



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

# Selección del material para la fundición de bolas empleadas en la molienda del clinker

**Tesis en opción al título de Ingeniero Mecánico**

**Autor:** Osmani Maujo Arce

**Tutores:** Prof. Tit. Ing. Isnel Rodríguez González, Dr. C.  
Prof. Inst. Ing. Eider Gresesqui Lobaina  
Prof. Asist. Ing. Beatriz Ramírez Serrano, Dr. C.

**Moa – 2016**  
**“Año 58 de la Revolución”**

# *DECLARACIÓN DE AUTORIDAD*

Yo: Osmani Maujo Arce, autor del presente trabajo de diploma y los tutores DrC: Isnel Rodríguez González, Dra. Beatriz Ramírez Serrano y el Ing. Eider Gresesqui 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.

---

Osmani Maujo Arce

---

Dra. Beatriz Ramírez Serrano

---

Dr. C. Isnel Rodríguez González

---

Ing. Eider Gresesqui Lobaina

# *PENSAMIENTO*

**“Como mismo la naturaleza le reveló sus secretos a los  
hombres  
del pasado; así mismo lo hará con los hombres del presente.  
Solamente tienen que hacerse las preguntas correctas”.**

**Albert Einstein**

# *Dedicatoria*

*En primer lugar dedico mi tesis a Dios mi Señor por nunca dejarme solo.*

*A la Revolución cubana por las oportunidades brindadas.*

*A mis tutores Isnel y Eider, por confiar en mí.*

*A mis padres Tania Arce Frómeta y Huberto Maujo Martínez por apoyarme y estar conmigo en cada paso.*

*A mi hermano Andrés Ruíz Ace.*

*A mi novia Anisleydis Peña 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 e instruido.*

*A la Revolución cubana por regalarme la oportunidad de convertirme en un profesional de las ciencias.*

*A mis tutores Isnel, Beatriz y Eider, por la confianza depositada, por su constante preocupación y por la ayuda prestada para la realización de mi tesis.*

*A todos los profesores del Departamento de Ingeniería Mecánica por servirme de ejemplo y contribuir en mis deseos de seguir el camino de la pedagogía y la investigación científica.*

*A mis padres, por darme el apoyo necesario para poder continuar y terminar mi carrera.*

*A mi padrastro Ideílís por ser el consuelo de mi mamá en los momentos de desespero.*

*A mi hermana, por ser una fuente de inspiración en todo lo que hago.*

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

*A mis tíos Iramis, Yurdenis Nelson y Yamira a mis primos porque todos ellos me ayudaron a no salirme del camino correcto.*

*A mi familia paterna en Pinar del Río por la preocupación y los ánimos de seguir adelante y buscar un mejor futuro.*

*A mis compañeros de estudio en especial a Leudís, Mario, Eneáis, Aliandrís por ser paciente y acompañarme como un hermano durante estos cinco años, por cada consejo y momento de ayuda.*

*A mis amigos, porque de una forma u otra me ayudaron a alcanzar este éxito.*

*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 desarrollan ensayos para determinar el material que garantice resistencia al desgaste de las bolas para la molienda del clinker, fabricadas en la Empresa Mecánica del Níquel de Moa (EMNi). Se seleccionaron tres materiales para los que se desarrolló el método gravimétrico para determinar dicha resistencia al desgaste, en el que se demuestra que existe un incremento de la resistencia a la abrasión, para el acero 70XL, con tratamiento térmico, respecto a los restantes analizados, de la misma manera experimentó dureza promedio de HRC 58,76. La microfotografía del acero 70XL, con tratamiento térmico, muestra la presencia de cementita solubilizada en todo el volumen de las probetas analizadas, a diferencia de la microestructura sin tratamiento térmico y las muestras de AISI 4140 (obtenidas por forja), 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 a determination of the material that guarantee the wear resistance of the balls for the clinker's milling, manufactured at the Mechanical Nickel Company (EMNi) was carry out. It was selected three base materials for determine the resistance to the wear by gravity method. It was demonstrated that exists an increment of the resistance to the abrasion for steel AISI 70XL, with heat treatment, in relation to the examined remainders, in the same way the average of hardness experienced was HRC 58,76. The microphotography of steel 70XL, with heat treatment, evidences the presence of cementite, solubilized in all volume of the examined test tubes, unlike the microstructure without heat treatment, the AISI 4140 (obtained by forging), which the grains are superiors and possess minor hardness. The 90 mm balls commercialized by the Mechanical Nickel Company have a cost of 6 477,22 CUP and 3 596,60 CUC, which represents a comparable number with value in the world market, although it is expected that the impact will be positive because the durability, of the same one, foresees that it will be bigger ..

ÍNDICE .....

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción .....	1
1.2. Procesos de trituración y molienda .....	1
1.2.1. Tipos de molienda .....	2
1.2.2. Factores que afectan la eficiencia de la molienda .....	4
1.2.3. Trituradoras de materiales .....	4
1.2.4. Etapas de la trituración .....	5
1.2.5. Leyes de la desintegración en el proceso de molienda .....	5
1.2.6. Molinos para los procesos de trituración.....	8
1.2.7. Elementos importantes en la molienda con bolas.....	9
1.3. Materiales para la elaboración de equipos de molienda .....	13
1.4. Procesos de obtención de bolas.....	14
1.5. Materiales para la elaboración de elementos de molienda .....	15
1.5.1. Principales características de las bolas .....	17
1.5.2. Composición química de bolas de acero forjado .....	18
1.5.3. Influencia del contenido de cromo sobre los elementos moledores.....	18
1.6. Mecanismos de desgaste .....	19
1.6.1. Desgaste por adherencia.....	20
1.6.3. Desgaste por fatiga.....	20
1.6.4. Desgaste por erosión.....	20
1.6.5. Desgaste por abrasión.....	21
1.7. Examen metalográfico .....	21
1.8. Conclusiones del Capítulo I .....	22

## CAPÍTULO 2. MÉTODOS, MATERIALES Y CONDICIONES DE OPERACIÓN

2.1. Introducción .....	23
2.2. Influencia de la bola en la disponibilidad del molino .....	23
2.3. Volumen de la carga de bolas de un molino .....	24
2.4. Métodos, procedimientos y condiciones experimentales .....	27
2.4.1. Obtención de las probetas metálicas .....	27
2.5. Preparación de las muestras .....	28
2.6. Análisis químico de las muestras.....	29
2.7. Preparación para la observación metalográfica.....	31
2.8. Dureza de los materiales estudiados.....	32
2.8.1. Ensayo de dureza.....	32
2.8.2. Ensayo de dureza volumétrica.....	33
2.9. Ensayos de desgaste gravimétrico .....	34
2.9.1. Parámetros estructurales.....	35
2.9.2. Parámetros operacionales.....	36
2.9.3. Parámetros de interacción .....	36
2.10. Conclusiones del capítulo 2 .....	37

## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. Introducción .....	38
3.2. Influencia de la bola en la disponibilidad del molino .....	38
3.3. Determinación de la carga de bolas del molino .....	39
3.4. Análisis de la composición química .....	40
3.5. Análisis microestructural de las muestras.....	41
3.6. Análisis de la dureza de las muestras.....	44

3.6.1. Resultados de los ensayos de dureza volumétrica.....	45
3.7. Comportamiento a desgaste del material de las bolas .....	46
3.8. Selección del material para la fabricación de las bolas.....	48
3.9. Valoración de las dimensiones ambiental y social.....	49
3.9.1. Medidas de prevención.....	50
3.10. Valoración de la dimensión económica.....	50
3.11. Conclusiones del capítulo 3 .....	52

### **Conclusiones generales**

### **Recomendaciones**

### **Referencias bibliográficas**

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el estado cubano presenta una situación económica acorde con los cambios experimentados en la sociedad. Esto se evidencia en los diversos reajustes manifestados en varias localidades del país, centros de trabajo y de estudio. Debemos entender que gran parte de esto es producto de la creciente competencia en el mercado mundial. Este hecho ha motivado que las empresas cubanas se interesen por incrementar la calidad en los productos y por realizar un amplio estudio en la preparación, ejecución y venta de las producciones. Todo esto con el objetivo de aprovechar al máximo cada proceso, elaborando mercancías que sean capaces de competir al más alto nivel en un mercado cada vez más globalizado (Rodríguez, 2008).

Desde hace ya mucho tiempo los procedimientos de trituración, desmenuzamiento y cribado son utilizados con amplitud por el hombre en sus actividades productivas. Es difícil indicar una rama de la industria o economía nacional en la que de una forma u otra, no se utilice este proceso. Andreiev et *al.*, 1980, ha calculado que actualmente una vigésima parte de la energía eléctrica producida en el mundo se consume en la trituración y desmenuzamiento de materiales sólidos.

Estos mismos autores plantean que la trituración y el desmenuzamiento son procesos de disminución de las dimensiones de los trozos (granos) de los materiales mediante la destrucción de los mismos por la acción de fuerza exteriores que superan las fuerzas interiores de cohesión, las que unen entre si las partículas del cuerpo sólido. En esencia los procesos de trituración y desmenuzamiento no se diferencian entre sí. Comúnmente se considera que en la trituración se emplean trituradoras y se obtiene un material preferentemente grueso, mientras que en el desmenuzamiento se emplean molinos y se logra un producto más fino (de 5 mm).

El tema de los medios moledores, y en particular de bolas en molinos rotatorios, ha sido estudiado desde tiempo atrás (Menacho, 1985), aunque es meritorio

resaltar que la mayoría de las investigaciones se han centrado en el estudio de la tecnología de fabricación de las bolas (Rivera, 2013).

La Empresa Mecánica del Níquel (EMNi) de Moa, cuenta con una UEB de fundición que es una de las más notables en el país por la gran variedad de piezas que se fabrican en la misma, no solo para la industria del Níquel, sino para terceros clientes, entre ellos, los de las industrias del cemento del oriente del país (Cemento Camagüey (Nuevitas) y Santiago de Cuba) que actualmente están recibiendo servicios de venta de bolas de molinos, fabricadas en cuatro diámetros (60, 70, 80 y 90 mm) de acero bajo aleado al cromo 70XL. Este producto es obtenido en hornos de inducción y utilizando como método de moldeo, el químico con resina furánica autofraguante.

Silot (2014) trató el tema de las bolas de los molinos desde el punto de vista tecnológico y de fabricación, sin embargo no han reparado en el hecho de la resistencia al desgaste que posee el material del cual están fabricadas.

### **Situación problemática**

En la Empresa Mecánica del Níquel de Moa (EMNi) “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche”, se implementa desde el año 2013 una nueva línea de producción de bolas de molinos. Las mismas son fabricadas de acero 70XL (AISI 8660) con cuatro diámetros (60, 70, 80 y 90 mm) y son empleadas en la molienda del clinker en las industrias del cemento de Santiago de Cuba, Nuevitas en Camagüey y Ciego de Ávila. En los últimos tiempos, debido a la pérdida de la capacidad de trabajo de dichas bolas, estas empresas se han visto obligadas a sustituirlas con una frecuencia de 400 a 500 horas de trabajo, deteniendo la línea de producción y afectándola en un 30%, lo que ha conducido a afectaciones de producciones muy sensibles para la fabricación de viviendas y el desarrollo industrial del país; además de que limita la entrada de recursos económicos a la entidad. Las bolas retiradas del proceso son enviadas a los patios de las empresas productoras afectando el medio ambiente de las mismas, al acumularse sin que sean recuperadas o recicladas.

De lo anterior se infiere como **problema de la investigación**:

Insuficiente conocimiento del material más adecuado para la fabricación de bolas para molinos, que garantice la resistencia al desgaste en los procesos de obtención de clínker de cemento.

Como **objeto de estudio** se plantea:

Material para bolas de los molinos en la molienda de la industria del cemento

Se define como **objetivo general**:

Seleccionar el material para la obtención de bolas que garantice la resistencia al desgaste en los molinos de bolas para los procesos de obtención de clínker de cemento, según la tecnología de fundición de la Empresa Mecánica del Níquel “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche”.

Y su **campo de acción** es:

Caracterización microestructural y procesos de desgaste de las bolas para molinos.

A partir del objetivo general declarado se establece la siguiente **hipótesis**:

Si se realiza la caracterización microestructural se desarrolla un ensayo gravimétrico de desgaste entonces se podrá proponer un material que garantice la resistencia al desgaste, de las bolas, para la molienda de clínker de cemento, según la tecnología de fundición de la Empresa Mecánica del Níquel “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche”.

Para la investigación se establecen los siguientes **objetivos específicos**:

1. Caracterizar microestructuralmente el material para fabricación de bolas empleadas en los procesos de molienda de clínker de cemento.
2. Establecer el mecanismo de desgaste de las bolas de los molinos usados en la molienda de materiales, con el empleo de un ensayo gravimétrico.
3. Determinar la carga de bolas de un molino de tres cámaras para la molienda de clínker de cemento.

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

1. Actualización del estado del arte en relación con la temática de la molienda de materiales, a partir del análisis de los trabajos precedentes consultados.
2. Caracterización microestructural de los materiales empleados en la fabricación de las bolas.
3. Determinación de los elementos químicos presentes en las aleaciones seleccionadas.
4. Obtención de la dureza de los materiales seleccionados.
5. Determinación de la resistencia al desgaste de las bolas para diferentes materiales.
6. Valoración de los resultados.

# **CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL DE LA INVESTIGACIÓN**

## **1.1. Introducción**

Cuando se realizan investigaciones científicas es de suma importancia tener en cuenta hasta qué punto se ha indagado en el tema que se trata. Esto permitirá evitarnos pérdidas innecesarias de tiempo, llegando a conclusiones a las que ya han arribado otros autores. De esta manera se aprovechan de manera eficiente los conocimientos y recursos heredados de otros investigadores.

Los equipos de procesamiento de minerales como son los molinos de bolas para la trituración del clinker en las industrias del cemento. están sujetos a severas condiciones de desgaste y de impacto En esta industria, al igual que en la minera, los consumos de cuerpos moledores ocasionan pérdidas económicas considerables que pueden alcanzar cientos de millones de dólares en el mundo. También cada día los nuevos diseños de molinos con altas energías de impacto exigen incrementar los parámetros de trabajo, principalmente la tenacidad (Albertin *et al.*, 2008).

En el presente capítulo se establece como **objetivo**:

Realizar una búsqueda de fuentes bibliográficas existente, que permita definir aspectos relacionados con el mecanismo de molienda en molinos de bola, así como del desgaste de estas.

## **1.2. Procesos de trituración y molienda**

Según Andreiev *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 1 pulgada (2,54 cm) y de molienda cuando se tratan partículas de tamaños inferiores a esta medida.

### 1.2.1. Tipos de molienda

La molienda es una operación unitaria, que reduce el volumen promedio de las partículas de una muestra sólida hasta un tamaño apropiado y controlado. Es la última etapa del proceso de fragmentación para la disminución del tamaño de las partículas. La reducción se lleva a cabo dividiendo o fraccionando la muestra por medios mecánicos hasta el tamaño deseado. La combinación de métodos más empleada en las máquinas de molienda son compresión, impacto, frotamiento, de cizalla y cortado. Los tamaños de salida de los productos de esta etapa, según Rivera (2013), se exponen a continuación en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Clasificación según el tamaño de salida del producto

Tipo de proceso	Tamaño de salida
Molienda gruesa	1 mm
Molienda fina	100 $\mu\text{m}$
Molienda ultrafina	10 $\mu\text{m}$

Se puede encontrar también la siguiente clasificación según el tamaño de salida del producto en la tabla 1.2. (Rivera 2013)

Tabla 1.2. Otra clasificación según el tamaño de salida del producto

Tipo de proceso	Tamaño de salida
Molienda gruesa	1-2 mm
Molienda media	200-500 $\mu\text{m}$
Molienda fina	50-100 $\mu\text{m}$

La molienda puede ser seca, que usa materiales prácticamente secos (2 % de agua) o con materiales que forman una pulpa (30-300 % de agua), el cual sería el caso de la molienda húmeda. Es habitual que la molienda sea seca en la fabricación del cemento Portland y que sea húmeda en la preparación de minerales para concentración.

En la tabla 1.3 aparecen algunas características de la molienda húmeda y seca. (Andreiev *et al.*, 1987)

Tabla 1.3. 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 de polvo y existe menos calentamiento de los equipos
Consume menos revestimiento	Consume más revestimiento (por corrosión)

La molienda de materiales también puede ser vista de otra forma. Por ejemplo, para procesar las materias primas típicas de la industria del cemento y lograr el tamaño deseado de los granos, puede ser de sistema abierto o cerrado (Andreiev *et al.*, 1987).

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 producto se muele a 400 mallas. El cemento se prepara agregando yeso y puzolana cuando se desea hacer cemento puzolánico. Una vez terminado el producto de esta molienda, se envía a silos desde los cuales se vende a diversos consumidores.

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.

En los últimos años se están popularizando molinos de rodillos, que consisten en una serie de rodillos verticales con una pequeña abertura graduada entre ellos a través de los cuales pasa el material a moler. Sin embargo, se han desarrollado nuevas tecnologías como el molino de rodillo horizontal, que representa un sistema innovador en la industria del cemento. Su inversión es bastante mayor que la de un molino de bolas pero requiere menos energía y menos mantenimiento.

### 1.2.2. Factores que afectan la eficiencia de la molienda

Para no afectar la eficiencia del molino de bolas, la densidad de la pulpa de alimentación debería ser lo más alta posible, pero garantizado un flujo fácil a través del molino. Es esencial que las bolas estén cubiertas con una capa de mena; una pulpa demasiado diluida aumenta el contacto metal-metal, aumentando el consumo de acero y disminuyendo la eficiencia. El rango de operación normal de los molinos de bolas es alrededor del 80% de sólidos en peso, dependiendo de la mena (Alcántara, 2008). La viscosidad de la pulpa aumenta con la fineza de las partículas, por lo tanto, los circuitos de molienda fina pueden necesitar densidad de pulpa menor. La eficiencia de la molienda depende del área superficial del medio moedor. 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 la partícula más grande y más dura de la alimentación. Una carga balanceada consistirá de un amplio rango de tamaños de bolas y las bolas nuevas agregadas al molino generalmente son del tamaño más grande requerido. Las bolas muy pequeñas dejan el molino junto con la mena molida y pueden separarse haciendo pasar la descarga por harneros (Chillcce y Rojas, 2012).

### 1.2.3. Trituradoras de materiales

Existe variedad de trituradoras de distintos tipos, las que permiten efectuar el trabajo de desintegración en la preparación de rocas y minerales. Conforme al tipo de trituradora y a los esfuerzos a los que someten a las rocas, se utilizan unas u otras con sus ventajas técnico-económicas propias de cada una. Seguidamente se consideraran solo aquellas que se estiman más importantes y de aplicación más generalizada (tabla 1.4).

Tabla 1.4. Tipos de trituradoras consideradas más importantes

Trituradoras	De mandíbulas	De cilindros
		Fijos
	De acción periódica	Móviles
		De martillos
	De acción continua	Rígidos (fijos)
		Locos o articulados

La clasificación anterior se hace basándose en el elemento de las máquinas que efectúa la desintegración, mandíbulas, cilindros o martillos.

#### 1.2.4. Etapas de la trituración

La trituración es también denominada desintegración y las maquinas que la producen se conocen según diversos autores como trituradoras, desintegradoras, quebrantadoras o machacadoras. Se realiza en distintas etapas identificándose como 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.

Según el tamaño que tienen las partículas a la salida de las máquinas de desintegración, se pueden distinguir las distintas etapas en la tabla 1.5. (Osorio *et al.*, 2001)

Tabla 1.5. Etapas de la trituración según el tamaño de partícula a la salida de la trituradora

Tipo de proceso	Tamaño de salida
Trituración gruesa	15 cm (6")
Trituración media	3-15 cm (1¼" a 6")
Trituración fina	0,5-3 cm (1/5" a 1¼")

La trituración gruesa, mediana y fina corresponden, prácticamente, a la primera, segunda y tercera etapa de desintegración.

#### 1.2.5. Leyes de la desintegración en el proceso de molienda

Las leyes de la desintegración se pueden clasificar como: "Leyes de distribución granulométrica" y "Leyes energéticas".

Las primeras plantean que resulta imposible obtener, por medio de la trituración, partículas que, en su totalidad, sean de volumen (tamaño) igual y uniforme. El material producido es de distintas dimensiones, repartiéndose de acuerdo a curvas bien definidas (figura 1.4) aportadas por Waganoff (2003), denominadas curvas granulométricas.

Por su parte, las leyes energéticas plantean que dentro del consumo de energía destinado a la trituración de materiales solo un 2% aproximadamente produce la aparición de nuevas superficies, el resto se pierde en deformación plástica de las partículas, deformación de las partes metálicas de la maquinaria, fricciones entre partículas, rozamiento de las partículas con las paredes de la maquinaria, calor, ruido y vibraciones.

La ley energética general que enuncia la relación existente entre el aporte necesario de energía y la reducción de tamaño obtenida, expresa que la energía necesaria para una determinada desintegración es proporcional exponencialmente al tamaño de la partícula:

$$\frac{dE}{dL} = -c \times L^p \quad .1.1$$

Donde:

$dE$  .- diferencial de energía, (J).

$dL$  .- diferencial de elongación.

$c$  .- constante de proporción.

$L$  .- longitud, (m).

$p$  .- constante en función del tipo de material

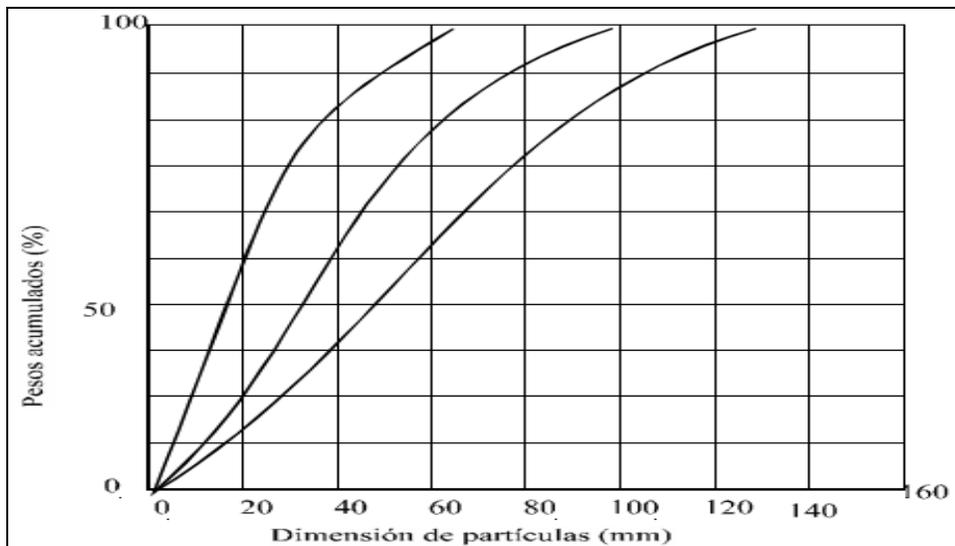


Figura 1.1. Curvas granulométricas. Fuente: Waganoff (2003).

Existen variantes de esta ley que se adaptan mejor a determinadas condiciones de trabajo: la Ley de Rittinger, enunciada en el año 1867 y que se basa en la hipótesis de las superficies de las partículas; la de Kick, expresada en el año 1885 y que se basa en una hipótesis volumétrica y la teoría de Bond, del año 1951 (Waganoff, 2003).

Rittinger (1867) y Kick (1885) plantean que “Los trabajos producidos en la desintegración son inversamente proporcionales a los tamaños de los granos producidos”, y que “El trabajo



Donde:

$W_i$ .- índice energético del material (kW·h) por tonelada necesarias para reducir un material desde un tamaño infinito hasta que el 80% pase por el tamiz de 100, ( $10^{-6}$ m).

$D_i$  y  $D_f$ .- tamaño inicial y final de las partículas, ( $\mu$ m).

$W$ .- trabajo de desintegración, (J).

### **1.2.6. Molinos para los procesos de trituración**

Se llaman así a las máquinas en donde se produce la operación de molienda. Existen diversos tipos según sus distintas aplicaciones, los más importantes son:

- De rulos y muelas,
- De discos,
- De barras,
- De bolas.

Las de rulos y muelas consisten en una pista similar a un recipiente de tipo balde, y un par de ruedas (muelas) que ruedan por la pista aplastando al material. En la antigüedad, para brindar la fuerza necesaria para hacer rodar las muelas por la pista se empleó la molienda manual o impulsada por animales. Más tarde este método fue reemplazado por el molino de viento, donde las aspas del mismo captaban y transforman la energía eólica en energía mecánica. Por medio de un sistema de engranajes adecuado se genera el movimiento necesario para moler el material.

El molino de discos consiste en dos discos, lisos o dentados, que están enfrentados y giran con direcciones opuestas (figura 1.2); el material a moler cae por gravedad entre ambos. Actualmente, este tipo de molino no se utiliza debido a que ha ido evolucionando hacia lo que hoy conocemos como molino de rodillos.

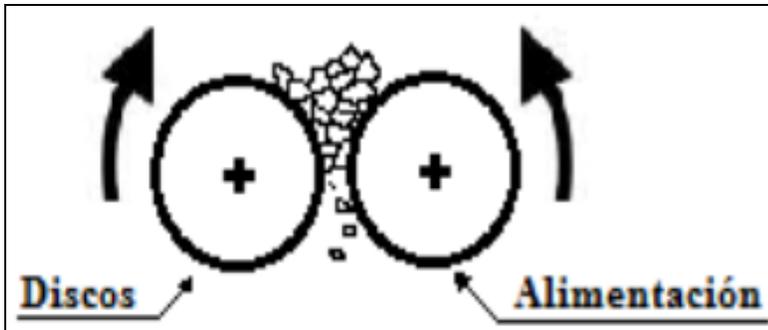


Figura 1.2. Molino de discos. Taggart (1999).

Los más utilizados en el ámbito industrial son los de bolas y barras, además de los de rodillos. Esquemáticamente, los dos primeros mencionados pueden concebirse como un cilindro horizontal que gira alrededor de su eje longitudinal (figura 1.2), conteniendo en su interior “elementos moledores” (elementos que se utilizan para efectuar la reducción del tamaño de los minerales), los cuales se mueven libremente; el material a moler ingresa por un extremo del cilindro, es molido por fricción y percusión de los elementos moledores y sale por el extremo opuesto con un tamaño menor. Los cuerpos de molienda son grandes y pesados con relación a las partículas de mena. Los más usados en la industria del procesamiento de minerales son las barras y bolas (Chillce y Rojas, 2012).

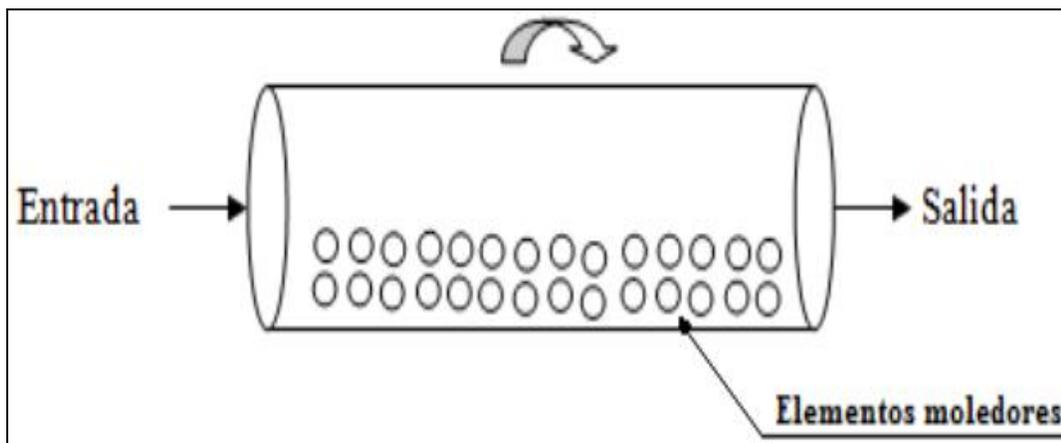


Figura 1.3. Esquema de un molino de bolas. Taggart (1999).

### 1.2.7. Elementos importantes en la molienda con bolas

Según Andreiev *et al.* (1987), existe una serie de elementos importantes que influyen en la molienda de los materiales. Estos son:

- Velocidad crítica del molino,



- A menor diámetro de bolas, mayor es la molienda de partículas pequeñas por una mayor superficie de los elementos moledores (fricción).
- A mayor diámetro de bolas, mejora la molienda de material duro (percusión).
- Para igual molienda, a mayor diámetro del molino o mayor velocidad, menor el diámetro necesario de bolas.

### Tamaño máximo de los elementos moledores

En los molinos de barras y bolas, como se mencionó anteriormente, los elementos moledores no tiene todos el mismo tamaño, sino que a partir de un diámetro máximo se hace una distribución de los mismos en tamaños inferiores.

Para determinar el diámetro máximo se aplica la expresión 1.4.

$$M = \sqrt{\frac{F(\mu) \times W_i}{K \times C_s(\%)}} \times \sqrt{\frac{S(\text{ton} / \text{m}^3)}{\sqrt{D(\text{ft})}}} \quad .1.4$$

Donde:

$M$  .- diámetro máximo de elementos moledores, (mm).

$F$  .- tamaño de alimentación del 80 % de la carga, (%).

$W_i$  .- índice de trabajo o constante adimensional en función de la naturaleza del material molido.

$K$  .- constante adimensional que vale: bolas→200, barras→300.

$C_s$  .- porcentaje de la velocidad crítica, (%).

$S$  .- peso específico del material a moler, (kgf/m<sup>3</sup>).

$D$  .- diámetro interno del molino, (m).

Luego, ingresando en tablas con el tamaño máximo de los elementos moledores, se obtiene la distribución porcentual y los respectivos diámetros de los componentes para efectuar la molienda.



### **1.3. Materiales para la elaboración de equipos de molienda**

Los molinos de bolas son tambores cilíndricos o cilindro-cónicos con paredes interiores revestidas por los blindajes o revestimientos. Los cuerpos moledores serán de forma esférica (bolas) o de formas cilíndricas, cónicas o irregulares. Estructuralmente cada tipo de molino consiste de 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 pueda girar en torno a su eje. El diámetro del molino determina la presión que puede ejercer el medio moledor en las partículas de mena y, en general, mientras mayor es el tamaño de la alimentación mayor necesita ser el diámetro. La longitud y el diámetro determinan el volumen y por consiguiente la capacidad del molino. Normalmente, el molino se alimenta continuamente de mena a través del muñón de un extremo, y el producto molido sale por el otro muñón.

#### **1.3.1. Partes principales de un molino**

Las partes principales de un molino (Drzymala, 2007) se dividen en:

El casco del molino: diseñado para soportar impactos y cargas pesadas, y está construido de placas de acero forjadas y soldadas. Tiene perforaciones para sacar los pernos que sostienen el revestimiento o forros. Para conectar las cabezas de los muñones tiene grandes bridas de acero generalmente soldadas a los extremos de las placas del casco, los cuales tienen perforaciones para apernarse a la cabeza.

Los extremos del molino, o cabeza de los muñones: pueden ser de hierro fundido gris o nodular para diámetros menores de 1m. Cabezas más grandes se construyen de acero fundido, el cual es relativamente liviano y pueden soldarse. Las cabezas son nervadas para reforzarlas.

El revestimiento; las caras de trabajo internas del molino consisten en revestimientos renovables que deben soportar impacto, ser resistente a la abrasión y promover el movimiento más favorables de la carga. Generalmente están hechos de acero al manganeso o 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 revestimientos del molino son de un costo importante en la operación de molienda y constantemente se está tratando de prolongar su vida. En algunas operaciones serán reemplazados los revestimientos y elevadores por goma. Se ha encontrado que esos son más duraderos, más fáciles y rápidos de instalar y su uso reduce el nivel de ruido. Sin embargo se ha informado que producen un aumento en el desgaste de medios de molienda comparados con los fabricados de hierro fundido blanco aliado con níquel. Los revestimientos de goma también pueden tener dificultades en procesos que requieren temperaturas mayores que 80°C (Alcántara, 2008).

#### **1.4. Procesos de obtención de bolas**

Los mayores consumos de bolas para molinos se encuentran en las industrias del cemento, por lo que son varios los autores (Walter, 1977; Alcántara, 2008; Andreiev *et al.* 1987) que han desarrollado investigaciones sobre su comportamiento. Los regímenes de trabajo de las bolas en los molinos, así como algunas de las aleaciones recomendadas para la fabricación de bolas, a pesar de ser un valioso material en esta materia, no expresa los métodos de obtención para los cuerpos moledores.

Andreiev *et al.* (1987), explican las teorías involucradas en todo el proceso de molienda, así como los regímenes y características principales de las bolas y recomiendan la utilización de bolas de acero obtenidas por laminación o forja. A pesar de ser una valiosa literatura para el conocimiento teórico de todo el proceso de molienda, no explica ni hace referencia a las bolas obtenidas por fundición para los procesos de molienda.

Decasper (1981), estudia los procesos y teorías involucradas en todo el proceso de molienda, así como el principio de operación de los molinos, los criterios de selección de los cuerpos moledores y calidad de estos, sin embargo, no explica ni hace referencia a las bolas obtenidas por fundición para los procesos de molienda.

En la actualidad existe en el mercado internacional una desproporción de la oferta y demanda de los productos, inclinándose la balanza por las ofertas, es decir, son más los productos ofertados que los consumidores, encontrándose el renglón de las bolas entre ellos,

a pesar de esto hay empresas que dominan en el mercado, entre ellas se encuentran algunas compañías de prestigio.

Dentro de estas podemos encontrar la empresa de fundición belga que comenzó en 1918, MAGOTTEAUX. Esta es ahora líder mundial en soluciones diferenciadas contra el desgaste. Es uno de los proveedores globales de la gama completa de soluciones de medios de molienda: con bajo y alto contenido de cromo. Ha suministrado bolas a las cementeras de nuestro país, fabrica las bolas atendiendo a las necesidades de los clientes, por los dos métodos de obtención más difundidos, laminado y fundido; pero las bolas fundidas de acero que ofertan a pesar de tener una excelente calidad, presentan un elevado costo. También podemos encontrar a FORDOCA, empresa venezolana que oferta cuerpos moledores de excelentes características y se elaboran con barras de acero de adecuada composición química por un proceso de laminación y de forja. A pesar de la excelencia de los productos ofertados, no fabrica bolas de acero por el método de fundición, por la complejidad de los mismos. DELTA INDUSTRIAL. S.A es otra empresa que incluye de todo tipo de piezas de fundición utilizadas en la industria de la minería, dentro ellos bolas de fundición aleadas para la molienda en seco y en húmedo. Logran la fundición de bolas mediante métodos sofisticados con moldes de alto rendimiento térmico, hornos eléctricos de inducción y tratamiento térmico especial que permite conseguir una estructura de grano fino y dureza uniforme en la totalidad del volumen de la bola.

Dentro de las entidades nacionales que están satisfaciendo las demandas de piezas y partes a las cementeras del país, se encuentra la Empresa Vanguardia Socialista localizada en la Habana, la cual, oferta bolas forjadas para los molinos del cemento con buenas características de dureza (HRC 42-47), esta empresa es la única de su tipo en la nación que hasta el presente oferta este producto a las industrias en el diámetro 90 mm.

### **1.5. Materiales para la elaboración de elementos de molienda**

Según Magotteaux (2006), los nombres comerciales de las aleaciones actuales más clásicas son Maxicrom y Duogam 1 para la primera cámara y Hardalloy y Duogam 2 para la segunda cámara. Además 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 son aleaciones diferentes por su composición química, el porcentaje de sus diferentes fases y su dureza (ver Tabla 1.6). Estos materiales deben ser considerados en un diagrama Fe-Cr-C. Su estructura se puede dividir en dos partes: una matriz (M) y un cierto contenido en carburos.

La matriz es esencialmente una solución sólida martensítica que contiene en solución una parte del carbono y del cromo de la aleación. El exceso de C y Cr está combinado en un carburo de Cr especial que puede ser descrito como sigue:

- Fórmula química general:  $[Fe, Cr]_7 C_3$  (abreviado: K2).
- Estructura cristalográfica: hexagonal.
- Dureza: + 1600 HV.

Finalmente, la matriz contiene también una parte más bien débil de austenita residual. Esta austenita es el constituyente de la matriz a alta temperatura. Esta parte ha escapado de la transformación martensítica completa después de su tratamiento térmico seguido de un temple de la matriz. No es posible detectarla con el microscopio óptico.

Tabla 1.6. Composición química, porcentaje y dureza de algunos materiales para bolas de molinos

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

Los programas de investigación han contemplado entre otros, poner a punto una alternativa al Duogam, posible de mejor resultado con un contenido de Cr más bajo. Los primeros ensayos industriales fueron esperanzadores y ahora se puede ya confirmar la aparición en el mercado de bolas de grueso diámetro, los materiales que se denominan Ecogam, con sus dos variantes Ecogam 18 y Ecogam 21 (ver características en la Tabla 1.6). Lo cierto es que

hasta el momento, para lograr los menores costes de molienda, quienes utilizan cuerpos moledores de tamaño grande, han contado con el Maxicrom como la solución económica más fiable del mercado. Magotteaux presenta ahora este nuevo producto llamado Ecogam. Las características de este nuevo producto son:

- Una alta dureza superficial.
- Una dureza de trabajo excepcional.
- Una fiabilidad absoluta contra las roturas.

### **1.5.1. Principales características de las bolas**

La carga de bolas en un molino consta de bolas de varios tamaños y diferentes calidades de material que se distribuyen en cámaras diferentes dentro de los mismos (Decasper, 1981).

Los tamaños máximo y mínimo de las bolas y la composición de estos tamaños dependen de varios factores, entre ellos:

- Tamaño máximo del material de alimentación a ser molido.
  - Finura del producto.
  - Diámetro del molino, longitud del molino.
  - Molturabilidad y estructura mineralógica del material de alimentación.
  - Sistema del molino (circuito abierto/cerrado, número de compartimientos, carga circulante).
- Dependiendo del proceso de molienda y de la etapa de molienda que se trate, las bolas deben resistir:
- Las fuerzas de impacto entre ellas (especialmente en la molienda de gruesos con bolas grandes).
  - Desgaste causado por las fuerzas de fricción entre las bolas y las placas de blindaje.
  - Desgaste causado por materiales abrasivos.
  - Corrosión (molienda por vía húmeda).

### 1.5.2. Composición química de bolas de acero forjado

En muchos países se producen bolas forjadas y generalmente pueden ser compradas localmente a precios favorables. Estos elementos moledores se usan para molienda por vía húmeda así como para molienda por vía seca de materiales poco abrasivos.

La composición química estándar de las bolas forjadas, según Silot (2014), se muestran en la tabla 1.7.

Tabla 1.7. Composición química de las bolas forjadas

Elemento	Composición Química					
	C		Mn		Cr	
	de	a	de	a	de	a
%	0,5	1,0	0,8	1,2	0,8	1,2

Dureza de superficie: HRC 35-47 (Decreciente en dirección al centro de la bola).

### 1.5.3. Influencia del contenido de cromo sobre los elementos moledores

Los elementos moledores al bajo cromo, son producidos por una gran cantidad de proveedores por método de fundición y se usan principalmente para molienda por vía húmeda. Debido a las considerables variaciones de calidad de estos elementos, por lo general son aplicados a molinos de diámetro menor a 3,5 m. En molinos de mayor tamaño pueden ocurrir roturas en las bolas por defectos de fundición pobre o quebraduras (Silot, 2014). Esta misma autora plantea la composición química estándar de estos elementos y aparece en la tabla 1.8.

Tabla 1.8. Composición química de bolas de hierro bajo cromo

Elemento	Composición Química							
	C		Mn		Cr		Si	
	de	a	de	a	de	a	de	A
%	2,8	3,3	0,1	0,4	0,1	0,4	0,4	0,8

Dureza de superficie: HRC 45-50

Las bolas, con alto contenido de cromo, son los elementos molidores más resistentes al desgaste. Se obtienen por método de fundición y son muy utilizadas en molienda por vía seca.

La tecnología de fabricación de bolas por el método de fundición con aleaciones de aceros, es extremadamente complicada por el hecho de que la geometría de la pieza (forma esférica), genera durante su solidificación un tipo de nucleación independiente con un amplio intervalo de solidificación dado por la aleación, donde se propicia la porosidad dispersa, difícil de erradicar, en parte influenciado además por la solidificación primeramente de todo su contorno, creando una coraza metálica y concentrando en su interior los gases que propician defectos. Por tal complejidad son pocas las empresas que fabrican bolas de acero por fundición y utilizan más ampliamente el método de laminación o forja y reservan la fundición para bolas de hierro con variadas composición de cromo, aprovechando las mejores propiedades de fundición que presentan los hierros.

#### **1.6. Mecanismos de desgaste**

El proceso de desgaste, puede definirse como una pérdida de material de la interface de dos cuerpos, cuando se les ajusta a un movimiento relativo bajo la acción de una fuerza. En general, los sistemas de ingeniería implican el movimiento relativo entre componentes fabricados a partir de metales y no metales, y según Sampén (2009), se han identificado seis tipos principales de desgaste, como sigue:

- Desgaste por adherencia,
- Desgaste por ludimiento,
- Desgaste por fatiga,
- Desgaste por erosión,
- Desgaste por cavitación,
- Desgaste por abrasión.

Según estudios realizados por Sarkar (1980) y ASM (1992), en la práctica son cinco los mecanismos de desgaste que aparecen en pares sólido-sólido, ellos son; desgaste abrasivo, adhesivo, por fatiga superficial, corrosivo mecánico y desgaste por frotamiento.

### **1.6.1. Desgaste por adherencia**

En este caso, el movimiento relativo puede ser por deslizamiento unidireccional o de vaivén, o bien la interacción ocurre bajo carga en un contacto oscilatorio de pequeña amplitud. Se sabe que los picos superficiales que coinciden fluyen plásticamente y forman fuertes uniones endurecidas por el trabajado. A medida que estas se rompen bajo la tracción tangencial impuesta, los sólidos van perdiendo material (Petty, 1968).

### **1.6.2. Desgaste por ludimiento**

El desgaste por ludimiento aparece como resultado del movimiento oscilatorio de dos superficies en contacto, como sucede en máquinas donde existe vibración entre las partes (Walton, 1981).

### **1.6.3. Desgaste por fatiga**

Es probable que el modo predominante de la mayoría de los tipos de desgaste sea por desprendimiento de material de la superficie por fatiga, ya sea que la naturaleza del movimiento sea unidireccional o de vaivén. Clasificar un tipo particular de falla como desgaste por fatiga puede ser confuso. Sin embargo, a fin de hacer una clasificación, el término desgaste por fatiga se reserva para identificar la falla de contactos lubricados en casos como los rodamientos de bolas o rodillo, engranes, levas y mecanismos impulsores de fricción. La pérdida de material es por desprendimiento de capas superficiales y por picaduras, como en los engranes (Plati, 2003).

### **1.6.4. Desgaste por erosión**

El desgaste por erosión se define como el proceso de eliminación de metal provocado por la incidencia de partículas sólidas sobre una superficie. El desgaste por erosión es deliberado como en el caso de la limpieza de piezas de colada o cascos de barco por medio de chorros de arena, pero en ocasiones se produce una pérdida destructiva y costosa de material como en el caso de las hélices de turbinas de gas o los refractarios en hornos de arco eléctrico. El grado de desgaste tiene relación con el ángulo de incidencia de la partícula respecto de la superficie. Los materiales dúctiles parecen deformarse y posiblemente se endurezcan cuando se les golpea en forma perpendicular, pero a un ángulo crítico de aproximadamente  $20^\circ$ , el metal se elimina por una acción de corte. Los materiales frágiles fallan por

agrietamiento de las superficies cuando la fuerza de impacto es normal. Se deduce que un componente dúctil finalmente se endurecerá por trabajado y fallará como si fuera frágil (Sierpinski & Janusz, 1999).

#### **1.6.5. Desgaste por abrasión**

La ASTM (1998), considera que el desgaste abrasivo es debido a partículas o protuberancias duras que son forzadas y movidas a lo largo de una superficie de un sólido más blando, teniendo como resultado una pérdida de material o rayado de la misma. Sin embargo, esta apreciación resulta un tanto general; por ello, se emplea una de carácter más específica, en donde la abrasión es generada por las partículas duras que se introducen entre dos superficies más blandas, que se deslizan e interactúan mutuamente. Las partículas abrasivas pueden ser las propias asperezas de la superficie o bien el producto del desgaste de las mismas; que tienden a cortar y arrancar material de la superficie, generando virutas y causando deformación plástica severa superficial y subsuperficial (Vazquez, 1997).

En el caso que las partículas sólidas impacten las superficies, se le conoce como erosión; lo cual puede ser considerado como un mecanismo del desgaste abrasivo. Cuando dos superficies están en contacto y movimiento relativo, se presenta el fenómeno de desgaste en ambas, donde una de ellas, es más dañada que otra, esto no solo debido a las propiedades del material y a las condiciones superficiales; sino que también depende de la velocidad de contacto, medio ambiente, tipo de carga, así como la presencia y naturaleza del abrasivo (ASTM 1996).

#### **1.7. Examen metalográfico**

El examen estructural de los materiales y aleaciones, por vía microscópica, es uno de los recursos principales que se poseen en la metalurgia, ya sea en investigaciones científicas o en el control de la calidad de los materiales, teniendo en cuenta la conocida relación estructura-propiedades. Pese a las nuevas técnicas e instrumental aparecidos durante los últimos tiempos, tales como el microscopio electrónico y el de emisión, el microscopio óptico no ha sido desplazado en modo alguno y conjuntamente con los medios indicados y los Rayos X, ofrece un panorama bastante completo del estado estructural de los componentes químicos del material o aleación en estudio. Estos componentes reciben el nombre de

constituyentes metalográficos y de sus proporciones, formas y estados dependen las propiedades físicas de una aleación.

En la técnica metalográfica es de vital importancia tener en cuenta la zona micrográfica a estudiar, esta es representativa del fenómeno en estudio, teniendo en cuenta la forma, función y origen del material. Debe lograrse una superficie perfectamente plana y un pulido especular, porque de esto dependerá la veracidad y exactitud de las conclusiones.

La elección de los reactivos de ataque y de los aumentos a los que serán observados los distintos microconstituyentes, está dentro de las variables que sobresalen en un análisis metalográfico.

Se puede concluir entonces, que el objetivo de la preparación de una muestra metalografía es la revelación de la "estructura verdadera", llamando en teoría "estructura verdadera" la composición de fases del material a la temperatura ambiente, que se determina en una parte preparada del material que no posee deformaciones, rayas, elementos extraños, aplastamientos, relieves, bordes redondeados ni daños térmicos. Esto se logra con la realización de un método sistemático de preparación que se dividen en varias etapas, selección y extracción, montaje (en caso de ser necesario), esmerilado grueso y fino y pulido final.

### **1.8. Conclusiones del Capítulo I**

El análisis de las fuentes bibliográficas consultadas permite plantear que:

1. Dependiendo del contenido de humedad, la molienda puede ser seca o húmeda, y dependiendo del régimen de trabajo del molino puede ser de sistema abierto o cerrado.
2. Resulta imposible obtener, por medio de la trituración, partículas que, en su totalidad, sean de volumen (tamaño) igual y uniforme.
3. Dentro de los principales mecanismos de desgaste que aparecen en pares sólido-sólido, podemos encontrar el desgaste abrasivo, adhesivo, por fatiga superficial, corrosivo mecánico y desgaste por frotamiento.









## **2.4. Métodos, procedimientos y condiciones experimentales**

Realizar un experimento significa planearlo, de modo que reúna la información pertinente al problema bajo investigación. Llevarlo a cabo implica tener en cuenta una secuencia completa de pasos tomados de antemano, para asegurar que los datos apropiados se obtendrán de modo que permitan un análisis objetivo, que conduzca a deducciones válidas con respecto al problema establecido (Rojas, 2011).

### **2.4.1. Obtención de las probetas metálicas**

A partir de una bola forjada de acero AISI 4140 se preparó una probeta mediante maquinado, por el método de arranque de virutas en la UEB de Maquinado de la Empresa Mecánica del Níquel.

Con el material de las bolas fundidas de acero 70XL (AISI 8660), se prepararon dos probetas metálicas para el desarrollo del diseño experimental. Estas se obtienen mediante el vertido del metal líquido en un molde previamente confeccionado, a partir de una plantilla. Para el desarrollo de este trabajo se utilizan plantillas sueltas sin sistema de alimentación, que son las recomendadas para fabricar una sola pieza o una serie de pequeñas cantidades.

La fusión de la aleación se realiza en un horno de inducción con crisol de alta frecuencia, con capacidad de una tonelada. La temperatura de vertido de esta aleación en el molde es de 1500-1480°C.

El moldeo se realiza según la instrucción 08-1-027 (2008), de forma manual con la utilización de mezclas autofraguantes, las cuales responden a las exigencias del proceso tecnológico tales como permeabilidad, resistencia, penetrabilidad al gas, poder gasógeno e higroscopicidad; todo esto con el objetivo de obtener las probetas con la mejor calidad posible.

El desmoldeo, se realiza en la desmoldeadora marca Webac, que consiste en un sacudidor con una estación de desmoldeo por vibración con rejilla de dimensiones 2x2 m y una carga máxima de 5 t.

Para realizar la limpieza de las probetas se utiliza la máquina granalladora V+S-Funker, tipo FBS 2,2 x 2,7x 3,30 m de fabricación alemana por la firma V+S Vogel & Schemmann Maschin GmbH Schwerter Str.200 en el año 2000.

A una de las probetas de AISI 8660 se le realizaron tratamientos térmicos de Normalizado, Temple y Revenido para caracterizar luego el material con condiciones microestructurales similares a las de las bolas que muelen el clinker en la producción de cemento. La otra de las probetas fundidas se dejó sin las operaciones tecnológicas con el fin de mantener sus condiciones microestructurales sin alterar.

El horno seleccionado para dar los tratamientos térmicos a la probeta de Ac 70XL aporta la cantidad de calor necesaria para calentar la carga hasta las temperaturas requeridas según las operaciones tecnológicas a realizar. Para la realización de dichos procesos se introdujeron las probetas en el horno calentándolas hasta temperaturas entre 820-840, 840-860 y 150-180°C para el normalizado, el temple y el revenido respectivamente, durante un tiempo de dos horas para los dos primeros procesos y tres horas para el último. A una de las probetas no se le realizaron tratamientos térmicos para mantenerla con la misma forma microestructural y poder comparar los cambios ocurridos.

## **2.5. Preparación de las muestras**

Las muestras se toman a partir de las probetas obtenidas con las diferentes composiciones químicas correspondientes a cada material (AISI 8660 y AISI 4140). Para esto se cortan y maquinan las muestras para la realización de los análisis propuestos, usando abundante refrigeración para evitar que el calentamiento originado modifique la microestructura, estas se cortan en un torno tipo 16 P 25 П–2 de fabricación rusa. Las muestras tienen una dimensión de 10 mm de diámetro y un espesor de 8mm.

Las operaciones de preparación y pulido se realizan en el Laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMMM, se utilizaron papeles abrasivos variando su granulometría al ser aplicadas a la pieza de trabajo, desde la más gruesa a la más fina. Se emplearon lijas del tipo No 350, 500, 600 y 800 (ASTM E 3 – 95).

El pulido se llevó a cabo con la lija montada sobre una placa de vidrio cambiando el sentido del lijado a 90° al pasar de un pliegue a otro, para eliminar la capa de material distorsionado y deslizado dejado por el anterior, esto permite obtener una superficie lisa y pulida, libre de impurezas o ralladuras. Por último las muestras se pulieron en una pulidora metalográfica modelo Rathenow-43, usando paños de fieltro y una solución de pasta abrasiva de óxido de cromo con granulometría de 3 µm.

## 2.6. Composición química de las muestras

Los resultados del análisis químico se obtienen en un espectrómetro cuántico de masa Belec Compact Port (Mobile Spectrometer for Metal Analysis) para base hierro, marca SPECTROLAB 230 (figura 1 de los anexos) con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón. El análisis consiste en una chispa que ataca la muestra, lee el espectro y en función de la longitud de onda se determinan los componentes del material. El chispeo se realiza en tres puntos de cada probeta con una atmósfera de argón para eliminar el oxígeno. De la serie de mediciones se determina un promedio, obteniendo así el porcentaje de cada elemento que conforma la aleación.

En el país existe una norma que especifica las características principales requeridas para la utilización de las bolas para la industria del cemento (NC-13-05-83). Las características principales recomendadas para los productos moledores, según esta norma, se muestran en las tablas 2.2 y 2.3.

Tabla 2.2. Composición química recomendada para las bolas de acero 70XL (NC-13-05-83)

Elementos	Composición Química									
	C		Mn		Si		Cr		S	P
	de	a	de	A	de	a	de	a	de	A
%	0,45	0,70	0,60	1,20	0,15	0,37	0,10	0,30	0,045	0,050

Tabla 2.3. Características físicas recomendada para las bolas de acero 70XL según NC-13-05-83

Diámetro Nominal; mm	Desviación límite del diámetro nominal; mm	Masa Teórica; kg	Ovalidad máxima permisible	
			mm	%
25	+5	0,064	2,25	9,0
30		0,111	2,40	8,0
40		0,263	3,20	8,0
50		0,514	3,50	7,0
60		0,888	3,60	6,0
70		1,410	4,20	6,0
80		2,104	4,20	5,0
90		2,996	4,50	5,0

Dureza recomendada: HRC 40-55.

En comparación con los modernos métodos de fabricación para bolas; MAGOTTEAUX, FORDOCA, DELTA INDUSTRIA S.A. han incrementado la dureza en los aceros destinados a las bolas, logrando durezas de HRC 50-63.

Atendiendo a estas nuevas propiedades alcanzadas por estas empresas y usando como datos de partida las recomendaciones de la norma cubana (Silot, 2014), se proponen rangos de composición química para la aleación, que recibe el nombre de Ac 70XL y que se muestra en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Composición química recomendada por Silot (2014)

Composición Química del Ac 70XL (%)										
C		Si		Mn		Cr		Ni		P y S
Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	≤
0,65	0,75	0,25	0,45	0,55	0,85	0,8	1,0	0,4	0,8	0,045

Este acero está clasificado dentro de los aceros de baja aleación, siendo el elemento aleante el cromo. La norma Gost denomina los aceros de la siguiente manera: el primer número representa en por ciento, el contenido de carbono medio en la aleación, la X representa el elemento aleante para el cromo, y la letra L la terminología para designar que es un acero obtenido por fundición. Según la norma, la misma puede alcanzar dureza HRC de 50-65, con la recomendación del tratamiento térmico mostrado en el anexo 2.

### Elementos que mayor influencia ejercen sobre la resistencia al desgaste de las aleaciones estudiadas

Cada elemento de la aleación confiere al acero una propiedad específica definida, entre ellas se encuentran:

**Carbono:** ejerce una gran influencia sobre las propiedades físicas y mecánicas del acero. Eleva su resistencia, dureza y templabilidad. El aumento del carbono en la fundición eleva de forma creciente la resistencia al desgaste

**Cromo:** aumenta la resistencia a la corrosión y al disolverse en la austenita, aumenta también la templabilidad. En los aceros con un alto contenido en carbono, aumenta la resistencia a la abrasión y al desgaste.

**Níquel:** la presencia del níquel aumenta en forma considerable la resistencia a la tracción y el límite elástico del acero, además de elevar su tenacidad y su dureza.

## 2.7. Preparación para la observación metalográfica

Las probetas pulidas se lavaron 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 en el Laboratorio de Ciencia de Los Materiales del ISMMM y el reactivo a utilizar es 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.

La microestructura se observa con la ayuda de un microscopio óptico empleando aumento de 200X. Para la observación de las probetas se empleó 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). 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).



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

El examen microscópico proporciona información sobre la constitución del material en estudio, pudiéndose determinar características tales como forma, tamaño y distribución de los granos, inclusiones y microestructura metalográfica. La microestructura puede reflejar la historia completa del tratamiento mecánico que ha sufrido el metal. La preparación defectuosa de las probetas puede arrancar las inclusiones importantes, destruir los bordes de grano, revenir un acero templado o en general, originar una estructura superficial distorsionada que no guarda ninguna relación con la superficie representativa y características del metal (Paumier, 2013).

## **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 obtenemos en piezas ya elaboradas características mecánicas importantes en forma rápida.

La elección de cada uno de los niveles está determinada por el mayor o menor grado de tolerancia que se quiere medir en el material, o lo que es lo mismo, por la mayor o menor homogeneidad en la estructura (Martínez, 1982).

### **2.8.1. 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 (ver anexo 4), utilizando como penetrador un cono de diamante con un ángulo de  $136^\circ$ , expresando la dureza en HRC y la carga aplicada es de 1471 N en un tiempo de 15 segundos. La superficie de la probeta se prepara de la misma manera que para el análisis microestructural (desbaste y pulido).

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.

$$\overline{HRC} = \frac{\sum_{i=1}^n HRC_i}{n} \quad (2.6)$$

Dónde:

$\overline{HRC}$  .- dureza promedio, (kgf/mm<sup>2</sup>).

n.- numero de mediciones realizadas.

Luego se realizó la conversión de los resultados promedios obtenidos en HRC en otra escala de conversión a HV.

Los ensayos de dureza se realizaron en la cara superficial superior de las probetas como se muestra en la figura 2.3 como sigue:

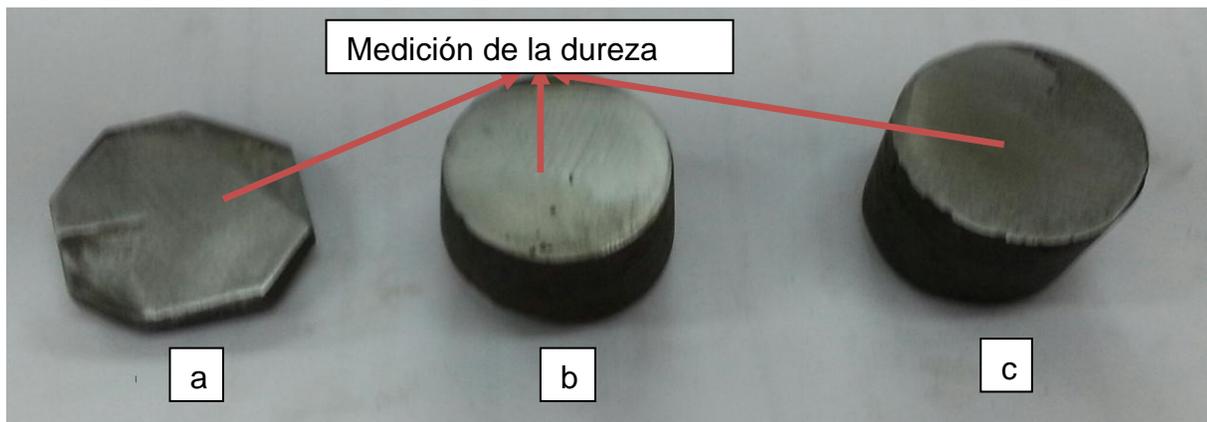


Figura 2.3. Probetas para el ensayo.

En la figura 2.3 se observa dónde se les realizó la medición de dureza a las diferentes probetas, AISI 4140 de la bola forjada (figura 2.3 a), acero 70XL con tratamiento térmico (figura 2.3 b) y acero 70XL sin tratamiento térmico (figura 2.3 c).

### 2.8.2. Ensayo de dureza volumétrica

Dentro de las propiedades fundamentales que deben poseer las bolas fundidas según la (NC-13-05-83), para ser utilizadas para la molienda del clinker se encuentra la dureza en la totalidad de ella. La dureza en las bolas debe disminuir desde la superficie hasta el centro, según criterios de fabricación (FORDOCA Y DELTA INDUSTRIAL S.A). Se considera que el centro es una bola con un diámetro que es el 20 % del diámetro nominal de ella.

La medición de la dureza volumétrica, es el criterio más utilizado a nivel internacional para caracterizar la dureza de las bolas en todo su contorno. La dureza se analiza comenzando desde la superficie hasta llegar al centro, compartiendo el área de la bola en diez puntos de muestreo (figura 2.4), luego se promedian los valores obtenidos y se obtiene la dureza volumétrica.

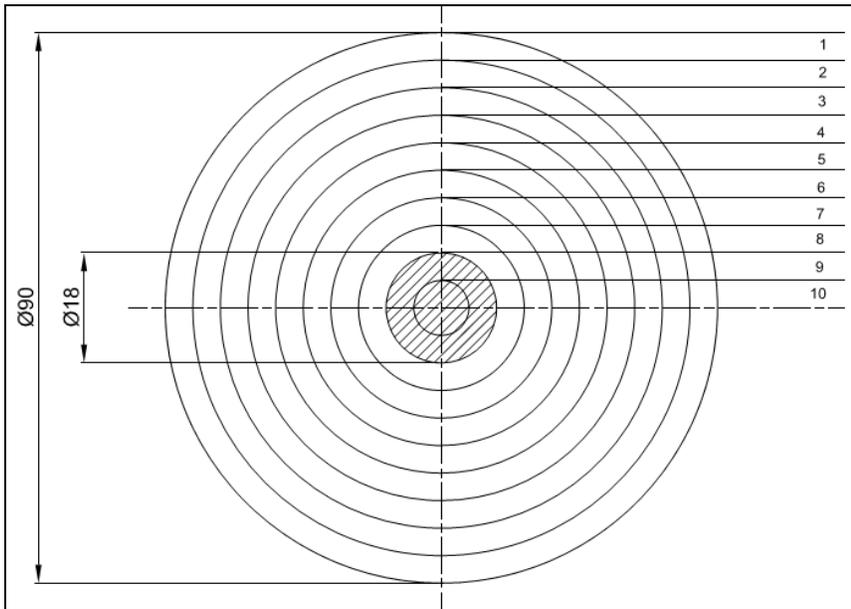


Figura 2.4. Puntos de muestreo para realizar el ensayo de dureza volumétrica.

## 2.9. Ensayos de desgaste gravimétrico

El ensayo típico para el desgaste gravimétrico es el llamado “roll paper”, donde un cilindro con papel de lija en la superficie con el que conociendo las condiciones y parámetros del ensayo tales como velocidad en rev/min, tipo de abrasivo y peso de la carga, se podrá conocer el comportamiento posterior del material controlando la pérdida de masa (Paumier, 2013). Este ensayo realizado según la norma ASTM G65-81 también tiene una variante en la que se utiliza un cilindro o rodillo de goma y se va depositando un mineral abrasivo, habitualmente sílice, y controlando igualmente la pérdida de masa en la probeta.

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 5). 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



El segundo grupo establece las propiedades de los elementos interfaciales (fluidos o lubricantes) y el medioambiente tales como:

- Parámetros químicos: composición química, adhesión, acidez y humedad.
- Parámetros físicos: densidad, conductividad térmica.
- Parámetros mecánicos: viscosidad, características viscosidad-temperatura y viscosidad-presión.

### **2.9.2. Parámetros operacionales**

Los parámetros operacionales caracterizan las condiciones funcionales del tribosistema y se consideran como variables independientes. Los parámetros principales de esta categoría son:

- Tipo de movimiento: deslizante, rodante, giro o impacto, en forma continua, intermitente, reversible u oscilante.
- Carga.
- Velocidad.

### **2.9.3. Parámetros de interacción**

Se definen como parámetros de interacción al modo de contacto entre las dos superficies.

Según Paumier, 2013, el desgaste se mide en la forma del volumen perdido contra cualquier parámetro. Generalmente, se mide en forma indirecta por medio de pérdida de masa, medición lineal o de área del desgaste. En este trabajo, el desgaste se midió como la pérdida de masa contra el tiempo.

Antes de comenzar el ensayo de desgaste gravimétrico se realizan las siguientes operaciones:

- Primeramente, las probetas se limpiaron con alcohol y se dejaron secar para evitar errores en la medición de sus respectivos pesos.
- La balanza y máquina tribológica se limpiaron de todo residuo y contaminante de pruebas anteriores.

- Se determinó el peso inicial de cada probeta utilizando una balanza analítica RADWAG modelo PS 3500 R1 perteneciente a la Empresa Mecánica del níquel de Moa. (ver anexo 6)

## **2.10. Conclusiones del capítulo 2**

1. Se realizaron tres probetas metálicas, una a partir de una bola forjada de acero AISI 4140 por el método de arranque de virutas y otras dos de Ac 70XL (AISI 8660) con y sin tratamiento térmico, mediante el vertido del metal líquido en un molde previamente confeccionado de arena.
2. El ensayo de dureza se desarrollará con el empleo de un durómetro digital con un penetrador un cono de diamante que posee un ángulo de  $136^{\circ}$  y aplicando una carga de 1471 N.
3. La resistencia al desgaste se evaluará por el método gravimétrico, con el empleo de papeles abrasivos con granos de óxido de silicio de grado 180.

## **CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

### **3.1. Introducción**

La molienda del clinker en las cementeras tiene gran peso en la vida social de las ciudades, porque de este proceso sale el material para construir los cientos de miles de edificaciones que vemos a nuestro paso. Para lograr un producto (cemento) de calidad se requiere que el molino tenga cuerpos moledores con propiedades, de dureza y resistencia, comprobadas y óptimas para su función.

El análisis de los resultados experimentales permitirá obtener conclusiones sobre el tema en estudio. Por esta razón se plantea el siguiente **objetivo** para el presente capítulo:

Establecer el comportamiento microestructural, así como la resistencia al desgaste que permita la selección del material para la fabricación de bolas de molinos.

### **3.2. Influencia de la bola en la disponibilidad del molino**

En información cedida por directivos de la Empresa de Nuevitas Camagüey se conoció que el molino es parado anualmente para la carga completa de bolas y luego con una frecuencia de 400-500 horas disminuyendo las horas mes tras mes, con el objetivo de la revisión del estado de las bolas en cada una de las cámaras. Si la carga de bolas es menor de un 10 % en peso, en alguna de las cámaras, se debe reponer las toneladas que faltan en cada cámara con las bolas de mayor tamaño, este proceso duraría alrededor de 10 h. El molino trabaja con un total de 20 horas diarias y se para durante cuatro horas por política de ahorro de energía.

Teniendo en cuenta el análisis que se realizó para la disponibilidad del molino por causa de paradas por bolas en el año 2015 según la expresión 2.1 se expresan los valores en la gráfica 3.1 de Columnas Agrupadas para el mes correspondiente. Se observa cómo disminuye la disponibilidad del molino transcurrido los meses ya que se va acortando el tiempo entre intervenciones por causa de que las bolas ya van perdiendo su capacidad de trabajo por deterioro o por desgaste. A medida que disminuyen los diámetros de las bolas van a presentar menor dureza y por ende mayor desgaste.

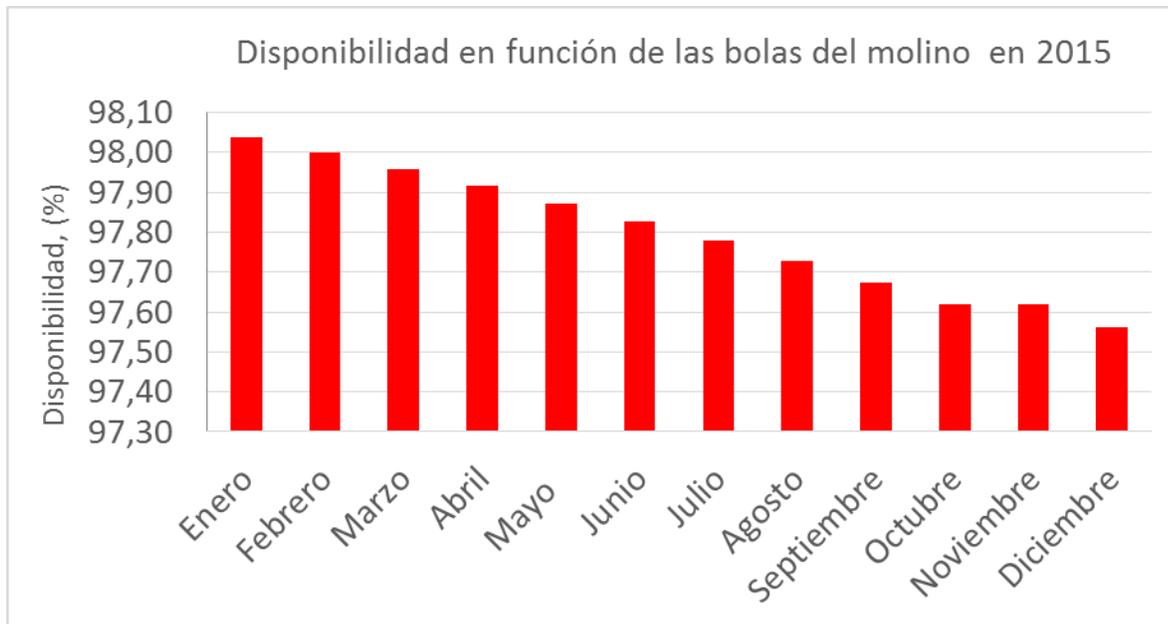


Figura 3.1. Disponibilidad del molino en función de las bolas.

Despejando en la expresión 2.1 el valor promedio de los resultados porcentuales del tiempo útil de operación obtenido mes tras mes que se muestran en la figura 3.1 y el valor del tiempo de Indisponibilidad de 10 h se tiene como resultado un valor anual de la disponibilidad de un 97,81 % lo que indica que el molino necesita cuerpos moledores con menor índice de desgaste.

### 3.3. Determinación de la carga de bolas del molino

De la expresión 2.4, que relaciona el volumen del molino (expresión 2.5) que se calcula asumiendo su geometría como la de un cilindro de longitud 13 m y diámetro de 2,6 m ( $V_{\text{molino}} = 68,98m^3$ ), el porciento de carga de bolas y el factor de empaquetamiento (que depende del cuerpo molidor y del material a moler) obtenemos el valor del volumen de llenado del molino de bolas que es de:

$$V_{\text{bolasmolino}} = 14,349m^3$$

En la tabla 3.1 se muestran la carga de bolas, tomando como base un molino de bolas de tres cámaras que labora en la cementera de Nuevitas, Camagüey.

Tabla 3.1. Cantidad de bolas por cámaras dentro del molino

Cámara	Ø de las Bolas (mm)	Cant. Por Bolas (Tn)	Cant. Total (Tn)
1	90	5 (6,9 %)	21 (29,16%)
	80	7 (9,7%)	
	70	9 (12,5%)	
2	60	7 (9,7%)	21 (29,16%)
	50	7 (9,7%)	
	40	7 (9,7%)	
3	30	30 (41,66%)	30 (41,66%)

Con el fin de mantener una producción de cemento constante y óptimo, el molino debe estar cargado con un volumen de bolas adecuado. De esta forma no existirá sobrecarga y por consiguiente no habrá exceso de trabajo ni gasto de potencia innecesaria. En la tabla 3.1 se muestra que para la primera cámara existe una carga de 21 toneladas compuesta por cinco toneladas de bolas de 90mm, siete toneladas de bolas de 80mm y nueve de 70mm. En la segunda cámara se carga con bolas de 40, 50 y 60mm con una cantidad de siete toneladas de cada una para un total de 21 toneladas. La tercera cámara se carga con 30 toneladas de bolas de 30mm. La diferencia de diámetros entre bolas por cámaras está dada por el hecho de que la granulometría a lograr por cada una es diferente. En la primera cámara se molturan materiales más gruesos, hasta llegar a la tercera cámara donde el producto debe salir con una finura de 50-100 µm.

### 3.4. Análisis de la composición química

Para la composición química de las probetas estudiadas se tomaron los resultados de tres análisis de chispas, realizados a ambos materiales, para sacar el promedio de los diferentes porcentajes de cada componente. Los valores de la media sacada se expresan en las tablas 3.2 para las probetas de acero 70XL (AISI 8660) y 3.3 para las de acero AISI 4140.

Tabla 3.2. Composición química del acero 70XL (AISI 8660)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
0,588	0,368	0,736	0,0132	0,0382	0,8841	0,019	0,6541	0,0037
Co	Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	As	Ce
0,0097	0,2631	0,0020	0,01	0,01	0,0037	0,21	0,107	0,067
B	Zn	Fe						
0,0010	0,076	96,356						

Al observar el resultado del análisis espectral obtenido, se distingue que la composición química del acero AISI 8660 está en el rango expuesto por Silot (2014) y que se muestra en la tabla 2.5.

Tabla 3.3. Composición química del acero AISI 4140

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
0,192	0,233	0,903	0,0107	0,0056	1,1859	0.2420	0,5145	0,0184
Co	Cu	Ti	V	W	Pb	Sn	Ce	As
0,0106	0,1685	0,0038	0,08	0,01	0,004	0,013	0,011	0,008
B	Fe	Zn						
0,0010	96,37	0,0131						

Por su parte el resultado del análisis espectral realizado al material de la bola forjada (AISI 4140), arrojó que el mismo también está en el rango de composición química estándar de las bolas forjadas mostrado en la Tabla 1.7.

### 3.5. Análisis microestructural de las muestras

El análisis microestructural consistió en la observación e identificación de las características de la estructura metalográfica en las muestras obtenidas. Se utilizaron para este ensayo una muestras con tratamiento térmico y una sin tratamiento térmico de acero 70XL (AISI 8660), además de una muestra de la bola forjada de acero AISI 4140. El aumento de visibilidad en el microscopio óptico fue de 200X.

El mismo se realizó con el objetivo de determinar la forma, tamaño y distribución de las inclusiones de grafito, así como el contenido de la masa metálica, basado en la norma ASTM A 247-67 (1998).

La figura 3.2 muestra la microestructura del acero AISI 4140, este presenta una estructura del tipo martensítica. Se puede observar que existen colonias de estructura de agujas, las cuales son propias del proceso de fundición. En la parte superior se puede apreciar una franja de granos de martensita revenida más finos con alguna presencia de ferrita acicular la cual disminuye su espesor a medida que se incrementa la profundidad desde la superficie hacia el núcleo. Esta franja de pequeño espesor es donde las agujas de martensita son más finas.



Figura 3.2. Microestructura del acero AISI 4140.

La formación de martensita es producto de tratamiento térmico del acero desde su temperatura de austenización, lo cual demuestra que las bolas de los molinos, primeramente se obtienen del proceso de fundición, que justifica la presencia de carburos de cromo en la parte inferior y luego se someten a un proceso de forjado en caliente donde se modifica el tamaño del grano y modifica la estructura, pero también existe disminución del tamaño del grano por el efecto de la acritud, ya que en el proceso de molienda, independiente de la función de las bolas de triturar el mineral (cemento), también chocan unas con otras.

La morfología de granos más grandes en la parte inferior, es motivada a que, los procesos de transformaciones que ocurren en la superficie por efecto del tratamiento de forjado y de acritud, no afectan el núcleo de las bolas. La formación de la ferrita es por la cantidad de carbono contenido en la aleación.

En la figura 3.3 se observa que en la muestra de acero 70XL (AISI 8660) sin tratamiento térmico existe la presencia de la ferrita y de la cementita, la primera se forma producto del proceso difusivo en la obtención de la aleación, donde provoca esta aparición el carbono como elemento alfégeno, la cementita se forma por la presencia del elemento níquel.

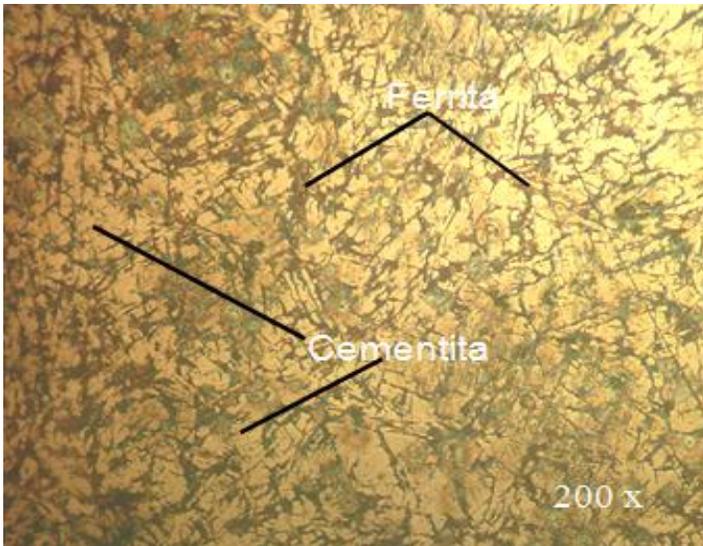


Figura 3.3. Microestructura del acero 70XL (AISI 8660) sin tratamiento térmico.

En la microfotografía (figura 3.4) se muestra, en los límites de grano cementita libre en una matriz perlítica, que a diferencia de la microestructura sin tratamiento térmico, el efecto de la disminución del tamaño de los granos es por el efecto de la acritud. Luego del tratamiento aplicado a la muestra, la aparición de la cementita es producida por el exceso de carbono sobre el límite de la solubilidad de la austenita (formado por el elemento níquel). La cementita por ser un compuesto duro y frágil, le infiere a la aleación elevada dureza, la cual puede ser hasta de HRC 68.

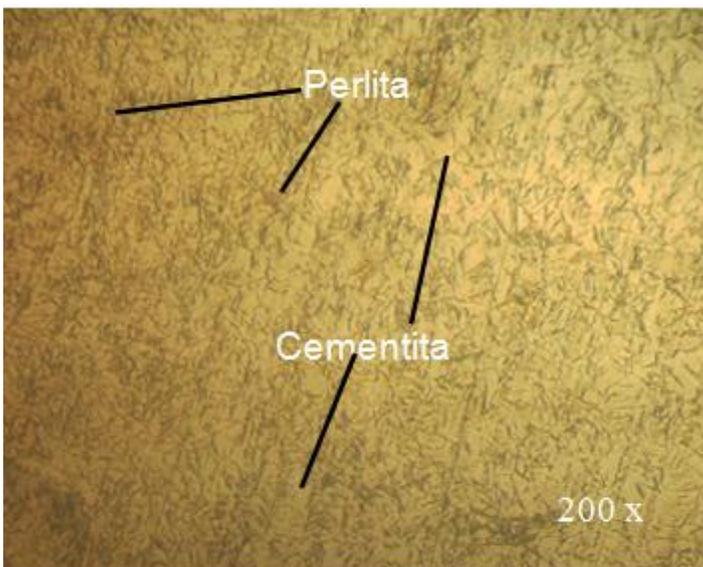


Figura 3.4. Microestructura del acero 70XL (AISI 8660) con tratamiento térmico.

### 3.6. Análisis de la dureza de las muestras

Con el objetivo de comprobar una de las propiedades mecánicas que deben poseer las bolas para la molienda del clinker en las cementeras, se realizaron los ensayos de dureza a las muestras obtenidas, incluyendo la de acero AISI 8660 después de la aplicación del tratamiento térmico.

Esta verificación de la dureza se realizó en cinco puntos diferentes de cada una de las probetas, obteniéndose los resultados que se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Valores de dureza obtenidos para los tres materiales analizados

Probetas	Número de ensayo				
	1	2	3	4	5
	<b>Valores de dureza en HRC</b>				
<b>AISI 8660 (Con TT)</b>	56,6	59,8	59,0	59,8	58,6
<b>AISI 8660</b>	49,5	48,1	47,3	49,8	47,3
<b>AISI 4140</b>	46,5	46,4	45,9	47,1	45,89

En estos resultados se observa que existe un incremento en la dureza de la aleación de acero AISI 8660 con tratamiento térmico y que además posee mayor contenido de carbono (0,588%) con relación a los resultados de dureza mostrados por el mismo material, sin tratamiento térmico y por el material de la bola forjada (0,192%).

De lo antes expresado se corrobora que el carbono funciona como agente endurecedor en los materiales en estudio, mejorando así, sus propiedades de resistencia.

Conociendo el valor de la dureza de cada probeta en HRC, se calcula según la expresión 2.1 del capítulo anterior la dureza promedio, como se muestra en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Promedio de la medición de dureza de las probetas en HRC y HV

Probeta	Dureza promedio en HRC	Dureza HV
<b>AISI 8660 (Con TT)</b>	58,76	670
<b>AISI 8660 (Sin TT)</b>	48,42	491
<b>AISI 4140</b>	46,7	472

Los valores de la Tabla 3.5 se corresponden con los mostrados en la Figura 3.4, donde se visualiza un Gráfico de Columnas Agrupadas, que compara valores entre categorías usando rectángulos verticales.

En la figura 3.5 se expone de forma descendente el comportamiento de la dureza, comprobada en las probetas de los diferentes materiales, comenzando por el acero AISI 8660 con tratamiento térmico (TT) y una dureza de HV 670. Se nota un descenso de la dureza en el acero AISI 8660 sin tratamiento térmico (TT) y en el acero AISI 4140 con durezas de HV 491 y HV 472 respectivamente.

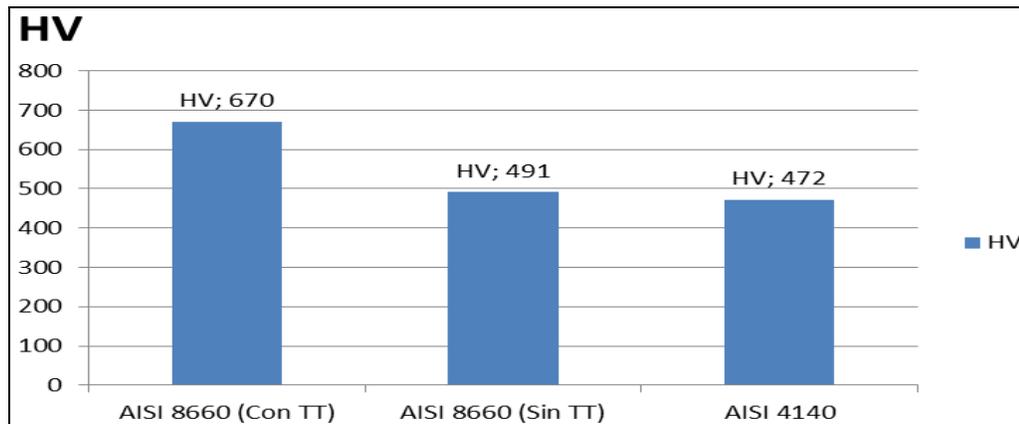


Figura 3.5. Valores de dureza en las probetas analizadas.

### 3.6.1. Resultados de los ensayos de dureza volumétrica

Los ensayos de dureza se realizaron como se explicó en el capítulo anterior, haciendo mediciones de dureza en 10 puntos de la bola, desde la superficie hasta el centro. Los valores alcanzados y el promedio se muestran en la Tabla 3.6.

Tabla. 3.6. Dureza volumétrica de las bolas de acero 70XL tratada térmicamente

Zona	Porcentaje de volumen por zona (%)	Dureza de la zona; HRC
1	27,1	58,7
2	21,7	58,7
3	16,9	57,5
4	12,7	57,5
5	9,1	55,6
6	6,1	54,2
7	3,7	53,8
8	1,9	53
9	0,7	52,5
10	0,1	50
<b>Total</b>	<b>100,0</b>	<b>55,15</b>

Los valores de la tabla anterior muestran el comportamiento de la dureza volumétrica en la bola, medida a través de las técnicas propuestas en la presente investigación, obteniéndose como dureza promedio HRC 55,15. Este valor está incluido en el rango de valores de la norma Gost, que adoptan empresas como MAGOTTEAUX, FORDOCA y DELTA INDUSTRIA S.A. y que actualmente están logrando en la Empresa Mecánica del Níquel de Moa. Para esta norma, el rango de la dureza en los aceros destinados a las bolas, es de HRC 50-63 como se expresa en el Capítulo 2.

La figura 3.6 muestra, a través de un gráfico de dispersión con líneas suavizadas y marcadores, la representación del proceder de la dureza volumétrica por zonas de la bola. Se observa que existe un decrecimiento marcado de la dureza de la bola desde la superficie hasta el centro; esto ocurre como consecuencia de la extracción del calor durante el enfriamiento en el tratamiento térmico, siendo el centro de la bola la última parte en enfriarse.

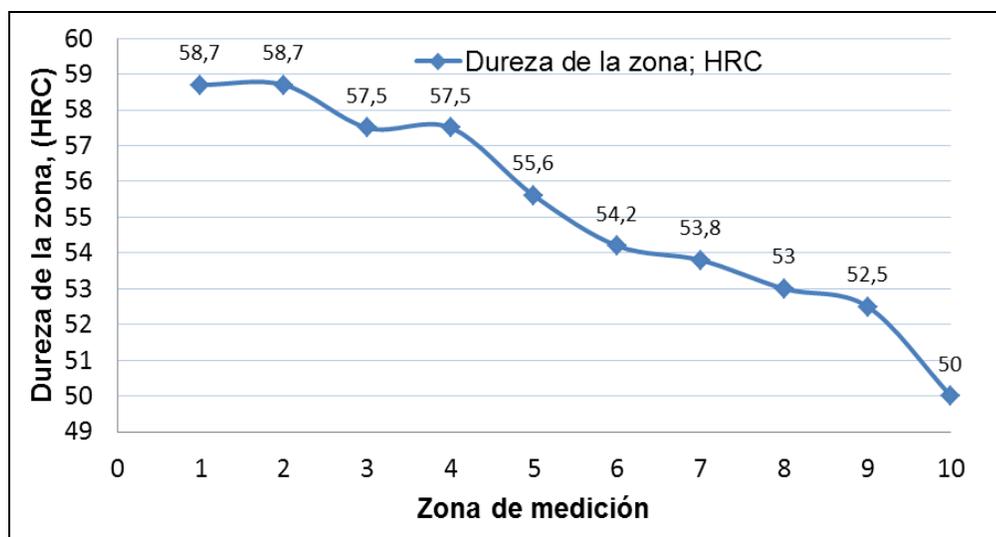


Figura 3.6. Comportamiento de la dureza volumétrica por zonas de la bola.

### 3.7. Comportamiento o desgaste del material de las bolas

Según Rojas (2011), se ha demostrado experimental y teóricamente que la dureza del material está correlacionada 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 construidos con un material de gran resistencia a la abrasión que garantice una elevada resistencia al desgaste durante un período de explotación razonable.

En la Tabla 3.7 se muestran los valores de los pesajes realizados a las probetas de acero AISI 4140 y acero AISI 8660 con y sin tratamientos térmicos.

En la tabla 3.7 se evidencia que el desgaste del acero AISI 8660 con tratamiento térmico es menor en relación al mismo material sin el proceso químico-metalúrgico y al acero AISI 4140 correspondiente a la bola forjada. En el Anexo 3 se encuentra mostrado a través de gráficos de dispersión el comportamiento del pesaje de las probetas en función del tiempo.

Tabla 3.7. Valores de los pesajes realizados a las probetas

Material	Pesaje 1 (g)	Pesaje 2 (g)	Pesaje 3 (g)
AISI 8660 (Con TT)	254,81	254,75	254,69
AISI 8660 (Sin TT)	249,00	248,85	248,73
AISI 4140	80,09	79,83	79,53

La tabla 3.8 refleja el promedio de material desgastado en función de la masa en gramos, calculado a partir de los datos expuestos en la tabla anterior.

Tabla 3.8. Resultados del análisis gravimétrico

Material	$\Delta P$ 1 (g)	$\Delta P$ 2 (g)	Promedio de $\Delta P$ (g)
AISI 8660 (Con TT)	0,06	0,06	0,06
AISI 8660 (Sin TT)	0,15	0,12	0,135
AISI 4140	0,26	0,30	0,28

La variación de masa ( $\Delta P$ ) correspondiente a estos aceros se calculó a partir de la expresión 2.7 que relaciona la masa inicial y la masa final como la substracción de la mayor menos la menor y se muestra en la figura 3.7 para una mayor comprensión del resultado del desgaste gravimétrico realizado. Se visualiza que para un valor de la dureza de HRC 46,7 correspondiente al acero AISI 4140 (bola forjada), el valor del desgaste gravimétrico según la expresión 2.7 es de 0,28 g.

Para el acero AISI 8660 sin tratamiento térmico y con dureza de HRC 48,42, el valor de  $\Delta P$  es de 0,135 g. Por su parte se observa que el menor grado de desgaste ocurre para el acero AISI 8660 con tratamiento térmico, con dureza de HRC 58,76; el valor de  $\Delta P$  para este acero es de 0,06 g.

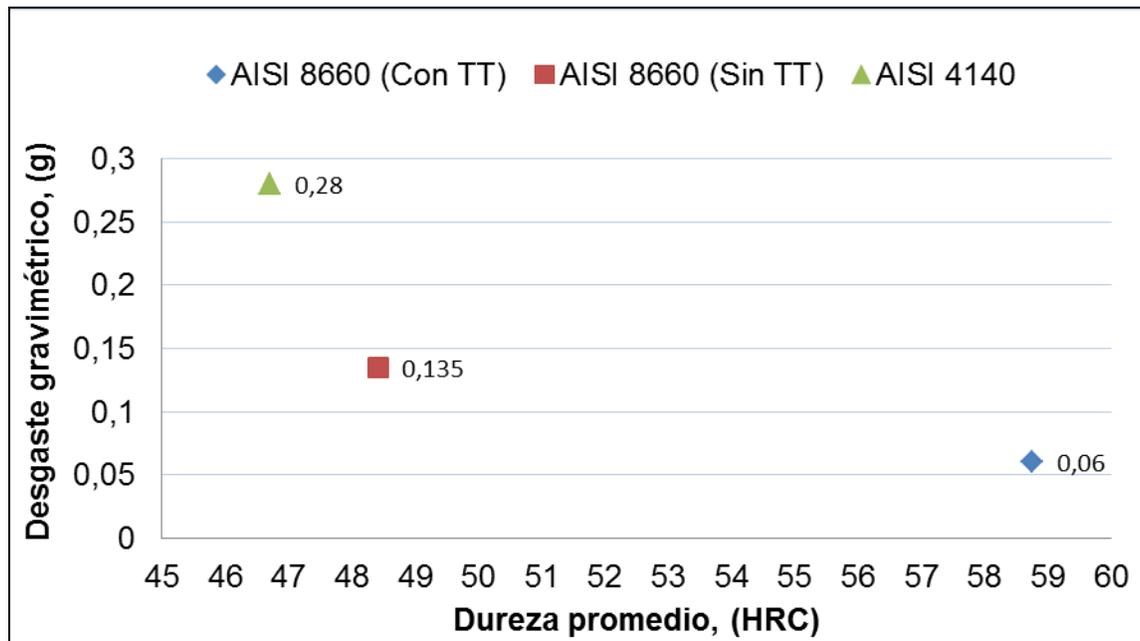


Figura 3.7. Comportamiento del desgaste gravimétrico con respecto a la dureza del material.

### 3.8. Selección del material para la fabricación de las bolas

Se conoce que luego del tratamiento térmico aplicado a la muestra de acero 70XL, aparece cementita producida por el exceso de carbono sobre el límite de la solubilidad de la austenita (formado por el elemento níquel). Esto le infiere a la aleación elevada dureza, la cual puede ser hasta de HRC 68, lo que no se comprobó para el acero AISI 4140 ni para el acero 70XL sin tratamiento térmico. Además se evidenció que existe un comportamiento descendente en las durezas analizadas de los diferentes materiales. Comenzando por el acero AISI 8660 con tratamiento térmico con una dureza de HV 670, pasando por la dureza en el acero AISI 8660 sin tratamiento térmico con durezas de HV 491 y terminando en el acero AISI 4140 con durezas de HV 472. También se conoce que los porcentajes de desgaste gravimétrico examinados se corresponden con el comportamiento de la dureza en los materiales en estudio, mostrando porcentajes de desgaste de 0,06; 0,135 y 0,28 g respectivamente.

Con esto podemos afirmar que el material de las bolas fundidas a las cuales se les aplica tratamiento térmico no solo sobrepasa el valor de la dureza del acero AISI 4140 y el del acero AISI 8660 sin tratamiento térmico, sino que también es más resistente al desgaste abrasivo y por tanto es el recomendado para fabricar las bolas para la molienda del clinker.

### **3.9. Valoración de las dimensiones ambiental y social**

Las partículas sólidas constituyen, por mucho, el principal contaminante emitido a la atmósfera por la industria del cemento. Aunque no son realmente nocivas por su ausencia de toxicidad, son frecuentemente causa de molestias para la población circundante y pueden producir perjuicios en la agricultura al cubrir las hojas de las plantas de una finísima capa de polvo.

Un 7 % aproximadamente de las partículas son pesadas, es decir mayores de 60 micras, lo que las configura como partículas sedimentables, que caerán muy cerca de la planta, con casi independencia de la altura de la chimenea. Alrededor de un 25% de las partículas se encuentran entre 1 y 10 micras. Dichas partículas serán transportadas a muy largas distancias (Enseñat, 2004). Además de esto se ha comprobado que bolas y partes de estas que se colocan en el patio de almacenaje de desechos de las empresas cementeras se han encontrado a kilómetros de distancia en alcantarillados públicos, influyendo negativamente en el sistema drenaje de las calles.

Sólo un 3% de las partículas son submicrónicas. Este tipo de partículas sería el más perjudicial si se encontrara muy concentrado al nivel del suelo, ya que puede producir neumoconiosis en los individuos sometidos a larga exposición ante los mismos. Afortunadamente este polvo es el que se transporta a más largas distancias y llega a tierra en concentración inapreciable.

El polvo de clínker de cemento puede provocar irritación de la garganta, provoca irritación cutánea, lesiones oculares graves, puede provocar una reacción alérgica en la piel, puede irritar las vías respiratorias.

Cuando, accidentalmente, el clínker de cemento entra en contacto con el agua o su polvo se humedece, se produce una fuerte solución alcalina. Debido a su alta alcalinidad, el clínker de cemento Portland húmedo puede provocar irritación cutánea y ocular. Además, debido a su contenido en Cr algunos individuos pueden desarrollar una reacción alérgica.

### 3.9.1. Medidas de prevención

En caso de contacto con los ojos: aclarar cuidadosamente con agua durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto, si lleva y resulta fácil. Seguir aclarando. Llamar inmediatamente a un Centro de Información toxicológica o a un médico.

- En caso de contacto con la piel: lavar con agua y jabón abundantes. En caso de irritación o erupción cutánea, consultar a un médico.
- Evitar respirar el polvo. En caso de inhalación: transportar a la víctima al exterior y mantenerla en reposo en una posición confortable para respirar. Llamar a un centro de información toxicológica o a un médico en caso de malestar.
- Mantener fuera del alcance de los niños.

### 3.10. Valoración de la dimensión económica

Está descartado que existe estrecha relación entre la fabricación de un producto con su costo de producción. Para que sea comercializable un producto, deberá tener precios competitivos con relación a los de otros productores, de lo contrario lejos de proporcionarle eficiencia se incidiría en grandes pérdidas. Además debe existir un mercado que satisfaga la capacidad de producción de quién quiere comercializar.

En el caso de la Empresa Mecánica del Níquel de Moa existe un mercado nacional con una demanda de 800 toneladas de bolas al año. Dentro del grupo de cementeras que conforman este mercado se encuentran las de Santiago de Cuba, la de Nuevitas en Camagüey y la 26 de Julio en Ciego de Ávila.

En la tabla 3.9 se muestran los gastos generales en los que se incurre para la fabricación de las bolas en la Empresa Mecánica del Níquel de Moa, empleando las partidas de costos de dicha empresa, las que consideran: materiales, salario básico y complementario, gastos de transportación, gastos directos, gastos indirectos, combustible y energía, amortización y un factor de ganancia del 14%.

Tabla 3.9. Gastos generales en la fabricación de las bolas de 90 mm

<b>Conceptos de Gastos</b>	<b>CUP</b>	<b>CUC</b>
Materia prima y materiales	2 986,57	2 496,02
Sub total (Gastos de Elaboración)	2 769,51	929,31
Otros Gastos directos	584,97	295,10

Tabla 3.9. Gastos generales en la fabricación de las bolas de 90 mm (continuación)

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	5 756,08	3 425,33
Impuestos y Contribuciones	444,19	0,00
Margen de utilidad S/ Base Autorizada	276,95	0,00
Precio establecido por el MFP	6 477,22	0,00
% Sobre los gastos en divisa	0,00	171,27
Componente en pesos convertibles	0,00	3 596,60

Se encontró además que el precio de venta de algunas empresas suministradores de bolas (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 3.10 el precio de venta de algunos suministradores de bolas.

Tabla 3.10. Precio de venta de algunos suministradores

<b>País</b>	<b>Empresa</b>	<b>Precio/T</b>
Canadá	Ontario Limited	1587,50 USD
España	Aceros y Suministros	1875,57 USD
Bélgica	Magotteaux	1300,00 USD
España	Consorcio Industrial	1785,91 USD
China	S.L Gonio	1027,00 USD

Se conoce que desde el punto de vista tecnológico las bolas, de acero 70XL, pueden fundirse en la Empresa Mecánica del Níquel de Moa, que existe demanda de mercado, que poseen buena resistencia al desgaste (por encima del material de la bola forjada de acero AISI 4140). Se puede afirmar que tienen un precio de venta alto por la peculiaridad de obtención de las mismas si se mide en cuanto a precio de venta con las empresas extranjeras, pero si a este precio se suma el flete, gastos Impuestos de aduaneros, Gastos de transportación, se incurría en valores a los 3 500 - 4 000 USD, cantidad superior a los de las bola fabricadas en la Empresa Mecánica del Níquel, adoptando. Entonces se puede concluir que la fabricación de las bolas en la mencionada empresa sustituiría esas importaciones para el país, debido a que para las entidades, cementeras cubanas, por lo que

será mucho más económico fabricar las mismas en dicha empresa cubana, otro elemento a considerar es el tiempo de duración que bolas fabricadas en esa entidad que se espera que sea superior debido a su resistencia mecánica.

### **3.11. Conclusiones del capítulo 3**

- El método de observación propuesto posibilita obtener la forma de la microestructura para los aceros AISI 4140 y 70XL con tratamiento térmico y sin este, dando la posibilidad de comparar los resultados en función de la dureza comprobada.
- Con la aplicación de las técnicas de ensayos propuestas, fue posible caracterizar la variación de la masa ( $\Delta P$ ) como resultado final del desgaste gravimétrico de los materiales.
- Se verificó que antes del tratamiento térmico en el acero 70XL, la estructura es de ferrita y cementita. Luego del tratamiento térmico es de cementita libre en una matriz perlítica.

## **Conclusiones generales**

- 1.** El acero 70XL con tratamiento térmico, es, de los estudiados, el de mejores propiedades para la fabricación de bolas en la Empresa Mecánica del Níquel, porque presenta un menor grado de desgaste (0,06 g) y una dureza de HRC 58,76.
- 2.** En la microfotografía del acero 70XL con tratamiento térmico se muestra, en los límites de grano, cementita libre en una matriz perlítica, que es un compuesto duro y frágil y le confiere, a la aleación, una dureza promedio de 58,76 HRC.
- 3.** Las bolas 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.

## **Recomendaciones**

- Aplicar los resultados obtenidos a la fundición de bolas para molinos que actualmente se desarrolla en la Empresa Mecánica del Níquel de Moa.
- Valorar la posibilidad de emplear aceros de contenidos medios de carbono con menor costo de fundición.
- La dureza promedio de las bolas de fundición con tratamientos térmicos deben estar en HRC 55 para evitar fracturas.
- Desarrollar una producción de prueba para verificar la durabilidad de las bolas fabricadas con la tecnología de la Empresa Mecánica del Níquel en una industria del cemento.

## Referencias bibliográficas.

1. Albertin, A.; G. Sinatora; A. Pitaluga. Relación entre factores microestructurales e impacto repetido en aleaciones de alto cromo para bolas de molino. Parada Ingeniería Mecánica, 1 (2008) 57–62.
2. Alcántara, D.; T. Fernández.; I. Rodríguez. Comportamiento de las capas superficiales deformadas plásticamente por el desgaste en elementos circulares. 17 (4) 1 – 4, 2009. <http://www.ciencias.holguin.cu/> Consultado el 2 de Mayo de 2016.
3. Alcántara, J. Diseño práctico de un molino de bolas. Tesis en opción al título de ingeniero mecánico. 2008
4. Andreiev, Perov, Zverievich, Trituración, desmenuzamiento y cribado de minerales. Niedra. Moscú.1987.
5. ASM. (1992). Friction, lubrication and wear technology. The Materials Information Society
6. ASTM. (1998). A 352. Standard Specification for Steel Castings, Ferritic and Martensitic, for Pressure- Containing Parts, Suitable for Low-Temperature Service
7. ASTM A 128 AB. Edited by Foct and A. Hendry, Institute of Metals. 1996. 34 p.
8. Chillce, V.; R. Rojas (2012) Implementacion 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.
9. Descaper, J. Manual del Molino, 1981.
10. Drzymala. J. Mineral Processing. Foundations of theory and practice of minerallurgy. 1 st English edition. C. Eng., Ph.D., D.Sc. Member of the Polish Mineral Processing Society. Wroclaw University of Technology 2007.
11. Enseñat, A La industria del cemento dentro de la problemática de la contaminación atmosférica., Subdirector General del Medio Ambiente Industria. 2004.

12. Ishikawa, S.; A. Yamamoto & kyoshioka. 2001. JP2001316754.
13. Martínez, F.; H. Martínez. Relación entre la resistencia máxima y el desgaste abrasivo en los aceros al carbono. 5 (2) 57 – 73, 1982.
14. Osorio, A.; G. Restrepo, J. Marín. 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. 2001.
15. Paumier, Y. Comportamiento microestructural del material del enfriador de mineral de la Empresa “Cdte. Ernesto Che Guevara” Tesis en opción al Título de Master en Electromecánica. 2013.
16. Petty, E. R. Physical Metallurgy of Engineering Materials. George Allen and Unwin Ltd. Londres. p 109 (1968).
17. Plati, A. Modelling of  $\gamma'$  Precipitation in Superalloys. [Universidad de Cambridge]. 2003.
18. Rivera, I. Balance poblacional en un molino de bolas para una ley de desgaste de tipo exponencial e hiperbólico en tiempos largos. Tesis o trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar el título de: Doctor en Ingeniería Ciencia y Tecnología de Materiales. 2013.
19. Rojas, M. Resistencia al desgaste de la aleación ni-resist con adición de aluminio como elemento de aleación. Tesis en opción al Título de Master en Metalurgia. Mención Metalurgia Física. 2011.
20. Sampén, L. Pautas para el diseño de partes metálicas resistentes al desgaste. Vol. (6) 2: pp. 74-78. 2009.
21. Sarkar, A. D. 1980. Friction and Wear. Academic Press Inc. (London) LTD, London, 423 p.
22. Sierpinski, Z. & G. Janusz. 1999. Phase transformations and strengthening during ageing of CuNi10Al3 alloy. Materials Science and Engineering A (264, 279 - 285).

23. Silot, Y. Trabajo de Diploma. Obtención de Bolas para la Molienda del Clincker a Partir de una Nueva Tecnología de Fundición. En opción al título de ingeniero metalúrgico.2014.
24. Taggart. 1999. Manual de preparación de Minerales.
25. Vázquez, J. C. 1997. Elementos de control de desgaste.  
<http://www.monografias.com/trabajos5/laweb/laweb.shtml>.
26. Waganoff. Trituración, Molienda y Separación de Minerales. Editorial Alsina. 2003.
27. Walter, H. Manual Tecnológico del Cemento. ETA, Barcelona, 1977.
28. Walton, C. F. 1981. Castings Iron Handbook.

## Anexo 1



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

## Anexo 2

 "Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche"		Denominación de la pieza							Orden de trabajo			
		Bola de los molinos de bola										
		Número de plano:	S/N					No. de tecnología:	13			
Denominación y grado del material:		Ac.70XL					Masa [ kg ] :	3.0				
No.de la operación tecnológica	Denominación de la operación tecnológica	Equipo tecnológico	Utillaje tecnológico	Medio ambiente	Dureza	Penetración capa de la tratada	Régimen de trabajo		Cantidad de pieza en dispositivo o instalación	Norma de rendimiento		
							Temperatura (°C)	Exposición (h + min)		Cargo	Escala salarial	
										TPC	0,25	
										T tecnológico	10,25	
										Tiempo total	10,50	
1	<b>Normalizado</b>											
1,1	Calentamiento y permanencia	CWO6.30/10	-	Aire	-	-	600-650	2	100	Terminista	V	5,00
1,2	Calentamiento y permanencia	CWO6.30/10	-	-	-	-	820-840	2				4,00
1,4	Enfriamiento al aire	-	Tenaza	Aire	-	-	-	-				1,00
2	Comprobación de dureza	Durómetro portátil Mod.DIGIMESS DP-300	-	-	HRC 17 - 20	Sujetar en mordaza						0,25
<b>Observaciones</b>										Mes	Año	
	Cantidad de piezas por evento:	100		Elaboró:	Nombre y apellidos		Firma					
	Cantidad de eventos:	1			Reynaldo Pérez Ramírez					mayo	2014	
	Tiempo del supervisor: X	0,84		Aprobó:								
	Tiempo del ayudante:	0,525										
	Tiempo del Gruero:	0,77175		Índice	Modificación		Firma			Mes	Año	

Figura 1. Carta tecnológica del tratamiento térmico de normalizado para las bolas de 90 mm de diámetro.

 <p>EMPRESA MECÁNICA DEL NIOUÉL "Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche"</p>		Denominación de la pieza						Orden de trabajo				
		Bola diámetro 90 mm										
		Número de plano:		S/N			No. de tecnología:		TECNOLOGÍA # 12			
		Denominación y grado del material:			Ac. 70XL			Masa [ kg ]:		3.0		
No. de la operación tecnológica	Denominación de la operación tecnológica	Equipo tecnológico	Utillaje tecnológico	Medio ambiente	Dureza	Penetración capa de la tratada	Régimen de trabajo		Cantidad de pieza en dispositivo o instalación	Norma de rendimiento		TPC
							Temperatura (°C)	Exposición (h + min)		Cargo	Escala salarial	T tecnológico
1	<b>Temple</b>											
1,2	Calentamiento y	CWO6.30/10	-	-	-	840-860	2	30	Terminsta	V		5,00
1,3	Enfriamiento	Baño de aceite	Grúa	Aceite			1					1,00
2	Comprobación de dureza	Durómetro portátil Mod.DIGIMESS DP-300		-	HRC 50 - 55	Sujetar la pieza en una mordaza.						0,25
<b>Observaciones</b>												
Cantidad de piezas por evento:		30		Elaboró:	Nombre y apellidos		Firma		Mes	Año		
Cantidad de eventos:		1			Reynaldo Pérez Ramírez				mayo	2014		
Tiempo del supervisor: X		0,52		Aprobó:								
Tiempo del ayudante:		0,325										
Tiempo del Gruero:		0,455		Índice	Midificación		Firma		Mes	Año		

Figura 2. Carta tecnológica del tratamiento térmico de temple para las bolas de 90 mm de diámetro.

 <p>EMPRESA MECÁNICA DEL NIOUÉL "Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche"</p>		Denominación de la pieza						Orden de trabajo				
		Bola de los molinos de bola										
		Número de plano:		S/N			No. de tecnología:		TECNOLOGÍA # 14			
		Denominación y grado del material:			70XL			Masa [ kg ]:		3.0		
No. de la operación tecnológica	Denominación de la operación tecnológica	Equipo tecnológico	Utillaje tecnológico	Medio ambiente	Dureza	Penetración capa de la tratada	Régimen de trabajo		Cantidad de pieza en dispositivo o instalación	Norma de rendimiento		TPC
							Temperatura (°C)	Exposición (h + min)		Cargo	Escala salarial	T tecnológico
1	<b>Revenido</b>											
1,1	Calentamiento y permanencia	CWO6.30/10	-	Aire	-	-	150 - 180	3	Terminsta	V		3,00
2	Comprobación de dureza	Durómetro portátil Mod.DIGIMESS DP-300		-	HRC 50 - 55	Sujetar la pieza en una mordaza.		0,25				
<b>Observaciones</b>												
Cantidad de piezas por evento:		30		Elaboró:	Nombre y apellidos		Firma		Mes	Año		
Cantidad de eventos:		1			Reynaldo Pérez Ramírez				mayo	2014		
Tiempo del supervisor: X		0,28		Aprobó:								
Tiempo del ayudante:		0,175										
Tiempo del Gruero:		0,245		Índice	Midificación		Firma		Mes	Año		

Figura 3. Carta tecnológica del tratamiento térmico de revenido para las bolas de 90 mm de diámetro.

### Anexo 3

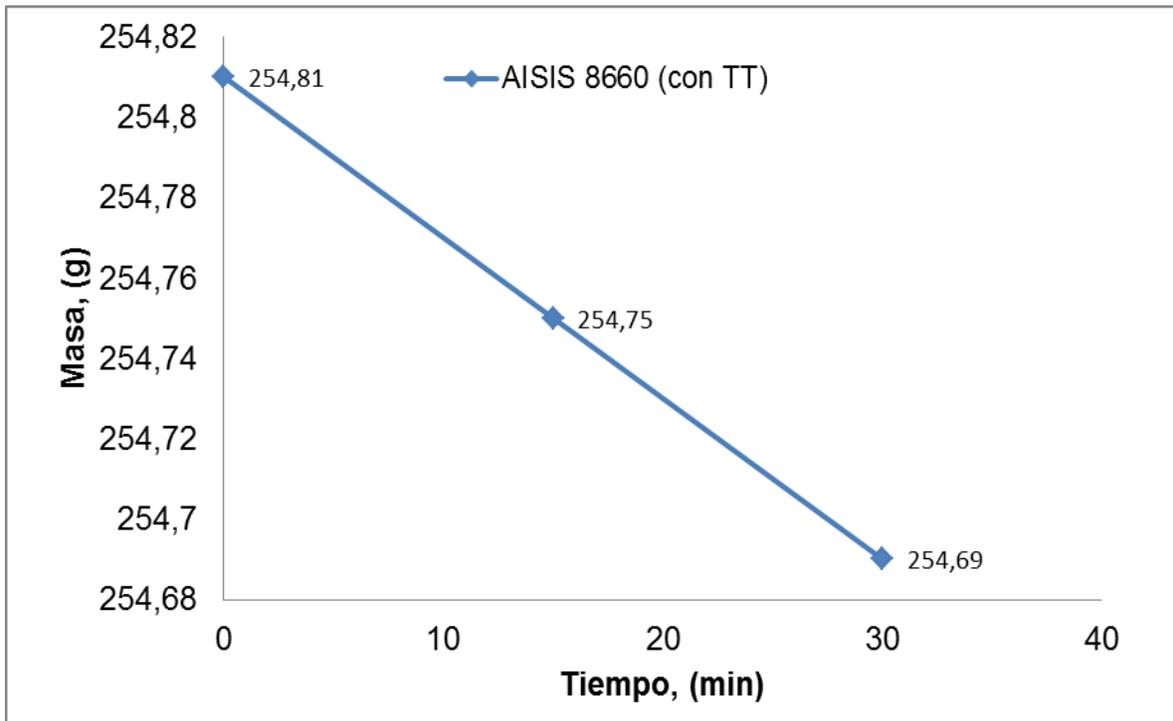


Figura 1. Comportamiento del pesaje de la probeta de acero AISI 8660 con tratamiento térmico en función del tiempo.

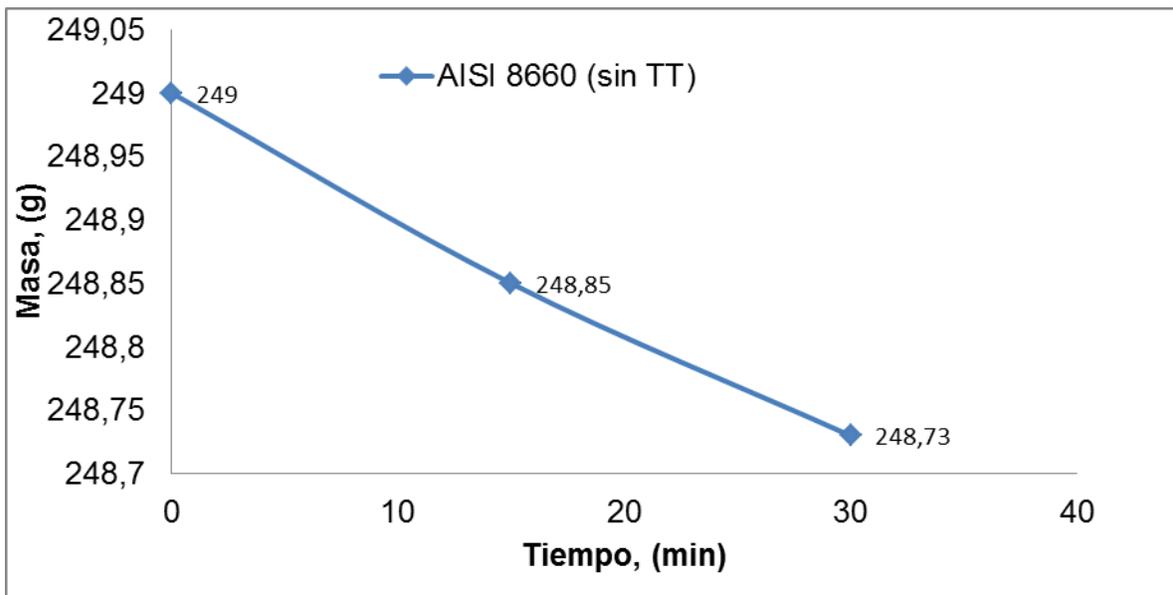


Figura 2. Comportamiento del pesaje de la probeta de acero AISI 8660 sin tratamiento térmico en función del tiempo.

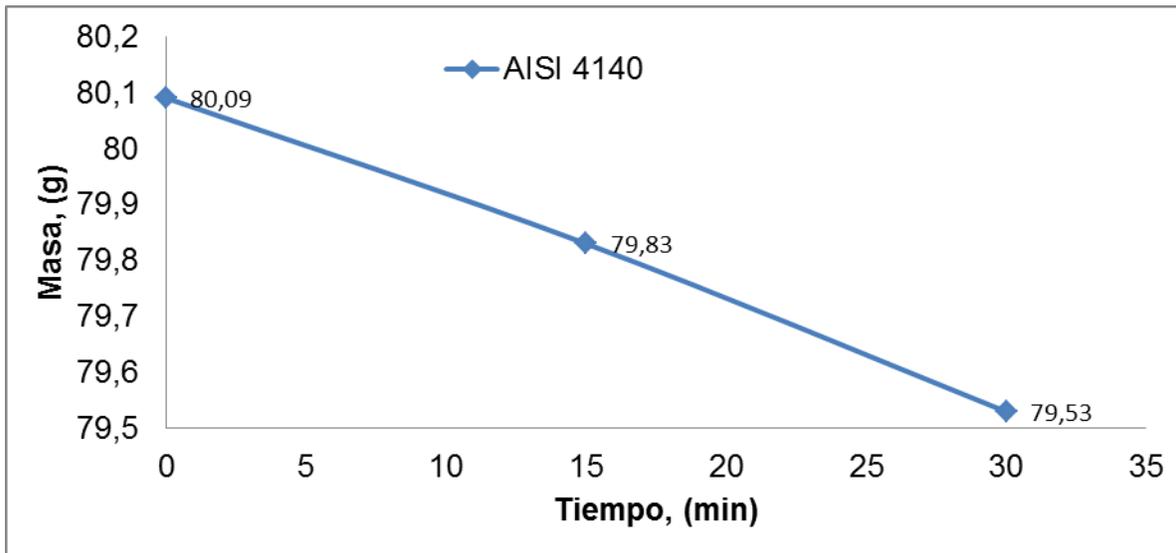


Figura 3. Comportamiento del pesaje de la probeta de acero AISI 4140.

## Anexo 4



Figura 1. Durómetro digital modelo HRS-ISO.

## Anexo 5

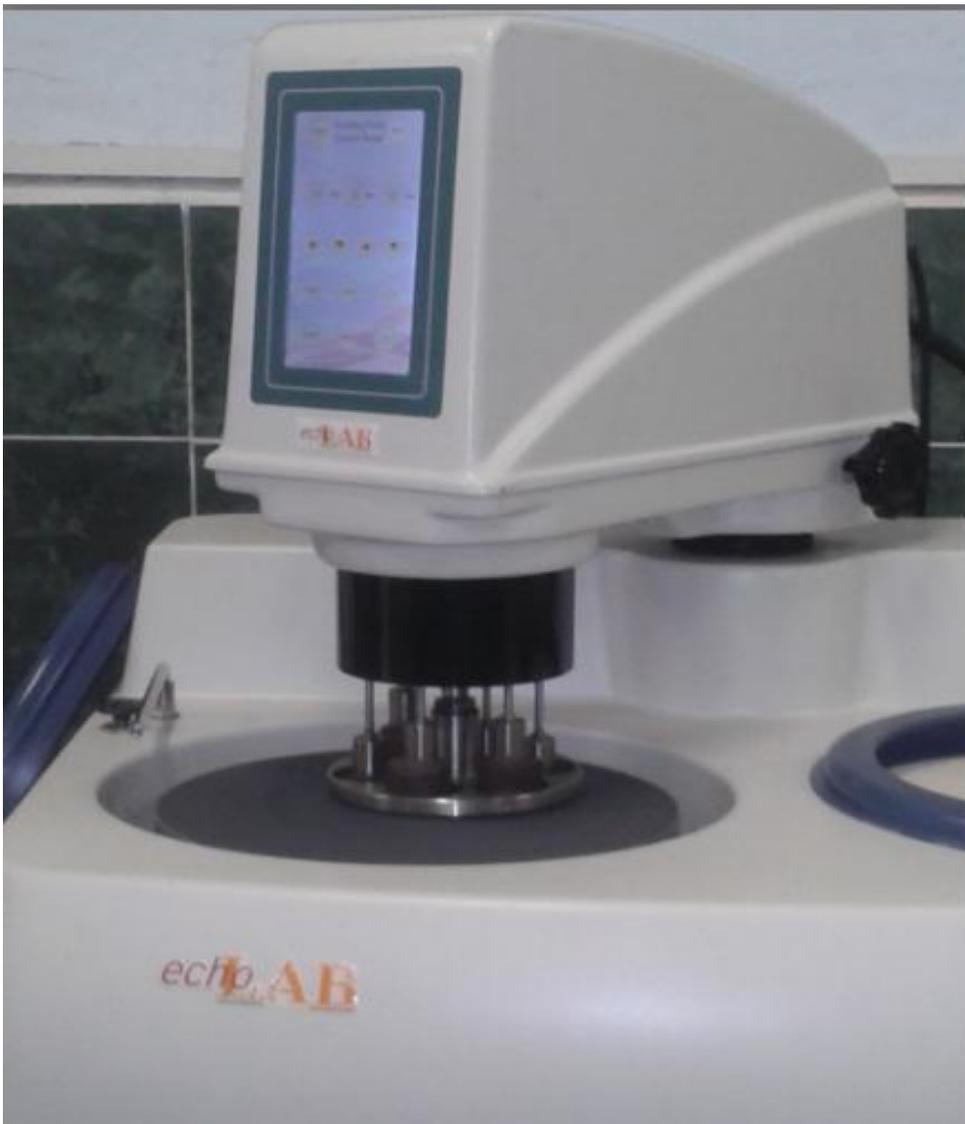


Figura 1. Pulidora automática (PM 52 D. Automatic Metallographic Sample Grinding and Polishing Machine).

## Anexo 6



Figura 1. Balanza analítica RADWAG modelo PS 3500 R1.