



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería Mecánica



**"RECICLAJE DE MATERIAL DE BOLAS UTILIZADAS
EN LA MOLIENDA DEL CEMENTO"**

TESIS DE GRADO
Prevía la obtención del Título de:
INGENIERO MECANICO

Presentada por:
Jorge Enrique Cunalata Naranjo

Guayaquil - Ecuador

1.989

AGRADECIMIENTO

A la Escuela Superior Politécnica
del Litoral.

Al Ing. Ignacio Wiesner, Director
de Tesis e Ing Homero Ortiz A.

A La Cemento Nacional C. A.

Al Ing. Luis Alberto San Martín.

Al Centro de Investigación
Científica y Tecnológica.

DEDICATORIA

A MIS PADRES: JORGE ENRIQUE Y
ROSITA CORINA, que sin su apoyo
no hubiera sido posible la
culminación de mi carrera.

A MIS HERMANOS: VICTOR, CESAR,
MARIO, CLARA, GLORIA Y ALICIA

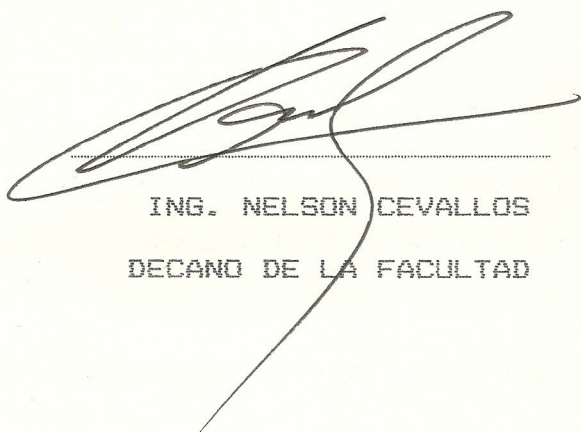
A MIS AMIGOS

DECLARACION EXPRESA

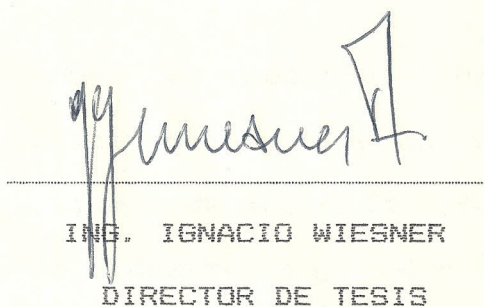
"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL).

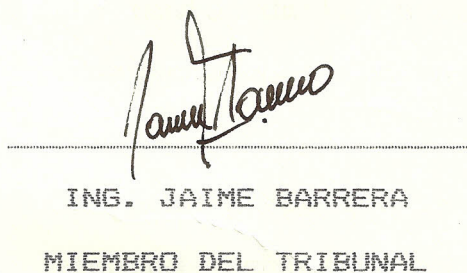
.....
JORGE E. CUNALATA NARANJO



ING. NELSON CEVALLOS
DECANO DE LA FACULTAD



ING. IGNACIO WIESNER
DIRECTOR DE TESIS



ING. JAIME BARRERA
MIEMBRO DEL TRIBUNAL



ING. MARCELO ESPINOSA
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

RESUMEN

El presente informe trata sobre el reciclaje del material de bolas que se utiliza en la molienda de cemento. Estas bolas por el tiempo de molienda sufre desgaste hasta reducirse a un diámetro muy pequeño pasando ahora a ser chatarra. Se hace un estudio primeramente de los materiales resistentes al desgaste abrasivo, luego el diseño, construcción y selección del modelo apropiado para nuestros fines, la fusión de la chatarra seleccionada, y prueba del desgaste abrasivo en un molino experimental.

En cada etapa que se la culmina, se lleva a cabo el debido control y supervisión de calidad y requerimientos técnicos. Se logra por lo tanto obtener bolas con propiedades aproximadas que luego de ser puestas a prueba han resultado que sí cumplen satisfactoriamente los requisitos de molienda.

INDICE GENERAL

RESUMEN	VI
INDICE GENERAL	VII
INDICE DE FIGURAS	IX
INDICE DE TABLAS	XI
SIMBOLOGIA	XII
INTRODUCCION	14
I LA MOLIENDA EN LA INDUSTRIA	16
1.1 Generalidades	16
1.2 La molienda en la producción del cemento	18
1.3 Cuerpos moledores: bolas y rodillos.	23
1.4 Materiales utilizados en las bolas..	28
II FUNDICIONES BLANCAS	33
2.1 Generalidades	33
2.2 Variedad	35
2.3 Fundiciones blancas de alto contenido de cromo	40
2.4 Propiedades	49
2.5 Resistencia al desgaste por abrasión e impacto	53
III TRABAJO EXPERIMENTAL	62
3.1 Plan de trabajo	62

3.2	Construcción de equipo auxiliar	63
3.3	Elaboración de patrón de calidad	69
3.4	Coladas de pruebas	72
3.5	Control de calidad de coladas de pruebas	85
3.5.1	Análisis químico	86
3.5.2	Metalografía	87
3.5.3	Ensayos mecánicos	89
	1. En bruto de colada	89
	2. Con tratamientos térmicos	89
3.6	Ensayos en Planta de cuerpos de prueba	89
3.7	Evaluación de cuerpos de pruebas	96
IV	DISCUSION DE RESULTADOS	98
	CONCLUSIONES	103
	RECOMENDACIONES	105
	BIBLIOGRAFIA	106

INDICE DE FIGURAS

No		Pag.
1	Molino Tubular	17
2	Molienda en VasiJa	18
3	Sistema de Molinos Compuestos	21
4	Sistema de Molienda con Descarga Central.....	22
5	Molino con dos Compartimientos	24
6	Resistencia al Desgaste de Materiales Fundidos	29
7	Variedad de Fundiciones Blancas	36
8	Diagrama Fe-Cr-C	43
9/ 12	Micrografías de Hierros Blancos Aleados, en diferentes matrices y porcentajes de carburos	45
13	Subdivisión de un Sistema de Tres Cuerpos ..	54
14	Disminución del Diámetro de Bolas	55
15	Desgaste de cuerpos antes y después de ensayarlos	60
16	Detalles del Molde Metálico	64
17	Montaje de Molde Metálico	65
18	Distribución de Bolas en Placa Modelo	67
19	Montaje en Tablero	68
20	Micrografía del Material Original	72
21	Desmoldeo	74
22	Solidificación de la Pieza en Molde Metálico	76

23	Alimentador de Placa Modelo	79
24	Porcentaje de Contracción por Temperatura ..	81
25	Solidificación de la Pieza en Arena	83
26	Horno de Inducción	85
27	Micrografía de Hierro Blanco Aleado obtenido en bruto de Colada	88
28	La misma Aleación tratada termicamente	88
29	Curva Gravimétrica	92
30	Curva Representativa de Desgaste	95

INDICE DE TABLAS

No		Pag.
I	Datos de Bolas para Molienda	25
II	Dureza en Diversas Zonas de las Bolas	26
III	Calidad de Material de Bolas	28
IV	Material de Bolas	31
V	Composición de Hierros Blancos Resistentes a la Abrasión ASTM A532	39
VI	Dureza de Microconstituyentes en Fundiciones al alto Cromo	41
VII	Propiedades de los Hierros Blancos Martensíticos	50
VIII	Dureza de los Hierros Blancos ASTM A532	50
IX	Dureza de Minerales	51
X	Composición Química del Patrón de Calidad	71
XI	Composición Química del Material Reciclado ...	86
XII	Tamizado del Material a Moler	91
XIII	Tamizado del Material Molido	94
XIV	Datos posteriores de Molienda	95

SIMBOLOGIA

ASTM	Asociación Americana Ensayos de Materiales
HV	Dureza Vickers
HRC	Dureza Rockwell escala C
HB	Dureza Brinell
m	Metro
cm	Centímetro
mm	Milímetro
seg	Segundo
h	Hora
°C	Grado Centígrado
C	Carbono
Cr	Cromo
Ni	Níquel
Mg	Manganeso
Mo	Molibdeno
M C	Carburos duros
RM	Rendimiento Másico
Vp	Volumen de la pieza
Vc	Volumen del sistema de colado
R	Radio
MA	Módulo del alimentador
Ac	Area de contacto

MP	Módulo de la pieza.
H	Altura
Va	Volumen del alimentador
Kg	Kilogramo
g	gramo
rpm	Revoluciones por minuto

I N T R O D U C C I O N

En la industria del cemento se utiliza en gran cantidad cuerpos moledores que con el tiempo de servicio son separadas para pasar a formar parte de la chatarra, material que tiene propiedades y características similares al original.

El Ecuador consume a través de su industria cementera alrededor de 1000 Ton de materiales resistentes a la abrasión, mismos que alcanzan precios hasta de 3000 sucres/kg, puesto que son aleaciones de alta aleación de cromo, principalmente. Se ha llegado a estimar que la generación de chatarra es de 1500 Ton/año, constituyendose en un rubro considerable de divisas que pueden evitarse de consumir en importación si se reciclan estos materiales a fin de restituir la forma de las bolas de molino y otras piezas de desgaste.

Es por esta circunstancia que en el presente trabajo se propone efectuar la refusión en hornos metalúrgicos de elevado nivel tecnológico con los que es posible conseguir tener muy poca alteración en la

composición química y por ende en las propiedades mecánicas. Esta acción daría inicio al abastecimiento de piezas de desgaste para el sector minero que está constituyéndose en la gran esperanza ecuatoriana para resolver la crisis económica.

LA INDUSTRIA EN EL ECUADOR

CAPITULO I

LA MOLIENDA EN LA INDUSTRIA

1.1 GENERALIDADES

Todo producto fino, impalpable, como el talco, leche en polvo, harinas, etc. han sufrido un proceso de transformación. Este proceso de transformación, también presente en la minería empleando cuerpos moledores para la obtención de su finura, se llama molienda, la cual significa desmenuzar un material hasta cierto grado de finura o granulometría que es necesaria en ciertos productos. La molienda se realiza con cuidado y rigor debido a que hay que controlar parámetros que pueden incidir en la calidad de los productos. En la industria del cemento que es el tema de interés de esta tesis, por ejemplo el producto final debe tener una finura ya establecida en la norma para cementos, que esta entre 2.100 - 3.500 cm^2/g , y además de otros requerimientos que a continuación se analizará.

La molienda es llevada a cabo generalmente en molinos tubulares (Figura 1), los cuales utilizan para la acción molturadora, barras, "cylpebs" y bolas. Los molinos son rotatorios, por el giro del cilindro del molino, el montón formado por los elementos moledores y el material, se eleva hasta un valor óptimo para su acción molturadora. La molienda se realiza por choque y rozamiento entre los cuerpos moledores y las paredes blindadas del molino.

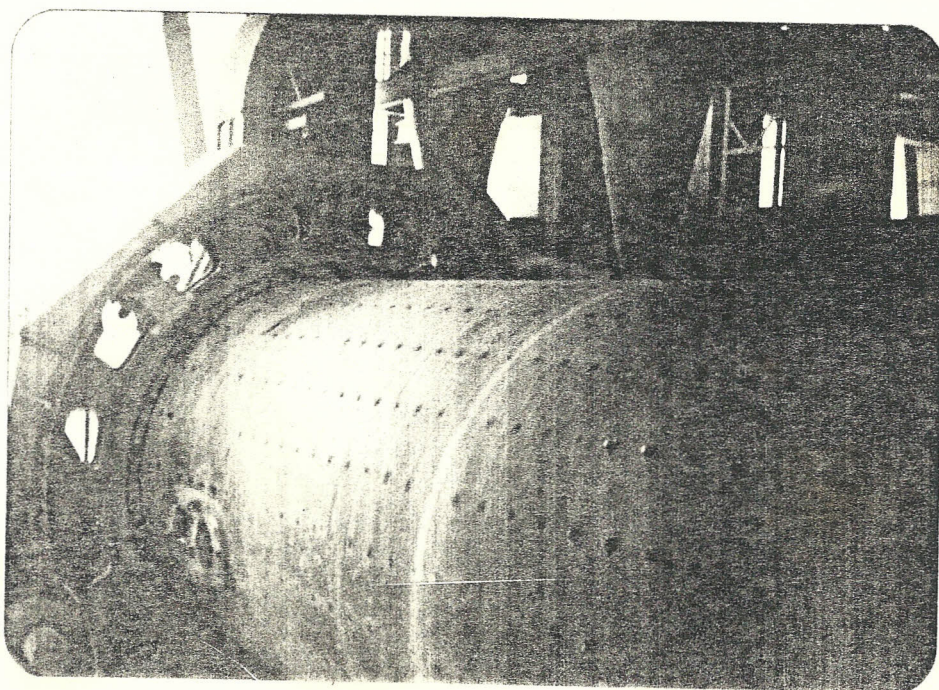


FIGURA 1 MOLINO TUBULAR

1.2 LA MOLIENDA EN LA PRODUCCION DE CEMENTO

Los primeros que se interesaron en la molienda fueron los romanos, eso da una idea desde que tiempos el hombre necesitó de este proceso. Los romanos hacían la molienda en vasijs (Figura 2), con unas cuantas libras de capacidad por hora. Esto se ha desarrollado con el paso del tiempo hasta lograr sistemas modernos de molienda con capacidades hasta de 400 - 500 t/h.

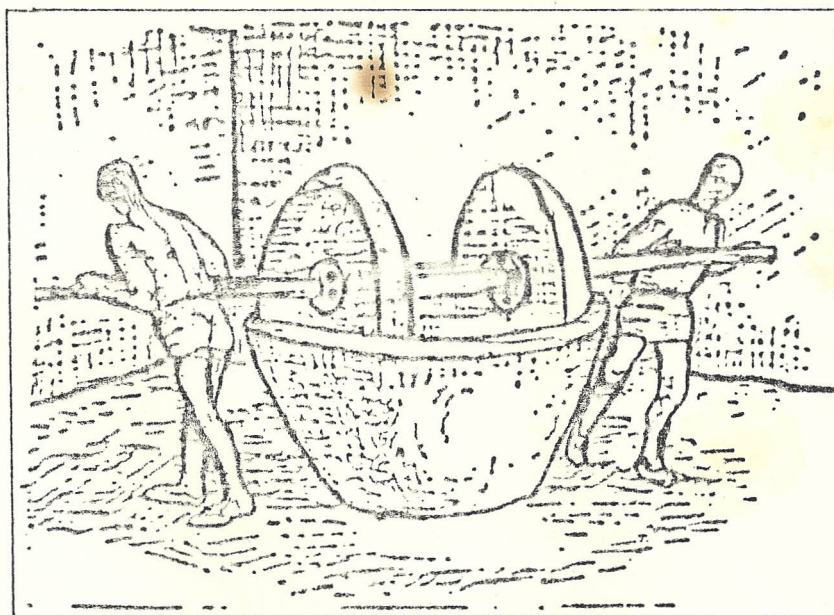


FIGURA 2 MOLIENDA EN VASIJA

Se logró desarrollar sistemas de molienda de crudo en escala industrial en el siglo XIX. El molino tubular que es de mayor uso en la industria cementera, se introduce entre los años 1890 - 1900, y posteriormente se desarrollan unos molinos de gran tamaño que se utilizan en las fábricas de cemento modernas, 5 m de diámetro y 20 m de longitud.

Entre los años 1920-1940 se desarrolla el molino de rodillos que es utilizado en la molienda del carbón, y que ahora se utiliza en la molienda del material crudo de cemento, y en los años 60-70 se instalan el molino autógeno. Hay otros sistemas que se utilizan en casos especiales y solo cuando se tratan de capacidades reducidas, como son los molinos vibratorios, o los molinos planetarios.

Todos los sistemas de molienda deben ser operados de tal forma que se obtenga la producción requerida así como la calidad de producto deseado, tomando en cuenta los costos relevantes de producción. A pesar de que existe un caudal considerable de experiencias acerca de la operación de molinos tubulares se observa con frecuencia que los molinos no son operados a su eficiencia máxima. Las posibles razones, no se limitan únicamente a composiciones inapropiadas de la carga de bolas o al posicionamiento impropio del separador, sino que

incluyen una serie de otros factores interrelacionados unos a otros, y responsables en forma global del buen o pobre funcionamiento del sistema de molienda.

La selección de un sistema de molienda depende básicamente de la calidad de cemento requerida y del respectivo consumo de energía eléctrica. Los requerimientos de calidad del cemento, tales como distribución del tamaño de las partículas y superficie específica, deben ser satisfechos. Una gran parte de los costos totales de operación en una planta de cemento se refieren al departamento de molienda de cemento, toda mejora por lo tanto, resulta en ahorros substanciales.

Varios sistemas de molienda han sido desarrollados a fin de cumplir con los requerimientos mencionados, entre ellos;

- sistema de molinos compuestos (Figura 3)
- sistema de molienda con elevadores de cangilones
- sistema de molienda con descarga central (Figura 4)
- sistema de molienda en dos etapas
- sistema de molienda con rodillos.

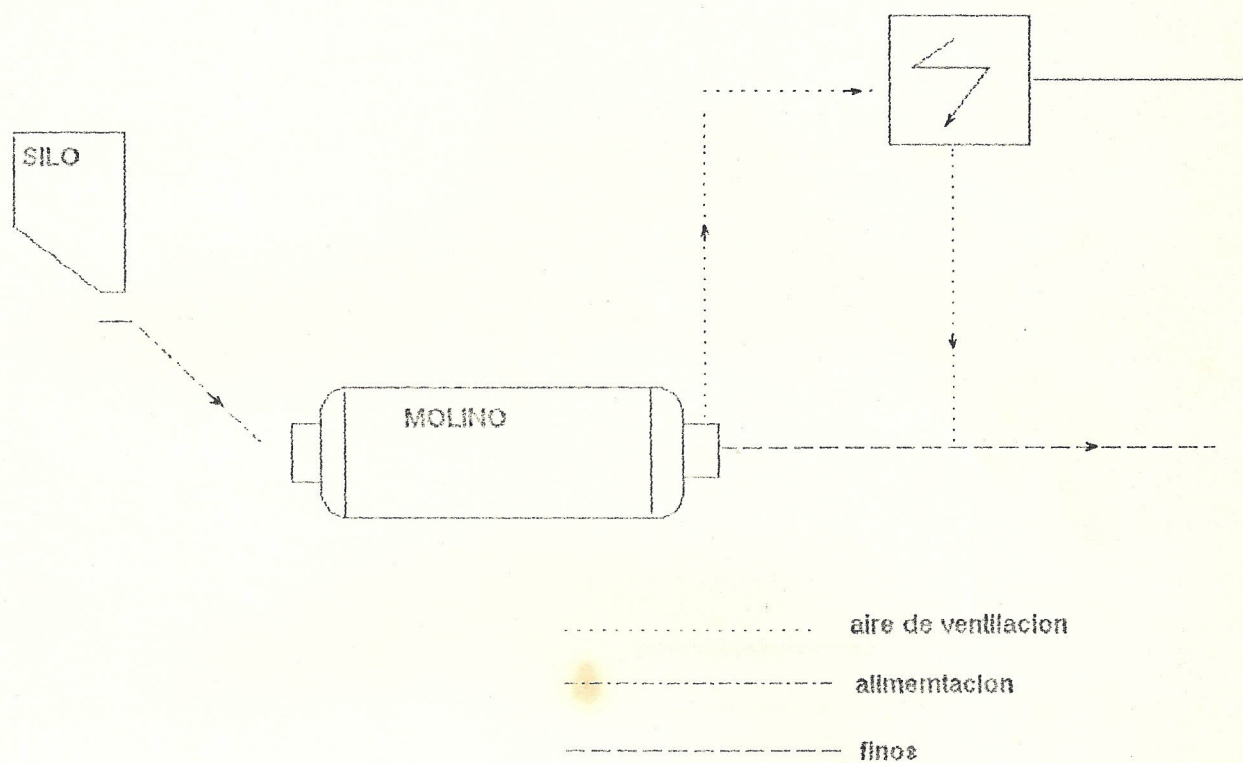


FIG. 3 SISTEMA DE MOLIENDA DE MOLINO COMPUESTO

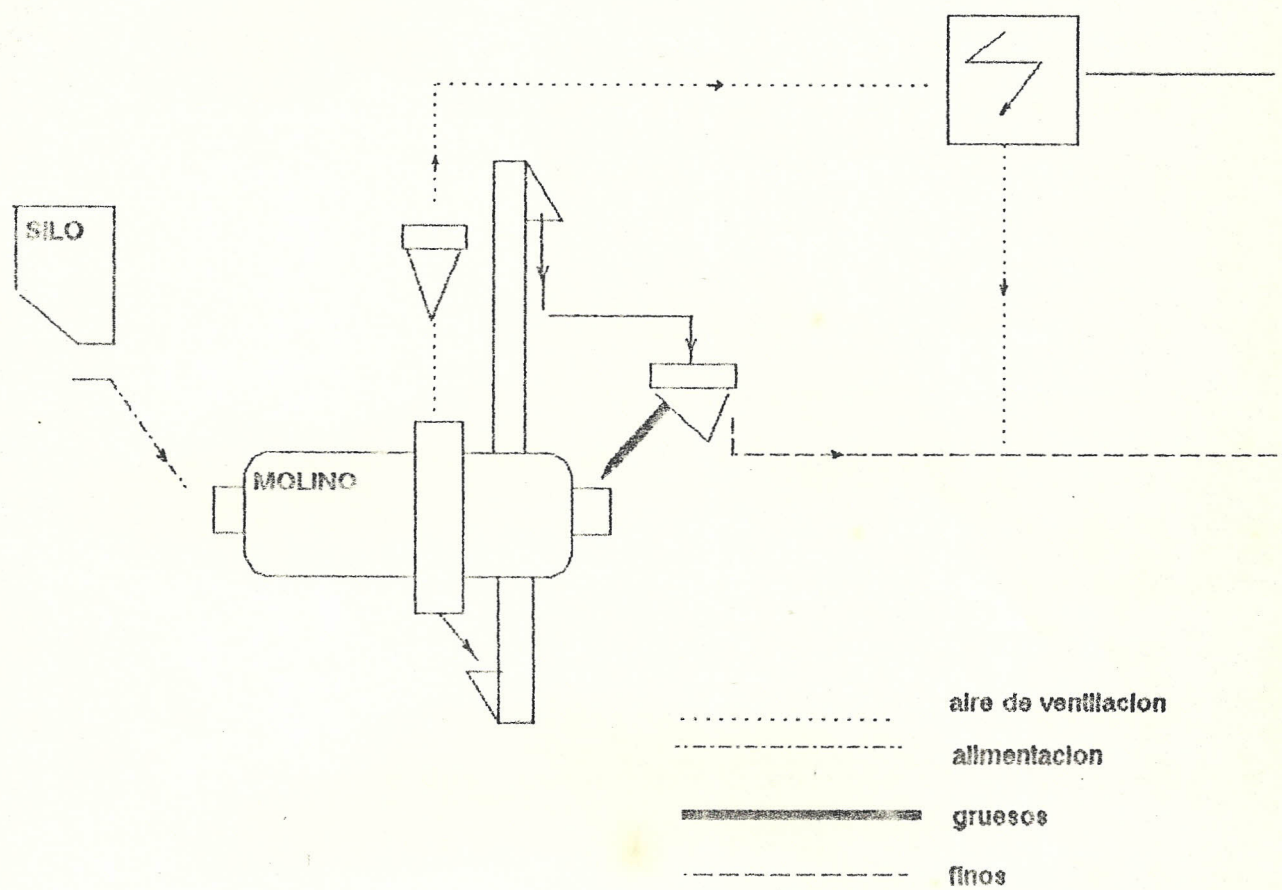


FIG. 4 SISTEMA DE MOLIENDA CON DESCARGA

CENTRAL

Los molinos tubulares son utilizados ya en el siglo XIX de un compartimiento, observando que en los molinos de un compartimiento la reducción de tamaño de las partículas se realizaba principalmente en el primer 20 - 30% de la longitud del molino, mientras que en el resto del molino es solo marginal.

Se introduce entonces el llamado molino compuesto, es decir una combinación de compartimientos individuales en un solo molino común. A fin de satisfacer las exigencias de finura del producto, los molinos están dotados con dos, tres y hasta cuatro compartimientos individuales. Los molinos en circuito cerrado que son aplicados en la actualidad consisten generalmente de un molino de dos compartimientos con descarga final (Fig 5), o con descarga central, esta última sin embargo es usada únicamente en casos especiales.

1.3 CUERPOS MOLEDORES: BOLAS Y RODILLOS

En los sistemas de molienda se utilizan cuerpos para moler, que son llamados cuerpos moledores y que pueden ser bolas, "cylpebs" y rodillos, los cuales presentan ventajas y desventajas. Considerando ésto, los cuerpos moledores -bolas- son las más recomendadas, ya que en la industria cementera se ha comprobado su rendimiento de desgaste y eficiencia de finura para la entrega del producto.

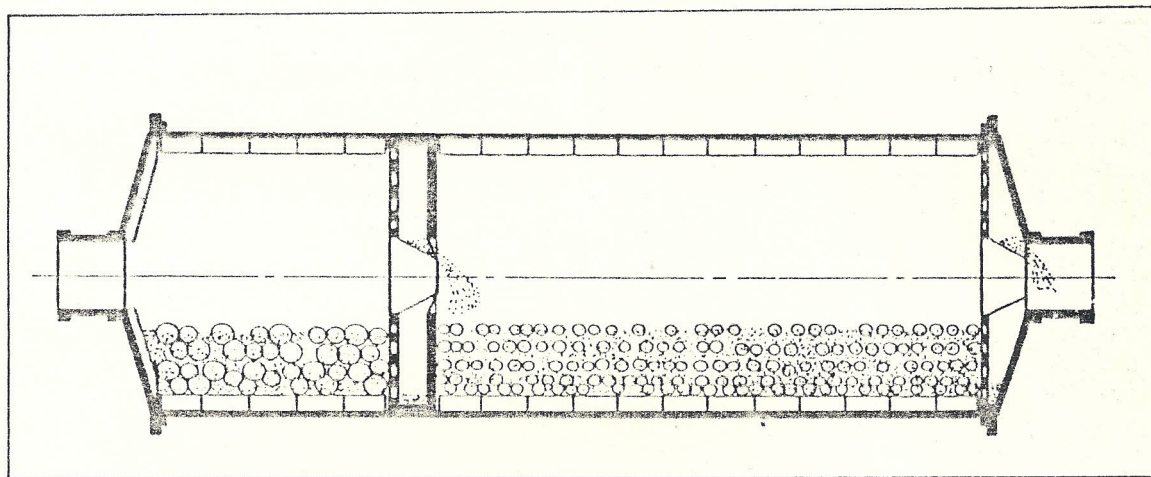


FIGURA 5 MOLINO CON DOS COMPARTIMIENTOS INDIVIDUALES

Una determinada dimensión de bolas puede desmenuzar materiales dentro de un margen bastante amplio para su granulometría, sin que influya de modo esencial el caudal del molino. Sin embargo, una desviación importante del tamaño óptimo de las bolas, merma la eficiencia del molino. Bolas demasiado pequeñas originan granos sobredimensionados en el producto, bolas demasiado gruesas originan superficies específicas demasiado pequeñas. La carga de bolas de un molino de cemento consiste de bolas molturadoras que tienen características de tamaño, peso, etc. (Tabla I), diferentes durezas (Tabla II).

TABLA I

DATOS ACERCA DE LAS BOLAS PARA MOLIENDA

Diametro bolas mm	Peso de una bola kg	#Bolas en 1000 kg	Peso 1m de bolas kg
100	4.115	243	4560
90	2.994	334	4590
80	2.107	474	4590
70	1.41	709	4640
60	0.889	1125	4660
50	0.514	1946	4708
40	0.263	3802	4760
30	0.111	9009	4850

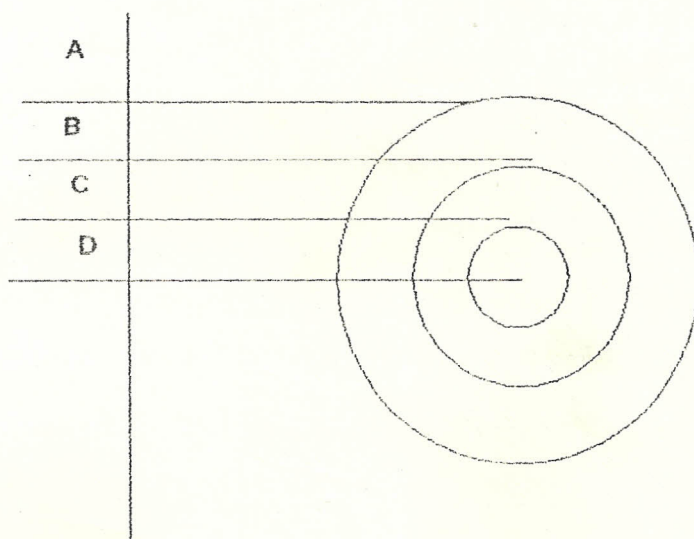
TABLA II

DUREZA DE LAS BOLAS PARA MOLIENTA EN SUS

DIVERSAS ZONAS

Diametro, mm.		40	50	60	80	90	100
Dureza RC	A	58	58	58	57	56	56
	B	58	58	58	57	56	56
	C	58	58	58	57	56	55
	D	57	57	57	57	56	55

ZONAS



Como se recordará el molino tubular es de dos compartimientos cada uno de los cuales está perfectamente identificado por su finura de cemento, la molienda gruesa se realiza normalmente con bolas de entre 50 y 100 mm. de diámetro, mientras que la molienda fina se realiza con bolas de entre 15 y 50 mm. de diámetro. Las bolas presentan diferentes tamaños y composiciones ya que dependen de varios factores, entre ellos:

- tamaño máximo de material de alimentación,
- finura del producto,
- diámetro del molino, longitud del molino,
- molturabilidad y estructura mineralógica del material de alimentación,
- sistema de molienda del molino.

En el proceso ya de la molienda, y de la etapa de que se trate, las bolas deben presentar propiedades adecuadas de resistencia y deben resistir:

- las fuerzas de impacto de las bolas mismas (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)

Para mantener una producción constante y óptima, debe seleccionarse tamaños adecuados de bolas, así como la calidad del material respectivo.

1.4 MATERIALES UTILIZADOS EN LAS BOLAS

Las bolas, como se ha escrito, deben satisfacer algunos requerimientos entre los cuales está el desgaste abrasivo que se encuentra presente por la acción molturadora de las bolas sobre el material, por lo tanto se debe conocer de que material se encuentran constituidas estas bolas, ya que si no lo hace, se tendrá problemas en el desgaste excesivo de material y por lo tanto un costo elevado en compra de cuerpos moledores, la Tabla III muestra la calidad de bolas por los fabricantes de cemento.

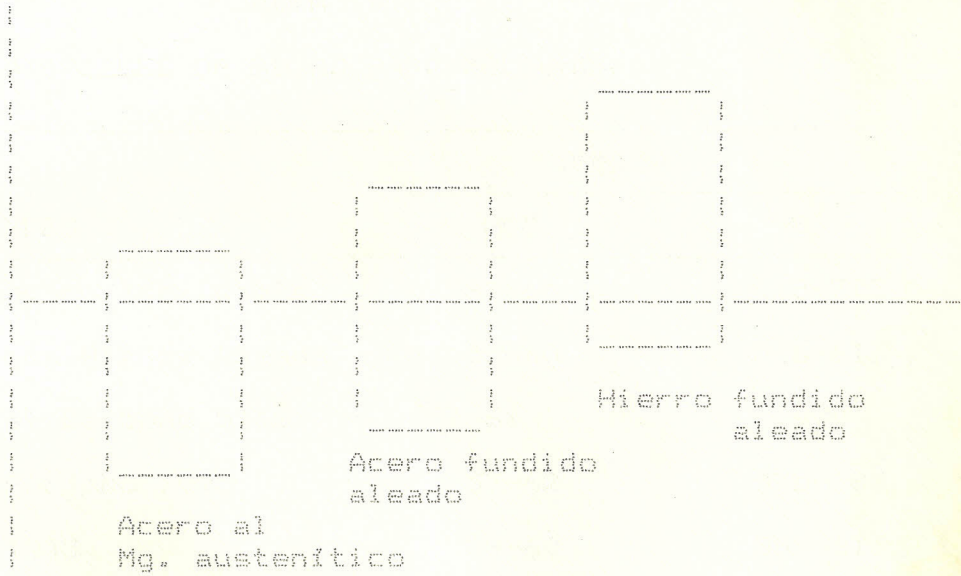
TABLA III

CALIDAD DE MATERIAL EN LA ELAVORACION DE BOLAS

Calidad del material	Tasa específica de desgaste	
	Bolas pequeñas	Bolas grandes
Bolas Forjadas (g/t)	60-450	300-1200
Bolas al bajo cromo (g/t)	150-450	-
Bolas al alto cromo (g/t)	15-50	30-70

En molino de bolas el desgaste específico de abrasión entre las bolas molidoras y cubiertas de los molinos es que se rompe o se desprende en servicio. En otras palabras, el material debe mostrar buena resistencia al desgaste en abrasión de moledura. En la Figura 6 se representa la resistencia al desgaste por ralladura y dureza de materiales fundidos.

Mejor resistencia
al desgaste contra
rayaduras



Mejor tenacidad

FIGURA 6 RESISTENCIA AL DESGASTE DE MATERIALES FUNDIDOS

En la Tabla IV, los materiales como el acero inoxidable y la fundición blanca aleada presentan mejores resistencias al desgaste, pero el acero inoxidable es muy caro por lo que se utiliza la fundición blanca aleada en muchas industrias cementeras. Este tipo de fundición es la que interesa analizar y desarrollar por lo que se analiza más detalladamente en el capítulo siguiente.

TABLA IV
MATERIALES DE BOLAS PARA MOLIENDA

MATERIALES	DUREZA	
	HRC	HB
440 C Acero Inoxidable	62-64	688-722
Fundición Blanca Aleada	55-60	546-613
Acero al Carbono 5165	61	670
Acero Forjado 1095	57-62	575-688
Acero 1045	58-60	587-613
Fundición Blanca	49-50	464-475

El Ni-Hard es una fundición blanca con, aproximadamente, un 2 % Cr y 4 % Ni y bajo contenido de silicio. El Ni-Hard es resistente al desgaste por deslizamiento, por proyección, o por chorro, sin embargo lo es poco contra el desgaste por choque. Hay bolas de molienda de Ni-Hard hasta el diámetro máximo de 60 mm a las que hay que suponer cuádruple duración que las de las bolas de acero forjado y endurecido.

CAPITULO II

FUNDICIONES BLANCAS

2.1 GENERALIDADES

Las fundiciones blancas actualmente son muy utilizadas y empleadas más que todo en partes donde está propenso el desgaste abrasivo, en el caso particular, se encuentra presente en el desgaste de material que sufren los cuerpos moledores, es decir las bolas por su acción molturadora.

Si la composición del hierro fundido es apropiada al enfriamiento rápido durante la solidificación del metal, éste solidificará con una combinación total de hierro blanco con carburos de hierro. Este compuesto también llamado cementita es dura y frágil, constituida por una microestructura de hierro blanco, por eso es utilizado en revestimientos de molinos, grillas, y principalmente cuerpos moledores.

En su composición química, los elementos aleantes tienen una gran importancia, ya que por más mínimo que sea la variación de porcentaje de éstos, sus propiedades variarán. A continuación se revisa los elementos aleantes principales.

El carbono combinado como componente del carburo Fe_3C , determina en gran parte las propiedades resistencia-dureza de las piezas fundidas. Cuando el hierro contiene un porcentaje más elevado de C, una parte del mismo se cristaliza en el momento de la solidificación, o inmediatamente después de ella, en forma de grafito. El grafito interpuesto en el hierro libera su constituyente, obteniendo una estructura disgregada y esponjosa, disminuyendo por lo tanto la resistencia a la dureza, y densidad de la fundición, aumentando por otro lado la posibilidad de su maquinado. Ahora si se tiene grafito en pequeña cantidad, estas resultan duras y frágiles, no consiguiendo trabajar con máquinas herramientas normales.

Como se ve, la presencia de cantidades mayores o menores de carbono tienen una influencia profunda sobre las propiedades del hierro, además es importante determinar en que forma aparece este elemento en el metal fundido, es decir, que es necesario examinar su microestructura.

La metalografía moderna facilita los medios para verificar la estructura de los metales por medio de un microscopio. Por este método se puede determinar el tamaño y la forma de granos y así como las posibles fallas de la pieza fundida.

El silicio tiene un poderoso efecto de ablandamiento, su presencia en la fundición reduce la capacidad de ésta para retener carburos en combinación química. Con muy poco silicio el hierro retiene todo su carbono en combinación y produce el hierro blanco.

El manganeso, cromo, molibdeno, titanio y el vanadio promueven la retención de carbono en la forma combinada (estabilizadores de carburos) y contrarrestan la acción del silicio.

El níquel y el cobre mejoran la matriz e incrementa la resistencia del hierro, pero no disminuye la cantidad de grafito presente y conserva la facilidad del hierro para trabajar en la máquina.

2.2 VARIEDAD

Las fundiciones blancas presentan una gran variedad de composiciones (Figura 7), las cuales son muy buenas para resistir el desgaste abrasivo.

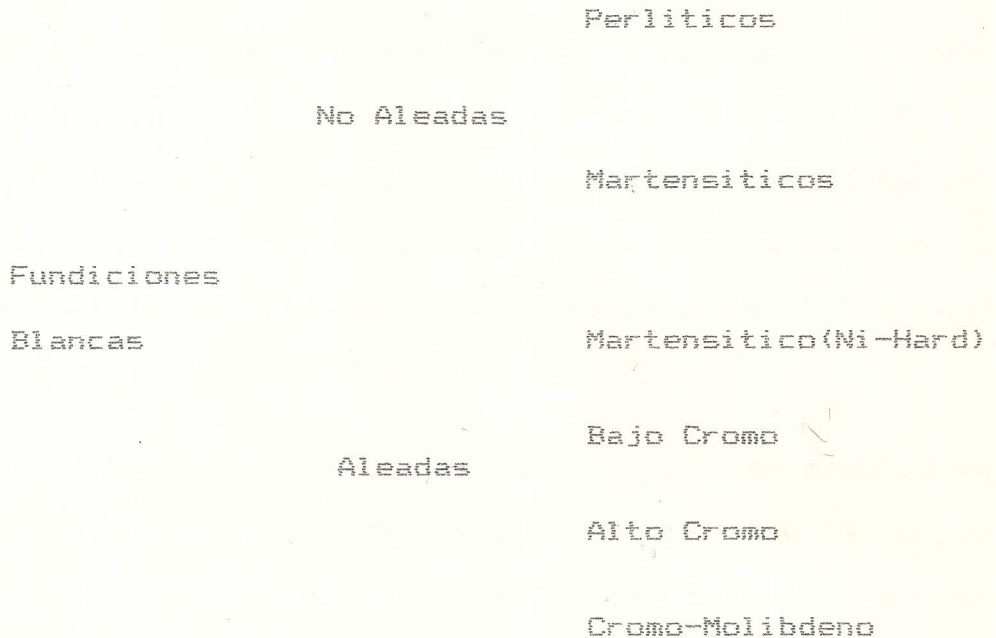


FIGURA 7 VARIEDAD DE FUNDICIONES BLANCAS

Los hierros blancos sin alear son comunmente producidos y proveen un servicio satisfactorio donde el material abrasivo no es fino y donde el reemplazo no es frecuente ni caro. Estos desarrollan una dureza en el rango de 350 a 550 HB. Su microestructura consiste en carburos de hierros primarios con una microdureza de 900-1200 HV, en una matriz perlítica con microdureza de 220-300 HV.

Inicialmente se utilizaban composiciones de bajo carbono, con 1.6 % Si, y elementos de aleación idénticas a los hierros fundidos para maleabilizar. Luego se desarrollaron otras composiciones más resistentes a la abrasión, con un 2.8 % a 3.6 % C, bajo Si, y elementos adicionales supresores de grafito, que aumentan la dureza de la matriz y refinan la perlita, siendo principalmente el Cr, como también el Ni, Mo y Cu.

- Los hierros blancos aleados son especialmente calificados para aplicaciones de resistencia a la abrasión, por el predominio de carburos en su microestructura proveyendo alta dureza, necesario en trituradoras y molinos. La estructura de la matriz puede ser controlada por el contenido aleante y por el tratamiento térmico, prefiriendo el de mejor costo balanceando entre la resistencia a la abrasión y la tenacidad requerida para resistir cargas de impacto repetitivas. Estos hierros son fundidos a las normas requeridas para trituradoras y molinos, o para manejo de materiales abrasivos.

Los hierros blancos aleados, todos ellos contienen cromo para prevenir la formación de grafito y para asegurar la estabilidad del carburo en la microestructura, muchos de estos hierros fundidos también contienen níquel, molibdeno, cobre o

combinaciones de estos elementos metálicos para prevenir o para minimizar la formación de perlita en la matriz, que es una fase no deseable por ser de baja dureza.

Surge entonces una revolución de estos materiales como los hierros fundidos blancos de matriz martensítica. Los primeros en aparecer fueron los hierros fundidos al Ni y Cr, denominados genericamente Ni-Hard, estos materiales tenían Ni suficientemente alto para que las dendritas de austenita se transformasen en una mezcla de austenita retenida + martensita, dependiendo del espesor.

En los hierros blancos aleados martensíticos, se desarrollan durezas en el rango de 500 a 700 HV. La dureza del carburo permanece en el nivel de 900 a 1200 HV, mientras que la martensita (asociada con alguna austenita retenida) exhibe microdurezas comprendidas entre 600 y 700 HV. Para diversas aplicaciones de resistencia a la abrasión, el hierro blanco aleado con matriz martensita proporciona el mejor servicio a bajo costo.

La especificación de la ASTM A532 cubre la composición y dureza de los hierros blancos aleados resistentes a la abrasión (Tabla V).

TABLA V

COMPOSICION DE HIERROS BLANCOS ALEADOS RESISTENTES A LA
ABRASION BAJO ESPECIFICACION ASTM A532

Clase	Tipo	Designation	Carbon	Manganese	Silicio	Niquel	Cromo	Molibdeno
I	A	Ni-Cr AC	3.0-3.6	1.3max	0.8max	3.3-5.0	1.4-4.0	1.0max *
I	B	Ni-Cr BC	2.5-3.0	1.3max	0.8max	3.3-5.0	1.4-4.0	1.0max *
I	C	Ni-Cr	2.9-3.7	1.3max	0.8max	2.7-4.0	1.1-1.5	1.0max
I	D	Ni-A Cr	2.5-3.6	1.3max	1.0-2.2	5.0-7.0	7.0-11	1.0max **
II	A	12% Cr	2.4-2.8	0.5-1.5	1.0max	0.5max	11-14	0.5-1.0***
II	B	15% Cr-Mo BC	2.4-2.8	0.5-1.5	1.0max	0.5max	14-18	1.0-3.0***
II	C	15% Cr-Mo AC	2.8-3.6	0.5-1.5	1.0max	0.5max	14-18	2.3-3.5***
II	D	20% Cr-Mo BC	2.0-2.6	0.5-1.5	1.0max	1.5max	18-23	1.5max ***
II	E	20% Cr-Mo AC	2.6-3.2	0.5-1.5	1.0max	1.5max	18-23	1.0-2.0***
III	A	25% Cr	2.3-3.0	0.5-1.5	1.0max	1.5max	23-28	1.5max ***

* Max.: 0.30% fosforo, 0.15% azufre.

** Max.: 0.10% fosforo, 0.15% azufre.

*** Max.: 10% fosforo, 0.06 azufre, 1.2% cobre.

En conclusión con relación a la calidad de los materiales usados en molienda es deseable que diseñadores, metalurgistas y fundidores especifiquen la composición óptima, tratamiento térmico y práctica de fundición para desarrollar el diseño más apropiado para elementos resistentes que sean sometidos al desgaste abrasivo con lo que se puede conseguir también eficiencia económica.

2.3 FUNDICIONES BLANCAS AL ALTO CONTENIDO DE CROMO

Las fundiciones blancas aleadas al cromo recaen en dos grandes grupos:

- a) El grupo aleado de bajo cromo con 1 a 4 % Cr y de 3 a 5 % Ni, con una modificación que contiene 7 a 11 % Cr
- b) Hierro al alto cromo que contiene 12 a 28 % Cr con 1 a 3 % Mo.

Las fundiciones al alto cromo, como muestra la Tabla V, son las más recomendables para los cuerpos molidores por su alta resistencia al desgaste abrasivo, ya que presentan una elevada dureza siendo representada en la Tabla VI.

Desde hace mucho tiempo se conoce las ventajas que se logra al adicionar cromo en las aleaciones Fe-C. El cromo entra en solución en la matriz y sustituye al hierro en la cementita hasta una concentración de 15% aproximadamente. Para concentraciones superiores de cromo, la cementita es inestable y es sustituida por un carburo hexagonal de composición M_7C_3 , en la cual M representa los elementos metálicos que entran en el carburo (en mayor parte el cromo y el hierro, pero también otros elementos presentes, en su caso, en la aleación considerada).

TABLA VI
VALORES TÍPICOS DE MICROCONSTITUYENTES
EN FUNDICIONES DE ALTO CROMO

Carburos	HV
M_3C	840 - 1100
M_7C_3	1200 - 1800
M O_2C	1500
MATRIZ	
Ferrita	70 - 200
Perlita	300 - 400
Austenita	300 - 600
Martensita	580 - 1000

Las aleaciones pertenecientes a esta familia son particularmente interesantes, habiendo sido objeto de estudio durante el transcurso de la primera guerra mundial, con objeto de encontrar una aleación capaz de sustituir a los aceros de corte rápido y que, si bien no han manifestado poseer las características necesarias para tal aplicación, han encontrado, por el contrario, numerosas aplicaciones como herramientas para el trabajo en frío.

Los aceros de 1.2 y 2.2 % C y 12 % Cr con adiciones eventuales de molibdeno y de vanadio, son ya perfectamente conocidas. Acto seguido, hacia los años 30, aparecen las primeras aplicaciones de estas aleaciones en forma de piezas moldeadas destinadas a resistir el desgaste abrasivo, y su desarrollo ha sido particularmente espectacular en el campo de la fabricación de cementos.

Durante estos últimos años, estas aleaciones han venido siendo utilizadas para la fabricación de cilindros de laminadores de los trenes de laminación continua de bandas en caliente; pero no es menos cierto que su empleo tiende a generalizarse. El campo de composición química de las aleaciones consideradas ha sido representado en la Figura 8 respecto a la proyección de la superficie del liquidus del sistema Fe-Cr-C.

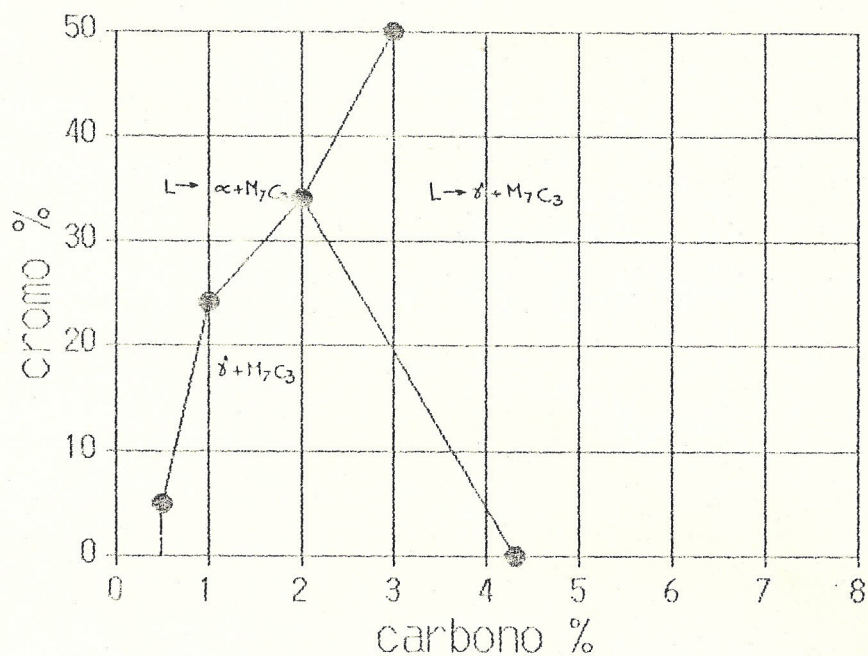


FIGURA 8 DIAGRAMA Fe - Cr - C

Los contenidos de carbono y de cromo oscilan dentro de los límites siguientes:

$$1.2 \% \leq C \leq 4.3 \% \quad \text{y} \quad 6 \% \leq Cr \leq 28 \%$$

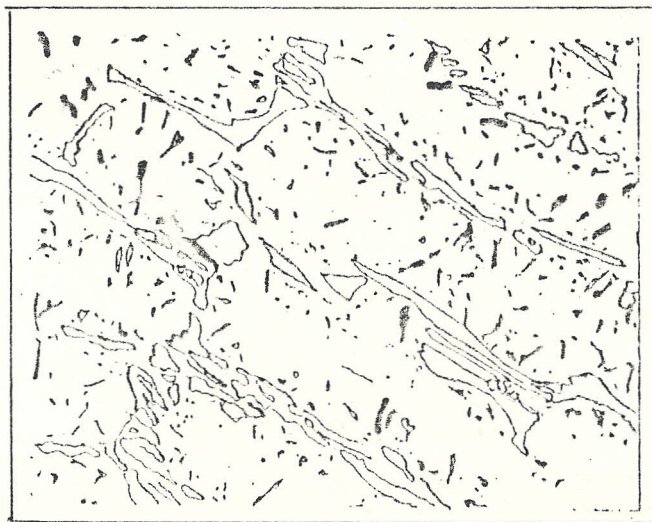
con, en su caso, las adiciones de silicio, de molibdeno y de vanadio, así elementos gammágenos, como por ejemplo, el manganeso, el níquel y el cobre.

La microestructura de estas aleaciones está formada por carburos eutécticos y, llegado el caso, de carburos primarios si el contenido de carbono es suficiente, y de una matriz de austenita o de sus productos de descomposición con carburos secundarios. La cantidad de carburos M_7C_3 formada depende, virtualmente, del contenido de carbono y de cromo, y queda perfectamente representada por la relación:

$$\% \text{ carburos} = 12.33 (\% C) + 0.55 (\% Cr) - 15.2$$

La morfología de los carburos eutécticos queda dominada por el volumen de fase de primera solidificación.

Cuando la austenita deja un volumen residual reducido tras la solidificación, el carburo eutéctico se reúne en los espacios interdendríticos y tiene un aspecto intergranular (Fig. 9). Cuando el volumen residual es más elevado, la eutéctica presenta un aspecto radiante (Fig. 10), y acto seguido toma un aspecto laminar (Fig. 11) cuando se desarrollan libremente. Para las composiciones hipereutécticas, los carburos primarios se presentan en forma de gruesos carburos hexagonales (Fig. 12).

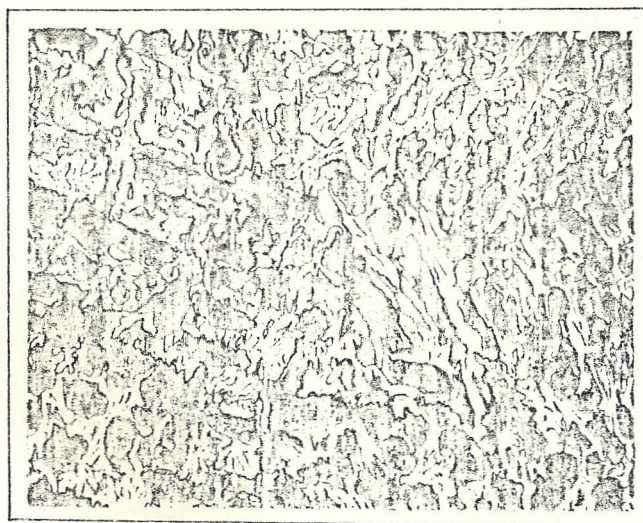


REACTIVO: PICRAL

AUMENTO: 750X

FIGURA 9

HIERRO BLANCO ALEADO, MATRIZ AUSTENITA
CON CARBUROS INFERIOR AL 20 %.

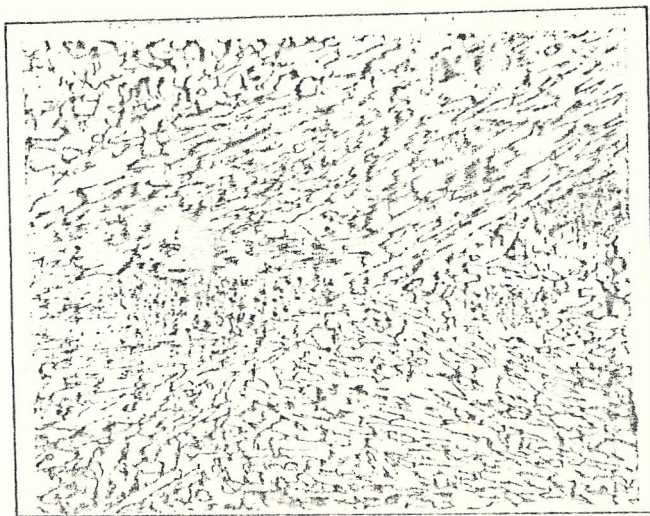


REACTIVO: PICRAL

AUMENTO: 150X

FIGURA 10

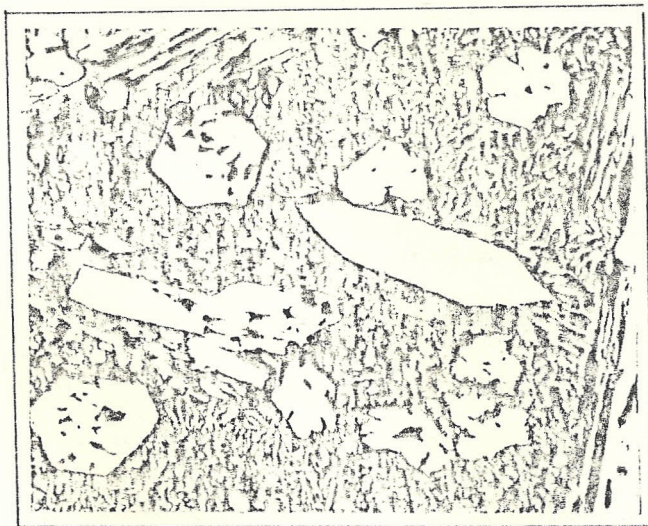
HIERRO BLANCO ALEADO, MATRIZ PERLITICA
CON CARBUROS COMPRENDIDOS ENTRE 20-30%



REACTIVO: PICRAL

AUMENTO: 150X

FIGURA 11 HIERRO BLANCO ALEADO, MATRIZ AUSTENITA
CON INICIO DE TRANSFORMACION A PERLITA
CON UN PORCENTAJE DE 35% DE CARBUROS.



REACTIVO: PICRAL

AUMENTO: 150X

FIGURA 12 HIERRO BLANCO ALEADO, MATRIZ PERLITICA
CON UN PORCENTAJE DE 50 % APROX.

La composición química de estos carburos M_7C_3 depende de su cantidad y de la relación Cr/C de la aleación, siendo el hierro el elemento que en mayor proporción sustituye al cromo. Cabe tener en cuenta que otros elementos, entre los cuales figura el molibdeno, puede también sustituir al cromo en cantidad apreciable.

Los elementos carburígenos distintos del cromo, como por ejemplo el vanadio y el molibdeno, pueden también formar carburos. Los hierros blancos presentan una estructura perlítica siempre que el contenido de cromo y de otros elementos aleantes disueltos en la matriz, sean bajos, y la templeabilidad del material no es suficiente para evitar la formación de perlita.

La mayor parte de los hierros fundidos de alto cromo son tratados termicamente. Este tratamiento consiste en acercarse a temperaturas en que la precipitación de carburos de cromo secundarios empobrecen la matriz metálica con el aumento de la temperatura M_s . A mayores temperaturas de desestabilización resultará en menor cantidad los carburos precipitados y mayor cantidad de austenita retenida. A menores temperaturas resultará una gran cantidad de carburos secundarios precipitados y consecuentemente empobrecimiento de la matriz. La martensita de menor contenido de carbono presentará menor dureza.

De esta forma existe una temperatura óptima de desestabilización para cada composición del hierro fundido. Del enfriamiento obtenido, la microestructura es totalmente martensítica y los carburos de cromo esferoidizados.

Al mismo tiempo del tratamiento de desestabilización y enfriamiento, ocurre la precipitación de carburos secundarios a una baja temperatura de 700 a 900 °C. Esta precipitación ocurre antes de transformaciones perlíticas, bainíticas y martensíticas y empobrecen de la misma forma la matriz.

Velocidades de enfriamiento menores permiten precipitaciones más intensas de carburos y transformaciones de austenita residual en martensita. Para velocidades de enfriamiento mayores, da menor tiempo para la difusión, menor precipitación y mayor cantidades de austenita retenida. Así mismo para cada composición y para cada espesor de placas las condiciones de tratamiento térmico cambian.

Hay controversia literaria en cuanto al efecto de la austenita retenida, que da la resistencia al desgaste de los hierros blancos. La mayor parte de trabajos considera perjudicial su presencia. Esto se debe a la posibilidad de que durante el servicio, se transforme en martensita con expansión volumétrica

asociada al orden de 3% incluido tensiones que pueden truncar el material. Algunos trabajos, registran el efecto benéfico de austenita retenida a la resistencia de desgaste de los hierros fundidos blancos. Estas discrepancias de comportamiento pueden estar ligadas a diferentes condiciones de ensayo.

2.4 PROPIEDADES

Las propiedades de las fundiciones blancas tanto físicas como mecánicas son mostradas en la Tabla VII son muy importantes, y es preciso conocer para aprovechar al máximo todas las ventajas que presentan, ya que en ocasiones se descuidan algunas de ellas. Las fundiciones blancas aleadas, son especialmente calificadas para aplicaciones de resistencia al desgaste, la Tabla VIII, indica los requerimientos mecánicos que se logra al ser fundido estos materiales. El predominio de carburos en la microestructura provee alta dureza que es necesario en este tipo de materiales.

Cuando se compara la resistencia del desgaste de materiales metálicos diferentes, la dureza del material abrasivo también tiene un efecto significativo. Por ejemplo las bolas de hierro blanco al alto cromo, pueden tener una resistencia diez veces más que las bolas forjadas de acero, usadas para moler clinker de cemento.

PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS DE LOS HIERROS BLANCOS MARTENSITICOS

Propiedades	Bajo Carbon: Alta Tenacidad		Alto Carbon: Alta Dureza	
	Colado en arena	Colado en coquilla	Colado en arena	Colado en coquilla
HB, bola de carburo de tungsteno	525-625	575-675	550-650	600-725
Deflecc. Transv. cm.	0.25-0.30	0.25-0.30	0.2-0.3	0.2-0.3
Resist. Ruptura Transv. kg/cm	5-6	6-7.7	4.4-5.5	5-7.45
Resist. Tension kg/cm	2.8-3.5	3.5-4.4	2.53-3.1	2.8-4.2
Gravedad Especifica g/cm	7.6-7.7		7.6-7.7	
Comportamiento Magnetico	Magnetico		Magnetico	
Color de Fractura	Blanca		Blanca	

REQUERIMIENTOS MECANICOS BAJO ESPECIFICACIONES DE ASTM A532

Clase	Tipo	Designacion	Dureza Brinell				Espesor tipico max mm
			Colado en arena, min	Colado en coquilla, min	Endurecido min	Ablandado max	
I	A	Ni-Cr-AC	550	600			200
I	B	Ni-Cr-BC	550	600			200
I	C	Ni-Cr	550	600			75 dia bola
I	D	Ni-A Cr	550	500	600	400	300
II	A	12% Cr	550		600	400	25 dia bola
II	B	15% Cr-Mo-BC	450		600	400	100
II	C	15% Cr-Mo-AC	550		600	400	75
II	D	20% Cr-Mo-BC	450		600	400	200
II	E	20% Cr-Mo-AC	450		600	400	300
III	A	25% Cr	450		600	400	200

En molienda de feldespato (dureza del orden 550 HV), la velocidad suele decrecer de dos o tres a uno. En molienda de cuarzo (Tabla IX) o minerales, contienen un alto porcentaje de cuarzo (el cual es considerado más duro que el feldespato) la superioridad de las bolas de hierro fundido al alto cromo sobre las bolas forjadas de acero puede ser del orden de 20 o 30 % solamente.

TABLA IX
DUREZA DE ALGUNOS MINERALES

Designacion	Escala de Mohs
Yeso	2
Caliza	3
Fluorita	4
Feldespato	6
Cuarzo	7
Topacio	8
Alumina (Al ₂ O ₃)	9
Diamante	10

En general las bolas de hierro fundido al alto cromo son más económicas solo para molienda de minerales de dureza 7 en la escala de Mohs (ver Tabla IX) o menores. Consecuentemente, las bolas y placas de molino de hierro fundido al alto cromo son usados ampliamente en la industria del cemento.

El efecto de la microestructura sobre la resistencia al impacto es muy importante estudiarlos, los hierros blancos de bajo cromo o sin alear, son frágiles porque su microestructura consiste esencialmente de una red continua de carburos M_3C y M_7C_3 rodeados de dendritas de austenita o productos de transformación. Cuando el contenido de cromo del hierro excede aproximadamente 10 % toman lugares inversos y la estructura consiste principalmente de carburos eutécticos del tipo M_7C_3 , rodeadas por austenita o productos en transformación. Por lo tanto, la resistencia al impacto de los hierros fundidos blancos al alto cromo dependen de la dureza de la matriz, más que de los carburos. En condiciones desfavorables de enfriamiento, la mayor parte o todo de la austenita se transforma a martensita el cual con el temple subsecuente adquiere tenacidad. Así, los hierros fundidos blancos hipoeutécticos cuya microestructura consiste esencialmente de carburos M_7C_3 de matriz martensita es relativamente tenaz.

El tamaño de grano también afecta la resistencia al impacto, el grano fino resiste mejor el impacto, una estructura de grano fino puede ser obtenida a través de un rápido enfriamiento en la solidificación, semejante como que toma lugar en paredes fundidas delgadas o cuando el hierro solidifica contra una coquilla metálica. Aparentemente el bismuto, telurio, vanadio producen granos de tamaño fino.

2.5 RESISTENCIA AL DESGASTE POR ABRASION E IMPACTO

Una vez que se ha analizado las propiedades de las fundiciones blancas y especialmente la influencia importante de la microestructura y de los microconstituyentes, es necesario enfocar estas propiedades en la incidencia del desarrollo de la molienda y lógicamente estudiando la naturaleza del desgaste y el impacto.

El desgaste es definido como la pérdida progresiva del material de la superficie de un cuerpo sólido como resultado de influencias mecánicas, esto es contacto y movimiento relativo con otro cuerpo en forma sólida, líquida o gaseosa. En el campo de trabajo, el desgaste aparece en cualquier parte en donde haya cualquier tipo de fricción, donde los minerales sean excavados, reducidos, transportados, mezclados o procesados en cualquier forma. Si se logra en un caso reducir el desgaste efectivamente,

por ejemplo utilizando un material de mayor dureza o resistencica, puede resultar un incremento de desgaste en otro lugar. Si se estudia más de cerca, se hace claro que no existe tal cosa como "resistencia al desgaste" como una propiedad específica del material en el sentido de resistencia a la tensión o grados de dureza. La interacción de varios parámetros que influyen en el comportamiento del sistema de tres cuerpos, es complejo. La subdivisión sistemática de los elementos fundamentales de un sistema de tres cuerpos que se muestra en la Figura 13 es una ayuda para entenderlo.

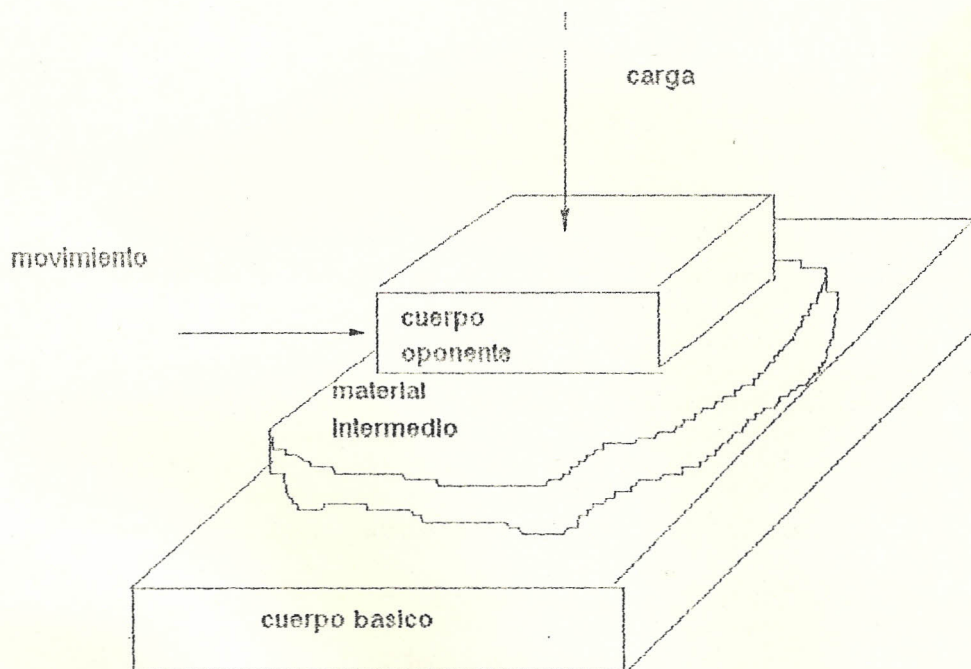


FIGURA 13 SUBDIVISION ESQUEMATICA DE UN SISTEMA DE
TRES CUERPOS

El material de configuración fija (cuerpo básico y posible cuerpo oponente) está sujeto a esfuerzo bajo la acción del material intermedio (sólido, líquido, gaseoso o mixto), por la energía mecánica aplicada manifestado como carga y movimiento.

Cada uno de estos cinco elementos están determinados en conjunto por un número prácticamente incalculable de características, de las cuales algunas de las más importantes son conocidas. La forma en que se aplica la energía - deslizamiento, rodadura, impacto, flujo - la proporción recibida, su distribución en los componentes en cuestión y la concentración, tienen una influencia decisiva en el trayecto del desgaste.

El tipo de desgaste que interesa es el llamado desgaste abrasivo que implica el desplazamiento y la separación de las partículas mecánicamente de una superficie metálica, puede producirse por contacto de un abrasivo metálico o no metálico. El desgaste abrasivo ocurre cuando las partículas duras se deslizan o ruedan bajo presión a través de una superficie, o cuando una superficie dura se frota a través de otra. Las partículas desgastadas por rozamiento del objeto más duro tienden a rasguñar o acanalar al material más suave.

Cuando la abrasión toma lugar bajo cargas superficiales elevadas como en molinos de cemento de bolas o barras y en bolas moledoras, la acción abrasiva es más compleja, es decir que, el diámetro tendrá una disminución proporcional como muestra la figura 14.

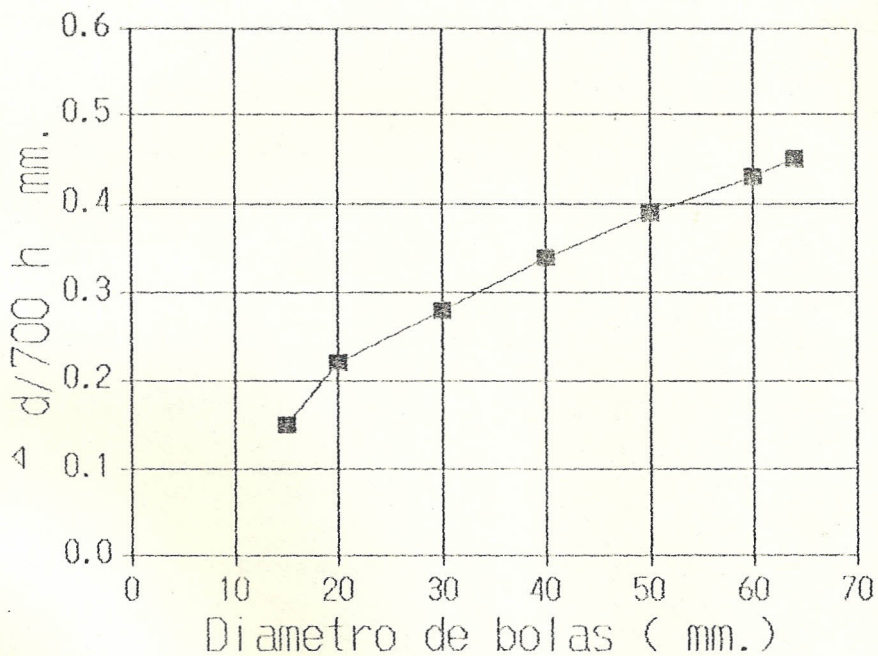


FIGURA 14 DISMINUCION DEL DIAMETRO DE BOLAS MOLEDORAS DESPUES DE 700 h DE TRABAJO

El abrasivo es completamente reducido de tamaño o de fragmentos pequeños, como resultado de esto, la acción comienza arrancando y deformando la superficie bajo las fuerzas que conducen a las grandes partículas contra otras llegando a transformarse en cortantes y rayantes cuando estas partículas son finas y de mayor ángulo, convirtiéndose en partículas abrasivas afiladas y con una orientación apropiadas llegando a desprender material por acción cortante, el resultado es diminutas virutas parecidas a un proceso de maquinado.

Como se ha mencionado anteriormente, la resistencia a la abrasión es una propiedad específica de un metal o aleación, pero implica las condiciones bajo las cuales es usado. La habilidad de una parte a resistir, pérdida de peso debido a la abrasión, depende de su microestructura, las operaciones actuales en la cual las partes están implicadas y la clase y tamaño del material que está siendo movido, triturado o molido.

En la mayoría de las operaciones el criterio de valor es la vida útil de la parte, en aplicaciones de trituradoras y molinos la vida de una parte puede ser limitada por su capacidad de soportar cargas de impacto repetitivas sin llegar a fracturarse. En aplicaciones para las cuales las cargas de impacto no

son severas, la vida de la fundición dependería de su capacidad de resistir el movimiento de un medio abrasivo contra la superficie del metal con una mínima pérdida de metal. Los hierros blancos son una clase de material que ofrece consideraciones de versatilidad en propiedades para una variedad de aplicaciones de resistencia a la abrasión.

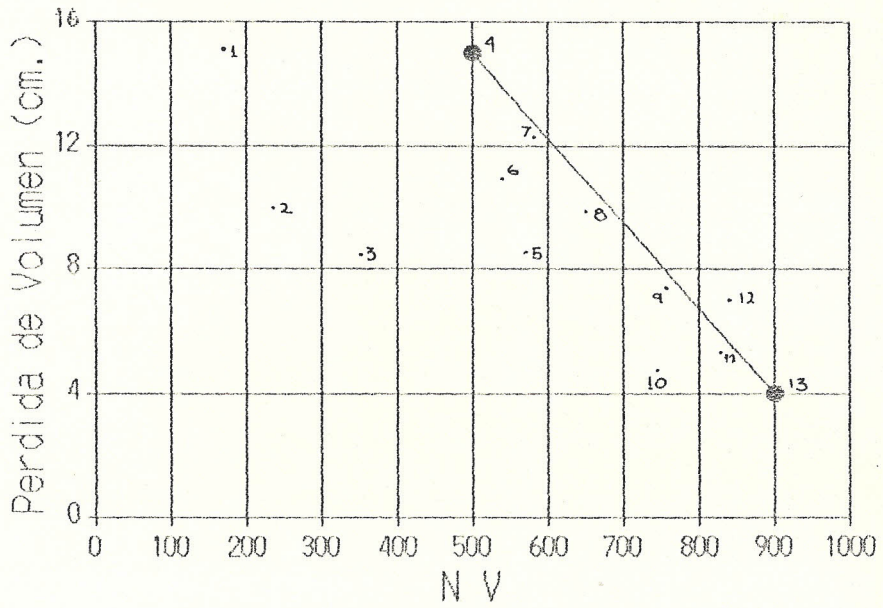
Desde aproximadamente 1955 se ha logrado rebajar de modo sustancial el desgaste de los cuerpos moledores, las diversas aplicaciones de materiales resistentes al desgaste por abrasión incluyen una amplia variedad de condiciones de servicio y usualmente implican una mayor pérdida de material que la que ocurren en otros tipos de desgaste. Algunas aplicaciones combinan desgaste abrasivo y resistencia al impacto. Otros solo implican un efecto de ralladura. Para tales efectos se utilizan hierros blancos aleados, que contienen un constituyente duro que es una matriz relativamente suave.

Así la selección de materiales al desgaste deben tomar en consideración la naturaleza específica del servicio, solo con el costo del material y el costo de la instalación. Materiales de bajo costo con una corta vida útil pueden ser más económicos, si su reemplazo es conveniente. Los hierros blancos aleados han demostrado ser los de mejor costo

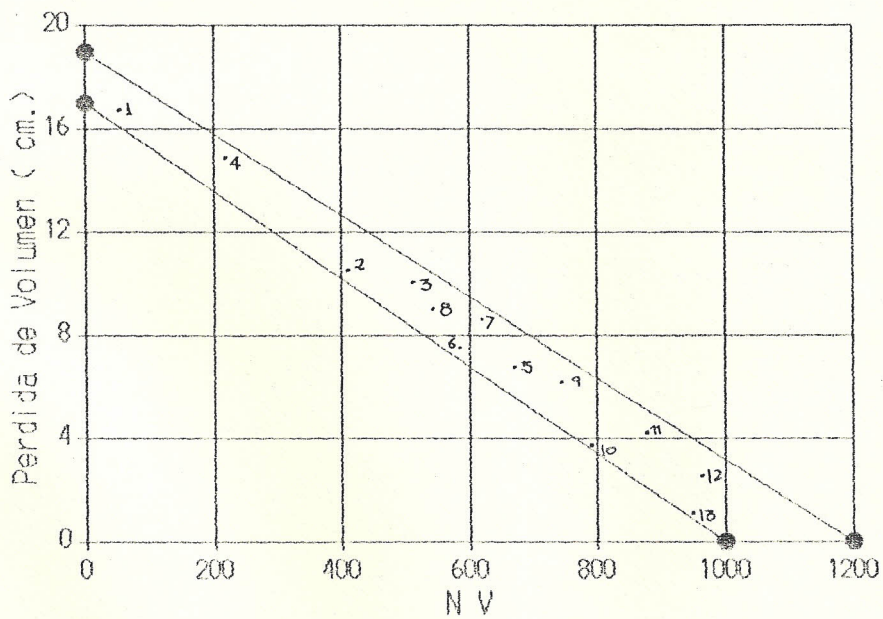
efectivo en muchas aplicaciones de resistencia a la abrasión. La minería y el recogimiento de minerales es la principal industria donde la abrasión es el principal problema. Los hierros blancos martensíticos son convenientes para proporcionar lo mejor en lo que respecta a resistencia a la abrasión.

Pequeñas relaciones existen entre el desgaste de varias aleaciones y su dureza previas a ensayarse. Otras investigaciones de resistencia a la abrasión de fundiciones de hierro y aceros han indicado que no existe relación entre el desgaste y la dureza antes de ser ensayadas (excepto en hierros blancos), pero que existe una correlación directa entre el desgaste abrasivo y la dureza superficial después de ensayarlas, como lo indica la Figura 15, antes de desgastarse en servicio.

La curva muestra correlación entre desgaste y dureza sólo en los hierros blancos, antes que sean puestas en servicio. Por tal razón la dureza del metal es una de las más importantes características a considerar cuando se selecciona un material resistente a la abrasión, aunque en otros casos no se considera la dureza del material sino su microestructura. En los aparatos que producen una fragmentación del abrasivo, el rendimiento de la operación entra en línea de cuenta y, a pesar de que



Antes de desgastarse en Servicio



Despues de Desgastarse en Servicio

FIGURA 15 DESGASTE DE CURPOS

las fundiciones de alto contenido de carbono presenten una resistencia a la abrasión menos correcta con una incidencia normal, en comparación con los materiales más suaves, el rendimiento de molienda puede llegar a ser superior, así como ha sido demostrado por los ensayos efectuados en el Centro de Investigaciones Metalúrgicas de Lieja (Bélgica).

Así, la experiencia y los resultados de los ensayos muestran que las fundiciones martensíticas de Ni-Cr (tipo Ni-Hard), son más frágiles que las fundiciones de alto contenido de cromo.

CAPITULO III

TRABAJO EXPERIMENTAL

3.1 PLAN DE TRABAJO

Para obtener bolas molidoras a partir de chatarra seleccionada, se siguió el siguiente plan de trabajo:

1.- Se diseñó y construyó un equipo auxiliar para moldear de bolas que cumpla satisfactoriamente requerimientos como:

- facilidad de manejo,
- rápido desprendimiento de piezas fundidas,
- molde que aproveche el máximo rendimiento másico de metal, y
- que no presente problemas de solidificación de las piezas.

2.- Se consideró un patrón de calidad a partir del material original, en el que se analizan aspectos como:

- composición química,
- microestructura, en relación a dos aspectos
 - matriz
 - porcentaje de carburos presentes, y
- dureza del material.

3.- Con el molde construido se realizaron las coladas de prueba y el control de calidad respectivo tanto en bruto de colada como con posterior tratamiento térmico.

4.- También se sometieron las bolas a una prueba de abrasión en donde se determina la resistencia que presenta el material al desgaste. Esta prueba se realizó en la Planta Experimental de la Espol, simulando un proceso de molienda.

5.- Con los resultados obtenidos anteriormente y el análisis de resultados respectivo se concluye sobre la calidad del producto encontrado.

3.2 CONSTRUCCION DE EQUIPO AUXILIAR

Se construyeron dos modelos para la fabricación de bolas en planta.

MOLDE METALICO

Para el diseño en primer lugar se discutió la posición del llenado de las piezas, si se realizaba

en forma vertical u horizontal. Se seleccionó la forma vertical ya que no había problemas en abrir y cerrar el molde y mas que todo la buena posición para el desprendimiento de la pieza fundida, esto se puede apreciar en la Figura 16 y además otros detalles.

En un cuerpo moledor la distribución de carburos es muy importante, y conociendo que en un molde metálico se obtiene por su rápida y homogénea disipación de calor, se diseñó un sistema de enfriamiento, el cuál ayudó a ser más rápida esta disipación y no solamente de las bolas sino también el calor que presentó el molde por la solidificación de la pieza.

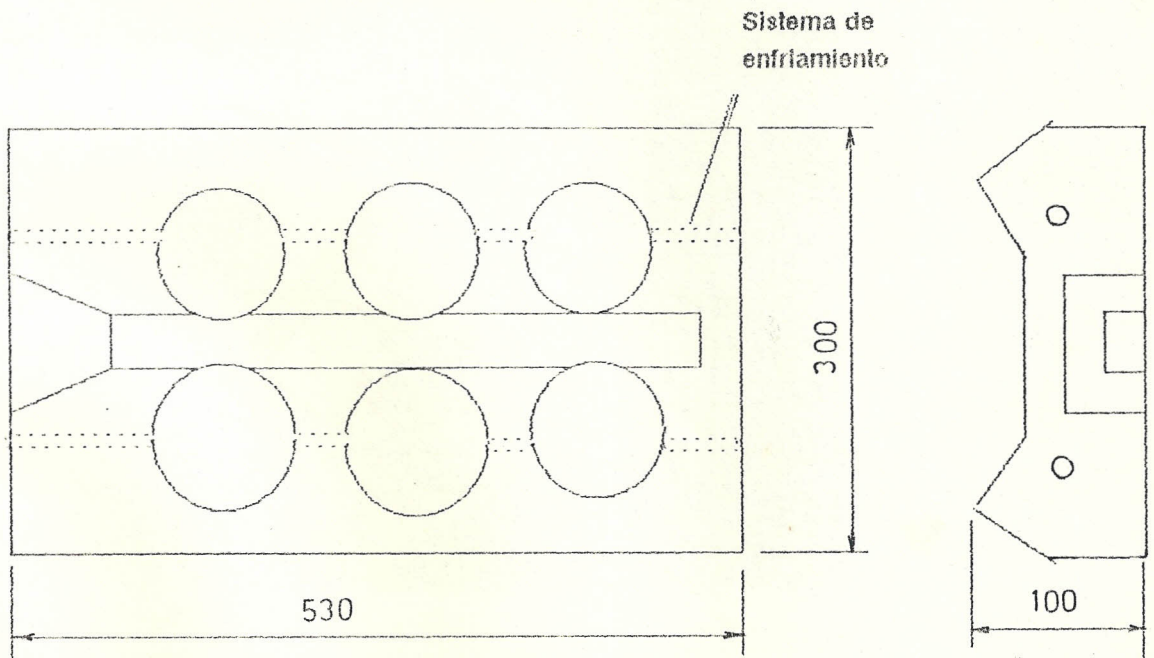


FIGURA 16 DETALLES DEL MOLDE METALICO

En el proceso de fundición de las caras del molde, se tuvo que sobredimensionar su espesor, luego son maquinadas y rectificadas para presentar una buena junta entre ellas y obtener un cierre casi hermético para impedir problemas de derrame metálico.

Una vez listo el molde se realizó el montaje en una mesa metálica(Figura 17). Una cara quedó fija a ella sujeta con unos templadores y la otra cara quedó libre para su accionamiento de abrir y cerrar el molde. Además este montaje facilitó el manejo de la olla para el colado metálico.

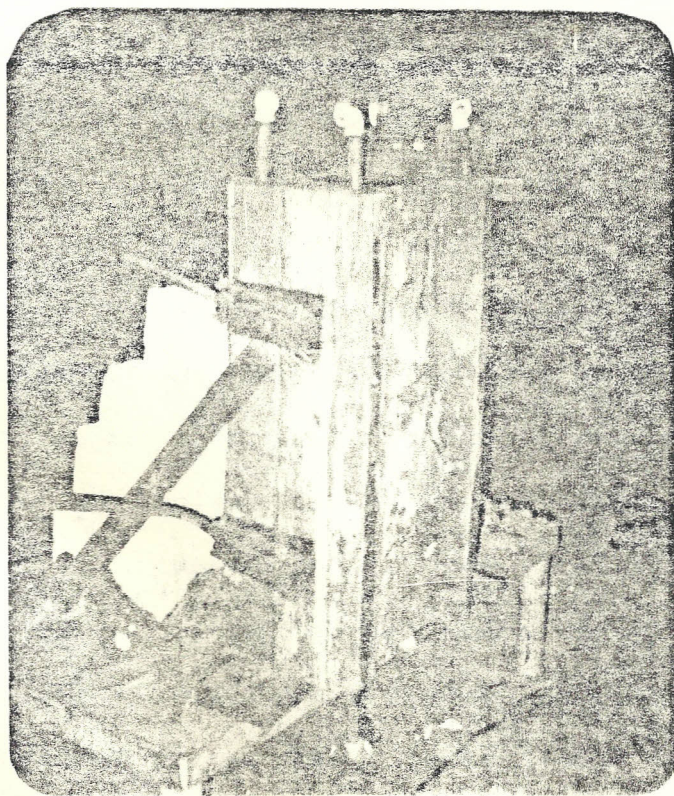


FIGURA 17 MONTAJE DEL MOLDE METALICO

PLACA MODELO

La placa modelo se trasladará de un lugar a otro para su moldeo en arena, por lo que se utilizó un material liviano para su construcción como el aluminio. La Figura 18, presenta la distribución en círculo de las bolas para su fundición. El número de bolas que presenta la placa modelo es el conveniente, ya que no se observa que las bolas queden muy estrechas unas con respecto a otras. Además esta distancia permite que las piezas por el lado del alimentador permanezca caliente y que en la periferia de la esfera, el calor se disipe uniformemente.

Primero se tuvo que fundir 14 medias esferas de aluminio, luego se ha maquinado sus superficies planas para realizar el montaje en el tablero de madera (Figura 19). Este montaje se realiza con precisión ya que cada media esfera es alineada justo en la misma posición con la otra media esfera y sujetas al tablero con pernos perdidos. Si no se tiene en cuenta esto, se obtendrían piezas descentradas y con rebabas considerables. Una vez construido el equipo auxiliar se procedió a realizar las coladas de pruebas y seleccionar el molde que más se ajuste a nuestro propósito.

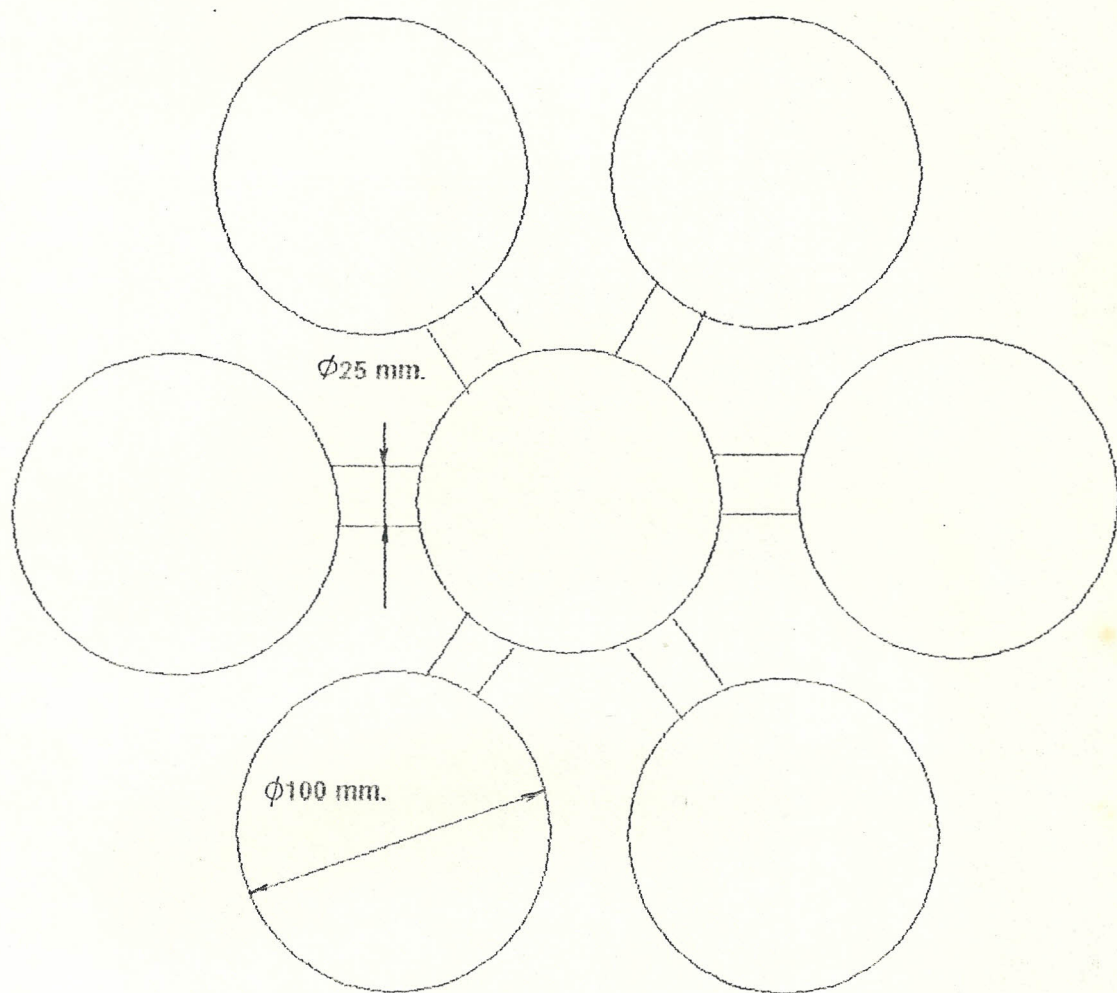


FIGURA 18 DISTRIBUCION EN CIRCULO PARA FUNDICION DE BOLAS

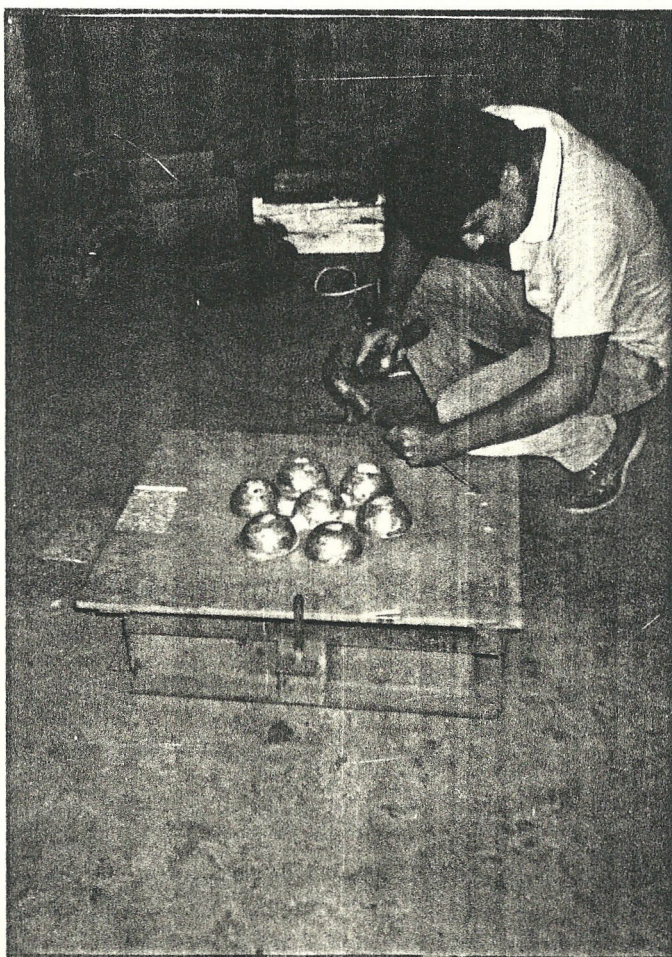


FIGURA 19 MONTAJE DE LA PLACA MODELO

3.3 ELABORACION DE PATRON DE CALIDAD

Un patrón de calidad es elaborado a base de datos recogidos de ensayos o análisis que se realiza en un determinado material que está sometido a un ciclo normal de trabajo. Este patrón sirve como referencia para la comparación con el material que se obtenga y aproximar su comportamiento de trabajo.

En la molienda del cemento, se utilizan cuerpos moledores -bolas- de varios tamaños, repartidos en dos cámaras. En la primera cámara se realiza la molienda gruesa, con bolas de 50 mm. a 100 mm, en la segunda cámara se realiza la molienda fina con bolas de 45 a 20 mm.

Los fabricantes de cemento, recomiendan utilizar bolas moledoras de alto cromo, ya que son altamente resistentes al desgaste abrasivo, acción que se encuentra presente por la mezcla del clinker y el yeso. Dependiendo del material a moler y del compartimiento que se trate se aplican las siguientes calidades:

- Compartimiento de molienda de gruesos:

materia prima	12 % Cr; 2 % C; y 58 - 60 RC
pasta	10 - 20 % Cr; y 60 - 63 RC
cemento	17 % Cr; 2 - 2.5 % C y 60 - 61 RC

- Los datos para molienda fina son los siguientes:

materia prima	12 % Cr; 3 % C y 62 - 63 RC
cemento	
pasta	20 - 30 % Cr y 60 - 63 RC

El fabricante de bolas presenta las siguientes características para la molienda del cemento:

carbono	2.2 %
cromo	17.0 %
dureza	60 RC
carburos	25 %

Para la elaboración del patrón de calidad se toma tres muestras de bolas que se utilizan en el ciclo normal de trabajo, una gastada, una nueva y otra de distinto diámetro.

Las muestras han sido analizadas separadamente, y dan exactamente los mismos resultados (Tabla X), confirmando que se trata del mismo material.

Con los datos del análisis químico se emplea una fórmula que determina aproximadamente el porcentaje de carburos presentes en la muestra:

$$\% \text{ Carburos} = 12.33 (\% \cdot C) + 0.55 (\% \text{ Cr}) - 15.2$$

$$\% \text{ Carburos} = 12.33 (2.2) + 0.55 (12.0) - 15.2$$

$$\% \text{ Carburos} = 18.52 \%$$

T A B L A X

COMPOSICION QUIMICA DEL PATRON DE CALIDAD

ELEMENTO	PORCENTAJE	ELEMENTO	PORCENTAJE
carbono	2.20 %	níquel	0.35 %
cromo	12.00 %	molibdeno	0.05 %
manganeso	0.29 %	vanadio	0.30 %
silicio	0.40 %	cobre	0.19 %
fosforo	0.025 %	azufre	0.038 %

Para la toma de dureza del material se seccionó una esfera, y se tomó la dureza diametralmente. El equipo empleado fue el Durómetro Rockwell y el resultado de mediciones cada 5 mm es:

- Dureza 55 RC

Ahora, se realiza el estudio metalográfico de la muestra. Se procede a pulirla, pasando por diferentes lijas, hasta alcanzar el paño, luego se la seca y se ataca con reactivos correspondientes. Al realizar la observación al microscopio (Figura 20) se encuentra que se trata de una fundición blanca presentando un aspecto de carburos eutécticos con un máximo de 20 %, en una matriz austenítica.



REACTIVO: PICRAL

AUMENTO: 113X

FIGURA 20 HIERRO BLANCO ALEADO

3.4 COLADAS DE PRUEBAS

A.- Colada de prueba en el Molde Metálico.

Lo que se pretende en esta colada de prueba es observar el comportamiento del metal en un molde metálico, y además si existen problemas en su manejo y desprendimiento de las pieza fundidas. Como material de prueba se utilizó chatarra de hierro que se aproxima al comportamiento de la fundición blanca.

Esta experiencia fue realizada en un horno de cubilote del Laboratorio de Fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la ESPOL.

Es importante que el molde metálico esté preparado para recibir el metal, es decir que se debe precalentar a una temperatura aproximada de 500°C , y no ocurra el choque térmico, entre el metal líquido y las paredes del molde, podrían dañarlo, luego se debe pasar una pintura en las caras del molde para que facilite el desprendimiento de la pieza. Esta pintura es hecha de grafito con kerosene y es aplicada unas tres veces, observando que el grafito quede adherido al molde y en cada pasada, se coloca una llama para evaporar el kerosene.

Una vez que se cuela el metal se espera unos minutos y se abre el molde, se procede entonces al desmoldeo. La pieza fundida de metal (figura 21), superficialmente no presenta ninguna falla, es decir rechupes ni fisuras en las bolas, así como tampoco ha quedado metal en el molde. se procede entonces a un análisis de la pieza fundida obtenida en el molde metálico.

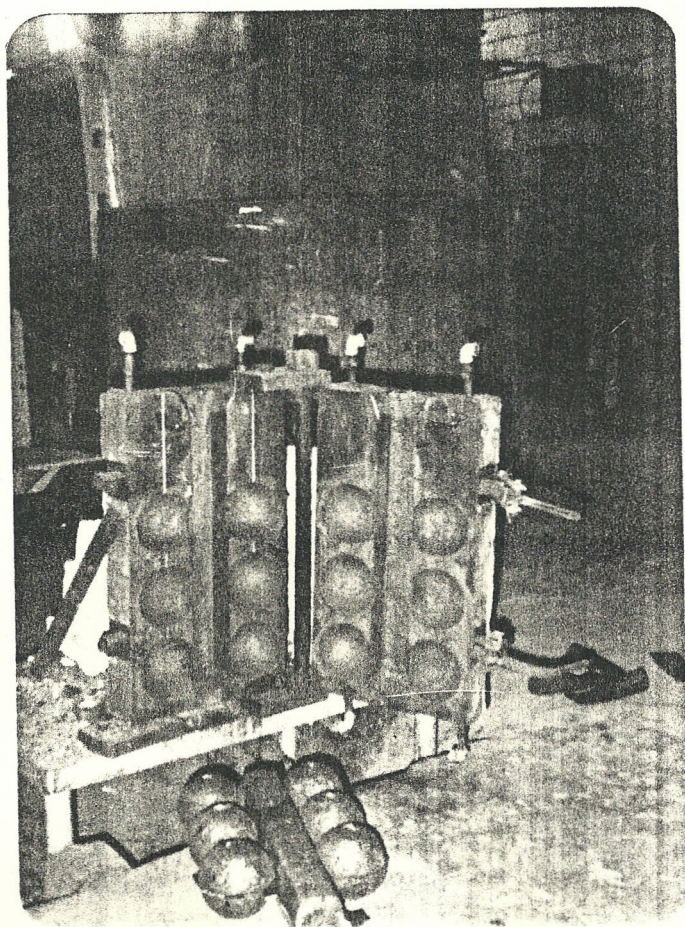


FIGURA 21 DESMOLDED

- Rendimiento Másico (RM).

El cálculo de este parámetro es importante ya que indica el porcentaje de aprovechamiento que se hace del total del metal que entra y que se convierten en bolas. El cálculo es el siguiente:

$$RM = \frac{V_p}{V_p + V_c} \times 100$$

$V_p = \text{Vol. pieza}$
 $V_c = \text{Vol. sistema de colado.}$

$$V_p = \frac{4}{3} \times R^3 \times \# \text{ bolas}$$

$$V_p = \frac{4}{3} (3.1416) (5)^3 \times 6$$

$$V_p = 3294 \text{ cm}^3$$

$$V_c = \text{Largo} \times \text{Ancho} \times \text{Altura}$$

$$V_c = 7 \times 7 \times 54$$

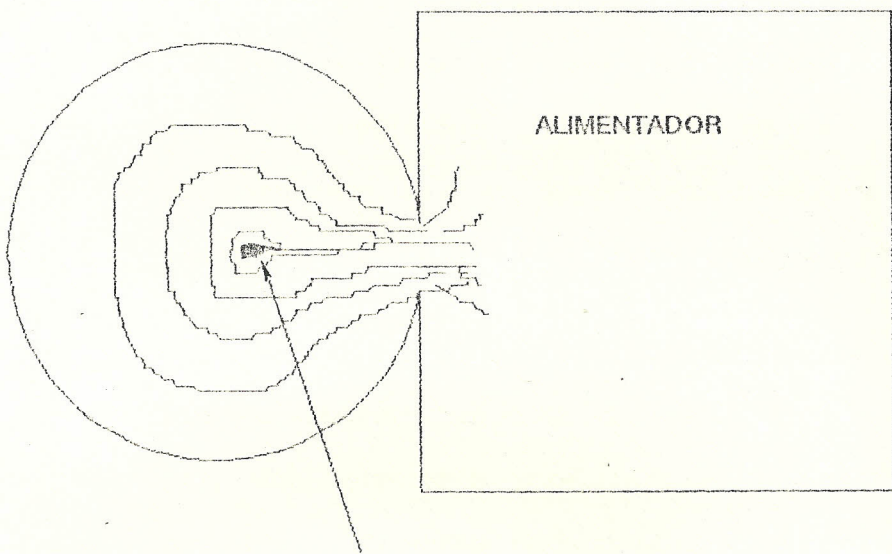
$$V_c = 2646 \text{ cm}^3$$

$$RM = 55.43 \%$$

- Análisis de la solidificación de la pieza.

La solidificación de la pieza en un molde metálico es normal y rápida ya que el metal presenta buenas cualidades para disipar el calor por conducción. En la Figura 22 se representa el avance aproximado, el foco

caliente quedará ubicado en el primer cuadrante y cualquier rechupe se encontrará en ese sector.



Foco caliente atrapado en el
interior de la bola.

FIGURA 22 AVANCE DE SOLIDIFICACION EN MOLDE METALICO

- **Presión.**

Como este molde metálico presenta un gran volúmen el alimentador, se tendrá una presión positiva, suficiente para que el metal fluya y llene totalmente la pieza.

- **Peso**

Este molde es hecho de hierro fundido gris por lo que se debe suponer el excesivo peso que presentará. Cada cara pesa aproximadamente 40 kg, teniendo un peso total de 80 kg. por lo que su manejo se hace laborioso.

- **Desprendimiento de la pieza.**

Por más que se ha colocado la pintura de grafito, el desprendimiento de la pieza ha resultado problemático, por su gran volúmen y por su geometría. Se observó que no hay irregularidades en su superficie y que las bolas, cuerpos moledores, son fácilmente desprendidos del alimentador.

B.- Colada de Prueba en el Modelo # 2 .

Es importante mencionar el empleo de una caja adobera, caja que facilita el moldeo en arena, ya que se puede desmoldar y continuar modelando piezas.

- Dimensionamiento del alimentador.

El alimentador será esférico, con el mismo diámetro de las bolas es decir 100 mm. que tendrá un bebedero, en el cual es conocido su diámetro y desconocido su altura, como se aprecia en la Figura 23. Esta cantidad de material servirá como respaldo para la contracción que sufrirá la pieza.

$$MA = \frac{V_p}{A_c} \quad (\text{Módulo del alimetador})$$

$A_c = \text{área de contacto}$

$$V_p = V \text{ esfera} + V \text{ cilindro}$$

$$V_p = \frac{4}{3} R^3 + r^2 H$$

$$A_c = A_c \text{ esfera} + A_c \text{ cilindro}$$

$$A_c = 4 R^2 + 2 r H + r^2$$

$$MP = \frac{V_c}{A_c}$$

$$V_c = \frac{4}{3} R^3 = 523.6 \text{ cm}^3$$

$$A_c = 4 R^2 = 314.16 \text{ cm}^2$$

$$MP = 1.66 = MA$$

$$1.66 = \frac{(2.5)^2 H + \frac{4}{3} (5)^3}{2(2.5) H + (2.5)^2 + 4(5)^2}$$

$$H = 5.06 \text{ cm.}$$

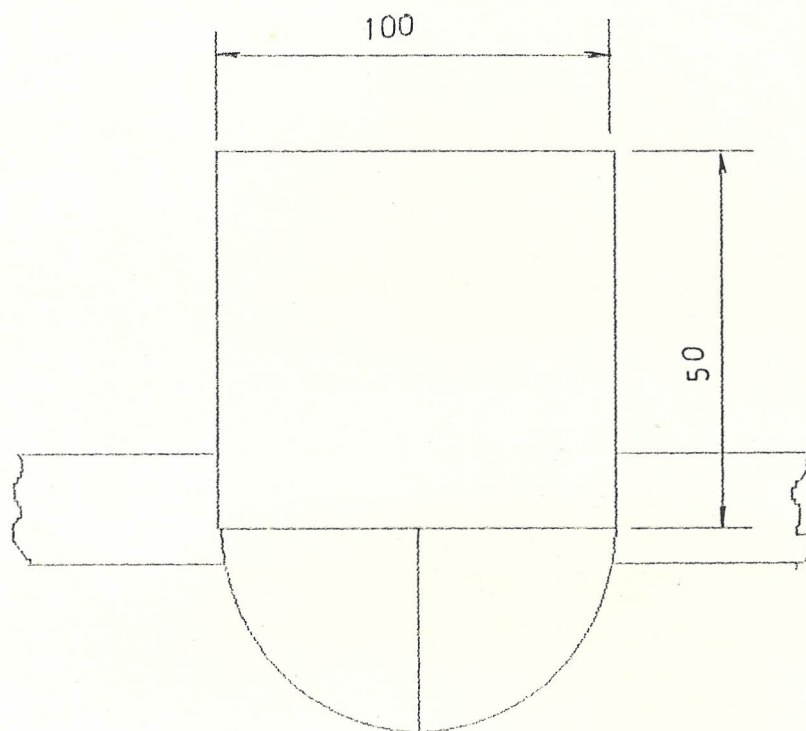


FIGURA 23 ALIMENTADOR DE LA PLACA

MODELO

Así el bebedero tendrá de diámetro 50 mm y de altura 50.6 mm, en el cilindro. Por lo tanto el volumen total que almacenará este alimentador será:

$$V_a = V_c + V_{\text{media esfera}}$$

$$V_a = r^2 H + 1/2 \left(\frac{4}{3} R^3 \right)$$

$$V_a = (5)^2 (5) + 1/2 \left[\frac{4}{3} (5)^3 \right]$$

$$V_a = 360 \text{ cm}^3.$$

- Porcentaje de contracción.

La contracción que sufre el metal al solidificar debe ser tomada en cuenta en el total del volumen de la pieza fundida. Según la Figura 24, para una temperatura de metal de 1550° C con 2.2 % de carbono recomienda el 7 % de contracción.

$$V_{\text{requerido}} = \frac{4}{3} R^3 = 523.6 \text{ cm}^3 \times 0.07$$

$$V_{\text{requerido}} = 36.65 \text{ cm}^3 \text{ por bola.}$$

Como son seis bolas, se requiere 220 cm³, por lo tanto se debe tener un alimentador que cumpla con este requerimiento. Del cálculo anterior del alimentador se observa que efectivamente, éste cumple con el volumen deseado ya que almacenará alrededor de 360 cm³.

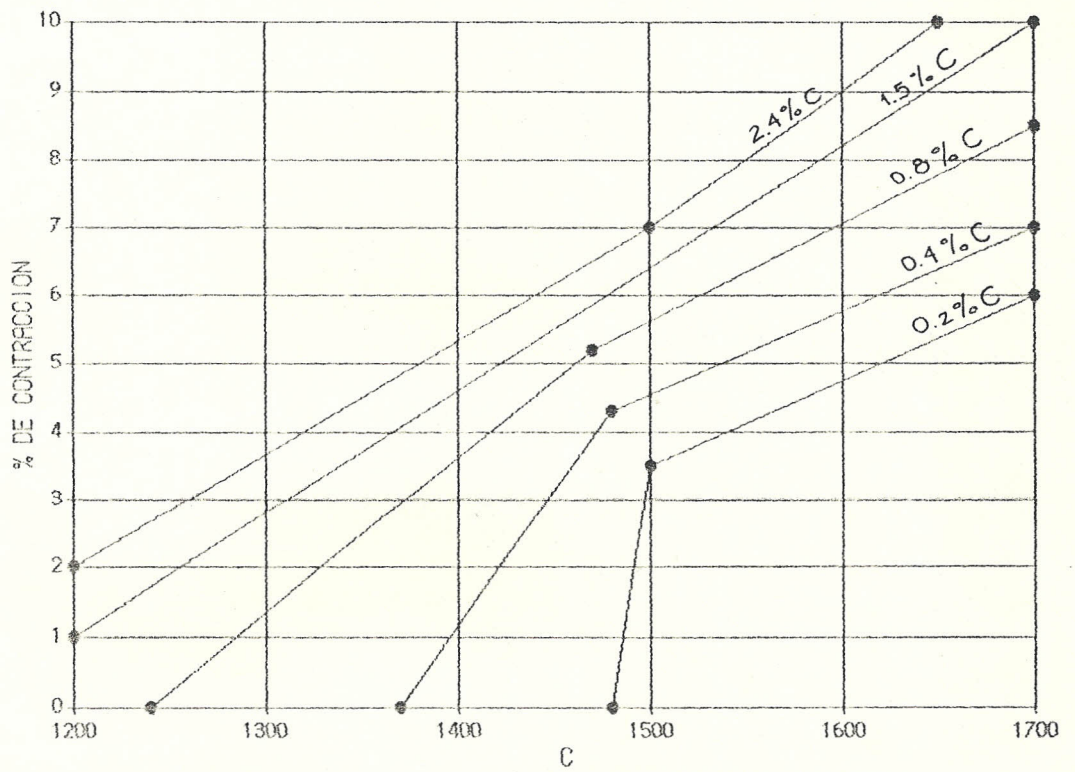


FIGURA 24 VARIACION EN EL VOLUMEN DE ALEACIONES HIERRO CARBONO CON LA TEMPERATURA

- Rendimiento másico.

$$RM = \frac{523.6 \times 6}{523.6 \times 6 + 523.6 + 216.8*} \times 100$$

* material del
bebedero.

$$Rm = 80 \%$$

$$Si \ V_p = 0.8 (V_p + V_c)$$

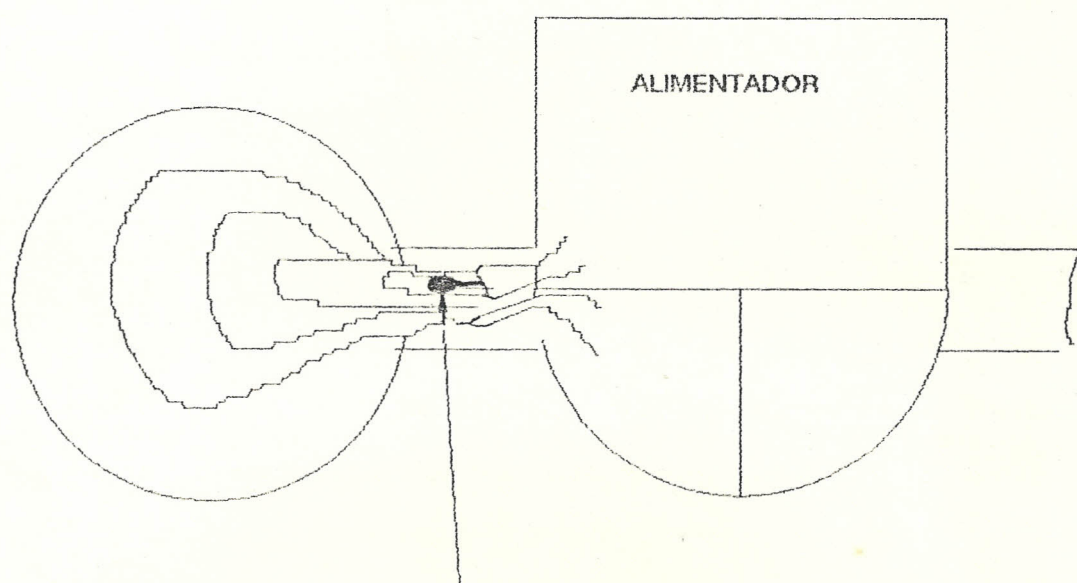
$$V_c = 0.25 \ V_p$$

Luego para fundir una bola de 100 mm que pesa aproximadamente 4 kg. se tiene que fundir y colar 5 kg.

- Análisis de la solidificación.

La solidificación tanto de la pieza como del alimentador, se producirá por conducción de calor hacia la arena.

La zona del canal de alimentación, del cargador a la bola, se verá afectada en su velocidad de enfriamiento debido a que esta zona, será calentada por el alimentador y la bola. De esta manera se orientará las isotermas de enfriamiento (Figura 25) hacia la boca de alimentación, quedando el foco caliente fuera de la bola, obteniéndose por lo tanto una buena solidéz en la pieza.



El Foco caliente queda
fuera de la bola.

FIGURA 25 SOLIDIFICACION DE LA
PIEZA EN MOLDE DE
ARENA.

Este hecho que contribuye a retardar el tiempo de solidificación incrementa la posibilidad de que este cargador sea suficiente para las piezas.

- **Presión.**

La presión que existirá será siempre positiva del cargador a la pieza, suficiente para que el metal líquido fluya en ese sentido.

Luego de realizar las coladas de prueba se seleccionó la placa modelo como el más conveniente para el propósito, ya que los parámetros importantes y decisivos fueron, la no presencia de focos calientes en las piezas fundidas y el alto rendimiento másico del metal. Además el costo de construcción empleado en la placa modelo no es nada comparable con lo que se tuvo que emplear en el molde metálico.

3.5 CONTROL DE CALIDAD DE COLADAS DE PRUEBAS

Contruido el molde metálico, se procedió al reciclaje de material de la chatarra seleccionada de bolas, las cuales por su reducción de diámetro tan pequeño no sirven para el propósito de la molienda. La fundición fue realizada en un horno de inducción de una fábrica local (Figura 26), y una vez fundidas las bolas de 100 mm a partir de chatarra se realizó el control de calidad.

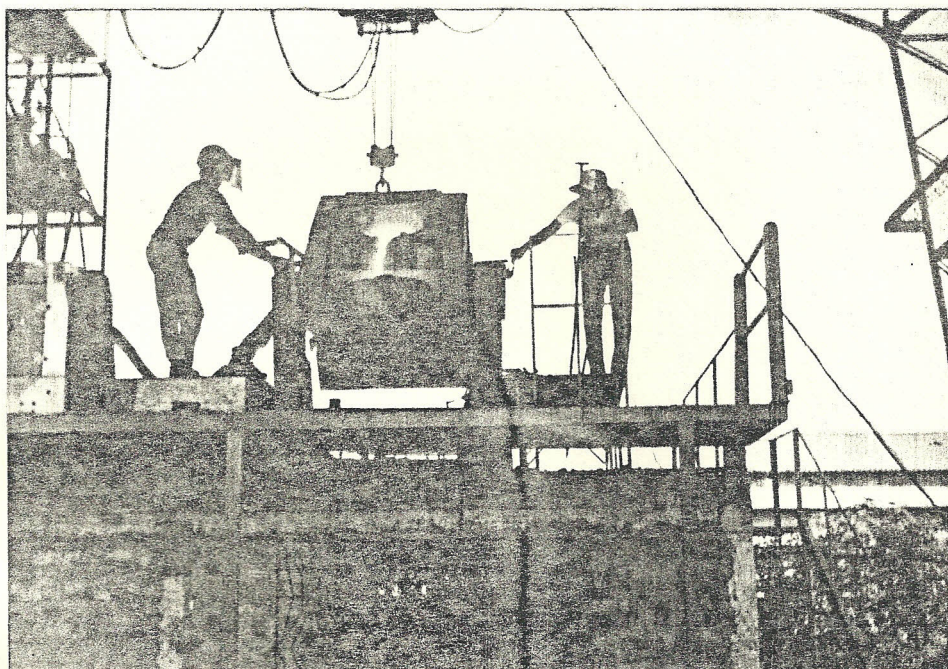


FIGURA 26 HORNO DE INDUCCION

3.5.1 Análisis químico.

La composición química es muy importante, ya que las propiedades mecánicas se hallan directamente influenciadas por la presencia o ausencia de los diferentes constituyentes como el carbono, cromo, manganeso, etc.

TABLA XI

COMPOSICION QUIMICA DEL MATERIAL RECICLADO

Promedio de cinco Pruebas

Elemento	Porcentaje
Carbono	2.40 %
Cromo	12.00 %
Manganeso	0.40 %
Silicio	0.72 %
Fósforo	0.02 %
Níquel	0.50 %
Moolibdeno	0.014%

Como se aprecia, los porcentajes de elementos aleantes comparados con el patrón de calidad están en el rango de materiales resistentes al desgaste abrasivo, resultado que solo se puede esperar de una técnica de fusión como la usada ya que tiene poca influencia sobre el cambio de la composición química.

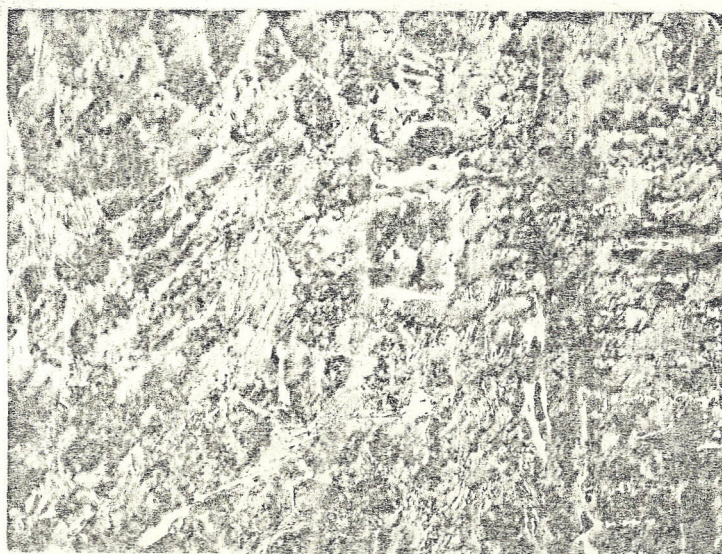
3.5.2 Metalografía.

Para conocer adecuada y rápidamente la constitución de un material el análisis metalográfico es el más apropiado. Con la ayuda de un microscopio se identifica los constituyentes de la matriz y las demás fases presentes en el material siendo esto, determinante en sus propiedades.

Equipo de pulido:

El pulido intermedio se realizó en un banco de lijas AB Buechler con papeles de lija No 320 - 400 y 600, lubricada con cera de carnauba, y el pulido fino en una máquina pulidora de disco STRUERS modelo DPU con pasta de diamante y disolvente.

La observación metalográfica y fotomicrografía es llevada a cabo en un microscopio de reflexión OLYMPUS modelo PME. Las fotomicrografías obtenidas son mostradas a continuación:



REACTIVO: PICRAL

AUMENTO: 200X

FIGURA 27 HIERRO BLANCO ALEADO OBTENIDO EN BRUTO DE COLADA



REACTIVO: PICRAL

AUMENTO: 113X

FIGURA 28 LA MISMA ALEACIÓN TRATADA TÉRMICAMENTE A 540 ° C POR 2 h, ENFRIADO AL AIRE

3.5.3 Ensayos Mecánicos.

Los cuerpos moledores, en su ciclo de trabajo, están sometidos a varias sollicitaciones y condiciones que reducirán su tamaño, unos más importantes que otros, de estos, el más crítico es la dureza del material. Entre este último parámetro y la resistencia al desgaste existe una relación directa, por ende uno de los controles normales del producto fundido es la medición de la dureza. La toma de dureza se realiza diametralmente, empleando el durómetro ROCKWELL escala C. con 150 Kg de carga y 5 seg. de aplicación. Los resultados son:

- 1.- En bruto de colada: 50 RC.
- 2.- Con Tratamiento Térmico: 62 RC.

3.6 ENSAYOS EN PLANTA DE CUERPOS DE PRUEBA

Considerando que los cuerpos moledores en el proceso de la molienda del cemento, están expuestos a la abrasividad del material que se muele, representado en la pérdida de peso, se llevó a cabo una simulación de molienda en una planta experimental, y con los datos obtenidos se podría seleccionar el cuerpo molidor -bola- mas conveniente.

Por ser una prueba bastante corta y utilizando un equipo limitado se tomó las debidas precauciones para que los resultados sean seguros y confiables.

La prueba de resistencia al desgaste abrasivo se la llevó a cabo en la Planta Experimental de la ESPOL, de la Facultad de Minas y Petróleo. El equipo para la molienda seleccionado es un molino pequeño que utiliza como elementos moledores bolas y barras, de acuerdo a la granulometría que se desea obtener.

El molino presenta las siguientes características:

- Tamaño: 180 mm diámetro x 360 mm Long.
- Motor: 1/2 HP.
- Revoluciones: 1200 rpm.

En primer lugar se limpió las rebabas que presenta las superficies de los cuerpos moledores, tanto la bola de material original como la bola del material reciclado, con un cepillo de hierro y las rebabas más resistentes con un esmeril, luego se llevó a cabo una premolienda, para dejar totalmente limpia las bolas, utilizando como material abrasivo el cuarzo. Esto es importante ya que, si no se realiza se obtendría datos falsos, porque lo primero en desprender serían estas rebabas. Finalmente las bolas son lavadas y secadas.

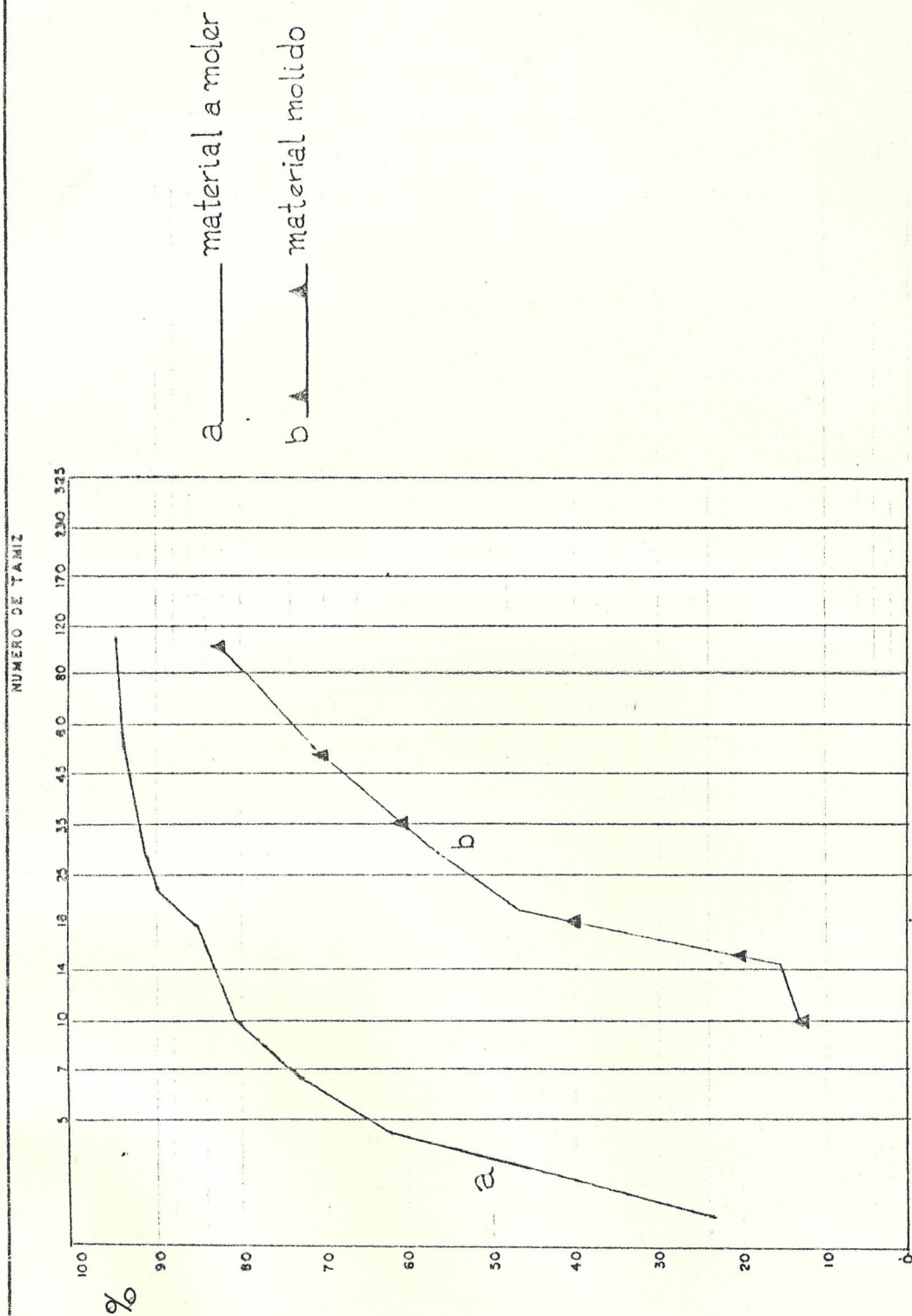
Como se mencionó anteriormente, el material a moler es el cuarzo, material abrasivo con una dureza de 7 en la Escala Mohs. El ciclo de trabajo será severo ya que la trituración del material se producirá íntimamente entre la bola y las paredes del molino. La granulometría del material de alimentación fue previamente analizada y tamizada, datos que se pueden observar en la Tabla XII y que según la gráfica 29 se trata de un material grueso como la grava con un promedio de tamaño de 7 mm.

TABLA XII

GRANULOMETRIA DEL MATERIAL DE
ALIMENTACION

TAMIZ (mm.)	PESO RETENIDO (g)	(%) (%)	PESO ACUMULADO
16	9.4	0.94	0.94
12.7	40.1	4.1	4.9
9.52	196.6	19.7	24.7
4.76	385.1	38.7	63.5
3.36	95.1	9.5	73.1
2	80.9	8.1	81.2
1.4	37.1	3.7	85.1
0.85	40.1	4.1	90.1
0.6	20.7	2.1	91.1
0.3	30.6	3.1	94.1
0.15	22.5	2.2	96.4
fondo	35.15	3.5	100

DISTRIBUCION DEL TAMAÑO DE GRANOS Y PORCENTAJES ACUMULADOS



TAMAÑO DE PARTICULAS EN MILIMETRO															
ARENA						L I M O						ARCILLA			
GRAVA		Muy gruesa:	Gruesa	Mediana	Fina	Muy fina	Gruesa	Medio	Fino	Muy fino					
5.0	4.0	3.0	2.0	1.0	0.5	0.4	0.3	0.2	.01	.005	.004	.003	.002	.001	

Datos de la Prueba:

Material abrasivo: cuarzo

Dureza del material abrasivo: 7 (Escala Mohs)

Tamaño promedio del material: 7 mm.

Peso de la bola: - material original: 3524 g.

- material reciclado: 3614 g.

Luego se observó que el material presenta una granulometría muy inferior a la que se cargó, por lo que se procedió a sacar el material molido y la bola. Las bolas fueron previamente lavadas y cepilladas para su pesaje, los datos obtenidos son:

BOLA ORIGINAL

Nº	PESO (g)		TIEMPO
	Inicial	Final	
1	3524	3521	3H33
2	3521	3518	3H50
3	3518	3516	2H37
Pérdida Peso: 8 g. en 10 h.			

BOLA RECICLADA

Nº	PESO (g)		TIEMPO
	Inicial	Final	
1	3614	3610	3H53
2	3610	3607	3H10
3	3607	3605	3H07
Pérdida Peso: 9 g. en 10 h.			

La granulometría del material molido fue tamizada (Tabla XIII) y la curva gravimétrica (Figura 29), determinó el tamaño promedio de la partícula: 0.8 mm.

Datos posteriores de pérdida de material contabilizados en intervalos de 10 h. de tiempo (Tabla XIV) y extrapolando resultados nos permite realizar una curva representativa (Figura 30) donde se aprecia el desgaste que sufre las bolas molidoras, en peso, en tiempos determinados.

TABLA XIII

GRANULOMETRIA DEL MATERIAL MOLIDO

TAMIZ (mm.)	PESO RETENIDO (g)	(%) PESO (%)	ACUMULADO
2	68.2	13.6	13.6
1.4	73.8	14.8	28.4
0.85	92.1	18.4	46.8
0.6	46.9	9.4	56.3
0.3	72.7	14.5	70.8
0.15	55	11	81.9
fondo	90.3	18.1	100

T A B L A X I V

P E S O (g .)							
O R I G I N A L				R E C I C L A D O			T I E M P O
N _g	Inicio	Final	Pérdida	Inicio	Final	Pérdida	Hora
4	3516	3508	8	3605	3595	10	10
5	3508	3500	8	3595	3586	9	10
6	3500	3492	8	3586	3577	9	10
7	3492	3484	8	3577	3568	9	10

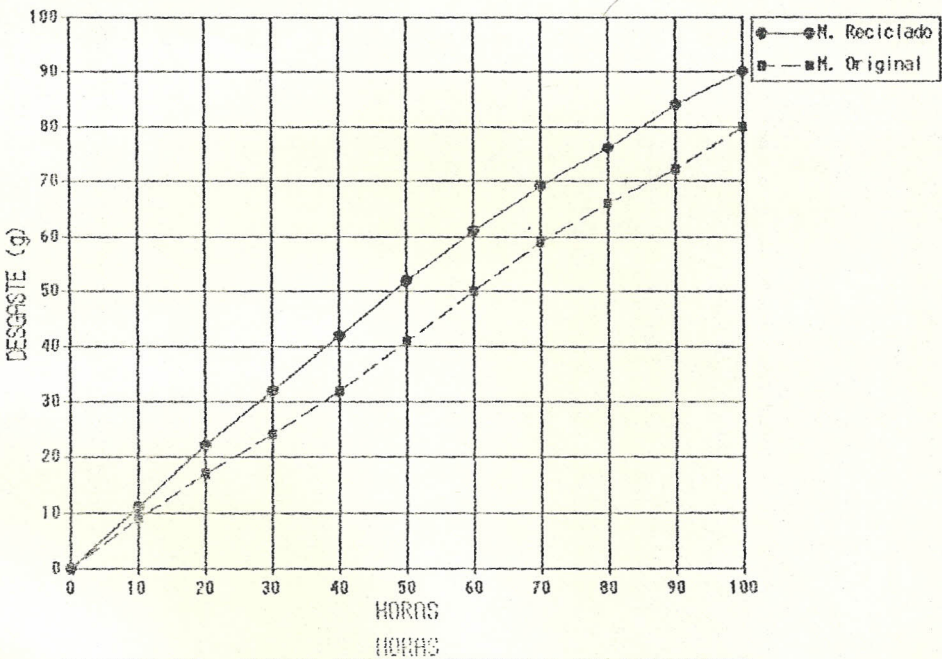


FIGURA 30 CURVA REPRESENTATIVA DE DESGASTE

3.7 EVALUACION DE CUERPOS DE PRUEBA

La evaluación de cuerpos de prueba se centra en el ensayo de resistencia al desgaste abrasivo, siendo importante mencionar el material abrasivo que se usó para éste ensayo. El cuarzo permite obtener resultados de desgaste de cuerpos moledores, en tiempos cortos, lo que no se podría haber alcanzado usando un material como el clinker.

En la Figura 30, se puede observar el comportamiento que sufre las bolas, tanto del material original como el reciclado. En 100 h. de molienda las bolas presentan un desgaste que se ha mantenido casi constante desde el inicio de la prueba, debido a lo mejor, a la buena distribución de carburos y a la dureza homogénea presentada, es así que la original ha perdido 80 g. y la reciclada 90 g. Si se considera que el material ensayado se obtuvo en bruto de colada, los resultados son alentadores ya que presenta una diferencia de 10 g..

Además se debe tener en cuenta que estos materiales se endurecen por el trabajo. La metalografía del material reciclado presenta una matriz, mezcla de austenita y martensita, tiene la propiedad de endurecer mucho más cuando está en servicio, es decir cuando entra al ciclo de molienda, por lo que a mayor

tiempo de trabajo la diferencia de peso se reduciría. Las bolas tratadas térmicamente serán las que mejor resistan el desgaste abrasivo ya que poseen una dureza mucho más elevada y su microestructura presenta una matriz martensítica que llega a una dureza de 62 RC. Con este material se podría llegar a condiciones óptimas de molienda.

CAPITULO IV

DISCUSION DE RESULTADOS

El objetivo del presente trabajo fue el de realizar un reciclaje de chatarra de bolas de molino, tratando de alcanzar condiciones tales que el material mantenga propiedades y características similares a las piezas originales de importación.

Se ha creído conveniente tomar como punto de discusión, calificar la calidad del producto encontrado, teniendo en cuenta criterios de:

- métodos de producción en serie,
- comparación con el patrón de calidad y
- resultados del ensayo de abrasión.

Considerando las características de los materiales resistentes a la abrasión (contenido - distribución de carburos y la dureza), se diseñó dos moldes, que permitieron alcanzar estas características, uno para fundir en metal y otro en arena.

El molde metálico permite alcanzar una buena distribución de carburos y alta dureza pero presenta defectos en las piezas. Al analizar la bola obtenida, se observa que hay rechupes internos - sector de alimentación- que podría ser ocasionado por la rápida solidificación del metal en esta zona, disminuyendo el área de alimentación y permitiendo de este modo que el foco caliente quede atrapado en el interior de la pieza útil. Además el choque térmico entre el material líquido (1500 °C aproximadamente) y el molde, podría generar fisuramientos.

La idea de fundir en círculo presenta alternativas muy buenas, ya que se obtiene resultados satisfactorios como un buen aprovechamiento másico del metal, que es lo que busca toda planta fundidora, y una buena solidificación de las piezas. El fundir en arena permite que el calor se disipe por conducción a la arena, eliminando las pérdidas por radiación. Además el costo del equipo auxiliar para fundir en arena es insignificante comparado con el molde metálico. Este tipo de fundición se podría implantar en fundidoras que deseen producirlas.

Los resultados del análisis químico del material reciclado (Tabla XII) permite asegurar que se trata de un material resistente al desgaste abrasivo según los rangos establecidos en la Norma ASTM A532 (Tabla V).

Se obtuvo una probeta de la bola fundida en bruto de colada, con una dureza de 50 RC. En cuanto a su microestructura (Figura 27), muestra que hay una estructura bruta de fusión, mezcla de austenita y martensita. Junto a los carburos eutécticos formados durante la solidificación, la matriz se encuentra empobrecida en cromo y carbono debido a la precipitación de los carburos primarios sobre los carburos eutécticos ya existentes. Es decir, se tiene una estructura heterogénea constituida con eutéctico interdendrítico en una ligera cáscara martensítica envueltas en dendritas de austenita retenida no transformada.

A fin de modificar ésta condición, se procedió a efectuar un tratamiento térmico que debía actuar principalmente sobre las dendritas de austenita y minimizar el efecto anteriormente descrito. Por otro lado la presencia de austenita retenida puede ser controlada a través del tratamiento de desestabilización.

En muchos casos la austenita retenida es perjudicial debido a la posibilidad de que durante el servicio se transforme a martensita con una expansión volumétrica asociada hasta el orden del 3 % induciendo a tensiones que pueden romper el material.

El tratamiento térmico seguido fue un temple martensítico, llevado a cabo en un horno eléctrico del Laboratorio de Metalurgia, bajo las siguientes condiciones:

- alcanzar la temperatura de 940°C y permanecer en el por espacio de 2 h.
- dejar enfriar al aire hasta temperatura ambiente.

logrando obtener una matriz más dura: 62 RC.

La observación microscópica (Figura 28) denota una transformación martensítica, quedando regida por una precipitación de carburos secundarios. Esta precipitación o disolución de carburos conducen al establecimiento de un equilibrio entre la cantidad de carburos y el contenido de carbono de la austenita.

El contenido de carbono de la austenita es más elevado (Tabla XII vs Tabla XI de análisis químico) y puede mantenerse en equilibrio mientras se aumente la temperatura, así como también alcanzar el equilibrio en la precipitación de los carburos. En cuanto a la prueba de abrasividad llevada a cabo en un molino experimental se concluye que si bien es cierto que se observa (Figura 30) una diferencia de pérdida de peso entre los dos materiales, es

alentador conocer que, la microestructura que presenta el material reciclado cambiará por cuanto la matriz tiene la propiedad de endurecer en el trabajo.

La bola tratada termicamente no fue ensayada ya que requeriría mayor tiempo de exposición. Es de suponer que con este tipo de material se obtendría rendimientos de molienda más elevados, por cuanto la vigilancia de la carga de bolas en el molino no será necesaria hacer en intervalos seguidos sino mas bien en períodos largos, eliminando así el tiempo que se perdería al realizarla.

Por el análisis efectuado se concluye que la calidad obtenida en el material reciclado es buena, y si se desea obtener buenos resultados de molienda se recomienda usar materiales abrasivos que presenten una dureza igual o menor que el cuarzo que es de 7 en la Escala Mohs.

Finalmente es importante mencionar, el gran esfuerzo realizado en el desarrollo de este trabajo que ha unido tanto la acción de la ESPOL como de la industria a fin de demostrar que es posible el inicio de la producción en serie, de este tipo de partes resistentes al desgaste, con ventajas económicas para el país.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una vez que se ha llevado a cabo la parte experimental y luego de realizar la discusión de resultados se concluye lo siguiente:

- 1.- El estar en condiciones de reciclar material de chatarra, nos permite desarrollar todo tipo de partes de maquinaria, más que todo las que estén sujetos a un desgaste abrasivo, decreciendo la importación de estos elementos, por lo tanto ayudando a la economía del país e incrementado el avance tecnológico del sector metalúrgico.
- 2.- Se debe señalar lo ventajoso que es trabajar con una técnica de fusión empleada en un horno de inducción, en la cual el calor se transmite directamente al crisol, alcanzando con rapidez el estado líquido del metal, a una temperatura aproximada de 1550 °C. Con esta temperatura se logra obtener una apariencia de chorro de metal brillante, sin presencia de oxidación, y una

alta colabilidad de fundición, por ser muy fluida, permitiendo de esta manera lograr características similares que el original.

3.- El sistema de moldeo en verde con modelo múltiple, implica un alto rendimiento metálico y una respuesta favorable a los problemas de solidificación asociados a defectología propia de fundición (rechupes internos).

4.- El material en bruto de colada ha dado resultados satisfactorios. Es de preveer que aquellos que fueron sometidos a un tratamiento térmico podrían presentar iguales o mejores características que los importados, que son utilizados en condición en bruto de colada.

5.- Del ensayo de resistencia a la abrasión realizada, a pesar de las limitaciones del equipo, y empleando el cuidado necesario, se logró obtener resultados que muestran una tendencia de resistencia al desgaste del material. El material reciclado tendrá un desgaste uniforme y esférico, debido a la distribución y porcentaje de carburos y a la dureza homogénea que presenta el material.

RECOMENDACIONES

- 1.- La ESPOL debería incentivar proyectos de investigación en el campo de la construcción de maquinaria minera.
- 2.- Se debería adquirir equipos adecuados para simular en mayor grado procesos industriales para que toda pieza elaborada vaya respaldada con resultados satisfactorios y confiables.
- 3.- Siendo el campo de la minería un sector de gran expectativa en el país y dado que la mayor parte de la maquinaria esta expuesta al desgaste abrasivo, se tiene en el un amplio campo de aplicación de estos materiales, los mismos que tenderían a mejorar las condiciones arcaicas de molienda, usados por los mineros en las zonas de explotación aurífera. Por lo que se recomienda a los industriales y mineros tener en cuenta todos los materiales susceptibles de ser reciclado, ya que representa un ahorro significativo de divisas.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- L. Austin, R. Klimpel y P. Luckie, Process Engineering of Size Reduction Ball Milling (1ª Edición; New York: Society of Mining Engineers, 1984), pp. 409 - 433
- 2.- R. Ban, Editor, Symposium Materials for the Mining Industry, "Properties and Performance of Cast Iron Grinding Balls, por J. Farge y G. Barclay" (Vail, Colorado: Climax Molybdenum Company, 1974), Capítulo 18.
- 3.- V. Carrión, Determinación de la Ley de Desgaste de las Bolas para Molienda a través de la Prueba de Bolas Marcadas, (Viña del Mar, Chile: III Simposium sobre Molienda, 14 de Noviembre 1980).
- 4.- W. Duda, Manual Tecnológico del Cemento, (1ª Edición; Barcelona, España: Editores Técnicos Asociados, S. A. 1977), pp. 71 - 110
- 5.- A. Guy, Physical Metallurgy for Engineers (Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1965), pp. 291 - 318
- 6.- R. Jackson, Metallurgical and Production Aspects of High Chromium Cast Irons for Abrasion Resisting Applications (Birmingham: Birmingham of University, Mayo 1974).

- 7.- F. Maratray y S. Bechet, "Fundiciones Blancas de Alto Contenido en Cromo Resistentes a la Abrasión", Revista Colada Ciencia y Tecnología, Vol. 12, No 9 (1979), pp. 183 - 192

- 8.- T. Zegarra, Diseño y Dimensionamiento de Sistemas de Alimentación y Colada para Bolas de molinos (La Paz, Bolivia: Reporte Metalúrgico, Universidad Mayor de San Andrés, Enero-Febrero, 1987).

- 9.- Chromium/Molybdenum White Cast Irons for Abrasive Applications, Londres, Marzo 23, 1972, "Foundry Trade Journal, por W. Fairhurst y D. Stolk" (Londres: Climax Molybdenum Company, 1972), pp. 401 - 408

- 10.- Choice of Appropriate Compositions for Chromium-Molybdenum White Irons Conference, París, Francia 1972, "AFS Transactions, por F. Maratray" (París: Climax Molybdenum S. A., 1972), pp. 121 - 124

- 11.- Developments in the Production and Use of Martensitic Alloy Cast Iron Conference, Londres, Junio 1962, "Institute's Annual Conference, por G. Harrison y R. Dixon" (Londres: The British Foundryman, 1962), pp. 164 - 176

- 12.- Fontes Blancas Tres Duras Resistant a L'usure par Abrasion (París: Centre Technique des Industries de la Fonderie, 1970).

- 13.- Influence of Abrasive Hardness on Wear Resistance of High-Chromium Irons Conference, Michigan, 1977, "Wear of Materials, por R. Gunflach y J. Parks" (Michigan: Climax Molybdenum Company, 1977), pp. 126 - 131
- 14.- Wear and Impact Resistant White Cast Irons Conference, Petroria, Sudafrica, 1980, "Services Council for Scientific and Industrial Research, por J. Bereza" (Petroria: Information and Research Services Council, 1980), pp. 205 - 211