

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINERA Y METALURGICA



**ALEACIONES FUNDIDAS DE ALTA RESISTENCIA AL
IMPACTO Y DESGASTE POR ABRASIÓN Y SU APLICACIÓN
EN PROCESOS INDUSTRIALES**

INFORME DE SUFICIENCIA

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO METALURGISTA**

**PRESENTADO POR:
CARMEN MARILUZ ORTEGA ALFARO**

**ASESOR
DSc. Ing. ORFELINDA AVALO CORTEZ**

**LIMA – PERU
2014**

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi padre† y a mi madre por ser los pilares de mi formación personal y por su constante apoyo y dedicación para la culminación de mis estudios profesionales.

RESUMEN

El presente informe desarrolla el tema de selección de aleaciones ferrosas obtenidas por el proceso de fundición, y su aplicación en procesos industriales donde se requiere que las piezas tengan las mejores características y propiedades mecánicas antidesgaste a fin de alargar el tiempo de vida útil de tales piezas.

Está dividido en cinco capítulos; en el primer capítulo se indican los objetivos específicos y su justificación; el segundo capítulo está relacionado a los conceptos teóricos de los aceros y fundiciones en general; en el tercer capítulo se describe las características de las aleaciones comerciales utilizadas en la industria minera y cementera principalmente; en el cuarto capítulo, se mencionan las variables más importantes a tener en cuenta para la selección de un material, y en el quinto capítulo se presentan casos prácticos de mejoramiento de rendimiento de fundiciones usadas en procesos de trituración, molienda y arrastre.

Se finaliza el informe con conclusiones respecto al tema.

ABSTRACT

This present work develops the theme on selection ferrous alloys obtained by the casting process, and their application in industrial processes are required to wear parts have the best physicochemical properties, to lengthen the lifespan.

It is divided into five chapters: the first chapter shows the specific objectives and justification, the second chapter is related to the theoretical concepts of general steels and castings; the third chapter describes the features of the commercial alloys used in mining and cement industry mainly, in the fourth chapter, identifies the most important variables to be considered for the selection of a casting alloy, and in the fifth chapter presents case studies foundries performance improvement processes used in crushing, grinding and drag.

The report ends with conclusions on the subject.

INDICE

	Pág.
INTRODUCCION	10
CAPITULO I: OBJETIVOS Y JUSTIFICACION	
1.1 Objetivo general	12
1.2 Objetivos específicos	12
1.2 Justificación	12
CAPITULO II: ASPECTOS GENERALES	
2.1 Aceros	14
2.2 Fierros Fundidos	19
2.3 Aplicaciones de Aceros y Fundiciones	20
CAPITULO III: ALEACIONES FUNDIDAS RESISTENTES AL IMPACTO Y DESGASTE POR ABRASION	
3.1 Aceros al Manganeso	25
3.2 Aceros de Alta Resistencia al Impacto	30
3.3 Aceros fundidos 7% Cromo	38
3.4 Fundiciones Blancas	44
CAPITULO IV: VARIABLES CONSIDERADAS EN LA SELECCIÓN DE ALEACIONES	
4.1 Composición Química	52
4.2 Tratamientos Térmicos	52
4.3 Dureza	53
4.4 Resistencia a la Tracción	54
4.5 Resistencia a la fluencia	54
4.6 Diseño de Geometría de la pieza	54

CAPITULO V: APLICACIONES Y SOLUCIONES INDUSTRIALES	
5.1 Caso 1: Elementos de desgaste en Chancadoras de Crudo	55
5.2 Caso 2: Elementos de desgaste en Forros de Molino de Crudo y Cemento	61
5.3 Caso 3: Revestimientos de Desgaste en Forros de Chutes de Descarga en Minas	69
CONCLUSIONES	73
BIBLIOGRAFIA	75

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1: Diagrama de Fase Hierro-Carbono	17
Figura 3.1a: Mantos de Chancadora Cónica	27
Figura 3.1b: Mantos de Chancadora Cónica	27
Figura 3.2: Mandíbulas Fija y Móvil	28
Figura 3.3: Rastra	28
Figura 3.4: Bandejas de Apron Feeder (Alimentadores)	29
Figura 3.5: Zapatas de Oruga	29
Figura 3.6: Diagrama CCT Acero HSLA	31
Figura 3.7: Estructura Martensítica	32
Figura 3.8: Martillo para Trituradora de Crudo	33
Figura 3.9: Martillos para trituradora de Clinker	34
Figura 3.10: Mandíbula Fija y Mandíbula Móvil	34
Figura 3.11: Barras Batidoras de Chancadoras de Crudo	35
Figura 3.12: Revestimientos para Chute de Descarga	35
Figura 3.13: Revestimientos de Tolvas de almacenamiento	36
Figura 3.14: Eslabones de cadena de arrastre	36
Figura 3.15: Adaptadores	37
Figura 3.16: Ruedas Transportadores	37
Figura 3.17: Sección isotérmica Diagrama Fe-Cr-C a 850°C	39
Figura 3.18: Sección isotérmica Diagrama Fe-Cr-C a 1000°C	40
Figura 3.19: Sección isotérmica Diagrama Fe-Cr-C a 1090°C	41
Figura 3.20: Placas de Pared de Entrada de Molino de Crudo	42
Figura 3.21: Forros de 1ra Cámara de Molino	42
Figura 3.22a: Placas de Pared Intermedia ó Diafragma de Molino	43
Figura 3.22b: Placas de Pared Intermedia ó Diafragma de Molino	43
Figura 3.24: Placas Ranuradas de Pared de Salida de Molino de Crudo/Cemento	50
Figura 3.25: Barras de Impacto	50
Figura 3.26: Impulsor	51

Figura 3.27:	Liner protectores de Tolvas	51
Figura 4.1:	Liner protectores de Tolvas	54
Figura 5.1:	Barra Batidora – Dimensiones	56
Figura 5.2:	Ensayos No Destructivos en Barra Batidora fundida	57
Figura 5.3:	Barra Batidora instalada	60
Figura 5.4:	Barra Batidora instalada	60
Figura 5.5:	Vista exterior de un Molino de Crudo / Cemento	61
Figura 5.6:	Esquema de un Molino de Crudo / Cemento	62
Figura 5.7:	Placa Primera Cámara Molino nueva – Cara de Trabajo	63
Figura 5.8:	Placa Primera Cámara Molino nueva – Cara lado casco	63
Figura 5.9:	Sección Placa Primera Cámara Molino	64
Figura 5.10:	Placas que han cumplido su ciclo de operación	65
Figura 5.11:	Placas de Pared Intermedia	66
Figura 5.12:	Placas de Pared Intermedia con fisura	67
Figura 5.13:	Placas de Pared Intermedia rota	68
Figura 5.14:	Diagrama de Procesos de Trituración	69
Figura 5.15:	Liners típicos para tolvas	70
Figura 5.16:	Liners para ser sometido a pruebas	71
Figura 5.17:	Liners de Stock Pile en operación	72

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Figura 3.1: Composición Química del Acero al Manganeso	25
Figura 3.2: Propiedades Mecánicas del Acero al Manganeso	26
Figura 3.3: Composición Química de Acero HSLA	30
Figura 3.4: Propiedades Mecánicas del Acero HSLA	33
Figura 3.5: Composición Química de Acero 7%Cr	38
Figura 3.6: Composición Química de Fundición Perlítica	45
Figura 3.7: Composición Química de Fundición Ni-Cr	46
Figura 3.8: Composición Química de Fundición Ni-Hard 4	46
Figura 3.9: Composición Química de Fundición Alto Cromo	47
Figura 5.1: Aleaciones de Prueba	57
Figura 5.2: Composición Química	58
Figura 5.3: Composición Química de Acero 7%Cr	66
Figura 5.4: Composición Química de Fundición ASTM A532	68
Figura 5.5: Composición Química de Fundición ASTM A532	71

INTRODUCCIÓN

En los procesos industriales, principalmente aquellos relacionados con la reducción de tamaños de los minerales (metálicos y no metálicos), se utilizan equipos de chancado y/o molienda cuyos elementos son fabricados de aceros de alta tenacidad y resistencia al desgaste.

Durante el circuito de tratamiento o procesamiento del mineral y con tamaños cada vez más reducidos, el comportamiento del mineral va variando y las propiedades que se requieren para los elementos de desgaste se basan en una alta resistencia al desgaste por abrasión.

La abrasión es una de las principales dificultades que afectan a los equipos en la manipulación de los materiales que provienen de minas o de canteras dependiendo del sector industrial, debido a que están expuestos a condiciones de operación severas por el desgaste ocasionados por la fricción de la partículas del material.

El deterioro por desgaste con el tiempo origina mal funcionamiento de los equipos, lo que se refleja en una disminución del rendimiento de los procesos productivos. Actualmente, las empresas están orientadas a mantener o superar sus ratios de producción, lo que implica que se debe minimizar las paradas de mantenimiento.

Una de las formas de lograrlo es reemplazando las piezas que están hechas de aleaciones tradicionales y que por estar expuestas a condiciones de operación

extremas como fuerte impacto y/o alta abrasión, sufren deterioros prematuros con cortos períodos de vida, por otro material reforzado que supere esos tiempos.

A nivel mundial se ha investigado y desarrollado “aleaciones antidesgaste”, por diferentes procesos, encontrándose aceros laminados, fundidos e inclusive de material cerámico. En los últimos años la fundición peruana ha orientado sus esfuerzos a desarrollar y/o perfeccionar “aleaciones antidesgaste” para atender las necesidades del mercado en su afán por disminuir la frecuencia de las reparaciones, y en consecuencia, elevar la productividad de las plantas.

Cabe mencionar, que las condiciones extremas de operación no solo están referidas al impacto o abrasión, sino que hay también otras variables importantes como la temperatura, la corrosión, etc. Sin embargo, el presente informe está centralizado en las aleaciones de “alta resistencia al impacto” y “desgaste por abrasión” en condiciones normales, que se han constituido en las más comerciales y están siendo aceptadas y utilizadas primordialmente en los sectores mineros y de construcción.

Quiero finalizar, agradeciendo a la empresa Fundición Fumasa S.A., por haberme permitido ampliar los conocimientos aprendidos en esta casa de estudios, por las facilidades brindadas y confianza depositadas para fortalecer los lazos comerciales entre proveedor-cliente, los mismos que han resultado en experiencias gratificantes al llevar a la práctica ideas y soluciones ofrecidas a la industria.

CAPITULO I

OBJETIVOS Y JUSTIFICACION

1.1 Objetivo General

Proporcionar información para mejorar y optimizar la productividad en general, en términos de alargamiento de vida útil y de gestión de mantenimiento de equipos.

1.2 Objetivos específicos

Aplicar los conocimientos metalúrgicos en los diferentes procesos industriales.

Proveer soluciones a la industria, para el mejoramiento continuo, teniendo como base la retroalimentación de las empresas usuarias y la comunicación constante.

Demostrar el interés de las empresas por consumir productos de fundición nacionales, en lugar de importarlos.

1.3 Justificación

Con el crecimiento económico, se incrementó también la competencia entre las industrias, lo que los ha obligado a elaborar planes de mantenimiento preventivo, con la finalidad de evitar paradas no programadas por falla de equipos por deterioro de piezas de desgaste.

Los costos por pérdida en la producción tanto por estas paradas no programadas, como por las frecuentes necesidades de reparación pueden llevar a las empresas a una situación insostenible.

Una de las formas de minimizar los gastos en que incurren las empresas por reparación o remplazo de piezas de equipos, es utilizando materiales de aleaciones resistentes al impacto y desgaste por abrasión, que alarguen su vida útil en la condiciones de trabajo a las que se encuentran sometidas.

En algunos casos, esta selección de materiales va acompañado de algunos criterios adicionales como por ejemplo, del diseño de la pieza y de la relación costo/beneficio, entre otros.

CAPITULO II

ASPECTOS GENERALES

Las aleaciones ferrosas son aleaciones binarias de hierro-carbono, que forman un compuesto intersticial debido a la difusión del carbono en la estructura cristalina del hierro al tener el primero, un radio atómico menor. La clasificación de estas aleaciones según su contenido de carbono comprende dos grandes grupos: Aceros cuando el contenido de carbono es de 0.03% a 1.075% y Fundiciones cuando el carbono se encuentra en más del 2%.

2.1 Aceros

Los aceros conservan las características metálicas del hierro en estado puro, pero la adición de carbono (por lo general menor de 1%) y de otros elementos, mejoran sus propiedades físico-químicas, templabilidad, resistencia mecánica, dureza, tenacidad, resistencia al desgaste, soldabilidad o maquinabilidad, etc.

Normas.- Con la finalidad de estandarizar las distintas variedades de los aceros existen Sistemas de Normas que regulan la composición de los aceros (valores mínimos o máximos para cada tipo de elemento) y las utilidades de los mismos en cada país, en cada fabricante de acero y en muchos casos en los mayores consumidores de aceros. La más difundida internacionalmente es la Clasificación AISI (American Iron and Steel Institute – Instituto Americano del Hierro y Acero), pero existen otras normas como la ASTM (American Society for Testing and Materials), SAE (Society of Automotive Engineers - Sociedad de Ingenieros Automotores), DIN (Deutsches Institut für Normung – Instituto Alemán de Normalización), ISO (International Standard Organization), UNE (Una Norma Española), entre otras.

Elementos aleantes.- Los principales elementos utilizados en la fabricación de los aceros son los siguientes:

- Aluminio: como desoxidante en porcentajes inferiores a 0.08%.
- Boro: aumenta la templabilidad sin reducir la maquinabilidad en pequeñas cantidades (del 0,001 al 0,006%).
- Cromo: forma carburos muy duros y proporciona al acero mayor dureza, resistencia y tenacidad a cualquier temperatura. Solo o aleado con otros elementos, mejora la resistencia a la corrosión.
- Molibdeno: es un elemento común del acero y aumenta la profundidad de endurecimiento del mismo, así como su tenacidad. Los aceros inoxidables austeníticos contienen molibdeno para mejorar la resistencia a la corrosión.
- Nitrógeno: se agrega a algunos aceros para promover la formación de austenita.
- Níquel: es un elemento gammágeno que facilita una estructura austenítica a temperatura ambiente, aumenta la tenacidad y resistencia al impacto. El níquel se utiliza mucho para producir acero inoxidable, porque aumenta la resistencia a la corrosión.
- Silicio: aumenta moderadamente la templabilidad. Se usa como elemento desoxidante. Aumenta la resistencia de los aceros bajos en carbono.
- Titanio: se usa para estabilizar y desoxidar el acero, mantiene estables las propiedades del acero a alta temperatura. Se utiliza por su gran afinidad con el Carbono para evitar la formación de carburo de hierro al soldar acero.
- Wolframio: también conocido como tungsteno. Forma con el hierro carburos muy complejos estables y durísimos, soportando bien altas temperaturas. En porcentajes del 14 al 18 %, proporciona aceros rápidos con los que es posible triplicar la velocidad de corte de los aceros al carbono para herramientas.
- Vanadio: tiene acción desoxidante y forma carburos complejos con el hierro, que proporcionan al acero una buena resistencia a la fatiga, tracción y poder cortante en los aceros para herramientas.

Los elementos indeseables o impurezas que se presentan en los aceros son:

- Azufre: límite máximo aproximado: 0,06%. Aunque se considera un elemento perjudicial, su presencia es positiva para mejorar la maquinabilidad en los procesos de mecanizado.
- Fósforo: límite máximo aproximado: 0,06%. El fósforo resulta perjudicial porque reduce la ductilidad y la tenacidad, haciéndolo quebradizo, a veces se agrega para aumentar la resistencia a la tensión y mejorar la maquinabilidad.

Fases Hierro-Carbono.- Los aceros poseen diferentes constituyentes o fases según su temperatura tales como perlita, cementita, ferrita, austenita, martensita y bainita. En el diagrama de equilibrio o de fases Fe-C, Figura 2.1, se representan las transformaciones que sufren los aceros al carbono:

- Hasta los 911 °C, el hierro ordinario, cristaliza en el sistema cúbico centrado en el cuerpo (BCC) y recibe la denominación de hierro α o ferrita. Es un material dúctil y maleable y es ferromagnético hasta los 768 °C. La ferrita puede disolver muy pequeñas cantidades de carbono.
- Entre 911 y 1400 °C cristaliza en el sistema cúbico centrado en las caras (FCC) y recibe la denominación de hierro γ o austenita, que se deforma con mayor facilidad y es paramagnética.
- Entre 1400 y 1538 °C cristaliza de nuevo en el sistema cúbico centrado en el cuerpo y recibe la denominación de hierro δ que es en esencia el mismo hierro alfa pero con parámetro de red mayor por efecto de la temperatura.
- A mayor temperatura el hierro se encuentra en estado líquido.
- Si se añade carbono al hierro, sus átomos podrían situarse simplemente en los intersticios de la red cristalina de éste último; sin embargo en los aceros aparece combinado formando carburo de hierro (Fe_3C), es decir, un compuesto químico definido y que recibe la denominación de cementita de modo que los aceros al carbono están constituidos realmente por ferrita y cementita.

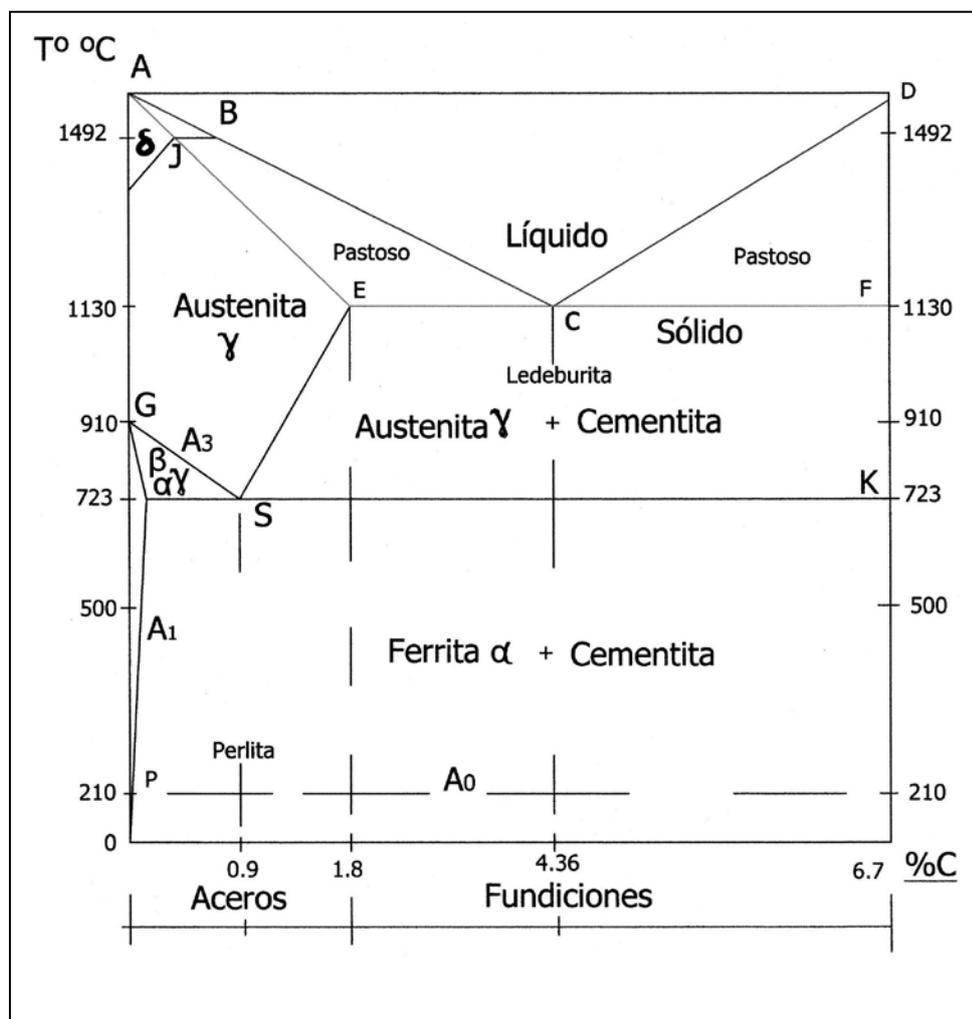


Fig. 2.1 : Diagrama de Fase Hierro-Carbono

El diagrama de fases Fe-C muestra dos composiciones singulares:

- Un eutéctico (composición para la cual el punto de fusión es mínimo) que se denomina ledeburita y que contiene un 4,3% de carbono. La ledeburita aparece entre los constituyentes de la aleación cuando el contenido en carbono supera el 2%. De este modo se observa que por encima de la temperatura crítica A₃ los aceros están constituidos sólo por austenita, una solución sólida de carbono en hierro γ y su microestructura en condiciones de enfriamiento lento dependerá de las transformaciones que sufra ésta.

- Un eutectoide en la zona de los aceros, donde la temperatura de transformación de la austenita es mínima. El eutectoide contiene un 0,77 %C (13,5% de cementita) y se denomina perlita. Está constituido por capas alternas de ferrita y cementita.

La existencia del eutectoide permite distinguir dos tipos de aleaciones de acero:

- Aceros hipoeutectoides ($< 0,77\% \text{ C}$), con perlita en matriz de ferrita.
- Aceros hipereutectoides ($> 0,77\% \text{ C}$), con perlita en matriz de cementita.

Las fases anteriormente mencionadas, perlíticas, son obtenidas enfriando lentamente los aceros al carbono. Cuando se modifican las condiciones de enfriamiento se puede obtener:

- Martensita, que es el constituyente típico de los aceros templados y se obtiene de forma casi instantánea al enfriar rápidamente la austenita. Después de la cementita (y los carburos de otros metales) es el constituyente más duro de los aceros.
- Bainita, producida por velocidades intermedias de enfriamiento y tiene estructura similar a la perlita formada por agujas de ferrita y cementita pero de mayor ductilidad y resistencia.
- Austenita, por enfriamiento rápido de aleaciones con elementos gammágenos (que favorecen la estabilidad del hierro γ) como el níquel y el manganeso, como por ejemplo de los aceros inoxidable austeníticos.

Clasificación de los aceros.- Los aceros se clasifican de acuerdo a su composición química:

- Aceros al carbono, cuyos contenido de carbono varía de 0.03 a 2% C
- Aceros corten, de buena resistencia a la corrosión atmosférica.

- Acero inoxidable, que contienen de 10 a 12%Cr, de buena resistencia a la corrosión.
- Acero microaleados (HSLA) de baja aleación de alta resistencia, de mejores propiedades mecánicas o mejor resistencia a la corrosión que los demás aceros.
- Aceros rápidos, para herramientas y tienen adiciones de Molibdeno, Wolfranio, Vanadio y Cromo, de buena resistencia a la temperatura y al desgaste.

2.2 Fierro Fundido

Estas aleaciones presentan un contenido de carbono mayor a 2% y comprende a:

- Fierro fundido gris, que es el más utilizado. El grafito en forma de láminas le proporciona características de baja resistencia a la tracción, al impacto y a la abrasión. Sin embargo, presenta propiedades excelentes como la colabilidad, facilidad para el maquinado y amortiguación de vibraciones.
- Fierro fundido nodular, cuyo grafito se encuentra en forma esferoidal, lo que le da excelentes propiedades mecánicas como, elasticidad, resistencia a los choques, capacidad de alargamiento, etc
- Fundiciones Blancas, utilizadas en condiciones donde predomina el desgaste abrasivo, aunque son frágiles y de poca maquinabilidad. Las propiedades dependen los elementos de aleación. Se usa el cromo y molibdeno porque son formadores de carburos y aumentan su estabilidad. El manganeso favorece la formación de carbono combinado, además de tener una afinidad especial con el azufre, lo cual le proporciona una aplicación insustituible.

Otro efecto de estos elementos es conducir el proceso de solidificación según los mecanismos de transformación de la austenita en perlita, bainita o martensita y de ahí la formación de diferentes microestructuras.

Los fierros aleados con níquel, se usan en condiciones de desgaste abrasivo. Tienen matriz austenítica. Un material típico de este grupo es el Ni-Resist resistente a la corrosión y al calor.

Los fierros aleados con cromo: presentan elevada dureza y resistencia al desgaste abrasivo. Este tipo de hierro aleado es muy poco maquinable.

Los fierros aleados con cromo y níquel: presentan una matriz martensítica con carburos del tipo $(Fe,Cr)_3C$, con dureza elevadas y con maquinabilidad limitada. Un material típico es el Ni-Hard.

Fierros aleados con molibdeno: el molibdeno es el endurecedor más efectivo del hierro fundido. Se emplean niveles de 1% generalmente y provoca la formación de estructuras aciculares con una elevada dureza, lo cual limita considerablemente su maquinabilidad.

Las variedades de las fundiciones blancas están tipificadas en la norma ASTM A532.

2.3 Aplicaciones de Aceros y Fundiciones

Debido a que los dos componentes de estas aleaciones ferrosas (Fierro y Carbono) se encuentran en abundancia en la naturaleza, su utilización es amplia y abarca varios sectores de la industria: construcción, agroindustrial, minero, aeronáutico, automotriz, alimenticio, etc.

Un gran porcentaje de esta demanda de aleaciones ferrosas está orientada a los procesos de conminución, en el que mediante la aplicación de fuerzas físicas se disminuye el tamaño de las rocas de mineral o se alcanza un tamaño ideal para un proceso industrial.

En la mayoría de las aplicaciones los mecanismos de desgaste que aparecen en pares sólido-sólido son principalmente: desgaste abrasivo, adhesivo, por fatiga superficial, corrosivo mecánico y desgaste por frotamiento.

Por ser uno de los efectos que mayor pérdida de materiales y energía produce, se abordará en este capítulo el desgaste por abrasión e impacto.

2.3.1. Desgaste por abrasión.

Es el desgaste producido por partículas abrasivas que se deslizan sobre la superficie metálica produciendo desprendimiento de material, dislocaciones de cristales y ralladuras profundas. Este desgaste se pone de manifiesto en equipos agrícolas, de construcción y minería.

Otros factores que afectan el desgaste abrasivo son la temperatura, las cargas que actúan sobre la superficie de trabajo, condiciones ambientales tales como la humedad y el grado de compactación de las partículas. Se considera que todo desgaste abrasivo del material es un agrietamiento por fragilidad, como resultado de actos de deformación plástica y endurecimiento que se repiten cíclicamente.

El desgaste abrasivo se puede clasificar en:

- Desgaste abrasivo de baja presión, que ocurre por deslizamiento de las partículas moviéndose libremente por la superficie y las tensiones actuantes son bajas y no exceden la resistencia a la rotura del abrasivo.
- Desgaste abrasivo por alta presión, cuando el abrasivo es atrapado entre dos superficies de carga y el desgaste no es solo por penetración, sino también por fractura de las partes frágiles y por deformación plástica de la matriz. Este tipo de abrasión es característica de operaciones de trituración, pero también se presenta como efecto secundario en numerosas aplicaciones metal sobre metal.
- Desgaste abrasivo con impacto, el cual involucra la remoción de material por la acción de un abrasivo cuyas partículas son de un tamaño apreciable e impactan en la superficie bajo un ángulo determinado. La energía de impacto se transfiere

al material y hace que el abrasivo produzca grandes surcos y ralladuras apreciables a simple vista. Este tipo de desgaste es más frecuente en el transporte de minerales.

Es importante destacar que en la práctica el desgaste no se presenta en forma simple, sino que aparece combinado como:

- Impacto, abrasión y presión: en rodillos, cadenas y rodaje de tractores.
- Impacto, abrasión y temperatura: en martillos y cuchillas de cizalla.
- Impacto y presión: en martillos de pilón y machacadoras, quebradoras.
- Abrasión, erosión y corrosión: válvulas y asientos, tornillos sinfín.
- Fricción, corrosión y cavitación: impulsores, álabes de turbinas.

2.3.2 Destrucción por impacto

Este tipo de destrucción se produce por la transferencia de energía cinética de un cuerpo simple sobre una superficie de extensión apreciable. Produce deformación superficial y del material que altera su forma y dimensión lo que puede devenir en la fractura por fatiga debido a impactos repetidos. Surge como resultado de contactos de cuerpos generalmente metálicos aunque no se excluyen rocas y minerales, que acompañados de determinada velocidad, originan choques intermitentes contra la pieza.

Se pueden clasificar en:

- Impacto ligero: la energía cinética es absorbida por una deformación elástica del metal base que recobra su dimensión pudiendo dar lugar a deformaciones plásticas a muy largo plazo. Las aleaciones recomendadas para este caso son los aceros inoxidables austeníticos.
- Impacto medio: produce deformaciones plásticas a corto plazo e inclusive trituración y desprendimientos superficiales a corto plazo. En estos casos se recomienda el uso de aceros con estructura martensítica.

- Impacto alto: produce deformaciones plásticas de gran magnitud de modo instantáneo y fracturas a corto plazo. Las aleaciones recomendadas para trabajar en estas condiciones son los aceros austeníticos.

CAPITULO III

ALEACIONES FUNDIDAS RESISTENTES AL IMPACTO Y DESGASTE POR ABRASION

Las aleaciones fundidas de alta resistencia al impacto y desgaste por abrasión están constituidas por las familias de aceros aleados y fundiciones blancas que tienen en su composición química, elementos aleantes como el Cr, Ni, Mo, Mn, etc, que le confieren propiedades mecánicas superiores a los aceros estructurales o fundidos convencionales. Estos elementos mejoran su resistencia mecánica, a la corrosión, su templabilidad, dureza y tenacidad, entre otros.

Otro aporte lo constituyen los microaleantes como el B y V, que son elementos afinadores de grano para lograr estructuras internas más compactas.

Sin embargo, la esencia de la aplicación de estas aleaciones queda definida por los tratamientos térmicos a los que son sometidos, los mismos que pueden ser Recocido, Normalizado, Temple, Revenido y Apagado, en forma individual o como una combinación de ellos. Importante también es, el medio y velocidad de enfriamiento a utilizar que puede ser agua o aire del medio ambiente o con aire forzado.

Todas estas variables de elementos químicos y tratamientos térmicos dependerá de la estructura (Austenita ó Martensita) que se quiera conseguir en las piezas fundidas y del tipo de trabajo al que serán sometidos.

A continuación se describirán las principales aleaciones que están respondiendo a la demanda de la industria minera, cementera y otros en general.

3.1 Aceros al Manganeso

Los aceros austeníticos al manganeso fueron desarrollados por Sir Robert Hadfield, de allí proviene la denominación más conocida de estas aleaciones, aceros Hadfield. Estos aceros combinan alta dureza, ductilidad y tenacidad con una gran capacidad de endurecimiento por deformación plástica en frío.

3.1.1 Composición Química

La composición más utilizada es la que tiene 1.2%C y 12%Mn que según la norma ASTM A128 corresponde al grado A, siendo la más tenaz en la familia. Sin embargo, existen otros grados cuyos elementos químicos se indican en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Composición Química de Ac. Manganeso

GRADO	ELEMENTO %						
	C	Mn	Cr	Mo	Ni	Si	P
A	1.05-1.35	11 mín				1.00 máx	0.07 máx
B1	0.90-1.05	11.5-14.0				1.00 máx	0.07 máx
C	1.05-1.35	11.5-14.0	1.50-2.50			1.00 máx	0.07 máx
D	0.70-1.30	11.5-14.0			3.00-4.00	1.00 máx	0.07 máx
E1	0.70-1.30	11.5-14.0		0.90-1.20		1.00 máx	0.07 máx
E2	1.05-1.45	11.5-14.0		1.80-2.10		1.00 máx	0.07 máx

3.1.2 Tratamientos Térmicos

Las piezas fundidas deben tener un tratamiento térmico adecuado para lograr la resistencia y ductilidad requeridas. Este consiste de calentar uniformemente hasta una temperatura aplicable al grado de acero producido, de por lo menos 1000°C, durante un tiempo, luego enfriarlo súbitamente en agua a 25°C.

La estructura que se obtiene es Austenita, no magnética, altamente tenaz, en la cual se ha suprimido la transformación martensítica de endurecimiento por la combinación del alto contenido de manganeso y carbono, así como, la precipitación de carburos debido a la alta velocidad de enfriamiento desde la T° de austenización.

3.1.3 Propiedades Mecánicas

La composición química de estos aceros, permite que el mecanismo de endurecimiento se deba únicamente a la acumulación de dislocaciones por absorción de energía y por esta razón, las propiedades del material evolucionan localmente permitiendo que las piezas adquieran una superficie dura manteniendo un núcleo tenaz. Véase Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Propiedades Mecánicas de Ac. al Manganeso

PROPIEDAD	VALOR
Resistencia a la Tracción	100 Kpsi
Elongación	30%
Dureza Brinell	200-240 HBN

Una de las características que restringen su uso, es la dificultad para mecanizar, pero tienen una gran ventaja que son fácilmente soldables.

3.1.4 Aplicaciones

Estos aceros se usan ampliamente en los campos de movimiento de tierra, minería, perforación de pozos, siderurgia, industria ferroviaria y en la fabricación de los productos del cemento y de la arcilla. Se usan en equipos tales como trituradoras de roca, molinos, dientes de pala, bombas para manejar grava, martillos, placas de desgaste y zapatas, entre otros.

En las figuras 3.1a, 3.1b, 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5 se pueden observar las diferentes aplicaciones de los aceros al manganeso.



Figura 3.1a: Mantos de Chancadora Cónica



Figura 3.1b: Mantos de Chancadora Cónica



Figura 3.2: Mandíbulas Fija y Móvil



Figura 3.3: Rastra



Figura 3.4: Bandejas de Apron Feeder
(Alimentadores)



Figura 3.5: Zapatas de Oruga

3.2 Aceros de Alta Resistencia al Impacto

Estas aleaciones son aceros de bajo carbono (también denominada HSLA –High Strength Low Alloy) y se encuentran tipificadas en la Norma ASTM A148 Gr. 210 - 180.

3.2.1 Composición Química

La fabricación de estos aceros en Hornos de Inducción presenta menor nivel de inclusiones no metálicas que aquellos aceros elaborados en otros tipos de Hornos como los Eléctricos de Arco. En la fusión de estos aceros se utiliza un tipo de chatarra especial de bajos porcentajes de P y S, el proceso de desoxidación se realiza en la cuchara utilizando Calcio-Silicio y se adicionan afinadores de grano como V, Ti o B. Para el análisis químico se hacen ensayos previos en el espectrómetro y se hacen ajustes con ferroaleantes.

La composición química estándar se observa en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Composición Química de Acero HSLA

ELEMENTO %					
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
0.25-0.30	1.40-1.60	0.50-0.90	1.80-2.10	0.50 máx	0.50 máx

3.2.2 Tratamientos Térmicos

Los tratamientos térmicos aplicables a este tipo de acero son normalmente de Temple y Revenido. Para obtener mejores propiedades en la aleación, se adiciona un tratamiento térmico previo de Recocido ú homogenización.

El tratamiento térmico de Recocido se realiza a una T° de 1000°C +/- 20°C para homogenizar el grano y puedan eliminarse las segregaciones químicas y cristalinas. El enfriamiento se hace dentro del Horno hasta la temperatura ambiente.

Luego se aplica el Temple según la Figura 3.6: Diagrama CCT Acero HSLA.

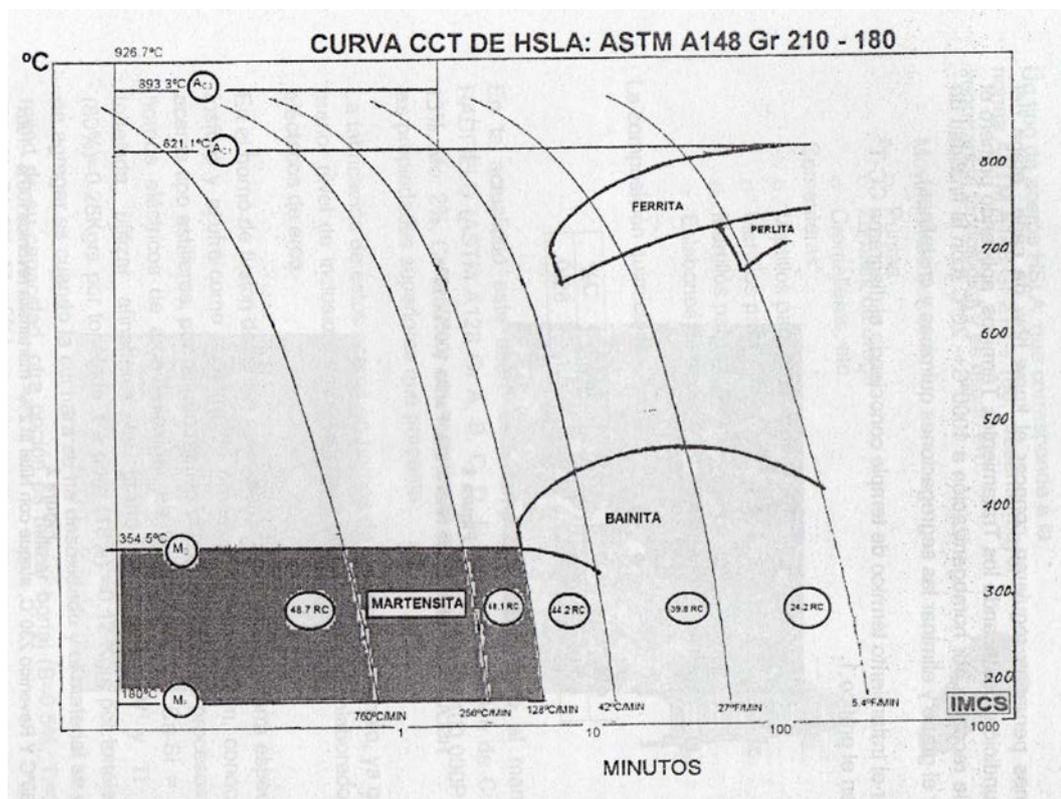


Figura 3.6: Diagrama CCT Acero HSLA

Según el gráfico, el Punto A3, que es la línea de la transformación alotrópica de Austenita (γ) en Ferrita (α), corresponde a 890°C, por lo que la austenización debe llevarse a cabo por lo menos 40°C mas sobre este punto, es decir mas o menos a 930°C, para conseguir afinar el grano austenítico.

Para el temple es importante considerar la T° de inicio de transformación de la martensita (solución solida intersticial sobresaturada de carbono que cristaliza en la red tetragonal BCT –Body Center Tetragonal-, debido a la deformación que produce en su red cristalina la inserción de los átomos de carbono), que es alrededor de los 354.5°C y la T° de fin de transformación que está por debajo de 180°C. La transformación martensítica tiene lugar a velocidades de temple muy rápidas que dificultan la difusión del carbono.

Finalmente se hace un revenido a 200°C, para eliminar las tensiones generadas durante la transformación martensítica y ablandar la estructura devolviendo tenacidad al material. Se debe evitar llegar a T°s de 300°C por que se inicia la transformación de Cementita Fe₃C.

Al término del tratamiento térmico la pieza fundida presentará una estructura martensítica de forma acicular o agujas. Ver Figura 3.7.



Figura 3.7: Estructura Martensítica Revenida

3.2.3 Propiedades Mecánicas

Las propiedades mecánicas se definen en el tratamiento térmico que le provee de una alta resistencia mecánica que lo hace aptos para desempeñarse en condiciones de grandes esfuerzos e impactos y abrasiones severas.

Los valores de estas propiedades se indican en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Propiedades Mecánicas de Ac. HSLA

PROPIEDAD	VALOR
Resistencia a la Tracción	210 Kpsi
Punto de Fluencia	180 Kpsi
Dureza Brinell	450-540 HBN

Debido a sus excelentes propiedades de resistencia al impacto y al desgaste, en la actualidad están reemplazando en algunas aplicaciones, a los Aceros fundidos al Manganeso tipo Hadfield (ASTM A128 Gr. A, C).

3.2.4 Aplicaciones

Las principales aplicaciones de estas aleaciones se encuentran en Placas de Blindajes, Placas para Chute de descarga, Mandíbulas Fijas y Móviles, Martillos de trituración, Barras de impacto, Sprockets de cadena, Eslabones de cadena de arrastre, entre otros. Ver Figuras 3.8 al 3.16.



Figura 3.8: Martillo para Trituradora de Crudo



Figura 3.9: Martillos para trituradora de Clinker



Figura 3.10: Mandíbula Fija y Mandíbula Móvil



Figura 3.11: Barras Batidoras de Chancadoras de Crudo



Figura 3.12: Revestimientos para Chute de Descarga



Figura 3.13: Revestimientos de Tolvas de almacenamiento



Figura 3.14: Eslabones de cadena de arrastre



Figura 3.15: Adaptadores, Uñas



Figura 3.16: Ruedas Transportadores

3.3 Aceros fundidos 7% Cromo

Estos aceros de excelente resistencia al desgaste por abrasión, surgieron como una alternativa a los aceros de la familia 12% Cr, utilizados ampliamente en la industria cementera, principalmente en los procesos de molienda de crudo y cemento. La diferencia entre ambas aleaciones es la presencia de sus carburos.

3.3.1 Composición Química

La composición de estos aceros se muestra en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5: Composición Química Ac. 7%Cr

ELEMENTO %					
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
0.6-1.2	0.60-0.90	0.60-0.90	7.0-8.0	0.50 máx	0.80 máx

3.3.2 Tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos que se deben realizar son Temple a una T° de 1000°C , por un tiempo de aproximadamente 6 horas, seguido de un enfriamiento con aire forzado. Luego se hace un Revenido a 200°C , manteniendo por un período de 8 a 10 horas con enfriamiento al ambiente.

La estructura que se obtiene es una matriz martensítica con presencia de carburos secundarios finos diseminados en su matriz.

Tomando como referencia el Diagrama Ternario Fe-Cr-C y para un mejor entendimiento del comportamiento estructural de ambos aceros (7 y 12% Cr), se describirán los Diagramas Binarios efectuando cortes a diferentes temperaturas.

a) Sección Isotérmica a 850°C :

El acero 7% Cr está compuesto de hierro γ + C_2 y se encuentra bastante cercano al dominio γ , lo que quiere decir que hay menos carburos C_2 en el 7% de Cr que en el 12% Cr. Ver Figura 3.17

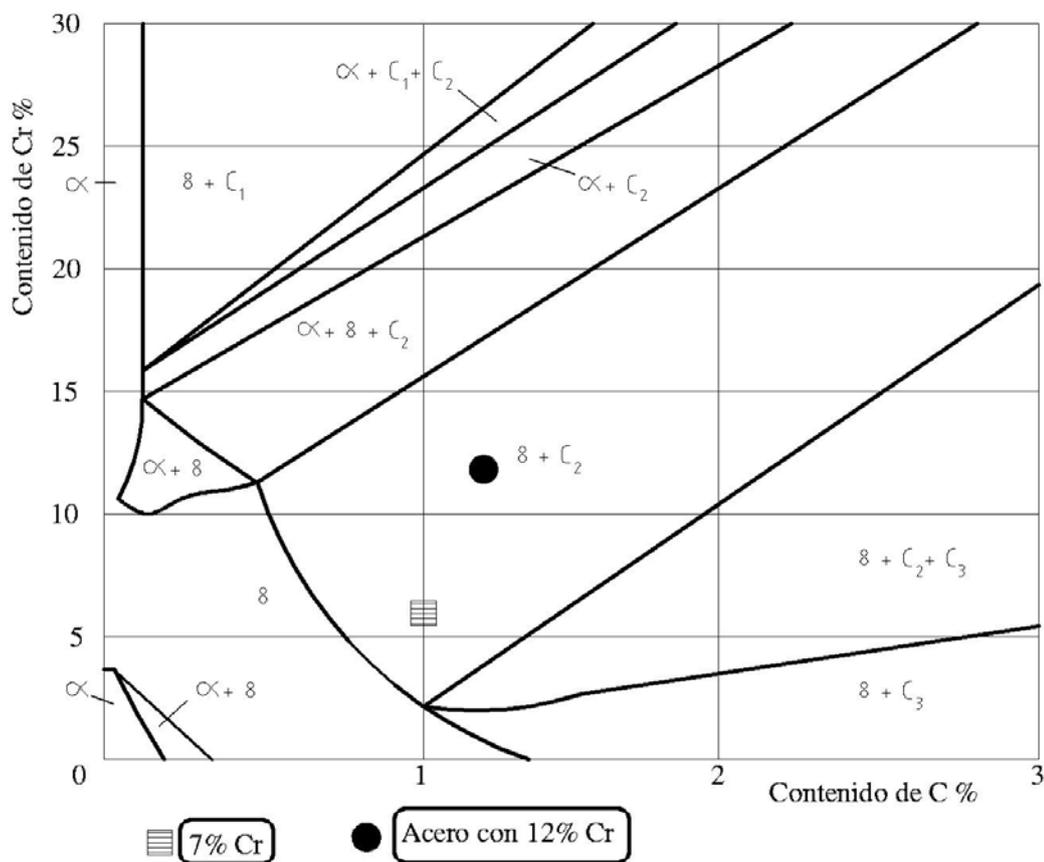


Figura 3.17: Sección isotérmica Diagrama Fe-Cr-C a 850°C

b) Sección Isotérmica a 1000°C:

El 7% de Cr está muy cerca del dominio gamma, no hay entonces prácticamente más carburos C_2 mientras que el 12% Cr está todavía fuertemente cargado de este carburo. Ver Figura 3.18.

c) Sección Isotérmica a 1090°C:

El 7% de Cr está completamente en el dominio gamma entonces no hay más carburos $(CrFe)_7C_3$ mientras que el 12% Cr está todavía compuesto de gamma + C_2 . Ver Figura 3.19

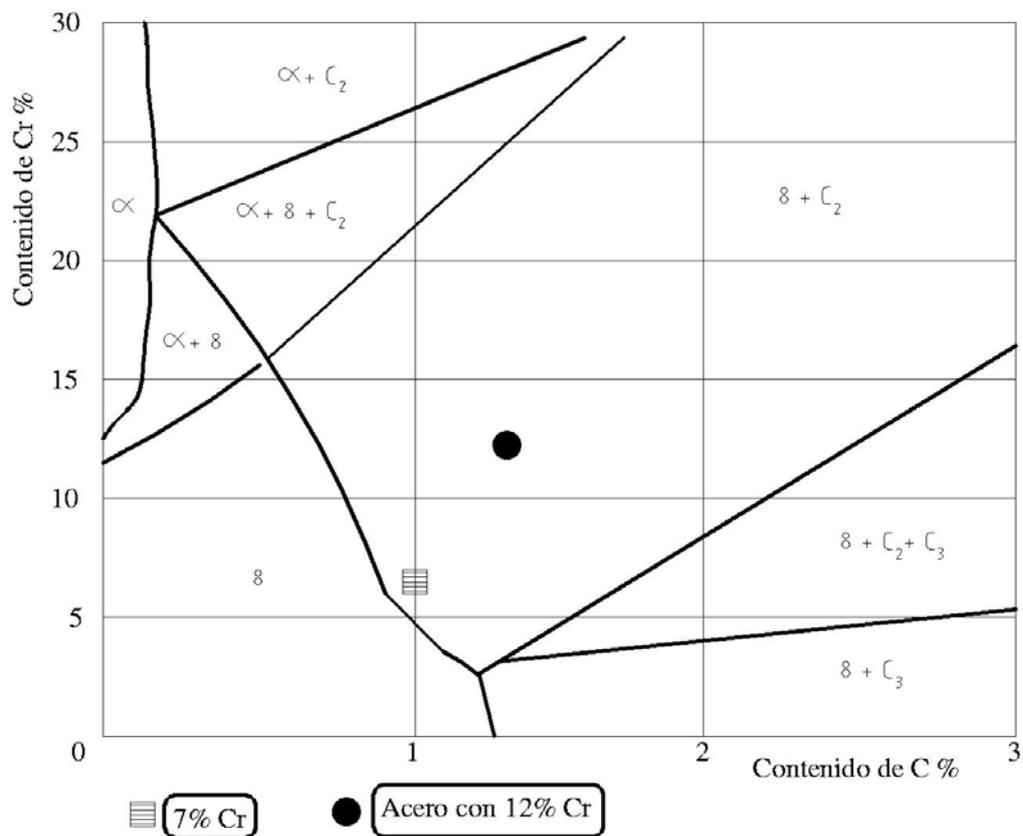


Figura 3.18: Sección isotérmica Diagrama Fe-Cr-C a 1000°C

Si se considera que una temperatura industrial de tratamiento térmico raramente sobrepasa los 1050°C, vemos que en el curso del enfriamiento a partir de estas temperaturas tendrá una estructura martensítica con una fina repartición de carburos en toda la masa.

Para el 12%Cr, los carburos C_2 sin disolver quedarán entonces en las juntas de granos, el carbono encontrándose por su gran parte en esos carburos C_2 habrá poca precipitación de carburos finos en la matriz.

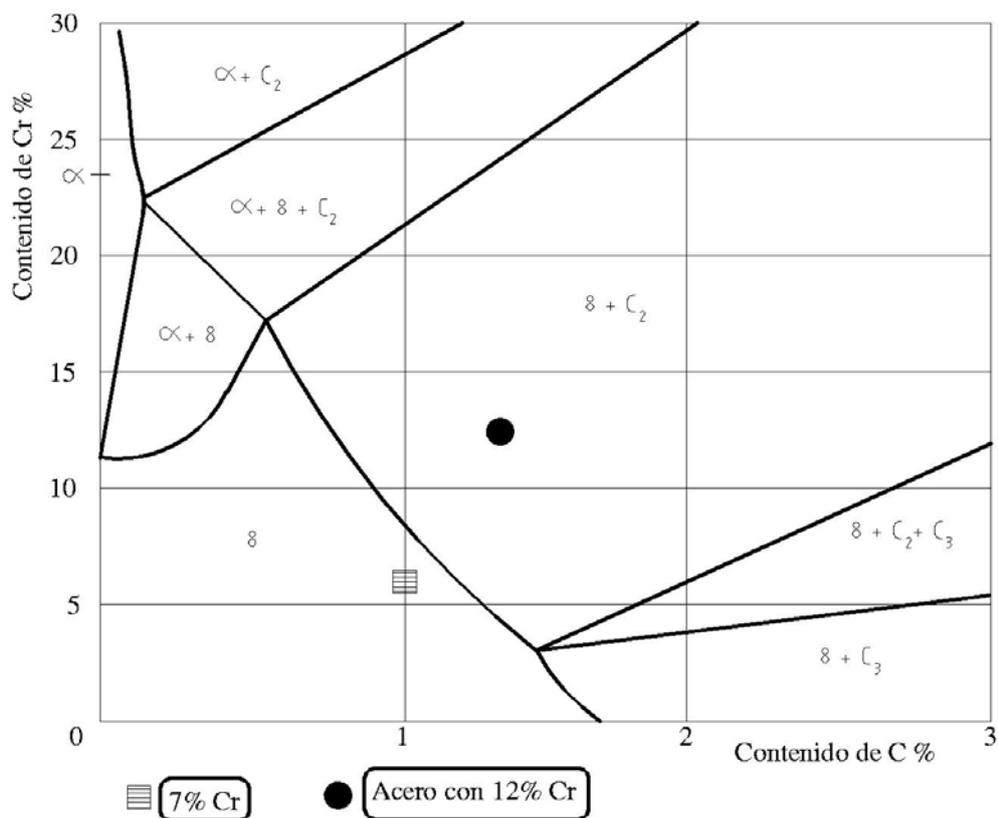


Figura 3.19: Sección isotérmica Diagrama Fe-Cr-C a 1090°C

3.3.3 Propiedades Mecánicas

La propiedad más importante de estos aceros es la dureza, cuyo rango varía desde 500 a 600 HBN.

3.3.4 Aplicaciones

La variación de su porcentaje de Carbono y de las durezas obtenidas flexibiliza su uso en Molinos tanto en las Paredes de entrada, Placas levantadoras, Placas Ranuradas Separadoras, Parrillas de descarga, Placas de blindaje, Martillos, entre otros.

Ver Figuras 3.20, 3.21, 3.22a y 3.22b.



Figura 3.20 : Placas de Pared de Entrada de Molino de Crudo



Figura 3.21: Forros de 1ra Cámara de Molino



Figura 3.22a: Placas de Pared Intermedia ó Diafragma de Molino



Figura 3.22b: Placas de Pared Intermedia ó Diafragma de Molino

3.4 Fundiciones Blancas

Las fundiciones resistentes a la abrasión (RA) están referidas a la clase de materiales ferrosos que tienen alta dureza, carburos resistentes al desgaste y que pueden ser fabricados por métodos convencionales de la fundición.

Estos carburos son los que confieren la excelente resistencia al desgaste en este tipo de fundiciones, sin embargo son estos mismos carburos los que hacen que la tenacidad sea baja y sean propensos a fractura por impacto. En consecuencia, la resistencia a la abrasión y la tenacidad son propiedades mutuamente exclusivas en las fundiciones RA.

3.4.1 Clasificación

La resistencia a la abrasión no es una propiedad distinta de un material, como la dureza o la resistencia a la tracción, pero depende de la microestructura del material y del ambiente abrasivo.

Las fundiciones Blancas resistentes a la abrasión se clasifican en cuatro grupos principales, basados en sus elementos aleantes y su microestructura: Perlíticos (FeC), Ni-Hard o Ni-Cr (M_3C), Ni-Hard 4 (M_7C_3) y Alto Cromo (M_7C_3).

a) Fundiciones Perlíticas:

Es la más antigua de este tipo de aleaciones. El enfriamiento de la fundición contra una superficie fría forma la red de carburos resistentes a la abrasión. La formación de carburos en contraposición al grafito se debe a la naturaleza ambivalente del Sistema Fe-C, donde el carbono puede precipitarse como grafito (fase estable) o carburo de hierro (fase metaestable). Esta fase metaestable que se produce por un enfriamiento rápido sufre una reacción de solidificación eutéctica, formando austenita y carburo de hierro, conocido como Cementita (Fe_3C).

La dureza está usualmente entre 350 a 500 HBN, que puede incrementarse formando más carburos o incrementando la dureza de la perlita al refinar su estructura laminar de ferrita y carburos.

La composición química se muestra en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6: Composición Química de Fundiciones Perlíticas

ELEMENTO %								
C	Si	Cr	Ni	Cu	Mn	Mo	P	S
2.4-3.9	0.4-1.5	0-2.0	0-2.0	0-1.5	0.2-1.0	0-0.5	1.0 máx	0.15máx

b) Ni-Hard o Fundiciones Ni-Cr:

Industrialmente, son conocidas como Ni-Hard (de la International Nickel Company – INCO -) y están referidas a un grupo de 4 tipos de composiciones (Ni-Hards 1, 2, 3 y 4) que utilizan Níquel como principal elemento aleante para la templabilidad. Otra característica importante es el uso del Cromo para promover la formación de carburos sobre el grafito. Se recomienda que el contenido de Cr sea de 1.4% mínimo aunque lo recomendable es 2%. El Cr estabiliza la reacción eutéctica y favorece la formación de la estructura de carburos independiente de la velocidad de enfriamiento.

Cuando se usa el Cr (hasta cierto punto el Mn y Mo) para estabilizar la fase de carburos, estos carburos se conocen como M_3C para reflejar la naturaleza mixta de esta fase. El carburo M_3C no es fácil de distinguir del carburo Fe_3C , formado en las fundiciones perlíticas.

En este caso la dureza es más alta que las perlíticas, alrededor de 550 HBN, que resulta de la formación de martensita versus perlita en la condición de fundido. Este cambio metalúrgico es el resultado del alto contenido de Ni. El contenido de 3 a 5% Ni permite que la austenita alcance la T° de inicio de la martensita sin que sea obstaculizada por la formación de perlita.

La composición química se muestra en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7: Composición Química de Fundiciones Ni-Cr

CLASE	ELEMENTO %					
	C	Si	Cr	Ni	Mn	Mo
Ni-Hard 1 ASTM A532 1A	3.0-3.6	0.8 máx	1.4-4.0	3.3-5.0	2.0 máx	1.0 máx
Ni-Hard 2 ASTM A532 1B	2.9	0.8 máx	1.4-4.0	3.3-5.0	2.0 máx	1.0 máx

c) Ni-Hard 4:

Estas aleaciones tienen una tenacidad un poco mayor a los Ni-Hard debido a que tienen un carburo de metal con mejor respuesta a la fractura y se conocen químicamente como M_7C_3 .

Este carburo mejorado se forma al incrementar el contenido de Cr a un mínimo de 7% y el Si alrededor de 1.8%. No solo incrementa la tenacidad sino que es más duro que el carburo M_3C . El inconveniente de este Ni-hard 4 son sus altos costos comparados al Ni-Hard tradicional.

Las durezas alcanzan los 550 a 650 HBN.

La composición química se muestra en la Tabla 3.8

Tabla 3.8: Composición Química de Ni-Hard 4

CLASE	ELEMENTO %					
	C	Si	Cr	Ni	Mn	Mo
Ni-Hard 4 ASTM A532 1D	2.5-3.6	1.0-2.2	7.0-11.0	5.0-7.0	1.30 máx	1.0 máx
Ni-Hard 4 NiDI	2.6-3.2	1.8-2.0	8.0-9.0	4.5-6.5	0.4-0.6	0.4 máx

d) Fundiciones Blancas de Alto Cromo:

Estas aleaciones son usadas cuando se requieren altas propiedades de tenacidad, resistencia a la abrasión y en algunos casos a la corrosión. Sus propiedades mecánicas y de desgaste se derivan de una bien controlada matriz de su microestructura y la fina distribución de los carburos M_7C_3 . Para secciones gruesas puede conseguirse alta templabilidad con la combinación de aleantes adecuados, como el Cr, Mo, Ni y Cu.

Una de las características de esta familia que lo hace diferente de las fundiciones al Ni-Cr es su estructura as-cast. Después del vaciado, la solidificación y el enfriamiento a temperatura ambiente, las fundiciones de alto cromo se supersaturan con C y Cr. El alto contenido de Cr estabiliza la matriz austenítica hasta la T° ambiente. Sin embargo, la composición de esta familia es tan amplia, que la microestructura as cast fácilmente puede ser ferrítica, perlítica, bainítica, ausferrítica, martensítica, austenítica o una mezcla. Por esta flexibilidad estas aleaciones tienen un amplio rango de aplicaciones.

La composición química se muestra en la Tabla 3.9

Tabla 3.9: Composición Química de Fundiciones Alto Cromo

CLASE	ELEMENTO %					
	C	Si	Cr	Ni	Mn	Mo
ASTM A532 IIA	2.4-2.8	1.0 máx	12	0.5 máx	0.5-1.5	0.5-1.0
ASTM A532 IIB	2.4-2.8	1.0 máx	15	0.5 máx	0.5-1.5	1.0-3.0
ASTM A532 IIC	2.8-3.6	1.0 máx	15	0.5 máx	0.5-1.5	2.3-3.5
ASTM A532 IID	2.0-2.6	1.0 máx	20	1.5 máx	0.5-1.5	1.5 máx
ASTM A532 IIE	2.6-3.2	1.0 máx	20	1.5 máx	0.5-1.5	1.5 máx
ASTM A532 IIIA	2.3-3.0	1.0 máx	25	1.5 máx	0.5-1.5	1.5 máx

3.4.2 Tratamientos Térmicos

Los tratamientos térmicos realizados a las fundiciones blancas tienen como objetivo tener fundiciones muy duras para una máxima resistencia a la abrasión ó ablandarla para hacerlos maquinables.

a) Las Aleaciones Ni-Hard fue diseñada para usarlos en condición as-cast, pero actualmente la mayoría de las fundiciones son tratadas térmicamente. Hay 3 tratamientos básicos que se aplican:

- Revenido en un rango de 225-275°C. El revenido a baja temperatura hace que la martensita sea menos frágil y mejore su tenacidad.
- Doble revenido primero a 450°C seguido de un enfriamiento en aire y luego un revenido a 275°C. Estas dos etapas de revenido reduce la dureza, pero se incrementa su resistencia a la fatiga por impacto repetido.
- Temple y Revenido. Es un tratamiento térmico completo por encima de la temperatura crítica en el rango de 750-850°C, seguido de enfriamiento lento y un revenido a baja temperatura, para maximizar la dureza y su resistencia a la abrasión.

b) Fundiciones Blancas de Alto Cromo y Cromo Molibdeno:

- Austenización: existe una T° de austenización óptima para obtener la máxima dureza, que varía para cada composición. Esta temperatura determina la cantidad de C que permanece en solución en la matriz de austenita. Si la T° es muy alta incrementa la estabilidad de la austenita y si es demasiado baja resulta en una martensita de bajo C, reduciendo por tanto la dureza y su resistencia a la abrasión. Un buen tratamiento térmico produce la desestabilización de la Austenita debido a la precipitación de carburos finos secundarios del tipo M_7C_3 dentro de la matriz austenítica.

En las fundiciones de Clase II que contienen de 12-20% Cr la austenización se hace en un rango de T° de 950-1010°C, mientras que en la Clase III que contienen de 23-28% Cr se austeniza de 1010-1090°C.

- Temple: enfriamiento con aire forzado desde la T° de austenización hasta por debajo del rango de T° de la Perlita, entre los 550-600°C.
- Revenido: de 2 a 4 horas en un rango de T° de 200 a 230°C, para restaurar algo de tenacidad en la matriz martensítica y para aliviar las tensiones residuales.

Gráficamente el ciclo de tratamiento térmico se puede visualizar en la Figura 3.23.

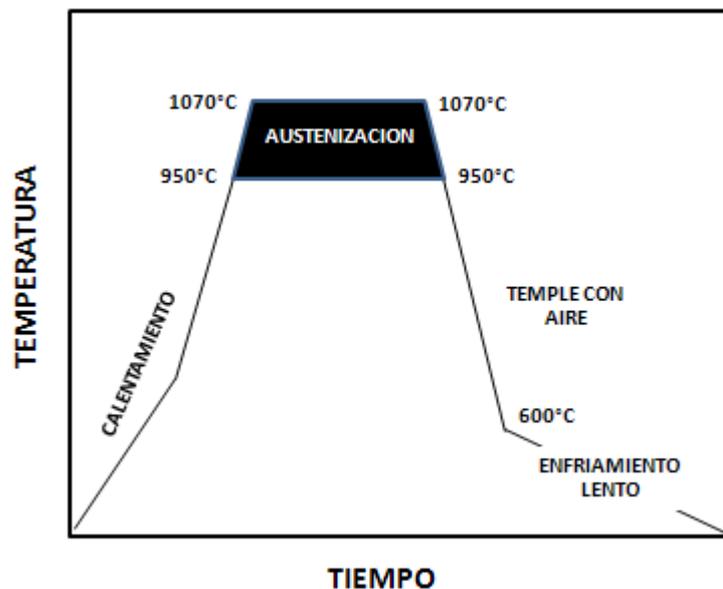


Figura 3.23: Ciclo de Tratamiento Térmico

3.4.3 Aplicaciones

La selección de una determinada fundición depende básicamente del costo, de la eficiencia y de la consistencia/fiabilidad.

Tienen una amplia gama de aplicaciones: Liners de Chutes, barras de desgaste martillo para trituradoras de carbón, impulsores, rodillos mezcladores, paletas para mezcladoras de concreto, barras batidoras partes de bombas, carzazas, forros de molino, entre otros. Ver Figuras 3.24, 3.25, 3.26 y 3.27.



Figura 3.24: Placas Ranuradas de Pared de Salida de Molino de Crudo/Cemento



Figura 3.25: Barras de Impacto



Figura 3.26: Impulsor



Figura 3.27: Liner protectores de Tolvas

CAPITULO IV

VARIABLES CONSIDERADAS EN LA SELECCIÓN DE ALEACIONES

4.1 Composición Química

La base de las aleaciones ferrosas son los elementos de Hierro y Carbono, sin embargo para controlar la estructura y propiedades de los aceros es indispensable la presencia de otros elementos aleantes, los cuales deben estar presentes en un rango determinado.

Los porcentajes de los elementos son analizados durante la fusión y balanceados al término, utilizando para ello una probeta, la misma que es analizada en un espectrómetro de emisión óptica, dispositivo electrónico que facilita la lectura en el más corto tiempo.

4.2 Tratamientos Térmicos

Es el conjunto de operaciones de calentamiento y enfriamiento, bajo condiciones controladas de temperatura, tiempo de permanencia, velocidad de enfriamiento, presión, etc., de las aleaciones en estado sólido, con la finalidad de realizar las transformaciones de fases y mejorar sus propiedades mecánicas, como la elasticidad, dureza y tenacidad. Existe una variedad de Tratamientos Térmicos (TT) pero los más utilizados son los siguientes:

- a) Temple, que consiste en elevar la T° de una fundición alrededor de los 1000°C para ser luego sometido a un enfriamiento súbito que puede ser en agua, aceite o aire. La estructura que se obtiene con este TT es Martensita, de alta dureza, frágil

y poco dúctil. La capacidad de una aleación para transformarse a Martensita se denomina Templabilidad y depende de su composición química.

- b) Revenido, que consiste en calentar una pieza fundida y templada hasta cierta T° , menor que la del temple, para reducir las tensiones internas que tiene un acero o fundición martensítica. Con esto se reduce la fragilidad y dureza inicial obtenida.
- c) Normalizado, que consiste en calentar una pieza hasta una T° crítica manteniéndola por un tiempo y luego se enfría al ambiente. El objetivo es obtener una aleación con una estructura más uniforme y con propiedades normales de su composición.
- d) Recocido, que consiste en calentar una pieza hasta una T° de austenización seguido de un enfriamiento a baja velocidad. Con este TT se logra disminuir la dureza y facilitar la maquinabilidad al ablandar el material.

Existe un recocido de homogenización, que consiste en calentar una pieza hasta la $T^\circ A_3+200^\circ\text{C}$, seguido de un enfriamiento lento dentro del horno. El objetivo principal es eliminar las heterogeneidades producidas durante la solidificación.

4.3 Dureza

Se denomina dureza al grado de resistencia a ser penetrado y/o rayado que ofrece un material. La dureza es una condición de la superficie del material y representa una propiedad mecánica del material. Se evalúa midiendo la resistencia a la penetración de un penetrador de un determinado material y geometría, sin necesidad de destruir la pieza metálica.

Las escalas de mayor aplicación son: Dureza Rockwell (HRC) y Dureza Brinell (HBN) y el rango de valores de durezas de las aleaciones que estamos mencionando son mayores a 450 HBN.

4.4 Resistencia a la Tracción

Es la resistencia que ofrece un material a esfuerzos tensionales o de tracción. Las unidades más utilizadas son: Kpsi (Kilo pound square inches) y Mpa (Mega Pascal). Para determinar los valores de esta resistencia se elaboran probetas de ensayo de tracción (de acuerdo a la Norma ASTM E008M). Las propiedades mecánicas que se obtienen al someter una probeta al esfuerzo axial hasta la rotura son principalmente: resistencia a la tracción, resistencia a la fluencia y la elongación. Ver Figura 4.1.

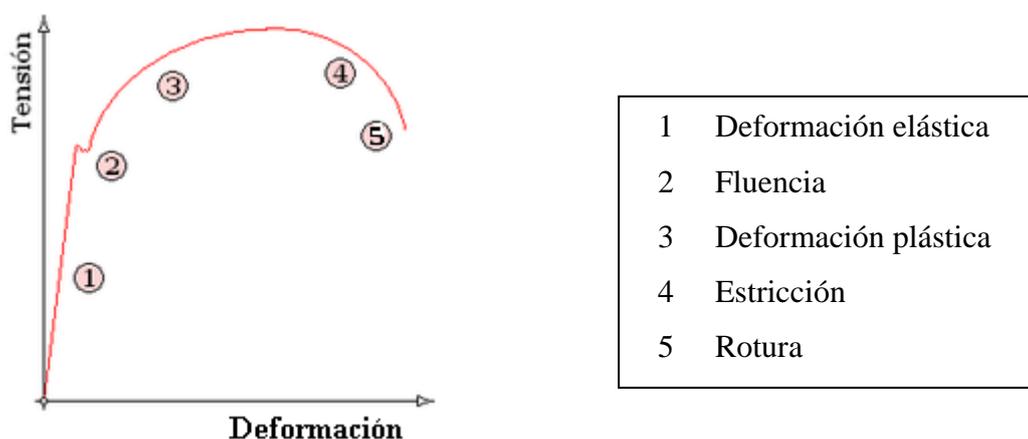


Figura 4.1: Curva de Deformación

4.5 Resistencia al Desgaste

Es la resistencia que ofrece una pieza o elemento estructural a la extracción y pérdida de material cuando se encuentra en deslizamiento relativo (rozamiento, fricción) con otra pieza o material.

4.6 Diseño de Geometría de la pieza

Consiste en diseñar la forma de una pieza, encontrando las zonas críticas de desgaste en operación. La geometría de un material es un factor importante cuando se trata de alargar la vida útil, reforzando y/o modificando zonas de mayor exposición al desgaste.

CAPITULO V

APLICACIONES Y SOLUCIONES INDUSTRIALES

Las aleaciones resistentes a impacto y abrasión son ampliamente usadas en la industria del cemento y en la minería, principalmente. Los casos prácticos a presentar se han desarrollado en los procesos de Chancado y Molienda en la producción del cemento, así como, en los procesos de acarreo, alimentación y descarga de minerales provenientes de mina a la sección de trituración.

5.1 Caso 1: Elementos de desgaste en Chancadoras de Crudo

Las plantas de cementos utilizan Chancadoras para triturar material proveniente de las canteras, los cuales pueden hacerse en una o dos etapas, primaria y secundaria. Los elementos de trituración pueden tener diferentes formas: conos, mandíbulas, martillos y barras batidoras, entre otros.

Este material compuesto por minerales de Caliza, Arcilla y Hierro, recibe la denominación de CRUDO, sus tamaños varían de 4 a 6" aproximadamente y vienen con diferentes composiciones y propiedades. Este crudo es la base para la fabricación del Clinker y Cemento.

Para el caso a tratar, indicaremos que en la Chancadora de Crudo se utilizan Barras Batidoras (Ver Figuras 5.1 y 5.2) de alta rotación y es preocupación del área de mantenimiento, conseguir una aleación que mejore el rendimiento de estas piezas por tonelaje procesado y reduzca las frecuencias de paradas para el cambio de los repuestos. Las características iniciales de las Barras Batidoras son las siguientes:

MATERIAL	ACERO FDO AL MANGANESO ASTM A128 GRADO A
DIMENSIONES	310 MM X 665 MM X 98 MM" ESP
RENDIMIENTO ACTUAL	1980 TON CALIZA

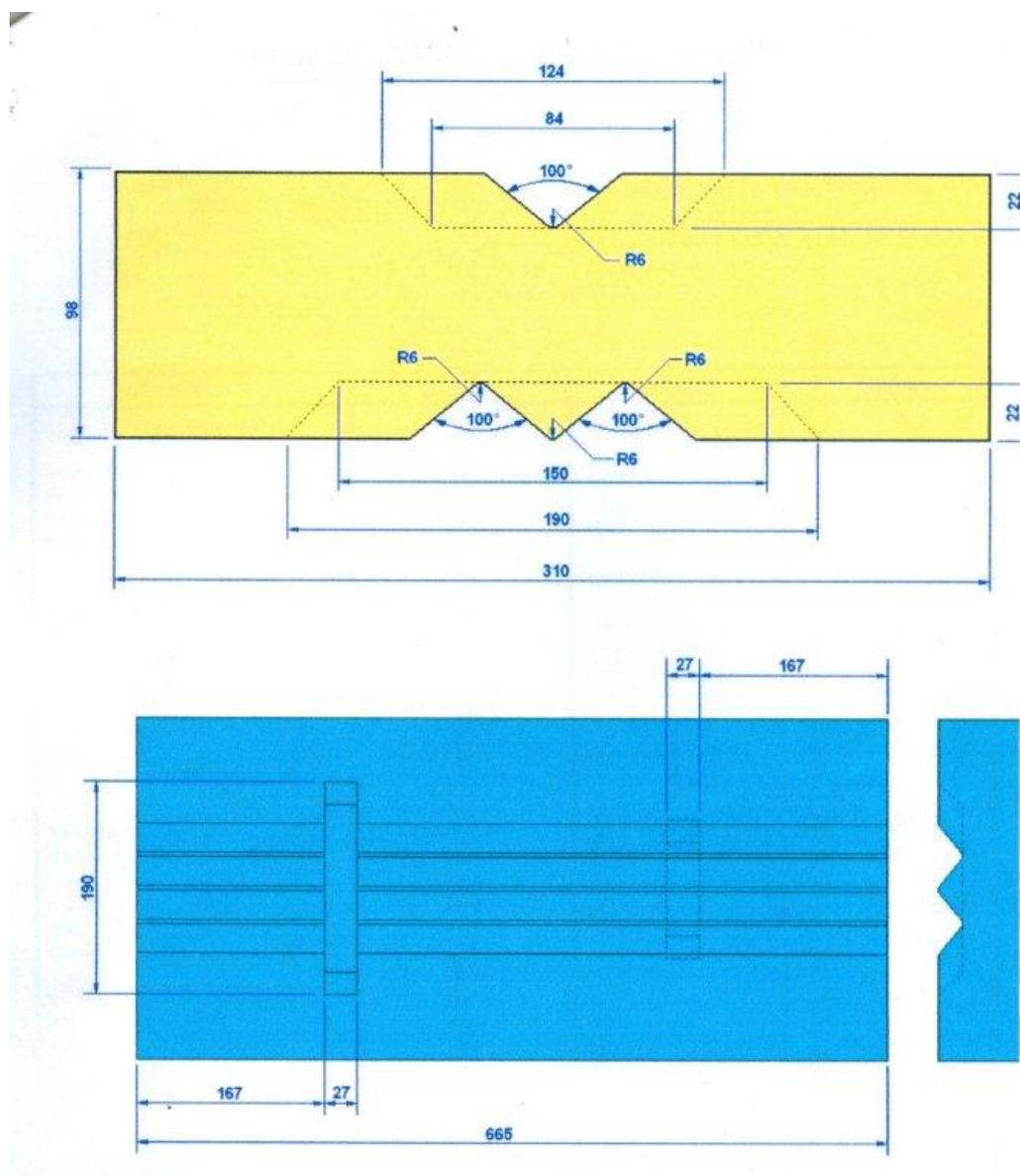


Figura 5.1: Barra Batidora - Dimensiones



Figura. 5.2: Ensayos No Destructivos en Barra Batidora fundida

Para mejorar la resistencia al impacto y al desgaste por abrasión se ha planteado lo siguiente:

- a) Realizar pruebas con 2 aleaciones alternativas.
- b) Modificar las dimensiones de las barras para alargar la vida útil

Las aleaciones usadas para las pruebas se observan en la Tabla 5.1

Tabla 5.1: Aleaciones de Prueba

ALEACION	DESCRIPCION	DUREZA
A	Acero al Manganeso ASTM A128	200-230 HBN
B	Acero ASTM A148 Gr. 210-180	480-520 HBN
C	Fundición ASTM A532 Gr. IIB	500-550 HBN*

* Puede llegar hasta 700 HBN pero no se recomienda porque es frágil.

En la Tabla 5.2 se puede observar las composiciones químicas:

Tabla 5.2: Composición Química

ALEACION	ELEMENTO %						
	C	Mn	Cr	Mo	Ni	Si	P
ASTM A128 GRADO A	1.05-1.35	11 mín				1.00 máx	0.07 máx
ASTM A148 GRADO 210-180	0.25-0.30	0.50-0.90	1.80-2.10		0.50 máx	1.40-1.60	
ASTM A532 GRADO IIB	2.40-2.80	0.50-1.50	15	0.50-1.00	0.50 máx	1.0 máx	

Los datos de Operación que se han obtenido de Planta son:

Los rendimientos de estas Barras se miden en función al total de tonelaje de caliza, arcilla o mineral de hierro procesado, en sus 2 volteos, es decir, trabajan en una posición inicial y luego se invierte de posición para que trabaje el lado opuesto.

En esta operación la variable tiempo no es relevante debido a que la chancadora puede estar parada por horas o semanas.

La cantidad de piezas que trabajan en la chancadora son de 8 unidades.

Aleación A: El tonelaje procesado fue:

$$35 \text{ Volquetes} \times 28 \text{ Ton c/Volquete} = 980 \text{ Ton Caliza}$$

$$35 \text{ Volquetes} \times 28 \text{ Ton c/Volquete} = 980 \text{ Ton Caliza}$$

1,960 Ton Caliza Total

Aleación B: El tonelaje procesado:

$$\begin{array}{rcl}
 42 \text{ Volquetes} \times 28 \text{ Ton c/Volquete} & = & 1,176 \text{ Ton Caliza} \\
 \\
 42 \text{ Volquetes} \times 28 \text{ Ton c/Volquete} & = & 1,176 \text{ Ton Caliza} \\
 & & \text{-----} \\
 & & 2,352 \text{ Ton Caliza Total}
 \end{array}$$

Aleación C: En esta prueba se utilizaron 06 Barras de Acero B y 02 Barras de Fundición tipo C:

$$9 \text{ Volquetes} \times 28 \text{ Ton c/Volquete} = 252 \text{ Ton Caliza}$$

Luego de este tonelaje se produjo la rotura de las 02 Barras Batidoras de aleación C, como pueden ver en las fotografías, Figuras 5.3 y 5.4. y fueron reemplazadas por otras 02 Barras de Acero de aleación B.

Resultados:

1. La aleación B, de alta resistencia al impacto ASTM A148 ha mejorado en 20% el rendimiento de barras. La utilización de aleaciones más resistente a la anterior deberá ser lento a fin de asegurar la ocurrencia de un desgaste antes que una rotura.
2. Las Barras por estar sujetas a un rotor, trabajan balanceadas, por tanto, no pueden ser modificadas en sus dimensiones por que se genera un aumento de carga, con más consumo de energía y también con riesgo de vibraciones. Además se incrementaría el costo unitario de cada Barra.



ZONA DE ROTURA

Figura 5.3: Barra Batidora instalada



Figura 5.4: Barra Batidora instalada

5.2 Caso 2: Elementos de desgaste en Forros de Molino de Crudo y Cemento

En los procesos de Molienda para la producción del Clinker y Cementos, los forros de los molinos (Ver Figura 5.5) sufren deterioro por impacto y abrasión, pero la selección óptima de una determinada aleación dependerá del diseño interior y tamaño de estos molinos.



Figura 5.5: Vista exterior de un Molino de Crudo / Cemento

Los molinos están separados por paredes intermedias que dividen el molino en dos o tres cámaras, y por tanto habrá mayor impacto en una cámara y mayor abrasión en otra. Se encontrará en el siguiente orden: Placas de Pared de Entrada, Placas levantadoras de la 1ra Cámara, Placa Ranurada Intermedia, Placas de Abrasión de la segunda cámara y Placas ranuradas de la Pared de Salida. Puede darse el caso de que existan dos paredes intermedias y por tanto tres cámaras de molienda.

Los tamaños de bolas de los molinos tendrán mayores diámetros en la primera cámara que los que se encuentran en una segunda cámara.

En la figura 5.6, se muestra el esquema de un molino de bolas utilizado en molienda.

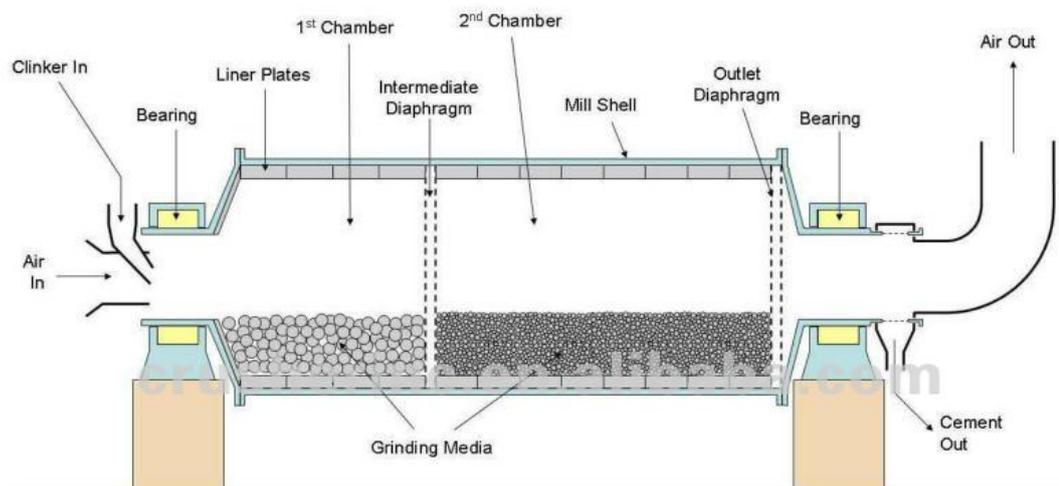


Figura 5.6: Esquema de un Molino de Crudo / Cemento

Las aleaciones tradicionales usadas para este fin han sido los aceros al manganeso, pero en los últimos años, las empresas cementeras se han mostrado más receptivas a las sugerencias de las fundiciones nacionales, para probar otras aleaciones como:

- Aleaciones de Alta resistencia al Cromo Molibdeno, 480-520 HBN
- Aleaciones de Alta resistencia de alto Cromo 12%, 550-600 HBN
- Aleaciones de Alta resistencia de alto Cromo 7%, 500-550 HBN
- Fundiciones resistentes al desgaste por abrasión, 600-650 HBN

Hacer las pruebas aplicando diferentes aleaciones ha sido un proceso largo, que ha tomado entre 6 a 8 años. El material de origen consistía de acero al manganeso ASTM A128.

Primera Cámara de Molino:

En este lado del Molino se tienen las Placas de la Pared de Entrada y las Placas del Casco, que están sometidas al impacto producido por Bolas de diferentes diámetros.

En las siguientes Figuras 5.7 y 5.8 se pueden observar la forma de forros de molino en sus estados de provisión:



Figura 5.7: Placa Primera Cámara Molino nueva – Cara de Trabajo



Figura 5.8: Placa Primera Cámara Molino nueva – Cara lado casco

El diseño original de estas placas se muestra en el perfil de la Figura 5.9.

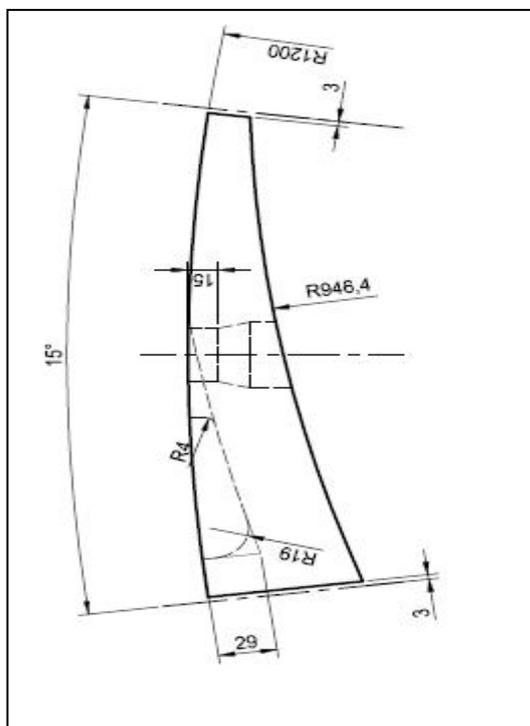


Figura 5.9: Sección Placa Primera Cámara Molino

- La aleación original es Acero Fundido al Manganeso ASTM A128
- Los espesores mínimo y máximo son 21 y 77 mm respectivamente.
- La zona de mayor espesor de 77 mm es la que soporta el impacto de las bolas de molino y por tanto tendrá mayor desgaste.
- Generalmente trabaja hasta un 50% de su espesor.

Con el objetivo de mejorar los rendimientos de las placas en esta etapa se ha ido migrando a diferentes aleaciones:

- Acero Fdo. al Cromo Molibdeno ASTM A148, con una dureza de 480 – 500 HBN
- Acero Fdo. Alto Cromo 12%Cr, con una dureza de 520-560 HBN
- Acero Fdo. Alto Cromo 7%Cr, con una dureza de 500-550 HBN

En la Figura 5.10 se puede observar el estado de las placas luego de ser retiradas para su evaluación respectiva. Se determina el rendimiento de las placas en función al tonelaje total procesado.



Figura 5.10: Placas que han cumplido su ciclo de vida útil

Los resultados obtenidos concluyen lo siguiente:

- El rendimiento de placas de Acero fdo al Cromo Molibdeno es el mismo que el material original.
- Al utilizar el acero fdo. al 12%Cr, se presentaron roturas a los 2 meses de operación en la parte del lomo, de espesor 77 mm.
- El acero fdo. al 7% de Cr ha dado mejores rendimientos. La eficiencia se incrementó en 40%.
- Si bien la composición química de este último está estandarizado, el contenido de Carbón deberá reajustarse al límite mayor, para incrementar su dureza. Ver Tabla 5.3.

Tabla 5.3: Composición Química de Ac. 7%Cr

ELEMENTO %					
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
0.6-1.2	0.60-0.90	0.60-0.90	7.0-8.0	0.50 máx	0.80 máx

Dureza: 500-550 HBN

Pared Intermedia:

Los forros que se encuentran en la pared intermedia son placas ranuradas. La luz de estas ranuras varían de 6 a 8 mm. La geometría de estas piezas es como se muestra en la Figura 5.11.



Fig. 5.11: Placas de Pared Intermedia

Las aleaciones utilizadas para reemplazar el acero al Manganeso han sido:

- Fundición Blanca ASTM A532 Gr. IIB, 600-650 HBN
- Acero Fdo. Alto Cromo 7%Cr, con una dureza de 500-550 HBN

Los resultados obtenidos concluyen lo siguiente:

- Por la geometría de las piezas (ranuras) las placas en ASTM A532 presentaron fisuras cerca al 50% de vida y posteriormente fractura. Ver Figura 5.12.



Fig. 5.12: Placas de Pared Intermedia con fisura

- Una fractura origina que las bolas de la primera cámara pasen a la segunda, con la consecuente parada para cambio de placas, reclasificación de bolas y pérdida de producción. Ver Figura 5.13.
- El acero fdo. al 7% de Cr ha dado mejores rendimientos. La eficiencia se incrementó en 30%.
- El contenido de Carbono deberá reajustarse al límite inferior del rango de composición, para reducir la dureza a 480-520 HBN

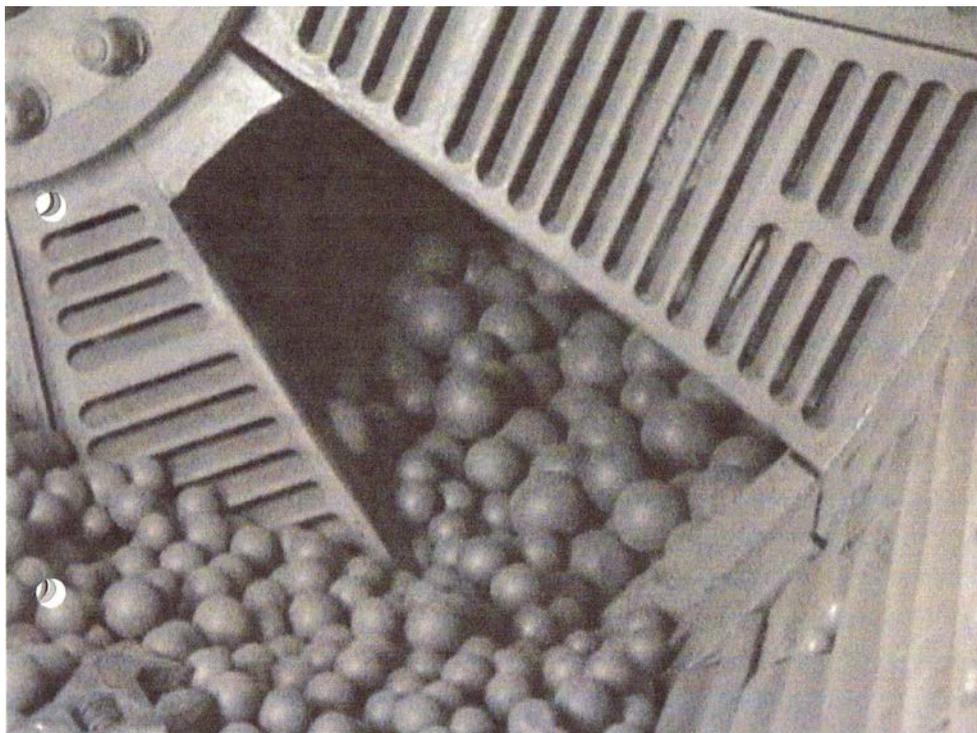


Fig. 5.13: Placas de Pared Intermedia rota

Placas de Segunda Cámara y Pared de Salida:

Los forros que se encuentran en esta cámara están sometidas a alta abrasión y mediano impacto.

La aleación original de Acero al Manganeso fue reemplazada por Fundición ASTM A532, con un rango de dureza de 580-620 HBN. El rendimiento se incrementó en un 100%. La composición química de esta aleación se observa en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4: Composición Química de Fundición A532 IIB

ALEACION	ELEMENTO %						
	C	Mn	Cr	Mo	Ni	Si	P
ASTM A532 GRADO IIB	2.40-2.80	0.50-1.50	15	0.50-1.00	0.50 máx	1.0 máx	

5.3 Caso 3: Revestimientos de Desgaste de Chutes de Descarga en Minas

El mineral extraído de mina y dependiendo de las condiciones de la voladura, es alimentado a las chancadoras secundarias, terciarias y es almacenado en tolvas y/o alimentados a la sección de molienda. Aquí los elementos de desgaste están sometidos tanto a impacto (por la altura de la que caen) como a abrasión (por fricción) de las piezas con el mineral.

Esta es una empresa minera que produce oro y el material proviene de un yacimiento a tajo abierto. En la figura 5.14 se muestra una parte del diagrama de flujo de la mina, en lo referente a los procesos de trituración y chancado.

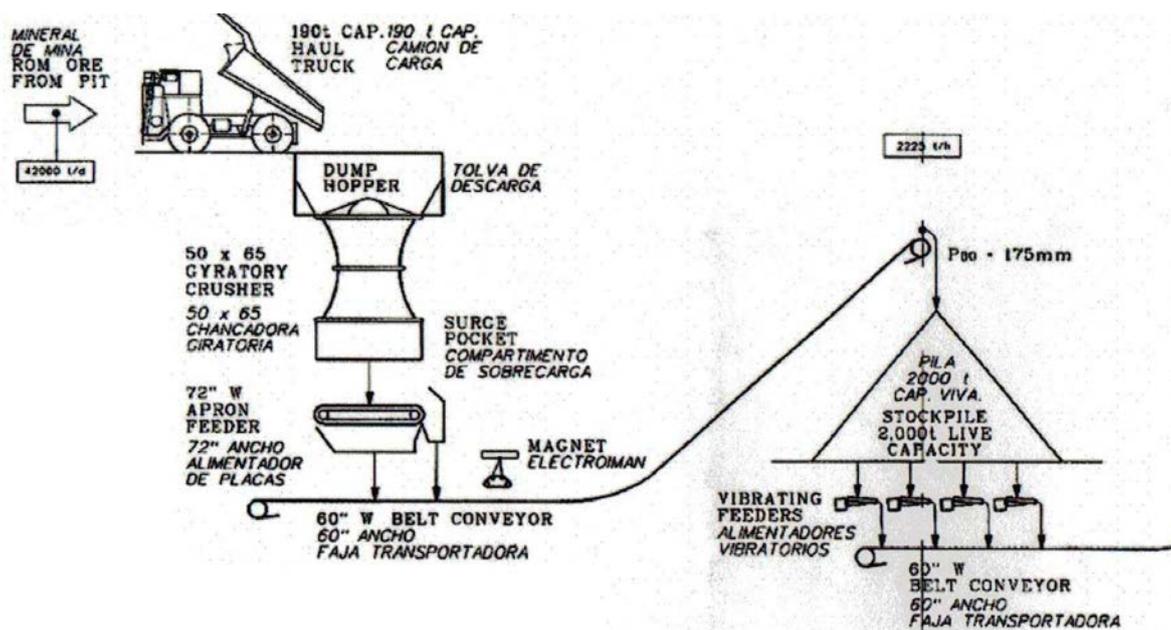


Fig. 5.14: Diagrama de Procesos de Trituración

Las piezas fundidas que se utilizan son Barras de desgaste, Placas de revestimiento, cóncavos y mantos, entre otros. En la tolva de descarga es donde se recibe impacto y en los procesos subsiguientes las piezas están expuestas a alta abrasión.

Las características de los liners al inicio fueron:

- Liners de diferentes dimensiones y espesores de superficie plana.
- La aleación utilizada en su fabricación ha sido Ni-Hard, 550-600 HBN.
- Presenta desgaste atípico en la zona de agujeros. Ver Figura 5.15.

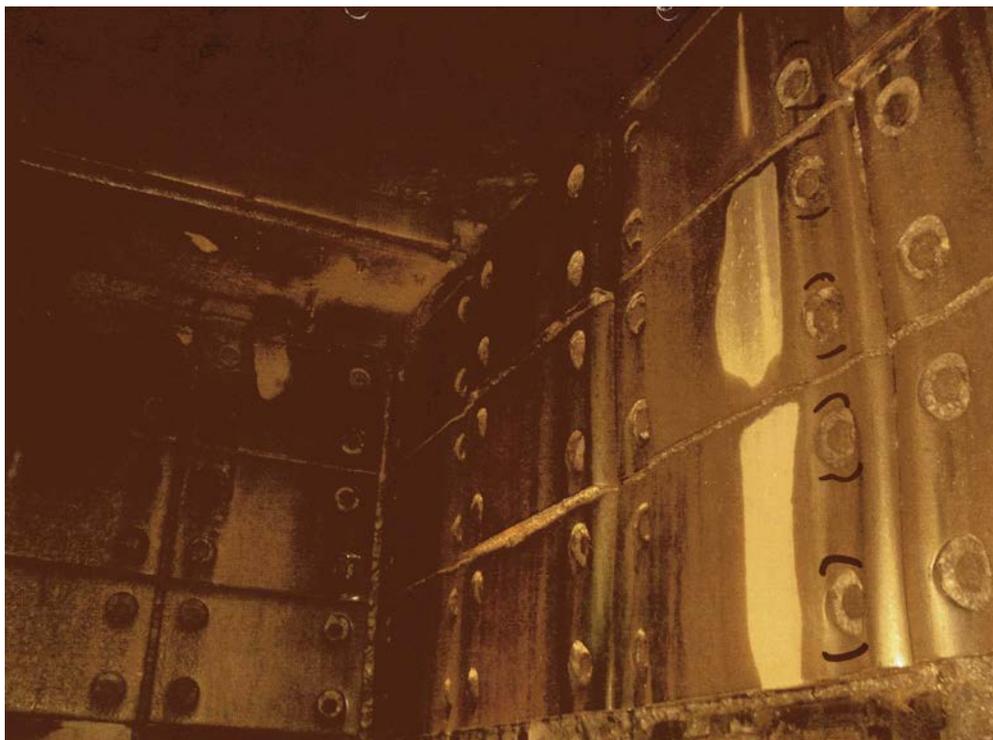


Fig. 5.15: Liners típicos para tolvas

A solicitud de los usuarios se propone mejorar en los siguientes aspectos:

- Mejorar la aleación por otras que ofrezca mayor vida útil.
- Evitar el desgaste atípico en la zona de los agujeros.
- Facilitar el manipuleo de las placas.
- Adicionar refuerzos para minimizar desgaste en la superficie de las placas.
- Hacer pruebas en la última tolva donde exista mayor abrasión, para evitar posibles fisuras en los liners que si reciben impacto.

Los resultados obtenidos luego de las pruebas y evaluaciones son:

- Se modificó la aleación a la fundición blanca ASTM A532 Grado IIB con durezas mayores a 650 HBN. Ver Tabla 5.5.

Tabla 5.5: Composición Química de Fundición A532 IIB

ALEACION	ELEMENTO %						
	C	Mn	Cr	Mo	Ni	Si	P
ASTM A532 GRADO IIB	2.50-3.30	1.50 máx	14-16	3.00 máx	2.50 máx	1.0 máx	0.1 máx

- Se colocaron orejas de izaje para facilitar el manipuleo. Ver Figura 5.16.
- Se colocó material adicional alrededor de los agujeros.
- Se reforzaron las superficies de los liners colocando listones con ángulos de inclinación para formar una cama con el material que pasa por las tolvas.



Fig. 5.16: Liners para ser sometido a pruebas

- El rendimiento obtenido con los cambios mencionados fue de 60% en las mismas condiciones de operación, es decir alimentado por el mismo tonelaje.
- En la Figura 5.17 se muestra la posición de los liners durante la prueba realizada.



Fig. 5.17: Liners de Stock Pile en operación

- Posteriormente se fue aplicando estos cambios a los liners de las otras tolvas con los resultados esperados.

CONCLUSIONES

1. La composición química de las aleaciones por sí sola no es determinante para decidir si una aleación es recomendable o no, dependerá también del estado microestructural del material establecido mediante tratamientos térmicos adecuados.
2. Aun cuando los elementos químicos presentes en la aleación se encuentren dentro de las especificaciones técnicas, también los TT deben ser los adecuados; por lo que es imprescindible hacer los ensayos de control de calidad: metalografía, dureza, tracción, ensayos no destructivos por líquidos penetrantes, partículas magnéticas y ultrasonido. Para ello, los equipos de control de calidad deberán encontrarse en estados calibrados para tiempos establecidos bajo normas técnicas específicas.
3. La rapidez del desgaste de las piezas fundidas estarán en función del grado de penetración del abrasivo en la superficie y por tanto es función de la dureza del material.
4. Las condiciones de operación de las chancadoras y molinos determinan la selección óptima de las aleaciones y estados microestructurales. En condiciones de impacto medio en las que se produce deformaciones plásticas se recomiendan aleaciones de estructura martensíticas, mientras que en la condiciones de fuerte impacto, en las que se producen deformaciones plásticas de gran magnitud en forma instantánea es recomendable trabajar con aleaciones de matriz austenítica.
5. La resistencia al desgaste de los aceros austeníticos se debe al endurecimiento por deformación plástica en frío (fenómeno ACRITUD) durante el trabajo normal de las piezas y no está relacionado con la dureza del material después del tratamiento térmico. No se recomienda realizar revenidos a altas temperaturas, ya que se precipitan carburos en los límites de grano, lo cual reduce el

endurecimiento por deformación y trae como consecuencia que el material sea menos resistente al desgaste.

6. Las fundiciones blancas pueden presentar una amplia variedad de propiedades dependiendo de su composición química y elementos aleantes, así como de las fases microestructurales presentes, las cuales pueden variar según el tratamiento térmico realizado.
7. Cabe precisar que en la mayoría de los casos, se ha logrado un aumento de la eficiencia del rendimiento de las piezas fundidas, variando las condiciones de fabricación en lugar de alterar las condiciones de operación en planta.
8. En la continua búsqueda por mejorar las propiedades físico químicas de los materiales y de incrementar su rendimiento en los diferentes procesos industriales, se hace imprescindible promover la Investigación y Desarrollo de nuevas aleaciones. Muchas de las empresas orientan el manejo de sus recursos casi en su totalidad, al cumplimiento de las metas de producción trazadas, destinando sólo un pequeño porcentaje al desarrollo de nuevos productos.
9. Las empresas proveedoras de piezas de fundición dependen mucho de los requerimientos y políticas de las empresas compradoras, por lo que a veces no se puede tener continuidad en las pruebas. Es importante resaltar que sólo el esfuerzo conjunto permitirá una reducción de costos de producción evitando paradas continuas de mantenimiento por cambio de repuestos, sin sacrificar la calidad y confiabilidad de las piezas.

BIBLIOGRAFIA

1. GEORGE LAIRD, RICHARD GUNDLACH, KLAUS ROHRIG, Abrasion-Resistant Cast Iron Handbook. Copyright 2000 American Foundry Society Des Plaines, Illinois 60016-8399
2. SCIENTIA ET TECHNICA AÑO XIII, NO 34, MAYO DE 2007. UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA. ISSN 0122-1701 231, Fundamentos Teóricos de los Aceros Austeníticos al Manganeso.
3. REVISTA DE METALURGIA VOL. 46 MUMERO EXTRAORDINARIO, 47-52,2010 ISSN: 0034-8570 EISSN: 1988-4222