



*Ministerio de Educación Superior
Instituto Minero-Metalúrgico
"Doctor A. Núñez Jiménez"*

*Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia*

Trabajo de Diploma

*Título: Efectos de la adición controlada de aluminio en
la microestructura de la aleación Ni-Resist L– Ni - Cr
20 – 2.*

Autor: Yoandrys Rodríguez León.

*Tutores: Ing. Maria Victoria Rojas Fernández.
Dr. Alberto Velásquez del Rosario.*

Curso: 2008-2009

Año del 50 aniversario del Triunfo de la Revolución.



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

DECLARACION DE AUTORIDAD:

Yo; Yoandrys Rodríguez León, autor de este trabajo de diploma certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo para fines docentes, educativos e investigativos.

Firma del Diplomante

Firma del Tutor

Firma del Tutor

Julio del 2009



DEDICATORIA:

- *A mis padres Rodrigo Rodríguez Rodríguez y Mercedes León Otaño ya que fueron los máximos inspiradores para que yo me formara como un profesional.*
- *A mi hermana Rosana Rodríguez León.*
- *A toda mi familia en forma general.*



AGRADECIMIENTOS:

- *A mis tutores María Victoria Rojas Fernández y Alberto Velásquez del Rosario por su ayuda y colaboración en la realización de este trabajo.*
- *A toda mi familia por apoyarme y ayudarme para que este sueño se hiciera realidad.*



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

Pensamiento:

El camino hacia el éxito no debe ser recorrido con botas de siete leguas. Paso a paso, poco a poco, pedazo por pedazo, ese es el camino a la prosperidad, ese es el camino a la sabiduría, ese es el camino a la gloria.

Charles Buxton.



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

Resumen:

En el presente trabajo, con el objetivo de evaluar la influencia de la adición controlada de aluminio en la microestructura de la aleación Ni – Resist L – Ni – Cr 20 – 2, se diseñaron tres variantes de aleaciones con la adición de 2; 2,5 y 3 por ciento de aluminio y se realizó el cálculo de carga de cada una de ellas. Para la evaluación de las propiedades de las variantes de aleaciones se realiza una caracterización metalográfica, para lo cual se confecciona la metodología de experimentación de los diferentes ensayos a realizar tales como ensayos de dureza, ensayos de microdureza y ensayos de desgaste. También se describen los equipos donde se realizaran los ensayos.

Palabras claves: Fundiciones austeníticas, aleación Ni-Resist.



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

Summary:

In the present work, with the objective to evaluate the influence of the controlled aluminum addition in the microstructure of the alloy Ni – Resist L – Ni – Cr 20 – 2, three alloy variants were designed with the addition of 2; 2,5 and 3 percent of aluminum and was made the calculation of load of each one of them. For the evaluation of the properties of type of alloys a is made metalográfica characterization, for which it makes the methodology of experimentation of the different tests to make such as and nays of hardness, in nays of nays micro-hardness and e of wearing down. Also the equipment is described where the tests were made.

Key words: Austenitic foundries, Ni-Resist alloy.



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

INDICE

INTRODUCCIÓN:	10
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO. ESTADO DEL ARTE.	13
1.1. Hierro fundido. Clasificación.	13
1.2. Hierros de elevada aleación.	14
1.3. Hierro fundido aleado resistente al desgaste abrasivo.	16
1.4. Otros trabajos realizados en la búsqueda de elevar la resistencia al desgaste abrasivo en los hierros fundidos.....	17
1.5. Efecto de los elementos de aleación en el hierro fundido.	20
1.6. Mecanismos de desgaste. Clasificación.....	25
1.6.1. Desgaste por abrasión.....	25
1.7. Maquinabilidad en el hierro fundido.....	26
1.7.1. Maquinabilidad en hierros aleados resistentes al desgaste.	26
CAPÍTULO II. FUNDICIONES GRISES.	28
2.1 Fundiciones grises. Nociones generales.	28
2.2 Influencia de la composición química en la estructura y las propiedades mecánicas de la fundición.	30
2.3 Fundiciones aleadas.....	38
2.3.1 Fundiciones resistentes al desgaste.....	39
2.3.2 Fundiciones resistentes a la corrosión.	40
2.4 Aleaciones Ni-Resist.	41
2.4.1 Metalografía:	42
2.4.2 Propiedades mecánicas:	42
2.5 Fundiciones aleadas con aluminio.....	42
2.6 Clasificación de los mecanismos de desgaste.....	44
2.6.1 Desgaste por abrasión.....	44
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.	46
3.1 Diseño de la investigación	46
3.1.1 Elección de las variables de la investigación:.....	47
3.1.2 Criterios de selección de las variables:	48
Trabajo de diploma.	Autor: Yoandrys Rodríguez León. 8



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

3.1.3 Matriz experimental utilizada en el desarrollo de los experimentos.....	48
3.2 Obtención de las probetas metálicas:	49
3.2.1 Plantillas y moldes.....	49
3.2.2 Cálculo de carga.	49
3.3 Metodología para la realización de ensayos.	50
3.3.1 Fundamentos del ensayo de dureza.	50
3.3.2 Fundamentos del ensayo de microdureza.	51
3.3.3 Fundamentos del ensayo de desgaste.	51
3.3.4 Caracterización de la morfología de las partículas:	52
3.4. Análisis químicos de las probetas:	55
3.5 Examen metalográfico:	56
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS.	57
4.1 Diseño de las variantes de aleaciones.....	58
4.3 Ataque químico de las probetas:.....	62
4.4 Cálculo de carga de cada variante de aleación para 100 Kg de material con diferentes porcentos de aluminio.....	62
CONCLUSIONES:	68
RECOMENDACIONES:	69
BIBLIOGRAFÍA:	70



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

Introducción:

En nuestro país se realizan continuamente notables esfuerzos para garantizar procesos estables y continuos, introduciendo una serie de mejoras tecnológicas con vistas a obtener producciones con calidad, eficiencia y rentabilidad, lo cual requiere de un equipamiento fiable y seguro.

En la industria minero-metalúrgica cubana las aleaciones inoxidables tienen una amplia utilización en la fabricación de bombas centrífugas para el trasiego de licores que en ocasiones van acompañados de partículas en suspensión o pulpas que suelen ser materia prima para los procesos o rechazo de los mismos.

En las plantas niqueleras Comandante Ernesto Che Guevara (ECG) y Comandante René Ramos Latour (ERRL) se aplica la tecnología de lixiviación carbonato-amoniaca, conocida universalmente como proceso “Caron”, donde se verifica la lixiviación con amoníaco del mineral laterítico rico en Fe, Ni y Co que ha sido previamente reducido en los hornos de reducción. Como resultado de la lixiviación el Ni y el Co se separan del Fe y el licor rico en Ni y el Co se procesa en etapas posteriores hasta obtener un sinter de Ni + Co. El material sólido con alto contenido de hierro sin lixiviar se bombea en forma de pulpa denominada “cola” hasta los depósitos o diques (de cola), donde se almacena para un futuro procesamiento.

Las colas son materiales altamente agresivos debido a la extrema abrasividad de las partículas sólidas con elevado contenido de sílice y a la alta corrosividad de los licores amoniacales calientes que las constituyen. Bajo estas condiciones de operación, se requiere de un material para la fabricación de las bombas con propiedades especiales que garantice elevada resistencia al desgaste y buena estabilidad química durante un período de explotación razonable.



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

El desgaste prematuro de los cuerpos e impelentes de las bombas de cola de dichas empresas ha sido durante mucho tiempo uno de los factores con marcada incidencia en las pérdidas e ineficiencias ocasionadas por las frecuentes paradas imprevistas y los elevados gastos por concepto de reparación, mantenimiento y sustitución.

En la Empresa Mecánica del Níquel, entidad donde se fabrican componentes para las industrias del níquel, se han experimentado tecnologías que asimilan la utilización de varios tipos de materiales para la fabricación de bombas de cola, sin que hasta el momento se haya encontrado una solución al problema.

Entre los materiales utilizados con mejores resultados, se encuentran algunas variantes de los denominados Ni-Resist, fundiciones austeníticas de hierro aleadas con alto contenido de Ni; sin embargo con la utilización de estas aleaciones, todavía no se satisface la durabilidad exigida.

Por lo antes expuesto podemos declarar como:

Situación Problemática

La aleación Ni-Resist no satisface la durabilidad exigida para la fabricación de las bombas de cola de las Empresas Niqueleras Comandante Ernesto Che Guevara (ECG) y Comandante René Ramos Latour (ERRL), por ello ocurren paradas imprevistas y los elevados gastos por concepto de reparación, mantenimiento y sustitución ejercen una marcada incidencia en las pérdidas e ineficiencias en el proceso productivo.



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

Problema:

Necesidad de incrementar la resistencia al desgaste de la aleación Ni – Resist L – Ni – Cr 20 – 2 conservando sus propiedades anti-corrosivas y de termo-resistencia.

Objeto de estudio:

Microestructura de la aleación Ni – Resist L – Ni – Cr 20 - 2

Objetivo general:

Evaluar la influencia de la adición controlada de aluminio en la microestructura de la aleación Ni-Resist L – Ni – Cr 20 - 2.

Objetivos Específicos

1. Obtener nuevas variantes de aleaciones Ni – Resist L – Ni – Cr 20 – 2 a escala de laboratorio por añadidura de Aluminio como elemento de aleación.
2. Caracterizar la microestructura de las muestras obtenidas.

Hipótesis:

La adición controlada de Aluminio modifica la microestructura de la aleación Ni-Resist 2L – Ni – Cr 20 - 2 y mejora su resistencia al desgaste, conservando sus propiedades anti-corrosivas y de termo-resistencia.

Campo de acción: Aleación Ni – Resist L – Ni – Cr 20 – 2.



Metodología de la investigación

1. Búsqueda bibliográfica y establecimiento del Estado del Arte.
2. Diseño de variantes de aleaciones con diferentes adiciones de Aluminio.
3. Obtención de las muestras.
4. Evaluación de las propiedades de las variantes de aleaciones a través de:
 - Caracterización metalográfica.
 - Ensayos de dureza.
 - Ensayos de microdureza.
 - Ensayos de desgaste.
5. Discusión de los resultados.

CAPÍTULO I. Marco teórico. Estado del Arte.

1.1. Hierro fundido. Clasificación.

La industria de la producción de hierro fundido es una de las principales a nivel internacional. Anualmente se producen piezas que son ensambladas y empleadas como componentes de equipos y maquinarias. La producción de hierro fundido es el triple al resto de las producciones de metales ferrosos y no ferrosos juntos, superado solo por la producción de acero laminado según datos obtenidos en (<http://www.turkdokum.com/turkishfoundryindustry.htm>) y en (Censo de Fundición del Mundo, 1990.)

El término de hierro fundido es aplicado a una familia de aleaciones ferrosas que contienen más del 2% de carbono. Incluye al hierro gris, maleable, dúctil (conocido como nodular por algunos autores), blanco, con elevado nivel de aleación y con grafito compacto, según varios autores entre los que se encuentran (Walton, 1981, Guirshovich, 1966, otros).



El hierro gris es el más empleado, con una producción anual superior al resto de los metales fundidos. La presencia de grafito laminar, señala (Eugenio Pages, 2000) le proporciona características como la baja resistencia a la tracción, al impacto y a la abrasión. Sin embargo presenta propiedades excelentes como la colabilidad, facilidad para el maquinado y la amortiguación de vibraciones.

Con el objetivo de mejorar la baja resistencia a la tracción del hierro gris, fue inventado el hierro maleable, el cual se obtiene por tratamiento térmico del hierro blanco y donde el grafito aparece en forma de nódulos, pero el costo de estas producciones es muy superior al del hierro gris. En la búsqueda del aumento del módulo de elasticidad del hierro surgió hace relativamente pocos años el hierro esferoidal, al cual muchos autores le llaman hierro dúctil, por el incremento que sufre esta propiedad. Sin embargo estas aleaciones no son las más empleadas en el caso donde las piezas producidas son empleadas en condiciones donde predomina el desgaste abrasivo, donde el hierro blanco presenta un mejor comportamiento y aún superior los hierros de elevada aleación, pero estos últimos tienen el gran inconveniente de ser prácticamente no maquinables.

1.2. Hierros de elevada aleación.

(Walton, 1981, Petty, 1968, ASTM A 352 y otros) clasifican a los hierros de elevada aleación como un grupo independiente de aleaciones de hierro fundido, donde las propiedades dependen directamente de la influencia de los elementos de aleación. En estas aleaciones de hierro fundido, el contenido de aleación está bien por encima del 4% y consecuentemente no pueden ser producidos por aleación en cuchara, como el resto de las aleaciones conocidas. Ellos usualmente son producidos en fundiciones con equipamiento especializado para producir hierros de elevada aleación. Sin embargo esta



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

afirmación es solo aplicable cuando la suma total de los elementos de aleación está muy por encima de 4%.

(Petty, 1968, Sy, 1959, Krause, 1969 y muchos otros, entre los que se encuentra un artículo 10 de Key-to Steel, 2000) señalan que los elementos como el cobre y el níquel tiene un efecto grafitizante durante la transformación eutéctica, sin embargo durante la transformación eutectoide dificultan la difusión del carbono promoviendo la formación de carbono combinado; mientras otros elementos como el cromo y el molibdeno 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.

Petty, 1968 y en un sitio de la Key-to-steel, 2000 señala que entre los hierros de elevada aleación se destacan:

- Los hierros aleados con níquel: los cuales deben ser templados para ser usados en aplicaciones donde predomine el desgaste abrasivo. Su matriz es austenítica. Un material típico de este grupo es el Ni-Resist resistente a la corrosión y al calor.
- Los hierros aleados con cromo: presentan elevada dureza y resistencia al desgaste abrasivo. Este tipo de hierro aleado es muy poco maquinable.
- Aleados con cromo y níquel: entre este tipo de hierros se destaca el Ni-Hard, el cual presenta una matriz martensítica con carburos del tipo $(Fe, Cr)_3C$, con durezas elevadas, pero con una maquinabilidad muy limitada.
- 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.



Estos hierros fundidos ya no resultan tan baratos como el hierro gris no aleado y también presentan menor colabilidad y maquinabilidad que éste.

1.3. Hierro fundido aleado resistente al desgaste abrasivo.

En las especificaciones dadas por la ASTM A 352 clasifican a los hierros de alta aleación en un grupo independiente y proponen entre ellos a: Hierros blancos al cromo-níquel, son conocidos también como Ni-Hard (tipos del 1 al 4) y contienen contenidos de cromo bajos, (de 3 a 5% de níquel y de 1 a 4% de cromo, con una modificación en la que el cromo se eleva de 7 a 11 % de cromo), Hierros al cromo-molibdeno, que contienen de 11 a 23% de cromo y hasta 3% de molibdeno y adicionalmente se adicionan níquel o cobre. Un tercer grupo de Hierros blancos aleados con elevado contenido de cromo (de 25 a 28% de cromo) los cuales pueden ser aleados además con otros elementos como el molibdeno y/o níquel hasta 1,5%.

Los hierros blancos aleados ofrecen una considerable versatilidad en sus propiedades, que lo hacen útil en aplicaciones donde es necesaria la resistencia a la abrasión. La composición del hierro blanco aleado se selecciona para obtener una distribución determinada en los carburos y una matriz que brinden una vida de servicio elevada y una efectividad de costos. Mientras las fundiciones de hierro blanco de baja aleación, con un contenido de elementos de aleación inferior a 4%, desarrollan durezas entre 350 y 550 HB, los hierros de elevada aleación alcanzan durezas entre 450 y 800 HB. Los carburos en los hierros blancos aleados presentan durezas del orden de 900 a 1 200 HV y las matrices martensíticas con austenita residual llegan a durezas del orden de 600 a 700 HV.



1.4. Otros trabajos realizados en la búsqueda de elevar la resistencia al desgaste abrasivo en los hierros fundidos.

Ishikawa Shin y otros, 2001 propusieron un hierro fundido de elevado nivel de aleación, con el objetivo de ser empleado en aplicaciones donde se requiere resistencia al desgaste, para lograrlo emplean un hierro base con carbono entre 2 y 4%, silicio hasta 1,5% y manganeso hasta 1,2%. Se le adiciona además cromo entre 6 y 20%, molibdeno ente 2 y 12% y vanadio entre 3 y 10% o un contenido de wolframio hasta 20%. Establecen como condición que: $\%Mo + 0,5\%W$ sea mayor que 0,32 ($0,5\%Cr + \%V$). Con este nivel de aleación obtuvieron carburos del tipo M_6C en los límites de los granos de los carburos primarios, con un tamaño de partícula hasta $3\ \mu m$ y una densidad de 0,05 granos por mm^2 , una aleación como esta indiscutiblemente posee una resistencia al desgaste abrasivo elevada, pero el costo de producción ya no resulta tan bajo como el de los hierros fundidos no aleados y la presencia de los carburos del tipo M_6C en los límites de los granos de los carburos primarios, además de proporcionar una elevada dureza, harán prácticamente no maquinables a las piezas obtenidas con este material.

Otros autores como Maedoro Hiroaki y otros, 2001, proponen hierros de elevado nivel de aleación resistentes al desgaste, a partir de un hierro de elevado contenido de cromo, pero hipereutéctico, con carbono entre 3,7 y 4,5% y con nitrógeno entre 0,10 y 0,40%. De este modo se mantiene la resistencia de los hierros hipoeutécticos, pero los carburos secundarios que se obtienen después del temple, debido al elevado contenido de carbono, aumentan considerablemente la dureza de la base metalográfica y por lo tanto incrementan la resistencia al desgaste.

Tampoco una aleación como esta resulta maquinable y el proceso de tratamiento térmico indudablemente elevará los costos de su producción.



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

Algunos autores como Yamamoto Masaaki y otros, 2001; proponen el uso de un hierro de elevado contenido de cromo y alto carbono, pero la acción del wolframio y el niobio actúan en la región hipoeutéctica, obteniéndose carburos de mayor dureza y con la tenacidad de los hierros aleados de elevado contenido de cromo. Las piezas fundidas obtenidas con este material pueden presentar una dureza del orden de 69 HRC. Con semejante dureza indiscutiblemente se eleva la resistencia al desgaste, pero la maquinabilidad se limita notablemente y los costos se elevan dado el nivel de aleación y los elementos empleados.

Para resolver el problema que se introduce con el maquinado algunos autores entre los que se encuentran Fakir Mile, 1998; proponen el empleo de un hierro de baja aleación para producir un árbol de levas, pero coloca enfriadores para que se forme una capa de hierro blanco en la superficie de las piezas. Para lograr maquinar dicha pieza aplica un recocido, para y luego obtiene la dureza requerida mediante temple en un baño salino o mediante temple por llama. Este proceso debido al alto consumo de energía encarece la aleación, aunque resuelva el problema del maquinado y la aleación empleada es menos cara por el contenido de los elementos de aleación empleado, respecto a la propuesta por el resto de los autores aquí mencionados.

Algunos autores entre los que se encuentran Liu Yuanzhong y Luo Maorang, 1998; proponen un hierro fundido con muy bajos contenidos de azufre y fósforo (0,01 a 0,025%) con alto silicio (2,0 a 3,4%) y la adición de cobre, cromo y molibdeno por debajo de 2%, además de emplear un elemento tierra rara (0,025 a 0,03%) unido a un metal no ferroso. Según los autores con esta aleación se pueden producir bolas para pulverizar minerales, con muy buena resistencia al impacto, a la fatiga, con costo bajos y elevando la vida de servicio de 2 a 5 veces el de las bolas obtenidas con un hierro de elevado contenido de cromo y medio contenido de manganeso. Pero el proceso de desulfuración y el costo de los inoculantes para obtener el hierro esferoidal, así como el equipamiento



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

necesario para su inoculación, no resultan tan baratos. Aunque el nivel de aleación con cobre y cromo es muy inferior al propuesto por el resto de los autores hasta aquí citados.

Algunos autores entre los que se encuentran Shikayama Kunio y otros, 1991; proponen con el objetivo de obtener bloques de freno un hierro donde hay presencia de grafito, el cual sirve como lubricante en un par de fricción y la adición de molibdeno (0,3 a 2%) a un hierro de alto contenido de carbono (3,5 a 4,0%) y silicio (1,4 a 2,5%), para obtener una estructura acicular, la cual presenta alta capacidad de amortiguamiento (damping), alta conductividad térmica, para disipar el calor que se produce durante la fricción al aplicar los frenos a alta velocidad. Por supuesto que el mecanismo de desgaste que prevalece en este proceso no es abrasivo.

Togawa Tsutomu y otros, 1991; con el objetivo de aumentar la dureza y la resistencia al impacto, proponen un hierro de bajo contenido de silicio (0,2 a 1,0%) con contenidos de molibdeno (0,5 a 2,0%), cromo (27 a 34%), wolframio (0,5 a 2,0%) y boro hasta 0,1%, el cual es tratado térmicamente entre 950 y 1100 °C y revenido después del temple entre 200 y 500 °C, para alcanzar los niveles de dureza deseados.

En un hierro con estos niveles de silicio tan bajos y los elevados contenidos de elementos formadores y/o estabilizadores de carburos, no puede estar presente el grafito, lo cual dificulta la maquinabilidad, pero también los costos son elevados por el nivel de aleación y por el proceso de tratamiento térmico, dado el nivel de energía a consumir.

Seto yoghito y otros, 1992; proponen un hierro fundido aleado con excelente resistencia al desgaste, empleando adiciones de molibdeno (5 a 15%), níquel (0,3 y 3%), cromo (7 a 18%), vanadio (1 a 8%) y wolframio hasta 10%. Establecen como condición que: %Mo + 0,5 %W esté entre 2 y 15% y aprovechando la microsegregación del vanadio, incrementar la dureza. Además endurecen la matriz con un tratamiento térmico. En tales condiciones la dureza



alcanzada hace excelente la aleación para usos donde sea necesario alta resistencia al desgaste, pero la maquinabilidad se ve extremadamente limitada. Los comentarios sobre los costos de producción son similares a los expuestos anteriormente, con objetivos similares.

Haga Michio, 1986; propone una aleación que contiene contenidos elevados de cromo, molibdeno, wolframio y titanio hasta 0,3% donde el niobio hasta 0,3 y el cobre hasta 4%, también están presentes. Con este nivel de aleación se logran carburos de forma granular que presentan elevada resistencia al desgaste y un elevado acabado superficial. Los criterios sobre esta aleación dado el nivel de los elementos de aleación empleados, elevan los precios de producción y actúan negativamente sobre la maquinabilidad.

Resulta de interés particular la solución brindada por Koie Takayiki y otros, 1991; donde conjugan el empleo de elementos como el níquel (3 a 5%) que promueven la formación de grafito y mejoran la estructura de la matriz y el cromo (1,2 y 2,5%) en contenido donde disminuye el desgaste sin que frene la grafitización. Se adicionan además molibdeno (0,1 a 2%) a un nivel donde la dureza de los carburos puede ser incrementada y boro en un nivel (0,01 a 0,2%) que regula la uniformidad del grafito y evita que se obtenga muy basto. Conjugan carburos y grafito permite la obtención de propiedades en el hierro fundido donde la resistencia al desgaste y la maquinabilidad estén en niveles que permitan su empleo en la obtención de piezas resistentes al desgaste abrasivo y se puedan realizar operaciones de maquinado en las mismas. Aún así los niveles de los elementos empleados pueden ser objeto de ajuste con el fin de bajar los costos de producción.

1.5. Efecto de los elementos de aleación en el hierro fundido.

La influencia de los elementos de aleación está relacionada fundamentalmente con el control de la transformación de la austenita.



El carbono es sin lugar a dudas, después del hierro, el elemento más importante; se le puede encontrar combinado con el hierro (carbono combinado) en forma de carburo (o cementita con 6,67% C) o en el estado libre de grafito (carbono libre o grafitico).

Entre los factores que influyen en que el carbono se encuentre en una u otra forma están la velocidad de enfriamiento y la presencia de elementos grafitizantes. Un enfriamiento lento y la presencia de silicio, níquel, cobre, etc.; facilitan la formación de grafito, por lo que la solidificación se puede explicar mediante el empleo del diagrama estable, como señala (Van de Velde, 1999). La forma, cantidad, tamaño y distribución de las láminas de grafito deben ser controladas cuando se requiere obtener fundiciones de calidad. Por otra parte un enfriamiento rápido y la presencia de agentes formadores y/o estabilizadores de carburos como el cromo y el molibdeno, dan lugar a la formación de carburos y la solidificación se explica a través del diagrama metaestable. El hierro que se obtiene así presenta elevada dureza y no puede ser mecanizado con los medios normales en las máquinas herramientas. En realidad el proceso de solidificación del hierro fundido es un proceso muy complicado, como puntualiza Van de Velde, 1999; pues aún después de un período superior a 100 años, quedan algunos aspectos sin explicación sobre el doble diagrama Fe-C, no por la existencia de un doble sistema, ni porque las aleaciones con un muy alto contenido de carbono no pueden ser explicadas por este sistema, sino por la variedad de diagramas de que se dispone. Otro aspecto que debilita los diagramas actuales es la formación de carburos a una temperatura tan baja como 1080°C, cuando se alea con elementos como el silicio, el cual solo se disuelve en la austenita sin intervenir en la composición de los carburos.

Los elementos de aleación pueden provocar cambios en la velocidad de enfriamiento del hierro gris. El silicio contribuye a la formación de ferrita y austenita. Algunos autores (Krause, 1969, Janowak, 1982 y otros) plantean que el silicio disminuye la solubilidad del carbono en la austenita y favorece la



difusión del carbono, por lo que favorece la formación de grafito a partir de la descomposición de los carburos primarios. Las cantidades de silicio deben ser calculadas teniendo en cuenta el carbono total, la velocidad de enfriamiento y el espesor de la pieza. (Maurer, 1924) propuso un diagrama donde en función de los contenidos de carbono y silicio se obtienen diferentes estructuras. (Janowak y Gundlach, 1987) proponen un nomograma, en papel logarítmico que permite la determinación de la resistencia a la tracción básica, a partir del carbono equivalente (CE) y el espesor de las piezas en fundiciones grises no aleadas.

Otros elementos tienen un efecto contrario al silicio, por ejemplo el cobre, el estaño, el antimonio y el arsénico se acumulan en la interfase austenita-grafito, creando una barrera a la emigración del carbono para formar grafito, como señalan (de Sy y otros autores), de esta forma inhiben la grafitización. Realmente este efecto ocurre durante la transformación eutéctode, pues en la transformación eutéctica como señalan varios autores, entre ellos Krause, 1969, aumentan el potencial de grafitización, el cual se puede inferir a partir del cálculo de la constante de grafitización propuesta por (Guirshovich, 1986).

El manganeso y el níquel ensanchan el campo austenítico al rebajar las temperaturas α_T y A_1 . La velocidad de formación de ferrita disminuye a temperaturas más bajas porque disminuye la velocidad de difusión del carbono, al bajar la temperatura. Así se asegura un nivel superior de carbono en la austenita.

El manganeso ejerce una acción opuesta a la del silicio, pues favorece la formación de carbono combinado, se combina fácilmente con el hierro y el azufre. El manganeso se combina con el azufre en una proporción de 1,77 partes en peso de manganeso por una parte de azufre teóricamente, en la práctica se necesita alrededor de tres veces el contenido de azufre para neutralizar su efecto adverso sobre el hierro fundido. El manganeso disminuye la temperatura de transformación eutéctode de la austenita, aumenta el intervalo de la austenita y disminuye la concentración de carbono en la



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

transformación eutectoide y en la transformación eutéctica, un 1% de manganeso disminuye la concentración de carbono en 0,06 – 0,07%, pero aumenta la temperatura de transformación eutéctica, un 1% de manganeso aumenta la temperatura de transformación eutéctica en 3°C aproximadamente. El manganeso se distribuye entre la austenita, la ferrita y la cementita, fundamentalmente en esta última y forma $(\text{Fe}, \text{Mn})_7\text{C}_3$ y $(\text{Mn}, \text{Fe})_{23}\text{C}_6$.

El azufre aparece en las fundiciones como sulfuro de hierro o de manganeso, el primero es perjudicial porque obstaculiza la grafitización, hace la fundición dura y frágil. En la práctica se mantiene el azufre entre 0.05 y 0.12. El sulfuro de manganeso solidifica antes de que lo haga el hierro fundido y lo hace asumiendo diferentes formas geométricas en los límites de los granos por lo que resulta inofensivo para el metal. Todo hierro producido comercialmente contiene alguna cantidad de azufre. El azufre no es totalmente indeseado, algunos tipos de hierro fundido tienen un contenido mínimo para producir la microestructura y las propiedades deseadas.

El fósforo cuando se encuentra hasta 0,1% es soluble en el hierro, cantidades superiores forman un microconstituyente conocido como esteadita, que es un complejo eutéctico de hierro y fósforo de hierro, el cual solidifica en los límites de los granos. Cuando alcanza contenidos de 0,2% en el hierro gris, la esteadita se presenta en los límites de las celdas y asume la forma de un triángulo cóncavo. Cuando llega a contenidos de hasta 1%, forma una red alrededor de los límites de los granos. La eutéctica fosfórica le confiere a la fundición líquida una particular fluidez porque disminuye el punto de solidificación, pero al mismo tiempo aumenta la dureza y la fragilidad.

En (Honeycombe, 1981) se clasifica al cromo junto al molibdeno entre los elementos que cierran el campo γ y lo restringen a una pequeña zona cerrada. Favorecen ambos la formación de ferrita y hacen continuos los campos α y δ . El cromo es un formador de carburos como son la cementita aleada $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$; y otros. Es además un fuerte promotor de perlita, pues aumenta la solubilidad del



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

carbono en la austenita e inhibe así la formación de la ferrita. Pero también es un promotor de temple y carburos durante la solidificación. El silicio y la inoculación con Ferrosilicio (75%) son efectivos en la reducción del temple causado por el cromo, pero no lo son en la eliminación de los carburos intercelulares. La acción del cromo en cuanto al afino de la perlita es débil.

(Krause, Janowak y otros) señalan que el molibdeno es uno de los elementos de aleación más ampliamente usado con el propósito de elevar la resistencia del hierro gris. Es añadido en cantidades entre 0.20 y 0.75 %. Este elemento aumenta las propiedades del hierro a elevadas temperaturas. Como el módulo de elasticidad del molibdeno es muy alto, las adiciones al hierro fundido provocan un aumento del módulo de elasticidad de este material. Es un potente endurecedor, colabora con el cromo, cobre y níquel para endurecer la matriz. En el diagrama Fe – C – Mo en su variante metaestable, se presentan unas cuantas fases de carburos: cementita aleada en la cual se disuelve hasta 2% de molibdeno, tres carburos binarios y carburos MoC y Mo₂C. En general el molibdeno disminuye la solubilidad del carbono en la fase alfa. El molibdeno no es un grafitizador, ni un estabilizador fuerte de carburos, esto es lo que explica por qué puede ser adicionado a la carga metálica sin variar prácticamente su carácter.

El aluminio refuerza significativamente la resistencia a la oxidación a las temperaturas elevadas y también aumenta la estabilidad de la fase ferrita a muy altas temperaturas hasta y más allá de 980 °C (1800 °F). El aluminio en el hierro es muy reactivo a las temperaturas de fusión del mismo y el contacto con el aire y la humedad debe ser insignificante, según García Caballero, Suárez Lisca, Alonso Martínez y otros, 2005.



1.6. Mecanismos de desgaste. Clasificación.

En la práctica son cinco los mecanismos de desgaste que aparecen en pares sólido-sólido, ellos son; desgaste abrasivo, adhesivo, por fatiga superficial, corrosivo mecánico y desgaste por frotamiento, (ASM Volume 18, 1992; Sarkar, 1980, Vázquez, 1997). Por ser uno de los efectos que mayor pérdida de materiales y energía produce, se abordará el desgaste abrasivo.

1.6.1. Desgaste por abrasión.

La función primaria de las aleaciones empleadas en sistemas donde predomina la abrasión metal-tierra, es aumentar la resistencia a la abrasión. Las aleaciones de abrasión metal-tierra están constituidas por hierros blancos con alto contenido de cromo, en la que los carburos que se forman durante la solidificación de la aleación, les proporcionan las propiedades necesarias para este tipo de aplicación.

Se ha demostrado experimental y teóricamente que la dureza del material está correlacionada con el grado de abrasión según (ASM Volume 18, 1992).

La dependencia de la resistencia a la abrasión, de la composición química, dureza y microestructura de un hierro fundido de alto cromo ha sido demostrada por (Gundlach, 1974) en un estudio realizado a 28 tipos de hierros blancos aleados con 17,5% de cromo, en los cuales se presentaban tres niveles de contenido de carbono y aleadas con otros elementos tales como: Cobre (0,5 a 3,0%), Manganeso (0,75 a 3,0%), Molibdeno (0,5 a 3,0%) y Níquel(0,6 a 2,0%). Todas las muestras fueron ensayadas tal y como fueron obtenidas de la fundición. En este estudio se demuestra que la dureza no es tan importante como la microestructura de la matriz en el control de la resistencia a la abrasión de un hierro blanco. Demostró también que contenidos de molibdeno combinados con níquel, cobre y manganeso en cantidades superiores a lo normal, producen fundiciones con satisfactoria resistencia a la abrasión,



aspecto relacionado con las microestructuras que se obtienen debido al efecto de los elementos de aleación.

1.7. Maquinabilidad en el hierro fundido.

(Walton, 1981) señala que la maquinabilidad del hierro está relacionada directamente con su microestructura, aunque se evalúa por la vida útil de las herramientas de corte y el acabado de las superficie. Por ejemplo la presencia del grafito (estructura suave) favorece la maquinabilidad, aunque la forma y tamaño de este influye en el acabado superficial. La microestructura alrededor del grafito influye en la vida de la herramienta del corte y permite mayores velocidades de corte.

La dureza Brinell es un indicador de la maquinabilidad, pues la dureza depende fundamentalmente de la microestructura, pero la maquinabilidad no se puede evaluar por la dureza únicamente.

La ferrita y la austenita son estructura de fácil maquinabilidad, a diferencia de la martensita y en menor grado de la bainita que son más difíciles de maquinar.

Los carburos son constituyentes de elevada dureza y tienen un efecto muy dañino para la vida de las herramientas de corte.

Las cuchillas para maquinado de hierros blancos, prácticamente no maquinables, se recomiendan en (Walton, 1981) que sean de cerámica, permitiendo altas velocidades para el corte del hierro moderadamente duros y se emplean sin refrigerantes. Para los hierros blancos resistentes al desgaste (ASTM A32) con dureza entre 450 y 600 HB en su condición de pieza fundida, se recomiendan herramientas de cerámica del tipo HPC.

1.7.1. Maquinabilidad en hierros aleados resistentes al desgaste.

Tanto la resistencia al desgaste como la maquinabilidad están puestas en función de la dureza, aunque en sentido contrario. Por una parte (Form y



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

Wallace, 1962) en la ecuación señalan que al aumentar la dureza respecto a la resistencia a la tracción, cosa que ocurre en los hierros blancos, disminuye la maquinabilidad, pues se incrementa el HR y por otra parte (Sakour, 1980 y Vázquez, 1997) señalan que al aumentar la dureza del material respecto a la del abrasivo, se favorece la resistencia al desgaste abrasivo del material, cuando se mueve en una masa abrasiva como la arena sílice.

Los hierros por excelencia para la producción de piezas que se utilizan en la explotación bajo condiciones de desgaste abrasivo, son los hierros de levado contenido de cromo, como ya se ha señalado, sin embargo debido a la presencia de carburos de elevada dureza y en matrices martensíticas, la maquinabilidad disminuye significativamente.

Sin embargo la combinación de estructuras tan duras como los carburos en matrices martensíticas y la presencia de grafito en la matriz, suaves y que permiten la obtención de una viruta discontinua durante el maquinado, puede lograr determinado grado de facilidad en el maquinado. Dichas estructuras pueden ser obtenidas en condiciones donde los elementos de aleación se combinen adecuadamente logrando potenciales de grafitización adecuados para que se forme grafito durante la transformación eutéctica con la presencia de elementos como el cobre y el níquel, en adición al efecto grafitizante del carbono y el silicio, presentes en cualquier hierro fundido y con las cantidades adecuadas de manganeso, cromo y molibdeno que favorezcan la formación de carburos, sin que se suprima la grafitización del hierro fundido.

Otros aspectos a tener en cuenta son el balance adecuado de los elementos aleantes como el manganeso, níquel y cobre que permitan la obtención de matrices martensíticas regulando la transformación de la austenita, para evitar la formación de perlita o bainita. El efecto combinado de los elementos manganeso, níquel y cobre, permite que sus efectos individuales se sumen en este sentido.



CONCLUSIONES

Se plantea en línea general que los hierros aleados con elevado contenido de cromo son los de mejor comportamiento para trabajar en condiciones de elevada abrasión y que los hierros grises no aleados son los de mejor comportamiento ante la maquinabilidad.

La producción de hierros de elevado nivel de aleación se señala que no pueden ser obtenidos por aleación en cuchara y que se requieren medios especiales para su obtención, lo cual no es válido solo para aleaciones con un nivel cercano a 4%.

Aunque aparecen descritos en la literatura el efecto de los elementos de aleación sobre las estructuras y las propiedades de los hierros aleados de un modo cualitativo, no se muestran modelos matemáticos que permitan cuantificar este efecto sobre las propiedades mecánicas y tribológicas, así como para algunos elementos cuantificables de la microestructura.

Se abordan en la literatura estudios sobre el incremento de la resistencia al desgaste a partir de tratamientos térmicos, pero en las condiciones de nuestro país donde los recursos energéticos son limitados, es una alternativa el obtener estructuras que incrementan la resistencia al desgaste a partir del efecto de los elementos de aleación desde que las piezas son obtenidas en la fundición, empleando la adición en cuchara para niveles de aleación no muy por encima de 4%.

CAPÍTULO II. Fundiciones grises.

2.1 Fundiciones grises. Nociones generales.

La fundición es el material más empleado para la elaboración de molduras perfiladas a consecuencia de sus buenas propiedades tecnológicas y un coste relativamente bajo en comparación con otras aleaciones.



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

La fundición es una aleación de componentes múltiples de hierro y carbono (más del 2%) y otros elementos, que se solidifican creando la autéctica.

De acuerdo con el diagrama hierro-carbono en el caso de equilibrio estable todo el carbono en la fundición se desprende en forma de grafito y la matriz metálica en forma de ferrita (fundición gris), para el equilibrio metaestable todo el carbono se desprende en la fundición en forma de cementita Fe_3C (fundición blanca).

La fundición gris contiene carbono en forma de grafito y cementita que se halla en la perlita. Las propiedades de la fundición gris dependen en gran parte de la cantidad de grafito y perlita, como también de la forma y tamaño de las inclusiones de grafito. Las inclusiones de grafito debilitan la sección transversal de la matriz metálica en la dirección perpendicular a la aplicación de la fuerza de extensión externa y ejerce una acción de entalla en la matriz metálica. El grafito reduce la resistencia de la fundición a la tracción, como también el límite de elasticidad y proporcionalidad, la ductibilidad (alargamiento relativo, resiliencia), el módulo de elasticidad. Es posible reducir la influencia negativa del grafito en sus propiedades disminuyendo la cantidad y las dimensiones de las inclusiones y la aproximación máxima de su forma a la esferoidal.

A diferencia del acero, la fundición posee una baja sensibilidad a las entallas. Las entallas que aparecen en la moldura de fundición (sopladuras, poros, inclusiones no metálicas, trazos que se forman durante el labrado por corte, etc.) disminuyen en grado pequeño la resistencia de la estructura de la fundición. Esta particularidad de la fundición se explica por la existencia de un gran número de entallas creadas por las inclusiones de grafito y una alta viscosidad cíclica.



2.2 Influencia de la composición química en la estructura y las propiedades mecánicas de la fundición.

Por el contenido de carbono las fundiciones se dividen en hipoeutéctica, eutécticas y hipereutécticas. Durante la solidificación de las fundiciones hipoeutécticas en primer lugar se separa la fase rica en carbono, es decir, el grafito primario o la cementita primaria. La solidificación de la eutéctica tiene lugar a la temperatura de parada autéctica. La composición de la autéctica y la temperatura de la transformación eutéctica depende del sistema en que transcurre: en el estable o metaestable. La estructura de la fundición se forma definitivamente durante la transformación eutéctoide.

Durante la cristalización de la fundición gris al momento de la transformación eutéctoide las componentes estructurales principales son la austenita y el grafito, que se forma durante la transformación eutéctica y se desprende de la austenita al enfriarse en el intervalo de temperaturas desde la transformación eutéctica a la eutéctoide. Durante la transformación eutéctoide tiene lugar el reagrupamiento de los átomos de hierro de la red cúbica de caras centradas $\gamma - Fe$ en cúbica centrada en el volumen $\alpha - Fe$ y la separación difusiva del carbono del hierro. Como resultado de la transformación se crean estructuras, compuestas de ferrita y de la fase rica en carbono. Al enfriarse lentamente el carbono se separa en forma de grafito. En este caso la estructura definitiva de la fundición será ferrita + grafito (F+G). En el diagrama de, $Fe - Fe_3C$ se han marcado las líneas de trazos del sistema Fe-C. El diagrama Fe-C es parecido al diagrama $Fe - Fe_3C$, pero sus líneas están desplazadas hacia la izquierda y hacia arriba. Los puntos característicos están designados con las mismas letras que en el diagrama $Fe - Fe_3C$, pero con apóstrofe. Por la línea $C'D'$ tiene lugar la precipitación del grafito primario, por la línea $E'C'F'$, la solidificación de la



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

eutéctica de grafito, esta es una fina mezcla mecánica de austenita y grafito. Durante el enfriamiento posterior hasta la línea $P'S'K'$ se desprende la mezcla eutéctode compuesta de grafito y ferrita. Las fundiciones en las cuales el carbono se separó parcial o completamente en forma de grafito, se llaman ferríticas, puesto que la matriz metálica la compone la ferrita. El carbono se desprende en forma de grafito en caso de enfriamiento muy lento. Siendo rápido el enfriamiento en el proceso de cristalización (primaria y secundaria) no se desprende grafito sino cementita. Al aumentar algo la velocidad de enfriamiento, cesa la separación de eutéctode de grafito hasta la línea $P'S'K'$ y el carbono restante pasa (por la línea $P S K$) a cementita y, como resultado, se forma cierta cantidad de perlita. En esta fundición la estructura ferrita, perlita e inclusiones de grafito (F+P+G), y se llama arrabio ferritoperlítico.

Si se continua elevando la velocidad de enfriamiento hasta la línea $P'S'K'$ no se desprende la eutéctode de grafito, y la austenita por la línea $P S K$ se convierte en perlita. Esta fundición tendrá la matriz: perlita e inclusiones de grafito en forma de escamas, se denomina perlítica y tiene una estructura perlita + grafito (P+G). Al aumentar la velocidad de enfriamiento entre las líneas de transformación eutéctica y eutéctode de la austenita aún antes de la perlita se separará no grafito sino cementita. Esta fundición la estructura Perlita-cementita secundaria-grafito (P+C+G) y se llama perlito cementítica.

A veces en la estructura de la fundición a la par del grafito se halla la ledeburita (al aumentar la velocidad de enfriamiento y en el caso de transformación eutéctica). Esta fundición se llama atruchada. La fundición blanca esta completamente sin grafitizar, el carbono se encuentra en esta en forma de composición química con el hierro. La estructura de la fundición blanca se compone de perlita y cementita libre estructuralmente (P+G).



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

Las fundiciones se consideran eutécticas si estas contienen un 4,2-4,3% de carbono. Al haber muchos componentes es posible la creación en la fundición de eutécticas complejas. Por ejemplo el fósforo (con un contenido en la fundición $\geq 0,06$ a 0,08%) forma con el hierro y el carbono una eutéctica de fosfuro que se solidifica a $950^{\circ}C$.

La dimensión y la forma de las inclusiones de grafito dependen de la existencia en la fundición líquida de centros de cristalización, de la velocidad de enfriamiento y el contenido de impurezas grafitizantes. Cuanto mayor es la cantidad de partículas pequeñas insolubles en la fundición líquida (centros de cristalización), tanto más fino será el grafito.

Para elevar la cantidad de centros de cristalización antes de la colada en la fundición líquida se introducen inoculantes: grafito, silicio, silicocalcio, aluminio y otros. Al disminuir el tiempo de cristalización y elevar el contenido de componentes grafitizantes en la fundición, las láminas de grafito se hacen más grandes y se alargan.

Los elementos de aleación modifican la microestructura de las fundiciones y con ello su dureza y resistencia, estando en ocasiones estos cambios influenciados, además, por una variación de la templabilidad. Los elementos de aleación modifican también como en los aceros, la situación de los puntos críticos y además ejercen una acción muy importante y compleja de la grafitización.

El silicio: Reduce la solubilidad del carbono en las soluciones líquidas y sólidas, contribuye a la formación de grafito, por eso al aumentar su contenido se reducen las propiedades mecánicas de las fundiciones ricas en carbono a consecuencia de la formación de grandes inclusiones de carbono.



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

El grado de eutecticidad de la fundición se determina por la parte eutéctica en su estructura. En caso de transformación en el estado metaestable, el grado de eutecticidad se halla por la fórmula:

$$S_E = \frac{C - 2}{4,3 - 2} = \frac{C - 2}{2,3}.$$

Donde: C es el contenido de carbono en la fundición.

Para la aleación que contiene Si, $S_E = 1$, corresponde el contenido de carbono de 4,3%. Para las fundiciones hipoeutécticas $S_E \leq 1$, y para las hipereutécticas $S_E \geq 1$. La influencia del silicio en el grado de eutecticidad se expresa con ayuda del **equivalente de carbono** en cual se calcula en tantos por ciento. Teniendo en cuenta el contenido de silicio en la fundición el equivalente de carbono $C_E = C + 0,3Si$. Teniendo en cuenta el contenido de silicio y fósforo $C_E = C + 0,3(Si + P)$. Tomando en consideración la influencia del silicio y fósforo, el grado de eutecticidad de la fundición puede ser determinado de la ecuación:

$$S_E = \frac{C}{4,3 - 0,3(Si + P)}$$

Al aumentar el equivalente de carbono C_E aumenta la cantidad de grafito, se reduce la cantidad de perlita y su grado de dispersión, se acrecientan las inclusiones de grafito, lo que reduce la resistencia de la fundición.

Carbono: El carbono es sin duda, después del hierro, el elemento más importante; se le puede encontrar combinado con el hierro (carbono combinado) en forma de carburo (o cementita Fe_3C con 6,67% de C) o en el estado libre de grafito (carbono libre o grafitico).



Sea combinado, sea granítico, no se forman al acaso. Son muchos los factores que pueden favorecer una forma o la otra, como la velocidad de enfriamiento y la presencia de otros elementos grafitizantes o estabilizantes.

Un enfriamiento lento así como también el silicio, el níquel etc.; facilitan la formación del grafito; el carbono granítico facilita disminuye la resistencia del metal, porque interrumpe la continuidad de su estructura, facilita la mecanización y da a la fractura un color gris o gris oscuro. Sea la forma, sea la calidad del carbono libre o granítico, deben ser por eso atentamente controladas, especialmente cuando se quieren obtener fundiciones de calidad.

Un enfriamiento rápido y la presencia de agentes estabilizantes, como el manganeso, el cromo etc, dan lugar a la formación de carburos. Faltando carbono libre, la fundición ofrece en la fractura un aspecto blancuzco y ya no se puede mecanizar con los medios normales en las máquinas de herramienta.

El manganeso: Se disuelve en la ferrita y se combina con el carbono formando carburos y con el azufre sulfuro manganeso MnS , lo que eleva la resistencia de la fundición y reduce su viscosidad. El manganeso en la fundición neutraliza la influencia nociva del azufre.

El manganeso contribuye al afino de la perlita, un contenido de hasta 1,5% de manganeso influye positivamente en las propiedades mecánicas de la fundición gris.

El Cromo: En la fundición durante la transformación eutéctica sirve como elemento que forma carburo y durante la eutectoide eleva la estabilidad de la austerita. El cromo eleva la resistencia de la fundición a temperaturas elevadas y calentamientos múltiples, por lo que se introduce en la composición de las fundiciones resistentes a la formación de cascarilla y a altas temperaturas. El cromo eleva la dureza, la resistencia al desgaste, la corrosión en agua de mar y soluciones ácidas débiles, pero aumenta la fragilidad de la fundición. Con un



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

contenido mayor de 0,8% de cromo la resistencia de la fundición se reduce a causa de la formación de carburos de cromo libres.

El níquel: En las aleaciones Fe-C eleva algo la temperatura de transformación eutéctica, aumenta la estabilidad de la austenita, la solubilidad del carbono en soluciones sólidas y líquidas, como también el contenido de carbono en la eutéctica y eutectoide, es un elemento grafitizante. El níquel actúa en la transformación eutéctica en forma análoga al silicio, al mismo tiempo detiene la desintegración de los carburos eutectoide, y con ello estabiliza la perlita y contribuye al aumento de su grado de dispersión.

Con un contenido mayor del 2% de níquel la estructura de la fundición se convierte al principio completamente perlítica, con un contenido de 4,5-5% de níquel se forma martensita. El níquel eleva la resistencia a la corrosión de las molduras de fundición en agua de mar y álcalis.

El azufre: Con el hierro forma una eutéctica fusible con una temperatura de fusión de $985^{\circ}C$. En la fundición líquida el azufre puede disolverse en cantidad ilimitada y en la sólida en cantidad insignificante.

El azufre se encuentra en forma de sulfuros ricos en hierro, o en forma de eutéctica, este frena la grafitización en las aleaciones pobres en manganeso, reduce sus propiedades mecánicas a causa de la creación de la eutéctica frágil en los límites de los granos. La neutralización de esta influencia del azufre y el grado máximo de grafitización para la fundición se logra siendo la relación $Mn/S = 4-5$. En este caso, el azufre se halla principalmente en forma de sulfuros manganosos, que no influyen en la grafitización. Los compuestos de sulfuros elevan la viscosidad de la fundición, empeoran la fluidez y las propiedades mecánicas. Con un contenido de un 0,12-0,14% de S se reduce bruscamente la fluidez y aumenta la cantidad de cementita y perlita en la estructura de la fundición, ocurre el temple al aire en las secciones delgadas de las molduras. El



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

temple al aire resulta debido a que los sulfuros ferrosos, teniendo una baja temperatura de fusión, se cristalizan por los límites de los granos y obstaculizan la disolución del carbono, el silicio en el hierro y la desintegración de la cementita.

El fósforo: Reduce la solubilidad del carbono en la fundición y la temperatura de la transformación eutéctica. El fósforo, siendo su contenido hasta el 0,3%, se disuelve en la fundición completamente, y superior al 0,3% crea una eutéctica de fosfuro en forma de inclusiones separadas de Fe_3P - Fe_3C -Fe, que se funden a $950^{\circ}C$. Con un contenido mayor del 0,6-0,7% de P la eutéctica de fosfuro se separa en forma de una red continua, dispuesta por los límites de los cristales. Por eso en la fundición para molduras importantes debe haber $\leq 0,15$ -0,20% de P, y para las molduras que experimentan frotis sin golpes, cuando se requiere buenas propiedades antifricción, $\leq 0,6$ -0,7% de P.

El fósforo eleva la fluidez, por eso su contenido en la fundición de piezas artísticas se eleva hasta el 1% y más, la influencia del fósforo en la grafitización es insignificante.

El cobre: Con un contenido de hasta un 3-4% se disuelve con facilidad en la fundición líquida, contribuye a la grafitización y reduce la dureza de la fundición, en la fundición gris contribuye a la estabilidad de la perlita y eleva la dureza, disminuye la temperatura de transformación eutéctica, favorece a la obtención de una estructura próxima a la homogénea en las secciones delgadas y gruesas de la moldura. El residuo contenido de cobre en la fundición rica en carbono eleva la resistencia y la dureza. El contenido óptimo de cobre en la fundición gris aleada es de 3-4%. Durante la solidificación del hierro colado el cobre contribuye a la grafitización, pero en el proceso de la transformación eutécticoide ésta obstaculizada la desintegración de la perlita. El cobre eleva la



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

resistencia de la fundición a la corrosión en condiciones atmosféricas, en soluciones de sales, ácidos y petróleo.

El titanio: Reduce la temperatura de transformación eutéctica y contribuye al sobreenfriamiento de la fundición, con un contenido de hasta 0,5% en la fundición hipoeutéctica favorece la grafitización y la separación del grafito en forma de pequeñas placas. Generalmente en la fundición se introduce 0,05-0,1% de Ti, y solo en la fundición para aros de pistón hasta un 0,2%. El titanio es un buen desoxidante, contribuye a una distribución uniforme del grafito en la fundición. El titanio neutraliza la acción del cromo en la fundición, siendo inoculante, resultado de lo cual se prescinde de la necesidad de elevar el contenido de silicio. El titanio contribuye al mejoramiento de las propiedades mecánicas, especialmente la resistencia de las fundiciones ricas en carbono. Con un contenido $\geq 0,18-0,20\%$ el titanio con el carbono forman carburos e impiden la grafitización. El titanio se emplea como inoculante en la fabricación de fundición maleable, pero para molduras de fundición de alta resistencia el Ti es una impureza indeseable, puesto que obstaculiza la creación de grafito esférico.

El molibdeno: Reduce la temperatura del comienzo y final de la cristalización de la austenita, en la fundición crea soluciones sólidas en la cementita y se disuelve en ésta hasta un 1,3%. Siendo las velocidades de enfriamientos normales para las molduras de fundición gris el molibdeno acelera la grafitización. Con un contenido en la fundición gris hipoeutécticas de hasta 1% de molibdeno la cantidad de cementita no aumenta, con un contenido de hasta el 3% de molibdeno se frena la grafitización, con un contenido mayor de molibdeno la fundición se solidifica blanca. El molibdeno eleva la resistencia y dureza de las fundiciones hipoeutécticas, como también la resistencia a corto plazo de la fundición a altas temperaturas, la resistencia al calor, a la dilatación,



la resistencia al desgaste y la resiliencia. El molibdeno mejora la resistencia a altas temperaturas de la fundición y en este sentido supera los demás elementos.

2.3 Fundiciones aleadas.

Los elementos de aleación mejoran las propiedades mecánicas, la resistencia a la corrosión, la resistencia al desgaste, la piroresistencia, las propiedades de antifricción y otras de la fundición. En dependencia del contenido de elementos de aleación las fundiciones se dividen en de baja aleación (hasta el 3% de elementos de aleación) de aleación media (3-10% de elementos de aleación), de alta aleación (más del 10% de elementos de aleación). En calidad de elementos de aleación para la fundición se utiliza el níquel, cromo, molibdeno, manganeso, aluminio, cobre y titanio. Las que mayor aceptación han obtenido en la construcción de maquinaria son las fundiciones de baja aleación.

Las adiciones de los componentes de aleación pueden ser hechas, sea durante el proceso de fusión, sea en el caldero de fundir: los elementos más empleados son el níquel, cromo, vanadio, titanio, cobre y molibdeno.

Para obtener fundiciones con gran resistencia mecánica (resistencia a la tracción sobre 30 kg/mm^2 , dureza Brinell sobre 200 a $400 H_d$) no es necesario recurrir a este procedimiento, sobre todo cuando los componentes de aleación pueden ser más ventajosamente empleados para uso de particular interés: basta conducir convenientemente la fusión y combinar de manera oportuna los cinco componentes principales de la fundición.

En cambio, es indispensable servirse de las materias citadas cuando se quiere tener requisitos y propiedades particulares de las piezas de fundición: buena resistencia a las altas temperaturas (cromo con o sin níquel, en dosis de cerca de 0,6 a 1% para piezas para exponer a temperaturas de 500 a $600 ^\circ\text{C}$; 2 a 3%



para 700 a 800 °C; hasta del 30 al 33% para temperaturas de 1000 °C y más) amagnetisidad (fundiciones austeníticas con 15 a 30% de níquel); resistencia a los agentes químicos (fundiciones al silicio, al cromo, al níquel, al cobre o fundiciones con la presencia simultanea de dos o más de estos elementos); se obtienen materiales muy resistentes a los ácidos clorhídrico, sulfúrico, acético etc.; a las lejías básicas, al agua de mar, particular propiedad mecánica de resistencia al desgaste. (fundiciones al titanio, al vanadio, al cromoníquel al molibdeno, etc.) .

Un uso particular digno de especial mención es el de las fundiciones aciculares recientemente descubiertas y ricas de grandes posibilidades de empleo. La estructura de la matriz de estas fundiciones no es ya perlítica, sin llegar a ser cementítica, pero por la forma acicular de sus cristales toma justamente dicho nombre. Sus propiedades mecánicas son elevadísimas: resistencia a la tracción, cerca de 40 Kg/mm²; a la flexión cerca de 900 a 1000; alargamiento, 1 a 2%; dureza, 250 a 270 H_a, esta se obtiene mediante adición de molibdeno en porcentaje variable, según el espesor de las piezas a colar (por consiguiente, de su velocidad de enfriamiento), a fundiciones con bajo contenido de carbono (no superior al 3%).

2.3.1 Fundiciones resistentes al desgaste.

Se emplean para molduras que trabajan en condiciones de elevado desgaste (para cojinetes, cilindros, bujes, tambores de freno y otros). Con el propósito de lograr una elevada resistencia al desgaste de la fundición se alea con elementos que contribuyen a la creación de carburos resistentes al desgaste (cromo, molibdeno y otros). La fundición tipo Ni-Hard tiene una composición en %: 2,7-3,6 de C; 0,4-1 de Si; 0,25-0,7 de Mn; 3,0-5 de Ni; 1,2-2,8 de Cr; ≤0,15 de S; ≤0,4 de P.



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

La fundición resistente al desgaste se emplea para molduras de placas perforadas de estirar, moldes para cerámica, los rodillos de transportadores, bolas rompedoras, etc. La fundición Ni-Hard tiene una estructura martensítica, que posee gran resistencia al desgaste, una gran contracción final (hasta el 2%) y bajas propiedades de fundición, como las fundiciones blancas.

2.3.2 Fundiciones resistentes a la corrosión.

Las fundiciones pobres en cromo se caracterizan por una elevada resistencia a la corrosión en agua de mar y corriente. Las fundiciones aleadas con 0,5-1% de Ni, poseen una elevada resistencia en álcalis. Tienen una resistencia en álcalis aún más elevada las fundiciones aleadas con cromo y níquel (de 0,5-1% de cada uno). Las fundiciones aleadas con cobre y antimonio en cantidad de 0,8% cada uno poseen elevada resistencia a la corrosión en ácido muriático (en 20-30 veces más que las fundiciones no aleadas).

Ocupan un lugar especial entre las aleaciones resistentes a la corrosión los ferrosiliciuros. Estos son aleaciones con un contenido de 14,5-18% de Si, con un contenido de carbono de cerca del 0,5%.

Las fundiciones con altos contenidos de silicio del tipo de los ferrosiliciuros tienen buena fluidez, son resistentes al desgaste, frágiles y se labra con dificultad, tienen una gran contracción final (1,7-2,3%) y una dureza Brinell HB 2740-4500MPa (300-460 Kgf/mm²). Estas aleaciones tienen una elevada resistencia a la corrosión en ácido sulfúrico de cualquier concentración. Su elevada estabilidad química está determinada por la creación de una película protectora de sílice SiO_2 a consecuencia de la acción del ácido sobre la moldura. En el ácido muriático y algunas otras sustancias la película de SiO_2 , que protege las molduras de aleaciones ricas en silicio de la corrosión, se destruye. En estos casos se emplean las fundiciones al silicio-molibdeno,



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

llamadas anticloros. En estas fundiciones se añade adicionalmente un 3,5-4% de Mo.

Poseen una resistencia elevada a la corrosión las fundiciones de estructuras austeníticas. Por ejemplo, la fundición nirezita. Esta tiene una elevada estabilidad química a temperatura normal en ácido sulfúrico, fórmico, acético, en sosa cáustica y en algunas sales y álcalis, como también en agua de mar. La composición de la Nirezita es en %: 0,4 de P; hasta 0,12 de S; 12-16 de Ni; 6-8 de Cu; 1,5-4 de Cr. Estas fundiciones tienen una elevada resistencia al desgaste y estabilidad térmica; se utilizan para camisa de bloques, cilindros para motores de automóviles.

2.4 Aleaciones Ni-Resist.

La aleación de hierro Ni-Resist tiene una matriz austenítica con aproximadamente el 10% de la aleación se encuentra en forma de carburos. La estructura austenítica es insustituible para los ambientes corrosivos en aceites, sales, ácidos, agua de mar y álcalis. La aleación es relativamente suave y el cromo se agrega para formar carburos que ayudan a mejorar la resistencia al desgaste. Ni-Resist es más denso que los hierros grises o dúctiles y tiene un coeficiente más alto de expansión térmica.

La micro estructura de esta aleación es del tipo VII, A, con el tamaño del grafito 4-6 según lo definido en la norma ASTM A247. La matriz es austenítica con un 5-10% de contenido de carburo.

Las aleaciones austeníticas no se pueden endurecer con tratamiento térmico. Pueden ser ablandadas y homogeneizadas calentándolas a 1800-1900° F (980-1040° C) durante tres a cinco horas y luego enfriarlas al aire. Esto hace que la mayoría de los carburos sean esferoidizados. El Recocido ablanda el material y resulta perjudicial sobre la resistencia.



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

El Ni-Resist que depende del níquel para desarrollar una matriz austenítica estable, y el cromo para combinar con el níquel para formar una firme cáscara resistente a la oxidación, y qué puede ligarse más allá con el molibdeno para mejorar las propiedades mecánicas a las altas temperaturas.

2.4.1 Metalografía:

El grafito está presente en forma esferoidal o en láminas según el tipo. La matriz es austenítica con poca presencia de carburos. Se usan as cast (no llevan tratamiento térmico). Son frente a las fundiciones grises y nodulares, lo que los aceros inoxidables son a los aceros al carbono. Similar al caso de los Hadfield.

2.4.2 Propiedades mecánicas:

Es una fundición resistente a la corrosión y a la alta temperatura. De todas las fundiciones grises son las de mayor tenacidad. La tracción de las láminas no supera los 210 Mpa, y la dureza oxila entre 130 y 270 HB. Las nodulares tienen dureza similar, y la tracción máxima 400 Mpa.

2.5 Fundiciones aleadas con aluminio.

Recientemente se han comenzado a fabricar y emplear ciertas fundiciones con aluminio. Sin embargo, en la actualidad todavía su empleo es muy limitado, porque su fabricación es muy difícil. La adición de cantidades de aluminio superiores al 6.5% hace desaparecer el grafito en las fundiciones y hace que aparezca la matriz formada por ferrita y carburos complejos. Esta estructura ferrítica como la de las fundiciones al silicio es muy inoxidable y refractaria al calor.

Las dos clases más importantes son:



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

1. Las fundiciones con 7% de aluminio que tienen buena resistencia al fuego y pueden utilizarse hasta 950 °C. Se mecanizan bastante bien. Su resistencia a la tracción es de unos 18 kg/mm² y su dureza de 300 Brinell.
2. Las fundiciones con más de 8% de aluminio que tienen muy buena resistencia a la oxidación y pueden ser utilizadas a más altas temperaturas, hasta unos 1000 °C. Son difíciles de mecanizar salvo a la muela. Su resistencia a la tracción es de unos 13 kg/mm² y su dureza suele variar de 250 a 500 Brinell.

Los hierros aleados con aluminio que desarrollan un grado alto de resistencia a la oxidación y buenas propiedades mecánicas a las altas temperaturas cuando adicionalmente se alea con molibdeno.

Los hierros aleados al aluminio consisten de dos grupos: los hierros grises y los hierros dúctiles. El grupo de baja aleación contiene de 1 a 7% Al, y el aluminio esencialmente reemplaza el silicio como el elemento grafitizante en estas aleaciones, en estos casos la matriz esta formada por una mezcla de ferrita y perlita. El grupo de alta aleación contiene de 18 a 22% de aluminio el grafito esta también en forma de láminas y la matriz es fundamentalmente ferrítica. Los hierros aleados con aluminio entre estos dos rangos serán hierros blancos de fundición libres de grafito con carburos estables de aluminio y no tienen importancia comercial.

El aluminio refuerza significativamente la resistencia a la oxidación a las temperaturas elevadas y también aumenta la estabilidad de la fase ferrita a muy altas temperaturas hasta y más allá de 980°C (1800°F). Como los hierros aleados al silicio, los hierros al aluminio forman un óxido adherente y compacto en la superficie de la pieza que es muy resistente a nuevas penetraciones de oxígeno.



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

Desgraciadamente, los hierros aleados al aluminio son muy difíciles de fundir sin las inclusiones de escoria.

El aluminio en el hierro es muy reactivo a las temperaturas de fusión del mismo, y el contacto con el aire y la humedad debe ser insignificante. Debe tenerse cuidado de no romper la capa de óxido que se forma durante el vertido del metal en el molde para evitar las inclusiones de la escoria.

2.6 Clasificación de los mecanismos de desgaste.

En la práctica son cinco los mecanismos de desgaste, ellos son; desgaste abrasivo, adhesivo, por fatiga superficial, corrosivo mecánico y desgaste por frotamiento, en nuestro caso nos interesa el desgaste abrasivo.

2.6.1 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. En una estructura determinada la intensidad de desgaste por abrasión depende de la forma, dureza y tamaño de los granos y partículas abrasivas.

La velocidad de desgaste depende del grado de penetración del abrasivo en la superficie y por lo tanto es función de la dureza superficial del material. La dureza, la tenacidad y sobre todo la rugosidad de las partículas abrasivas, acentúan la abrasión, mientras que la fragilidad de éstas atenúa su efecto.

Si la dureza del abrasivo es muy superior a la dureza de la superficie fraccionada, el desgaste es fuerte. Si por el contrario es más blando la velocidad de desgaste es lenta. Se debe tener en cuenta que si la dureza de ambos es similar, el más leve cambio de una de ellas puede aumentar considerablemente el desgaste.

Otros factores que afectan el desgaste abrasivo son la temperatura, las cargas que actúan sobre la superficie de trabajo, condiciones ambientales tales como



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

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 proceso de desgaste abrasivo en condiciones reales, se realiza siempre con la colaboración no solamente de los granos abrasivos, sino también del medio exterior, de una composición química controlada (en el caso del empleo de lubricante) o no controlada (en el caso de la acción de la atmósfera).

En el desgaste abrasivo influye la dureza y la tenacidad del material. La tenacidad es la resistencia que opone el material deformado por la acción de las partículas abrasivas, a la rotura. El desgaste abrasivo depende también del coeficiente de fricción, fuerza de unión adhesiva entre partículas de la superficie del metal y las partículas abrasivas. Cuando los valores del coeficiente de fricción son elevadas, se favorece el proceso de microcorte.

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.
- 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.



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

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.

En este tipo de desgaste pueden observarse tres regímenes en dependencia de las durezas de los materiales interactuantes.

- Régimen débil: cuando la dureza del abrasivo es menor que la del metal.
- Régimen de transición: cuando la dureza del abrasivo es aproximadamente igual a la del metal.
- Régimen severo: cuando la dureza del abrasivo es mayor que la del metal.

Se ha demostrado experimental y teóricamente que la dureza del material está correlacionada con el grado de abrasión según (ASM Volume 18, 1992)

CAPÍTULO III. Metodología de la investigación.

3.1 Diseño de la investigación

Existen dos métodos de planificación de experimentos, el método estadístico y el método clásico. Los métodos de planificación estadísticos se utilizan generalmente cuando se requiere encontrar las variantes óptimas de un proceso complejo con gran número de variables y donde es necesaria la variación de diversos factores simultáneamente. Por otra parte, el campo del método clásico se limita a la obtención de las dependencias particulares entre



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

dos o tres parámetros. Estas dependencias son interesantes, principalmente para la interpretación teórica.

El desarrollo de la metodología de trabajo y del estudio experimental de la obtención de aleaciones Ni-Resist mejoradas a través de la adición de aluminio, se realiza con el objetivo de comprobar la predicción teórica sobre la capacidad de mejorar la resistencia al desgaste abrasivo a través del estudio de la microestructura de la aleación.

La metodología incluye la selección de variables que pueden ejercer una influencia significativa en el proceso, el desarrollo de la matriz experimental, la obtención de las muestras, la realización de los ensayos y la corroboración de los resultados obtenidos a través de la caracterización microestructural.

3.1.1 Elección de las variables de la investigación:

A partir del análisis realizado, se determinaron las variables a estudiar en el diseño y se seleccionaron los niveles de trabajo. Tabla No.1.

Se escogió como variable de entrada solamente:

- Porcentaje de aluminio añadido.

Tabla No.1. Variable definida.

Variables	Nivel inferior	Nivel medio	Nivel superior
Porcentaje de aluminio (%)	2	2,5	3

Las variables de salida:

- Ensayos de dureza.
- Ensayos de microdureza.



- Ensayos de desgaste.

3.1.2 Criterios de selección de las variables:

La selección de los porcentos de aluminio que se adicionan estuvo basada en referencias existentes, tomando en consideración que en una aleación austenítica los componentes Ni_3Al y $NiAl$, se forman cuando el contenido de aluminio es menor que 3%.

3.1.3 Matriz experimental utilizada en el desarrollo de los experimentos.

Para el desarrollo de los experimentos se utiliza el método factorial completo (3^K), o sea, tres niveles con K factores ($K=1$), debido a que solamente analizaremos los diferentes porcentos de aluminio. Por tanto el diseño incluye la realización de tres réplicas para un total de 9 experimentos.

En la tabla No.2 se expone la matriz experimental descodificada, con los experimentos distribuidos de forma aleatoria.

No. Ensayo	Factor
	% Al
1	2
2	2,5
3	3



3.2 Obtención de las probetas metálicas:

3.2.1 Plantillas y moldes.

Las plantillas se obtienen en el taller de plantillería de la Empresa Mecánica del Níquel. Se solicita la elaboración de plantillas sueltas sin sistema de alimentación, pues son estas las que se emplean cuando se va a fabricar una sola pieza o una serie de pequeñas cantidades.

Se pretenden obtener semiproductos que se puedan emplear luego para la elaboración de las probetas según el ensayo correspondiente y se fabrican a partir de croquis elaborados por los autores.

El moldeo se realizará en el Taller de fundición de la EMNi mediante el moldeo manual. Las arenas empleadas para la fundición de las piezas de la aleación Ni-Resist será arena sílice y cromita, las cuales corresponden a las exigencias del proceso tecnológico tales como permeabilidad del gas, poder gasógeno, higroscopicidad, etc.; todo esto con el objetivo de lograr una mejor obtención de las piezas fundidas.

3.2.2 Cálculo de carga.

Para la evaluación de la influencia del porcentaje de aluminio en la microestructura de la aleación, se obtienen probetas de Ni-Resist con adiciones de 2; 2,5 y 3 % de aluminio.



3.3 Metodología para la realización de ensayos.

3.3.1 Fundamentos del ensayo de dureza.

Se entiende por dureza la resistencia del metal ensayado a la penetración en éste de una punta metálica o de diamante. La determinación de dureza es el método de ensayo que se utiliza con mayor frecuencia.

Por medio de este método se obtienen características mecánicas importantes en forma rápida y no destructiva y se pueden realizar en piezas ya elaboradas.

Definición:

“La mayor o menor resistencia que un cuerpo opone a ser rayado o penetrado por otro” o “la mayor o menor dureza de un cuerpo respecto a otro tomado como elemento de comparación”.

Métodos de dureza:

- Ensayo estático de penetración.
- Ensayo de rebote.
- Ensayo de rayado.
- Ensayo de abrasión y erosión

Dureza Rockwell:

Se calcula la dureza en base a la profundidad de penetración y la carga total no se aplica en forma continua. Hay una carga inicial y otra adicional (varía según las condiciones de ensayo).

El valor se obtiene en lectura directa del dial del indicador. La dureza está dada por el incremento de penetración debido a la acción de la carga adicional y una vez suprimida esta, la carga inicial es de 10 Kgf y las adicionales son de



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

50, 90 y 140 Kgf y los penetradores utilizados son: bolilla de 1/16", 1/8", 1/4", 1/2", o cono de diamante. Las escalas más utilizadas son HRC (con cono de diamante y carga de 150Kgf) y HRB (con bolilla de 1/16" y carga de 100Kgf).

3.3.2 Fundamentos del ensayo de microdureza.

Se aplica para la determinación de la dureza de volúmenes microscópicamente pequeños de metal. La microdureza se determina en aparato especial que consta de un mecanismo de carga con punta de diamante y de un microscopio metalográfico. La superficie de la probeta se prepara de la misma manera que para la microinvestigación (rectificado, pulido y decapado). El número de dureza H se determina por el tamaño de las huellas igualmente que la dureza Vickers. El valor de la microdureza se halla por tablas especiales.

3.3.3 Fundamentos del ensayo de desgaste.

Se entiende por desgaste la pérdida gradual de materia de la superficie de un cuerpo sólido producida involuntariamente por acciones mecánicas, particularmente por rozamiento.

Entre los varios tipos de desgaste se pueden distinguir los causados por:

- Frotamiento por rodamiento con engrase.
- Frotamiento por rodamiento sin engrase.
- Frotamiento por deslizamiento con engrase.
- Frotamiento por deslizamiento sin engrase.
- Acción de materiales en polvo, líquidos con abrasivos (erosión), chorros violentos de agua (cavitación).



El resultado depende del método del ensayo, método que debe reproducir con aproximación suficiente las sollicitaciones del caso práctico.

3.3.4 Caracterización de la morfología de las partículas:

El instrumento básico con que se trabaja es el microscopio metalográfico. Con él, se puede determinar el tamaño y la morfología de los granos así como el tamaño, forma y distribución de las diversas fases o inclusiones presentes, parámetros muy relacionados con las propiedades del material examinado.

Pueden usarse otras técnicas como la medición de dureza, resistometría, difracción de rayos X y microscopía electrónica, por ejemplo, pero nunca se presiente del microscopio óptico metalográfico.

El éxito de este primer análisis depende en gran medida de la preparación previa de la muestra o probeta, por lo que esta constituye, sobre bases científicas, prácticamente todo un arte ya que depende mucho de la habilidad y experiencia personal del operario.

Se pretende conseguir una superficie espectacular, preferentemente plana y exenta de toda raya, a lo que resulta en la práctica muy difícil sino se tiene una gran experiencia. Para ello, se sigue una metodología adecuada y se observan determinadas reglas y precauciones.

La muestra debe ser lo más representativa posible de la estructura que se pretende estudiar. Sí, por ejemplo, se trata de estudiar un fallo de material (grieta o rotura), la muestra debe tomarse de una zona lo más próxima a la región donde se produjo el fallo y compararlas luego con otras obtenidas en una región normal.



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

Los cortes para hacer las muestras puede hacerse manualmente o con sierras especiales a base de abrasión, según la dureza del material objeto de estudio. En todos los casos, sin embargo, es una precaución fundamental, evitar que las muestras se calienten para impedir cambios en la estructuras, lo que falsearía el análisis.

Desbaste y pulido:

a) Desbaste

El método más empleado actualmente es el de usar pulidoras mecánicas de rotación, que trabaja con papeles abrasivos de inmersión, generalmente de carburo de silicio, bajo un chorro constante de agua que actúa como lubricante y como refrigerante.

Las muestras se sostienen con firmeza, se presiona uniformemente y se coloca de modo que las rayas del pulido sean transversales a la dirección en que rota el papel, de modo a que cada pase de un papel esmeril a otro borre las huellas que dejó el anterior.

Los papeles abrasivos se usan en una secuencia, que lógicamente, va de mayor a menor y esto se regula según ciertos códigos numéricos.

La secuencia está determinada por el tamaño del grano abrasivo. Los números están relacionados con la cantidad de granos del abrasivo por unidad de superficie, por lo que se entiende que el número debe ir de menor a mayor en la medida que el tamaño del grano disminuye. En caso de una secuencia aproximada de estos papeles podría ser de 80, 120, 220, 280, 400, 600 y 800.

b) Pulido

Los fundamentos del método y también sus objetivos son los mismos, pero la base material cambia. Aquí se emplean las pulidoras mecánicas de paño cuyos abrasivos son pastas hechas a base de material como dióxido de cromo, polvo



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

de diamante, aluminio y otros; sus lubricantes son agua, alcohol y otros especiales.

Es importante destacar que durante toda la etapa del desbaste y pulido, debe tenerse especial cuidado con el lavado minucioso de la muestra antes de pasar de un abrasivo a otro, ya sea de papel o en paño, pues de lo contrario se contaminaría y se echaría a perder. El medio de lavado puede ser agua alcohol, u otro, según el caso.

También existe el método de pulido electrolítico que puede sustituir el paño. Cuando se emplea el electropulido como etapa final del pulido, se elimina esta capa por medio de la acción química del electrolito sobre la muestra que actúa disolviéndola. Ciertamente este es un método más refinado, pero también más engorroso y caro, luego solo se emplea justificadamente.

Ataque químico

Aunque en la etapa anterior se logre alcanzar lo que se llama un pulido espectacular, esto no basta para revelar la estructura de la muestra o probeta.

En efecto, si se logra un pulido así, bajo el microscopio solo se ve una luz intensa, muy brillante, reflejada en la superficie pulida que se ha convertido en un pequeño espejo plano.

Para poder revelar la estructura interna de la muestra (microestructura), las fronteras de granos, las fases presentes y los subgranos, es necesario que cada parte de la muestra refleje la luz de modo desigual. Debe haber un necesario contraste para poder diferenciar las partes constituyentes, que es el objetivo deseado. Todo esto se logra mediante el ataque químico que es selectivo en su velocidad de reacción.

Los reactivos de ataque pueden ser las sustancias químicas más diversas, pero un lugar primordial lo ocupan los ácidos inorgánicos como el nítrico, clorhídrico



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

y fluorhídrico en diversos medios fluidos, entre los que abundan el agua y el alcohol etílico.

El ataque escogido depende de lo que se desee revelar (por ejemplo: fronteras de granos o diferenciar una parte de otra). Una vez más, al finalizar esta etapa de análisis químico, la muestra debe levantarse muy bien y secarse rápidamente, tanto para detener el ataque y evitar el posible deterioro de la muestra antes de su estudio (que se queme o se oxide rápidamente), como para proteger los lentes del microscopio de posibles vapores o incluso pequeñas gotas de reactivo que puedan dañarlos de forma irreversibles.

Las fotografías obtenidas de estos exámenes (ensayos micrográficos), genéricamente llamados microfotografía, se logran con la ayuda del microscopio metalográfico, cuyos principios ópticos y de observación no difieren mayormente de los comunes.

Por otra parte, con la observación de las estructuras micrográficas y por comparación de microfotográficas, es posible deducir el contenido aparente del carbono, finura y variedad de los componentes, clasificación de aleaciones, reconocer las inclusiones por defectos de fabricación (óxidos, silicatos, oxisulfuros, silicoaluminatos), etc.

3.4. Análisis químicos de las probetas:

El análisis químico de las probetas se realiza en el laboratorio de muestras del taller de fundición de la Empresa Mecánica del Níquel. Los resultados se obtienen en un Espectrofómetro de Admisión (para base hierro, o sea para solo análisis químicos de materiales ferrosos), marca SPECTROLAB. El análisis consiste en una chispa que ataca la muestra, lee el espectro y en función de la longitud de onda de este espectro se determinan los componentes. El chispeo



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

se realiza en varios lugares de la muestra con una atmósfera de argón para eliminar el oxígeno. De la serie de mediciones se hace un promedio obteniendo así el % de cada componente que forma la fundición.

Para corroborar los resultados obtenidos en este ensayo los análisis se realizan en el laboratorio químico del Centro de Investigaciones del Níquel. La técnica empleada en este caso es el de absorción atómica en un equipo PIE-IUNICAM de procedencia británica.

3.5 Examen metalográfico:

Las operaciones de corte de las muestras se realizan con una cortadora de metales aplicando refrigeración intensa con emulsión refrigerante para evitar transformaciones adicionales en la estructura producto del calentamiento durante el corte. Las muestras, debidamente marcadas, se someten a procesos de preparación para su posterior caracterización.

La preparación de las muestras para la caracterización metalográfica se realiza según los procedimientos establecidos en las normas NC 10-56:86 y ASTM E3-95.

Durante el pulido se emplean máquinas herramientas, pulidoras de laboratorio aplicando técnicas de pulido manual. Las operaciones de clasificación, preparación y pulido de las muestras se realizan siguiendo la siguiente secuencia de operaciones:

- **Cepillado:** Se aplica el cepillado en dos caras aproximadamente paralelas en una máquina cepilladora.
- **Rectificado:** Horizontal 6T-82-1 con refrigeración continua. Se designa una de las caras para el pulido y ataque y la otra para el análisis químico.



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

- **Pulido:** Las muestras se pulen en una pulidora metalográfica modelo Montasupal empleando papel abrasivo de las series 350, 500, 600, y 800, paños de fieltro y una solución de pasta abrasiva de Cr_2O_3 con granulometría de 3 μm .
- **Limpieza lavado y secado:** Después de la adecuada preparación de las superficies, las probetas se lavan con acetona para eliminar restos de grasa, polvo y pasta de pulir cuidando no frotar la superficie pulida. Posteriormente se limpian con etanol absoluto para eliminar cualquier vestigio de humedad.
- **Ataque de las superficies a investigar:** Inmediatamente después de la limpieza, se procede a realizar el ataque de las superficies a investigar. Se emplean las técnicas de ataque manual por inmersión según ASTM E262-PracticeA. En los laboratorios del ISMM.
- **Limpieza y secado:** Después de atacadas, las superficies de las muestras se lavan con agua destilada y posteriormente en alcohol para finalmente secarlas en agua caliente.

CAPÍTULO IV. Análisis de resultados.

En el presente trabajo se realizó una investigación teórica con el objetivo de incrementar las propiedades de termoresistencia y de resistencia al desgaste de la aleación Ni – Resist L - Ni – Cr 20– 2. Se seleccionó esta aleación ya que la misma presenta una matriz austenítica, basándonos en trabajos ya realizados en el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Estos trabajos a pesar de



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

que fueron realizados en aceros demostraron que al añadirle el aluminio como elemento de aleación y con un contenido menor de 3 % en aleaciones austeníticas mejoran sus propiedades de resistencia al desgaste y de termoresistencia provocando un efecto endurecedor en la aleación. Por lo que en nuestro trabajo se proponen tres variantes de aleaciones con un contenido de 2; 2,5 y 3 por ciento de aluminio, cada ensayo cuenta con tres réplicas para un total de nueve experimentos.

Nota: No se realizaron los experimentos ya que la aleación en el momento de esta investigación no se estaba fundiendo.

Se desarrolló la metodología de trabajo para la caracterización de la microestructura y del estudio experimental de la obtención de aleaciones Ni-Resist 3L – Ni – Cr 30 – 3 mejoradas a través de la adición de aluminio a escala de laboratorio.

4.1 Diseño de las variantes de aleaciones.

De acuerdo con el contenido de aluminio seleccionado fueron diseñadas tres variantes de aleaciones:



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

Variantes de aleaciones:

Tabla No. 3. Composición química de la aleación Ni – Resist con adición de 2 % de aluminio.

Elementos	% en masa.
C	2,9
Si	1,75
Mn	1,15
Ni	20
Cr	2,25
P	0,0755
S	0,0605
Al	2
Fe	69,814

Tabla No. 4. Composición química de la aleación Ni – Resist con adición de 2,5 % de aluminio.

Elementos	% en masa.
C	2,9
Si	1,75
Mn	1,15
Ni	20
Cr	2,25
P	0,0755
S	0,0605
Al	2,5
Fe	69,314



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

Tabla No. 5. Composición química de la aleación Ni – Resist con adición de 3 % de aluminio.

Elementos	% en masa.
C	2,9
Si	1,75
Mn	1,15
Ni	20
Cr	2,25
P	0,0755
S	0,0605
Al	3
Fe	68,814

4.2 Para comprobar como se comportan las propiedades mecánicas de la aleación Ni – Resist mejorada por la añadidura de aluminio se proponen como variables de salida.

1. Ensayo de dureza.

El método elegido para realizar el ensayo fue por Dureza Rockwell en un Durometro modelo SOELAN. B. URSS -198. En el que se calcula la dureza en base a la profundidad de penetración y la carga total no se aplica en forma continua. Hay una carga inicial y otra adicional (varía según las condiciones de ensayo).



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica



FIGURA 4.1 Durómetro Brinell (Laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM Moa.)

2. Ensayo de microdureza.

Para este ensayo se utiliza el microscopio modelo: PMT-3 N0168 (MADE IN URSS) diseñado por Jrashev y E.S. Berkovich (1952), que se encuentra en el Laboratorio de microscopia de menas del ISMM de Moa.



FIGURA 4.2 Microscopio utilizado para el ensayo de microdureza.



3. Ensayo de desgaste.

El objeto práctico de la prueba es el de confrontar la resistencia al desgaste de diversos materiales y con ello establecer una grabación de calidad para un determinado empleo.

4.3 Ataque químico de las probetas:

Se realiza con el objetivo de resaltar la microestructura de la aleación Ni – Resist L – Ni – Cr 20 – 2. Para este ataque químico se utilizará el ácido nítrico.

Reactivos de ataque para examen microscópico			
Reactivo de ataque	Composición		Usos
Ácido Nítrico (Nital)	Ácido Nítrico	5cc	Aceros y hierros
	Alcohol etílico	95 cc	

Se emplea como reactivo de ataque el ácido nítrico porque este resalta los diversos constituyentes estructurales y el contorno de los granos de la aleación Ni – Resist L – Ni – Cr 20 – 2.

4.4 Cálculo de carga de cada variante de aleación para 100 Kg de material con diferentes porcentos de aluminio.

Para el cálculo de carga se empleó el programa ORCAC (22) disponible en el taller de Fundición de la Empresa Mecánica del Níquel y se utiliza para todas



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

las operaciones de fusión.. Este Software tiene soporte en el Microsoft Excel del Windows 2000 y es el que se emplea actualmente en este taller.



Tabla No. 6 Cálculo de carga de la aleación Ni – Resist.

Carga de la Aleación		Ni-Resit(carga nueva)								Horno Utilizado:				Inducción 1tn		
Composición química, %		ELEMENTOS														
		C		Si		Mn		Ni		P		S		Cromo		
		De	hasta	De	hasta	De	hasta	De	hasta	De	hasta	De	hasta	De	Hasta	
		2,6	3,2	1	2,5	0,8	1,5	18	22	0,001	0,15	0,001	0,12	1,5	3	
Análisis deseado, %																
Cálculo para el análisis químico deseado.																
Composición de la Carga Alélica	Peso, Kg	2,9		1,75		1,15		20		0,0755		0,0605		2,5		
		%	Kg	%	Kg	%	Kg	%	Kg	%	Kg	%	Kg	%	Kg	
bio	60	4,2	2,52	2,75	1,65	0,6	0,36									
anquilla	11	0,44	0,048	0,55	0,061	1,3	0,143									
Sinter	22							92	20,24							
Cr 0,6	3													60	1,8	
bón Antracita	0,3	60	0,18													
tarra de Ac Ct3	3,2	0,2	0,006	0,2	0,006	0,4	0,013			0,05	0,002	0,04	0,001			
(Metálico)	0,5					99,9	0,5									
total	100	64,84	2,755	3,5	1,717	2,3	1,015	92	20,24	0,05	0,002	0,04	0,001	60	1,8	
ciones																
didadas o ganancias																
TOTAL	100		2,755		1,717		1,015		20,24		0,002		0,001		1,8	



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

Tabla No. 7 Cálculo de carga de la aleación Ni – Resist mejorada con un 2% de aluminio.

Carga de la Aleación				Ni-Resit(carga nueva)								Horno Utilizado:				Inducción 1tn			
Composición química, %		ELEMENTOS																	
		C		Si		Mn		Ni		P		S		Cromo		Aluminio			
		De	hasta	De	hasta	De	hasta	De	hasta	De	hasta	De	hasta	De	Hasta	De	hasta		
		2,6	3,2	1	2,5	0,8	1,5	18	22	0,001	0,15	0,001	0,12	1,5	3	1	3		
Análisis deseado, %																			
Cálculo para el análisis químico deseado.																			
Composición de la Carga Métrica		Peso, Kg	2,9		1,75		1,15		20		0,0755		0,0605		2,5		2		
			%	Kg	%	Kg	%	Kg	%	Kg	%	Kg	%	Kg	%	Kg	%	Kg	
Carbio		60	4,2	2,52	2,75	1,65	0,6	0,36											
Carbón Anquilla		11	0,44	0,048	0,55	0,061	1,3	0,143											
Sinter		22							92	20,24									
Cr 0,6		3												60	1,8				
Carbón Antracita		0,3	60	0,18															
Botarra de Ac Ct3		1,18	0,2	0,006	0,2	0,006	0,4	0,013			0,05	0,002	0,04	0,001					
(Metálico)		0,5					99,9	0,5											
(Metálico)		2,02															99	2	
Total		100	64,84	2,755	3,5	1,717	2,3	1,015	92	20,24	0,05	0,002	0,04	0,001	60	1,8		2	
Pérdidas																			
Pérdidas o ganancias																			
TOTAL		100		2,755		1,717		1,015		20,24		0,002		0,001				2	



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

Tabla No. 8 Cálculo de carga de la aleación Ni – Resist mejorada con un 2,5% de aluminio.

Arca de la Aleación		Ni-Resit(carga nueva)										Horno Utilizado:				Inducción 1tn		
Composición química, %	ELEMENTOS																	
	C		Si		Mn		Ni		P		S		Cromo		Aluminio			
	De	hasta	De	hasta	De	hasta	De	hasta	De	hasta	De	hasta	De	Hasta	De	hasta		
	2,6	3,2	1	2,5	0,8	1,5	18	22	0,001	0,15	0,001	0,12	1,5	3	2	3		
Análisis deseado, %																		
Cálculo para el análisis químico deseado.																		
Composición de la Carga Métrica	Peso, Kg	2,9		1,75		1,15		20		0,0755		0,0605		2,5		2,5		
		%	Kg	%	Kg	%	Kg	%	Kg	%	Kg	%	Kg	%	Kg	%	Kg	
bio	60	4,2	2,52	2,75	1,65	0,6	0,36											
anquilla	11	0,44	0,048	0,55	0,061	1,3	0,143											
Sinter	22							92	20,24									
Cr 0,6	3													60	1,8			
bón Antracita	0,3	60	0,18															
atarra de Ac Ct3	0,675	0,2	0,006	0,2	0,006	0,4	0,013			0,05	0,002	0,04	0,001					
(Metálico)	0,5					99,9	0,5											
(Metálico)	2,525															99	2,5	
total	100	64,84	2,755	3,5	1,717	2,3	1,015	92	20,24	0,05	0,002	0,04	0,001	60	1,8		2,5	
ciones																		
didadas o ganancias																		
TAL	100		2,755		1,717		1,015		20,24		0,002		0,001				2,5	



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

Tabla No.9 Cálculo de carga de la aleación Ni – Resist mejorada con un 3% de aluminio.

Carga de la Aleación		Ni-Resit(carga nueva)										Horno Utilizado:				Inducción 1tn		
Composición química, %		ELEMENTOS																
		C		Si		Mn		Ni		P		S		Cromo		Aluminio		
		De	hasta	De	hasta	De	hasta	De	hasta	De	hasta	De	hasta	De	Hasta	De	hasta	
		2,6	3,2	1	2,5	0,8	1,5	18	22	0,001	0,15	0,001	0,12	1,5	3	3	3	
Análisis deseado, %																		
Cálculo para el análisis químico deseado.																		
Composición de la Carga Alélica	Peso, Kg	2,9		1,75		1,15		20		0,0755		0,0605		2,5		3		
		%	Kg	%	Kg	%	Kg	%	Kg	%	Kg	%	Kg	%	Kg	%	Kg	
Carbio	60	4,2	2,52	2,75	1,65	0,6	0,36											
Carbón Anquilla	11	0,44	0,048	0,55	0,061	1,3	0,143											
Sinter	22							92	20,24									
Cr 0,6	3													60	1,8			
Carbón Antracita	0,3	60	0,18															
Carbón de Ac Ct3	0,17	0,2	0,006	0,2	0,006	0,4	0,013			0,05	0,002	0,04	0,001					
(Metálico)	0,5					99,9	0,5											
(Metálico)	3,03															99	3	
Total	100	64,84	2,755	3,5	1,717	2,3	1,015	92	20,24	0,05	0,002	0,04	0,001	60	1,8		3	
Pérdidas																		
Pérdidas o ganancias																		
TOTAL	100		2,755		1,717		1,015		20,24		0,002		0,001				3	



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

CONCLUSIONES:

1. Se obtuvieron tres variantes de la aleación Ni – Resist L – Ni – Cr 20 – 2 mejoradas por añadidura de aluminio a escala de laboratorio, con contenidos de 2; 2,5 y 3.
2. Se elaboró la metodología de trabajo para la caracterización de la microestructura de la aleación Ni – Resist L – Ni – Cr 20 – 2, que incluye los fundamentos de los ensayos de dureza, microdureza y de resistencia al desgaste.



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

Recomendaciones:

Se recomienda la realización de los experimentos a escala de laboratorio para la caracterización de la microestructura de la aleación Ni – Resist L – Ni – Cr 20– 2 mejorada por añadidura de aluminio de acuerdo con la metodología de trabajo realizada en este trabajo.



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

BIBLIOGRAFÍA:

1. AKIR Mile (SI) WO9847648, 1998
2. De VELDE, CEES van. Carbide formation in cast iron, Part I A new Approach
3. GEORGEL. KEHI. Fundamentos de la práctica metalográfica. Casa editorial Mcgraw-hill book Company. Nueva York. 516 páginas. 1963
4. GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, L. Estudio preliminar de la precipitación de partículas coherentes en aleaciones HK – 40. Tutores M.Sc. Maritza Meriño Cala y el Dr. Alberto Velásquez del Rosario. Tesis en opción al título de ingeniero metalúrgico. 2004. 49 páginas.
5. GUIRSHOVISH, N.G. Clasificación y Propiedades del Hierro en Lingotes. [Construcción](#) de Maquinarias, 1966. p562
6. ISHIKAWA SHIN. Yamamoto Akira, Yoshioka Keiishi. JP2001316754, 2001
7. KRAUSE, D. E. Gray Iron- A Unique Engineering Material. ASTM, Special Technical Publications 455, Philadelphia, 1969 pp 3-28
8. MERIÑO CALA, M. Diseño de una aleación termoresistente base hierro para hornos Herreshoff. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, 2008.
9. Disponible en:
10. <http://intranet.ismm.edu.cu/sites/revistamg/v24-n4-2008/art1-4-2008.pdf>
11. Pages, E.
<http://www.advance.com.ar/usuarios/eupages> (actualizado en el 2000)



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”.
Facultad de Metalurgia y Electromecánica

<http://www.monografias.com/trabajos16/estrategia-produccion/estrategia-produccion.shtml>.

12. PINO RIVERO, L. Hierros aleados resistentes al desgaste. Universidad Central de Las Villas. Cuba. 2002.
13. SALCINES MERIÑO, C. Tecnología de fundición. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de la Habana. Tomo I. 1985. 288 páginas.
14. SALCINES MERIÑO, C. Tecnología de fundición. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de la Habana. Tomo II. 1985. 294 páginas.
15. S.H. AVNER. Introducción a la Metalografía Física. Editorial Mir. 1978. Moscú.
16. SMIMOV, N y otros. Producción de acero. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de la Habana. 1987. 304 páginas.
17. TABERA LEYVA, O. Programa para el cálculo de carga, Empresa Mecánica del Níquel, 2004.
18. WALTON, C.F. Castings Iron Handbook. Iron casting Society, Inc. 1981
19. YAMAMOTO MASAOKI, MAEDONO HIROAKI, otros (3) JP2001049381, 2001
20. to the solidification of cast iron, April 2000
21. <http://www.key-to steel.com/articles/art10.htm> (2000)