



*Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero- Metalúrgico
"Dr. Antonio Núñez Jiménez"
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Mecánica*

Trabajo de Diploma

EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO METALÚRGICO

Influencia de la adición de aluminio en las propiedades mecánicas y químicas de la aleación Ni-Resist

Autor: Oscar Galán Aristiguís

Tutores: Prof. Ing. María Victoria Rojas Fernández, Msc.

Prof. Tit, Ing. Alberto Velásquez Del Rosario, Dr.c.

Moa

2011





*Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero- Metalúrgico
"Dr. Antonio Núñez Jiménez"
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Mecánica*

Trabajo de Diploma

EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO METALÚRGICO

Influencia de la adición de aluminio en las propiedades mecánicas y químicas de la aleación Ni-Resist

Autor: Oscar Galán Aristiguis

Tutor: Prof. Ing. María Victoria Rojas Fernández, Msc.

Prof. Tit, Ing. Alberto Velásquez Del Rosario, Dr.c.

Moa

2011

Pensamiento

“Todos los esfuerzos tienen que conducir al incremento sostenido de la productividad del trabajo, a la par que aseguremos el pleno empleo de los recursos laborales, a la reducción de los costo y el aumento de la rentabilidad de las empresas, en suma a la eficiencia”

Fidel Castro Ruz.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo con todo el amor que se merecen:

A mi madre Adís María Aristiguis García,

.....quien me ha alumbrado el camino con su brillante luz en todo mi andar y me ha dado apoyo sin apreciar los límites del sacrificio.

A mi padrastro Jorge Luis Álvarez García,

..... quien me ha dado siempre su disposición y me ha guiado por el camino correcto.

A mis hermanos Javier Álvarez Aristiguí, Yaidiel Álvarez Aristiguí y Yordanka Álvarez Aristiguí,

..... a quienes me unen más que lazos de consanguinidad, sentimientos profundamente sanos y transparente respeto.

A mis compañeros y amigos,

..... quienes siempre están dispuestos a ayudarme, incluso en los momentos más difíciles de mi vida.

A mi Patria y a mi invencible Revolución.

Agradecimientos

- + Agradezco profunda y sinceramente a mis tutores Alberto Velázquez Del Rosario y María Victoria Rojas Fernández, por brindarme apoyo y muestras de aliento, permitiéndome vencer las adversidades del camino en la realización de esta tesis.*
- + A todos los profesores del Departamento de Metalurgia que contribuyeron en mi formación profesional.*
- + A todos mis compañeros de aula quienes me brindaron apoyo durante el transcurso de la carrera.*
- + A mis amigos Yunier Pérez Rodríguez, Carlos Iván Meléndez, Yuleisis Figueredo Herrera y Dauriel Pérez Moreno por su excelente y transparente amistad.*
- + El agradecimiento más especial y de todo corazón a mi madre y familia en general, por dar de sí el espíritu optimista de luchar hasta el final por un propósito y brindarme su apoyo incondicional.*

“A cada uno de ustedes vaya mi más sincero agradecimiento”.

RESUMEN

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. 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, además de ser un elemento que, en presencia de elementos como el hierro y el níquel, contribuye a la formación y/o precipitación de partículas, pero se desconoce su influencia en las propiedades mecánicas y química del hierro fundido aleado Ni-Resist como elemento de aleación. Es por ello que se plantea como objetivo en este trabajo evaluar la influencia del aluminio como elemento de aleación en las propiedades mecánicas y químicas del hierro fundido Ni-Resist por precipitación de partículas a partir de la adición de aluminio como inductor de compuestos intermetálicos. Se utilizó el método tradicional de experimentación, que consistió en fijar la variable porcentaje de níquel variando la variable porcentaje de aluminio, y para inducir partículas se aplicó un tratamiento térmico de recocido acompañado con un envejecimiento. Se concluye que la adición de aluminio incrementa las propiedades químicas y mecánicas y se determina que la aleación de mejores resultados es la variante con 29 % Ni; 2,24 % Al, dureza de 60 HRB, resistencia a la tracción de 143,96 MPa y una resistencia al impacto de 20,60 J/cm².

Palabras claves: *Elementos de aleación, precipitación de partículas, compuestos intermetálicos.*

ABSTRACT

The alloy elements modify the microstructure of the casting and so its hardness and resistance. In addition, sometimes these changes are being influenced by a variation of hardenability. Aluminium significantly reinforces the resistance to oxidation at high temperatures and also increases the stability of the ferrite phase at very high temperatures. However, being an element that contributes to the formation of particle and/or precipitation in the presence of iron and nickel, but its influence in the mechanical and quimical properties of the cast iron as an alloy element is not known in Ni-Resist alloy. Therefore it is for that reason that the objective this work is to estimate the influence of aluminum as an alloy element in the mechanical and chemical properties of the cast iron Ni-Resist alloy by particle precipitation from the addition of aluminum as an intermetallic compounds inducer. The traditional experimentation method that consists of fixing the variable percentage of nickel while varying the variable percentage of aluminum has been used. For particles induction, an annealing heat treatment accompanied with an aging was applied. It has been concluded that the addition of aluminum increases the chemical and mechanical properties whereby the alloy with good results was determined to be the variant with 29 % Ni; 2,24 % Al, hardness of 60 HRB, tensile strength of 143,96 MPa and impact resistance of 20,60 of J/cm².

Key words: *alloy elements, particle precipitation, intermetallic compounds.*

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	8
<i>CAPÍTULO 1: MARCO CONCEPTUAL TEÓRICO SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICO MECÁNICAS DE LOS HIERROS DE ELEVADA ALEACIÓN.....</i>	13
1.1. Hierro fundido.....	13
1.2. Hierros de elevada aleación.....	14
1.3. Hierros fundidos aleados resistentes al desgaste abrasivo.....	15
1.4. Efecto de los elementos de aleación en el hierro fundido.....	16
1.5. Precipitación de partículas en aleaciones metálicas.....	20
<i>CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS.....</i>	24
2.1 Metodología de experimentación.....	24
2.2 Diseño estadístico de experimentos.....	25
2.3 Composición química.....	26
2.4 Elección de las variables de la investigación.....	26
2.5 Criterios de selección de las variables.....	26
2.6 Matriz experimental utilizada en el desarrollo de los experimentos.....	27
2.7 Análisis de la composición química.....	28
2.8 Aplicación de tratamientos térmicos.....	29
2.9 Metodología para la realización de ensayos.....	30
2.9.1. Selección y preparación de las muestras.....	31
2.9.2. Corte y maquinado.....	31
2.9.3. Marcado.....	35
2.10 Evaluación de las propiedades mecánicas.....	36
2.10.1. Ensayos de dureza.....	36
2.10.2. Fundamento del ensayo de resistencia a la tracción.....	36
2.10.3. Fundamento del ensayo de resistencia al impacto.....	39
2.10.4. Ensayos de estabilidad química.....	41
2.10.5. Procedimiento estadístico.....	43

<i>CAPITULO 3: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</i>	45
3.1. Análisis de la composición química de las variantes de aleaciones estudiadas	45
3.2. Resultado obtenido por los cálculos de la metodología para el maquinado	47
3.3. Resultados obtenidos en el maquinado de las probetas en la fresadora vertical modelo 6 M 13 L	47
3.4. Evaluación de las propiedades mecánicas de las variantes de aleaciones	49
3.4.1. Ensayos de dureza	49
3.4.2. Resistencia a la tracción	51
3.4.3. Resistencia al impacto	53
3.4.4. Ensayo de estabilidad química.....	54
3.5. Análisis estadístico	56
3.6. Argumentación de la variante seleccionada	60
3.7. Valoración económica	61
3.8. Impacto medio ambiental	64
<i>CONCLUSIONES</i>	67
<i>RECOMENDACIONES</i>	68
<i>BIBLIORAFÍA</i>	69

INTRODUCCIÓN

En Cuba 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 planta niquelífera Comandante Ernesto Che Guevara 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 níquel y el cobalto se separan del hierro y el licor rico en estos elementos se procesa en etapas posteriores hasta obtener un sínter 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, donde se almacena para su 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.

El desgaste prematuro de los cuerpos e impelentes de las bombas de cola de dicha empresa 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.

La necesidad de aumentar la eficiencia operativa de equipamientos y procesos ha conllevado al desarrollo de nuevos materiales con una resistencia incrementada, destacándose las superaleaciones complejas endurecibles por precipitación, aplicables a las más diversas situaciones y requerimientos industriales. En tal sentido, las superaleaciones base níquel y hierro han tenido un incuestionable predominio en los campos de la aeronáutica, plantas de potencia y las industrias petroquímicas y metalúrgicas.

La precipitación es uno de los mecanismos más efectivos en el endurecimiento de aleaciones. La presencia de partículas finas y dispersas por precipitación puede actuar de distinta forma, mejorando sustancialmente la resistencia de las mismas en función del tamaño de los precipitados. Las partículas más pequeñas actúan como freno para el movimiento de las dislocaciones mientras que las de mayor tamaño anclarán las juntas del grano impidiendo su crecimiento.

Los materiales endurecidos por precipitación, constituyen el grupo de aleaciones para altas temperaturas de mayor uso en los últimos decenios por sus excelentes condiciones de servicio y en su funcionamiento, los cuales conservan las propiedades mecánicas de las aleaciones metálicas y se asemejan, en cuanto a la resistencia a altas temperaturas y atmósferas agresivas, a las de materiales cerámicos.

Estas aleaciones de uso industrial a altas temperaturas deben sus excelentes propiedades mecánicas al contenido de partículas coherentes. Las partículas coherentes son estructuras ordenadas con una composición definida que impiden el movimiento de las dislocaciones y actúan microscópicamente bloqueando el avance de la deformación. Se dice que una partícula es coherente cuando los cristales que la forman se corresponden directamente con el arreglo cristalino de la matriz, o sea, con el componente de la aleación que constituye la mayor porción del volumen del sólido y en cuyo seno se alojan las partículas.

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 en los hierros fundidos, modifican también como en los aceros, la situación de los puntos críticos y además ejercen una acción muy importante y compleja de la grafitización.

Ciertos elementos como el silicio, aluminio, níquel y cobre, que se disuelven en la ferrita, la endurecen y la hacen aumentar su resistencia. Son elementos que favorecen la grafitización.

Otros elementos como el cromo, manganeso, y molibdeno son formadores de carburos, elementos que tienden a formar fundición blanca en vez de gris y dificultan la grafitización.

El aluminio, a pesar de su importante función como desoxidante del acero y en el control del tamaño del grano al reducir el crecimiento del mismo al formar óxidos y nitruros, es reportado recientemente en la literatura (Sourmail, 2002; Plati, 2003; Mariño; *et al.*, 2008b; 2008a) como un metal que, en presencia de elementos como el hierro y el níquel, también contribuye a la formación y/o precipitación de partículas coherentes. Es por ello que resulta muy común encontrarlo como componente de superaleaciones en su papel de inductor de compuestos intermetálicos.

Este como elemento de aleación funciona como agente promotor de la precipitación y por ende provoca un efecto endurecedor como consecuencia de la presencia de las partículas coherentes ordenadas γ' del tipo $(\text{Ni}_3\text{Al})_x$, mejorando así, las propiedades termo-resistentes de la aleación y garantizando buenas combinaciones de resistencia a la tracción y a la termofluencia.

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. El aluminio en el hierro es muy reactivo a la temperatura de fusión del mismo y el contacto con el aire y la humedad debe ser insignificante.

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, pero hasta el momento no se ha 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 níquel; sin embargo con la utilización de estas aleaciones, todavía no se satisface la durabilidad exigida.

Por lo antes expuesto, **la situación Problémica** de la investigación la constituye:

Las propiedades mecánicas y químicas de la aleación Ni-Resist no satisfacen la durabilidad exigida de las piezas que trabajan en ambientes corrosivos de alta abrasividad.

Problema:

Desconocimiento de la influencia del aluminio como elemento aleante en las propiedades mecánicas y químicas de la aleación Ni-Resist.

El objeto de investigación es:

Propiedades mecánicas y químicas de la aleación Ni-Resist con la adición de aluminio como elemento aleante.

Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente **hipótesis**:

La adición controlada de aluminio como elemento de aleación en el hierro fundido Ni-Resist posibilita la precipitación de partículas intermetálicas que modifican las propiedades químicas e incrementan las propiedades mecánicas de la aleación.

Campo de acción:

Material de los impelentes de bombas de colas en la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara".

A partir de la hipótesis planteada, se define como **objetivo general** del trabajo:



Evaluar la influencia del aluminio como elemento de aleación en las propiedades mecánicas y químicas del hierro fundido Ni-Resist.

Para dar cumplimiento al objetivo general y verificar el cumplimiento de la hipótesis planteada, se establecen los **Objetivos Específicos** siguientes:

Aplicar mecanismos teóricos experimentales de precipitación de partículas al incremento de las propiedades mecánicas y químicas de la aleación Ni-Resist por la adición de aluminio como elemento aleante.

1. Evaluar el comportamiento químico y mecánico de la aleación Ni-Resist con la adición de aluminio como elemento aleante.

Para lograr el cumplimiento de los objetivos propuestos, se plantean las siguientes tareas **de trabajo**:

1. Diseño de experimentos,
2. Análisis de la composición química,
3. Aplicación de tratamientos térmicos.
4. Evaluación de las propiedades químicas y mecánicas de la aleación a través de:
 - a) Dureza,
 - b) Ensayo de resistencia a la tracción,
 - c) Ensayo de resistencia al impacto,
 - d) Argumentación de las variables seleccionadas,
5. Valoración económica e impacto ambiental.

CAPÍTULO 1: MARCO CONCEPTUAL TEÓRICO SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICO MECÁNICAS DE LOS HIERROS DE ELEVADA ALEACIÓN

Un hierro fundido aleado es aquel que contiene elementos especiales añadidos en suficiente cantidad para producir una modificación en las propiedades físicas, químicas o mecánicas que se puedan medir. Los elementos de aleación se añaden al hierro fundido para fines especiales, tales como resistencia a la corrosión, al calor o al desgaste y para mejorar las propiedades mecánicas. La mayoría de los elementos de aleación en el hierro fundido aceleran o retardan la grafitización, lo cual es una de las razones importantes para la aleación.

1.1. Hierro fundido

Según varios autores entre los que se encuentran Walton (1981) y Guirshovich (1966), 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, blanco, con elevado nivel de aleación y con grafito compacto,

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 hierro gris es el más empleado, con una producción anual superior al resto de los metales fundidos. La presencia de grafito laminar, señala 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 creado 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, por el incremento que sufre esta propiedad. Sin embargo estas aleaciones no son las más empleadas en el caso donde las piezas producidas son utilizadas 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, Rojas (2011).

1.2. Hierros de elevada aleación

Petty (1968), Walton (1981) y ASTM A 352 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 muy 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.

Sy (1959), Petty (1968) y Krause (1969), 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.

Otros efectos 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 otras fuentes Key to Steel (2000) coinciden en 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. Hierros fundidos aleados resistentes al desgaste abrasivo

En las especificaciones dadas por la ASTM A 352 también se clasifican a los hierros de alta aleación como un grupo independiente y proponen entre ellos a: Hierros blancos al cromo-níquel, son conocidos también como Ni-Hard y contienen contenidos de cromo bajos, (de 3 - 5 % de níquel y de 1 - 4 % de cromo, con una modificación en la que el cromo se eleva de 7 - 11 %), Hierros al cromo-molibdeno, que contienen de 11 - 23 % de cromo y hasta 3 % de molibdeno y adicionalmente se

añaden níquel o cobre. Un tercer grupo de Hierros blancos aleados con elevado contenido de cromo (25 - 28 %), 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 1200 HV y las matrices martensíticas con austenita residual llegan a durezas del orden de 600 a 700 HV.

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

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.

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 puede encontrar combinado con el hierro en forma de carburo (o cementita con 6,67 % C) o en el estado libre de grafito (carbono libre o grafito).

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 De Velde (2000).

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 de herramientas.

En realidad el proceso de solidificación del hierro fundido es un proceso muy complicado, como puntualiza De Velde (2000); 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 y Gundlach (1987) 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), presentan 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 que 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 señala Sy (1959) de esta forma inhiben la grafitización. Realmente este efecto ocurre durante la transformación eutectoide, 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 (1966).

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 eutectoide de la austenita, aumenta el intervalo de la austenita y disminuye la concentración de carbono en la transformación eutectoide y en la transformación eutéctica, un % de manganeso disminuye la concentración de carbono en 0,06 – 0,07 %, pero aumenta la temperatura de transformación eutéctica, un % 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 $(Fe Mn)_{7C3}$ y $(Mn Fe)_{23C6}$.

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 – 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 fosfuro 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 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 $(Fe,Cr)_3C$; y otros. Es además un fuerte promotor de perlita, pues aumenta la solubilidad del 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 (1969); Janowak y Gundlach (1987) 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 la temperatura de fusión del mismo y el contacto con el aire y la humedad debe ser insignificante, según García; et al.,(2005).

1.5. Precipitación de partículas en aleaciones metálicas

La precipitación es uno de los mecanismos más efectivos en el endurecimiento de aleaciones (Mariño; *et al.*, 2008b; 2008a; Rojas, 2011). La presencia de partículas finas y dispersas por precipitación puede actuar de distinta forma, mejorando sustancialmente la resistencia en función del tamaño de los precipitados. Las más pequeñas actúan como freno para el movimiento de las dislocaciones mientras que las de mayor tamaño anclarán las juntas de grano impidiendo su crecimiento. Con el fin de entender estos efectos, es necesario comprender los factores que controlan la disolución de los carburos y nitruros que pueden formar los distintos elementos de aleación presentes en el material, así como su cinética de precipitación.

Las partículas de precipitados deben ser pequeñas y estar finamente dispersas. Si tras la precipitación se mantiene el material a temperaturas relativamente altas puede ocurrir que dichas partículas crezcan, generalmente las más grandes a costa de las más pequeñas.

La baja tenacidad de una aleación, hace que sea frágil en ambientes donde predominen los regímenes intensos de altas temperaturas y elevadas tensiones de trabajo, y donde las cargas sean de signos variables generados por esfuerzos mecánicos y gradientes térmicos. Mariño; et al., (2008 b; 2008 a) realizan un trabajo encaminado a obtener un material que satisfaga esas condiciones, para ello

utilizaron los modelos de redes neuronales como herramientas para diseñar una nueva superaleación base hierro Fe-Cr-Ni-C-Al con las propiedades adecuadas.

Ellos Investigan la influencia del tratamiento térmico en la microestructura y la formación de fases utilizando la microscopía óptica y la microscopía electrónica de barrido, conjuntamente con la difracción de rayos X. Evalúan las propiedades mecánicas a temperatura ambiente y a altas temperaturas a través de los ensayos de tracción y termofluencia. Obtienen una aleación con una durabilidad de 100 000 h a 800 °C bajo tensiones de 180 MPa. Por lo tanto, el procedimiento de diseño empleado es validado y puede considerarse una propuesta novedosa para el diseño y desarrollo de nuevas aleaciones.

La obtención y aplicación de aleaciones especiales de base hierro data desde la segunda mitad del siglo XIX, cuando aún no se tenían conocimientos sobre la estructura de las mismas, ni qué relación guardaba esta con las propiedades. La adición de determinados elementos como componentes de la aleación para mejorar las propiedades del hierro, era un proceso incontrolado y carente de fundamentos científicos. Con el desarrollo y aplicación de las técnicas de análisis y microscopía para la caracterización de la microestructura de los metales, se impulsó la realización de las investigaciones relacionadas con la introducción de elementos de aleación para mejorar las propiedades del hierro.

Las superaleaciones base níquel son una clase especial de materiales tratados térmicamente cuyas propiedades derivan de la precipitación de partículas coherentes o semicoherentes. Las partículas precipitadas pueden crecer durante el tratamiento térmico inicial y es muy importante poder predecir la cinética de crecimiento de δ' y su posterior comportamiento a altas temperaturas Mclean (1984) y Ges et al., (1997).

Las investigaciones sobre el empleo de los aceros inoxidable a escala industrial se remontan al período comprendido entre los años 1910 y 1915 Lula (1986) y Davis (1997), fecha en que se publicaron las primeras monografías relacionadas con la estructura y propiedades de los mismos.

Estudios posteriores relacionados con la composición, estructura y propiedades, el tratamiento térmico y la influencia de los elementos de aleación en los aceros inoxidable condujeron al desarrollo de las aleaciones endurecibles por precipitación en la década de los 40 por la USSC (United States Steel Corporation). El encarecimiento y escasez del níquel durante la II Guerra Mundial provocó el desarrollo de los aceros austeníticos inoxidable altos en manganeso, en los que gran cantidad o la totalidad del níquel se sustituyó por este importante elemento (Blair, 1992).

Dentro del total de la producción mundial de aceros inoxidable, el 52 % pertenece a los aceros austeníticos inoxidable al cromo-níquel (De Meyer et al., 2001). La selección de estos materiales para aplicaciones que implican resistencia a la corrosión a altas temperaturas requiere de un conocimiento profundo sobre los mecanismos y la cinética de la formación de fases secundarias, capas superficiales, su composición química, estructura, mecanismos de difusión, etc. Todos estos factores y otros que están estrechamente relacionados con las propiedades mecánicas y estructurales a altas temperaturas permiten la adecuación del material para usos específicos.

Conclusiones del capítulo

Como resultado de análisis del estado del arte y la base teórica existente, se plantean las siguientes conclusiones:

- Varias investigaciones han estado encaminadas a incrementar las propiedades mecánicas en los hierros fundidos con la adición de diferentes elementos como agentes aleantes, entre los que se encuentran el cromo, manganeso, vanadio, wolframio, nitrógeno, niobio, cobre y boro,
- El hierro gris es el más empleado en la producción de piezas fundidas a pesar de que la presencia de grafito laminar, 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,



- La bibliografía consultada reporta importantes contribuciones al desarrollo de superaleaciones donde predominan elementos de aleación como el Al, Ti, Nb, Re, Ir y Ru en el caso de las superaleaciones base Ni y Co y elementos como el Nb, V, B y el Ta en el caso de las aleaciones base Fe, pero para dar respuesta ante cargas considerables a altas temperaturas a costa de la precipitación de partículas coherentes con la matriz metálica,
- En la bibliografía consultada hasta el momento, no se reportan trabajos relacionados con el estudio de la influencia del aluminio en las propiedades de la aleación Ni-Resist.

CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS

Los Ensayos de Materiales están presentes en el control de tensiones en máquinas y estructuras, en la detección de fallas, en el estudio de las estructuras cristalográficas de los metales y en la determinación de las causas que provocan la rotura de los materiales en servicio.

2.1 Metodología de experimentación

Se pueden establecer dos grandes clases de métodos de investigación: los métodos lógicos y los empíricos. Los primeros son todos aquellos que se basan en la utilización del pensamiento en sus funciones de deducción, análisis y síntesis, mientras que los métodos empíricos, se aproximan al conocimiento del objeto mediante su conocimiento directo y el uso de la experiencia, entre ellos se encuentran la observación y la experimentación.

Para el desarrollo de la investigación se emplearon los siguientes **métodos**:

1. Método de investigación documental o bibliográfica para la sistematización del conjunto de conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio,
2. Método de investigación experimental para obtener y caracterizar el objeto de estudio y sus principales regularidades,
3. Método inductivo - deductivo.

La experimentación juega un papel fundamental virtualmente en todos los campos de la investigación y el desarrollo. El objetivo es obtener información de calidad, que permita desarrollar nuevos productos y procesos, comprender mejor un sistema (un proceso industrial, un procedimiento analítico) y tomar decisiones sobre como optimizarlo y mejorar su calidad, comprobar hipótesis científicas.

Para llevar a cabo la experimentación se procedió de la manera siguiente:

1. Diseño estadístico de experimentos,

2. Elección de las variables de la investigación,
3. Criterios de selección de las variables,
4. Matriz experimental utilizada en el desarrollo de los experimentos,
5. Análisis de la composición química de las muestras obtenidas,
6. Aplicación de tratamientos térmicos para evaluar el comportamiento de la aleación con y sin tratamiento térmico,
7. Metodología para la realización de ensayos,
8. Selección y preparación de las muestras,
9. Evaluación de las propiedades mecánicas y químicas de las variantes de aleaciones, a través de ensayos de tracción, impacto y estabilidad química,
10. Procedimiento estadístico,
11. Argumentación de la variante seleccionada.

2.2 Diseño estadístico de experimentos

Diseñar un experimento significa planearlo de modo que reúna la información pertinente al problema bajo investigación. El diseño de un experimento es la secuencia completa de pasos tomados de antemano para asegurar que los datos apropiados se obtendrán de modo que permitan un análisis objetivo que conduzca a deducciones válidas con respecto al problema establecido (LEGRÁ, 2009).

La aleación patrón que se utiliza es Ni-Resist según la norma ASTM A-436-84 (1997), que tiene las siguientes características:

Fundición gris con grafito laminar que contiene un grado de Ni en proporción suficiente para que su estructura sea austenítica estable, que le confieren propiedades físicas y mecánicas especiales.

Micrográficamente, al lado de la austenita y del grafito laminar, se encuentra una red más o menos importante de carburos de cromo.

Presenta una notable resistencia a la corrosión en los medios más diversos, una buena resistencia a la oxidación y al crecimiento a temperatura elevada (700°C), al desgaste y a la erosión. Son tenaces amagnéticas, poseen una gran resistividad y un coeficiente de dilatación próximo al aluminio, bronce y acero inoxidable.

2.3 Composición química

La composición química de las aleaciones a estudiar en la investigación se muestra en la tabla 2.1, así como algunas de sus propiedades mecánicas.

Tabla 2.1 Composición química de la aleación Ni-Resist

Elementos	C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu	S	P	Fe
% en masa	2 –3	1– 2	0,5– 1,5	18– 32	0,2 – 2	>0,13	<0,12	<1	Bal.

Propiedades mecánicas

Densidad, (kg/m³).....7,42

Dureza Rochwell (HRB).....20 – 22

2.4 Elección de las variables de la investigación

A partir del análisis realizado, se determinaron las variables a estudiar en el diseño de la investigación.

Se escogieron como variables de entrada:

- Porcentaje de aluminio,
- Porcentaje de níquel.

Variabes de salida:

- Dureza,
- Resistencia a la tracción antes y después del tratamiento térmico,
- Resistencia al impacto antes y después del tratamiento térmico,
- Estabilidad química.

2.5 Criterios de selección de las variables

Las propiedades de muchas aleaciones y superaleaciones austeníticas con resistencia incrementada, derivan de la precipitación de partículas coherentes o semicoherentes, como demostraron Bhadeshia et al., (2002), Ges (2006), Mackay et al., (2007), Mariño et al., (2008 a y b) y Rojas (2011). Las partículas precipitadas pueden crecer durante el tratamiento térmico inicial y es muy importante poder predecir la cinética de crecimiento de la fase que precipita.

Una superaleación se fabrica fundiendo una aleación base níquel o hierro y agregando aluminio u otros elementos que favorezcan la ocurrencia de mecanismos de precipitación de partículas coherentes. Luego la mezcla líquida se enfría, aparece una masa de fase gamma níquel – aluminio, ya que el punto de solidificación de la fase gamma es superior al de la fase gamma prima. Cuando la aleación experimenta un posterior enfriamiento en su estado sólido, precipitan pequeños cubos de fase gamma prima dentro de la matriz de fase gamma. El tamaño final de las partículas de gamma prima se controla variando la velocidad de enfriamiento de la aleación.

La selección del porcentaje de aluminio está basada en referencias existentes Mackay; et al., (2007), Mariño; et al., (2008 a y b) y Rojas (2011), tomando en consideración que en una aleación austenítica los compuestos Ni_3Al y $NiAl$, se forman cuando el contenido de aluminio es menor que 3 % o cuando se encuentra en el rango entre 17 y 25 % de níquel. Para determinar el comportamiento del aluminio se tomaron aleatoriamente con carácter creciente diferentes porcentajes.

Los porcentajes de níquel se determinaron en función del contenido de este elemento en las aleaciones seleccionadas, que tienen un contenido entre 18 y 32 %.

El estudio de las propiedades químicas se realiza a través del análisis de estabilidad química y las propiedades mecánicas se evalúan a través de los análisis de dureza, tracción e impacto, basados en investigaciones realizadas que fueron consultadas para desarrollar el estado del arte.

Se parte, de esta manera, del resultado precedente obtenido por Rojas (2011), donde se argumenta la factibilidad de añadir aluminio como elemento de aleación al hierro fundido Ni-Resist para inducir partículas intermetálicas en la matriz que pudieran incrementar la resistencia mecánica de la misma. En esta investigación se caracterizan las propiedades metalúrgicas (microestructura) de la aleación y se argumenta, de forma sucinta, la influencia del aluminio en la dureza de la aleación; sin llegar a profundizar en otras propiedades como la resistencia a la tracción, la resiliencia y la estabilidad química en medios amoniacales.

2.6 Matriz experimental utilizada en el desarrollo de los experimentos

Para el desarrollo de los experimentos se utiliza el método tradicional de experimentación. Este método consiste en variar un factor cada vez: a partir de unas condiciones iniciales, se realizan experimentos en los cuales todos los factores se mantienen constantes excepto el que se está estudiando. De este modo, la variación de la respuesta se puede atribuir a la variación del factor y por tanto, revela el efecto de ese factor. El procedimiento se repite para los otros factores. El razonamiento que soporta esta forma de actuar, es que si se variaran dos o más factores entre dos experimentos consecutivos, no sería posible conocer si el cambio en la respuesta ha sido debido al cambio de un factor, al de otro, o al de todos a la vez.

En la tabla 2.2 se presenta la matriz experimental a utilizar en la investigación para la aleación propuesta, no existe una gran diferencia en la composición química, la diferencia fundamental radica en el contenido de níquel.

Tabla 2.2 matriz de experimentos

Parámetros	Símbolo	Niveles de Vibraciones		
		Mín.	Medio	Máx.
Porcentaje de Aluminio (%)	AL	0,50	1,45	2,34
Porcentaje de Níquel (%)	Ni	22,0	-	29,0
Perturbaciones	pH, Volumen, Presión, Concentración			

2.7 Análisis de la composición química

Los resultados del análisis químico se obtienen en un Espectrofotómetro cuántico de Admisión para base hierro, marca SPECTROLAB 230 Fig. 2.1 con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón. El análisis consiste en una chispa que ataca la muestra, lee el espectro y en función de la longitud de onda se determinan los componentes. El chispeo 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 porcentaje de cada elemento que conforma la aleación. Estos análisis fueron realizados en el Laboratorio de análisis químico, perteneciente a la Empresa mecánica del Níquel.



Figura 2.1 SPECTROLAB 230

2.8 Aplicación de tratamientos térmicos

La introducción de los elementos aleantes en combinación con tratamientos térmicos adecuados ha sido la base para el gran desarrollo experimentado por las superaleaciones. La fase γ' puede precipitar en la matriz de austenita, por medio de un tratamiento térmico adecuado y lograr el endurecimiento por precipitación.

Para lograr el objetivo propuesto se aplicó el tratamiento térmico planteado en la metodología de trabajo, cuyo régimen se muestra en la figura 3.1; que consistió en un recocido de homogenización con un posterior envejecimiento natural de la siguiente manera:

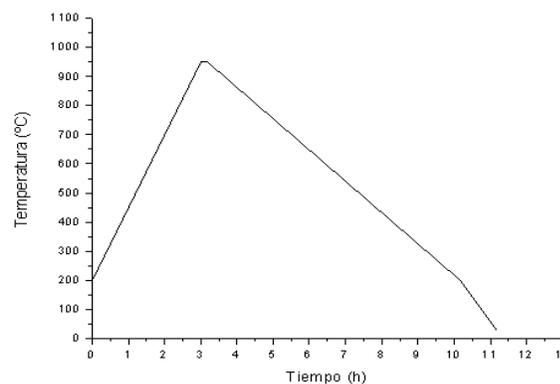


Figura 3.1 Régimen de recocido y envejecimiento para las muestras analizadas

Para determinar la influencia del aluminio en las propiedades de la aleación objeto de estudio, las muestras son sometidas a un tratamiento térmico de recocido de homogenización (solubilizado) y luego un envejecimiento natural.

Las muestras se introdujeron a una temperatura de 200°C, se calentaron a una velocidad de 300-320°C/h hasta la temperatura de recocido 950°C, con un tiempo de permanencia a esta temperatura de 10 min (según cálculo: 1 hora para cada 25 mm de sección mínima); se dejaron enfriar en el horno hasta una temperatura de 200°C con un posterior enfriamiento a temperatura ambiente, logrando así un envejecimiento natural (Instrucción tecnológica para tratamiento térmico de las piezas fundidas de hierro gris, resistentes a la fricción, resistentes al calor y aleaciones resistentes al desgaste, Empresa Mecánica del Níquel).

Para ello se utiliza un horno del Laboratorio del tipo ЧОЛ-16251/11-М1У de fabricación soviético figura. 2.2, que tiene las siguientes características:

Alimentación de corriente.....220 v
Frecuencia.....60 Hz
Temperatura máxima.....1100°C



Figura 2.2 Horno eléctrico de laboratorio

2.9 Metodología para la realización de ensayos

Se hace necesaria la aplicación de técnicas de ensayo, para el estudio del efecto causado por la adición de aluminio como elemento de aleación en el incremento de

las propiedades mecánicas y la modificación de las propiedades de la aleación objeto de estudio, para ello se utiliza la siguiente metodología:

1. Selección y preparación de las muestras,
2. Corte y maquinado,
3. Marcado,
4. Ensayo de dureza,
5. Ensayos de tracción,
6. Ensayos de resistencia al impacto.

2.9.1. Selección y preparación de las muestras

Las probetas obtenidas con diferentes composiciones químicas y las diferentes adiciones de aluminio se muestran en la figura 2.3, son preparadas para la realización de los diferentes ensayos con el objetivo de analizar cómo influye la adición de aluminio en las propiedades químicas y mecánicas.



Figura 2.3 Probetas

2.9.2. Corte y maquinado

A partir de las probetas fundidas, se cortan y se maquilan las muestras para la realización de los ensayos. Durante la realización de las operaciones se aplica un refrigerante para evitar que el calentamiento originado modifique la microestructura, estas se elaboran en un torno de filetear 16K20 de fabricación rusa, perteneciente al taller de maquinado de la Empresa Mecánica del Níquel.

Metodología de cálculo para el maquinado de las probetas en el torno Universal de Cilindrar y Roscar: Modelo 16K20

Los regímenes de corte dependen de las propiedades del material, del tipo de cuchilla y el tipo de elaboración, el hierro fundido aleado Ni-Resist, es un material de buena maquinabilidad y permite un buen acabado superficial, no obstante en estos materiales puede aparecer el fenómeno de acritud por lo que fueron refrigeradas.

A continuación se exponen las secuencias de pasos para realizar la tecnología de maquinado para la fabricación de las probetas para el ensayo de tracción, la cual fue realizada según Manual de tecnología para corte de metales en frío (1981) que corresponde al método analítico. La selección de los tiempos del proceso tecnológico se hizo según (M. Quesada, Y. Ivatsevich y J. Gutiérrez, 1988).

Frecuencia de rotación del husillo

$$n = \frac{1000 \cdot V_{C \text{ recom.}}}{\pi \cdot D}; \text{ (rev/min)} \quad (2.1)$$

donde:

$V_{C \text{ recom}}$ → Velocidad de corte recomendada; m/min.

D → Diámetro; mm.

Después de calculada la frecuencia de rotación del husillo se debe corregir por el pasaporte de la máquina.

Velocidad de corte real

$$V_{C \text{ real}} = \frac{\pi \cdot D \cdot n_c}{1000}; \quad (\text{m/min}) \quad (2.2)$$

)

donde:

n_c → Frecuencia de rotación del husillo corregida; rev/min.

Determinación del tiempo principal de maquinado

A la hora de determinar los tiempos de maquinados debemos de tener en cuenta el tipo de operación que se realiza, de acuerdo con el tipo de la probeta.

$$T_m = \frac{L + l_1 + l_2}{n_c \cdot S} \cdot i; (\text{min}) \quad (2.3)$$

donde:

L → Longitud de la superficie a maquinar; mm.

l_1 → Espacio que media entre el punto en que hace contacto el filo con la pieza en bruto y el momento en que se comienza a maquinar la pieza a plena profundidad; mm.

l_2 → Espacio corregido por la herramienta en la salida del corte; mm.

i → Números de pasadas.

S → Avance; mm/rev.

Determinación de la longitud de maquinado

$$L = \frac{D - d}{2}; (\text{mm}) \quad (2.4)$$

donde:

d → Diámetro menor de la pieza; mm.

Determinación de la potencia de corte

$$N_c = \frac{N_{tabu} \cdot V_c \cdot k_1 \cdot k_2}{100}; (\text{kW}). \quad (2.5)$$

Donde:

N_{tabu} → Potencia de la tabla; kw.

V_c → Velocidad de corte; m/min.

K_1 y K_2 → Coeficientes de corrección.

Metodología de cálculo para el fresado

Para el cálculo del fresado se escogerá una máquina fresadora vertical modelo 6M 13L. Según la metodología se obtuvo la probeta para la realización del ensayo de resistencia al impacto.

Determinación del número de revoluciones

Se calculará según la ecuación:

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D}; \text{ (rev/min)} \quad (2.6)$$

Donde:

$V \rightarrow$ Velocidad de corte; m/min.

$D \rightarrow$ Diámetro de la probeta; mm.

Después de calculado el número de revoluciones se debe corregir por el pasaporte de la máquina.

Determinación la velocidad de corte real

Esta se determina por la siguiente ecuación:

$$V_{C \text{ real}} = \frac{\pi \cdot D \cdot n_c}{1000}; \text{ (m/min)} \quad (2.7)$$

Donde:

$n_c \rightarrow$ Frecuencia de rotación del husillo corregida; rev/min.

Determinación de la potencia de corte

Se calcula según la ecuación:

$$N_c = E \cdot \frac{V \cdot t \cdot Z}{1000} \cdot K_1 \cdot K_2; \text{ (kW)}. \quad (2.8)$$

Donde:

$E \rightarrow$ Potencia; Kw.

$t \rightarrow$ Profundidad de corte; mm.

$Z \rightarrow$ Número de dientes.

K_1 y $K_2 \rightarrow$ Coeficiente de corrección.

Determinación del tiempo de maquinado

Según la siguiente ecuación se obtiene que:

$$T_m = \frac{L + l_1 + l_2}{n_c \cdot S} \cdot i; \text{ (seg)} \quad (2.9)$$

Donde:

$L \rightarrow$ Longitud de la superficie a maquinar; mm.

l_1 → Espacio que media entre el punto en que hace contacto el filo con la pieza en bruto y el momento en que se comienza a maquinar la pieza a plena profundidad; mm.

l_2 → Espacio corregido por la herramienta en la salida del corte; mm.

i → Números de pasadas.

S → Avance; mm/rev.

2.9.3. Marcado

Las muestras se marcan para su posterior identificación durante la investigación, se dividen en dos grupos, el primer grupo responde a las muestras que se analizan sin la aplicación del tratamiento térmico y el segundo grupo las que se analizan después de aplicado el tratamiento térmico, el marcado será de la siguiente manera:

Muestra patrón A

Aleación Ni-Resist

Modificación 1	Aleación con un contenido de 0,50 % Al
Modificación 2	Aleación con un contenido de 0,75 % Al
Modificación 3	Aleación con un contenido de 1,45 % Al
Modificación 4	Aleación con un contenido de 2,00 % Al
Modificación 5	Aleación con un contenido de 2,24 % Al
Modificación 6	Aleación con un contenido de 2,34 % Al

Muestras

Marcado antes de T.T.

Después de T.T

Muestra patrón	M-1	-
Modificación 1	M-2	T-2
Modificación 2	M-3	T-3
Modificación 3	M-4	T-4
Modificación 4	M-5	T-5
Modificación 5	M-6	T-6
Modificación 6	M-7	T-7

2.10 Evaluación de las propiedades mecánicas

2.10.1. Ensayos de dureza

Se entiende por dureza de un material, la resistencia que este opone a ser penetrado. Existen muchos procedimientos para determinar la dureza. El más extendido es el método de Rockwel. Por medio de este método se obtienen características mecánicas importantes en forma rápida y no destructiva y se pueden realizar en piezas ya elaboradas. Los ensayos de dureza se realizan en un durómetro modelo 2018 TP de fabricación soviética, según los procedimientos de la norma NC 04-10:67 en el Laboratorio de Ciencia de los Materiales del Instituto Superior Minero Metalúrgico, que presenta las siguientes características:

Alimentación de corriente.....220 v

Frecuencia.....60 Hz

2.10.2. Fundamento del ensayo de resistencia a la tracción

Los ensayos de tracción se aplican para determinar algunas propiedades mecánicas, conocer las cargas que pueden soportar los materiales y medir su comportamiento en distintas situaciones. Para la realización del ensayo de tracción se utilizan máquinas especiales de diversa construcción y potencia, conocidas como máquinas de ensayo universal.

Este ensayo se puede realizar fácilmente y permite determinar varias características mecánicas importantes de los materiales, las que pasan a ser criterios de su calidad, al mismo tiempo permiten juzgar con suficiente exactitud el comportamiento del material cuando está sometido a otros tipos de solicitaciones.

Las probetas para ensayos de tracción como se muestra en la figura 2.3, pueden ser industriales o calibradas, estas últimas, se emplean en experiencias más rigurosas y adoptan formas perfectamente cilíndricas o prismáticas con extremos ensanchados, no solo para facilitar su sujeción en la máquina de ensayo, sino para asegurar la rotura dentro del largo calibrado de menor sección. En estos se enmarcan los

denominados "Puntos fijos de referencia" a una distancia inicial preestablecida que permitirá después de la fractura, juntando los trozos, determinar la longitud final (L_f).

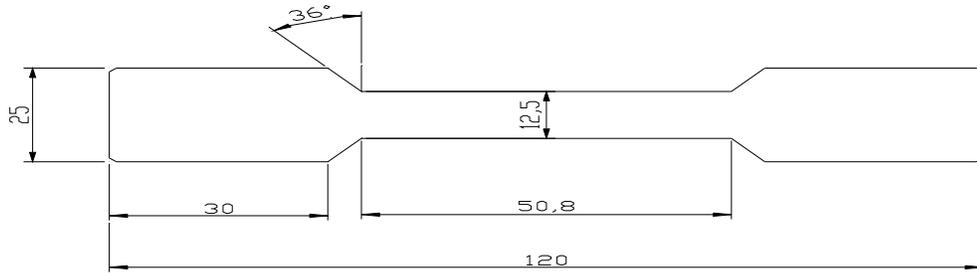


Figura 2.3 Probeta para ensayo de tracción.

Un cuerpo se encuentra sometido a tracción simple cuando sobre sus secciones transversales se le aplica cargas normales uniformemente repetidas de modo de tender a producir su alargamiento.

Por las condiciones de ensayo, el de tracción estática es el que mejor determina las propiedades mecánicas de los materiales, o sea aquella que define sus características de resistencia y de deformabilidad. El ensayo de tracción permite obtener, bajo un estado simple de tensión, el límite de elasticidad o el que lo reemplaza prácticamente, la carga máxima y la consiguiente resistencia estática, en base a cuyos valores se fijan los de las tensiones admisibles y mediante el empleo de medios empíricos se puede conocer el comportamiento del material sometidos a otro tipos de sollicitaciones (fatiga y dureza).

Modo y tiempo de aplicación de las cargas

La carga debe aplicarse de tal manera que el esfuerzo resulte uniformemente distribuido sobre la sección transversal del material.

Tratándose de ensayo estáticos el incremento de la carga se efectúa en forma muy lenta, para evitar los esfuerzos de las fuerzas de inercia, velocidad que se fija según las normas y materiales, adoptándose generalmente una variación de $0,1 \text{ kgf/mm}^2$ por segundo aproximadamente hasta alcanzar el límite de fluencia, a partir del cual puede llegarse como máximo a 50 kgf/mm^2 por minuto.

Resulta de gran importancia la velocidad de la aplicación de la carga de ensayo, pues su incremento produce un retraso en la aparición de las deformaciones plásticas y un aumento de la resistencia del material. Si las cargas se aplican en forma extremadamente lentas, se obtiene una disminución del límite de fluencia y un aumento de la resistencia, aunque a expensas de la ductilidad, disminuye considerablemente.

Propiedades Mecánicas de Resistencia

Del gráfico de ensayo pueden determinarse los valores de las cargas a los límites proporcionales, de fluencia y la que corresponde a la máxima, que permiten calcular las tensiones convencionales que fijan las propiedades de resistencia.

Para evaluar la resistencia a la tracción nos basaremos en la metodología según Fernández (1987) haciendo uso de las siguientes expresiones:

$$[\sigma_{ET}] = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A_0}; (MPa) \quad (2.10)$$

$$A_0 = \frac{\pi \cdot D^2}{4}; (mm^2) \quad (2.11)$$

donde:

$P_{m\acute{a}x}$ → Carga máxima; N.

A_0 → Área inicial de la probeta; mm^2 .

D → Diámetro de la probeta; mm.

Los ensayos se realizaron en una máquina universal P-50 según la figura 2.4 de procedencia soviética perteneciente al laboratorio de Calidad de la Empresa Mecánica del Níquel, según la norma DIN 50145/ 5106 ASTM E8 M/ E9.

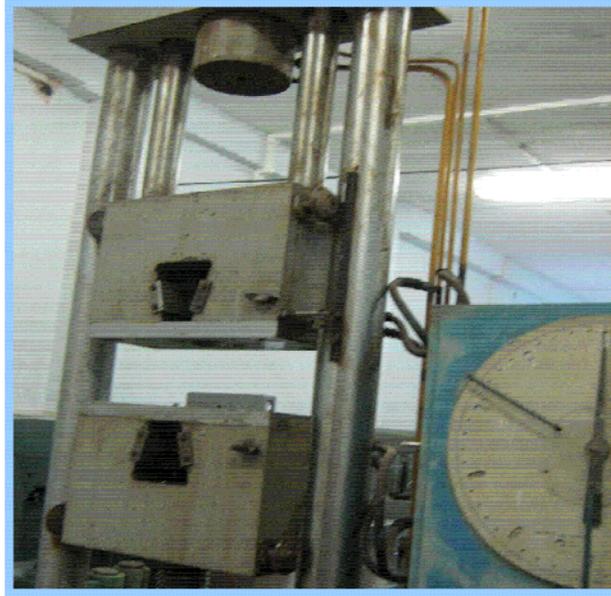


Figura 2.4 Máquina d tracción universal P-50

2.10.3. Fundamento del ensayo de resistencia al impacto

El objetivo principal de la prueba de impacto es observar el comportamiento de un material al ser impactado por un objeto específico. La prueba de impacto, es probablemente uno de los ensayos más difíciles de interpretar en términos científicos, esto se debe a que hay que entender conceptos como energía y tenacidad para interpretar los resultados.

Se define como tenacidad la cantidad de energía que puede adsorber un material antes de fracturarse. Por otro lado la energía es la capacidad para realizar un trabajo debido a una fuerza que recorre una cierta distancia.

En elementos sometidos a efectos exteriores instantáneos o variaciones bruscas de las cargas, las que pueden aparecer circunstancialmente, su falla se produce generalmente, al no aceptar deformaciones plásticas o por fragilidad, aun en aquellos metales considerados como dúctiles. En estos casos es conveniente analizar el comportamiento del material en experiencia de choque o impacto.

Los ensayos de choques determinan, la fragilidad o capacidad de un material de absorber cargas instantáneas, por el trabajo necesario que al introducir la fractura de la probeta de un solo choque, el que se refiere a la unidad de área, para obtener lo

que se denomina resiliencia. Este nuevo concepto, tampoco ofrece una propiedad definida del material, sino que constituye un índice comparativo de su plasticidad con respecto a las obtenidas en otros ensayos en idénticas condiciones, por lo que se deben tener muy en cuenta los distintos factores que inciden sobre ella, o sea que el objetivo del ensayo de choque es el de comprobar si una máquina o estructura fallará por fragilidad bajo las condiciones que impone su empleo, muy especialmente cuando las piezas concentran tensiones por cambio brusco de sección, maquinados incorrectos, fileteados, etcétera.

Método de ensayo

Los ensayos dinámicos de choque se realizan generalmente en máquinas denominadas péndulos o martillos pendulares, en lo que se verifica el comportamiento de los materiales al ser golpeados por una masa conocida a la que se deja caer desde una altura determinada, realizándose la experiencia en la mayoría de los casos, de dos maneras distintas el método Izod y el método Charpy. En ambos casos la rotura se produce por flexión de la probeta, por lo que se le denomina flexión por choque.

Flexión por choque sobre barras simplemente apoyadas (Método Charpy)

Con la finalidad de que el material esté actuando en las más severas condiciones, el método Charpy utiliza probetas entalladas (estado triaxial de tensiones) y velocidades de deformación de 4,5 a 7 m/s.

Es aconsejable realizar el ensayo de choque por el método Charpy, con el empleo de probetas entalladas aprobadas por las Normas Internacional Standard organización, I. S. A que tienen las dimensiones indicadas.

La resiliencia al choque resulta, según este método el trabajo gastado por la unidad de sección transversal para romper al material de un solo golpe y así determinar la resistencia al impacto.

Los ensayos de resistencia al impacto se realizaron en una máquina con péndulo charpy, de fabricación china del Laboratorio de Resistencia de los Materiales de la Universidad de Holguín, que tiene las siguientes características.



Alimentación de corriente.....220 v

Frecuencia.....60 Hz

2.10.4. Ensayos de estabilidad química

La estabilidad química de una aleación depende de su capacidad de oponerse al deterioro en medios agresivos. La corrosión es un fenómeno espontáneo que se presenta prácticamente en todos los materiales procesados por el hombre. Se puede describir como una oxidación acelerada y continua que desgasta, deteriora e incluso puede afectar la integridad física de los objetos o estructuras (Domínguez, 1987).

Para evaluar la estabilidad química de la aleación modificada con aluminio se realizaron ensayos de corrosión por inmersión de las muestras en un recipiente con soluciones amoniacales a una temperatura de 90° C siguiendo lo establecido en los procedimientos de las normas ASTM G4-01 (2008) y ASTM G31-72 (2004). Una vez transcurridos los tiempos de ensayos, las muestras se pesaron en una balanza analítica marca SARORIUS BP 221.

Para realizar los ensayos de estabilidad química se prepararon tres testigos para cada muestra con un diámetro de 20 mm y espesor de 10 mm.

Las muestras son cortadas en un torno de filetear 16K20 de fabricación rusa, perteneciente al taller de maquinado de la Empresa Mecánica del Níquel. Para el pulido de la superficie de las probetas se utiliza una pulidora metalográfica modelo Rathenow-43 con el uso de papeles abrasivos de diferentes granulometrías. Los testigos no deben colocarse en el mismo lugar, debido a no presentar las mismas concentraciones en todas las superficies del recipiente. Los testigos fueron expuestos al medio de prueba durante siete días en soluciones amoniacales para un tiempo de 168 horas. Para este ensayo se tuvo en cuenta el peso inicial y final de las probetas, la superficie del material y el tiempo de exposición del testigo en el medio agresivo.

Los ensayos de estabilidad química se realizaron a escala piloto, en una instalación prevista para evaluar el comportamiento de la corrosión en el material de prueba en la Planta de Recuperación de amoniaco de la Empresa Cmte. Ernesto Che Guevara,

efectuándose 3 pruebas en cada testigo, luego se tomó el testigo de mayor diferencia de peso y se calculó la velocidad de corrosión. En la figura 2.5 se observa la balanza analítica utilizada para el pesaje de los testigos.



Figura 2.5 Balanza analítica

Para determinar la velocidad de corrosión se tuvo en cuenta las pérdidas de peso del testigo, la superficie del material y el tiempo de exposición del material en soluciones amoniacales, dado por la siguiente ecuación, según Tomashov (1979).

$$K = \frac{PI - PF}{S \cdot t}; \text{ (mm/año)} \quad (2.12)$$

donde:

K → Velocidad de corrosión; mm/año.

PI → Peso inicial; g.

PF → Peso final; g.

S → Área total del testigo; m².

t → Tiempo de posición del testigo en el medio agresivo; h.

Para llevar la velocidad de corrosión (g/m².horas) a penetración (mm/año), se emplea la ecuación siguiente (Manual de corrosión, 2008).

$$V_c = \frac{K \cdot 8,76}{\rho} \quad (2.13)$$

donde:

8,76 → Factor de conversión.

V_c → Velocidad de corrosión; mm/año.

ρ → Densidad del material; g/cm³.

Se tomó la densidad del material para los hierros fundido de 7,87 g/cm³. Según Fontana (1990).

2.10.5. Procedimiento estadístico

Los datos obtenidos de los ensayos de dureza, resistencia a la tracción y resistencia al impacto se procesaron utilizando el software Statgraphics Plus Versión 5.1 Español y Microsoft Excel 2010 para obtener una función de correlación entre estas variables. Por consiguiente, se hizo necesario evaluar estadísticamente los datos experimentales a través del proceso de regresión múltiple, obtenidos para confirmar el grado de confiabilidad. Esta evaluación estadística se realizó por medio de la desviación estándar y del coeficiente de correlación, y se calculan por las ecuaciones (2.13) y (2.14) respectivamente.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum y_i^2 - \left(\frac{\sum y_i}{n}\right)^2}{n-1}} \quad (2.14)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (2.15)$$

Donde:

σ → Desviación estándar.

y_i → Valor de la observación.

\bar{y} → Media aritmética.

n → Número de observaciones.

Conclusiones del capítulo

Del presente capítulo se puede concluir lo siguiente:

1. Los métodos de investigación empleados permiten sistematizar los conocimientos relacionados con la temática abordada, así como la planificación adecuada de la investigación,



2. Se describieron los métodos, procedimientos y condiciones experimentales que fundamentan la predicción de que el aluminio como inductor de partículas mejora las propiedades químicas y mecánicas del hierro fundido aleado Ni-Resist por la adición de aluminio como elemento de aleación,
3. Con la aplicación de las técnicas de ensayos propuestas, es posible evaluar el comportamiento metalúrgico y mecánico de la aleación a escala de laboratorio.

CAPITULO 3: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El análisis de los resultados experimentales permitirá obtener conclusiones sobre el sistema en estudio y decidir actuaciones futuras. Tanto por la importancia de las decisiones que se pueden tomar, como por el costo elevado de la experimentación.

Para lograr el incremento de las propiedades mecánicas y la modificación de las propiedades químicas de la aleación Ni- Resist se han tomado en cuenta los criterios que hasta el momento se han publicado (Mariño; et. al, 2008 a y b; Mariño, 2008 y Rojas, 2011) con respecto a la fabricación de aleaciones austeníticas de producción nacional , a través del fortalecimiento de materiales a través de la precipitación de partículas con la adición de diferentes elementos como agentes aleantes, entre los que se encuentran el cromo, aluminio, manganeso, vanadio, wolframio, nitrógeno, niobio, cobre y boro.

3.1. Análisis de la composición química de las variantes de aleaciones estudiadas

Los reportes de composición química se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Composición química de la aleación Ni-Resist patrón

Elementos	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe
% en masa	2,47	2,25	0,57	0,03	0,05	0,35	22,0	0,13	Balance

Como se observa, la composición de las muestras se corresponde con la composición química de la aleación patrón Ni-Resist según establece la norma. En este caso, los contenidos de Mn, P, S, Cr y Cu se consideran impurezas, debido a que sus contenidos están dentro del rango establecido por la norma para ser considerados como tal, pero están en los rangos permisibles.

El resultado del análisis químico de la primera variante de aleación tipo 2 modificada con 0,5 % Al, se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Composición química de la muestra M-2

Elementos	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe	Al
% en masa	2,74	2,33	0,62	0,04	0,05	0,33	22,00	0,14	Bal	0,50

Obtenida la segunda variante de aleación tipo 3 modificada con 0,75 % Al y realizado el análisis químico, se obtienen los resultados que se observan en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Composición química de la muestra M-3

Elementos	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe	Al
% en masa	2,78	2,35	0,60	0,04	0,05	0,31	23,43	0,14	Bal	0,75

Realizado el análisis químico de la variante de aleación tipo 4 modificada con 1,45 % Al, se obtuvo el resultado que aparece en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Composición química de la muestra M-4

Elementos	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe	Al
% en masa	2,87	2,34	0,60	0,04	0,07	0,31	22,00	0,15	68,20	1,45

Al igual que en el procedimiento anterior, se obtienen en la cazuela las variantes de la aleación modificadas con 2; 2,24 % de aluminio, el resultado del análisis químico de estas variantes de aleaciones se muestra en las tablas 3.5, 3.6 respectivamente.

Tabla 3.5 Composición química de la muestra M-5

Elementos	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe	Al
% en masa	2,54	1,94	0,50	0,04	0,06	0,26	29,26	0,15	62,65	2,00

Tabla 3.6 Composición química de la muestra M-6

Elementos	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe	Al
% en masa	2,47	1,93	0,51	0,04	0,06	0,26	29,0	0,15	62,01	2,24

3.2. Resultado obtenido por los cálculos de la metodología para el maquinado

A continuación se exponen los valores de los regímenes de corte de las diferentes maquinas empleadas para las operaciones de maquinado de las probetas. Que se muestran en la figura 3.7.

Tabla 3.7 Resultados de los parámetros de la máquina para el torneado

Nº	Datos											Valores calculados					
	V _C	S	T	N _{tab}	I	I ₁	I ₂	K ₁	K ₂	D	D	n _c	V _{C real}	N _C	n _e	T _m	L
005	Tiempo de instalación de la probeta en el torno, t _a =1 min																
010	105	0.4	2	6.6	1	4	2	0.8	1	27	25	1238	105	5.9	1250	0.06	27
015	105	0.4	1	6.6	1	4	2	0.8	1	124	122	269	122	6.88	315	1.03	50
020	105	0.4	1	6.6	1	4	2	0.8	1	25	12	1337	98	5.50	1250	0.13	60
025	105	0.4	1	6.6	1	4	2	0.8	1	25	24	1337	98	5.50	1250	0.02	1
030	Invertir probeta: desmontar t _{a1} =4min; instalar t _{a2} =6min y un tiempo total de la operación de t _T =10min																
035	105	0.4	1	6.6	1	4	2	0.8	1	122	120	1238	105	5.9	1250	0.06	2
040	Desmontar la probeta del torno, t _a =2 min																

3.3. Resultados obtenidos en el maquinado de las probetas en la fresadora vertical modelo 6 M 13 L

Para la elaboración de las probetas fue necesaria la confección de la ruta tecnológica por la cual transita en su elaboración de acabado. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 3.8.

Tabla 3.8 Resultados de los parámetros de la máquina para el fresado

N°	Datos												Valores calculados					
	Rut	V _h	S	t	E	i	l ₁	l ₂	K ₁	K ₂	S _Z	Z	n _c	V _{C real}	N _C	n _e	T _m	L
05	Tiempo de instalación de la probeta en la fresadora, t _a =9 min																	
010	34	0.02	1	1.4	1	2	6	1.2	1	0.02	5	196	43.19	0.36	250	12.6	55	
015	34	0.02	1	1.4	1	2	6	1.2	1	0.02	5	196	43.19	0.36	250	12.6	55	
020	34	0.02	1	1.4	1	2	6	1.2	1	0.02	5	196	43.19	0.36	250	12.6	55	
025	34	0.02	1	1.4	1	2	6	1.2	1	0.02	5	196	43.19	0.36	250	12.6	55	
030	34	0.02	1	1.4	1	2	6	1.2	1	0.02	5	1082	31.4	0.26	1000	0.9	10	
035	Desmontar la probeta de la fresadora, t _a =6min																	

El maquinado en todos los casos se puede realizar satisfactoriamente de acuerdo con la condición que se representa a continuación. $N_h \geq N_c$. Donde en todos los casos la potencia del husillo va a ser mayor que la potencia de corte.

El análisis de unidades de medidas de todas las variables utilizadas en los cálculos anteriores se representan a continuación en la tabla 3.9.

Tabla 3.9 Análisis de unidades

Magnitudes	u/m
Diámetro mayor (D) y menor (d)	mm
Velocidad recomendada (V _{Cr}) y real (V _{C real})	m/min
Potencia de corte (N _C), del husillo (N _h) y por tabla (N _{tab})	KW
Tiempo de maquinado (T _m) y auxiliar (t _a)	min
Avance (S)	mm/rev
Longitudes (L, l ₁ y l ₂)	mm
Frecuencia de rotación del husillo corregida n _c	rev/min
Profundidad de corte t _c	mm

Los coeficientes de corrección K_1 y K_2 son adimensionales

3.4. Evaluación de las propiedades mecánicas de las variantes de aleaciones

3.4.1. Ensayos de dureza

Con el objetivo de comprobar la influencia que ejerce el aluminio como elemento aleante en la dureza de la aleación que se estudia, se realizaron los ensayos de dureza a las muestras obtenidas antes y después de la aplicación del tratamiento térmico.

El promedio de los valores de dureza obtenidos en tres puntos diferentes de cada una de las muestras, se muestran en la tabla 3.10.

Tabla 3.10 Ensayos de dureza antes y después del tratamiento térmico

Muestras	HRB	Muestras	HRB
M-1	20	-	-
M-2	25	T-2	28
M-3	32	T-3	41
M-4	41	T-4	49
M-5	46	T-5	55
M-6	52	T-6	60

En estos resultados se observa que existe un incremento en la dureza de las aleaciones estudiadas, con relación a la muestra patrón, aún antes de realizar el tratamiento térmico y después del tratamiento térmico, siendo la de mejores resultados la M-3 que tiene un contenido de aluminio de 0,75 % y 22 % de níquel y la M-6, de composición de 2,24 % de aluminio y 29 % de níquel. Los resultados se corroboran en la figura 3.2

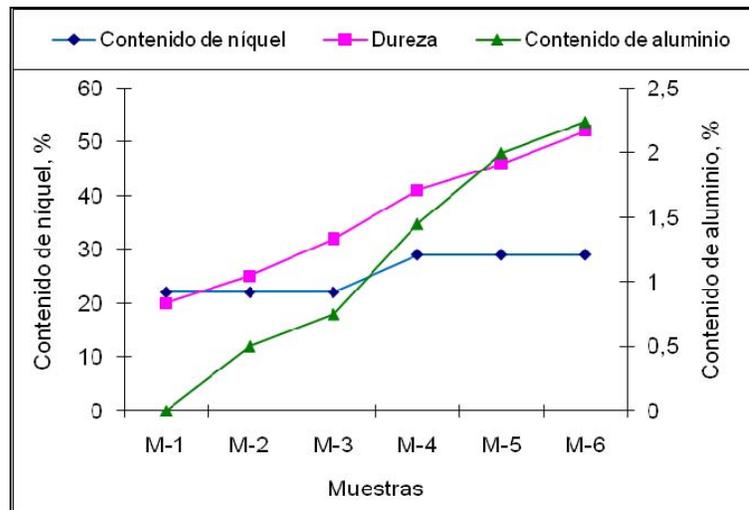


Figura 3.2 dureza de las variantes de aleaciones antes de aplicar tratamiento térmico. Después de aplicar tratamiento térmico, la modificación que obtuvo mejores resultados fue la variante T-3, que corresponde con la aleación M-3 y la variante T-6 que se corresponde con la aleación M-6.

La variante de mejores resultados de acuerdo a la dureza es la aleación tipo 6, (T-6) con contenido de aluminio de 2,24 % y 29 % de níquel, esto se puede observar en la figura 3.3.

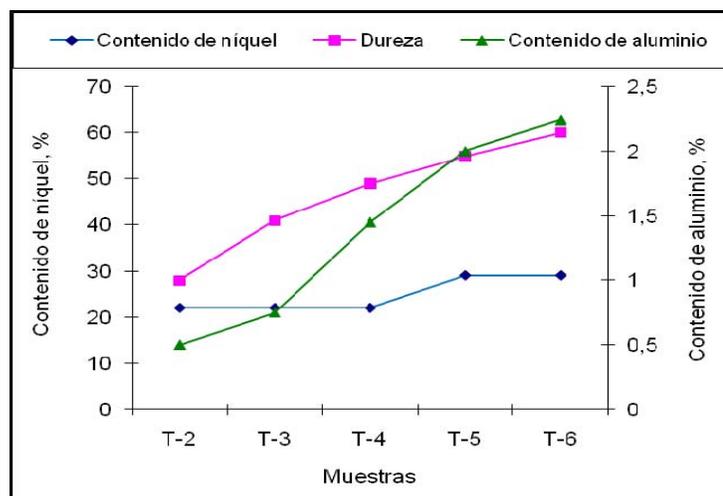


Figura 3.3 Dureza de las variantes de aleaciones después de aplicar tratamiento térmico

Lo antes expresado nos confirma que el aluminio como elemento aleante en aleaciones austeníticas funciona como agente promotor de la precipitación y por ende provoca un efecto endurecedor, mejorando así, sus propiedades de resistencia.

Como se observa, a medida que se incrementa el contenido de aluminio, se incrementan los valores de dureza hasta alcanzar un máximo de 59 HRB lo que concuerda con los resultados de Mariño; et al., (2008).

3.4.2. Resistencia a la tracción

Este ensayo es uno de los que sus resultados están más relacionados con las condiciones de rotura, según la ecuación 2.10. De acuerdo con los valores derivados en los cálculos de la resistencia podemos apreciar los resultados en la tabla 3.11.

Tabla 3.11 Ensayos de resistencia a la tracción antes y después del tratamiento térmico

Muestras	σ_R (MPa)	Muestras	σ_R (MPa)
M-1	87,98		
M-2	95,98	T-2	119,97
M-3	106,97	T-3	127,97
M-4	111,97	T-4	131,50
M-5	117,57	T-5	137,22
M-6	119,97	T-6	143,96

Con la adición de aluminio como elemento de aleación en las muestras obtenidas, antes de aplicar el tratamiento térmico, existe un incremento de la resistencia a la tracción de las variantes modificadas con relación a la muestra patrón. Además se observa que el incremento fue en orden ascendente a medida que se incrementa el aluminio, los resultados se muestran en la figura 3.4.

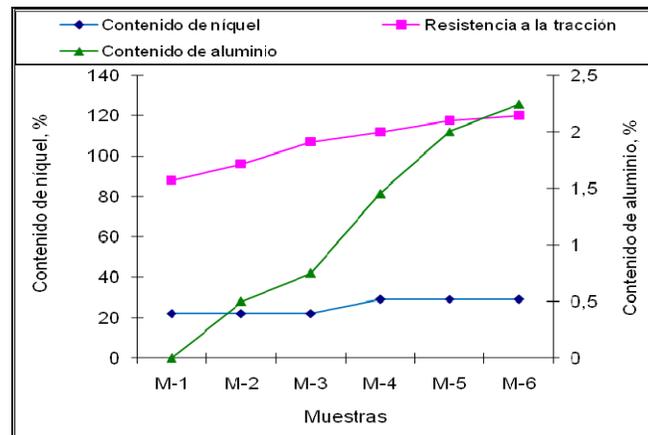


Figura 3.4 Resistencia a la tracción de las variantes de aleaciones antes de aplicar tratamiento térmico

Después de aplicado el tratamiento térmico, se observa un incremento significativo en la resistencia del material al ser traccionado en todas las variantes de aleaciones, tanto con relación a la muestra patrón como con relación a la misma muestra antes de ser tratada térmicamente, esto se puede corroborar en la figura 3.5.

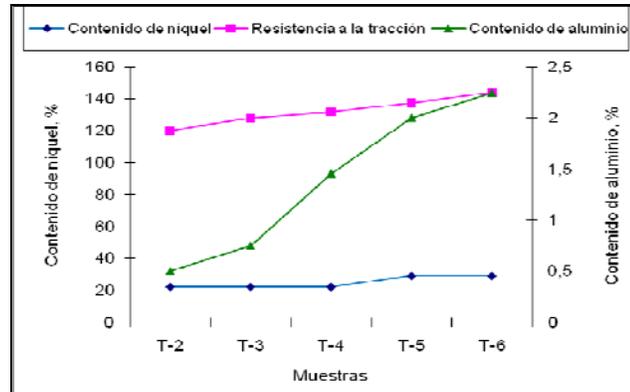


Figura 3.5 Resistencia a la tracción de las variantes de aleaciones después de aplicar tratamiento térmico

La muestra de mejores resultados de las variantes de aleaciones modificadas con aluminio antes de ser tratadas térmicamente es la muestra M-3, que tiene un contenido de 22 % de níquel y 0,75 % de aluminio y la muestra M-6, con un contenido de 29,0 % de níquel y 2,24 % de aluminio.

Después de tratarlas térmicamente las de mejores resultados fueron las Muestras T-3 y T-6, correspondientes a las variantes de aleaciones M-3 y M-6 antes de ser aplicado el tratamiento térmico (fig.3.5)

De manera general, estos ensayos demuestran que al adicionar aluminio como elemento de aleación es posible incrementar la resistencia a la tracción de la aleación Ni-Resist por precipitación de partículas.

Como se observa, a medida que se incrementa el contenido de aluminio, se incrementan los valores de tracción hasta alcanzar un máximo de 144 MPa lo que concuerda con los resultados de Mariño; et al., (2008).

3.4.3. Resistencia al impacto

Los ensayos de impacto se emplean para medir la habilidad de una muestra o artículo acabado para resistir al choque. El valor obtenido por el ensayo se corresponde con la energía absorbida por el equipo de ensayo durante el proceso de rotura de la probeta bajo un único conjunto de valores para las variables que influyen en el comportamiento.

Los resultados de resiliencia fueron obtenidos de manera digital a través del software que presenta la máquina para ensayo de resistencia al impacto, los mismos se muestran en la tabla 3.12.

Tabla 3.12 Ensayos de resistencia al impacto antes y después del tratamiento térmico

Muestras	ak (Nm/cm ²)	Muestras	ak (Nm/cm ²)
M-1	176,58	-	-
M-2	158,92	T-2	162,45
M-3	118,31	T-3	114,48
M-4	85,44	T-4	69,45
M-5	69,45	T-5	43,16
M-6	49,93	T-6	20,6

La adición de aluminio como elemento inductor de partículas intermetálicas antes de aplicar el tratamiento térmico, provoca un incremento en los valores de dureza y una disminución de los valores de resiliencia. Los mismos se cumplen para la muestra tratada térmicamente, donde se observan menores valores de resistencia al impacto en comparación con la muestra patrón, como con relación a la misma muestra antes de ser tratada térmicamente, como se observa en la figura 3.6.

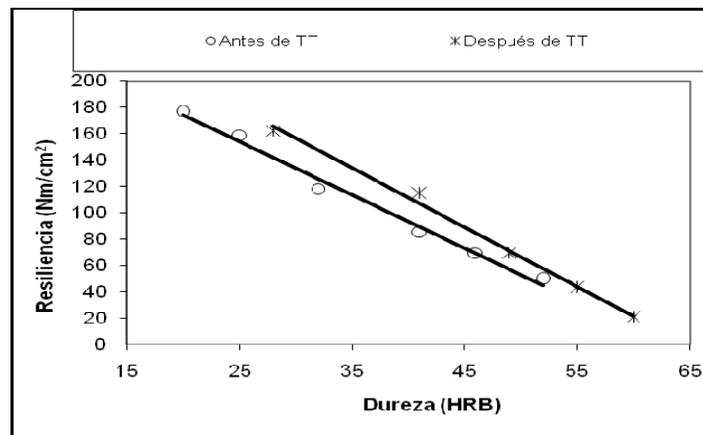


Figura 3.6 Resistencia al impacto antes y después de aplicar el tratamiento térmico. Según Mariño; et. al (2008b) y Rojas (2011), el aluminio como elemento aleante en aleaciones austeníticas funciona como agente promotor de precipitación de partículas intermetálicas. Mariño; et. al (2008b) demostraron el efecto endurecedor de partículas intermetálicas del tipo NiAl_3 en la aleación HK40; mientras que Rojas (2011) demuestra el incremento de la dureza por el mismo efecto en la aleación Ni-Resist + 2,2 % de Al. Estos resultados se corresponden plenamente con los de la presente investigación en el sentido de que al añadir contenidos de aluminio a la aleación Ni-Resist, además de verificarse el incremento de la dureza, también se incrementan los valores de la resistencia a la tracción con la consiguiente respuesta en los valores de resiliencia expuestos en la tabla 3.12.

3.4.4. Ensayo de estabilidad química

Los resultados de las pruebas de estabilidad química se obtuvieron a partir de las expresiones 2.12 y 2.13 respectivamente y se muestran en las figuras 3.7 y 3.8.

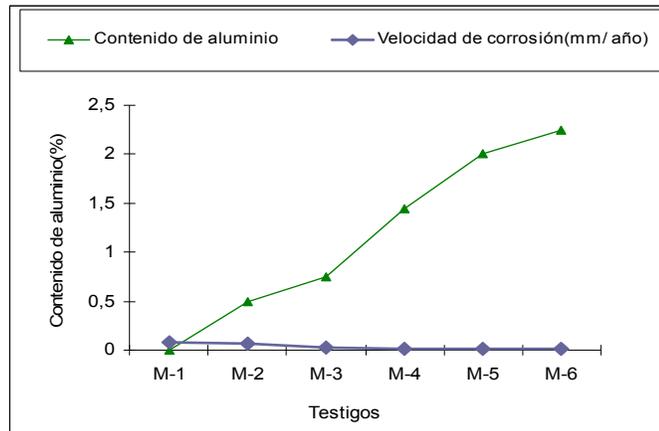


Figura 3.7 Ensayo de estabilidad química antes de aplicar el tratamiento térmico

Después de evaluada la estabilidad química para las variantes de aleaciones de acuerdo a la NC 12-00-10, se puede decir que, estos materiales son muy resistentes a la corrosión en soluciones amoniacaes ya que las pérdidas de material por procesos de electrólisis es mínima para el período analizado. En este caso, se alcanzan valores de corrosión de 0,0092 mm/año, los que se consideran pequeños.

Con la adición de aluminio como elemento de aleación en las muestras obtenidas, antes de aplicar el tratamiento térmico, se observa que existe una buena estabilidad química de las variantes de aleaciones modificadas con aluminio, con relación a la muestra patrón.

Después de aplicado el tratamiento térmico existe una estabilidad en la estructura del material, incrementándose la resistencia del material ante la presencia de medios agresivos de todas las variantes de aleaciones tanto con relación a la muestra patrón, con relación a la mismas muestras, antes de ser tratada térmicamente, como se muestra en la figura 3.8.

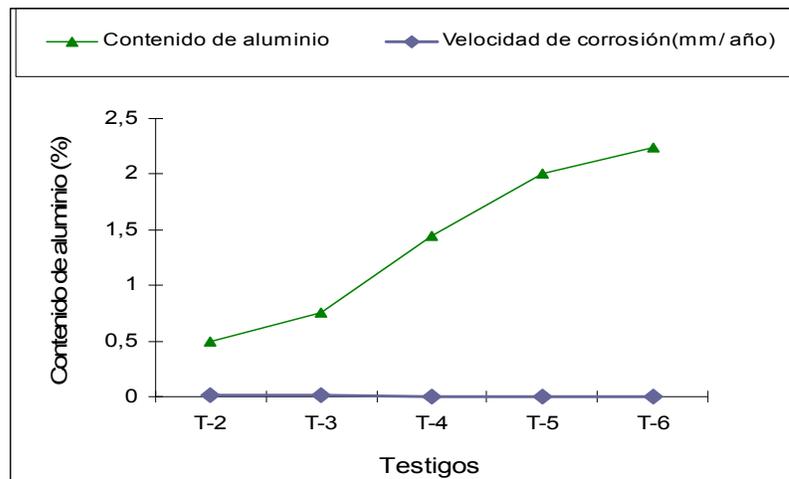


Figura 3.8 Ensayo de estabilidad química después de aplicar el tratamiento térmico

De los resultados del ensayo de corrosión se desprende que, al añadir aluminio como elemento de aleación no se altera la estabilidad química de la misma. En este caso, aunque la actividad del electrolito se incrementa con la temperatura, la aleación permanece resistente ante los efectos de los medios agresivos.

Se puede plantear que las partículas precipitadas en la aleación caracterizadas por Rojas (2011), no son focos de procesos anódicos o catódicos que aceleren la destrucción del metal por corrosión. Por tanto, a tenor de los resultados de Mariño et. al (2008a) y Rojas (2011), se atribuye estas propiedades a los efectos del aluminio - en cantidades que no excedan el 2,5 %- como elemento favorecedor de precipitados intermetálicos que ejercen una influencia positiva en las propiedades mecánicas de la aleación Ni-Resist.

3.5. Análisis estadístico

Los resultados del análisis estadístico se obtuvieron por medio del software Statgraphics Plus Versión 5.1 Español y Microsoft Excel 2010. Este análisis estadístico tiene como finalidad evaluar mediante curvas de modelo de ajuste la confiabilidad que existe de la dureza con relación a la resistencia a la tracción y resistencia al impacto

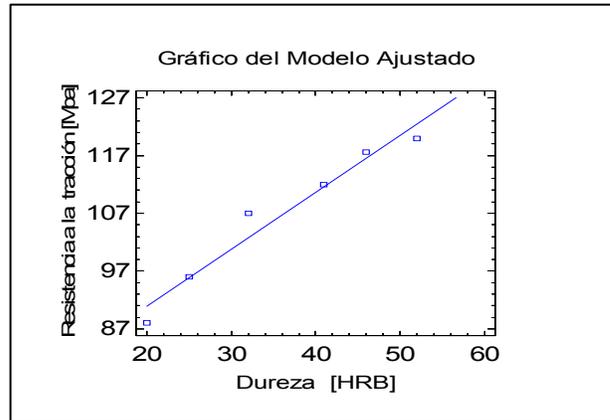
Tabla 3.13 Análisis estadístico del ensayo de resistencia a la tracción antes del tratamiento térmico y después del tratamiento térmico

Probetas	Valores antes del T.T	Valores después del T.T
R ² (%)	95,70	96,15
R-cuadrado (ajustado para g.l.)	94,63	94,89
Error estándar de est.	2,91	2,06
Error absoluto medio	1,84	1,35
Estadístico de Durbin-Watson	1,59	1,45
P-valor	0,05	0,05
Δm media	60,14	54,06
Desviación estándar	38,81	46,25

Dado el valor pequeño de la desviación estándar para las probetas según la tabla 3.13, los resultados del ensayo de resistencia a la tracción antes del tratamiento térmico y después del tratamiento térmico muestran poca variación de su valor medio. El error estándar indica que la desviación típica de los residuos es de 2,91.

Dado que el p – valor en la tabla 3.13, es superior a 0,05 existiendo una relación estadísticamente significativa entre las variables estudiadas para un nivel de confianza del 99 %, lo que no hay indicio de autocorrelación serial de los residuos.

En las figuras 3.7 y 3.8 se observan los gráficos del modelo ajustado mediante un análisis estadístico del ensayo de resistencia a la tracción de las probetas estudiadas antes del tratamiento térmico y después del tratamiento térmico.



Figuras 3.7 Análisis estadístico del ensayo de resistencia a la tracción antes del tratamiento térmico

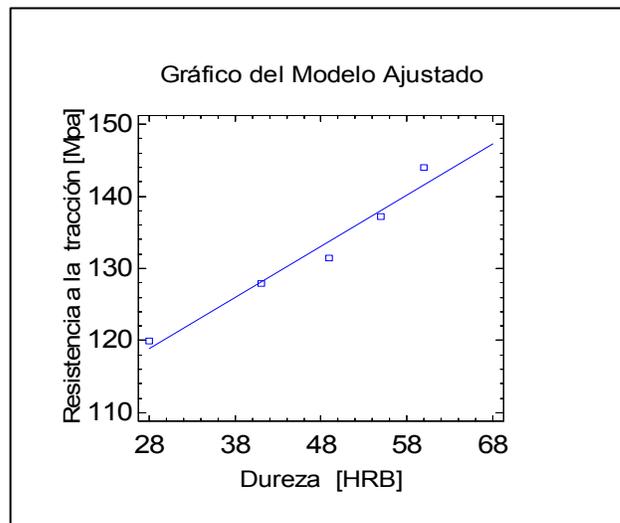


Figura 3.8 Análisis estadístico del ensayo de resistencia a la tracción después del tratamiento térmico

El análisis estadístico de los ensayos de resistencia al impacto estudiados antes del tratamiento térmico y después del tratamiento térmico, muestran los resultados de un modelo de regresión lineal múltiple, que describe el comportamiento de la resistencia al impacto con relación a la dureza.

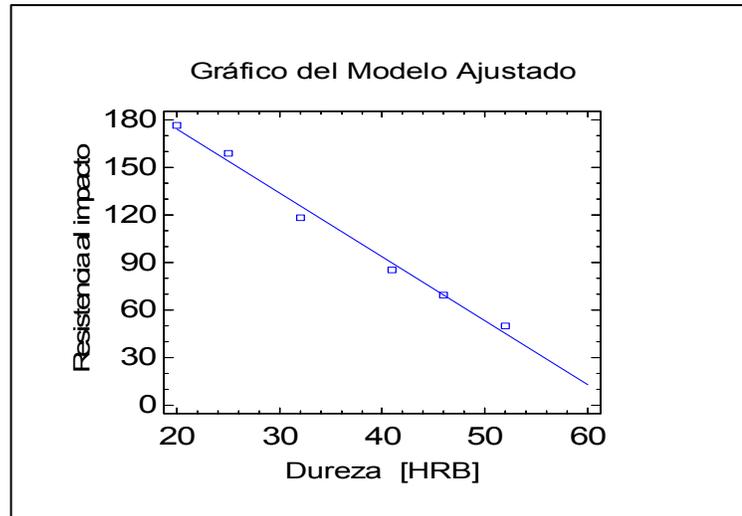
Los resultados del análisis estadístico del ensayo de resistencia al impacto se muestran en la tabla 3.14.

Tabla 3.14 Análisis estadístico del ensayo de resistencia al impacto antes del tratamiento térmico y después del tratamiento térmico

Probetas	Valores antes del T.T	Valores después del T.T
R ² (%)	99,03	99,47
R-cuadrado (ajustado para g.l.)	98,77	99,29
Error estándar de est.	5,59	4,79
Error absoluto medio	3,92	2,87
Estadístico de Durbin-Watson	1,68	2,87
P-valor	0,01	0,01
Δm media	58,31	54,06
Desviación estándar	58,09	43,12

Dado el valor pequeño de la desviación estándar para probetas según la tabla 3.14, los resultados del ensayo de resistencia al impacto de las probetas analizadas antes del tratamiento térmico y después del tratamiento térmico muestran poca variación de su valor medio.

El estadístico R² indica que el modelo representa un 99,47 de la variabilidad de la resistencia al impacto. Se obtiene que P - valor es inferior a 0,01, siendo estadísticamente significativo para un nivel de confianza del 99 %. Los resultados del análisis estadístico del ensayo de resistencia al impacto se corroboran en las figuras 3.9 y 3.10.



Figuras 3.9 Análisis estadístico del ensayo de resistencia al impacto antes del tratamiento térmico

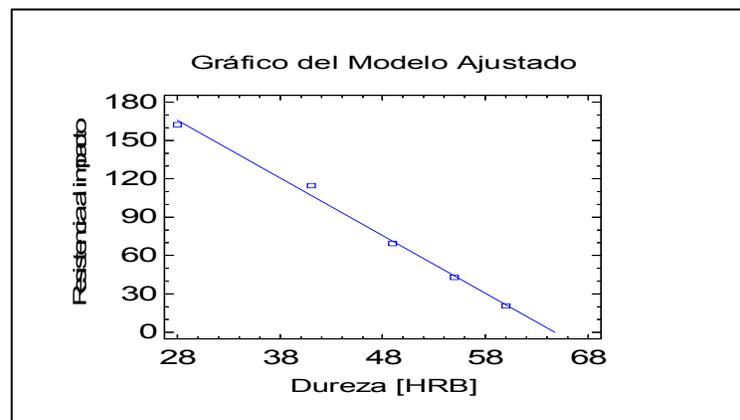


Figura 3.10 Análisis estadístico del ensayo de resistencia al impacto después del tratamiento térmico

3.6. Argumentación de la variante seleccionada

El aluminio, a pesar de su importante función desoxidante y en el control del tamaño del grano al reducir el crecimiento del mismo al formar óxidos y nitruros, es reportado en la literatura por Sourmail (2002) y Plati (2003) como un metal que, en presencia de elementos como el hierro y el níquel, también contribuye a la formación y/o precipitación de partículas.

Es por ello que resulta muy común encontrarlo como componente de superaleaciones en su papel de inductor de compuestos intermetálicos, por lo que se

puede decir que: evaluadas las variantes de aleaciones objeto de estudio y según los criterios recogidos en la bibliografía consultada, se determina que la adición de aluminio como elemento aleante en la aleación Ni-Resist incrementa la dureza y la resistencia a la tracción atribuidas a la precipitación de partículas.

De acuerdo al análisis mecánico y de corrosión realizado a las variantes de aleaciones propuestas, se determina que la aleación de mejores resultados es la aleación Ni-Resist modificada, que corresponde a la muestra T-6, con la adición de 2,24 % de aluminio y 29 % de níquel.

De esta manera, se cumple el objetivo trazado y se verifica la hipótesis formulada en el trabajo, ya que se incrementó la dureza y la resistencia a la tracción con una aceptable resistencia a la corrosión de la aleación Ni-Resist en medios amoniacales calientes por la adición de aluminio como elemento de aleación.

3.7. Valoración económica

Los gastos incurridos por la investigación se pueden dividir en gastos de materiales, salarios de los trabajadores y en gastos de energía. Conociendo el precio de los materiales utilizados durante la investigación, la duración de las operaciones de máquinas, la tarifa horaria de los operadores de las máquinas, la potencia consumida en los equipos utilizados y la tarifa eléctrica, se puede realizar una valoración económica de la investigación.

Costos de producción

Para los costos de producción en cualquier empresa productora de piezas se tienen en cuenta fundamentalmente la mano de obra y los materiales de producción. Los principales costos se muestran en la figura 3.11

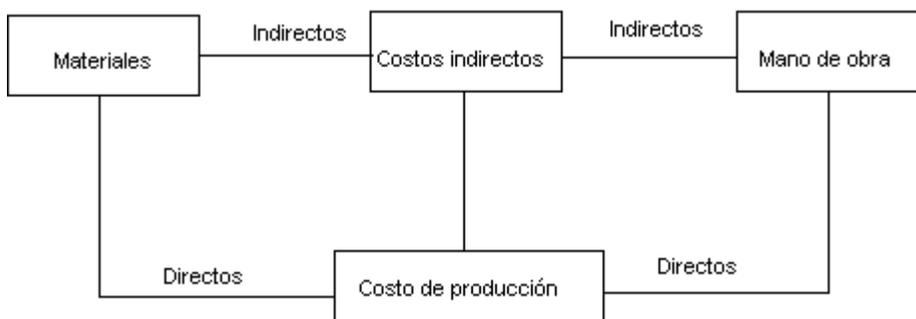


Figura 3.11 Costos de producción para la elaboración de las probetas

Costo de producción por fundición

Obtenidas las probetas, es necesario determinar el costo de producción. El mismo viene dado por el gasto de materiales fundamentales y auxiliares, energía eléctrica y salario de la fuerza de trabajo, durante el proceso de fundición. El análisis económico de este trabajo se realiza sobre la base del metal líquido utilizado en el llenado del molde.

Tabla 3.13. Costo directo e indirecto para la producción de las probetas

Costos directos			
Materiales fundamentales	Peso(kg)	Costo (Unitario)	Total(cuc)
Retorno FG	41,01	-	-
Palanquilla	7,52	12,86	96,72
Ni-Sinter	15,57	0,40	6,35
Ferrocromo	3,33	0,48	1,61
Si- metálico	0,39	2,46	0,96
Mn- metálico	1,47	7,89	11,60
Carbón antracita	0,68	1	0,68
Total			117,92
Materiales auxiliares	Kg	Costo (Unitario)	Total(CUC)
Arena Sílice	70	0,049	3,47
Catalizador	5,60	1,03	5,76
Resina	14	2,93	41,02
Alcohol	1.5	0,80	1,2
Grafito Plateado	0.75	0,18	0.14
Pezrubia	1.20	0,88	1.06
Granalla	3	2,37	7,11
Total			59,75
Salario Básico			5,61

Salario Complementario (9,09 %)			0,51
Seguridad social (14 %)			0,86
Utilización de la Fuerza de trabajo			1,74
Total de salario			8,72
	kW	Costo (Unitario)	Total
Energía	60,000	0,1125	6.75
Total de los costos directos			75,22
Costo indirecto			
Carga fabril (2,67 %) (Salario básico)			0,15
Total del costo			75,37

Tabla. 3.14. Costo de fabricación de las probetas

Tipo de material	Costo del material (\$)	Peso del semiproducto (kg)	Precio (\$)
Ni-Resist	1,25	2.16	2.7
Operario	Tarifa por horas(\$)	Tiempo efectivo(h)	Costos (\$)
Tornero A	1,78	2,28	2,05
Fresador A	1.78	1.7	2.01
Salario básico (suma de todos los costos) Sb			5.09
Salario complementario $Sc=(Sb*0,1)$			0.50
Aporte a la Seguridad Social $(Sc+Sb)*0,09$			0.50
Gasto de Energía			
Máquina	Tiempo de trabajo(h)	Potencia de la máquina(kW)	Energía consumida(kW/h)
Torno	0.018	10	0.18
Fresadora	0.09	10	0.9
Horno	3	5	15
	Costo de Energía	$Ec*0.06$	
Torno			0.010
Fresadora			0.054
Horno			0.9
Costo total de energía			0.96
Costo total del maquinado			9.75

El costo total de producción de las probetas por el proceso de fundición, incluyendo el maquinado es: **85,12 CUC**.

Como referencia para el análisis de las ventajas de producir en la EMNi aleaciones Ni-Resist con resistencia incrementada, a continuación se muestra una tabla 3.15 de los costos de aleaciones con y sin aluminio:

Tabla 3.15 Costo de la aleación sin adición de aluminio y con aluminio

Aleación	Costo de 1 kg (CUC)	
	Sin Al	Con Al
NI-Resist	23,78	23,87

Como se observa, existe una diferencia de 0,09 CUC por kilogramo de aleación de Ni-Resist con la adición de aluminio comparada con la Ni-Resist sin aluminio. Si se considera, además, que el aluminio normalmente está disponible en los talleres de fundición como material de retorno, entonces se puede hablar de factibilidad económica, tecnológica y funcional de añadir aluminio como elemento de aleación al Ni-Resist que se produce en la Empresa Mecánica del Níquel para la fabricación de componentes de bombas de licor amoniacal en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, esto implicaría un incremento en las propiedades químicas y mecánicas de la aleación objeto de estudio, lo que trae consigo una disminución en el desgaste de las piezas que la conforman, así como una prolongación en su vida útil, logrando disminuir los gastos por concepto de reparación, mantenimiento y sustitución.

3.8. Impacto medio ambiental

Se entiende por impacto ambiental el efecto que produce una determinada acción humana sobre el medio ambiente en sus distintos aspectos. El concepto puede extenderse, con poca utilidad a los efectos de un fenómeno natural catastrófico. Técnicamente es la alteración de la línea de base antrópica o a eventos naturales.

La protección del medio ambiente se ha convertido en los últimos años, en una de las cuestiones que más inquietan a la humanidad. Los grandiosos medios técnicos que dispone el hombre para explotar las riquezas naturales, el acelerado desarrollo de la economía y el crecimiento de la población, han dado lugar a consecuencias indeseables para la humanidad, tales como: el agotamiento de los recursos

naturales, la contaminación ambiental, los ruidos, las pérdidas de los valores estéticos del medio circundante y la merma acelerada del fondo genético, entre otros.

El proceso de fundición es altamente generador de residuos sólidos y gaseosos, donde se generan gases nocivos que van a parar en la atmósfera, afectando así el medio circundante y la vida de la flora y la fauna de las zonas aledañas. Además las arenas de moldeo que se derraman, poseen varios componentes como, aglutinantes, melaza que de cierta manera inciden en los suelos.

Las partículas de arena de moldeo por debajo de $0.018 \mu\text{m}$ están en suspensión en el taller, introduciéndose en los pulmones de los trabajadores provocando enfermedades como la silicosis.

En el proceso de maquinado se produce gran cantidad de desechos sólidos, estos desechos en forma de virutas al ser depositadas en un lugar específico, alteran el equilibrio de ese pequeño ecosistema.

Para que el ambiente de trabajo del taller de fundición de la Empresa Mecánica del Níquel” Gustavo Machín Hoed sea el adecuado, se debe mantener una buena higiene y reducir la generación de contaminantes al ambiente por lo que es necesario tener en cuenta una serie de medidas lo cual preservará el entorno laboral y la atmósfera. Para esto se debe reducir la generación de sustancia de desechos y el ruido producido por las maquinas que se están operando, los cuales pueden provocar efectos nocivos sobre la salud del trabajador.

Conclusiones del capítulo

Del presente capítulo se puede concluir lo siguiente:

- ✓ El método propuesto posibilita predecir el incremento de las propiedades mecánicas y químicas del hierro fundido aleado Ni-Resist, por la adición de aluminio como inductor de compuestos intermetálicos por precipitación de partículas manteniendo invariable la estabilidad química en medios amoniacaes,
- ✓ Con la aplicación de las técnicas de ensayos propuestas, fue posible evaluar el incremento de las propiedades mecánicas y las modificaciones de las



propiedades químicas de la aleación objeto de estudio por precipitación de partículas con la adición de aluminio.

CONCLUSIONES

Realizado el análisis de los resultados obtenidos, se arriba a la siguiente conclusión.

Se incrementan las propiedades químicas y mecánicas de la aleación Ni- Resist con la adición de aluminio como elemento aleante, atribuidas a los efectos del aluminio como inductor de compuestos intermetálicos que funcionan como barreras al movimiento de dislocaciones en presencia de deformaciones:

- La variante de aleación de mejores resultados es la T-6 con 29 % Ni; 2,24 % Al; dureza de 60 HRB; resistencia a la tracción de 143,96 MPa; resistencia al impacto de 20,60 J/cm² y velocidad de corrosión de 0,0092 mm/año,
- La aplicación de tratamiento térmico, combinado con el efecto endurecedor del aluminio, provoca un incremento en las propiedades químicas y mecánicas de la aleación Ni-Resist,
- Resulta factible producir esta aleación en la Empresa Mecánica del Níquel, lo que reportaría grandes beneficios a la Empresa Ernesto Che Guevara por concepto de reparación, mantenimiento y sustitución de componentes de las bombas.



RECOMENDACIONES

Se recomienda lo siguiente:

1. Profundizar los ensayos de corrosión para investigar la cinética química de la variante de aleación modificada con aluminio en soluciones amoniacaes calientes.
2. Realizar ensayos de desgaste húmedo en presencia de soluciones amoniacaes para investigar el comportamiento de la aleación.



BIBLIORAFÍA

- ASTMA 352. (1998). *Standard Specification for Steel Castings, Ferritic and Martensitic, for Pressure-Containing Parts, Suitable for Low-Temperature Service.*
- ASTM. A 247-67 (1998). *Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Casting.*
- ASTM. A 436 - 84 (1997). *Standard Specification for Austenitic Gray iron Castings.*
- DE VELDE, C. V. (2000). *Carbide formation in cast iron, Part I A new Approach to the solidification of cast iron.*
- GARCÍA, C. R. et al. (2005). *Tecnología para la elaboración de crisoles de hierro gris resistentes a las altas temperaturas para la fusión de aleaciones de aluminio.*
- GES, A. M. F. O.; PALACIO, H. A. (2006). *Crecimiento de Partículas gamma prima en una Superaleación CMSX. pp. 1 – 7.*
- GUIRSHOVICH, N. G. (1966). *Clasificación y Propiedades del Hierro en Lingotes. Construcción de Maquinarias. p.*
- HONEYCOMBE, R. W. (1981). *Key to Steels. Microstructure and properties Spottiswoode Ballantyne Ltd.*
- JANOWAK, J. F. & R. B. GUNDLACH. (1987). *Fundiciones Grises Aleadas. Fundición.*
- KRAUSE, D. E. (1969). *Gray Iron- A Unique Engineering Material, Philadelphia. ASTM, Special Technical Publications.*
- LEGRÁ LOBAINA, A; Silva Diéguez, O.R. (2009). *La investigación científica: Conceptos y reflexiones. Moa: ISMM. 427h.*
- MARIÑO, C. M. et al. (2008a). *Design of a creep resistant iron-bas superalloy for Herreshoff furnaces Part II– Experimental results Minería y Geología 24 (4).*



- MARIÑO, C. M. et al. (2008b). *Design of a creep resistant iron-base superalloy for Herreshoff furnaces. Part I– Mechanical properties modelling and phase diagram simulation. Minería y Geología* 24 (3).
- PETTY, E. R. (1968). *Physical Metallurgy of Engineering Materials. George Allen and Unwin Ltd. Londres. 109p.*
- PLATI, A. (2003). *Modelling of γ' Precipitation in Superalloys. [Universidad de Cambridge].*
- Producción de hierro fundido [En línea]. [Consultado 20010520]. Disponible en: <HTTP://WWW.TURKDOKUM.COM/TURKISHFOUNDRYINDUSTRY.HTM>.
- QUESADA, M.; Ivatsevich, Y. ; Gutiérrez, J. (1981). *Manual de tecnología para corte de metales en frío.*
- ROJAS FERNÁNDEZ, M. V. (2011). *Resistencia al desgaste de la aleación Ni-Resist. con adición de aluminio como elemento de aleación. Tesis de Maestría. Alberto Velázquez Del Rosario; Félix Ariel Morales Rodríguez (Tutores). Instituto Superior Minero Metalúrgico. 78h.*
- TOMASHOV, N.D. *Theory of corrosion and protection of metals.* La Habana: Instituto Cubano Del Libro, [s.a]. 512 p.