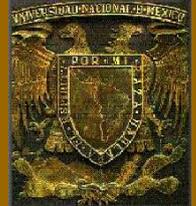


UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA



LABORATORIO DE TECNOLOGÍA DE MATERIALES

LECTURAS PARA INGENIERÍA No. 23

“SUPERALEACIONES”



ING. JAVIER CÁRDENAS FERNÁNDEZ

M.I. FELIPE DÍAZ DEL CASTILLO RODRÍGUEZ

Cuautitlán Izcalli, Edo. de México

2015

ÍNDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1	
ASPECTOS GENERALES DE LAS ALEACIONES Y SUPERALEACIONES Y SU APLICACIÓN EN MÉXICO	
1.1. LA CIENCIA DE MATERIALES.....	4
1.2. GENERALIDADES DE LOS MATERIALES.....	5
1.3. CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES.....	6
1.4. LAS ALEACIONES.....	7
1.4.1. Aleaciones ferrosas.....	7
1.4.2. Aleaciones no ferrosas.....	14
1.5. MATERIALES AVANZADOS: LAS SUPERALEACIONES.....	22
1.5.1. Características o propiedades generales de las superaleaciones.....	25
1.5.2. Aplicaciones de las superaleaciones.....	25
1.5.3. Preparación y/o procesado de las superaleaciones.....	27
1.5.4. Revestimiento de las superaleaciones.....	29
1.5.5. Disponibilidad de las superaleaciones.....	31
1.5.6. Costo de superaleaciones.....	31
1.5.7. Investigación y desarrollo de nuevas superaleaciones.....	31
1.5.8. Generalidades de las principales superaleaciones.....	32
CAPÍTULO 2	
ALEACIONES BASE NÍQUEL	
2.1. EL NÍQUEL.....	36
2.2. ALEACIONES DE NÍQUEL.....	37
2.3. SUPERALEACIONES BASE NÍQUEL.....	39
2.3.1. Estructura cristalina.....	43
2.3.2. Características o propiedades de las superaleaciones base níquel.....	51
2.3.3. Métodos de procesado de superaleaciones base níquel.....	53
2.3.4. Procesos de endurecimiento empleados en superaleaciones base níquel.....	64
2.3.5. Resistencia versus temperatura en superaleaciones base níquel.....	65
2.3.6. Difracción de electrones de una superaleación base níquel.....	66
2.4. SUPERALEACIONES BASE NÍQUEL IMPORTANTES Y MAS EMPLEADAS.....	66
2.4.1. Monel® (Ni, Cu).....	67
2.4.2. Inconel® (Ni, Cr, Fe).....	73
2.4.3. Incoloy® (Ni, Fe, Cr).....	79
2.4.4. Hastelloy® (Ni, Mo, Fe, Cr).....	84
2.5. FABRICANTE DE SUPERALEACIONES BASE NÍQUEL EN MÉXICO.....	95
2.5.1. Mega Mex “Metales especiales bajo demanda”.....	95
2.5.2. MetalNet.....	96

CAPÍTULO 3 ALEACIONES BASE COBALTO

3.1. EL COBALTO	98
3.2. ALEACIONES DE COBALTO	99
3.3. SUPERALEACIONES BASE COBALTO	101
3.3.1. Microestructura	102
3.3.2. Características o propiedades de las superaleaciones base cobalto	104
3.3.3. Métodos de elaboración de superaleaciones base cobalto	105
3.4. SUPERALEACIONES DE COBALTO MÁS USUALES	108
3.4.1. Estelite® o Stellite® (Co, Cr, Ni, Fe, C).	109
3.4.2. Talonite® (Co, Cr, Ni, Fe, C).	116
3.4.3. Aleación Co-Cr-Ta-Zr.	117
3.4.4. Aleaciones Co-Cr-Mo.	118
3.4.5. Aleaciones Co-Ni-Cr-Mo.	121
3.4.6. Elgiloy®	123
3.4.7. Havar®	124
3.5. DISTRIBUIDOR DE SUPERALEACIONES BASE COBALTO EN MÉXICO	124
3.5.1. Kennametal Stellite	124
3.5.2. Böhler Welding Group	125

CAPÍTULO 4 ALEACIONES BASE TITANIO

4.1. EL TITANIO	127
4.2. ALEACIONES DE TITANIO	129
4.2.1. Titanio de alta pureza	130
4.2.2. Aleaciones de titanio α	131
4.2.3. Aleaciones de titanio $\alpha+\beta$	131
4.2.4. Aleaciones cuasi- α	132
4.2.5. Aleaciones cuasi- β	132
4.2.6. Aleaciones de titanio β	132
4.3. SUPERALEACIONES BASE TITANIO	133
4.3.1. Microestructura	134
4.3.2. Efectos de los elementos de aleación en la microestructura	138
4.3.3. Características o propiedades de las superaleaciones base titanio	140
4.3.4. Procesos de elaboración de superaleaciones base titanio	140
4.4. TRATAMIENTO TÉRMICO DE SUPERALEACIONES BASE TITANIO	145
4.5. SUPERALEACIONES DE TITANIO MÁS USUALES	146
4.5.1. Timetal 64 o IMI 318 (Ti-6Al-4V)	146
4.5.2. Timetal® 17 (Ti-5Al-2Sn-4Mo-2Zr-4Cr)	149
4.5.3. Aleación Ti-3-2.5 (Ti-3Al-2.5V)	153
4.5.4. Aleación Ti-6246 (Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo)	155
4.6. DISTRIBUIDOR DE SUPERALEACIONES BASE TITANIO EN MÉXICO	157
4.6.1. RTI International Metals, Inc.	157
4.6.2. AEHI, Inc.	159
4.6.3. TIMET	160

**CAPÍTULO 5
ALEACIONES BASE HIERRO**

5.1. EL HIERRO	161
5.2. SUPERALEACIONES BASE HIERRO	164
5.2.1. Microestructura	167
5.2.2. Características o propiedades de las superaleaciones base hierro	171
5.2.3. Métodos de elaboración de superaleaciones base hierro	172
5.2.4. Tratamientos térmicos del acero inoxidable	175
5.3. SUPERALEACIONES BASE HIERRO MÁS USUALES	175
5.3.1. Aceros inoxidables serie 200	175
5.3.2. Aceros inoxidables serie 300	177
5.3.3. Aceros inoxidables serie 400	181
5.4. FABRICANTES Y DISTRIBUIDORES DE SUPERALEACIONES BASE HIERRO EN MÉXICO	187
5.4.1. Mega Mex “Metales especiales bajo demanda”	187
5.4.2. Aceros Palmexico	188
5.4.3. ATRESA Aceros y tubos regios S.A. de C.V.	189

BIBLIOGRAFÍA	190
---------------------------	------------

INTRODUCCIÓN

Históricamente, el desarrollo y la evolución de las sociedades han estado íntimamente vinculados a la capacidad de sus miembros para producir y conformar los materiales necesarios para satisfacer sus necesidades. En efecto, las primeras civilizaciones se conocen por el nombre del material que usaban (Edad de Piedra, Edad de Bronce). Sin embargo, hace relativamente poco tiempo que los científicos llegaron a comprender la relación entre elementos estructurales de los materiales y sus propiedades. Este conocimiento adquirido ha provocado el desarrollo de materiales distintos con características muy especiales para satisfacer las necesidades de nuestra moderna y compleja sociedad, se trata de metales, plásticos, vidrios, cerámicas y fibras.

Se puede afirmar que una de las grandes revoluciones de la ciencia e ingeniería de los materiales fue el descubrimiento de las diferentes fases térmicas de los metales, y en especial del acero.

Actualmente los adelantos estructurales aeroespaciales más sofisticados se basan en materiales denominados *superaleaciones*.

El término "*superaleaciones*" fue utilizado por primera vez poco después de la Segunda Guerra Mundial, para describir un grupo de aleaciones desarrolladas para su uso en turbocompresores y turbinas de motor de aviones que requerían un alto rendimiento a temperaturas elevadas. Sin embargo, en los últimos diez años se han realizado avances tecnológicos en el desarrollo de modernos motores de turbinas para aeroplanos y dirigibles y componentes de generación de energía, coincidiendo con significativos logros de ingeniería en el área de la metalurgia de las superaleaciones. Para ello se han incrementado los niveles de elementos aleantes de tipo refractarios, logrando incrementar sus propiedades mecánicas a elevadas temperaturas.

Las *superaleaciones* o *aleaciones de alto rendimiento* son un grupo de materiales o aleaciones metálicas de *base níquel, cobalto, hierro y titanio* que presentan excelentes propiedades mecánicas a temperaturas elevadas, es decir, son utilizados a menudo de más de 0.7 de su temperatura de fusión absoluta (a temperaturas de 540°C y superiores). Su resistencia al creep y resistencia a la oxidación son los criterios principales de diseño.

Las superaleaciones se basan en elementos del Grupo VIII B y contienen grandes cantidades de elementos de aleación, por lo general consisten en diversas combinaciones de Fe, Ni, Co y Ti, así como cantidades pequeñas de W, Mo, Ta, Nb, Cr y Al, con el fin de producir una combinación de alta resistencia a temperaturas elevadas, a la corrosión, a las vibraciones y a la termofluencia a temperaturas superiores a los 1000°C.

Actualmente la investigación y el desarrollo de las aleaciones de alto rendimiento (superaleaciones) ha sido impulsado principalmente por la industria aeroespacial, y en México por la industria aeronáutica y de energía, en aplicaciones como turbinas de avión, ductos y vasos de procesos químicos, turbinas de gas en tierra, carcasas de bombas, plantas eléctricas, reactores nucleares, tubos intercambiadores de calor, motores de gasolina, equipos para tratamiento térmico, y chimeneas en plataformas marinas de PEMEX, por mencionar algunas.

Así, con el presente trabajo se pretende dar a conocer un panorama general de las superaleaciones, sus propiedades o características y aplicaciones más importantes, que hacen que se empleen en distintos procesos de las diferentes industrias, primordialmente en la industria aeronáutica.

Es así que en el *capítulo 1*, se establece la clasificación de los materiales en ingeniería y los aspectos generales de las aleaciones (ferrosas y no ferrosas) y superaleaciones, así como su aplicación en México.

En el *capítulo 2*, se da a conocer un panorama general de lo que son las superaleaciones basadas en níquel, sus propiedades o características, y su microestructura la cual consta de dos fases principalmente, la fase gamma y la fase gamma prima. Así también, se mencionan las superaleaciones base níquel más empleadas en México y las empresas más importantes que fabrican y comercializan estos materiales.

En el *capítulo 3*, se establecen los aspectos generales de las superaleaciones base cobalto, como son la microestructura, las propiedades o características que poseen y los métodos de elaboración. También se muestran las superaleaciones base cobalto más usuales, importantes y comerciales en México, así como las empresas que fabrican y distribuyen estas aleaciones de

alto rendimiento.

En el *capítulo 4*, se da a conocer un panorama general de lo que son las superaleaciones base titanio, sus características o propiedades que poseen, y su microestructura en la cual los elementos de aleación tienen efectos. Así mismo, se mencionan tanto las superaleaciones base titanio más importantes y comerciales en México como las empresas que fabrican y distribuyen estos materiales.

Por último en el *capítulo 5*, se establecen los aspectos generales de las superaleaciones base hierro las cuales son aceros inoxidable auténticos. Aquí se mencionan la microestructura, las características o propiedades y los tratamientos térmicos de estas aleaciones. También se muestran las aleaciones de acero inoxidable (superaleaciones base hierro) más usuales, importantes y comerciales en México, así como las empresas que fabrican y distribuyen estas aleaciones de alto rendimiento.

Esperemos que el presente trabajo ayude a las personas interesadas a tener un panorama general del tema.

CAPÍTULO 1

ASPECTOS GENERALES DE LAS ALEACIONES Y SUPERALEACIONES Y SU APLICACIÓN EN MÉXICO

1.1. LA CIENCIA DE MATERIALES

La *ciencia de materiales* implica investigar la relación entre la estructura y las propiedades de los materiales. Por el contrario, la ingeniería de materiales se fundamenta en las relaciones propiedades-estructura y diseña o proyecta la estructura de un material para conseguir un conjunto predeterminado de propiedades. Conviene matizar esta diferencia, puesto que a menudo se presta a confusión.

La *ciencia de materiales* es un campo multidisciplinario que estudia conocimientos fundamentales sobre las propiedades físicas macroscópicas de los materiales y los aplica en varias áreas de la ciencia y la ingeniería, consiguiendo que éstos puedan ser utilizados en obras, máquinas y herramientas diversas, o convertidos en productos necesarios o requeridos por la sociedad.

La relación de estas disciplinas se puede ver en la figura 1.1.

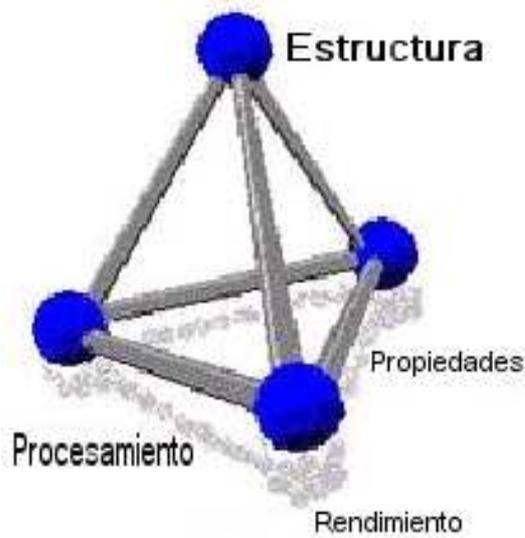


Figura 1.1. Refleja las diferentes disciplinas de esta ciencia. Estructura, proceso, rendimiento y propiedades.

Incluye elementos de la física aplicada y la química, así como las ingenierías química, mecánica, civil y eléctrica. Con la atención puesta de los medios en la nanociencia y la nanotecnología en los últimos años, la ciencia de los materiales ha sido impulsada en muchas universidades.

A pesar de los espectaculares progresos en el conocimiento y en el desarrollo de los materiales en los últimos años, el permanente desafío tecnológico requiere materiales cada vez más sofisticados y especializados.

1.2 GENERALIDADES DE LOS MATERIALES

Históricamente, el desarrollo y la evolución de las sociedades han estado íntimamente vinculados a la capacidad de sus miembros para producir y conformar los materiales necesarios para satisfacer sus necesidades. En efecto, las primeras civilizaciones se conocen por el nombre del material que usaban (Edad de Piedra, Edad de Bronce).

El hombre primitivo sólo tuvo acceso a muy reducido número de materiales presentes en la naturaleza: piedras, maderas, arcilla, cuero... Con el transcurso del tiempo, descubrió técnicas para producir materiales con nuevas propiedades superiores a las de los naturales (*principalmente aleaciones*).

Hace relativamente poco tiempo que los científicos llegaron a comprender la relación entre elementos estructurales de los materiales y sus propiedades. Este conocimiento, adquirido en los últimos 200 años aproximadamente, los ha capacitado, en alto grado, para modificar o adaptar las características de los materiales. Quizá uno de los científicos más relevantes en este campo haya sido Willard Gibbs al demostrar la relación entre las propiedades de un material y su estructura.

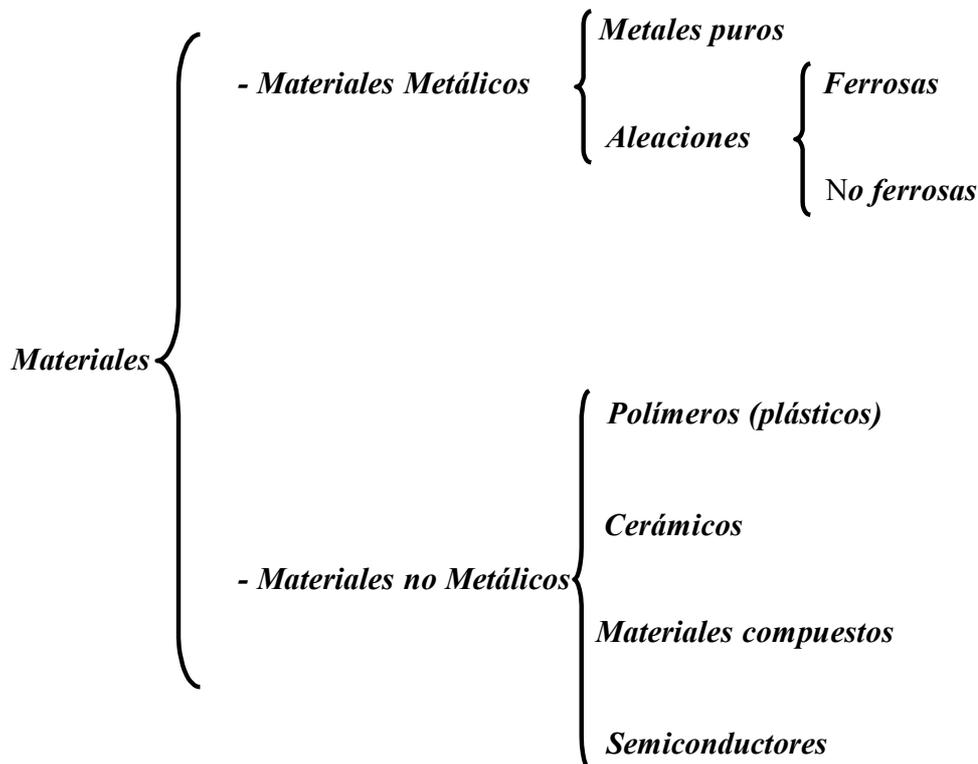
Se han desarrollado decenas de miles de materiales distintos con características muy especiales para satisfacer las necesidades de nuestra moderna y compleja sociedad, se trata de metales, plásticos, vidrios y fibras.

Se puede afirmar que una de las *grandes revoluciones* de la ciencia de materiales fue el descubrimiento de *las diferentes fases térmicas de los metales, y en especial del acero*.

Actualmente los adelantos estructurales aeroespaciales más sofisticados se basan en aleaciones denominadas *superaleaciones*, así también los adelantos electrónicos más sofisticados se basan en componentes denominados *materiales semiconductores*.

1.3. CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES

La *ciencia de materiales* clasifica a todos los materiales de uso corriente en Ingeniería, en función de sus propiedades y su estructura atómica, en dos grandes grupos, a saber:



Como se observa en el esquema anterior, las aleaciones generalmente se clasifican en dos grupos principales, teniendo en cuenta cuál o cuales elementos se encuentran presentes en mayor proporción, denominándose a estos elementos *componentes base de la aleación*. Los elementos que se encuentran en menor proporción serán *componentes secundarios o componentes traza*. Así pues, se clasifican en:

- *Aleaciones ferrosas (base hierro)* y
- *Aleaciones no ferrosas (base cobre, base zinc, base aluminio, etc.)*.

1.4. LAS ALEACIONES

Aspectos generales

Una **aleación** es una mezcla sólida homogénea, de propiedades metálicas, que está compuesta de dos o más elementos, de los cuales, al menos uno es un metal.

Las aleaciones están constituidas por **elementos metálicos: Fe, Al, Cu, Pb**. Pueden tener algunos **elementos no metálicos como: P, C, Si, S, As**. El método ordinario de preparación de las aleaciones es la *fusión conjunta* (o sea la mezcla de los elementos en estado de fusión), pero a veces se utiliza la *sinterización*, la *electrólisis* o la *sublimación*.

En la mayoría de los casos, los componentes en estado de fusión que forman parte de la aleación son totalmente solubles el uno en el otro, es decir, forman una *solución líquida* en la que los átomos de los distintos elementos, de manera mas o menos uniforme están mezclados entre si. Cuando solidifican, estas soluciones líquidas, pueden formar ya en estado sólido, los siguientes tipos de aleaciones: *Soluciones sólidas*, *Compuestos químicos* y *Mezclas mecánicas*.

Cuando los aleantes no tienen carácter metálico suelen hallarse en muy pequeña proporción, mientras que si únicamente se mezclan metales, los aleantes pueden aparecer en proporciones similares al metal base.

1.4.1. Aleaciones ferrosas

Las aleaciones ferrosas son aquellas que tienen como base o elemento en mayor proporción al **hierro (Fe)**, y componentes secundarios a metales (por ejemplo: Mn, Ni, V, Cr, Co) y no metales (por ejemplo: C, P, Si, S).

Las aleaciones ferrosas se pueden clasificar a su vez en:

- **Aceros.**
- **Fundiciones de hierro (hierros colados).**

Aceros

Los aceros dependiendo de su contenido de carbono y de otros elementos de aleación se clasifican en:

- *Aceros simples.*
- *Aceros aleados.*
- *Aceros de alta aleación.*

Aceros simples

Los aceros simples se pueden definir como una aleación hierro con carbono con un contenido de éste último en el rango de 0.02 hasta el 2% con pequeñas cantidades de otros elementos que se consideran como impurezas tales como P, S, Mn, Cu, Si, etc.

Los aceros simples se clasifican de acuerdo a su contenido de carbono en:

- Aceros de bajo carbono.
- Aceros de medio carbono.
- Aceros de alto carbono.

Cada uno de los grupos anteriores tiene características bien definidas como se muestra a continuación:

Aceros de bajo carbono ($0.02 < \%C < 0.3$)

- Son dúctiles.
- Soldables.
- No se pueden tratar térmicamente.
- Poseen una resistencia mecánica moderada.
- Maquinables.
- Baratos.

Aceros de medio carbono ($0.3 < \%C < 0.65$)

- Son templables (Se pueden someter a temple y revenido).
- Poseen buena resistencia mecánica.
- Ductilidad moderada.
- Baratos.

Aceros de alto carbono (%C>0.8)

- Son templables.
- Duros y resistentes al desgaste.
- Dificiles de soldar.
- Poco tenaces.
- Baratos.

Entre las principales aplicaciones de los aceros simples se pueden mencionar a las siguientes:

- Estructuras.
- Elementos de máquinas (Ejes, resortes, engranes, etc.).
- Tornillos.
- Herramientas de mano.

Aceros aleados

Los aceros aleados son aceros simples a los que se les agrega de manera intencional ciertos elementos de aleación, entre los que se pueden mencionar a los siguientes: cromo, molibdeno, níquel, tungsteno, vanadio, silicio, manganeso, etc., debiendo ser la suma de todos los elementos antes mencionados menor o igual al 5 %.

Los objetivos perseguidos son los siguientes:

- Aumentar la resistencia mecánica.
- Mejorar su templabilidad.
- Aumentar su resistencia a la corrosión y a la oxidación.

Para designar a los aceros simples y aleados se utiliza un sistema de identificación de 4 dígitos desarrollado por **AISI** (American Iron and Steel Institute) y **SAE** (Society of Automotive Engineers) y que en México fue adoptado por **NOM** (Norma Oficial Mexicana).

A continuación, por ejemplo el **acero NOM - 1045**; el primer dígito indica cual es el principal elemento de aleación (carbono en este caso); el segundo dígito, la modificación del acero original y los dos últimos dígitos cual es el porcentaje de carbono en centésimas de punto, esto es, en el ejemplo el contenido de carbono es de 0.45%.

En la tabla 1.1 se muestra cual es principal elemento de aleación dependiendo de cual es el valor del primer dígito.

Tabla 1.1. Designación AISI-SAE-NOM para aceros simples y aleados.

FAMILIA	PRINCIPAL ELEMENTO DE ALEACIÓN
1XXX	CARBONO
2XXX	NIQUEL
3XXX	NIQUEL-CROMO
4XXX	CROMO-MOLIBDENO
5XXX	CROMO
6XXX	CROMO-VANADIO
8XXX	CROMO-NIQUEL-MOLIBDENO
9XXX	CROMO-SILICIO

Aceros de alta aleación

Los aceros de alta aleación se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- ***Aceros Inoxidables.***
- ***Aceros para herramientas.***

Los Aceros Inoxidables

Son básicamente aleaciones Fe-Cr ó Fe-Cr-Ni con un contenido de al menos 12 % de cromo y el menor contenido posible de carbono y que poseen una buena resistencia a la corrosión y a la oxidación conferida por una capa de óxido de cromo que se forma sobre su superficie y origina la pasivación de ésta.

Los aceros inoxidables se clasifican de acuerdo a la microestructura que se pueden obtener en ellos, tal y como se muestra enseguida:

- Aceros inoxidables martensíticos.
- Aceros inoxidables ferríticos.
- Aceros inoxidables austeníticos.

A continuación se mencionan las principales características de cada una de las familias de aceros antes mencionados:

Aceros Inoxidables Martensíticos

- Poseen un contenido de cromo entre el 12 y 14 %.
- El contenido de carbono no excede de 0.4 %.
- Son magnéticos.
- Son tratables térmicamente (Temple y revenido).
- Poseen regular resistencia a la corrosión y a la oxidación.
- Son los más económicos dentro de los aceros inoxidables.
- Según AISI-NOM se identifican mediante un 4 seguido de dos dígitos.

Aceros Inoxidables Ferríticos

- Poseen un contenido de cromo entre el 15 y 25 %.
- El contenido de carbono no debe exceder de 0.1 %.
- Poseen buena resistencia a la corrosión y a la oxidación.
- No son tratables térmicamente.
- Endurecibles mediante trabajo en frío.
- Son magnéticos.
- Según AISI- NOM se identifican mediante un 4 seguido de 2 dígitos.

Aceros inoxidables Austeníticos

- Poseen entre el 15 y 25 % de cromo.
- También contienen níquel en un rango de 7 al 15 %.
- Y el contenido de carbono no debe exceder de 0.08 %.
- Son no magnéticos.
- No son tratables térmicamente.
- Son endurecibles mediante trabajo en frío.
- Son caros.
- Se identifican mediante un 3 seguido de 2 dígitos, y los que contienen manganeso mediante un 2 seguido de 2 dígitos.

Las principales aplicaciones de los aceros inoxidables son:

- Tuberías.
- Recipientes de proceso.
- Válvulas.
- Cuchillería.
- Resortes.
- Artículos de ornato, etc.

Los Aceros para Herramienta

Son otro grupo importante de aceros y como su nombre lo indica se utilizan fundamentalmente para la fabricación de herramientas, con el fin de usarlos para darle forma a otros materiales. Los principales elementos de aleación de los aceros para herramienta son: carbono, tungsteno, molibdeno, manganeso, vanadio, níquel, cobalto etc.

Los aceros para herramienta deben mostrar las siguientes cualidades:

- Deben poseer una alta dureza y resistencia al desgaste.
- También deben mostrar una excelente templabilidad.
- Deben sufrir una deformación mínima durante el tratamiento térmico.
- Deben retener su dureza a altas temperaturas (dureza al rojo).

Al término de la Segunda Guerra Mundial, en los Estados Unidos de Norteamérica, AISI se encargó de clasificar e identificar los aceros para herramienta tal y como se muestra a continuación:

Aceros para trabajo en frío

Los cuales a su vez se dividen en:

- ***Aceros templables en agua*** y que se identifican con la letra *W*.
- ***Aceros templables en aceite*** identificables con la letra *O*.
- ***Los aceros templables al aire*** que se identifican con la letra *A*.
- ***Los aceros de alto cromo- alto carbono*** que se utilizan para la fabricación de troqueles que se identifican con la letra *D*.

Aceros resistentes al impacto. Identificables con la letra *S*.

Aceros para trabajo en caliente. Se identifican con la letra *H*.

Aceros rápidos o aceros alta velocidad. Pueden ser al tungsteno y al molibdeno, identificándose los primeros con la letra T y los segundos con la letra M.

Aceros para moldes. Se identifican con la letra P.

Aceros de propósito general. Se identifican con las letras L y F.

Fundiciones de hierro

Son aleaciones de hierro y carbono con un contenido de este último en el rango de 2 hasta 6.7% con cantidades adicionales de silicio o manganeso. Su principal diferencia con los aceros es que no se les puede dar forma mediante deformación plástica ni en frío ni en caliente.

Sus principales características son las siguientes:

- Buena resistencia a la compresión, pero no a la tensión.
- Son maquinables.
- Absorben vibraciones.
- Buena resistencia bajo cargas variables.
- Son baratos.

Los hierros fundidos se clasifican en función de la forma en que se encuentra en carbono tal y como se menciona a continuación:

Hierros fundidos blancos. El carbono se encuentra en forma de carburo de hierro.

Hierros fundidos grises. El carbono se encuentra en forma de hojuelas de grafito.

Hierros fundidos nodulares o dúctiles. El carbono se encuentra en forma de nódulos de grafito.

Hierros fundidos maleables. Donde el carbono se encuentra en forma de rosetas de grafito.

Los *más resistentes son los hierros nodulares* pero al mismo tiempo son los *más caros* ya que se precisa de un mayor control en su composición química. Los *más usados* son los *hierros fundidos grises*.

Las principales aplicaciones de los hierros fundidos son:

- Carcasas para bombas y transmisiones.
- Bases y marcos para máquinas herramientas.
- Engranajes.
- Flechas.
- Partes automotrices, etc.

1.4.2. Aleaciones no ferrosas

Las aleaciones no ferrosas son aquellas que carecen de hierro o que tienen un bajo nivel de éste, es decir, tienen como base o elemento principal a otro metal distinto al hierro (por ejemplo: Al, Cu, Pb, Zn, Ni, Co, Ti, etc.).

Los metales no ferrosos se pueden clasificar a su vez, como se muestra en la tabla 1.2.

Tabla 1.2. Clasificación de los metales no ferrosos atendiendo a su densidad.

TIPO	CARACTERÍSTICAS	EJEMPLO DEL METAL BASE NO FÉRROSO
- Pesados	Su densidad es igual o mayor de 5 kg/dm ³ .	Estaño, Cobre, Cinc, Plomo, Cromo, <i>Níquel</i> , Wolframio o Tungsteno y <i>Cobalto</i> .
- Ligeros	Su densidad esta comprendida entre 2 y 5 kg/dm ³ .	Aluminio, <i>Titanio</i> .
- Ultraligeros	Su densidad es menor de 2 kg/dm ³ .	Magnesio.

En general, sus principales características son:

- Blandos.
- Alta resistencia a la corrosión (superior que las aleaciones ferrosas).
- Elevada conductividad eléctrica y térmica.
- Baja densidad.
- Facilidad de producción.
- Tienen poca resistencia mecánica y dureza que las aleaciones ferrosas.

Para mejorar sus propiedades suelen alearse con muchos más metales.

Los metales no ferrosos son utilizados en la manufactura como elementos complementarios de los metales ferrosos, también son muy útiles como materiales puros o aleados lo que por sus propiedades físicas y de ingeniería cubren determinadas exigencias o condiciones de trabajo, por ejemplo el bronce (cobre-estaño) y el latón (cobre-zinc).

Los metales no ferrosos, ordenados de mayor a menor utilización, son:

- *Cobre (y sus aleaciones).*
- *Aluminio.*
- *Estaño.*
- *Plomo.*
- *Cinc.*
- *Níquel.*
- *Cromo.*
- *Titanio.*
- *Magnesio.*
- *Cobalto.*
- *Wolframio (Tungsteno).*

Metales no ferrosos pesados

El Estaño (Sn) y sus aleaciones

El estaño es un importante metal de uso corriente en ingeniería y se obtiene de la casiterita. Sus principales elementos de aleación son:

- Plomo (25%), para constituir una aleación que se emplea como soldadura blanda.
- Cobre.
- Antimonio.

Sus principales características son:

- Densidad de 7.28 kg/dm³.
- Su punto de fusión alcanza los 231°C.
- Resistencia a la tracción de 5 kg/mm².
- Color blanco y brillante.

- Blando.
- Maleable en frío.
- En caliente es frágil y quebradizo.
- Resistente a la corrosión ambiental.

Sus principales aplicaciones son:

- Recubrimientos.
- Materiales antifricción.
- Fabricación del papel de estaño.
- Fabricación de la hojalata.
- Proteger al acero contra la oxidación.

El Cobre (Cu) y sus aleaciones

El cobre es un importante metal de mayor uso corriente en ingeniería y se emplea ampliamente en la industria, sus principales elementos de aleación son:

- Estaño, para constituir al **bronce**, la cual es una aleación de cobre que contiene al estaño o algún otro elemento como fósforo o aluminio como constituyente esencial.
- Zinc, formando el **latón**, la cual es una aleación de cobre en la que el zinc es un constituyente importante.
- Níquel (2 a 30% de Ni), constituyendo los **cuproníqueles**.
- Aluminio (5 a 11% Al), constituyendo los **cuproaluminios**.
- Berilio (0.4-2% de Be), constituyendo los **cuproberilios**.

Sus principales características son:

- Densidad de 8.9 kg/dm³.
- Punto de fusión de 1083°C.
- Posee una resistencia mecánica moderada.
- Es buen conductor eléctrico.
- Presenta alta conductividad térmica.
- Posee buena resistencia a la corrosión y oxidación.
- Es dúctil, maleable y fácil de soldar.
- Posee buena maquinabilidad.

- Sus propiedades mejoran con bajas temperaturas.

Sus principales aplicaciones son:

- Conductores eléctricos.
- Contactos eléctricos.
- Resortes.
- Grifos.
- Tuerca y tornillos
- Tubería.
- Artesanías.
- Campanas y engranes.
- Cerraduras.
- Revestimientos en tejados, fachadas, puertas y ventanas.
- Criogénicas.

El Zinc (Zn) y sus aleaciones

El zinc es un importante metal de uso corriente en ingeniería, con cada día mayor número de aplicaciones, el cual es muy abundante en nuestro país; sus principales elementos de aleación son:

- Cobre, constituyendo latones, que puede contener otro elemento como el Ni para constituir alpaca.
- Aluminio.
- Magnesio.

Sus principales características son:

- Densidad de 7.14 kg/dm³.
- Punto de fusión de 419°C.
- Resistencia a la tracción de 3 kg/mm² en piezas moldeadas y en las piezas forjadas de 20 kg/mm².
- Tiene el mayor coeficiente de dilatación térmica de todos los metales.
- A temperatura ambiente es muy quebradizo.
- Entre 100 y 150°C es muy maleable.
- Buena resistencia a la corrosión.

- Económico.
- Se funde a bajas temperaturas aleado con otros elementos.
- Presenta una gran resistencia a la deformación plástica en frío, que disminuye en caliente.
- No se puede endurecer por acritud.
- Presenta el fenómeno de fluencia a temperatura ambiente.

Sus principales aplicaciones son:

- Recubrimiento (Galvanizado del acero).
- Piezas de fundición inyectada en la industria de automoción.
- Metalurgia de metales preciosos y eliminación de la plata del plomo.
- Baterías de Zn-AgO usadas en la industria aeroespacial para misiles y cápsulas espaciales por su óptimo rendimiento por unidad de peso.
- Baterías zinc-aire para computadoras portátiles.
- Parte importante de dos aleaciones comerciales de gran importancia que son el Zamak y el Zinalco, el cual es producto de la investigación de académicos de la UNAM.

El Plomo (Pb) y sus aleaciones

El plomo es otro importante metal de uso corriente en ingeniería, sus principales elementos de aleación son:

- Estaño, para constituir una aleación que se emplea para soldaduras.
- Estaño, Cadmio y Bismuto, para formar aleaciones fácilmente fusibles.
- Aleado con otros metales, para aumentar su dureza.

Sus principales características son:

- Densidad de 11.34 kg/dm³.
- Punto de fusión de 327°C.
- Resistencia a la tracción de 2 kg/mm².
- Es muy maleable.
- Es muy dúctil.
- Blando.
- Se deforma progresivamente.

- Tienen una colabilidad excelente.
- Fácilmente fusible.
- Alta dureza.

Sus principales aplicaciones son:

- Soldaduras blandas.
- Elementos de protección contra la radioactividad.

El Cromo (Cr)

Sus principales características son:

- Densidad de 6.8 kg/dm³.
- Punto de fusión de 1900°C.
- Color grisáceo acerado.
- Muy duro.
- Gran acritud.
- Buena resistencia a la oxidación y la corrosión.

Sus principales aplicaciones son:

- Objetos decorativos (cromado brillante).
- Fabricación de aceros inoxidables y aceros para herramientas (cromado duro).

El Tungsteno o Wolframio (W)

Sus principales características son:

- Densidad de 19 kg/dm³.
- Punto de fusión de 3370°C (metal refractario).

Sus principales aplicaciones son:

- Filamentos de bombillas incandescentes.
- Fabricación de herramientas de corte .

Metales no ferrosos ligeros

El Aluminio (Al) y sus aleaciones

El aluminio es un importante metal de uso corriente en ingeniería que más se usa en la actualidad, así como las aleaciones que forma con los siguientes elementos:

- Mg.
- Ni-Co, para constituir una aleación llamada Alnico.
- Cu.
- Zn.
- Li, etc.

Sus principales características son:

- Densidad de 2.7 kg/dm³.
- Punto de fusión de 660°C.
- Resistencia a la tracción de 10 kg/mm² (el doble si esta laminado o forjado).
- Es muy ligero.
- Buena resistencia a la corrosión debida a la formación de una capa protectora.
- Fácil de reciclar (principalmente el aluminio puro).
- Buena relación resistencia/peso.
- Es buen conductor de la electricidad y del calor.
- Muy maleable y dúctil.
- Baja dureza.

Sus principales aplicaciones son:

- Conductores eléctricos.
- Componentes para avión.
- Envases para alimentos.
- Cancelería.
- Fabricación de pomos.
- Diversos componentes automotrices.
- Dado que son livianas pueden utilizarse en construcción aeronáutica (duraluminio: 95,5% Al, 3% Cu, 1% Mn, 0,5% Mg).
- Fabricación de barcos (hidronalio: 90% Al, 10% Mg), siendo resistentes a la corrosión

del agua de mar.

- Pulverizado finamente como combustible sólido de cohetes espaciales.
- Aumentar la potencia de los explosivos.

Metal no ferroso ultraligero

El Magnesio (Mg)

Se obtiene de la carnalita, dolomita y magnesita. Sus principales características son:

- Densidad de 1.74 kg/dm³.
- Punto de fusión de 650°C.
- Resistencia a la tracción de 18 kg/mm².
- Muy inflamable (en estado líquido o polvo).
- Tiene un color blanco parecido al de la plata.
- Es maleable y poco dúctil.
- Más resistente que el aluminio.

Sus principales aplicaciones son:

- Fabricación de productos pirotécnico.
- Desoxidante en los talleres de fundición de acero.
- Aeronáutica.

Los metales no ferrosos *Ni, Co y Ti* y sus respectivas aleaciones, serán tratados como *materiales avanzados* llamados *superaleaciones*.

Los metales no ferrosos tienen un costo alto en comparación a los metales ferrosos, pero con el aumento de su demanda y las nuevas técnicas de extracción y refinamiento, se han logrado abatir considerablemente los costos, con lo que su competitividad ha crecido notablemente en los últimos años, figura 1.2.



Figura 1.2. Principales metales ferrosos y no ferrosos.

1.5. MATERIALES AVANZADOS: LAS SUPERALEACIONES

Aspectos generales

El término "*superaleaciones*" fue utilizado por primera vez poco después de la Segunda Guerra Mundial, para describir un grupo de aleaciones desarrolladas para su uso en turbocompresores y turbinas de motor de aviones que requerían un alto rendimiento a temperaturas elevadas. La gama de aplicaciones para las que se utilizan superaleaciones se ha extendido a muchas otras áreas y ahora incluye las aeronaves y en tierra las turbinas de gas, motores de cohetes, químicos y plantas de petróleo. Son especialmente adecuados para estas aplicaciones exigentes debido a su capacidad de retener la mayor parte de su resistencia, incluso después de largos tiempos de exposición por encima de 650 °C (1200 °F). Su versatilidad se debe al hecho de que combinan esta alta resistencia con buena ductilidad a baja temperatura y estabilidad superficial.

En los últimos diez años se han realizado avances tecnológicos en el desarrollo de modernos motores de turbinas para aeroplanos y dirigibles y componentes de generación de energía coincidiendo con significativos logros de ingeniería en el área de la metalurgia de las superaleaciones. Para ello se han incrementado los niveles de elementos aleantes de tipo refractarios en las superaleaciones, logrando incrementar sus propiedades mecánicas a elevadas temperaturas, sin embargo, esto produjo un importante problema que es la formación de defectos de granos y particularmente el desarrollo de cadenas de freckles durante la solidificación direccional.

Los freckles (pecas) son defectos macroscópicos que ocurren en varios sistemas de aleaciones bajo ciertas condiciones de solidificación. Este tipo de defectos se distribuyen usualmente en un modo específico en la fundición.

Las superaleaciones que son aleaciones de gran funcionamiento, han llegado a ser la opción del acero para resistencia a la corrosión y de gran versatilidad.

El desarrollo de las superaleaciones ha dependido en gran medida de las industrias de químicos y de la innovación de procesos, y ha sido impulsado principalmente por la industria aeroespacial y de energía.

Concepto

Se denominan *superaleaciones* o *aleaciones de alto rendimiento* a un grupo de materiales o aleaciones metálicas de *base níquel (Ni), cobalto (Co), hierro (Fe) y titanio (Ti)* que presentan excelentes propiedades mecánicas a temperaturas elevadas, es decir, son utilizados a menudo de más de 0.7 de su temperatura de fusión absoluta (a temperaturas de 540 °C y superiores). Resistencia a la fluencia y resistencia a la oxidación son los criterios principales de diseño.

Las superaleaciones se basan en elementos del Grupo VIII B y contienen grandes cantidades de elementos de aleación, por lo general consisten en diversas combinaciones de Fe, Ni, Co y Ti, así como cantidades pequeñas de W, Mo, Ta, Nb, Cr, y Al, con el fin de producir una combinación de alta resistencia a temperaturas elevadas, a la corrosión, a las vibraciones y a la termofluencia a temperaturas superiores a los 1000°C, figura 1.3.

- *Aleaciones base níquel (el más adecuado para aplicaciones del motor de avión),*
- *Aleaciones base cobalto,*
- *Aleaciones base titanio,*
- *Aleaciones base hierro y,*
- *Combinaciones de estos elementos (como en el caso de las superaleaciones Inconel).*

1.5.1. Características o propiedades generales de las superaleaciones

Las superaleaciones o aleaciones de alto rendimiento resisten las condiciones más críticas, y presentan las siguientes características generales:

- Excelente resistencia mecánica.
- Elevada resistencia a altas temperaturas (calor).
- Buena resistencia al ataque del medio ambiente (incluyendo nitruración, carbonización, oxidación y sulfuración).
- Excelente resistencia al Creep.
- Resistencia a la ruptura por estrés.
- Buena estabilidad metalúrgica (estabilidad en la superficie).
- Expansión térmica muy útil.
- Resistencia a la fatiga térmica.
- Resistencia a la corrosión.
- Buena resistencia a cargas elevadas.
- Resistencia a las vibraciones.
- Resistencia a la termofluencia (creep)

1.5.2. Aplicaciones de las superaleaciones

Las aplicaciones típicas se encuentran principalmente enfocadas en el campo de la industria aeroespacial, aeronáutica y eléctrica.

Las principales aplicaciones son:

- Reactores nucleares.
- Carcasas de bombas.
- Motores eléctricos militares.
- Plantas eléctricas.

- Tubos intercambiadores de calor.
- Revestimientos de barrera térmica (*TBC*).

Desempeñan un papel importante, ya que protegen el material de los efectos térmicos, como la corrosión y la oxidación, permitiéndoles operar en tales condiciones.
- Turbinas de turbocompresores.

Las superaleaciones comunes en esta aplicación son; el Inconel 713 y el Mar-M 247.
- Motores de gasolina.

La superaleación particularmente útil en esta aplicación es el Mar-M 247, ya que reduce la necesidad de enriquecimiento de combustible en las altas cargas, mejorando la eficiencia del motor.
- Válvulas de asiento de los motores de pistón, tanto para los motores diesel como para los de gasolina (ya sea en la forma de una válvula de sólidos o como una válvula bimetálica).

La superaleación común en esta aplicación es el Nimonic 80A. La resistencia a la corrosión es particularmente útil cuando se trata de temperaturas y presiones altas, y se encuentran en un motor diesel. Esta superaleación resiste las picaduras y la degradación de las condiciones de funcionamiento, lo que no sería posible con un acero inoxidable regular.
- Ambientes ácidos o agua salada.

Se utilizan en lugar del acero inoxidable, previniendo la corrosión.
- Industria marina.
 - Submarinos.
 - Turbinas marinas.
- Industria de procesos químicos y petroquímicos.

Vasos de procesamiento químico.
- Industrias de gas y petróleo.

Turbinas de gas industrial.
- Ambientes extremos (alta temperatura).

Donde una gran resistencia al calor y a la corrosión son muy importantes para la integridad del producto final.
- Industria aeroespacial y aeronáutica.

Vehículos espaciales y vehículos de alto rendimiento.

Motores a reacción de cohetes.

Motores de turbinas de gas de aviones y en cuchillas de la misma (para las secciones más calientes).

Las regiones están sujetas a altas temperaturas que requieren, alta resistencia, excelente resistencia a la fluencia, así como a la corrosión y a la oxidación. En la mayoría de los motores de turbina se encuentra en la parte de alta presión, donde se enfrenta a condiciones que se acercan a la temperatura de fusión de las superaleaciones utilizadas, figura 1.4.

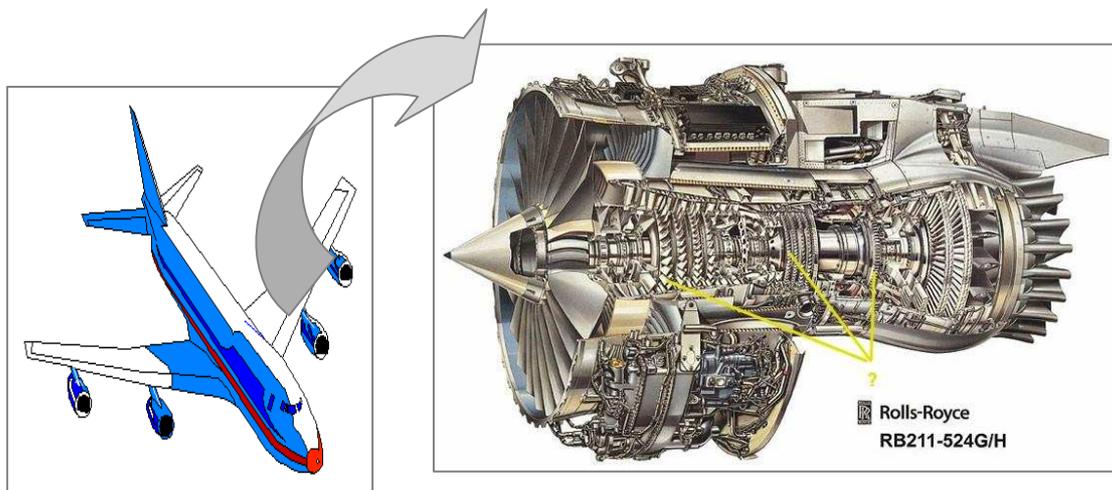


Figura 1.4. Aplicaciones. Motor de la turbina de avión y alabes de la misma.

1.5.3. Preparación y/o procesado de las superaleaciones

Históricamente, la mayoría de las superaleaciones se preparaban mezclando los materiales fundidos. Más recientemente, **las superaleaciones son fundidas mediante:**

- *Moldeo por inversión o cera perdida.*
- *Fundición con poliestireno expandido.*
- *Pulvimetalurgia.*

La pulvimetalurgia ha alcanzado gran importancia en la preparación de superaleaciones con características especiales. En este proceso, se preparan las superaleaciones mezclando los materiales secos en polvo, prensándolos a alta presión y calentándolos después a temperaturas justo por debajo de sus puntos de fusión. El resultado es una superaleación sólida y homogénea.

- *Fusión en vacío.*

El desarrollo de esta técnica permite hoy en día de un control muy preciso de la composición química de las superaleaciones y la reducción de la contaminación y, a su vez conduce a una revolución en las *técnicas de procesamiento*, tales como, figura 1.5:

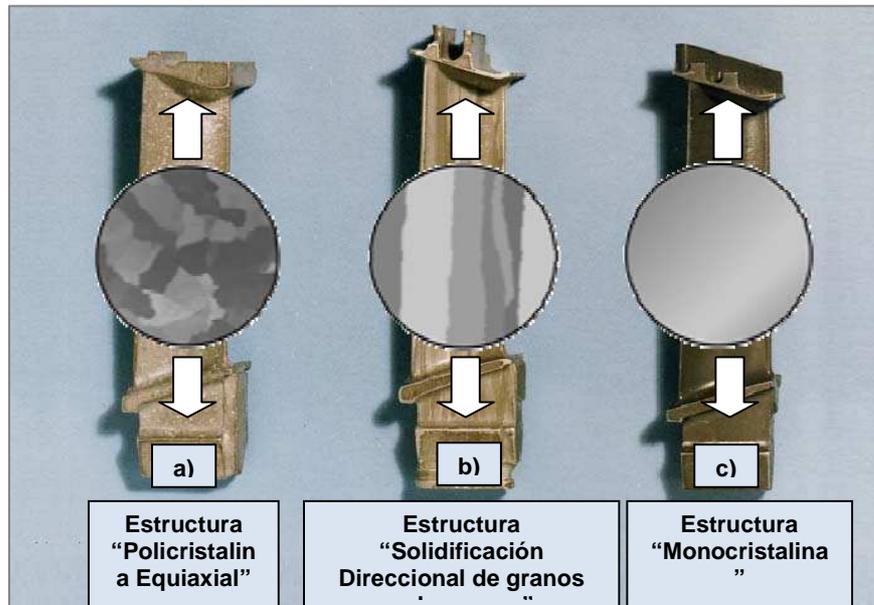


Figura 1.5. Tres tipos diferentes de alabes de turbina: a) Policristal Equiaxial b) Grano Columnar c) Monocristal.

- *Solidificación Direccional de Granos Columnares.*

Las superaleaciones de estructura de granos columnares dirigidos se crean utilizando esta técnica y se producen granos altamente orientados paralelos a los ejes de tensión importante.

- *Estructura monocristalina (cristal único).*

Las superaleaciones monocristalinas se forman como un solo cristal, usando una versión modificada de la técnica de solidificación direccional, así que no hay límites de grano en el material.

- *Estructura Policristalina Equiaxial.*

Las superaleaciones policristalinas equiaxiales se pueden crear con la metalurgia de polvos, la tecnología de fundición o mediante la tecnología de fundición en un molde de cerámica.

1.5.4. Revestimiento de las superaleaciones

Las superaleaciones que son sometidas a altas temperaturas y ambientes corrosivos (como la región de alta presión de la turbina de los motores de avión) están cubiertas con diferentes tipos de revestimiento. Principalmente dos tipos de proceso de revestimiento se aplican: *el proceso de cementación en paquetes y el revestimiento de fase gaseosa.*

- *Proceso de cementación en paquetes.*

El proceso de cementación en paquetes se lleva a cabo a temperaturas más bajas, a unos 750 °C. Las piezas se cargan en cajas que contienen una mezcla de polvos: material de revestimiento activo, que contienen aluminio, el activador (cloruro o fluoruro), y el lastre térmico, como el óxido de aluminio. A altas temperaturas el aluminio gaseoso haluro se transfiere a la superficie de la pieza y se difunde hacia adentro (sobre todo la difusión hacia el interior). Tras el final del proceso de la llamada "capa verde" se produce una pieza que es muy delgada y frágil para su uso directo. Un tratamiento térmico posterior de difusión (varias horas a temperaturas de 1080 °C) conduce a una mayor difusión hacia el interior y la formación de la capa deseada.

- *Revestimiento de fase gaseosa.*

Este proceso se lleva a cabo a temperaturas más altas, a unos 1080 °C. El material de revestimiento es generalmente cargado en bandejas especiales, sin contacto físico con las piezas a recubrir. La mezcla de revestimiento contiene material de revestimiento activo y activador, pero en general no contiene lastre térmico. Al igual que en el proceso de cementación en paquetes, el cloruro de aluminio gaseoso (o fluoruro) se transfiere a la superficie de la pieza. Sin embargo, en este caso es la difusión hacia el exterior. Este tipo de recubrimiento también requiere de un tratamiento de difusión del calor.

En la mayoría de los casos, después del proceso de revestimiento, las regiones de la superficie de las piezas se enriquecen con una *capa de adherencia* de aluminuros.

- *Capa de adherencia*

La capa de adherencia se adhiere al recubrimiento como barrera térmica del sustrato de la superaleación. Además, la capa de enlace proporciona protección contra la oxidación y actúa como una barrera de difusión contra el movimiento de los átomos del sustrato con el medio ambiente.

Hay tres principales tipos de capa de adherencia:

- Los aluminuros.

Para los revestimientos de adherencia de aluminuros, la composición final y estructura de la capa depende de la composición del sustrato. Los aluminuros también carecen de la ductilidad por debajo de 750 ° C, y muestran una limitada resistencia a la fatiga termomecánica.

- Los aluminuros de Platino.

Los aluminuros de Platino son muy similares a las capas de enlace de los aluminuros, a excepción de una capa de Platino depositados en la hoja del recubrimiento. El Platino se cree que ayuda en la adhesión de óxido y que contribuye a la corrosión en caliente. El costo de las planchas de Platino se justifica por el aumento del lapso de vida de la hoja recubierta.

- CrAlY.

El CrAlY es la última de las capas de adherencia y no interactúa fuertemente con el sustrato. El cromo proporciona resistencia a la oxidación y a la corrosión en caliente. El aluminio controla los mecanismos de oxidación, al limitar el crecimiento de óxido. El itrio mejora la adherencia al sustrato de óxido. Últimas investigaciones han demostrado que la adición de renio o tantalio, aumentan la resistencia a la oxidación.

1.5.5. Disponibilidad de las Superaleaciones

En los últimos años se han logrado significativos logros de ingeniería en el área de la metalurgia de las superaleaciones. Aproximadamente el 12% de las superaleaciones producidas en México se emplea en la fabricación y desarrollo de modernas turbinas para aeroplanos y dirigibles y componentes de generación de energía.

La compañía MegaMex líder en el ramo de materiales y/o aleaciones en México, ofrece la mayoría de las superaleaciones en presentaciones como:

- Placa.
- Lámina.
- Barra.
- Tubo.
- Tubing (con costura y sin costura).
- Alambre.
- Conexiones.

1.5.6. Costo de superaleaciones

Hoy en día es indispensable y necesario reducir el costo de las superaleaciones, ya que por lo general éstas contienen un alto contenido de níquel que los hace tener un costo relativamente alto, e incluso más caro que el hierro. Además, los elementos como el titanio, renio, cobalto y rutenio que son utilizados también, los hacen ser aun más caros. Los elementos de aleación y los tratamientos térmicos hacen a menudo difícil de mecanizar las superaleaciones, lo que hace que se sumen también a los costos de fabricación.

Las superaleaciones son caras pero su aplicación se ha ido extendiendo.

1.5.7. Investigación y desarrollo de nuevas superaleaciones

La disponibilidad de las superaleaciones durante las últimas décadas ha conducido a un aumento constante de las temperaturas de entrada de la turbina, y la tendencia se espera que continúe.

Sandia National Laboratories está estudiando un nuevo método para la fabricación de superaleaciones, conocido como radiólisis. Se introduce un nuevo ámbito de investigación en la creación de aleaciones y superaleaciones, a través de la síntesis de nanopartículas. Este proceso es una promesa como método universal de formación de nanopartículas.

Mediante el desarrollo de la comprensión de la ciencia de los materiales como base detrás de estas formaciones de las nanopartículas, se especula que podría ser posible ampliar la investigación en otros aspectos de las superaleaciones, figura 1.6.

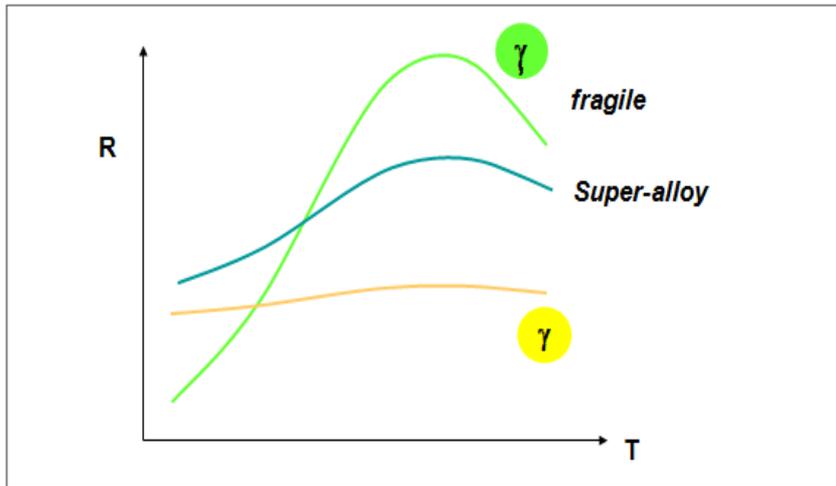


Figura 1.6. La composición de la estructura de superaleaciones (Coexistiendo la fase γ desordenada “suave” y la fase γ' ordenada, trayendo consigo un material ligero con nuevas propiedades mecánicas).

Puede haber considerables desventajas en la fabricación de aleaciones con este método. Alrededor de la mitad del uso de las superaleaciones se encuentran en aplicaciones donde la temperatura de servicio está cerca de la temperatura de fusión de la aleación. Es común por lo tanto, el uso de monocristales. El método anterior produce aleaciones policristalinas que sufren de niveles inaceptables de fluencia.

El futuro paradigma de las aleaciones es el enfoque y desarrollo en la reducción de peso, en la mejora de la oxidación y en la resistencia a la corrosión, mientras se mantienen la resistencia de la aleación. Además, con la creciente demanda de alabes de turbinas para la generación de energía, es indispensable y necesario reducir el costo de las superaleaciones.

1.5.8. Generalidades de las principales superaleaciones

Como se vio al principio de este capítulo, las aleaciones a base de níquel, cobalto y titanio entran en la clasificación de las aleaciones no ferrosas, mientras que las aleaciones a base de hierro entran en las aleaciones ferrosas, ya que contienen al hierro como elemento principal de aleación.

Aleaciones base níquel

Los solutos esenciales de las superaleaciones base níquel son de aluminio y / o de titanio, con una concentración total que es típicamente menos del 10 por ciento atómico. Esto genera una microestructura de equilibrio de dos fases, que consta de gamma (γ) y gamma prima (γ'). Es la γ' la que es en gran parte responsable de la fuerza a elevadas temperaturas del material y de su increíble resistencia a la fluencia de deformación. La cantidad de γ' depende de la composición química y de la temperatura.

Las superaleaciones base níquel son fácilmente deformables por su red fcc, poseen una excelente resistencia a la corrosión y a la oxidación a altas temperaturas, buena resistencia mecánica a elevadas temperaturas, alta conductividad eléctrica y propiedades magnéticas. Las superaleaciones base níquel tienen como objeto mejorar las características de tracción, fluencia, fatiga y estabilidad superficial del material.

Las superaleaciones base níquel principalmente se emplean en los procesos industriales químicos y de petróleo, en cámaras de combustión, en alabes de turbinas de gas de aviones, en toberas, en la industria aeroespacial y en algunas baterías eléctricas.

Son ejemplos de superaleaciones base níquel:

- El Inconel (níquel-cromo-hierro), que posee una alta resistencia al calor y es inoxidable.
- El Hastelloy (níquel-molibdeno-hierro-cromo) o Nimonic (que incorpora al titanio).
- El Duraníquel (níquel-aluminio), que posee una alta resistencia a la corrosión y una gran resistencia mecánica similar a los aceros.
- El Permaníquel (níquel-cobalto-hierro-carbono-manganeso-silicio-titanio-magnesio), que posee una buena resistencia a la corrosión, una buena conductividad eléctrica y

térmica y propiedades magnéticas, pero que disminuye su dureza al aumentar la temperatura.

Aleaciones base cobalto

Las superaleaciones de níquel tienen limitaciones a temperaturas superiores a 1000 °C, por lo tanto, las piezas del turboreactor sometidas a temperaturas de 1100 °C se fabrican de superaleación de cobalto (zonas de la cámara de combustión, alabes de la turbina cercanas a la cámara de combustión).

Estas superaleaciones presentan ventajas respecto a las de níquel, como la mayor temperatura de fusión, la superior resistencia a la corrosión y a la oxidación en caliente, debido al mayor contenido en cromo (del 20 al 30%), y en general mayor resistencia a la corrosión-fatiga. Son resistentes al choque térmico y pueden obtenerse por moldeo. El aluminio refuerza el comportamiento a la oxidación y a la corrosión.

La resistencia mecánica de las superaleaciones de cobalto es inferior a las de níquel aunque mantienen su resistencia a temperaturas elevadas. Su resistencia en estas condiciones se debe principalmente, a la distribución de carburos refractarios (combinaciones de metales tales como el tungsteno y el molibdeno con el carbono), que tienden a precipitar en los límites de grano de matriz austenítica. La mejora de las propiedades de la aleación con la red de carburos se mantiene hasta temperaturas próximas a su punto de fusión.

Generalmente, las aleaciones de cobalto, además de llevar metales refractarios y carburos metálicos, contienen niveles elevados de cromo, lo que aumenta la resistencia a la corrosión provocada por la presencia de los gases de combustión calientes. Las aleaciones de cobalto son más fáciles de soldar que otras superaleaciones y se forjan con más facilidad. Por estas razones, se aplican para fabricar la intrincada estructura de la cámara de combustión de las turbinas de gas, donde los componentes deben ser hechurables y soldables.

Los elementos de adición más utilizados, cromo, tantalio, tungsteno, molibdeno y níquel, entran en solución sólida en la matriz cúbica centrada en las caras y contribuyen al reforzamiento a través de los efectos normales de endurecimiento por solución sólida. El efecto endurecedor relativo dependerá de los diámetros atómicos.

Aleaciones base titanio

Las superaleaciones base titanio tienen una combinación de resistencia y ligereza que no es asequible para cualquier otro sistema de aleación, y por esta razón se usan ampliamente en las piezas estructurales de los aviones.

Cuando el peso es un factor crítico, se emplean estas superaleaciones de titanio. En este caso se describen como una fase α precipitada dentro de una matriz de fase β . La densidad es mucho menor que las de las superaleaciones basadas en Co y Ni, sin embargo la resistencia a elevadas temperaturas es bastante menor. Solo se pueden emplear con garantías de buenas propiedades mecánicas hasta $T=1/2$ del punto de fusión (temperaturas en grados K), mientras que las de Ni y Co se pueden utilizar hasta $T=7-8/10$ del punto de fusión.

Hay materiales intermetálicos del tipo TiAl y Ti₃Al que prometen buenas prestaciones mecánicas a temperaturas elevadas. Tan importante como las fases presentes en los materiales y su estequiometría es el procesado del material, ya que altera la microestructura y por tanto las prestaciones.

Aleaciones base hierro

Las superaleaciones base hierro, son en mayor parte aceros inoxidable auténticos reforzados con carburos (son aleaciones Fe-Ni-Cr).

En general las superaleaciones desarrollan la fuerza de alta temperatura a través del fortalecimiento de la solución sólida, y la resistencia a la oxidación y a la corrosión es proporcionada por elementos como, el aluminio y el cromo.

Por ello estas principales *aleaciones a base de níquel, cobalto, titanio e hierro*, serán tratados particularmente en los siguientes capítulos.

CAPÍTULO 2

ALEACIONES BASE NÍQUEL

2.1. EL NÍQUEL

Aspectos generales

El níquel ocupa el lugar 24 en abundancia entre todos los elementos, constituye como promedio el 0.016% de la corteza terrestre en sus 16 km más cercanos a la superficie. Sin embargo los depósitos de níquel dispersos por todo el mundo tienen gran importancia económica.

Las menas de óxido, por lo común llamadas lateritas, se encuentran principalmente en los trópicos. Del total de yacimientos conocidos, más del 80% consisten en lateritas.

El níquel tiene número atómico 28 y es uno de los elementos de transición de la cuarta serie de la tabla periódica. Su masa atómica es de 58.71, su punto de fusión es de 1,453° C, y su densidad es de 8.902 g/cm³. Entre sus propiedades útiles se encuentra su módulo de elasticidad, propiedades magnéticas, y elevadas conductividades térmicas y eléctricas. Tiene una capacidad de absorción superficial sin formar compuestos estables, convirtiéndolo en un importante catalizador.

Como elemento de aleación, el níquel se utiliza en aceros endurecibles, inoxidable, en aquellos resistentes a la corrosión y para servicios a altas temperaturas (superaleaciones).

Aproximadamente el 10% de la producción anual total del níquel se consume en procesos de electro-recubrimiento (galvanostegia). Este metal puede depositarse electrolíticamente para desarrollar propiedades mecánicas del mismo orden que las de níquel forjado; sin embargo, existen procesos de baño para depositar capas de níquel con una dureza de 425 Brinell. El uso más difundido del níquelado es para proteger contra la corrosión partes del hierro y el acero, así como piezas coladas en matriz (moldes de inyección) a base de zinc utilizadas en la industria automovilística.

2.2. ALEACIONES DE NÍQUEL

El níquel y sus aleaciones pueden *clasificarse* en los siguientes grupos:

- Níquel.
- Níquel y cobre.
- Níquel y hierro.
- Níquel, hierro y cromo.
- Níquel, cromo, molibdeno y hierro.
- Aleaciones pulvimetalúrgicas.

Níquel

Estas aleaciones dependiendo de que tan solo o puro se encuentra el níquel, se pueden clasificar en:

- *Ánodos (99.3% Ni).*
- *Electrolíticos (99.56% Ni).*
- *Níquel forjado comercialmente puro (de 99.6 a 99.97% de Ni).*
- *Níquel carbonilo en polvo y comprimidos (99.95% Ni).*

En estas aleaciones se encuentran: el *Permaniquel* y el *Duraniquel*. La resistencia a la corrosión del níquel los hace particularmente útil para conservar la pureza de los productos en el manejo de alimentos, fibras sintéticas álcalis cáusticos, así como en aplicaciones estructurales, cuando es fundamental dicha estructura.

Otras características de estas aleaciones son sus propiedades magnéticas y magnetoestrictivas, sus elevadas conductividades térmicas y eléctricas, su bajo contenido de gas, y su baja presión de vapor.

Níquel y cobre

Estas aleaciones dependiendo de su contenido de níquel se pueden clasificar en:

- *Aleaciones de bajo contenido de níquel (2 a 13% Ni).*
- *Cuproníqueles (de 10 a 30% Ni).*
- *Aleaciones para monedas (25% Ni).*
- *Aleaciones de resistencia eléctrica controlada (45% Ni).*
- *Aleaciones no magnéticas (hasta 60% Ni).*

- ***Aleaciones de alto contenido de níquel (mas de 50% Ni).*** A estas aleaciones se les denominan ***Monel***, se caracterizan por tener elevada resistencia mecánica, soldabilidad, excelente resistencia a la corrosión, y tenacidad en un amplio intervalo de temperatura. Tienen un excelente rendimiento en la exposición al agua de mar y en condiciones de alta velocidad.

Níquel y hierro

Estas aleaciones se pueden clasificar a su vez en:

- ***Aceros forjados (de 0.5 a 9% Ni).***
- ***Aceros de aleación colados (de 0.5 a 9% Ni).***
- ***Hierros colados de aleación (de 1 a 6 y de 14 a 36% Ni).***
- ***Aleaciones magnéticas (de 20 a 90% Ni).***
- ***Aleaciones no magnéticas (10 a 20% Ni).***
- ***Aceros revestidos de acero inoxidable (de 5 a 49% Ni).***
- ***Superalaciones a base de hierro (de 0.2 a 9% Ni).***
- ***Aleaciones de dilatación térmica controlada.***
 - ***De bajo coeficiente (de 36 a 50% Ni).*** Estas aleaciones tienen bajo coeficiente de dilatación térmica, que pertenece virtualmente a una temperatura menor que la de Curie.
 - ***De dilatación seleccionada (de 22 a 50% Ni).*** Estas aleaciones son denominadas como Nilo 42, Ni-Span- C 902, y una *serie de Incoloy*.

Níquel, hierro y cromo

Estas aleaciones se pueden clasificar a su vez en:

- ***Aleaciones resistentes al calor (de 40 a 85% Ni).***
- ***Aleaciones de resistencia eléctrica controlada (de 35 a 60% Ni).***
- ***Superalaciones a base de hierro (de 0.2 a 9% Ni).***
- ***Superalaciones a base de hierro (de 9 a 26% Ni).***
- ***Aceros inoxidables (de 2 a 25% Ni).***
- ***Aceros martensíticos de alto níquel (18% Ni).***

Níquel, cromo, molibdeno y hierro

Estas aleaciones pueden ser clasificadas en:

- *Aleaciones reforzadas por solución de base níquel (de 40 a 80% Ni).*
- *Aleaciones reforzadas por precipitación de base níquel (de 40 a 90% Ni).*

Estas aleaciones reciben los nombres comerciales de *Hastelloy, Inconel, MAR-M- 252, Rene, Astroloy Udimet, y Waspaloy*. Se crearon principalmente para el servicio en ambientes altamente corrosivos, muchas de ellas poseen buena resistencia a la oxidación, y algunas tienen una resistencia mecánica útil hasta una temperatura de 1093° C.

Aleaciones pulvimetalúrgicas

Estas aleaciones son reforzadas por:

- *Dispersión en base níquel (de 78 a 98% Ni), y*
- *Dispersión de óxido (ODS) ligadas mecánicamente en base níquel (de 69 a 80% Ni).*

Se producen por un proceso de metalurgia de polvos patentado, en el que se usa dióxido de torio como dispersoide. Las propiedades mecánicas son determinadas en gran medida por la forma de procesamiento.

Así, las aleaciones más idóneas para satisfacer muchas de las condiciones extremas (de temperatura, carga y oxidación) son materiales basados en el níquel y conocidos como superaleaciones base níquel.

2.3. SUPERALEACIONES BASE NÍQUEL

Aspectos generales

En los últimos diez años se han realizado avances tecnológicos en el desarrollo de modernos motores de turbinas para aeroplanos, dirigibles y componentes de generación de energía, coincidiendo con significativos logros de ingeniería en el área de la metalurgia de superaleaciones de base níquel. Para ello se han incrementado los niveles de elementos aleantes de tipo refractarios en las superaleaciones base níquel, logrando incrementar sus propiedades mecánicas a elevadas temperaturas, sin embargo, esto produce un importante problema que es la

formación de defectos de granos y particularmente el desarrollo de cadenas de freckles durante la solidificación direccional.

Los freckles (pecas) son defectos macroscópicos que ocurren en varios sistemas de aleación bajo ciertas condiciones de solidificación. Este tipo de defectos se distribuyen usualmente en un modo específico en la fundición. En monocristales (SX) o fundiciones solidificadas direccionalmente (DS), los freckles se encuentran en su mayoría en la superficie de la fundición, sin embargo, también se forman dentro de la misma. En un examen metalúrgico se muestra que los freckles se componen de granos equiaxiales y constituyentes eutécticos. Varios autores han considerado que la formación de freckles en sistemas metálicos es debida a un problema de inestabilidad convectiva hidrodinámica.

En general las superaleaciones contienen grandes cantidades de elementos de aleación con el fin de producir una combinación de alta resistencia a altas temperaturas, a la corrosión, a las vibraciones y a la termofluencia (alta resistencia mecánica a altas temperaturas) a temperaturas superiores a los 1000° C.

Concepto

Las superaleaciones base níquel son aquellas que tienen como elemento principal o en mayor proporción al níquel, conteniendo otras adiciones elementales comunes como son Al, Ti y Cr, que los hacen tener las propiedades adecuadas para resistir las condiciones extremas a altas temperaturas.

Las superaleaciones constan de dos o más fases cristalinas. En el caso de las superaleaciones base níquel son las fases γ y γ' , y presentan un buen comportamiento hasta los 1000° C aproximadamente. Para temperaturas mayores se suelen emplear superaleaciones de cobalto.

Las superaleaciones base níquel pueden ser endurecidas por:

- ***Solución sólida.***
- ***Precipitación***

Las superaleaciones endurecibles por solución sólida, como la Hastelloy X, se utilizan en aplicaciones que requieren sólo una resistencia moderada.

En las aplicaciones más exigentes, como en las secciones calientes de las turbinas de gas, se utilizan superaleaciones endurecibles por precipitación.

La mayoría de las *superaleaciones base níquel* comerciales contienen además de Ni que es la base, a otros elementos como son: Al o Ti (hasta el 8%), Cr (10-20%) que es esencial para la resistencia a la oxidación, Co (5-10%), Y (en pequeña proporción) que ayuda a la cascarilla de óxido a cohesionar al sustrato, y pequeñas cantidades de B, Zr, y C. Otras adiciones comunes son: Mo, W, Ta, Hf, y Nb.

Las *superaleaciones base níquel policristalinas de grano* que contienen elementos de fortalecimiento de frontera como el boro y circonio, que segregan en el límite de grano. La reducción resultante en la energía del límite de grano, se asocia con una mejor resistencia a la fluencia y ductilidad cuando el mecanismo de falla implica decohesión de grano.

También encontramos las *superaleaciones base níquel monocristalinas* que se clasifican en aleaciones de primera, segunda y tercera, que contienen al renio. La segunda y tercera generación contienen alrededor de 3% y 6% en peso de renio, respectivamente. El Re es un complemento muy caro pero conduce a una mejora en la resistencia a la fluencia (Resistencia al creep). Se argumenta que el aumento de la resistencia a la fluencia viene de la promoción del montón de Re, de las particiones en la fase γ y hace la red impura más negativa. Experimentos de resolución atómica han demostrado que el Re se produce como grupos en la fase γ . También se afirma que el Re reduce la tasa de difusión general en estas superaleaciones base níquel.

En términos generales, las adiciones de los elementos en superaleaciones base níquel se pueden clasificar como:

- **Formadores γ** (Elementos que tienden a la partición de la matriz γ). Estos son elementos generalmente del grupo V, VI, VII, y elementos tales como Co, Cr, Mo, W y Fe. Los diámetros atómicos de estos elementos son del 3-13% diferente al níquel (el elemento de la matriz).

- **Formadores γ'** (Elementos de partición de la precipitación γ'). Son elementos que vienen del grupo III, IV, V, y elementos tales como Al, Ti, V, Nb, Ta y Hf. Los diámetros atómicos de estos elementos difieren del níquel por 6.18%.
En resumen, los elementos como el Co, Fe, Cr, Nb, Ta, Hf, Mo, W, V, Ti y Al son solución sólida reforzantes, tanto en γ y γ' .
- **Formadores de carburo.** Estos elementos son principalmente C, Cr, Mo, W, Nb, Ta y Ti. Los carburos tienden a precipitar en los límites de grano, y por lo tanto, reducen la tendencia de deslizamiento del límite de grano.
- **Elementos que separan a los límites de grano.** Los elementos principales que separan a los límites de grano son B, C, y Zr. Sus diámetros atómicos son 21-27% diferentes que las de Ni.

La figura 2.1 muestra los efectos de los elementos aleantes en superaleaciones base níquel. La "M" en $M_{23}C_6$ representa una mezcla de átomos del metal.

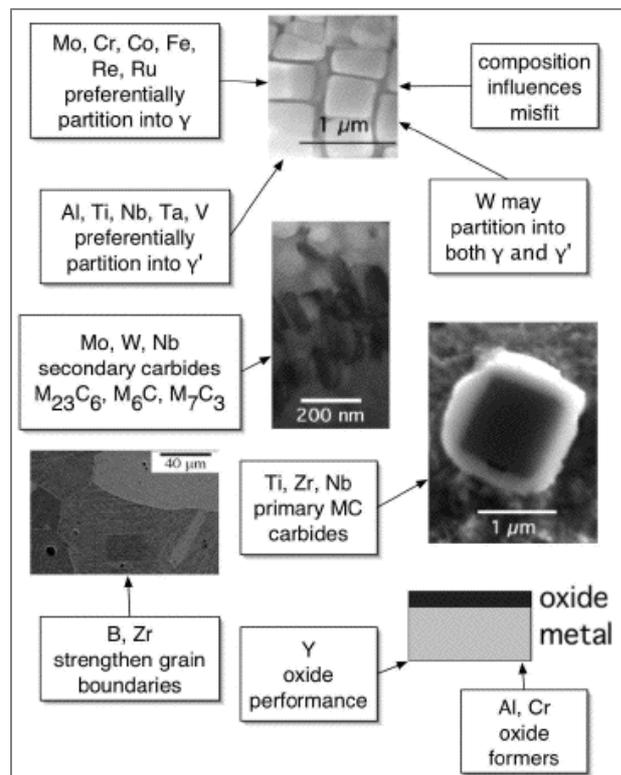


Figura 2.1. Efectos de los elementos aleantes en superaleaciones base níquel.

Las *principales fases* presentes en la mayoría de las superaleaciones base níquel son las siguientes:

Gamma (γ): Es la matriz de la aleación, y tiene una estructura cristalina cubica centrada en las caras (FCC) a base de níquel. Por lo general contiene un alto porcentaje de elementos por solución sólida como Co, Cr, Mo, Fe y W.

Gamma Prima (γ'): La fase gamma prima en superaleaciones base níquel es Ni_3 (Al, Ti) y es una fase de precipitación. La γ' precipita homogéneamente en toda la matriz γ y da estabilidad. La γ' es muy dúctil y por lo tanto da fuerza a la matriz sin reducir la resistencia a la fractura de la aleación. El Aluminio y el titanio son los principales componentes y se añaden en cantidades y proporciones respectivas, para precipitar una fracción de alto volumen en la matriz. En algunas aleaciones modernas, la fracción de volumen de la γ' precipitada, es alrededor del 70%.

Carburos: El carbono añadido a los niveles de 0.05-0.2%, se combina con elementos reactivos y refractarios como el titanio, el tantalio y el hafnio, para formar carburos como el $M_{23}C_6$ y M_6C que tienden a formarse en el límite de grano durante el tratamiento térmico. Estos carburos tienen una estructura cristalina FCC. En las superaleaciones con los límites de grano, los carburos son beneficiosos para aumentar la fuerza de ruptura a alta temperatura.

Fases que separan a los límites de grano: Se trata generalmente de fases indeseables, frágiles que se pueden formar durante el tratamiento térmico. Estas fases se han caracterizado por poseer una estructura topológicamente apretada y afectan negativamente las propiedades mecánicas como lo es la resistencia a la fluencia; además pueden actuar como iniciadores de grietas debido a su naturaleza quebradiza.

Hay, por supuesto, los límites a las concentraciones que se pueden agregar sin inducir precipitación. Es particularmente importante evitar ciertas fases de fragilización como Laves y Sigma. No hay reglas simples que rigen la concentración crítica, lo mejor es calcular o medir la parte correspondiente en un diagrama de fase.

2.3.1. Estructura cristalina

En una aleación convencional, todos los átomos están distribuidos según una estructura cristalina particular; es decir, todos los planos de átomos están colocados según una secuencia determinada. Corrientemente, una muestra consta de muchos granos, o cristales individuales, unidos entre sí. Las estructuras cristalinas de los diferentes granos no están mutuamente alineadas, pero sí lo están los átomos de los distintos cristales, siguiendo siempre la misma pauta.

Por su parte, los átomos de las superaleaciones están distribuidos en dos o más fases, o tipos de disposición. En las *superaleaciones base níquel*, los solutos esenciales son el aluminio y / o titanio, con una concentración total que es típicamente menos del 10 por ciento atómico, causante de sus excelentes propiedades. Esto genera una microestructura de equilibrio de dos fases de microcristales casi-cúbicos, la fase gamma prima (γ') y la fase gamma (γ). Los cristales, diminutos y normalmente cúbicos de la fase gamma prima, se incrustan en una matriz formada por la fase gamma, figura 2.2.



Figura 2.2. Microestructura de la fase gamma prima (γ') incrustada en una matriz de fase gamma (γ).

- *Fase gamma (γ):* solución sólida centrada en las caras que actúa como matriz en la que la γ' precipita.

- Fase gamma prima (γ'): dispersión de precipitados ordenados intermetálicos, responsable de la gran resistencia de las superaleaciones. Las fórmulas estequiométricas de esta fase son:

- $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$.
- Ni_3Al .
- Ni_3Ti .

Por ejemplo, en la fase gamma prima de la superaleación níquel-aluminio, existen tres átomos de níquel por cada átomo de aluminio. En la fase gamma, cada tipo de átomo puede ocupar cualquier sitio, figura 2.3.

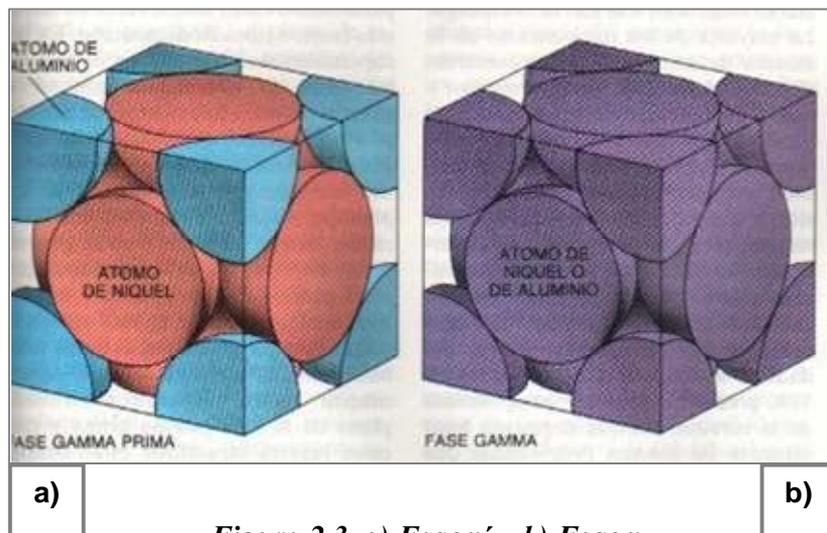


Figura 2.3. a) Fase γ' b) Fase γ .

En cierto modo se puede considerar a estas aleaciones como un material compuesto, formado por micropartículas metálicas dispersas en una matriz metálica.

Así, la γ' es en gran parte responsable de la resistencia a temperatura elevada del material y de su increíble resistencia a la fluencia. La cantidad de γ' depende de la composición química y de la temperatura, como se ilustra en los diagramas de fase ternarios que se muestran en la figura 2.4.

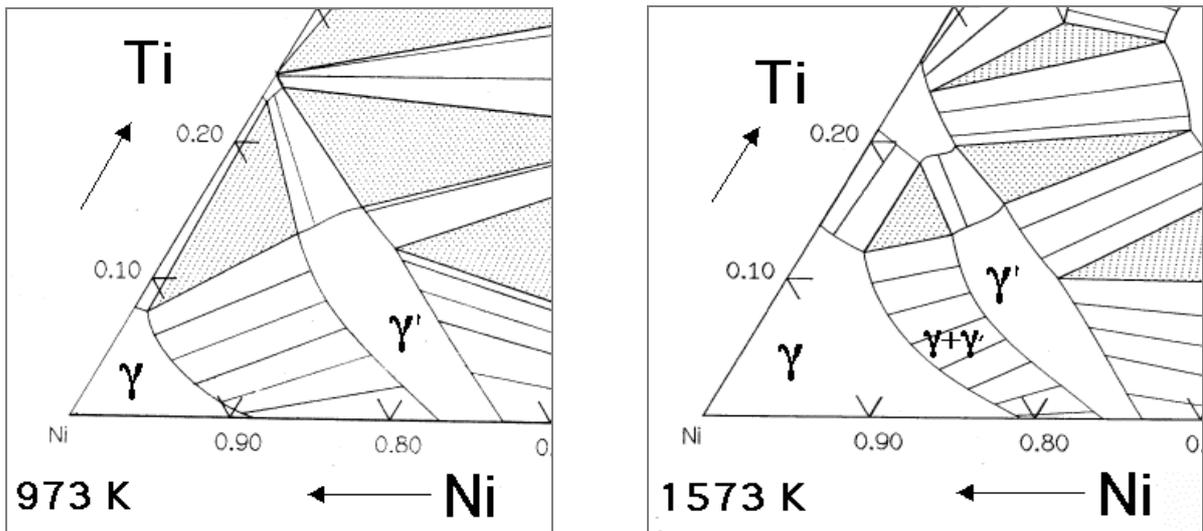


Figura 2.4. Diagramas de fase ternarios de superaleaciones base níquel.

Los diagramas de fase ternario Ni-(Al,Ti) muestran el campo de fase γ y γ' . Para una composición química dada, la fracción de γ' disminuye a medida que se aumenta la temperatura. Este fenómeno se utiliza para disolver el γ' a una temperatura lo suficientemente alta (*una solución para el tratamiento*), seguido por el envejecimiento a una temperatura inferior a fin de generar una dispersión uniforme y fina de fortalecimiento de precipitados.

La fase γ es una solución sólida con una red cúbica centrada en las caras y una distribución aleatoria de los átomos de los diferentes elementos, figura 2.5.

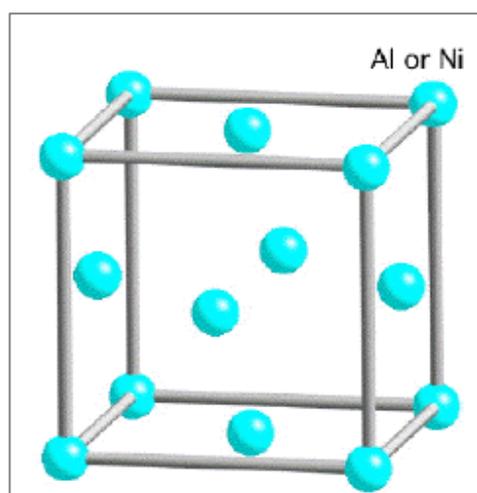


Figura 2.5. Estructura cristalina de γ .

Por el contrario, la fase γ' tiene una red cúbica primitiva en la que los átomos de níquel se encuentran en los centros de la cara de la celda y los átomos de aluminio o el titanio en las esquinas de la misma. Este arreglo atómico tiene la fórmula química de Ni_3Al , Ni_3Ti o $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$. Sin embargo, como se puede ver en la $(\gamma + \gamma') / \gamma'$, el límite de la fase de las secciones ternarias del diagrama de fase Ni-(Al,Ti), la fase no es estrictamente estequiométrica. No puede existir un exceso de vacantes en una de las subredes, ya que conduce a desviaciones de la estequiometría, como alternativa, algunos de los átomos de níquel podrían ocupar los sitios de Al y viceversa.

La clave de la resistencia de las superaleaciones base níquel, reside en la presencia de cristales de fase gamma prima, figura 2.6.

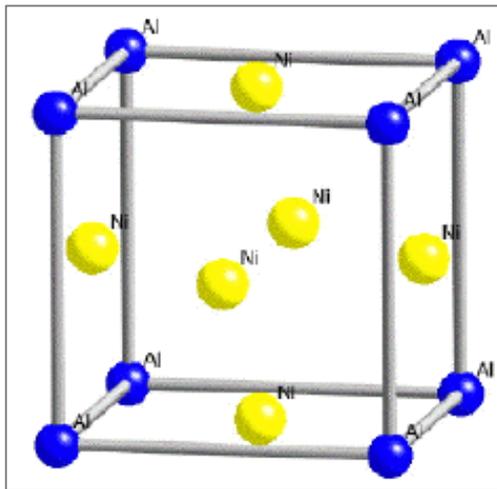


Figura 2.6. Estructura cristalina de γ' .

La principal diferencia entre las dos fases radica en que los átomos en la fase γ' están mucho más ordenados que en la fase γ . Es decir, si bien es verdad que los planos atómicos siguen la misma disposición en ambas fases, también es cierto que los átomos de níquel ocupan lugares específicos en cada plano de la fase gamma prima y que otros lugares específicos están ocupados por los átomos del otro metal, que suele ser aluminio. Así, cuando un semiplano de dislocación se presenta, este se desplaza ocupando el lugar del vecino, y ciertas posiciones atómicas que en el semiplano original estaban ocupadas por átomos de aluminio

lo están ahora por átomos de níquel, y viceversa. Esta disposición atómica tiene mayor energía interna que la fase gamma prima sin deformar, dificultando el desplazamiento de una dislocación a través de la fase gamma prima. Las dislocaciones se desplazan a través de la fase gamma prima por pares; una segunda dislocación debe moverse a través del material suprimiendo el desorden causado por la primera, conllevando ello, a que las dislocaciones les resulte difícil penetrar la fase atómica ordenada γ' , en parte debido a que el orden interfiere con el movimiento de la dislocación, y por lo tanto, resistan la deformación y sean más rígidas que una aleación convencional.

Se observa entonces, que ambas fases presentan una estequiometría Ni_3Al , pero la estructura cristalina de la fase γ' contiene átomos de Ni y Al ordenados en la celda unidad, mientras que en la fase γ éstos átomos están desordenados. Dado que tanto las fases de una red cúbica con los parámetros de red similar, la γ' se precipita en una relación de orientación de cubo del cubo con la γ . Esto significa que los bordes de las celdas son exactamente paralelos a los bordes correspondientes de la fase γ . Además, debido a que sus parámetros de red son similares, la γ' es coherente con la γ cuando el tamaño de precipitado es pequeña.

El pequeño desajuste que se da entre las redes γ y γ' es importante por dos razones. En primer lugar, cuando se combina con la relación de orientación γ / γ' , garantiza una baja energía interfacial. El mecanismo ordinario de engrosamiento precipitado es impulsado totalmente por la minimización de la energía interfacial total. Una interfaz coherente o semicoherente, por lo tanto, hace la microestructura estable, una propiedad que es útil para aplicaciones de temperatura elevada.

La magnitud y el signo del desajuste también influyen en el desarrollo de la microestructura bajo la influencia de una tensión a temperaturas elevadas. El desajuste se dice que es positivo cuando la γ' tiene un parámetro de red mayor que γ . El desajuste puede ser controlado mediante la alteración de la composición química, en particular el aluminio en relación al titanio. Una impureza negativa estimula la formación de montones de γ' , esencialmente las capas de la fase en una dirección normal a la tensión aplicada. Esto puede ayudar a reducir la velocidad de fluencia si el mecanismo consiste en el ascenso de las dislocaciones a través del engrosamiento precipitado. Por ello, la gran dureza que presentan las superaleaciones base níquel se debe a las

dislocaciones que se anclan en la interfase de los dos constituyentes (se pueden mover a través de la fase γ , pero se anclan cuando llegan a un microcristal de fase γ'). Generalmente además de Ni y Al, se añade Cr para proteger la pieza de la corrosión, y Ti y W para aumentar más la dureza. Al enfriar la mezcla líquida, primero solidifica la fase γ (punto de fusión mayor) y al enfriar la fase sólida aparece la γ' segregada dentro de la matriz metálica. El tamaño final de los microcristales de fase γ' dependen de la velocidad de enfriamiento y puede llegar a ser el 60 % del volumen de la aleación. A elevada temperatura, los cristales de la fase γ' tienden a crecer por lo que se calientan a temperatura más alta que la de operación y se envejecen a una temperatura inferior. Cuando estas superaleaciones son muy duras, también son bastante frágiles. Esto significa que al obtener estos materiales se separan las fases, ya que las fuerzas de cohesión no son muy altas. Un 0.02 % de B en las superaleaciones base níquel mejora mucho la mecanización y se pasa de frágil a dúctil. La resistencia máxima se consigue a 850° C, y la resistencia mecánica es útil hasta los 1000° C. Los elementos cercanos a la cámara de combustión de una turbina de gas (turborreactor) de avión, se fabrican de esta superaleación.

En la figura 2.7 se muestra imagen obtenida mediante transmisión electrónica de barrido (SEM), donde se puede observar un ejemplo de la gran proporción de γ' (por lo general por encima de 0.6) que contienen las palas de una turbina diseñada para aeromotores (turbinas), donde el metal experimenta temperaturas de más de 1000 ° C. Sólo es necesaria una pequeña fracción (0.2) de γ' cuando la aleación se ha diseñado para el servicio a temperaturas relativamente bajas (750 ° C) y donde se utiliza la soldadura para la fabricación.

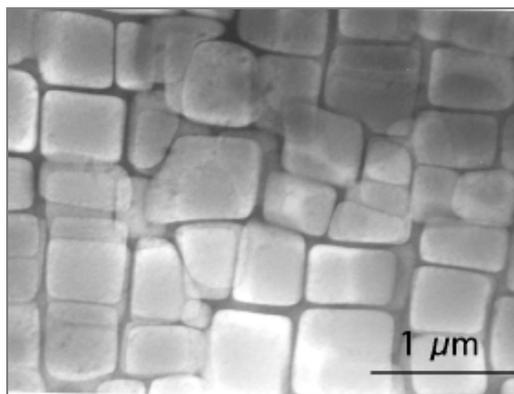


Figura 2.7. Microscopía electrónica de barrido que muestra una gran fracción de partículas γ' cuboidal en una matriz γ . Ni-9.7Al-1.7Ti-17.1Cr-6.3Co-2.3W en%.

En la figura 2.8 también se muestra una imagen obtenida con SEM, donde se puede observar un ejemplo de una pequeña fracción de partículas γ' esférica en una matriz γ . Al mismo tiempo se ilustran partículas de carburo en el grano límite en diagonal desde la parte inferior izquierda a la parte superior derecha.

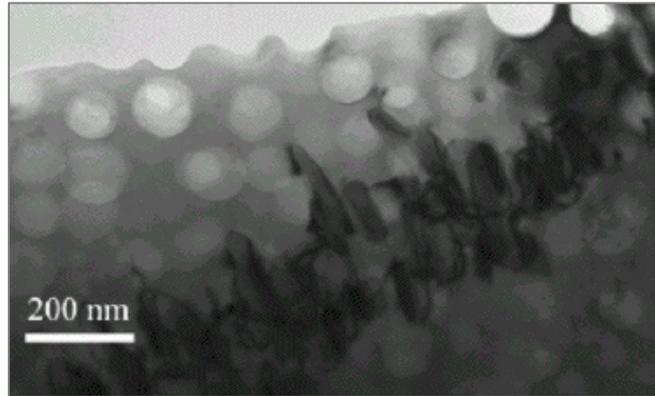


Figura 2.8. Fotomicrografía obtenida con SEM que muestra una pequeña fracción de partículas γ' esférica en una matriz γ . Ni-20Cr-2.3Al-2.1Ti-5Fe-0.07C-B-0.005W en %. También ilustra en diagonal $M_{23}C_6$ partículas de carburo en el grano límite.

Cuando se requiere una mayor resistencia a bajas temperaturas (*por ejemplo*, discos de turbina), las aleaciones pueden reforzarse mediante una nueva fase conocida como γ'' . Esta fase tiene lugar en las superaleaciones base níquel con una importante acumulación de niobio (Inconel 718) o vanadio, la composición de la γ'' es entonces Ni_3Nb o Ni_3V . Las partículas de γ'' son en forma de discos.

La estructura cristalina de la fase γ'' se basa en una red tetragonal centrada en el cuerpo con una disposición ordenada de átomos de níquel y niobio. La resistencia se produce tanto por un endurecimiento de la coherencia, y el mecanismo para el endurecimiento. Los parámetros de red de γ'' son aproximadamente $a = 0.362$ nm y $c = 0.741$ nm, figura 2.9.

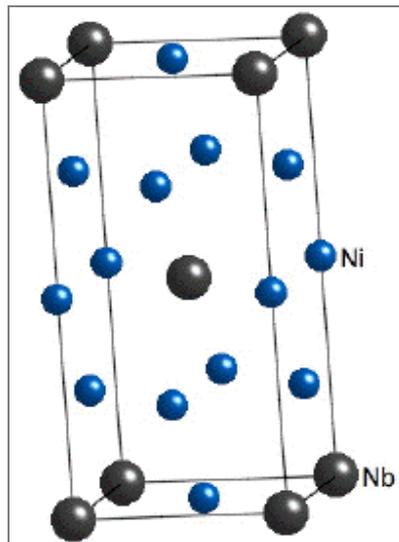


Figura 2.9. Estructura cristalina de la fase γ' .

En conclusión, las superaleaciones base níquel, en particular las que poseen elevada proporción de fase gamma prima, aumentan su resistencia a temperaturas elevadas, consiguiendo la máxima hacia los 850° C. La mayoría de las modernas superaleaciones base níquel mantienen su resistencia mecánica útil hasta temperaturas del orden de los 1000° C. Sin embargo, las superaleaciones base níquel presentan limitaciones a temperaturas muy elevadas; por este motivo, los componentes de la propia cámara de combustión, donde se alcanzan temperaturas del orden de los 1100° C, se construyen con *aleaciones de cobalto*, tema que será discutido en el siguiente capítulo.

2.3.2. Características o propiedades de las superaleaciones base níquel

Las superaleaciones base níquel presentan las siguientes propiedades importantes:

- Buena resistencia mecánica a la tracción a temperaturas elevadas.
- Excelente resistencia a la corrosión y a la oxidación en caliente.
- Buena resistencia a fatiga térmica con alto y bajo número de ciclos.
- Son rígidas y resisten la deformación.
- Presentan una gran dureza.
- Alta resistencia a las vibraciones.
- Alta conductividad eléctrica y propiedades magnéticas.

Las superaleaciones base níquel tienen como objeto mejorar las características de tracción, fluencia, fatiga y estabilidad superficial del material.

Microestructura y tratamiento térmico

Para optimizar las propiedades (a menudo de un sistema revestimiento-metal) de las superaleaciones base níquel se requieren ser tratados térmicamente a dos temperaturas diferentes dentro del campo de la fase γ / γ' . En el primer tratamiento térmico, la temperatura más alta precipita las partículas más gruesas de γ' . En el segundo tratamiento, la temperatura más baja conduce a una precipitación más. Esta última precipitación conduce a una más fina dispersión secundaria de γ' . El resultado neto es una distribución bimodal de γ' , como se ilustra en la figura 2.10.

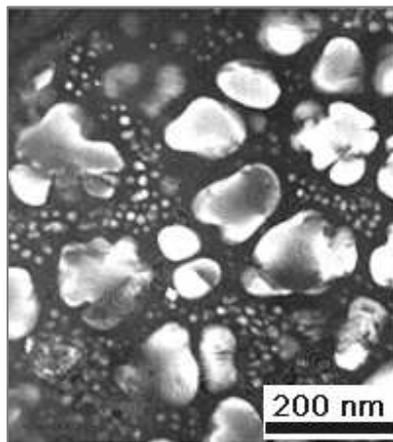


Figura 2.10. Distribución bimodal de γ' .

La temperatura de solución del tratamiento térmico no sólo determina la cantidad de γ' que se disuelve, sino también el tamaño de grano de γ . El grano se vuelve más grueso, si todos los cristales de γ' se disuelven. La aleación de la figura 2.11 de la izquierda ha sido tratado térmicamente a una temperatura *sub-solvus*, mientras que en la aleación de la figura 2.12 de la derecha ha sido tratado una temperatura *super-solvus*.

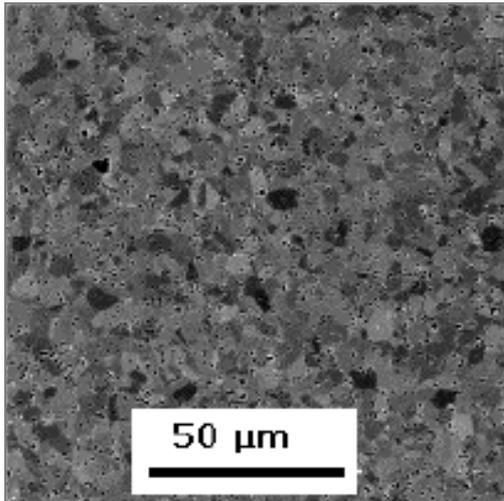


Figura 2.11. Aleación a una temperatura sub-solvus.

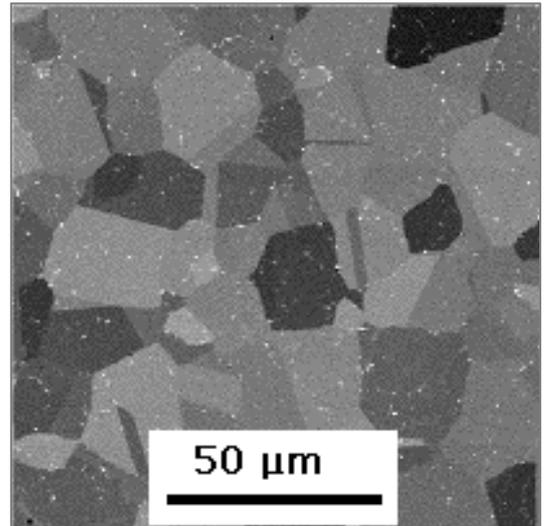


Figura 2.12. Aleación a una temperatura super-solvus.

2.3.3. Métodos de procesado de superaleaciones base níquel

Las técnicas o métodos de procesado por las cuales se pueden llevar a cabo la fabricación de superaleaciones base níquel son las siguientes:

- Fundición convencional.
 - Moldeo por inversión o cera perdida.
 - Poliestireno expandido.
- Efecto superplástico.
- Solidificación rápida.
- Solidificación direccional.

Fundición convencional

Una superaleación base níquel normalmente se fabrica fundiendo una pieza de níquel y agregando aluminio. Normalmente, se agrega cierto porcentaje de cromo para proteger de la corrosión al producto final, y pequeñas cantidades de otros metales, así como titanio y tungsteno, para aumentar aún más la dureza. Luego, la mezcla líquida se enfría, apareciendo una masa de fase gamma de 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

enfriamiento posterior en su estado sólido, se precipitan pequeños cubos de fase gamma prima dentro de la matriz de fase gamma, figura 2.13.

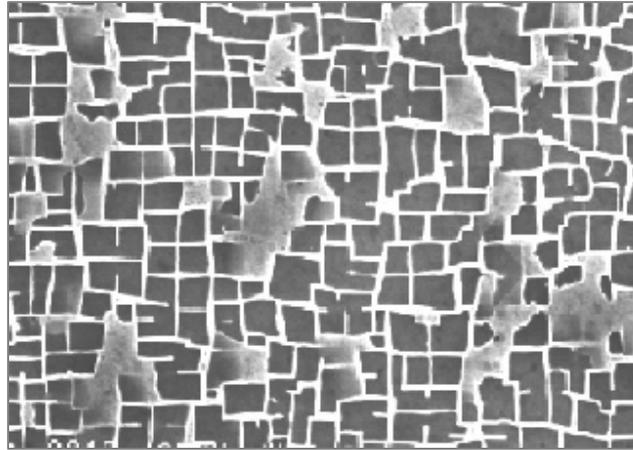


Figura 2.13. Partículas de la fase γ' dispersas en la fase γ .

El tamaño final de las partículas de gamma prima se controla variando la velocidad de enfriamiento del material.

Las piezas de las superaleaciones base níquel presentan la máxima resistencia mecánica cuándo contienen una elevada proporción (cerca del 60 por ciento en volumen) de diminutos cristales de gamma prima. Sin embargo, cuando las piezas en servicio se exponen a elevadas temperaturas, los pequeños cristales de gamma prima tienden a crecer. Para conseguir ciertas propiedades mecánicas a elevada temperatura y mantenerlas a pesar de su exposición a muchos ciclos de uso, se han ideado complejos tratamientos térmicos.

Un procedimiento típico consiste en calentar la aleación a una temperatura relativamente elevada, enfriarla rápidamente y luego envejecerla a baja temperatura, con el fin de conseguir el adecuado tamaño y la oportuna distribución de los cristales de gamma prima.

En los últimos años, ha despertado gran interés en metalurgia, cierta modificación de las superaleaciones de níquel-aluminio. Desde hace algún tiempo, se sabe que la resistencia mecánica de la fase gamma prima pura de níquel-aluminio crece drásticamente con la temperatura. Durante décadas, este efecto ha intrigado a los investigadores, pero los intentos de sacar partido de esta propiedad se han visto sistemáticamente frustrados por otra propiedad de la fase gamma prima relacionada con su dureza: su extrema fragilidad.

Al fabricar una muestra pura de fase γ' de níquel-aluminio, los granos individuales, o

cristales, de gamma prima mantienen dura la muestra, pero los granos se separan de sus vecinos por el límite de grano (las fronteras entre granos) y la muestra tiende a pulverizarse.

En 1979, Kiyoshi Aoki y Osamu Izumi, de la Universidad de Tohoku, descubrieron que la adición de pequeñas cantidades de boro a la muestra evitaba su desmoronamiento. El boro tiende a unirse a los límites de los granos y facilita el deslizamiento de un grano respecto al vecino sin perder cohesión. El mecanismo exacto de este fenómeno se desconoce y es objeto de activa investigación. Un 0.02 por ciento en peso de boro es capaz de transformar la fase gamma prima del níquel-aluminio de frágil en dúctil.

Moldeo por inversión o cera perdida

El proceso de moldeo por inversión consiste en una caja refractaria donde se mete el modelo hecho de cera, para que posteriormente la caja se caliente, de manera que la cera se derrita y se plasme el molde en la misma caja. Luego, entra el material fundido y se llena la cavidad, formándose así la pieza. Por último, se rompe la caja refractaria dejando solo la pieza fundida.

Esta técnica de procesado presenta las siguientes características:

- Realiza piezas en una sola operación con un mínimo de gasto de material y de energía.
- Las piezas no necesitan un maquinado posterior.
- Puede fabricar cualquier pieza complicada y de cualquier tamaño.
- Los materiales más duros de trabajar son los primeros candidatos para este tipo de fundición.

Las ventajas del moldeo por inversión son:

- Fabricación de piezas de cualquier forma, tamaño y material.
- Excelente tolerancias.
- No requiere posicionamiento de la pieza, ni salidas para desmoldeo.
- Uniformidad en las piezas.
- Económicamente rentable para una gran cantidad de piezas.

Poliestireno expandido

Es muy similar al proceso anterior, solo que aquí se utiliza arena refractaria compactada en vez de una caja refractaria. En este proceso se obtienen los modelos de poliestireno, revisando muy bien que no tengan defectos que se reproduzcan en las piezas. Luego, se recubre el modelo con

arena refractaria compactada. Posteriormente, se vacía el material en la arena para que la temperatura evapore el poliestireno. Por último, el material llena la cavidad y toma la forma de la pieza.

Las ventajas de la fundición con poliestireno expandido son:

- Evita el almacenamiento de modelos no permanentes.
- Permite obtener tolerancia que se ajustan bien a las requeridas.
- Permite el reciclaje de la arena ya utilizada.
- No es necesaria la utilización de machos.
- Los modelos se pueden fabricar uniendo partes más sencillas.
- Mejor acabado superficial que la fundición en arena.
- Libertad de diseño.

Efecto superplástico

A principios de los años sesenta, se descubrió también otra nueva técnica de fabricación de superaleaciones; por medio del *efecto superplástico*. Ciertas aleaciones son susceptibles de experimentar deformaciones de su longitud inicial del orden del mil por ciento sin romperse, después de haber conseguido afinar mucho el tamaño de grano. La razón de este comportamiento radica en que los granos muy pequeños se deforman lentamente y deslizan unos respecto a otros sin perder su mutua cohesión. Así, las aleaciones superplásticas se pueden forjar en formas complejas, eliminando muchas etapas de mecanizado y de terminación.

En 1963, Joseph B. Moore y Roy L. Athey, de Pratt & Whitney, descubrieron que ciertas superaleaciones base níquel con grano muy pequeño podían fabricarse gracias a su superplasticidad. El pequeño tamaño de grano necesario se consigue deformando vigorosamente el material a una temperatura por debajo mismo de la que permite la cristalización de la fase gamma prima. Es fundamental la presencia de partículas de gamma prima para evitar la recristalización de la matriz de fase gamma y, por tanto, el crecimiento de los granos. Una vez que se ha llevado el material a la condición superplástica es posible deformarlo, como si fuera una masilla, en la forma prevista. Después, las piezas así deformadas se tratan térmicamente, se enfrían rápidamente y se envejecen, para conseguir una microestructura más resistente y estable a elevada temperatura que la ofrecida por granos

pequeños de la estructura superplástica. Las aleaciones fabricadas superplásticamente son menos costosas de mecanizar y, cuando se obtienen a partir de *polvos finos prealeados*, exhiben una notable uniformidad química y microestructural. Esta característica repercute en el logro de mejores propiedades en las aleaciones forjadas, particularmente en la resistencia a la fatiga de baja frecuencia. Otra ventaja de tal microestructura homogénea es que, mediante el recocido del gradiente, se transforma en una estructura columnar direccionalmente alineada; el procedimiento consiste en desplazar lentamente el elemento calefactor a lo largo de la muestra en una determinada dirección. La microestructura resultante muestra un parecido superficial con la obtenida por solidificación direccional, pero tiene un grano más pequeño, es más homogénea y puede recrystalizar en una amplia variedad de texturas.

Los polvos prealeados pueden moldearse por dos técnicas:

- *Compactación isostática en caliente y*
- *Aleación mecánica.*

Compactación isostática en caliente

Los *polvos prealeados* para las superaleaciones base níquel pueden moldearse por el procedimiento conocido como *compactación isostática en caliente*. Primero, se empaquetan en un molde variable de paredes delgadas, que es una versión geométrica aumentada de la forma final prevista. Después, el molde se coloca en un horno de vacío a elevada temperatura, para eliminar las moléculas absorbidas de gas; luego, se sella el molde y se introduce en una prensa especial. Aquí, el molde se expone a elevadas presiones y temperaturas, reduciendo sus dimensiones y soldando los polvos entre sí (sinterización). Finalmente, se arranca el molde y la pieza obtenida se mecaniza a su forma final.

La compactación isostática en caliente no sólo sirve para fabricar polvos en una determinada forma, sino que también se aplica para subsanar defectos en piezas premoldeadas y para rejuvenecer alabes del estator y del rotor de una turbina, así como otros componentes desgastados por el uso. Los alabes del estator y del rotor que, tras muchas horas de funcionamiento, muestran microporos en los límites de los granos, se rejuvenecen por compactación en caliente, ya que de este modo el metal se suelda por presión cerrando los microporos. La compactación isostática en caliente permite también construir un componente

a partir de secciones de distintas aleaciones. Por ejemplo, se puede fabricar un disco de turbina por compresión isostática de dos tipos de polvos aleados; los polvos utilizados para construir los bordes exteriores deben ser de una aleación muy resistente a la termofluencia, mientras que los utilizados para las zonas próximas al eje podrían ser de una aleación susceptible de aguantar las mayores cargas.

Aleación mecánica

A menudo, interesa distribuir homogéneamente pequeños porcentajes de un metal dentro de otro. La técnica de ***aleación mecánica***, introducida, en 1970, por John S. Benjamín, de la International Nickel, se ha convertido en un procedimiento eficaz para conseguir este tipo de mezcla de polvos de partículas prealeados. Los materiales a aleación, se introducen, en forma de pequeñas partículas, en un molino de bolas de gran velocidad, que consiste esencialmente en un conjunto de agitadores y un gran número de pequeñas bolas de acero inoxidable. Los agitadores giran rápidamente, propiciando colisiones de las bolas entre sí y con las pequeñas partículas metálicas. De este modo, las partículas se sueldan en frío entre sí, formando aglomerados metálicos de mayores dimensiones, que posteriores colisiones con las bolas vuelven a desmoronar y a soldar repetidamente. El resultado final es un polvo de partículas muy pequeñas y homogéneas. A continuación, este polvo se compacta y se sintetiza por extrusión en caliente; finalmente, se procesa y se recristaliza direccionalmente.

Una aplicación típica de la aleación mecánica es la dispersión de pequeñas partículas de óxido en una matriz de aleación de níquel o de cobalto. Las partículas de óxido anclan las dislocaciones, como lo hacen los cristales de γ' en una superaleación de níquel, endureciendo el material pero sin fragilizarlo. Al contrario que los cristales de gamma prima en las superaleaciones base níquel, las partículas de óxido no crecen por calentamiento y, por tanto, las aleaciones endurecidas por dispersión de óxidos son más resistentes a elevada temperatura que las aleaciones endurecidas por pequeños cristales dentro de una matriz. A las aleaciones endurecidas por dispersión de óxidos les espera un futuro brillante.

Solidificación rápida

Recientemente ha aparecido una nueva técnica de fabricación de superaleaciones, la solidificación rápida, gracias a la cual los metales fundidos se enfrían a velocidades de hasta un

millón de grados por segundo. Las superaleaciones enfriadas rápidamente tienden a ser bastante homogéneas, pues los cristales no disponen de tiempo suficiente para nuclear y crecer. Frecuentemente, los materiales que tienen microestructura homogénea presentan resistencia mecánica y puntos de fusión altos de salida. Los cristales de la segunda fase (tales como los de la gamma prima), que precipitan en el seno de la matriz, son pequeños, están homogéneamente distribuidos y aumentan la resistencia de la aleación porque obstaculizan el desplazamiento de las dislocaciones. Estos cristales frenan también el desplazamiento de los límites de los granos de la propia aleación, impidiendo el crecimiento de los granos en las aplicaciones a elevada temperatura. Además, la solidificación rápida puede dar lugar a fases metaestables: fases cristalinas o cuasi cristalinas dotadas de cierta estabilidad, aunque menor que la de las fases de las aleaciones obtenidas por enfriamiento lento. Las fases metaestables ofrecen interesantes propiedades que empiezan a explotarse con detenimiento.

Existen diversos procedimientos para enfriar rápidamente los metales fundidos, entre los cuales encontramos:

Rociar al metal líquido

Este procedimiento sencillo consiste en rociar el metal líquido y proyectar las gotas contra una superficie fría.

Atomización

Este procedimiento consiste en enfriar las pequeñas gotas del metal líquido rociándolas en una atmósfera de gas inerte extremadamente frío. La empresa Pratt & Whitney ha desarrollado esta técnica como sistema propio: dejar caer un delgado chorro de metal fundido sobre un disco que gira a gran velocidad, el cual transforma el chorro en gotitas y las proyecta a través de una atmósfera fría, figura 2.14.



Figura 2.14. Chorro de metal fundido sobre un disco a gran velocidad, que transforma el chorro en gotitas proyectándolas a una atmósfera fría.

Este procedimiento produce polvos pequeños de aleación enfriada rápidamente, que se pueden consolidar por extrusión en caliente para obtener un producto homogéneo.

Llama de plasma

General Electric combina la fusión, la compactación y fabricación en un solo proceso; en él, mediante una llama de plasma, la aleación enfriada rápidamente se aplica a modo de delgada capa sobre la superficie de un componente preexistente. Así se crea un recubrimiento ideal para los componentes de la cámara de combustión de las turbinas, puesto que la aleación depositada opone resistencia a la fatiga térmica.

Vitrificado con láser

Es una de las *técnicas más versátiles de enfriamiento rápido*, utiliza láseres con elevada densidad de potencia. El haz láser se proyecta rápidamente sobre la superficie del material, formando finas capas de material fundido. Estas capas delgadas se enfrían cerca de la masa del sólido que no ha sido afectada por el láser. Por medio de esta técnica se consiguen velocidades de enfriamiento que alcanzan los 10 millones de grados por segundo. La ventaja de este procedimiento, estriba en que se modifica la microestructura superficial de un material sin afectar al substrato. Es posible añadir capas de mayor espesor de material enfriado

rápidamente de manera gradual, depositando de forma continua polvos aleados y aplicando láser alternativamente. Si el control del láser es suficientemente versátil, se obtienen capas de formas muy complejas. La aplicación potencial del vitrificado por láser incluye el endurecimiento de los extremos de los alabes de las turbinas y la construcción de los filos de las partes giratorias.

Recubrimientos y unión de metales

Los recubrimientos de especial importancia, permiten usar un metal con las propiedades mecánicas precisas, aunque no resista los ambientes corrosivos. Con las nuevas técnicas de unión se producen componentes formados por soldadura dura de muchas capas delgadas unidas. Una aplicación de esta técnica es la fabricación de alabes de turbinas refrigeradas por aire, provistos de pequeños canales por donde éste pasa. Tales alabes se fabrican en series de segmentos delgados, taladrando la sección del canal por fotoataque. Los segmentos delgados se ensamblan y se unen por difusión en estado sólido o por soldadura dura, situando entre dos segmentos normales una fina película de parecida composición, pero con punto de fusión ligeramente inferior. Los segmentos se compactan entre sí en vacío y a elevada temperatura; el material de enlace se difunde por las superficies en contacto, uniéndolas.

Solidificación direccional

El concepto de solidificación direccional se inició con los trabajos realizados, en 1960, por técnicos de General Electric. Con ellos demostraron que la resistencia a la termofluencia de ciertas superaleaciones de níquel puede aumentar drásticamente si en el momento de la obtención de estas aleaciones, se opera de modo que los límites de los granos se orienten paralelamente a un esfuerzo aplicado uniaxialmente, tal como sería el caso de la fuerza centrífuga existente en los alabes de una turbina y debida a la elevada velocidad de rotación. Las muestras ofrecen menor tendencia a deformarse o a agrietarse si los límites de los granos no son perpendiculares al esfuerzo principal.

En 1967, en la empresa aeronáutica Pratt & Whitney Aircraft, se demostró que la resistencia a la tracción de las superaleaciones de níquel aumentaba cuando no desaparecían los límites de grano como ocurre en un monocristal y la muestra se orientaba según la dirección específica de la fuerza aplicada. Estos descubrimientos sirvieron para que Pratt & Whitney

desarrollara nuevas técnicas para producir alabes de turbinas con notables propiedades, ya que entonces un *alabe convencional de turbina se fabricaba colando el metal fundido dentro de un molde cerámico* (que se ha precalentado a una temperatura próxima a la mitad de su punto de fusión) y dejándolo solidificar. El metal líquido empieza a cristalizar en las zonas en contacto con el molde; el resultado final es una fina *textura policristalina* con pequeños granos individuales orientados al azar.

Sin embargo, en la *solidificación direccional*, la mayor parte del molde se precalienta a temperaturas próximas al punto de fusión del metal, la sección inferior del molde se rodea con una placa de cobre enfriada con agua: es el "plato frío". El molde se mantiene en una "zona caliente" cubierta por una campana aislante térmica. El metal líquido se cuela en el molde y empieza a solidificar en el plato frío. En este plano refrigerante normalmente se nuclean y crecen muchos cristales. Luego, el molde se hace descender lentamente desde la campana aislante, sacándolo de la zona caliente. Así, los cristales formados en el fondo del molde crecen en largas columnas. El resultado final es un alabe de turbina constituido por *varios cristales, largos y columnares*, con parecida orientación y unidos entre sí a través de planos verticales. Todos los límites de grano están orientados aproximadamente en la dirección con que los alabes serán solicitados por la fuerza centrífuga.

Un procedimiento similar al descrito produce *alabes sin límites de grano (monocristalino)*. Un alabe que sea monocristalino se fabrica colando el metal líquido en un molde que tiene un cuello de botella de forma espiral entre el plato frío y la parte superior del molde. Al sacar el molde de la campana aislante, empiezan a formarse cristales columnares, pero el cuello de botella es tan estrecho que sólo permite que uno de estos cristales lo cruce. Este es el cristal que crece a través del cuello de botella. En la parte superior del cuello, donde el molde se ensancha, el cristal dilata su diámetro, por lo que sólo crece un cristal en el molde; así, el alabe final (que se forma en la parte superior del molde) será monocristalino.

La figura 2.15 muestra cada proceso en que el metal líquido empieza a cristalizar en sus respectivos moldes de cerámica.

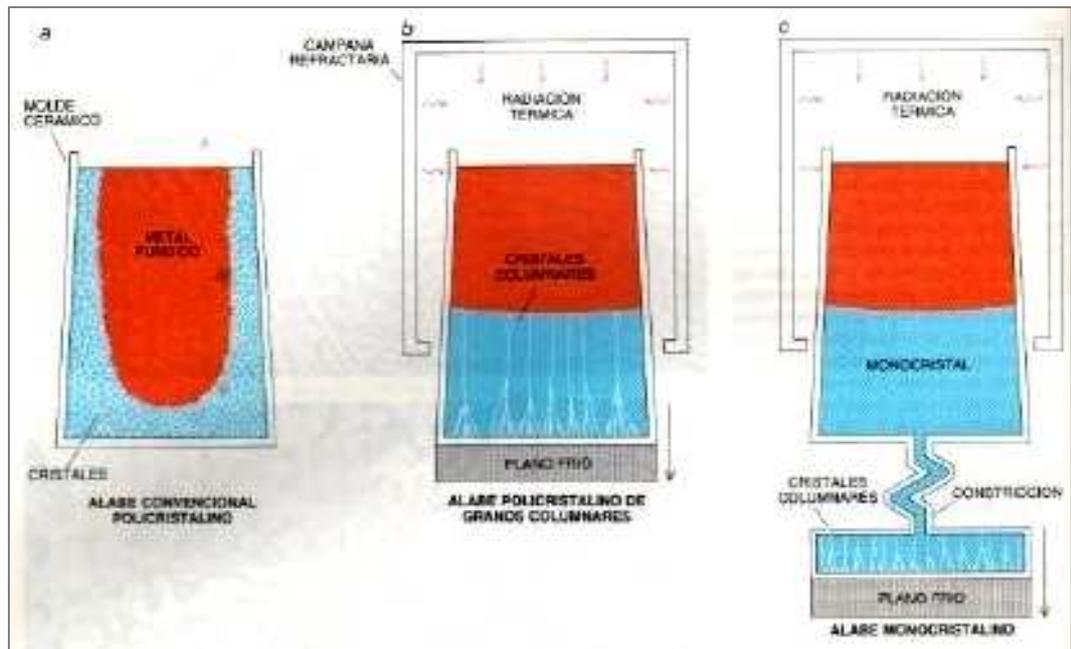


Figura 2.15. a) Proceso convencional policristalino b) Proceso policristalino de granos columnares c) Proceso monocristalino.

La solidificación direccional en superaleaciones base níquel es muy útil para moldear alabes de turbinas, figura 2.16. Sin embargo, también se aplica en otras superaleaciones.

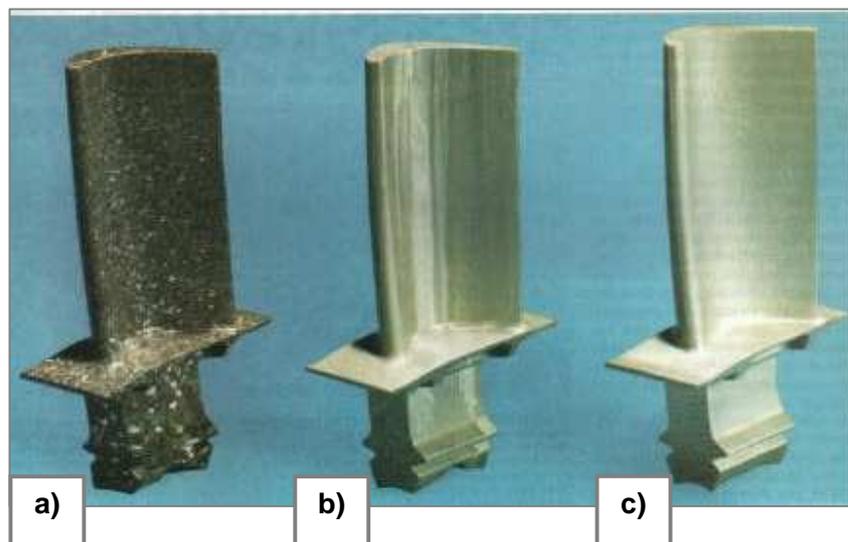


Figura 2.16. a) Alabe convencional policristalino b) Alabe policristalino de granos columnares c) Alabe monocristalino.

En particular, la solidificación direccional, se usa para fabricar un nuevo tipo de material conocido como **superaleación eutéctica**, que se forma añadiendo a la *aleación líquida de níquel y aluminio cierta cantidad de molibdeno y solidificando direccionalmente la mezcla*. Una vez solidificado, el molibdeno aparece en forma de filamentos incrustados en una matriz de las fases γ y γ' de níquel-aluminio y alineados paralelamente a la dirección de solidificación. Los filamentos de molibdeno actúan reforzando considerablemente el material, de modo parecido a como las fibras de grafito robustecen la matriz epóxica de ciertos materiales calificados de compuestos. La diferencia más notable entre "híbridos" eutécticos y convencionales es que las fibras de los eutécticos tienen un diámetro inferior al micrómetro (una millonésima de metro) y aparecen separadas por unos pocos micrómetros. Estas características serían imposibles de conseguir con los procedimientos acostumbrados, basados en introducir las fibras en un molde y luego agregar el material de la matriz.

Tan importantes como las propias aleaciones son las dos últimas técnicas de procesado de metales. Las técnicas de procesado posibilitan que la metalurgia saque el máximo provecho de los nuevos conocimientos microestructurales. Estas técnicas permiten fabricar las aleaciones tradicionales de maneras hasta ahora desconocidas, y facilitan la creación de nuevos metales que jamás se hubieran obtenido con las técnicas históricas.

2.3.4. Procesos de endurecimiento empleados en superaleaciones base níquel

- **Endurecimiento por solución sólida:** Grandes adiciones de Cr, Mo y W, pequeñas adiciones de Ta, Zr, Nb y B proporcionan el endurecimiento por solución sólida. Estos efectos son bastante estables, actuando los bordes de grano como frenos en el avance de las dislocaciones, lo que provoca la resistencia a la termofluencia.
- **Endurecimiento por dispersión de carburos:** Todas las superaleaciones contienen pequeñas cantidades de carbono, que en combinación con otros elementos aleantes produce una red de finas partículas de carburo muy estables. Estos carburos, tales como Ti C, B C, Zr C, Ta C, etc, poseen una extraordinaria dureza.
- **Endurecimiento por precipitación:** Algunas superaleaciones base níquel que contienen Al y Ti forman precipitados endurecedores, coherentes con la matriz, del tipo gamma prima (Ni_3Al , Ni_3Ti , $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$) durante el envejecimiento, que aumentan la resistencia de la aleación, sobre todo a altas temperaturas.

La dispersión de óxido de reforzamiento de superaleaciones base níquel

La dispersión de óxido de reforzamiento de superaleaciones base níquel se puede producir a partir de polvos de aleación y de óxido de Itrio, utilizando el proceso de aleación mecánica. El Y (itrio) llega a ser dispersado en el producto final, figura 2.17.

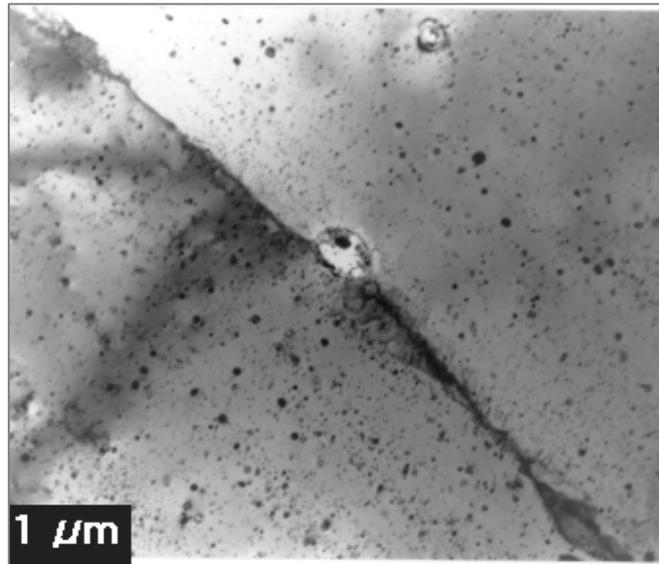


Figura 2.17. Dispersión de óxido de Itrio en una superaleación base níquel. Aleación MA6000.

El óxido de itrio es muy estable, por lo que el material es especialmente adecuado para aplicaciones de temperatura elevada. Sin embargo, la aleación mecánica es un proceso muy difícil, así que para estas aleaciones se tienen aplicaciones limitadas.

2.3.5. Resistencia versus temperatura en superaleaciones base níquel

La fuerza de la mayoría de los metales disminuye a medida que se aumenta la temperatura, simplemente porque la asistencia de la activación térmica hace que sean más fáciles los desplazamientos y se puedan superar los obstáculos. Sin embargo, las superaleaciones base níquel contienen γ' , que básicamente es un compuesto intermetálico basado en la fórmula $Ni_3(Al, Ti)$, que los hace especialmente resistentes a la temperatura.

En resumen, es la presencia de γ' , la responsable de la resistencia de las superaleaciones base níquel, es relativamente insensible a la temperatura, figura 2.18.

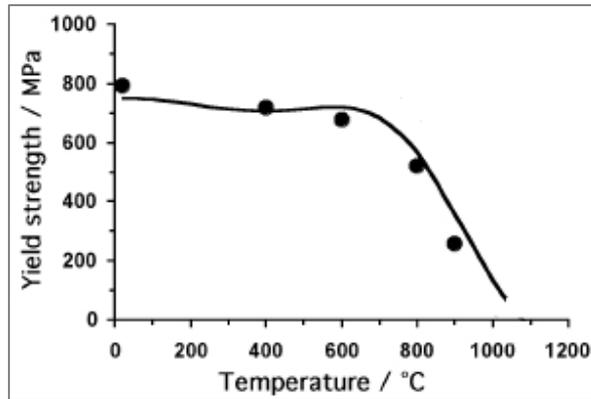


Figura 2.18. La resistencia a la fluencia de una superaleación base níquel en particular que contiene sólo un 20% de γ' . Los puntos se miden y la curva es una predicción teórica. Observe cómo la resistencia es en un primer momento insensible a la temperatura.

2.3.6. Difracción de electrones de una superaleación base níquel

La figura 2.19 muestra un patrón de difracción de electrones superpuestas de γ , γ' y $M_{23}C_6$ de carburo. La fases γ y γ' tienen sus redes cúbicas perfectamente alineadas.

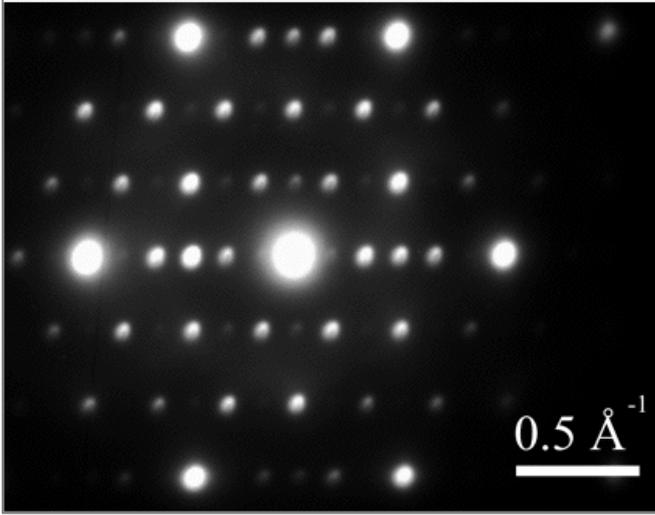


Figura 2.19. Patrón de difracción de electrones de γ , γ' y $M_{23}C_6$ de carburo.

2.4. SUPERALEACIONES BASE NÍQUEL IMPORTANTES Y MAS EMPLEADAS

Las superaleaciones base níquel más importantes y más empleadas no solo en México sino en el resto del mundo son:

Duraníquel (Ni, Al).

Posee una alta resistencia a la corrosión y una gran resistencia mecánica similar a los aceros.

Permaníquel (Ni, Co, Fe, C, Mn, Si, Ti, Mg).

Posee una buena resistencia a la corrosión, una buena conductividad eléctrica y térmica y propiedades magnéticas, pero disminuye su dureza al aumentar la temperatura.

Las dos aleaciones anteriores son las más comunes que podemos encontrar comercialmente dentro de las de superaleaciones base níquel.

2.4.1. Monel® (Ni, Cu).

Monel es una marca registrada usada como prefijo para diferentes aleaciones de metales *resistentes a la corrosión*. Es producida por Special Metals Corporation, figura 2.20.



Figura 2.20. Monel en barra circular.

Propiedades

- Buena resistencia a ácidos como el fluorhídrico y sulfúrico.
- Gran resistencia a los álcalis.
- Es maleable.
- Alta resistencia a la corrosión atmosférica y al agua salina.
- Más resistente que el acero.

Aplicaciones

- Ejes de bombas, herramientas para pozos de petróleo, instrumentos, raspadores y cuchillas para médicos, resortes, partes para válvulas y tornillería.

- Industria marina (componentes marinos).
- Industria de procesamiento químico y de petróleo (equipos).
- Válvulas, bombas, ejes, conexiones, e intercambiadores de calor.

Curiosidades

El Monel fue descubierto por Robert Crooks Stanley quién trabajo para la Compañía Internacional de Níquel en 1901. Esta nueva aleación tomo su nombre en honor al presidente de la compañía, Ambrose Monell.

Monel 400 o aleación 400.

Monel 400 es una aleación de *níquel-cobre* (cerca de 67% Ni- 23% Cu). La aleación 400 es una solución de aleación sólida que puede ser endurecida al trabajarla en frío, tabla 2.1.

Tabla 2.1. Composición de Química (%).

C	Mn	S	Si	Ni	Cu	Fe
0.30 max	2.00 max	0.024 max	0.50 max	63.0 min	28.0-34.0	2.50 max

Propiedades

- Buena resistencia al agua de mar y al vapor a altas temperaturas
- Excelente resistencia al rápido fluido del agua de mar o agua salubre.
- Excelente resistencia al agrietamiento por tensión de corrosión en la mayoría de las aguas dulces.
- Particularmente resistente al ácido clorhídrico e fluorhídrico cuando están desaireados.
- Resistencia al ácido hidrociorhídrico y sulfúrico a temperaturas y concentraciones moderadas, pero raramente es el material de opción para estos ácidos.
- Excelente resistencia a sales alcalinas y neutras.
- Alta resistencia al agrietamiento de tensión por corrosión inducido por cloruro.
- Buenas propiedades mecánicas desde temperaturas bajo cero.
- Es difícil de maquinar y se endurece.
- Facilidad para soldar, y puede ser templada para incrementar su fuerza.

- Poco magnética a temperatura ambiente.

Aplicaciones

- Ingeniería marina.
- Equipo de elaboración químico y de hidrocarbon.
- Tanques de gasolina y agua potable.
- Alambiques de petróleo crudo.
- Calentadores desairados.
- Calentadores de agua hirviendo.
- Válvulas, bombas, ejes, conexiones, y tornillería.
- Intercambiadores de calor industriales.
- Solventes tratados con cloro.
- Torres de destilación de petróleo crudo.

Fabricaciones con Monel 400

El Monel 400 puede ser soldado fácilmente con arco de gas tungsteno, arco de gas metal o procesos de arco cubierto usando metales de relleno apropiados. No hay necesidad de tratamiento térmico después de soldarse, sin embargo la limpieza después de soldar es crítica para la óptima resistencia a la corrosión, si no se hace existe un gran riesgo de contaminación y fragilidad.

Las fabricaciones ya terminadas pueden ser producidas en un rango muy amplio de propiedades mecánicas cuando se controla apropiadamente la cantidad de calor o frío al trabajar y se hacen los tratamientos térmicos apropiados.

Curiosidades acerca de la aleación 400

Esta aleación tiene una larga historia de uso como material resistente a la corrosión, que viene desde el siglo 20 cuando fue desarrollada al tratar de usar un mineral de níquel con alto contenido de cobre. El contenido de níquel y cobre del mineral fue aproximadamente la combinación que ahora está formalmente especificada para la aleación.

Monel[®] k-500 o aleación k-500.

Monel K-500 es una precipitación endurecible de aleación *níquel-cobre* que combina una excelente resistencia a la corrosión como el Monel 400, pero además tiene una ventaja que es su mayor fuerza y dureza. Estas propiedades amplificadas de mayor fuerza y dureza, se obtienen al adicionar aluminio y titanio a la base níquel-cobre, tabla 2.2.

Tabla 2.2. Composición Química (%).

Ni	Cu	Al	Ti	C	Mn	Fe	S	Si
63.0-70.0	Resto	2.30-3.15	0.35-0.85	0.25 max	1.5 max	2.0 max	0.01 max	0.50 max

Se usa un proceso térmico para el efecto de la precipitación, este proceso es típicamente llamado en condición envejecida.

Propiedades

- Fusión de 1350°C.
- Tiene aproximadamente tres veces la resistencia a punto cedente y el doble de la resistencia de tensión de la aleación 400.
- Alta resistencia a la corrosión en un rango muy amplio de ambientes marinos y químicos, desde agua pura, a minerales ácidos no oxidantes, sales y álcalis.
- Excelente resistencia al agua de mar a alta velocidad.
- Resistencia al ambiente de gas ácido.
- Excelentes propiedades mecánicas desde temperaturas bajo cero hasta temperaturas de 480° C.
- Es una aleación no magnética.

Aplicaciones

- Aplicaciones de servicio de gas ácido.
- Elevadores de seguridad y válvulas en la producción de gas y petróleo.
- Herramientas e instrumentos para taladrar pozos de petróleo (puntas de taladros).
- Industria de pozos de petróleo.
- Cuchillas y raspadores para médicos.

- Cadenas, cables, resortes, partes de válvulas, y tornillería para servicio marino.

Fabricaciones con Monel K-500

La manufactura con Monel K-500 se hace fácilmente con procedimientos comerciales estándar. La mejor manera de soldar la aleación K-500 es con el proceso TIG (Soldadura con gas inerte y electrodo de tungsteno). Se recomienda que el Monel K-500 sea recocido después de ser soldado y cualquier soldadura sea relevada de esfuerzos antes de hacerle el envejecimiento.

El fuerte maquinado de esta aleación se puede obtener cuando el material está recocido o trabajado en caliente y templado. Sin embargo, el material envejecido puede ser terminado maquinándolo para tener tolerancias más cercanas y acabados finos. Por lo tanto la práctica recomendada es maquinarlo un poco más grande, envejecerlo, y después terminarlo al tamaño deseado.

Monel® R-405.

Monel R-405 es la versión fácil de maquinar del Monel 400. Es una aleación de níquel-cobre con una cantidad controlada de sulfuro para que tenga inclusiones que actúen como astillas durante el maquinado, tabla 2.3.

Tabla 2.3. Composición Química (%).

Ni	Cu	Fe	S	Mn	C	Si
63.0 min	28.0-34.0	2.5 max	0.025-0.060	2.0 max	0.3 max	0.5 max

El Monel R-405 es una aleación en solución sólida que puede ser endurecida solamente al trabajarla en frío.

Propiedades

Las características son esencialmente las mismas del Monel 400 como:

- Fácil de maquinar y es recomendado para uso con máquinas de roscado automáticas.
- Buena resistencia al agua de mar.
- Excelente resistencia al rápido fluido del agua de mar o agua salubre.

- Excelente resistencia a la corrosión bajo esfuerzos en la mayoría de las aguas dulces.
- Particularmente resistente al ácido clorhídrico e fluorhídrico cuando están desairados.
- Buena resistencia al ácido clorhídrico y sulfúrico a temperaturas y concentraciones moderadas, pero raramente es el material de opción para estos ácidos.
- Excelente resistencia a sales alcalinas y neutras.
- Buena resistencia al agrietamiento de tensión por corrosión inducido por cloruro.
- Alta resistencia alcalina.
- Fácil de soldar.

Aplicaciones

- Usada principalmente para inventario de maquinado automático de tornillería y generalmente no es recomendada para otras aplicaciones.
- Repuestos para válvulas y metros.
- Productos de maquinado de tornillería.

Fabricación con Monel R-405

El Monel R-405 es fabricado, bañado, y tratado térmicamente con el mismo procedimiento de la aleación 400. No se recomienda para forja. Sin embargo, el Monel R-405 se desarrolló especialmente para un fácil maquinado y se recomienda para uso con maquinas de maquinado automático.

Esta aleación de níquel también tiene los mismos procedimientos y procesos que la aleación 400 y puede unirse con soldadura estándar. Justamente como con la aleación 400, el R-405 puede ser soldado fácilmente con procesos de soldadura de arco de gas tungsteno, arco de gas metal o arco de metal cubierto usando rellenos apropiados de metales. No hay necesidad de tratamiento térmico después de ser soldado, sin embargo, es crítica una limpieza completa para una óptima resistencia a la corrosión, si no es así puede haber riesgo de contaminación y de fragilidad.

2.4.2. Inconel[®] (Ni, Cr, Fe).

Inconel es una marca registrada usada como prefijo para más de veinte diferentes aleaciones de metales *resistentes a altas temperaturas y corrosión*. Es producido por Special Metals Corporation, figura 2.21.



Figura 2.21. Inconel en rollos.

Propiedades

- Buena resistencia a ácidos como el sulfúrico, fosfórico, nítrico, e clorhídrico
- Casi completamente libre de agrietamiento producido por corrosión bajo esfuerzo
- Excelentes propiedades mecánicas tanto en temperatura extremas bajas como en temperaturas extremas altas.
- Buena resistencia a picaduras, grietas por corrosión y corrosión intercrystalina.
- Alta resistencia a la oxidación en altas temperaturas.

Aplicaciones

- Procesos químicos y petroquímicos.
- Partes expuestas a alta tensión mecánica y al agua de mar.
- Chimeneas en plataformas marinas.
- Turbinas de gas, motores de cohetes, partes espaciales.
- Equipos para control de polución.
- Reactores nucleares.

Inconel 600 o aleación 600.

Inconel 600 es una aleación de *níquel-cromo* usada para aplicaciones que requieren resistencia a la corrosión y a altas temperaturas, tabla 2.4.

Tabla 2.4. Composición Química (%).

Ni + Co	Cr	Fe	C	Mn	S	Si	Cu
72.0 min	14.0-17.0	6.0-10.0	0.15 max	1.00 max	0.015 max	0.50 max	0.50 max

Esta aleación de níquel fue diseñada para ser usada desde temperaturas criogénicas hasta temperaturas elevadas en el rango de 1093 °C

Propiedades

- Excelente resistencia a un amplio rango de ambientes corrosivos (soluciones alcalinas).
- Excelente resistencia al agrietamiento por tensión de corrosión causada por el ion cloruro.
- No es magnético.
- Excelentes propiedades mecánicas.
- Alta fuerza y fácil para soldar bajo un amplio rango de temperaturas.
- Alta resistencia a la corrosión en muchos componentes orgánicos e inorgánicos.

Aplicaciones

- Industrias químicas.
- Industria aeroespacial.
- Industrias de tratamientos térmicos.
- Industria de la pulpa y el papel.
- Procesamiento de alimentos.
- Ingeniería nuclear.
- Partes de turbinas de gas.

Aplicaciones con Inconel 600

El Inconel 600 puede ser formado en frío o en caliente usando procesos típicos. Si se trabaja en caliente se debe hacer entre temperaturas de 871 °C -1232°C evitando trabajarlo entre 649°C-871°C porque la ductilidad disminuye en este rango de temperaturas. La aleación 600 puede ser soldada con Arco protegido, TIG y MIG.

Inconel 601 o aleación 601.

Inconel 601 es una aleación de níquel-cromo usada para aplicaciones que requieren resistencia a la corrosión y al calor, tabla 2.5.

Tabla 2.5. Composición Química (%).

Ni	Cr	Al	C	Mn	Si	Fe
61.5	22.5	1.4	0.05	0.3	0.2	14

Propiedades

- Excelente resistencia a la oxidación a 1204°C
- Buena resistencia al rejón, aún bajo severas condiciones de ciclos térmicos.
- Alta resistencia a la carburización.
- Buena resistencia a la corrosión acuosa.
- Buena fuerza al deslizamiento de ruptura.
- Estabilidad metalúrgica.
- Fácilmente manejable, maquinable y soldable.

Aplicaciones

- Procesos químicos.
- Industria aeroespacial.
- Industrias de tratamientos térmicos.
- Generación eléctrica.
- Tratamiento térmico de mufles y retortas.
- Tubos radiantes.

- Rejilla de soporte para catalizadores en la producción de ácido nítrico.
- Soportes de tubo para supercalentadores de vapor.

Inconel 625 o aleación 625.

Inconel 625 es una aleación de níquel resistente a la corrosión y a la oxidación. Su gran fuerza y funcionamiento se debe a la adición de niobio, el cuál actúa con el molibdeno para endurecer la matriz de la aleación, tabla 2.6.

Tabla 2.6. Composición Química (%).

Cr	Ni	Mo	Co + Nb	Ta	Al	Ti	C
20.00-30.00	Resto	8.0-10.0	1.0 max	3.15-4.15	0.40 max	0.40 max	0.10 max
Fe	Mn	Si	P	S			
5.0 max	0.50 max	0.50 max	0.015 max	0.015 max			

Propiedades

- Alta fuerza de deslizamiento de ruptura.
- Resistencia a la oxidación a 1800° F.
- Resistencia a la corrosión de rendija y a la picadura en agua de mar (corrosión acuosa).
- Excelente resistencia al agrietamiento por tensión de corrosión causada por el ión cloruro.
- Excelente resistencia a la fatiga.
- No es magnético.
- Fácilmente soldable.

Aplicaciones

- Sistemas de canalización de aviones.
- Industria aeroespacial.
- Sistemas de escape de motores de avión.

- Sistema de reversa de empuje del motor.
- Equipos especializados para agua de mar.
- Equipos de procesamiento químico.

Fabricación con Inconel 625

La aleación 625 tiene excelentes características de fabricación y soldado. Puede forjarse o trabajarse en caliente a una temperatura que se mantenga entre un rango de 1800° a 2150° F. Idealmente, para controlar el tamaño del grano, las temperaturas para el acabado en caliente deben ser las del límite bajo del rango en que se trabaja. La aleación 625 también se puede trabajar en frío debido a su buena ductilidad. Sin embargo, la aleación se endurece rápidamente al trabajarla, así que necesita un tratamiento de recocido para la formación o fabricación de componentes complejos. Para poder restaurar el mejor balance de sus propiedades, todas las partes trabajadas en frío o en caliente deben ser recocidas y rápidamente refrescadas. Esta aleación de níquel puede ser soldada con métodos de soldado manual o automáticos, incluyendo arco con gas tungsteno, arco con gas metal, rayo de electrón y soldadura por resistencia.

Inconel 718 o aleación 718 (Otros nombres comunes: Haynes® 718, Nicrofer® 5219, Allvac® 718, Altemp® 718).

El Inconel 718 es una aleación de *níquel-cromo-molibdeno* diseñada para resistir un amplio rango de ambientes corrosivos, tabla 2.7.

Tabla 2.7. Composición Química (%).

Ni	Fe	Cr	Cu	Mo	Nb	C	Mn
50.00-55.00	Resto	17.00-21.00	0.30 max	2.80-3.30	4.75-5.50	0.08 max	0.35 max
P	S	Si	Ti	Al	Co	B	
0.015 max	0.015 max	0.35 max	0.65-1.15	0.20-0.80	1.00 max	0.006 max	

Una de las características más sobresalientes de la composición del Inconel 718 es la adición de niobio que le permite endurecer por envejecimiento, el cual le permite ser recocido y soldado sin endurecimiento espontáneo durante el calentamiento y el refrescamiento. La adición de niobio actúa con el molibdeno para endurecer la matriz de la aleación, dándole gran fuerza sin tratamiento térmico para lograrlo. Otras aleaciones populares de *níquel-cromo* son endurecidos por envejecimiento a través de la adición de aluminio y titanio.

Propiedades

- Excelentes propiedades mecánicas
- Buenas propiedades de resistencia a la fluencia, resistencia de deslizamiento y ruptura.
- Alta resistencia al agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos causada por cloruros y sulfuros.
- Buena resistencia a la corrosión acuosa y al agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo causado por el ión cloro.
- Excelente resistencia a alta temperatura.
- Excelentes características para ser soldado, resistente al agrietamiento después de ser soldado.

Aplicaciones

- Procesos químicos.
- Industria aeroespacial.
- Componentes de combustible líquido en motor de cohete.
- Equipo de control de polución.
- Reactores nucleares.
- Tanques de almacenamiento criogénico.
- Válvulas, tornillería, resortes, mandriles, y ganchos para tubos.
- Equipo para terminado de cabezal en pozos y cierre de emergencia (BOP's).
- Partes del motor de turbinas de gas.

Inconel 939 o aleación 939.

El Inconel 939 puede ser fundido mediante moldeo por inversión o cera perdida, y por fundición con poliestireno expandido. Esta aleación tiene la siguiente composición química, tabla 2.8.

Tabla 2.8. Composición Química (%).

Ni	Cr	Co	C	Al	Ti	Nb	Ta	W
Resto	22.50	19.0	0.15	1.90	3.70	1.0 max	1.40 max	2.0 max

Propiedades

- Alcanza mayores temperaturas sin alterar sus propiedades mecánicas.
- Presenta agrietamiento durante la soldadura, debido a esfuerzos térmicos.
- Es costosa la soldadura, ya que es soldadura por láser para evitar el agrietamiento.

Aplicaciones

- Componentes de turbina.

2.4.3. Incoloy® (Ni, Fe, Cr).

Incoloy es una marca registrada usada como prefijo a varias aleaciones de metales *resistentes a altas temperaturas y corrosión*, producidas por Special Metals Corporation, figura 2.22.



Figura 2.22. Incoloy en tubo.

Propiedades

- Buena resistencia a la corrosión en ambientes acuosos.

- Excelente fuerza en ambientes de alta temperatura.
- Excelente resistencia a la oxidación y carburización en ambientes de alta temperatura.
- Facilidad para fabricación.

Aplicaciones

- Tubería de proceso, intercambiadores de calor, equipos de carburización, forros para elementos calientes, tubos para generador de vapor nuclear.
- Procesos químicos y petroquímicos, plantas eléctricas, hornos industriales, equipos donde hay bastante calentamiento.
- Equipos para control de polución, tubos para pozos de gas y petróleo, reprocesamiento de combustible nuclear, producción de ácidos, equipos de baños químicos para limpiar metales.

Incoloy® 800H /HT® o aleación 800H/HT (Otro nombre común: Aleación 800).

Incoloy 800, 800H y 800HT son aleaciones de níquel-hierro-cromo con buena resistencia y excelente resistencia a la oxidación y la carburización a altas temperaturas. Estas aleaciones de níquel son idénticas excepto por el alto nivel de carbono en la aleación 800H, y la adición de 1.2% de aluminio y titanio en la aleación 800HT.

El *Incoloy 800* fue el primero de estas aleaciones, tabla 2.9.

Tabla 2.9. Composición Química (%) de la aleación 800

Ni	Fe	Cr	Cu	Ti	Al	C	Mn	S	Si
30.0-35.0	39.5 min	19.0-23.0	0.75 max	0.15-0.60	0.15-0.60	0.1 max	1.5 max	0.015 max	1.0 max

El Incoloy 800 fue modificado un poco en *Incoloy 800H*. Esta modificación se hizo para controlar el carbono (0.05-0.10%) y el tamaño del grano para optimizar las propiedades de ruptura por tensión, tabla 2.10.

Tabla 2.10. Composición Química (%) de la aleación 800H

Ni	Fe	Cr	Cu	Ti	Al	C	Mn	S	Si
30.0- 35.0	39.5 min	19.0- 23.0	0.75 max	0.15- 0.60	0.15- 0.60	0.05-0.10 max	1.5 max	0.015 max	1.0 max

**Note que los límites de composición química del Incoloy 800H podrían o no estar entre los límites del Incoloy 800HT.*

El Incoloy 800HT tiene mayores modificaciones al combinar los niveles de titanio y aluminio (0.85-1.20%) para asegurar buenas propiedades a altas temperaturas, tabla 2.11.

Tabla 2.11. Composición Química (%) de la aleación 800HT

Ni	Fe	Cr	Cu	Ti	Al	C	Mn	S	Si
30.0- 35.0	39.5 min	19.0- 23.0	0.75 max	0.25- 0.60	0.85- 1.20	0.06- 0.10 max	1.5 max	0.015 max	1.0 max

**Note que la composición química del Incoloy 800HT siempre va a estar entre los límites del Incoloy 800H.*

El Incoloy 800 se usa primordialmente en aplicaciones con temperaturas hasta de 1100° F, y las aleaciones 800H y 800HT son normalmente usadas a temperaturas mayores de 1100° F donde se requiere la resistencia a deslizamiento y a la ruptura.

La aleación de níquel (800H/HT) es dualmente certificada y combina las propiedades de las dos. La aleación Incoloy 800H/HT fue hecha para aplicaciones estructurales a altas temperaturas.

Propiedades

- Gran resistencia a alta temperatura.
- Gran resistencia a la ruptura por deslizamiento.
- Resistencia a la oxidación y a la carburización en ambientes de altas temperaturas.
- Buena resistencia a la corrosión en muchos ambientes ácidos.

- Buena resistencia en atmósferas que contienen sulfuro.
- Puede ser soldado con técnicas comunes usadas en aceros inoxidables.

Aplicaciones

- Calderas de templado para hornos de etileno.
- Válvulas, conexiones y otros componentes expuestos a ataques corrosivos en temperaturas de 593-982 °C
- Hornos industriales.
- Equipos para tratamientos térmicos
- Procesos químicos y petroquímicos.
- Súpercalentadores y recalentadores en plantas eléctricas.
- Recipientes de presión.
- Intercambiadores de calor.
- Plantas eléctricas nucleares e industria de pulpa y papel.

Incoloy 20 o aleación 20 (Otro nombre común: Carpenter 20).

La aleación 20 también conocida como Carpenter 20, es una aleación *austenítica* de níquel-hierro-cromo que fue desarrollada para máxima resistencia al ataque de los ácidos, específicamente al ácido sulfúrico. También contiene niobio para estabilización contra la sensibilización y la corrosión intergranular resultante, tabla 2.12.

Tabla 2.12. Composición de Química (%).

Ni	Fe	Cr	Cu	Mo	Nb
32.00-38.00	Balance	19.0-21.0	3.0-4.0	2.0-3.0	8xC-1.0max
C	Mn	P	S	Si	
0.07max	2.0max	0.045max	0.035max	1.0max	

Ha habido un debate muy largo para decidir si el Carpenter 20 es un *acero inoxidable* o una *aleación de níquel*, porque la cantidad de níquel está en el límite donde se define si es uno o el

otro. Entonces depende de la persona con la que usted hable, podría referirse a la aleación 20 como un acero inoxidable o como una aleación de níquel. Cualquiera sea el caso seguirá siendo excelente opción para la resistencia a la corrosión.

Propiedades

- Excelente resistencia general a la corrosión por el ácido sulfúrico.
- Excelente resistencia a la corrosión de quebradura por estrés causada por cloruro.
- Altas propiedades mecánicas.
- Facilidad para fabricar.
- Mínima precipitación de carburos al momento de soldarlo.
- Excelentísima resistencia a la corrosión en ácido sulfúrico caliente.

Aplicaciones

- Equipo de fabricación de hule sintético.
- Procesos farmacéuticos, de plásticos, orgánicos y de químicos pesados.
- Tanques, tubería, intercambiadores de calor, bombas, válvulas, y otros equipos de procesos.
- Equipos para limpieza de ácidos, y equipo de baños para limpieza de metales.
- Tubería para procesamiento químico y recipientes para reactores.
- Tapones de burbuja.
- Equipos de procesamiento petroquímico.
- Producción de alimentos y coloración.

2.4.4. Hastelloy® (Ni, Mo, Fe, Cr).

Hastelloy es una marca registrada, y este nombre es usado como prefijo para más de veinte aleaciones diferentes, altamente resistentes a la corrosión. Es producida por Haynes International Inc., figura 2.23.



Figura 2.23. La aleación Hastelloy en rollos

Propiedades

- Alta resistencia al ataque uniforme.
- Muy buena resistencia a la corrosión localizada.
- Excelente resistencia al rompimiento por tensión causado por la corrosión.
- Buena resistencia a ácidos corrosivos como; ácido sulfúrico, nítrico, clorhídrico, hidroc্লórico y crómico.
- Facilidad para soldar y hacer fabricaciones.
- Alta resistencia a la oxidación en altas temperaturas.

Aplicaciones

- Industria de procesamiento químico.
- Industria aeroespacial
- Farmacéutica
- Producción de petróleo y gas.
- Partes expuestas a la alta tensión mecánica y al agua de mar.
- Partes que están expuestas a gases de combustión o plantas de desulfurización de gas.

Hastelloy C-276 o aleación C-276 (Otros nombres comunes: Hastelloy C, Inconel C-276).

Hastelloy C-276 es una superaleación de *níquel-molibdeno-cromo con adición de tungsteno*, diseñado para tener una excelente resistencia a la corrosión en un rango amplio de ambientes severos, tabla 2.13.

Tabla 2.13. Composición Química (%)

Ni	Mo	Cr	Fe	W	Co	Mn	C
Resto	15.0-17.0	14.5-16.5	4.0-7.0	3.0-4.5	2.5 max	1.0 max	0.01 max
V	P	S	Si				
0.35 max	0.04 max	0.03 max	0.08 max				

El alto contenido de níquel y de molibdeno hacen que esta aleación sea especialmente resistente a la picadura y a la corrosión en grietas en ambientes de reducción, mientras que el cromo lo hace resistente a medios oxidantes. El bajo contenido de carbono minimiza la precipitación de carburo durante la soldadura para mantener la resistencia a la corrosión en las estructuras de ensamble. Esta aleación de níquel es resistente a la formación de grano limitado precipitado en la zona afectada por el calor, haciendo conveniente su uso en muchas aplicaciones de procesos químicos en condición ensamble.

Aunque hay muchas variaciones de la aleación Hastelloy, el Hastelloy C-276 es el que se ha usado más ampliamente.

Propiedades

- Excelente resistencia a la corrosión en ambientes de reducción.
- Excelente resistencia a soluciones fuertes de sales oxidantes, como el cloruro férrico y cúprico.
- Resistencia a la corrosión en la zona afectada por el calor en las partes soldadas.
- Resistencia a la corrosión localizada por picadura y agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo
- Resistencia a los efectos corrosivos del gas cloro, hipoclorito y dióxido de cloro.

Aplicaciones

- Ductos, apagadores, depuradores, torre de gas para recalentadores, ventiladores y mangueras para ventiladores para el control de polución.
- Tubos para gas en sistemas de desulfurización.

- Componentes para procesos químicos como intercambiadores de calor, recipientes de reacción, evaporadores, y tubería de transferencia.
- Pozos de gas amargo.
- Producción de pulpa y papel.
- Tratamiento de desechos.
- Equipos farmacéuticos y de procesamiento de alimentos.

Fabricación con Hastelloy C-276

El Hastelloy C-276 puede forjarse en frío. Aunque la aleación tiende a endurecerse al trabajarse, puede ser estirado, centrifugado, estampado o perforado. Todos los métodos comunes para soldar pueden ser usados, aunque el oxi-acetileno y arco sumergido no se recomiendan cuando los productos van a ser usados en ambientes de corrosión.

Hastelloy® C-22 o aleación C-22 (Otro nombre común: Inconel 22).

Hastelloy C-22 es una aleación de níquel-cromo-molibdeno-tungsteno, austenítica y versátil. El contenido alto de cromo le permite tener buena resistencia a medios oxidantes mientras que el molibdeno y el tungsteno le dan buena resistencia a medios de reducción, tabla 2.14.

Tabla 2.14. Composición Química (%)

C	Cr	Co	Fe	Mn	Mo	Ni	P
0.010 max	20-22.5	2.5 max	2.0-6.0	0.50 max	12.5-14.5	Balance	0.02 max
Si	S	W	V				
0.08 max	0.02 max	2.5-3.5	0.35 max				

Esta aleación de níquel resiste la formación de precipitados en el límite de grano en la zona afectada por el calor en la soldadura, lo cual hace conveniente su uso en la mayoría de procesos químicos.

La aleación C-22 no debe usarse a temperaturas mayores de 1250° F debido a la formación de fases perjudiciales que se desarrollan a temperaturas mayores que esta.

Propiedades

- Resistencia a la picadura, corrosión de rendija y al agrietamiento por tensión de corrosión.
- Gran resistencia a medios reductores o de oxidación.
- Excelente resistencia a medios acuosos oxidantes.
- Excelente resistencia a ambientes en procesos químicos, incluyendo ácido férrico, anhídrido acético, agua de mar, y soluciones salubres.
- Resistencia a la formación de grano limitado precipitado en la zona afectada por el calor de la soldadura.
- Fácil de ser soldado.

Aplicaciones

- La industria farmacéutica usa tubos y conexiones en aleación C-22 para prevenir la contaminación causada por fallas relacionadas con la corrosión.
- Fabricación de celofán.
- Sistemas de desinfección con cloro.
- Producción de pesticidas.
- Sistemas de depuración e incineración.
- La industria química en equipos como depurador de gases de combustión scrubbers, sistemas de desinfección con cloro, depuradores de dióxido de sulfuro, plantas de blanqueo de pulpa y papel, sistemas de equipos de limpieza y tratamiento de baño para metales, y reprocesamiento de combustible nuclear.
- Proceso de aguas negras.

Fabricaciones con Hastelloy C-22

Aunque el Hastelloy C-22 es suficientemente dúctil para fabricarlo trabajándolo en frío, puede ser necesario un recocido intermedio debido al endurecimiento por trabajo en frío. Para forjarlo se debe trabajar entre 1750-2050° F seguido de un enfriamiento rápido. El recocido se debe realizar a un rango de temperaturas entre 2020-2150° F seguido de un templado rápido. El temple a rápida velocidad evita la formación de fases perjudiciales las cuales se forman entre 1400 – 1800° F. Esta aleación se puede soldar con arco de gas tungsteno, arco de gas metal, y procesos de arco cubierto.

Hastelloy® X o aleación X (Otro nombre común: Inconel® HX).

Hastelloy X es una superaleación de *níquel-cromo-hierro-molibdeno* con gran fuerza a alta temperatura, resistente a la oxidación y de fácil fabricación, tabla 2.15.

Tabla 2.15. Composición Química (%)

Ni	Mo	Cr	Fe	W	Co	Mn	C
Resto	8.0-10.0	20.5-23.0	17.0-20.0	0.2-1.0	0.5-2.5	1.0 max	0.05-0.15
P	S	Si	Al	Ti	B	Cu	
0.04 max	0.03 max	1.0 max	0.50 max	0.15 max	0.01 max	0.50 max	

El refuerzo de la matriz que proporciona el molibdeno produce como resultado una gran resistencia en una solución sólida dando unas buenas características para su fabricación.

Propiedades

- Gran resistencia a la oxidación hasta temperaturas de 2000° F.
- Resistencia a la carburización y a la nitruración (condiciones que comúnmente llevan a la falla a altas temperaturas).
- Excelente resistencia a altas temperaturas.
- Buena resistencia al agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo causada por el cloruro.

Aplicaciones

- Turbinas de gas.
- Industria petroquímica.
- Hornos industriales.
- Equipos de tratamiento térmico.
- Ingeniería nuclear.
- Cámaras de combustión para motores de aviones.
- Calentadores para cabinas de aviones.
- Partes para escape de turbinas.

Fabricación con Hastelloy X

La aleación X tiene excelentes características para formarla y soldarla. Puede ser forjada, y por su buena ductilidad, puede ser trabajada en frío. Puede ser soldada por métodos manuales o automáticos incluyendo el arco cubierto, gas tungsteno, arco de gas metal, y procesos de gas sumergido. La aleación puede ser soldada por resistencia. Para formarla en caliente, la aleación debe ser calentada comenzando en temperaturas de 2150° F.

Hastelloy® B-3 o aleación B-3.

Hastelloy B-3 es una aleación de *níquel-molibdeno*, con una composición química que se muestra en la tabla 2.16.

Tabla 2.16. Composición Química (%).

Ni	Mo	Fe	C	Co	Cr	Mn	Si
65.0 min	28.5	1.5	0.01 max	3.0 max	1.5	3.0 max	0.10 max
Ti	W	Al	Cu				
0.2 max	3.0 max	0.50 max	0.20 max				

Limitaciones

La aleación B-3 tiene muy baja resistencia a la corrosión en ambientes oxidantes, por lo cuál no se recomienda su uso en tales medios o en la presencia de sales férricas o cúpricas porque estas podrían causar una falla debido a una prematura y rápida corrosión. Estas sales se desarrollan cuando el ácido hidroclicórico se pone en contacto con hierro o cobre. Por lo tanto, si esta aleación es usada al tiempo con tubería de hierro o de cobre en un sistema que contenga ácido hidroclicórico, la presencia de estas sales podrían causar una falla prematuramente. Además, este acero de aleación de níquel no debe ser usado a temperaturas entre 1000° F y 1600° F porque la aleación tendrá una reducción en su ductilidad.

Propiedades

- Excelente ductilidad durante exposiciones transitorias a temperaturas intermedias.
- Excelente resistencia a la picadura y agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo.
- Excelente resistencia a la línea de cuchillo y al ataque de la zona afectada por calor.
- Excelente resistencia a los ácidos sulfúrico, acético y fosfórico, y otros medios donde no haya oxidación.
- Resistencia al ácido hidroc্লórico en todas las concentraciones y temperaturas.
- Estabilidad térmica superior a la de la aleación B-2.

Aplicaciones

- Procesos químicos.
- Hornos al vacío.
- Componentes mecánicos en ambientes de reducción.

Hastelloy® B-2 o aleación B-2.

Hastelloy B-2 es una solución sólida reforzada de aleación de níquel-molibdeno, tabla 2.17.

Tabla 2.17. Composición Química (%)

Ni	Mo	Fe	C	Co	Cr	Mn	Si
Balance	26.0-30.0	2.0 max	0.02 max	1.0 max	1.0 max	1.0 max	0.10 max
P	S						
0.040 max	0.030 max						

El molibdeno es el elemento primario para la aleación, este provee una resistencia significativa a la corrosión en ambientes de reducción. Este acero de aleación de níquel puede ser usado en ensamble sin tratamiento adicional porque este resiste la formación de grano limitado de precipitado de carburo en la zona afectada por el calor de la soldadura.

Limitaciones

La aleación B-2 tiene muy baja resistencia a la corrosión en ambientes oxidantes, por lo cuál no se recomienda su uso en dichos medios o en la presencia de sales férricas o cúpricas porque estas podrían causar una falla debido a una prematura y rápida corrosión. Estas sales se desarrollan cuando el ácido hidroclicórico se pone en contacto con hierro o cobre. Por lo tanto, si esta aleación es usada al tiempo con tubería de hierro o de cobre en un sistema que contenga ácido hidroclicórico, la presencia de estas sales podrían causar una falla prematuramente. Además, este acero de aleación de níquel no debe ser usado a temperaturas entre 1000° F y 1600° F porque la aleación tendrá una reducción en su ductibilidad.

Propiedades

- Excelente resistencia a la picadura y agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo.
- Buena resistencia a condiciones de reducción como cloruro de hidrógeno, y ácidos sulfúrico, acético y fosfórico.
- Resistencia al ácido hidroclicórico en todas las concentraciones y temperaturas.

Aplicaciones

- Procesos químicos.
- Hornos al vacío.
- Componentes mecánicos en ambientes de reducción.

2.4.5. Nimonic (Ni, Cr).

Nimonic 75.

El Nimonic 75 fue diseñado principalmente como aleación resistente al calor, teniendo la siguiente composición química nominal, tabla 2.18.

Tabla 2.18. Composición Química Nominal (%).

Ni	Cr
80.0	20.0

Propiedades

- Buena resistencia a elevadas temperaturas (1,250° C).

Nimonic 80.

Esta fue la primera superaleación base níquel, endurecible por precipitación, desarrollada en el año 1941 en Gran Bretaña. Es una solución sólida de níquel con 20% Cr, 2.25 % Ti, y 1% de Al; siendo estos dos últimos metales útiles para la formación de precipitados de gamma prima, tabla 2.19.

Tabla 2.19. Composición Química (%).

Ni	Cr	Ti	Al
Resto	20.0	2.25	1.0

Nimonic 80A.

Esta aleación tiene la composición química mostrada en la tabla 2.20.

Tabla 2.20. Composición Química (%).

Ni	Cr	Co
70.0 min	20.0	2.0

Aplicaciones

- Material adecuado para utilizarse a altas temperaturas.

Nimonic 90.

Nimonic 90 tiene la composición química siguiente, tabla 2.21.

Tabla 2.21. Composición Química (%).

Ni	Cr	Co	Ti	Al	Fe
53.0	20.0	18.0	2.5	1.5	1.5

Propiedades

- Buena resistencia a la termofluencia (creep).
- Alta tenacidad.
- Buena estabilidad a temperaturas elevadas.

Aplicaciones

- Motores a reacción.

2.4.6. Inconel (Ni, Cr, Mo, Cu).**Inconel B e Inconel G.**

Estas aleaciones fueron diseñadas principalmente como materiales resistentes a los ácidos sulfúrico y nítrico, con la composición química mostrada en las tablas 2.22 y 2.23.

Tabla 2.22. Composición Química (%).

Inconel B

Ni	Cr	Mo	Cu
50.0 min	28.0	8.5	5.5

Tabla 2.23. Composición Química (%).

Inconel G

Ni	Cr	Mo	Cu
56.0 min	22.5	6.5	6.5

Propiedades

- Buena resistencia a la corrosión.

Aplicaciones

- Cojinetes de impulso y rotatorios.
- Piezas de bombas y válvulas en las que se requiere alta dureza a medios corrosivos.

2.4.7. Chromel A (Ni, Cr).

Esta aleación tiene la composición química nominal mostrada en la tabla 2.24.

Tabla 2.24. Composición Química Nominal (%).

Ni	Cr
80.0	20.0

Aplicaciones

- Hornos industriales.
- Elemento eléctrico de calefacción para aparatos caseros.

Nichrome (Ni, Cr, Fe).

Esta aleación tiene la composición química nominal mostrada en la tabla 2.25.

Tabla 2.25. Composición Química Nominal (%).

Ni	Cr	Fe
60.0	16.0	24.0

Aplicaciones

- Resistencias de tostadores, cafeteras, planchas, secadores de pelo, calentadores eléctricos y reóstatos para equipos electrónicos.

2.5. FABRICANTE DE SUPERALEACIONES BASE NÍQUEL EN MÉXICO

Las empresas mas importantes en México que fabrican y comercializan superaleaciones base níquel son dos, a saber:

- *Mega Mex “Metales especiales bajo demanda”.*
- *Metalnet.*

2.5.1. Mega Mex “Metales especiales bajo demanda”

Mega Mex es un proveedor estable de metales de alta calidad, incluyendo acero inoxidable, acero al carbón, aleaciones base níquel, aluminio, cobre, latón y bronce en todos los grados y especificaciones ASTM. Su fuerte relación con diferentes molinos le permite ofrecer *virtualmente metales de "cualquier tipo"*.

Los productos en aleaciones base níquel incluyen:

- Barras, placas, laminas, tubos, y conexiones.
- Perfiles y barras.
- Tornillos, Tuercas, y válvulas.

También ofrece:

- Bridas y conexiones de todas las clases en aleaciones base níquel, titanio, acero inoxidable, y acero al carbono.
- Forjas en todos los grados de las aleaciones base níquel, acero al carbón, y acero inoxidable.

2.5.2. MetalNet

MetalNet es otra empresa que ofrece un amplio rango de aleaciones base níquel y productos de diferentes formas y tamaños como:

- Barras.
- Planos.
- Tubos.
- Cable.
- Secciones extruidas y perfiles.
- Chapas, etc.

En la tabla 2.26 se muestran las principales aleaciones base níquel que manejan.

Tabla 2.26. Aleaciones base níquel.

INCOLOY	INCONEL	MONEL
825 (42 Ni/22 Cr/3 Mo)	600 (75 Ni/16 Cr)	187 (32 Ni/65 Cu)
800 (32 Ni/21 Cr)	601 (61 Ni/23 Cr/1.5 Al)	190 (65 Ni/31 Cu)
800 HT (32 Ni/21 Cr)	625 (61 Ni/22 Cr/9 Mo)	60 (65 Ni/27 Cu)
DS (37 Ni/18 Cr/2.3 Si)	112 (61 Ni/22 Cr/9 Mo)	67 (32 Ni/67 Cu)
65 (42 Ni/21 Cr/3 Mo)	C-276 (55 Ni/15 Cr/16 Mo)	K-500 (66 Ni/32 Cu/2 Al)
	182 (67 Ni/15 Cr/8 Mn)	400 (66 Ni/34 Cu)
	617 (52 Ni/22 Cr/12 Co/9 Mo)	
	718 (53 Ni/19 Cr/5 Nb/3 Mo)	
	82 (72 Ni/17 Cr/3 Nb)	

Nota

- Algunos de estas designaciones son nombres comerciales o de fabricantes específicos.

En conclusión, aproximadamente el 65% del níquel consumido en México se emplea en la fabricación de acero inoxidable austenítico y otro **12% en superaleaciones base níquel**. El restante 23% se reparte entre otras aleaciones, baterías recargables, catálisis, acuñación de moneda, recubrimientos metálicos y fundición.

CAPÍTULO 3

ALEACIONES BASE COBALTO

3.1. EL COBALTO

Aspectos generales

El **cobalto** es un elemento químico de número atómico 27 y símbolo **Co** situado en el grupo 9 de la tabla periódica de los elementos. El cobalto es un metal duro no ferroso pesado, de color blanco azulado, su densidad es de 8.6 kg/dm³, su punto de fusión es de 1,490° C, y tiene propiedades análogas al níquel pero es no magnético.

El cobalto no se encuentra como metal nativo en la tierra a excepción del que se presenta, en cantidades mínimas, en fases metálicas de los meteoritos. Su contenido geoquímico en las rocas y minerales de la litosfera ha sido establecido en 20 ppm (partes por millón o g/t). Como elemento químico simple el cobalto se integra en las combinaciones que dan lugar a unas setenta especies minerales.

Casi en su totalidad, la producción mundial de metal cobalto procede, primariamente, del tratamiento de menas minerales. Un pequeño porcentaje de esta producción deriva del reciclado de componentes industriales o productos previamente manufacturados con cobalto.

Hay que tener en cuenta, sin embargo, que son excepcionales los depósitos minerales ricos en cobalto de interés económico, y por ello, la recuperación de este escaso metal suele tener carácter subsidiario respecto a procesos de concentración industrial de otros metales a los que se asocia en la naturaleza, como el cobre, níquel, cromo, plata, oro, uranio, etc. En consecuencia, el cobalto es considerado habitualmente un subproducto o coproducto de los diversos procesos minero-metalúrgicos.

El cobalto es, al igual que el hierro y titanio, un metal alotrópico, que transforma a los 467°C de una estructura hexagonal compacta (HCP) a una cúbica centrada en las caras (FCC.). El metal tiene un punto de fusión de 1,493°C, manteniendo sus propiedades magnéticas hasta los 1,115°C, temperatura de Curie.

La resistencia a la corrosión y oxidación del cobalto es menor que la del hierro, y esto, unido a su elevado costo, hacen que el metal puro no tenga muchas aplicaciones industriales. En cambio, si se utiliza de manera importante como elemento de aleación, este proporciona a sus aleaciones una elevada refractariedad, resistencia a la corrosión y excelentes propiedades magnéticas. El cobalto se usa generalmente en la industria como un material duro aplicado en la superficies en regiones de desgaste críticas, aplicado por soldadura de recargue. Por ello, las aplicaciones más importantes del cobalto son:

- Como elemento de aleación en aceros de herramientas y en aceros al cobalto para imanes permanentes.
- Aleado para recubrimientos duros resistentes al desgaste.
- Como elemento aglutinante en los insertos de carburo sinterizado.
- Como base de aleaciones resistentes a la corrosión, para imanes o superaleaciones.

Por tanto, cabe mencionar que el mayor consumo de cobalto refinado se da en la industria de manufactura de aleaciones y superaleaciones.

3.2. ALEACIONES DE COBALTO

En general, las aleaciones de cobalto, al igual que las aleaciones de níquel, son bastante complejas, resultando difícil su clasificación por la composición, por consiguiente, se pueden clasificar en los siguientes grupos:

- Cobalto de alta pureza
- Aleaciones resistentes a la corrosión.
- Aleaciones resistentes a la abrasión.
- Aglutinante para herramientas de carburos sinterizados
- Aleaciones para imanes permanentes.
- Aleaciones de alta permeabilidad magnética.
- Superaleaciones base cobalto.

Cobalto de alta pureza

El metal cobalto de alta pureza es uno de los componentes contenidos en algunas de las baterías eléctricas ligeras de tipo metal-hidruro o similares, cuyo uso es ya generalizado en telefonía, radiofonía, cámaras de vídeo o fotografía.

Aleaciones resistentes a la corrosión y abrasión

Son aleaciones adecuadas a condiciones de trabajo extremas ya que reúnen tenacidad, resistencia, dureza e inalterabilidad. Por ello, son de empleo común en aceros resistentes al calor, la corrosión o el desgaste por rozamiento. La gama de sus aplicaciones comprende desde las herramientas de todo tipo, hilos de acero para bandas de resistencia en neumáticos radiales o discos para corte y pulido de metales, hasta usos minoritarios en aleaciones para fabricación de prótesis.

Aglutinante para herramientas de carburo sinterizado

Las aleaciones del grupo de los carburos sinterizados contienen en especial el carburo de tungsteno 11, compuesto que confiere al material propiedades de resistencia mecánica, flexibilidad e inalterabilidad, pero también de fragilidad y porosidad. Las propiedades de estas aleaciones se mejoran con procesos de fabricación que consiguen fijar la fase carburada a una matriz de partículas metálicas (cobalto, titanio, tantalio, vanadio, niobio, etc.). El resultado es una estructura de gran resistencia mecánica, formada por los granos del componente mayoritario (lo que se denomina la fase mayor) y los restantes componentes minoritarios (fase menor), regularmente distribuidos en los espacios intergranulares. Tal modelo de estructura dificulta los posibles microdeslizamientos dentro del material. Por su resistencia al desgaste, que supera entre 12 y 20 veces la del acero rápido, se emplean en herramientas de carburo para mecanizado y corte (taladros, fresas, terrajas, discos de corte, etc.).

Aleaciones para imanes permanentes

Son aleaciones que contienen entre el 5 y el 35% de cobalto y pueden dividirse, fundamentalmente, en dos grupos:

- *Alnicos* y
- *Cunicos*

Los **alnicos** son aleaciones de composición 5-35% Co, 12-25% Ni, 5-11% de Al, y eventualmente titanio y cobre, siendo el resto hierro. Estas aleaciones no son forjables ni mecanizables, por lo que deben moldearse con sus dimensiones exactas, o bien mediante metalurgia de polvos con lo que presentan mejores propiedades mecánicas y una mayor facilidad de conformación. Tras su imanación en un campo magnético elevado se pueden obtener excelentes propiedades.

Los **cunicos** son aleaciones Co-Ni-Cu dúctiles y mecanizables que se utilizan en aquellos casos en que la forjabilidad es esencial.

Estos imanes se emplean en fabricación de instrumentos de medida eléctrica, pequeños motores y magnetos, tubos de televisión, altavoces, instalaciones telefónicas, aparatos de radar, etc.

Aleaciones de alta permeabilidad magnética

Estas aleaciones alcanzan elevadas intensidades de imantación en un campo magnético débil, empleándose en diafragmas de receptores y equipos sonar. Las dos aleaciones más importantes son:

- **Hyperco**, de composición 33% Co, 64% Fe, 1% Cr.
- **Permendur**, de composición 50% Co, 50% Fe.

Estas aleaciones normalmente no son laminables ni forjables, y se caracterizan por tener muy altos valores de saturación debido al elevado porcentaje en Co, superior incluso al del hierro muy puro. Para la aleación Hyperco, la saturación se alcanza con 24,200 gauss, siendo de 21,000 gauss la saturación del hierro.

3.3. SUPERALEACIONES BASE COBALTO

Aspectos generales

Estas superaleaciones son resistentes al calor, por ello para temperaturas mayores a los 1,000°C se suelen emplear superaleaciones base cobalto. Las aleaciones de cobalto encuentran una gran aplicación por la excelente resistencia al desgaste y las propiedades mecánicas a altas temperaturas. Además, contienen metales refractarios, carburos metálicos y niveles elevados de cromo, con el fin de aumentar la resistencia a la corrosión.

En función de su utilización se dividen en tres grupos:

- Aleaciones para uso a temperaturas entre 665 °C y 1150 °C.
- Aleaciones para el uso a temperaturas en torno a los 650 °C.
- Aleaciones resistentes al desgaste.

Concepto

Las superaleaciones base cobalto son aquellas que tienen como elemento principal o en mayor proporción al cobalto, conteniendo otras adiciones elementales comunes como son cromo, níquel, molibdeno, y tungsteno, que los hacen tener las propiedades adecuadas para resistir el medio ambiente al que están expuestos, como son las condiciones extremas a altas temperaturas. La tabla 3.1 muestra las propiedades mecánicas principales que aportan algunos elementos de aleación en las superaleaciones base cobalto.

Tabla 3.1. Propiedades que aportan algunos elementos de aleación en las aleaciones base cobalto.

METAL	%	PROPIEDAD GENÉRICA
Co	64.8	Rigidez, dureza y resistencia.
Cr	28.5	Resistencia a la corrosión.
Mo	5.3	Aumenta dureza y resistencia.
Si	0.5	Mejora la fluidez durante la fundición.
Mn	0.5	Mejora la fluidez durante la fundición.
C	0.4	Aumenta dureza y resistencia.

En general, las superaleaciones base cobalto ofrecen una gama de cualidades físicas muy amplia (en función de los restantes componentes de la aleación y sus proporciones relativas).

3.3.1. Microestructura

Las superaleaciones base cobalto, no tienen una fase de fortalecimiento secundario como gamma prima. Sin embargo, están formadas por una *matriz de cobalto, que es prácticamente austenítica*, es decir, los elementos de adición utilizados como cromo, tantalio, tungsteno, molibdeno y níquel, entran en solución sólida en la matriz cúbica centrada en las caras y contribuyen al reforzamiento a través de los efectos normales de endurecimiento por solución sólida, figura 3.1.

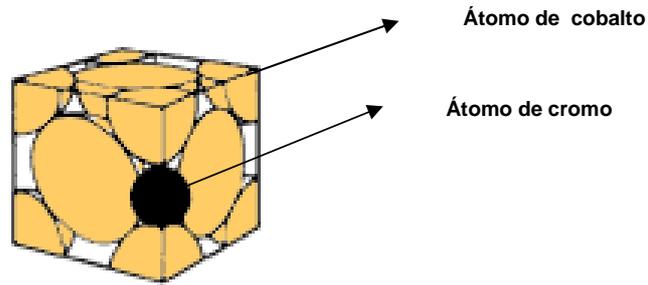


Figura 3.1. Estructura cristalina (FCC) de la matriz de las superaleaciones de cobalto.

No obstante, participan en un porcentaje minoritario otros componentes como el carbono, silicio, hierro, manganeso, etc.

Estas aleaciones muestran una fuerte tendencia a la precipitación de diversos carburos en el límite de grano como son M_6C , M_7C_3 , $M_{23}C_6$, MC o compuestos intermetálicos, junto a la formación de constituyentes eutécticos en zonas de fusión incipiente que pueden aparecer con las elevadas temperaturas de tratamiento. Estos carburos son los responsables de que las aleaciones base cobalto posean una elevada resistencia al desgaste y a la abrasión a altas temperaturas. Sin embargo, las elevadas temperaturas, alrededor de $1,285^\circ C$, producen áreas de fusión inicial, que hacen la precipitación de carburos $M_{23}C_6$ en el borde de grano con estructura tipo Widmanstätten, figura 3.2.

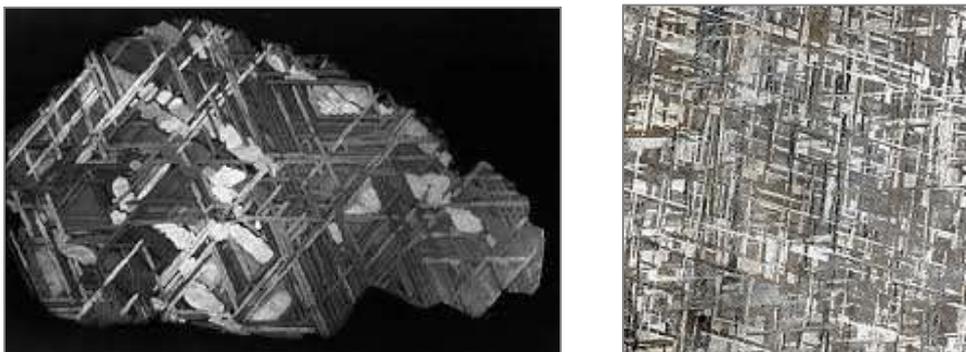


Figura 3.2. Estructura tipo Widmanstätten.

Estas estructuras afectan las propiedades mecánicas del material. Los tratamientos posteriores a la sinterización como el prensado isostático en caliente y la solubilización, rompen la estructura de placas de los carburos, mejorando sensiblemente las propiedades del material.

La resistencia mecánica de las superaleaciones base cobalto es inferior a las de níquel, pero mantienen su resistencia a temperaturas mucho más elevadas. Su resistencia en estas condiciones se debe, principalmente, a la distribución de los *carburos refractarios* (combinaciones de metales tales como el tungsteno y el molibdeno con el carbono) mencionados anteriormente, que tienden a precipitar en los límites de los granos de la matriz austenítica. La mejora de las propiedades de la aleación con la red de carburos se mantiene hasta temperaturas próximas a su punto de fusión.

En conclusión, las superaleaciones de cobalto están constituidas por *metales refractarios* y *carburos metálicos*, además de contener niveles elevados de *romo*, lo que aumenta la resistencia a la corrosión, que puede ser provocada por la presencia de gases de combustión calientes. Los átomos de cromo se combinan con los átomos de oxígeno y forman una capa protectora de óxido de cromo, que protege la aleación de gases corrosivos.

La figura 3.3 muestra la microestructura de una aleación de cobalto y dendritas de carburo de cromo en los límites de grano.

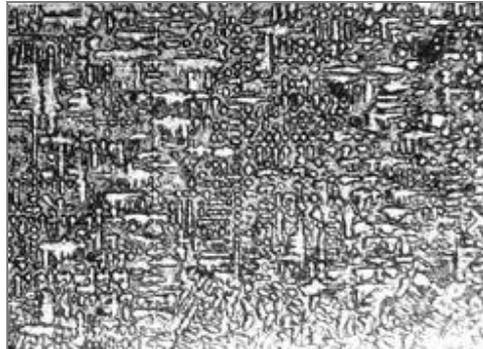


Figura 3.3. Aleación de cobalto y dendritas de carburo de cromo.

3.3.2. Características o propiedades de las superaleaciones base cobalto

Las características o propiedades mecánicas sirven en la mayoría de los casos como base para dictaminar sobre un material metálico, con vistas a un fin de aplicación concreto. A continuación se da un resumen de las propiedades mecánicas más importantes de las **superaleaciones de cobalto** no sólo sometidas a esfuerzo continuo sino también esfuerzos cíclicos e impacto.

- Excelente resistencia al *desgaste* y al *“galling”* (descamación en la superficie) a altas temperaturas.
- Buena resistencia a la corrosión, debido a que en la superficie se forma una capa de óxido inerte que inhibe el ataque del medio fisiológico al metal y le confiere una extraordinaria protección.
- Excelente resistencia a la oxidación, en caliente debido al mayor contenido en cromo (del 20 al 30%).
- Buenas propiedades mecánicas tensión-ruptura a alta temperatura.
- Módulo de elasticidad de entre 220 y 234 GPa que es superior incluso al de los aceros inoxidable (200-210 GPa).
- Mantienen su resistencia a temperaturas elevadas.
- Buena resistencia al calor (choque térmico).
- Buena resistencia al creep.
- Elevada refractariedad.
- Son más sencillos de soldar que otras superaleaciones y se forjan con más facilidad.

La gran resistencia al desgaste de las aleaciones base cobalto la hacen difícil de fabricar. Así mismo, como en el níquel y en el hierro, la adición de cromo, molibdeno, y tungsteno mejoran la resistencia a la corrosión en estas aleaciones.

La resistencia al Creep se alcanza por soluciones sólidas, y también por la adición de una fase dispersa virtualmente insoluble en la matriz.

3.3.3. Métodos de elaboración de superaleaciones base cobalto

Las técnicas de elaboración por las cuales se puede llevar a cabo la fabricación de superaleaciones base cobalto son prácticamente las mismas que las de base níquel, solo que se asumirán dos de suma importancia.

Fundición convencional

La *fundición* es un método común en la fabricación de estas aleaciones, por medio de la fundición convencional. Este procedimiento consiste normalmente en fundir la pieza de cobalto y cromo, agregando pequeñas cantidades de otros metales como tantalio, tungsteno, molibdeno, níquel, carbono y hierro para aumentar aún más la dureza y proteger de la corrosión al producto final. Luego, la mezcla líquida se enfría

controlando la velocidad, con el fin de obtener las propiedades adecuadas a altas temperaturas.

Moldeo por inversión o cera perdida

El proceso de moldeo por inversión consiste en una caja refractaria donde se mete el modelo hecho de cera, para que posteriormente la caja se caliente, de manera que la cera se derrita y se plasme el molde en la misma caja. Luego, entra el material fundido y se llena la cavidad, formándose así la pieza. Por último, se rompe la caja refractaria dejando solo la pieza fundida.

Esta técnica de procesado presenta las siguientes características:

- Realiza piezas en una sola operación con un mínimo de gasto de material y de energía.
- Las piezas no necesitan un maquinado posterior.
- Puede fabricar cualquier pieza complicada y de cualquier tamaño.
- Los materiales más duros de trabajar son los primeros candidatos para este tipo de fundición.

Las ventajas del moldeo por inversión son:

- Fabricación de piezas de cualquier forma, tamaño y material.
- Excelente tolerancias.
- No requiere posicionamiento de la pieza, ni salidas para desmoldeo.
- Uniformidad en las piezas.
- Económicamente rentable para una gran cantidad de piezas.

Poliestireno expandido

Es muy similar al proceso anterior, solo que aquí se utiliza arena refractaria compactada en vez de una caja refractaria. En este proceso se obtienen los modelos de poliestireno, revisando muy bien que no tengan defectos que se reproduzcan en las piezas. Luego, se recubre el modelo con arena refractaria compactada. Posteriormente, se vacía el material en la arena para que la temperatura evapore el poliestireno. Por último, el material llena la cavidad y toma la forma de la pieza.

Las ventajas de la fundición con poliestireno expandido son:

- Evita el almacenamiento de modelos no permanentes.
- Permite obtener tolerancia que se ajustan bien a las requeridas.
- Permite el reciclaje de la arena ya utilizada.
- No es necesaria la utilización de machos.
- Los modelos se pueden fabricar uniendo parte mas sencillas.
- Mejor acabado superficial.
- Libertad de diseño.

Pulvimetalurgia

La pulvimetalurgia ha alcanzado gran importancia en la preparación de superaleaciones con características especiales, y está basado en la compactación y sinterización de pequeñas partículas de la aleación. En este proceso, se preparan las aleaciones mezclando los materiales secos en polvo, prensándolos a alta presión y calentándolos después a temperaturas justo por debajo de sus puntos de fusión, con el fin de eliminar la porosidad. El resultado es una aleación sólida sin heterogeneidades en la composición química, y se obtienen microestructuras homogéneas controladas, ya que se evitan los rechupes (contracciones de volumen producidos en la solidificación).

3.3.4. Procesos de endurecimiento empleados en superaleaciones base cobalto

Con el fin de obtener altas resistencias en frío y a elevadas temperaturas, los elementos de aleación deben producir un endurecimiento y una microestructura del material estable a estas temperaturas. Los procesos de endurecimiento generalmente empleados en estas aleaciones son:

- Endurecimiento por solución sólida,
- Endurecimiento por dispersión de carburos, y
- Endurecimiento por precipitación.

Endurecimiento por solución sólida

Grandes adiciones de cromo, molibdeno y tungsteno, y pequeñas adiciones de tantalio, circonio, niobio y boro proporcionan un endurecimiento por solución sólida. Puesto que durante el calentamiento no ocurren procesos de ablandamiento, los efectos del endurecimiento resultan

bastante estables, actuando los bordes de grano como frenos al avance de las dislocaciones. En consecuencia, esto hace a la aleación resistente a la termofluencia.

Endurecimiento por dispersión de carburos

Todas las aleaciones, aunque no se haya especificado en su composición química, contienen pequeñas cantidades de carbono, el cual, en combinación con otros elementos de aleación, produce una red de partículas finas de carburo muy estables. Estos carburos, tales como el TiC, BC, ZrC, TaC, Cr₇C₃, Cr₂₃C₆, Mo₆C y W₆C, tienen una extraordinaria dureza. La estelita 6B, superaleación base cobalto, posee una elevada resistencia al desgaste y a la erosión a altas temperaturas debido a la presencia de estos carburos.

Endurecimiento por precipitación

Algunas de las superaleaciones de cobalto forman precipitados endurecedores durante el envejecimiento, coherentes con la matriz, que aumentan en gran medida la resistencia de la aleación, sobre todo a elevada temperatura.

3.4. SUPERALEACIONES DE COBALTO MÁS USUALES

La tabla 3.2 muestra un panorama general de las superaleaciones base cobalto más usuales, importantes y comerciales en México, pero existen otras más, las cuales se mencionarán también.

Tabla 3.2. Aleaciones de cobalto - Composición Química Nominal (%).

ALEACIÓN	Co	Cr	W	C	Ni	Mo	Fe	Si	Otros	Dureza (HRC)
Stellite 1	Bal.	32	12	2.45	<3	<1	<3	<2	<0.5	51-56
Stellite 6	Bal.	30	4.5	1.2	<3	<1	<3	<2	<0.5	40-45
Stellite 12	Bal.	30	8	1.4-1.8	<3	<1	<3	<2	<0.5	46-51
Stellite 20	Bal.	33	16	2.45	<3	<1	<3	<2	<0.5	53-59
Stellite 21	Bal.	28	-	0.25	3	5.2	<3	<1.5	<0.5	28-40
Stellite 22	Bal.	28	-	0.30	1.5	12	<3	<2	<0.5	41-49
Stellite 25	Bal.	20	14	0.1	10	<1	<3	<1	<0.5	20-45
Stellite 31	Bal.	26	7.5	0.5	10	-	<2	<1	<0.5	20-35
Stellite F	Bal.	26	12	1.7	22	<1	<3	<2	<0.5	40-45
Stellite 107	Bal.	31	4	2	24	-	<2	<3	<0.5	38-47
Stellite 190	Bal.	27	13.5	3.2	<1	<1	<3	1	<0.5	54-59
Stellite 250	Bal.	28	-	0.1	-	-	21	<1	<0.5	20-28
Stellite 306	Bal.	25	3	0.5	6	-	4	1	6 Nb	32-42
Stellite 694	Bal.	28	19	1	5	-	<3	1	1 V	48-54
Stellite 706	Bal.	31	-	1.2	<3	4	<3	<1	<1	39-44
Stellite 712	Bal.	31	-	1.5/1.9	<3	8	<3	<2	<1	46-51
ULTIMET	Bal.	26	2	0.06	9	5	3	-	<1	28-45

3.4.1. Estelite® o Stellite® (Co, Cr, Ni, Fe, C).

Estelite es una marca registrada usada como prefijo para más de veinte diferentes aleaciones de metales resistentes al desgaste. Es producido por Deloro Stellite Company (inventado por Elwood Haynes), figura 3.4.



Figura 3.4. Estelite en soldadura.

Propiedades

- Es no magnética.
- Elevada dureza y tenacidad.
- Buena resistencia mecánica.
- Excelente resistencia al desgaste.
- Alta resistencia a la corrosión, erosión, abrasión y galling.
- Buena capacidad para soportar temperaturas extremas.
- Dificiles de mecanizar.
- Tienden a tener extremadamente arriba puntos de fusión.

Aplicaciones

- Dientes para sierras.
- Alabes de turbinas.
- Herramientas para tornos.
- Centrales eléctricas nucleares (tuberías que comunican con el reactor).
- Revestimiento en duro.
- Piezas de maquinaria resistentes a ácidos.
- Asientos de válvula, válvulas de motores de combustión interna reduciendo el desgaste en ellos.
- Revestimiento de vainas de termopares
- Estructuras de prótesis dentales.

Stellite 6B (Otros nombres: Cobalto 6B, Haynes 6B).

Aleación de *cobalto-cromo-tungsteno*. Esta aleación tiene la siguiente composición química, tabla 3.3.

Tabla 3.3. Composición Química (%).

Elementos	Porcentaje
Cobalto (Co)	RESTO
Cromo (Cr)	28.0 – 30.0
Tungsteno (W)	3.5 - 5.5
Níquel (Ni)	0 – 3.0
Hierro (Fe)	0 – 3.0
Molibdeno (Mo)	0 - 1.5
Manganeso (Mn)	0 – 2.0
Carbono (C)	0.9 - 1.4
Silicio (Si)	0 – 2.0

Propiedades

- Resistencia máxima (MPa): 1,221.
- Limite elástico (MPa): 710.
- Elongación (%): 4.
- Elevada resistencia al desgaste, a la abrasión, y al "galling", a altas temperaturas.
- Posee bajo coeficiente de fricción, permitiendo el contacto con deslizamiento con otros metales sin dañarlos por arrastre de material.
- Alta resistencia a la mayoría de las formas de desgaste. Esta característica es inherente al material y no es debida a trabajado en frío, tratamiento térmico u otro proceso.
- Buena resistencia a la erosión por cavitación.
- Buena resistencia al impacto y al shock térmico.

- Buena resistencia al calor, reteniendo una alta dureza aún estando al rojo (al enfriarse recupera su dureza original).
- Buena resistencia a medios corrosivos.
- Buena resistencia a la oxidación.

Aplicaciones

Estas aleaciones encuentran utilidad cuando se requieren conjuntamente resistencia al desgaste y a la corrosión.

- Usado en turbinas de vapor.

Haynes 25.

Aleación de *cobalto-cromo-tungsteno*. Esta aleación tiene la composición química mostrada en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Composición Química (%).

Elementos	Porcentaje
Cobalto (Co)	Resto
Cromo (Cr)	20.0
Tungsteno (W)	15.0
Níquel (Ni)	10.0

Propiedades

- Resistencia máxima (MPa): 931.
- Limite elástico (MPa): 448.
- Elongación (%): 60.

Aplicaciones

- Motores a reacción.

UTP Celist 701.

Aleación de *cobalto-cromo-tungsteno*. Esta aleación tiene la composición química mostrada en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Composición Química (%).

Elementos	Porcentaje
Cobalto (Co)	Balance
Carbono (C)	2.3
Cromo (Cr)	32.0
Tungsteno (W)	13.0

Propiedades

- Dureza de 54-56 RC.
- Alta resistencia al desgaste.
- Buena resistencia a la corrosión a altas temperaturas.

Aplicaciones

Indicado para superficies duras resistentes al desgaste sobre partes sujetas a abrasión severa en combinación con corrosión y temperaturas altas hasta 900°C.

UTP Celist 706.

Aleación de *cobalto-cromo-tungsteno*. Esta aleación tiene la composición química mostrada en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Composición Química (%).

Elementos	Porcentaje
Cobalto (Co)	Balance
Carbono (C)	1.1
Cromo (Cr)	27.5
Tungsteno (W)	4.5

Propiedades

- Dureza de 40-42 RC.
- Alta resistencia al desgaste.
- Buena resistencia a la corrosión y presión a altas temperaturas.

Aplicaciones

Indicado para superficies duras de alto grado sobre partes sujetas a una combinación de impacto, corrosión, capitación, abrasión, presión, erosión y altas temperaturas hasta 900°C.

UTP Celist 712.

Aleación de *cobalto-cromo-tungsteno*. Esta aleación tiene la composición química que se muestra en la tabla 3.7.

Tabla 3.7. Composición Química (%).

Elementos	Porcentaje
Cobalto (Co)	Balance
Carbono (C)	1.6
Cromo (Cr)	29.0
Tungsteno (W)	8.5

Propiedades

- Dureza de 48-50 RC.
- Alta resistencia al desgaste.
- Buena resistencia a la corrosión y presión a altas temperaturas.

Aplicaciones

Indicado para superficies duras altamente resistente al desgaste sobre partes sujetas a una combinación de abrasión, erosión, cavitación, corrosión, presión y altas temperaturas hasta 900°C.

Aleación ASTM F1091 (Otros nombres: L605, F90).

Aleación de *cobalto-cromo-níquel-tungsteno*. Esta aleación tiene la composición química, mostrada en la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Composición Química (%).

Elementos	Porcentaje
Carbono (C)	0.05 - 0.15
Fósforo (P)	0 - 0.03
Silicio (Si)	0 - 0.4
Manganeso (Mn)	1.0 – 2.0
Azufre (S)	0 - 0.03
Cromo (Cr)	19.0 – 21.0
Níquel (Ni)	9.0 – 11.0
Tungsteno (W)	14.0 – 16.0
Hierro (Fe)	0 – 3.0
Cobalto (Co)	46.39 - 53.49

Propiedades

- Aleación no magnética.
- Buena resistencia a la oxidación y corrosión.
- Buena resistencia mecánica a temperaturas elevadas.

Las propiedades mecánicas elevadas pueden obtenerse mediante trabajo en frío. Luego del trabajo en frío permanece siendo no magnética. Si bien su respuesta al tratamiento térmico de envejecido es mínima comparada con otras aleaciones endurecibles por envejecimiento, en algunos casos puede utilizarse en condición de trabajado en frío y envejecido.

Aplicaciones

Entre sus aplicaciones se encuentran: dispositivos médicos, stents, resortes, válvulas y componentes para la industria aeroespacial.

Debido a su alto contenido de tungsteno, el L605 es radio-opaco, lo que es beneficioso en los dispositivos implantables.

- Implantes dentales.
- Prótesis quirúrgicas.

3.4.2. Talonite® (Co, Cr, Ni, Fe, C).

Talonite es una marca registrada y es una aleación similar a Estelite solo que ha sido laminado en caliente y se ha endurecido de una manera particular para proporcionar una combinación de dureza, resistencia al desgaste y maquinabilidad. Es producido por Deloro Stellite Company, figura 3.5.



Figura 3.5. Aleación talonite utilizada en cuchillería especial.

Propiedades

- No es magnética.
- Excelente resistencia al desgaste y a la corrosión.

- Es más fácil de trabajar que el Estelite.
- Buena capacidad para soportar temperaturas extremas.

Aplicaciones

- Cuchillería especial.
- Dientes para sierras.
- Herramientas para tornos.
- Asientos de válvula, válvulas de motores de combustión interna reduciendo el desgaste en ellos.

3.4.3. Aleación Co-Cr-Ta-Zr.

La aleación de *cobalto-cromo-tantalio-zirconio* reúne una serie de cualidades y ventajas que pueden ser interesantes a la hora de trabajar con ella. Esta aleación tiene la composición química que se muestra en la tabla 3.9.

Tabla 3.9. Composición Química (%).

Elementos	Porcentaje
Carbono (C)	0.93
Cobalto (Co)	53.4 - 61.0
Cromo (Cr)	23.0
Hierro (Fe)	1.5
Manganeso (Mn)	0.01
Silicio (Si)	0.04
Tantalio (Ta)	10.0
Tungsteno (W)	11.0
Zirconio (Zr)	0.03

La ventaja de esta aleación es que no tiene níquel, además de contener tungsteno y tantalio que le dan mayor dureza y compatibilidad fisiológica.

Propiedades

- Resistencia a la compresión de 760 MPa.
- Elongación de 3%.
- Límite elástico de 760 MPa.
- Dureza Vickers de 460.
- Resistencia a la tensión de 1,035 MPa.
- Módulo de Young de 235 GPa.
- Reacciona muy bien contra el agua del mar.
- Su temperatura de colada llega a los 1,410°C.

Aplicaciones

Esta aleación necesita ser usada por microfusión o colada.

- Se usa en las paletas de las turbinas que impulsan el aire o el fluido.

3.4.4. Aleaciones Co-Cr-Mo.

Los dos elementos básicos en estas aleaciones son el cobalto (65 %) y cromo (35 % en peso) que forman una solución sólida. Se añade molibdeno para producir un grano más pequeño que produce una mayor resistencia después de moldear. Estas aleaciones moldeadas fueron las primeras en ser utilizadas ya que presentan un elevado grado de rigidez.

Las aleaciones **CoCrMo** tienen buena resistencia a la corrosión y elasticidad. Son utilizadas principalmente en:

- Piezas coladas.
- Restauraciones dentales.
- Articulaciones artificiales.

Aleación ASTM F1537 (Otros nombres: CCM, CoCrMo).

Aleación de **cobalto-cromo-molibdeno**. Puede presentarse en versiones de alto contenido de nitrógeno y bajo contenido de carbono (CCM). Esta aleación tiene la composición química mostrada en la tabla 3.10.

Tabla 3.10. Composición Química (%).

Elementos	Porcentaje
Cobalto (Co)	RESTO
Cromo (Cr)	26.0 – 30.0
Molibdeno (Mo)	5.0 – 7.0
Carbono (C)	0 - 0.14
Silicio (Si)	0 – 1.0
Níquel (Ni)	0 – 1.0
Hierro (Fe)	0 - 0.75
Manganeso (Mn)	0 – 1.0
Nitrógeno (N)	0 - 0.25

Observaciones:

La composición mostrada corresponde a la versión de alto nitrógeno y bajo carbono (CCM).

Propiedades

- Posee alta resistencia mecánica.
- Buena resistencia a la corrosión y resistencia al desgaste.
- Elevado grado de rigidez.
- No magnética.

Aplicaciones

Se utiliza para forjar y maquinar prótesis ortopédicas para reemplazo de articulaciones y dispositivos de fijación de fracturas, como las utilizadas en caderas, rodillas y hombros.

- Prótesis quirúrgicas.

Aleación ASTM F-75.

Aleación de *cobalto-cromo-molibdeno*. Puede presentarse en versiones de alto contenido de nitrógeno y bajo contenido de carbono (CCM). Esta aleación tiene la composición química que se muestra en la tabla 3.11.

Tabla 3.11. Composición Química (%).

Elementos	Porcentaje
Cobalto (Co)	58.9 - 64.9
Cromo (Cr)	26.0 – 30.0
Molibdeno (Mo)	5.0 – 7.0
Carbono (C)	0 - 0.1
Silicio (Si)	0 – 1.0
Níquel (Ni)	0 – 1.0
Hierro (Fe)	0 - 0.75
Manganeso (Mn)	0 – 1.0
Nitrógeno (N)	0 - 0.25

Observaciones:

La composición mostrada corresponde a la versión de alto nitrógeno y bajo carbono (CCM).

Propiedades

- Posee alta resistencia mecánica.
- Buena resistencia a la corrosión y resistencia al desgaste.
- Alto grado de rigidez.
- No magnética.

Aplicaciones

Se utiliza para forjar y maquinar prótesis ortopédicas para reemplazo de articulaciones y dispositivos de fijación de fracturas, como las utilizadas en caderas, rodillas y hombros.

- Prótesis quirúrgicas.

Aleación ASTM F76.

Aleación de *cobalto-cromo-molibdeno*.

Propiedades

Condición: *Por colado, forjado y pulvimetalurgia.*

- Resistencia máxima de 655 MPa.
- Limite elástico de 450 MPa.
- Elongación de 8%.

3.4.5. Aleaciones Co-Ni-Cr-Mo.

Las aleaciones *Co-Ni-Cr-Mo* son forjadas, los dos elementos mayoritarios en estas aleaciones son el cobalto y cromo, formando una solución sólida con hasta un 65 % (en peso) de cobalto. Se añade molibdeno para producir un grano más pequeño que produce una mayor resistencia después de forjar, mientras que el níquel aumenta la dureza y resistencia. Asimismo, deben evitarse las soldaduras en esta aleación ya que las uniones son lugares propicios para la aparición de corrosión.

Las aleaciones forjadas CoNiCrMo de alta resistencia mecánica, fueron desarrolladas al comienzo de los años 70, utilizadas en vástagos de prótesis de cadera.

Propiedades

- Resistencia elevada a la corrosión en medio salino y carga.
- Resistencia a la fatiga y tenacidad mayores al de las aleaciones CoCrMo.
- El trabajado en frío puede incrementar la tenacidad en más de un 100 %.
- Resistencia al desgaste con el mismo metal y otros materiales pobres.

Aplicaciones

- Piezas forjadas.
- Vástagos de implantes altamente cargados, tales como caderas y rodillas.
- Componentes de vida útil prolongada.

Aleación ASTM F562 (Otro nombre: Co-Ni-Cr-Mo).

Aleación de *cobalto-níquel-cromo-molibdeno*.

Propiedades

Condición: Forjado + Solubilizado por Recocido.

- Resistencia a la rotura (MPa): 795 – 1000.
- Límite elástico (MPa): 240 – 655.
- Elongación (%): 50.

Condición: Forjado + Trabajado en frío.

- Resistencia a la rotura (MPa): 1790.
- Límite elástico (MPa): 1585.
- Elongación (%): 8.

Condición: Forjado + Recocido completamente.

- Resistencia a la rotura (MPa): 600.
- Límite elástico (MPa): 276.
- Elongación (%): 50.

Estas propiedades satisfacen las normas ASTM.

El módulo de elasticidad es de 220-234 GPa y no cambia con la resistencia a la rotura.

Aleación Co-Cr-Ni-Mo-W-Fe.

Propiedades

Condición: Forjado

- Resistencia máxima (MPa): 1,310.
- Limite elástico (MPa): 1,172.

- Elongación (%): 12.

3.4.6. Elgiloy®

Elgiloy® es una marca registrada. Esta aleación tiene la composición química que se muestra en la tabla 3.12.

Tabla 3.12. Composición Química (%).

Elementos	Porcentaje
Níquel (Ni)	20
Cobalto (Co)	40
Cromo (Cr)	20
Molibdeno (Mo)	7
Manganeso (Mn)	2
Hierro (Fe) Carbono (C) Berilio (Be)	8.30 g/cm ³

Propiedades

- Alta resistencia mecánica.
- Buena resistencia a la temperatura y corrosión.

Aplicaciones

- Fabricación de resortes.
- Cierres de cremallera, termostatos y alumbrado público.
- Implantes.

3.4.7. Havar®

Havar® es una aleación de *Co (42.5%), Cr (20%), Ni (13%), Fe, W, Mo y Mn*, tratada térmicamente y laminada en frío. Esta debe endurecerse por envejecimiento. Así mismo, se puede unir utilizando las técnicas de soldadura. La excelente resistencia se logra por tratamiento térmico a 540 ° C, después de haberlo trabajado en frío.

Propiedades

- Excelente resistencia a altas temperaturas.
- Excelente resistencia a la corrosión.
- No magnético.
- Alargamiento (%): 1.
- Modulo de elasticidad (GPa): 200.
- Resistencia a la tracción (MPa): 1860.

Aplicaciones

- Diafragmas de presión.
- Resortes de poder.
- Espaciadores de la brecha en los cabezales magnéticos.
- Láminas de destino en la física nuclear.
- Producción de radioisótopos para la detección y tratamiento del cáncer.

3.5. DISTRIBUIDOR DE SUPERALEACIONES BASE COBALTO EN MÉXICO

Las empresas en México que fabrican y comercializan superaleaciones base cobalto son varias, así que solo se mencionaran dos importantes.

3.5.1. Kennametal Stellite

Kennametal Stellite produce sus propias aleaciones de cobalto y níquel que ofrece a una variedad de diferentes industrias, donde los problemas con el desgaste (calor, abrasión, corrosión y erosión) están a flote, en los productos que a menudo operan en condiciones muy duras y a altas temperaturas, dando lugar a acortar la vida de trabajo, alto costo de mantenimiento y tiempo de alta inactividad.

Los productos en aleaciones base cobalto incluyen:

- Barras.
- Laminas.
- Electroodos.
- Alambres.
- Polvos.

En la tabla 3.13 se muestran las principales aleaciones base cobalto que manejan.

Tabla 3.13. Aleaciones base cobalto.

ALEACIÓN	
Stellite [®] 1	Stellite [®] 25
Stellite [®] 3	Stellite [®] 31
Stellite [®] 4	Stellite [®] 190
Stellite [®] 6	Stellite [®] 694
Stellite [®] 6B	Stellite [®] 706
Stellite [®] 6K	Stellite [®] 712
Stellite [®] 12	Stellite [®] F
Stellite [®] 21	Stellite [®] Star J

3.5.2. Böhler Welding Group

Böhler Welding Group es una empresa metalúrgica líder a nivel mundial, que produce materiales de alto rendimiento como son: aleaciones base cobalto, aceros, aceros especiales, consumibles para soldadura, entre otros.

La gama de productos en aleaciones base cobalto incluyen:

- Alambres tubulares.
- Laminas.
- Polvos metálicos.
- Alambres tubulares para recargues duros.
- Alambres tubulares para metalización con arco spray.

- Flejes y fundentes para plaqueados.
- Alambres sólidos y varillas para soldadura MIG.
- Alambres para soldadura por arco sumergido.
- Varillas TIG.
- Fundente granulado.
- Electrodo revestidos.
- Varillas para soldadura oxiacetilénica.

En la tabla 3.14 se observan las aleaciones de cobalto de Böhler Welding Group más usuales.

Tabla 3.14. Aleaciones de cobalto de Böhler Welding Group.

Aleación	Composición Química (valor promedio, %)
UTP Celist 701	C 2.3, Cr 32, W 13.0, Co balance.
UTP Celist 712	C 1.6, Cr 29.0, W 8.5, Co balance.
UTP Celist 706	C 1.1, Cr 27.5, W 4.5, Co balance.

CAPÍTULO 4

ALEACIONES BASE TITANIO

4.1. EL TITANIO

Aspectos generales

El **titanio** es un elemento químico de símbolo Ti y número atómico 22. Se trata de un metal de transición de color gris plata y es considerado como un metal no ferroso ligero de la era espacial. Es el noveno elemento más común en la corteza terrestre (después del oxígeno, silicio, aluminio, hierro, magnesio, calcio, sodio, potasio), lo que constituye el 0.63%, y el cuarto metal estructural más abundante después del aluminio, hierro y magnesio. El titanio se extrae del rutilo (óxido de titanio) y la ilmenita, abundante en las arenas costeras, en la escoria de ciertos minerales de hierro, y en las cenizas de animales y plantas. Para ello, el óxido debe someterse antes a un proceso de refinado utilizando el proceso de Kroll, para que esta se convierta en tetracloruro de titanio y se prevenga su reacción con sustancias tales como el nitrógeno, el oxígeno y el hidrógeno. Después es reducido a titanio por medio de sodio o magnesio, para que este se esponje y se consolide. Finalmente se alea según se necesite y se procesa utilizando fundición de arco eléctrico al vacío.

El titanio experimenta transformaciones alotrópicas a temperaturas elevadas y presión atmosférica. Este fenómeno de la alotropía, se debe a que los átomos que forman las moléculas, se agrupan de distintas maneras, provocando características físicas diferentes como: color, dureza, textura, etc. El *titanio* tiene una red hexagonal compacta (*fase alfa*) a temperaturas inferiores a los 882°C. Es una estructura que no permite la maleabilidad y la ductilidad, es frágil. Por arriba de 882°C tiene una estructura cúbica centrada en el cuerpo (*fase beta*), que se mantiene hasta la temperatura de fusión, figura 4.1.

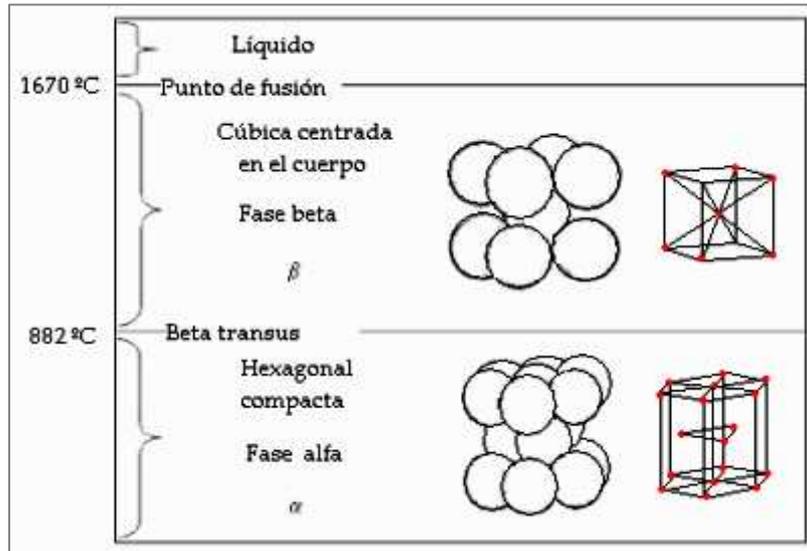


Figura 4.1. Estructuras cristalinas del titanio. Hexagonal compacta (fase α) y cúbica centrada en el cuerpo (fase β).

Comparado con el acero, metal con el que compite en aplicaciones técnicas, es mucho más ligero (4.5/7.8). Sus características generales son las siguientes:

- Densidad de 4.507 kg/m³.
- Punto de fusión de 1,670°C.
- Gran tenacidad.
- Relación de tenacidad-peso elevada.
- Alta resistencia a la corrosión y oxidación.
- Gran resistencia mecánica, especialmente a la tracción.
- Es maleable y dúctil.
- El contenido de oxígeno afecta severamente la ductilidad y tenacidad. A mayor concentración el material es más tenaz y duro.
- Material soldable.
- Mantiene una alta memoria de forma.

La principal limitación del titanio es su reactividad química con otros materiales a elevadas temperaturas, además de que es mucho más costoso que el acero, lo cual restringe su uso industrial.

Aplicaciones

Su utilización se ha generalizado en los siguientes ámbitos:

- **Industria aeronáutica-aeroespacial**, donde es capaz de soportar las condiciones extremas de frío y calor que se dan en el espacio.
- **Industria automovilística**, donde es incorporando a componentes de los vehículos con el fin de aligerar el peso de los mismos.
- **Construcción naval**, donde se fabrican hélices y ejes de timón, cascos de cámaras de presión submarina, componentes de botes salvavidas y plataformas petrolíferas, así como intercambiadores de calor, condensadores y conducciones en centrales que utilizan agua de mar como refrigerante, porque el contacto con el agua salada no le afecta.
- **Industria militar**, aquí el titanio es utilizado como material de blindaje, en la carrocería de vehículos ligeros, en la construcción de submarinos nucleares y en la fabricación de misiles.
- **Instrumentos deportivos**, donde se hacen distintos productos de consumo deportivo como palos de golf, bicicletas, cañas de pescar, etc.
- **Industria energética**, donde es utilizado en la construcción de sistemas de intercambio térmico en las centrales térmicas eléctricas y centrales nucleares.
- **Industria química**, por ser resistente al ataque de muchos ácidos.
- **Prótesis**, este metal tiene propiedades biocompatibles, dado que los tejidos del organismo toleran su presencia, por lo que es factible la fabricación de muchas prótesis e implantes de este metal.

El titanio forma aleaciones con otros elementos para producir componentes muy resistentes que son utilizados por las industrias aeroespacial, aeronáutica, militar, petroquímica, agroindustrial, automovilística y médica.

4.2. ALEACIONES DE TITANIO

Comercial y técnicamente existen muchas aleaciones de titanio. La ASTM (*American Society for Testing and Materials*) clasifica estas aleaciones basándose en la presencia de las fases α y β , quedando de la siguiente manera:

- Titanio de alta pureza.
- Aleaciones de titanio α .

- Aleaciones de titanio $\alpha+\beta$.
 - Aleaciones casi- α .
 - Aleaciones casi- β .
- Aleaciones de titanio β .

4.2.1. Titanio de alta pureza

El titanio comercialmente de alta pureza soporta altas temperaturas, son de poco peso, tienen alta resistencia mecánica y son excelentes en la resistencia a la corrosión.

El titanio comercialmente puro tiene una composición superior al 99% de titanio y esta disponible en varios grados en función del contenido de elementos intersticiales (impurezas) que tiene, como el carbono, hidrogeno, hierro, nitrógeno y oxígeno, los cuales influyen sobre la resistencia mecánica y la tenacidad del metal. Es *destacable* que el aumento del contenido en hierro empeora la resistencia del metal a la corrosión.

En la tabla 4.1 se definen los diversos grados de titanio comercialmente puro, según la norma ASTM-B265.

Tabla 4.1. Designación ASTM de los grados del titanio de alta pureza.

Designación Grado (ASTM)	Resistencia a la tensión mínima (MPa)	Módulo de elasticidad mínimo (MPa)	Límites de impureza (%)					Composición (%)				
			N (max)	C (max)	H (max)	Fe (max)	O (max)	Al	Sn	Zr	Mo	Otros
Ti grado 1	240	170	0.03	0.10	0.015	0.20	0.18	-	-	-	-	-
Ti grado 2	340	280	0.03	0.10	0.015	0.30	0.25	-	-	-	-	-
Ti grado 3	450	380	0.05	0.10	0.015	0.30	0.35	-	-	-	-	-
Ti grado 4	550	480	0.05	0.10	0.015	0.50	0.40	-	-	-	-	-
Ti grado 7	340	280	0.03	0.10	0.015	0.30	0.25	-	-	-	-	0.2Pd

Como se mencionó, el contenido de elementos intersticiales controla las propiedades mecánicas del material. A mayor cantidad de intersticiales el grado aumenta, es decir el grado 1 es el más

puro y el grado 4 el que contiene mayor cantidad de impurezas y el que presenta valores más altos de resistencia mecánica.

4.2.2. Aleaciones de titanio α

Las aleaciones usuales totalmente α contienen 5% de Al y 2.5% de Sn, ambos endurecedores de α por solución. Estas aleaciones tienen adecuada resistencia a la corrosión y a la oxidación, mantienen bien su resistencia mecánica a temperaturas elevadas, tienen soldabilidad adecuada y normalmente poseen aceptable ductilidad y conformabilidad a pesar de su estructura hexagonal compacta. Las aleaciones α se recosen a temperaturas elevadas en la región β y luego se enfrían. El enfriamiento rápido proporciona una estructura α de grano acicular fino, en tanto que un enfriamiento en horno proporciona una estructura de placas.

Estas aleaciones son normalmente usadas en componentes de motores a reacción.

4.2.3. Aleaciones de titanio $\alpha+\beta$

Las aleaciones $\alpha+\beta$ tienen cantidades pequeñas de aluminio y vanadio y pueden tratarse térmicamente para obtener altas resistencias. Primero la aleación es tratada por solución cerca de la temperatura beta-transus (transición de la fase β), lo que permite la persistencia de una pequeña cantidad de α para evitar el crecimiento de grano. Después, la aleación se enfría rápidamente para formar una solución sólida *sobresaturada metaestable β o martensita de titanio α* .

La β sobresaturada se retiene más fácilmente en las aleaciones más cercanas a las aleaciones enteramente de fase β .

La martensita de titanio α se forma en las aleaciones $\alpha+\beta$ con menos porcentaje de elementos aleantes y tiene típicamente una apariencia acicular.

Finalmente, la aleación es envejecida o revenida alrededor de 500°C. Cabe mencionar que durante el envejecimiento, las fases α y β dispersas (matriz), y el precipitado de la fase β o α , incrementa la resistencia y la tenacidad de la aleación.

Las aleaciones $\alpha+\beta$ tienen buena resistencia, alta ductilidad, propiedades uniformes y buena soldabilidad.

Los componentes para estructuras aeroespaciales, motores a reacción y trenes de aterrizajes son aplicaciones típicas de estas aleaciones $\alpha+\beta$ tratadas térmicamente.

4.2.4. Aleaciones casi- α

Cuando tiene una estructura esencialmente α a temperatura ambiente. En estas aleaciones pequeñas cantidades de fase β mejoran la forjabilidad.

- Tienen mayor resistencia que las aleaciones α a temperatura ambiente.
- Gran resistencia a la fluencia por encima de 400°C.

Se utilizan por su destacada resistencia a la fluencia y su estabilidad a temperaturas elevadas, puesto que contienen pequeñas cantidades de elementos estabilizadores de la fase β .

4.2.5. Aleaciones casi- β

Cuando tiene una estructura principalmente β a temperatura ambiente.

- Tienen menor resistencia que las aleaciones β a temperatura ambiente.
- Son menos flexibles en las técnicas de fabricación que las aleaciones β .

4.2.6. Aleaciones de titanio β

Estas aleaciones contienen estabilizadores β tales como molibdeno, silicio y vanadio.

Aunque las adiciones excesivas de vanadio o molibdeno producen una estructura totalmente β a temperatura ambiente, ninguna de las llamadas aleaciones β están realmente aleadas a tal grado. En lugar de esto, abundan estabilizadores de β , de modo que el enfriamiento rápido produce una estructura metaestable compuesta en su totalidad de β , haciendo que pueda ser no estable. En la condición recocida, donde sólo existe β en la microestructura, la resistencia proviene del endurecimiento por solución sólida.

Estas aleaciones tienen una alta resistencia endurecibles con el tiempo y permiten la flexibilidad en las técnicas de fabricación. Son más difíciles de mecanizar que las aleaciones fase $\alpha+\beta$. También pueden envejecerse para producir resistencias mayores.

Sus aplicaciones incluyen los sujetadores de alta resistencia, vigas y otros elementos para uso aeroespacial.

de titanio se han revelado como las más idóneas para esta aplicación, sin embargo, cabe mencionar que estas aleaciones también presentan una disminución de las propiedades mecánicas con el aumento de la temperatura. Esta evolución es importante de analizar porque por ejemplo, en el compresor de un motor se superan temperaturas de 400°C.

A pesar de los numerosos progresos llevados a cabo en el campo de las técnicas de aleación, de los tratamientos térmicos y de los trabajos mecánicos, se puede decir que la máxima temperatura de trabajo que resisten estas superaleaciones es todavía demasiado baja.

Concepto

Las superaleaciones base titanio son aquellas que tienen como elemento principal o en mayor proporción al titanio, conteniendo otras adiciones elementales comunes como son aluminio, vanadio, cromo, zirconio, molibdeno, estaño y niobio, que los hacen tener las propiedades adecuadas para resistir las condiciones más críticas, cargas elevadas, alta temperatura y a un ambiente agresivo. Estas superaleaciones son caras pero su aplicación se ha ido extendiendo.

4.3.1. Microestructura

Las superaleaciones base titanio, al igual que las superaleaciones de níquel, constan de dos fases, la fase α y la fase β , figura 4.3.

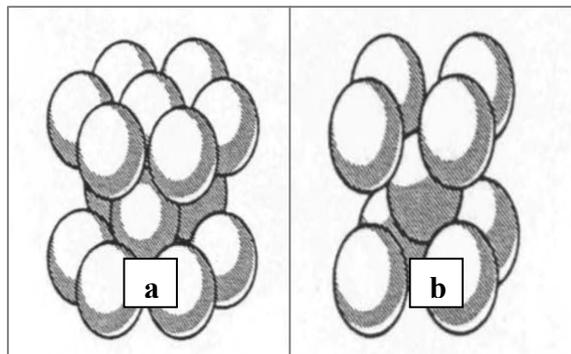


Figura 4.3. a) Red hexagonal compacta (fase α). b) Red cubica centrada en el cuerpo (fase β).

Así, dependiendo del proceso de conformación, del posterior tratamiento de recocido y de la velocidad de enfriamiento (temperaturas superiores a la β -transus), se hace posible la obtención de dos microestructuras diferentes: *laminar* y *equiaxial*.

Microestructura laminar

Cuando se eleva la temperatura por encima del β -transus la microestructura del material es laminar. Si el *enfriamiento es lo bastante rápido*, unas placas de fase α crecen en el borde de los granos de fase β , figura 4.4.

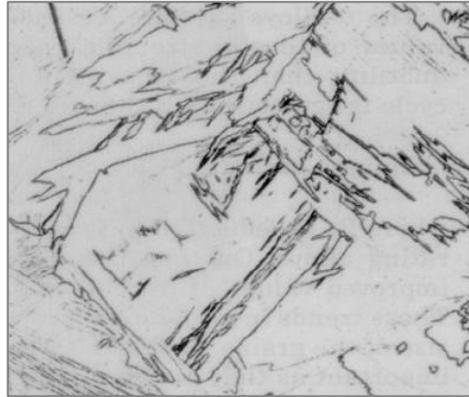


Figura 4.4. Microestructura laminar de una superaleación de titanio (templado rápidamente desde la región de fase β).

Dependiendo de la velocidad del enfriamiento se obtendrá distintos tamaños. Un enfriamiento rápido provoca la formación de placas más finas. Este fenómeno de la microestructura se llama Widmanstätten.

Ahora, si el *enfriamiento es lento* desde temperaturas superiores a la β -transus, la microestructura también es laminar, pero los granos se convierten en fase β y al enfriar lentamente se obtiene una estructura totalmente de placas de Widmanstätten que rodean a la fase β , como la que se puede apreciar en la figura 4.5.

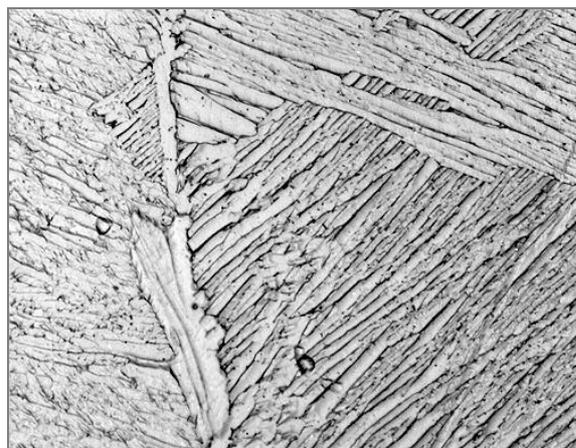


Figura 4.5. Microestructura laminar de una superaleación de titanio (enfriado lentamente desde la región de fase β).

Una microestructura laminar proporciona un mejor comportamiento a la fluencia, una mayor tenacidad y una mejor resistencia a la propagación de grietas, pero disminuye la resistencia a la fatiga.

Microestructura equiaxial

Cuando se eleva la temperatura de la aleación al dominio de la fase $\alpha+\beta$ y se enfría, se obtiene una microestructura equiaxial, figura 4.6.

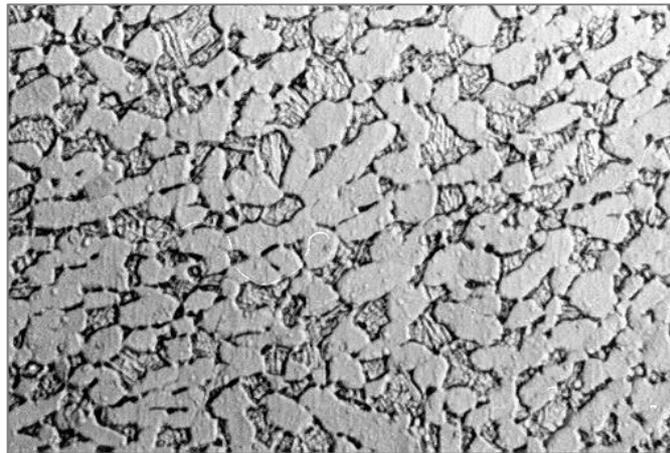


Figura 4.6. Superaleación de titanio mostrando granos equiaxiales de fase α (recocido 1 hora a 700°C).

Esta microestructura está constituida de granos de fase α primarios equiaxiales en una matriz de fase β retenida. En el proceso de enfriamiento, solidifican en primer lugar cristales de fase β ; a temperaturas más bajas cristalizan la fase α dentro de la matriz de fase β . Los cristales de la fase α presentan dos tipos de morfología:

Si la aleación se forma por tratamiento térmico y posterior enfriamiento, los cristales de fase α adquieren una forma lenticular, figura 4.7.



Figura 4.7. Forma lenticular de los cristales de fase α de las superaleaciones de titanio.

Cuando el material se trabaja en caliente y luego se trata térmicamente, los cristales de la fase α son más esféricos, figura 4.8.



Figura 4.8. Forma esférica de los cristales de fase α de las superaleaciones de titanio.

La morfología lenticular es más resistente a la termofluencia (confiriendo por ejemplo a los alabes una mayor capacidad para mantener su longitud inicial cuando giran a gran velocidad durante mucho tiempo) que la morfología esférica, pero resiste peor la fatiga de baja frecuencia.

Se han desarrollado tratamientos capaces de generar, en la misma muestra de una aleación, cristales de fase α de ambas formas, figura 4.9, ya que la resistencia a la termofluencia y a la

fatiga de baja frecuencia son propiedades a tener en cuenta al proyectar componentes rotatorios (alabes).



Figura 4.9. Muestra de una superaleación de titanio con cristales de fase α de ambas formas.

Así, la microestructura equiaxial (ambas formas de fase α) proporciona una mayor ductilidad, mejor resistencia a la iniciación de grietas por fatiga y es más formable.

En general, las propiedades mecánicas de las superaleaciones base titanio dependen en gran parte de su microestructura, es decir de la forma y del tamaño de los granos, y de la proporción de las fases α y β .

4.3.2. Efectos de los elementos de aleación en la microestructura

El principal efecto de los elementos de aleación en las superaleaciones de titanio, es la modificación de la temperatura de transformación. De esta manera, los elementos de aleación se clasifican en:

- **Elementos estabilizadores de la fase α** como el *carbono, nitrógeno, oxígeno, aluminio, galio y germanio* elevan la temperatura de transformación, es decir, incrementan la temperatura a la cual α se transforma en β .
- **Elementos estabilizadores de la fase β** como el *hidrógeno, cromo, vanadio, hierro, manganeso, cobalto, níquel, cobre, tantalio, molibdeno, niobio y tungsteno* disminuyen la temperatura de transformación (β), causando incluso que la fase β sea estable a temperatura ambiente.

- **Estabilizadores β isomorfos**, son el *vanadio* y *molibdeno*, y no forman compuestos intermetálicos con el titanio BCC, o sea la fase β .
- **Estabilizadores β eutécticos**, son el *hierro*, *manganeso*, *cromo*, *cobalto*, *níquel* y *cobre*, y forman sistemas eutéctoides con el titanio, produciendo una estructura difásica a temperatura ambiente.
- **Elementos neutros** como el *estaño* y *zirconio* fortalecen α y β proporcionando endurecimiento por solución sólida sin afectar la temperatura de transformación, mientras que el *silicio* mejora la resistencia a la fluencia.

En general los *elementos de aleación* en estas superaleaciones *aportan endurecimiento por solución sólida* y *modifican su temperatura de transformación alotrópica*, como se ve en la figura 4.10.

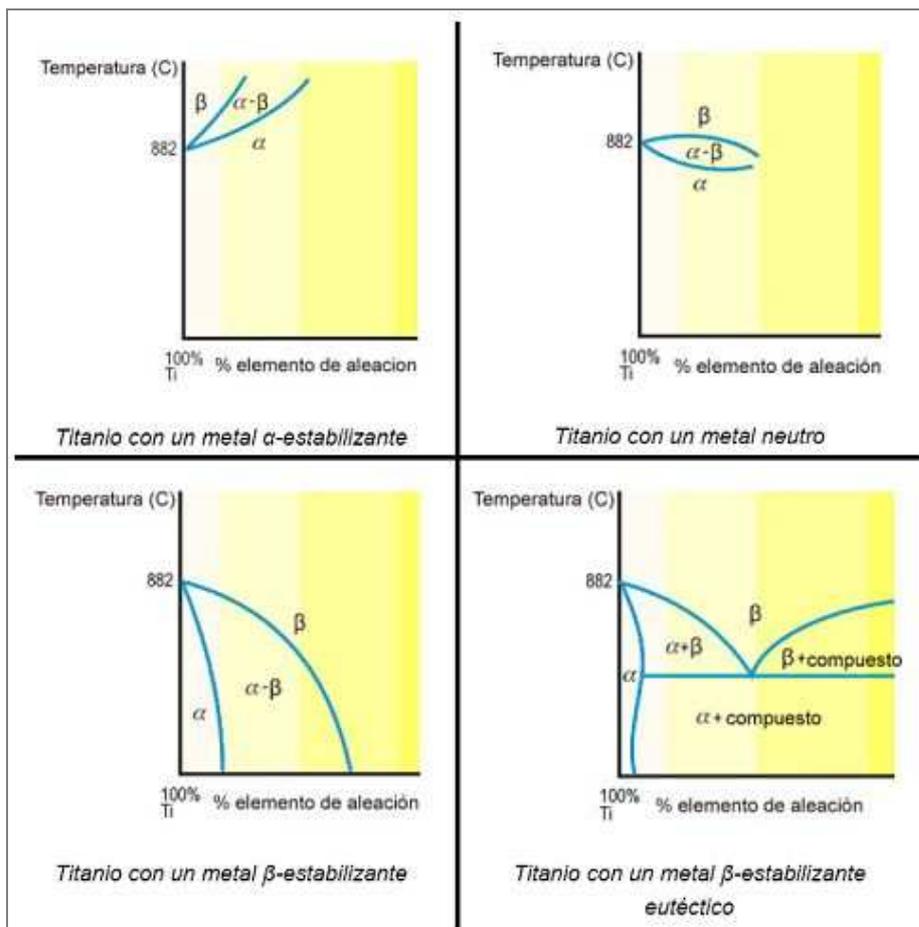


Figura 4.10. Efecto de los elementos de aleación sobre el diagrama de equilibrio del titanio.

4.3.3. Características o propiedades de las superaleaciones base titanio

En general las superaleaciones base titanio tienen las siguientes propiedades o características.

- Excelentes propiedades mecánicas.
 - Excelente resistencia mecánica.
 - Alta resistencia a la fatiga.
 - Excelente resistencia a la corrosión y oxidación; debido a que en la superficie se forma una capa de óxido inerte que impide el ataque del medio ambiente a la aleación y le confiere una extraordinaria protección.
 - Excelente resistencia a elevadas temperaturas, pero menor que la de las superaleaciones base níquel y cobalto.
 - Alta tenacidad-peso.
 - Densidad mucho menor que las superaleaciones basadas en cobalto y níquel.
 - Alta ductilidad.
- Son ligeras.
- Fácilmente forjadas, soldadas y maquinadas.
- Son muy costosas.
- No son magnéticas.

Parámetros que determinan la tenacidad

- Nivel de elementos intersticiales y sustitucionales.
- Tamaño de grano.
- Morfología microestructural.
- Fracciones relativas de α y β .
- Textura cristalográfica.

Las superaleaciones de titanio con mejor combinación de resistencia y tenacidad son las β metaestables, cuya microestructura consiste en una elevada fracción de fase β con precipitados muy finos de fase α .

4.3.4. Procesos de elaboración de superaleaciones base titanio

Las técnicas de elaboración más comunes por las cuales se pueden llevar a cabo la fabricación de superaleaciones base titanio son las siguientes:

- Fusión en vacío.

- Pulvimetalurgia.
- Efecto superplástico.

Fusión en vacío

Primero que nada hay que señalar que la obtención de superaleaciones de titanio mediante fundición directa no es aconsejable para estas, debido a que pueden contener cantidades importantes de gas incluido, debido a la elevada avidéz del titanio por los elementos intersticiales (oxígeno, nitrógeno, carbono, hidrógeno) produciendo su incorporación un aumento muy brusco de la resistencia mecánica y un descenso muy importante en la ductilidad, adquiriéndose un comportamiento frágil. Por lo tanto es aconsejable llevar el proceso de fusión al vacío, lo cual se llama así por no haber presencia de atmósfera.

La fusión al vacío permite el procesamiento de metales cuyas propiedades se degradarían si se funden en la atmósfera.

En el proceso de fusión al vacío, los metales son contenidos en un cilindro, encerrado en una charola que se llama crisol (generalmente de grafito) y se lleva a un vacío. Los metales se funden mediante el choque de un arco entre un electrodo cargado y los metales, formando así una mezcla en estado líquido. Entonces el crisol se rodea de agua que enfría la mezcla en una proporción controlada, para que finalmente se obtenga la aleación ya en estado sólido.

Al realizar este proceso en un vacío, se evita la incorporación de impurezas, que aparecen durante el proceso en crisoles de cerámica.

Ventajas del proceso

- La tasa de solidificación del material fundido puede controlarse meticulosamente.
- En condiciones de vacío, las impurezas escapan de la mezcla líquida a la cámara de vacío.
- Reduce la necesidad de materiales a gran escala y gastos laborales.

El desarrollo de esta técnica permite hoy en día de un control muy preciso de la composición química de las superaleaciones y de la contaminación.

Pulvimetalurgia

La pulvimetalurgia ha alcanzado hoy en día gran importancia en la preparación de superaleaciones de titanio alcanzando características especiales, y está basado en la compactación y sinterización de pequeñas partículas de la aleación. En este proceso, se preparan las aleaciones mezclando los materiales secos en polvo, prensándolos a alta presión y calentándolos después a temperaturas justo por debajo de sus puntos de fusión, con el fin de eliminar la porosidad. El resultado es una aleación sólida sin heterogeneidades en la composición química, y se obtienen microestructuras homogéneas controladas, ya que se evitan los rechupes (contracciones de volumen producidos en la solidificación).

Efecto superplástico

Las superaleaciones de titanio pueden fabricarse gracias a su superplasticidad. Esto no quiere decir que se ponga blando, si no que a un esfuerzo muy grande, cuando el titanio puro normalmente se rompería, la aleación empieza a experimentar deformación. Se puede deformar hasta unas 15 veces, o sea un 1500% sin romperse. La razón de este comportamiento radica en que los granos muy pequeños se deforman lentamente y se deslizan unos respecto a otros sin perder su mutua cohesión.

El proceso después de haber conseguido afinar el tamaño de grano (obtenido a temperaturas por debajo del punto de fusión) consiste en llevar la aleación a una deformación plástica (velocidad de deformación lento) que se alcanza a una temperatura de 0.5 a 0.65 veces su temperatura de fusión, logrando así la condición superplástica de la aleación.

Una vez que se ha llevado el material a la condición superplástica es posible deformarlo, como si fuera una masilla, en la forma prevista o deseada. Después, las piezas así deformadas se tratan térmicamente, se enfrían rápidamente y se envejecen, para conseguir una microestructura más resistente y estable a elevada temperatura que la ofrecida por granos pequeños de la estructura superplástica.

Así, las aleaciones superplásticas como las de titanio se pueden forjar en formas complejas, eliminando muchas etapas de mecanizado y de terminación. Este proceso es muy caro, ya que es lento, sin embargo es utilizado para hacer piezas y motores de aviones. Gran parte de los

motores están hechos de titanio superplástico, ya que resuelve el problema de las uniones, porque las distintas partes se pegan a una cierta temperatura y se presionan.

Las aleaciones fabricadas superplásticamente son menos costosas de mecanizar y, cuando se obtienen a partir de *polvos finos prealeados*, exhiben una notable uniformidad química y microestructural. Esta característica repercute en el logro de mejores propiedades que en las aleaciones forjadas, particularmente en la resistencia a la fatiga de baja frecuencia.

Los polvos prealeados pueden moldearse por dos técnicas:

- *Compactación isostática en caliente y*
- *Aleación mecánica.*

Compactación isostática en caliente

Los *polvos prealeados* para las superaleaciones de titanio pueden moldearse por el procedimiento conocido como *compactación isostática en caliente*. Primero, se empaquetan en un molde de pared delgada, que es una versión geométrica aumentada de la forma final prevista. Después, el molde se coloca en un horno de vacío a temperatura elevada, para eliminar las moléculas absorbidas de gas; luego, se sella el molde y se introduce en una prensa especial. Aquí, el molde se expone a elevadas presiones y temperaturas, reduciendo sus dimensiones y soldando los polvos entre sí (sinterización). Finalmente, se arranca el molde y la pieza obtenida se mecaniza a su forma final.

La compactación isostática en caliente no sólo sirve para fabricar polvos en una determinada forma, sino que también se aplica para subsanar defectos en piezas premoldeadas y para rejuvenecer alabes del estator y del rotor de una turbina (que muestran microporos en los límites de granos tras muchas horas de funcionamiento), así como otros componentes desgastados por el uso.

Aleación mecánica

La técnica de *alear mecánicamente*, se ha convertido en un procedimiento eficaz para conseguir este tipo de mezcla de polvos de partículas prealeados. Los materiales a alear se introducen en forma de pequeñas partículas, en un molino de bolas de gran velocidad, que consiste esencialmente en un conjunto de agitadores y un gran número de pequeñas bolas de

acero inoxidable. Los agitadores giran rápidamente, propiciando colisiones de las bolas entre sí y con las pequeñas partículas metálicas. De este modo, las partículas se sueldan en frío entre sí, formando aglomerados metálicos de mayores dimensiones, que con posteriores colisiones con las bolas se vuelven a desmoronar y a soldar repetidamente. El resultado es un polvo de partículas muy pequeñas y homogéneas. A continuación, este polvo se compacta y se sintetiza por extrusión en caliente, para que finalmente sea procesada y recristalizada direccionalmente.

Normalmente después de la elaboración de estas superaleaciones se suelen llevar otros procesos comunes como la mecanización, la forja y la soldadura.

Maquinado

El maquinado de superaleaciones de titanio presentan dificultades similares a las de los aceros inoxidables y mayores que las de los aceros normales, aunque tengan la misma dureza. Sin embargo, el mecanizado electroquímico es una forma para evitar dificultades de procesos de conformación.

Forja

La *forja en frío* en estas superaleaciones será más difícil en la medida de la cantidad de estructura hexagonal compacta (fase α) que contenga, ya que las posibilidades de deformación plástica serán muy limitadas.

La posibilidad de *forja en caliente* se hace a temperaturas superiores a la transformación alotrópica (882°C), presentando el fenómeno de superplasticidad.

Soldadura

Los procesos para soldar aleaciones de titanio pueden clasificarse de la siguiente forma:

- La soldadura por arco (*TIG, MIG y PAW*).
- La soldadura por láser y plasma.
- La soldadura por haz de electrones.
- La soldadura por resistencia eléctrica.
- La soldadura por fricción.
- La soldadura por difusión.

- La soldadura por forja.
- La soldadura “Brazing”.

4.4. TRATAMIENTO TÉRMICO DE SUPERALEACIONES BASE TITANIO

El tratamiento térmico en las superaleaciones base titanio se lleva a cabo con el fin de:

- Reducir los esfuerzos residuales producidos en el proceso de fabricación.
- Conseguir una adecuada combinación de ductilidad, maquinabilidad, estabilidad dimensional y estructural.
- Incrementar resistencia mecánica por medio de procesos de revenido y recocido.
- Optimizar propiedades particulares como la resistencia a la fractura, la resistencia a la fatiga y la resistencia a la fluencia a alta temperatura.

El tratamiento térmico consiste en procesos de revenido y recocido, los cuales se describen a continuación:

Revenido

En este proceso se calienta la estructura obtenida por enfriamiento rápido a una alta temperatura (550°C), donde la estructura sufre diversas transformaciones, obteniéndose con ello una alta resistencia.

Recocido

En este proceso se calienta la estructura hasta temperaturas de austenitización (800-925°C) seguido de un enfriamiento lento. Con este tratamiento se logra aumentar la elasticidad, mientras que se disminuye la dureza. También facilita el mecanizado de las piezas al homogeneizar la estructura, afinar el grano y ablandar el material.

Durante el recocido se logra eliminar la acritud y las tensiones internas que produce el trabajo en frío, figura 4.11.

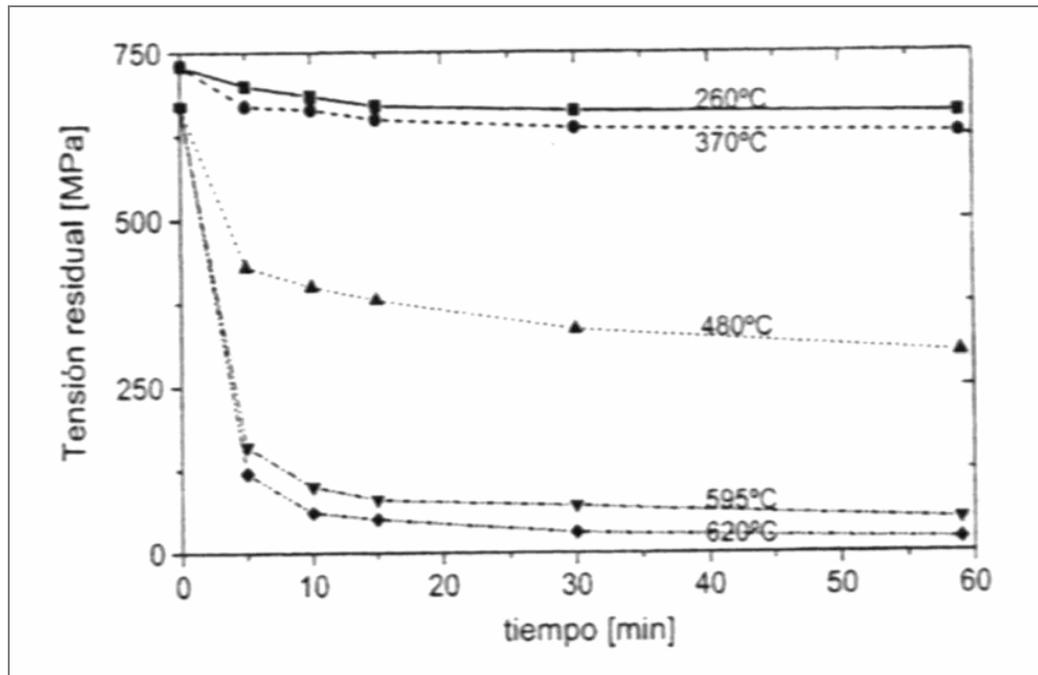


Figura 4.11. Gráfica donde se observa la eliminación de tensión residual (interna) respecto a la temperatura de recocido a 1 hora.

Los procesos de recocido más comunes en estas superaleaciones son:

- Mill-annealing.
- Doble recocido.
- Recocido de recristalización.
- Recocido β .

4.5. SUPERALEACIONES DE TITANIO MÁS USUALES

Las superaleaciones base titanio más usuales, importantes y comerciales en México, son las siguientes:

4.5.1. Timetal 64 o IMI 318 (Ti-6Al-4V)

Es una aleación de titanio $\alpha+\beta$ (específicamente casi- β), cuya composición es de 6% Al y 4% V, y es la aleación de titanio más empleada. El aluminio incrementa la temperatura de la transformación entre las fases α y β , mientras que el vanadio disminuye esa temperatura.

Presenta excelentes propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión y oxidación a temperaturas altas, alta tenacidad, biocompatibilidad y se pueden modificar sus propiedades mediante tratamiento térmico. Además, la aleación puede ser soldada y es moderadamente difícil de cortar.

La presencia de vanadio en la aleación, la hace bifásica ($\alpha+\beta$) mejorando de manera muy significativa la conformación por deformación plástica de los diferentes piezas aeroespaciales.

La aleación *forjada* muestra una microestructura denominada “mill annealed” (típica de recocido), compuesta por granos de fase α equiaxial finamente dispersas en una matriz β , figura 4.12.

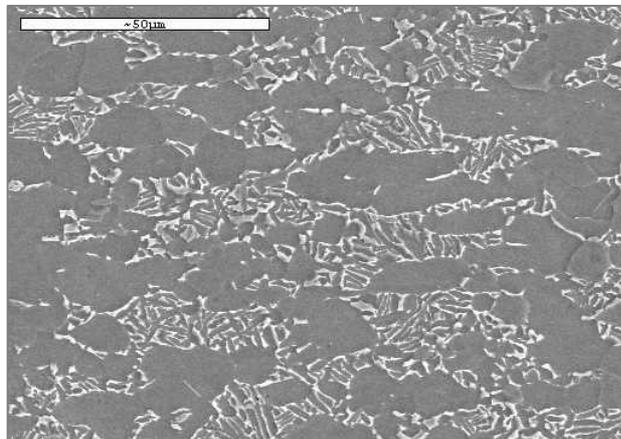


Figura 4.12. Microestructura “mill annealed” típica de recocido (Ti-6Al-4V).

La aleación sinterizada muestra una microestructura laminar de grandes placas α y β , debido a la baja velocidad de enfriamiento, figura 4.13. La fase α precipita preferencialmente en borde de grano de fase β .

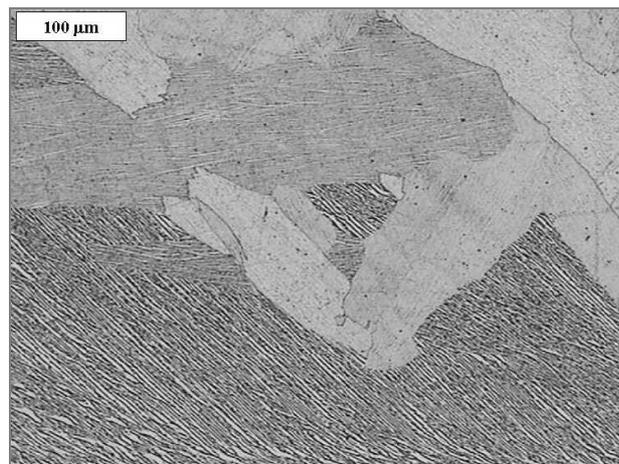


Figura 4.13. Microestructura laminar tras una sinterización (Ti-6Al-4V).

El tamaño de grano se hace mayor debido al tiempo de permanencia a temperaturas elevadas en el proceso. Aquí la microestructura “mill annealed” tiene una menor resistencia a la fatiga y tenacidad.

Tras la sinterización se suministra a un tratamiento llamado BUS (Broken-Up Structure), que rompe la estructura tipo Widmanstätten y forma pequeñas agujas tipo martensita, figura 4.14.

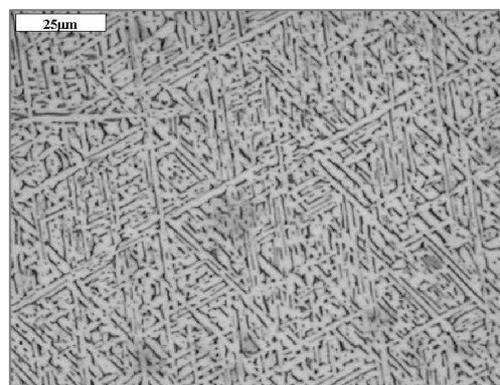


Figura 4.14. Microestructura resultante del tratamiento BUS.

Las propiedades mecánicas tras la sinterización son: límite elástico de 788 MPa, microdureza de 359 HV y límite de resistencia a la fatiga de 483 MPa (después del tratamiento BUS, hasta valores de 621 MPa).

Cabe mencionar que se debe evitar en los tratamientos térmicos de la aleación Ti-6Al-4V el enfriamiento rápido desde la fase α , ya que se produciría fragilidad en el material.

Esta aleación se usa en formas de laminas, placas, forjados, afianzadores y barras. Se encuentra comúnmente en aplicaciones aeroespaciales en lo que son componentes de motores a reacción de aviones (resistencia a alta temperatura) y alabes de turbina. Con la adición de molibdeno se puede usar en aplicaciones específicas de alta resistencia, en la forma de placa y forjado.

En la actualidad esta aleación comienza a ser de mayor utilización en prótesis articulares, mejorándose sus propiedades tribológicas por medio de diferentes procesos de endurecimiento, como son nitruraciones mediante implantación iónica o mediante difusión de nitrógeno.

Timetal 64 ELI o Aleación F136 ELI (Ti-6Al-4V ELI)

Versión modificada de la aleación Ti-6Al-4V que ofrece una mejora en la ductilidad ante fracturas en entornos de aire y agua salada, junto con una excelente dureza y resistencia. Por lo general, se utiliza en componentes del fuselaje, blindaje balístico, componentes para buques marinos, estructuras de vehículos espaciales y componentes de misiles.

Aleación Ti-6Al-4V-(0.08-0.14)Ru

Versión modificada de la aleación Ti-6Al-4V con contenido de Ru, que ofrece una mejora en la dureza ante fracturas en aire, agua de mar y salmueras. Tiene una buena resistencia a la corrosión y soporta altas temperaturas. Aprobado para ser utilizado en servicios ácidos como en quipos de procesamiento químico y perforación-producción de hidrocarburo mar adentro.

Aleación Ti-6Al-4V-1Mo

Es una aleación de titanio $\alpha+\beta$, cuya composición es de 6% Al, 4% V y 1% Mo. Se usa en forma de placa y forjados para aplicaciones específicas de alta resistencia. Es una aleación de gran utilidad en el sector aeroespacial.

4.5.2. Timetal® 17 (Ti-5Al-2Sn-4Mo-2Zr-4Cr)

Es una aleación forjada de titanio $\alpha+\beta$ (específicamente casi- β), cuya composición es de 5% Al, 2% Sn, 4% Mo, 2% Zr y 4% Cr. Permite un tratamiento térmico para mejora de sus propiedades. Timetal 17 ofrece alta resistencia a la deformación a temperaturas elevadas (creep), una buena ductilidad y tenacidad, así como buena resistencia a la fatiga de bajo ciclo. Esta aleación fue diseñada principalmente para motores a reacción.

Timetal® 18 (Ti-5.5Al-5V-5Mo-2.4Cr-0.75Fe-0.15O)

Es una aleación forjada de titanio $\alpha+\beta$ (específicamente casi- β) de nueva creación, cuya composición es de 5.5% Al, 5% V, 5% Mo, 2.4% Cr, 0.75% Fe y 0.15% O. Proporciona excelentes combinaciones de propiedades mecánicas como alta resistencia, excelente ductilidad, alta resistencia a la tenacidad y mucho mas ligereza que otras aleaciones de titanio.

Timetal 18 tiene aplicaciones en la industria aeronáutica, principalmente en las piezas estructurales del tren de aterrizaje y del fuselaje.

Timetal® 21S (Ti-15Mo-3Nb-3Al-0.2Si)

Es una aleación de titanio $\alpha+\beta$ (específicamente casi- β), cuya composición es de 15% Mo, 3% Nb, 3% Al y 0.2% Si. Ofrece buena conformabilidad en frío, soldabilidad, buena resistencia a la fluencia y resistencia a la oxidación excelente.

Esta aleación por lo general es sometida a un tratamiento térmico típico, que consiste en un tratamiento de solución de 816 a 843°C durante 30 minutos y se enfría al aire. Y después a un tratamiento de envejecimiento de 510 a 679°C durante 8 a 16 horas, con el fin de obtener las propiedades mecánicas deseadas.

Timetal 21S es excelente a altas temperaturas, y se utiliza en el sector aeroespacial en componentes tales como el enchufe de escape del motor y los conjuntos de boquillas. También es muy adecuado para materiales compuestos de matriz, además es compatible con la mayoría de las fibras, y es suficientemente estable hasta 816°C.

Timetal® 54M (Ti-5Al-4V-0.6Mo-0.4Fe)

Es una aleación de titanio $\alpha+\beta$ (específicamente casi- β) de nueva creación, cuya composición es de 5% Al, 4% V, 0.6% Mo y 0.4% Fe. Timetal 54M se desarrolló para mejorar los costes totales de producción de Ti-6Al-4V. Estudios recientes han demostrado que Timetal 54M ofrece propiedades mecánicas similares a Ti-6Al-4V pero con una mejor maquinabilidad, biocompatibilidad y soldabilidad. También exhibe conformado superplástico.

Esta aleación se utiliza en la industria automotriz en los turbocompresores, y está siendo evaluada actualmente para obtener una especificación de la MGA con objeto de facilitar las aplicaciones aeroespaciales y no aeroespaciales. Además está fabricado con "tecnología verde" que puede revolucionar la eficiencia de la producción de componentes de titanio para aplicaciones industriales y comerciales.

Timetal 367® o Aleación F1295 (Ti-6Al-7Nb)

Aleación de titanio, cuya composición es de 6% Al y 7% Nb. Ofrece alta resistencia, dureza y ductilidad. Su metalurgia es muy similar a la del Timetal 6-4, pero la sustitución de vanadio por niobio hace que posea una mayor biocompatibilidad.

Esta aleación por lo general es sometida a un tratamiento térmico típico, que consiste en un proceso de recocido a 700°C durante 1 hora, para posteriormente enfriarla al aire.

Se utiliza fundamentalmente para implantes médicos que derivan de su excelente biocompatibilidad.

Timetal® 550 o IMI 550 (Ti-4Al-4Mo-2Sn-0.5Si)

Aleación de titanio $\alpha+\beta$, cuya composición es de 4% Al, 4% Mo, 2% Sn y 0.5% Si. Timetal 550 es fácilmente forjable y se utiliza generalmente en una condición de tratamiento térmico. Este proceso consiste en un tratamiento de solución a 900°C durante 1 hora y enfriada al aire. Después a un proceso de envejecimiento a 500°C durante 24 horas, también enfriada al aire.

Esta aleación tiene buena resistencia a la tracción a elevada temperatura, buena resistencia a la fatiga y es resistente a la fluencia hasta los 400°C. En forma de hoja, la aleación tiene buenas propiedades superplásticas y excelente equilibrio de resistencia y tenacidad.

Timetal 550 se utiliza comúnmente en la industria aeronáutica en lo que son los discos del compresor y flaps. También ha encontrado aplicaciones en motores de altas prestaciones para automóviles.

Timetal® 555 (Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-0.6Fe)

Es una aleación de titanio $\alpha+\beta$, cuya composición es de 5% Al, 5% Mo-5% V, 3% Cr y 0.6% Fe. Timetal 555 tiene alta resistencia y excelentes combinaciones de propiedades mecánicas, incluyendo templabilidad profunda.

Timetal® 829 (Ti-5.5Al-3.5Sn-3Zr-1Nb-0.25Mo-0.3Si)

Es una aleación de titanio $\alpha+\beta$ (específicamente casi- α), cuya composición es de 5.5% Al, 3.5% Sn, 3% Zr, 1% Nb, 0.25% Mo y 0.3% Si. Tiene una combinación de resistencia a la fluencia de hasta 540°C, buena resistencia a la oxidación, soldable, buena forjabilidad y no es magnético.

Esta aleación por lo general es sometida a un tratamiento térmico típico, que consiste en un proceso de solución de calor a 1050°C durante 30 minutos, enfriada al aire. Posteriormente a un proceso de envejecimiento a 625°C durante 2 horas, también enfriada al aire.

Timetal 829 es una avanzada aleación para el sector aeronáutico, ya que es ocupado para los componentes de motores de turbina.

Timetal® 834 o IMI 834 (Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr-0.7Nb-0.5Mo-0.35Si-0.06C)

Es una aleación de titanio $\alpha+\beta$ (específicamente casi- α), cuya composición es de 5.8% Al, 4% Sn, 3.5% Zr, 0.7% Nb, 0.5% Mo, 0.35% Si y 0.06% C. Ofrece buena resistencia a la tracción, buena forjabilidad, facilidad para soldar, resistencia a la fluencia de hasta 600°C, excelente resistencia a la fatiga y a la oxidación, y es no magnética.

La aleación es sometida a un tratamiento térmico típico, que consiste en un proceso de solución a 1,015°C durante 2 horas, enfriado en aceite. Posteriormente a un proceso de envejecimiento a 700°C durante 2 horas, enfriado al aire.

Los principales usos de Timetal 834 incluyen anillos, discos de compresor y cuchillas para motor aéreo.

Timetal® 5111 (Ti-5Al-1Sn-1Zr-1V-0.8Mo)

Es una aleación de titanio $\alpha+\beta$ (específicamente casi- α), cuya composición es de 5% Al, 1% Sn, 1% Zr, 1% V y 0.8% Mo. Ofrece excelente soldabilidad, buena dureza y alta resistencia a la corrosión al agua de mar.

Timetal 5111 fue desarrollado en conjunto con la Armada y hoy en día se ha producido a escala comercial. Es ideal para aplicaciones en ambientes marinos, donde la dureza y resistencia a la corrosión son esenciales.

Timetal® 10-2-3 (Ti-10V-2Fe-3Al)

Es una aleación de titanio $\alpha+\beta$ (específicamente casi- β), cuya composición es de 10% V, 2% Fe y 3% Al. Timetal 10-2-3 es forjada y tiene una alta resistencia a elevada temperatura. Se utiliza en la industria aeronáutica.

Timetal® 15-3-3-3 (Ti-15V-3Sn-3Cr-3Al)

Es una aleación de titanio $\alpha+\beta$, cuya composición es de 15% V, 3% Sn, 3%Cr y 3% Al. Ofrece resistencia a la tracción, resistencia a la fatiga a bajo ciclo y es mecanizable.

Timetal® XT

Timetal XT es una aleación de titanio altamente conformable, diseñado específicamente para escapes de automóviles y tubos en general. Esta aleación demuestra una excelente resistencia a la oxidación, alta resistencia mecánica, deterioro reducido después de la exposición a temperaturas elevadas, conformación excelente y soldable.

Timetal XT responde a la creciente demanda de aleaciones de titanio para aplicaciones de escape, debido a su capacidad de mejorar el rendimiento y la economía de combustible mediante la reducción de peso y un excelente aspecto. Utilizado en la actualidad en:

- Los tubos de escape y silenciadores para motocicletas de alto rendimiento.
- Equipo original en algunos modelos de Porsche.
- Sistemas de escape del mercado de accesorios diseñados para el BMW Serie M, AMG Mercedes y otras marcas de alto rendimiento.

4.5.3. Aleación Ti-3-2.5 (Ti-3Al-2.5V)

Es una aleación de titanio $\alpha+\beta$ (específicamente casi- β), cuya composición es de 3% Al y 2.5% V. Ofrece la mayor resistencia y tolerancia en el diseño de recipientes bajo presión, con una correcta soldabilidad y facilidad de conformado en frío. Sus aplicaciones se encuentran principalmente en conductos de aeronaves y componentes para buques de marina.

Aleación Ti-3Al-2.5V-(0.04-0.08)Pd

Versión modificada de la aleación Ti-3Al-2.5V con contenido 0.04 a 0.08 de Pd. Con propiedades mecánicas, físicas y fabricabilidad equivalentes, que ofrece una resistencia elevada a la corrosión. Sus aplicaciones principales se encuentran en equipos de procesamiento químico y de producción de hidrocarburo mar adentro.

Aleación Ti-3Al-2.5V-(0.08-0.14)Ru

Versión modificada de la aleación Ti-3Al-2.5V con contenido 0.08 a 0.14 de Ru. Con propiedades mecánicas, físicas y fabricabilidad equivalentes, que ofrece una resistencia elevada a la corrosión especialmente en ambientes ácidos. Sus aplicaciones principales se encuentran en equipos de procesamiento químico, de hidrocarburo y en discos de turbina (sector aeroespacial).

Aleación Ti-6242 (Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo)

Es una aleación de titanio $\alpha+\beta$ (específicamente casi- α), cuya composición es de 6% Al, 2% Sn, 4% Zr y 2% Mo. El aluminio es un estabilizador de la fase α y el molibdeno de una concentración moderada, es un estabilizador de la fase β . La aleación obtenida es entonces una aleación $\alpha+\beta$ ligeramente estabilizada en β . El β -transus es de 995°C.

La aleación Ti-6242 es *forjada* en la región $\alpha+\beta$ y sometido a un tratamiento térmico. En la figura 4.15 se observa una estructura bi-modal con granos de α primarios alongados dentro de β , transformada en una estructura $\alpha+\beta$ Widmanstätten. La fracción de volumen de los granos α primarios es de un 50% y miden unos 20 μm .

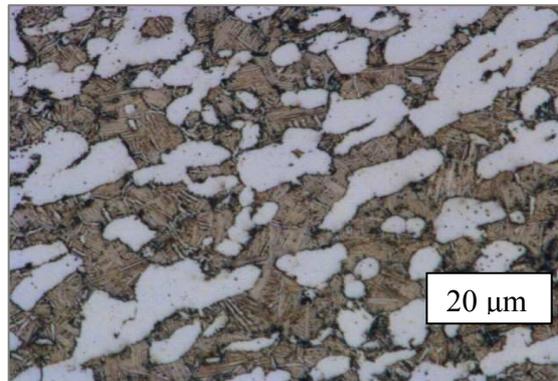


Figura 4.15. Aleación Ti-6242 forjado en la región $\alpha+\beta$.

La aleación Ti-6242 es resistente a la oxidación y tiene buena resistencia a la fatiga a alta frecuencia. Es de gran utilidad en el sector aeroespacial, comúnmente en alabes de turbina.

Aleación Ti-6242S (Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si)

Es una aleación de titanio $\alpha+\beta$ (específicamente casi- α), cuya composición es de 6% Al, 2% Sn, 4% Zr, 2% Mo y 0.1% Si. Tiene una alta resistencia mecánica, estabilidad y resistencia a las

deformaciones a temperaturas altas como 550°C. Sus principales aplicaciones son componentes de fuselaje, automotores y motores de turbinas a gas.

4.5.4. Aleación Ti-6246 (Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo)

Es una aleación de titanio $\alpha+\beta$ (específicamente casi- β), cuya composición es de 6% Al, 2% Sn, 4% Zr y 6% Mo. El aluminio estabiliza la fase α , el estaño y el zirconio son elementos que provocan endurecimiento en fase sólida y son neutros con respecto a la estabilización de las fases, mientras que el molibdeno estabiliza la fase β a temperatura ambiente para obtener una aleación $\alpha+\beta$ cuyas características mecánicas se podrán mejorar con un tratamiento térmico apropiado.

La aleación Ti-6246 es *forjada* en la región β y enfriada lentamente, figura 4.16. El β -transus se sitúa a 935°C. Después del forjado la aleación se somete a un tratamiento térmico. Este tratamiento consiste en mantener el material a una temperatura de 900°C de 1 a 2 horas, seguido de un enfriamiento a 50°C por minuto hasta llegar a 595°C donde se mantiene durante 8 horas. Finalmente el material se enfría al aire.

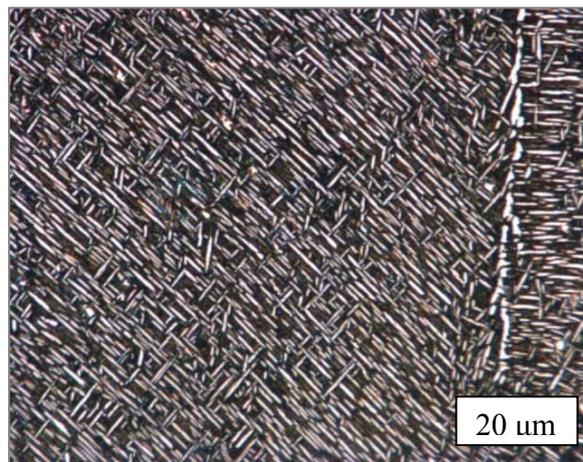


Figura 4.16. Aleación Ti-6246 forjado en la región β .

Se observa en la figura 4.16 una microestructura con granos de fase β y granos de fase α . Aquí se tiene una estructura llamada Widmanstätten dentro de la matriz de granos β , que se forma cuando el material se somete a un enfriamiento lento desde la región β . Entonces se forman placas de fase α , dentro de los granos β y durante el último tratamiento térmico se forman placas finas de α secundarias dentro de la matriz de fase β . Los granos de fase α se observan en el borde de grano β .

Esta aleación es resistente a la oxidación y tiene una resistencia a la tracción de 1,172 MPa, un límite elástico de 1,103 MPa, una ductilidad del 10%, una dureza de 39 HRB y una soldabilidad limitada. Es utilizada en el sector aeroespacial, comúnmente en el disco y el alabe de la turbina.

Aleación Ti-811 (Ti-8Al-1Mo-1V)

Es una aleación de titanio $\alpha+\beta$ (específicamente casi- α), cuya composición es de 8% Al, 1% Mo y 1% V. Es altamente resistente a las deformaciones, soldable, de alta resistencia y puede utilizarse con una temperatura de hasta 455°C; lo que muestra la densidad más baja y el módulo más alto de todas las aleaciones comerciales de titanio. Su aplicación principal es en componentes de motores de turbinas a gas.

Aleación Ti-662 (Ti-6Al-6V-2Sn)

Aleación de titanio $\alpha+\beta$, cuya composición es de 6% Al, 6% V y 2% Sn. Tiene una alta resistencia, dureza y ductilidad, con una soldabilidad limitada. Puede utilizarse en forma recocida (muy alta resistencia). Su aplicación típica se encuentra en componentes del fuselaje.

Aleación Ti-6-22-22 (Ti-6Al-2Zr-2Sn-2Mo-2Cr-0.15Si)

Aleación de titanio $\alpha+\beta$, cuya composición es de 6% Al, 2% Zr, 2% Sn, 2% Mo, 2% Cr y 0.15% Si. Posee buena resistencia (superiores a las del Ti-6Al-4V) y dureza. Tiene excelente formabilidad superplástica y estabilidad térmica. Se utiliza fundamentalmente en el sector aeroespacial (componentes del fuselaje y componentes de misiles).

Aleación SP-700 (Ti-4.5Al-3V-2Mo-2Fe)

Aleación de titanio $\alpha+\beta$, cuya composición es de 4.5% Al, 3% V, 2% Mo y 2% Fe. Posee una buena ductilidad y resistencia a la fatiga a altas temperaturas. Tiene una excepcional formabilidad superplástica. Se utiliza comúnmente en el sector aeroespacial como componentes del fuselaje, componentes de motores de turbinas a gas y componentes de misiles.

Aleación Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo

Es una aleación de titanio β , cuya composición es de 3% Al, 8% V, 6% Cr, 4% Zr y 4% Mo. Es una aleación muy *resistente a la corrosión y a la temperatura*. Tiene una resistencia a la

tracción de 793 MPa, un límite elástico de 759 MPa, una ductilidad de 15%, una dureza de 45 HRB y una soldabilidad regular. Sus aplicaciones son donde se requiera alta resistencia a la corrosión y a la temperatura (aplicaciones marinas y motores de aviones).

Aleación Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo-(0.04-0.08)Pd

Versión modificada de la aleación Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo con contenido 0.04 a 0.08 de Pd. Presenta propiedades físicas y mecánicas equivalentes al Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo, pero con una significativa mejora en la resistencia a la tensión y a la corrosión a altas temperaturas. Sus aplicaciones se encuentran en componentes para busques de marina y producción-perforación de hidrocarburos.

Aleación Ti-0.3Mo-0.8Ni

Aleación de titanio, cuya composición es de 0.3% Mo y 0.8% Ni. Es muy resistente a la corrosión y altamente soldable como fabricable. Es una aleación aprobada para ser utilizada en servicios ácidos, como equipos de procesamiento químico y de producción de hidrocarburo mar adentro.

4.6. DISTRIBUIDOR DE SUPERALEACIONES BASE TITANIO EN MÉXICO

Las empresas mas importantes que fabrican y que en México distribuyen (comercializan) superaleaciones base titanio son las siguientes:

- ***RTI International Metals, Inc.***
- ***AEHI, Inc.***
- ***TIMET***

4.6.1. RTI International Metals, Inc.

RTI International Metals, Inc., se especializa en titanio, cumpliendo con los requerimientos de las aplicaciones tecnológicas más sofisticadas del mundo en los mercados de la industria aeroespacial, de defensa, propulsión, médica, energética y química. RTI ha logrado avances en aleaciones base titanio a través de procesos de fabricación, ingeniería, mecanizado y moldeado. Distribuye productos de fabricación especializados en formas extrudidas, piezas moldeadas y componentes de alta ingeniería a través de su cadena de suministro integrada.

RTI hace productos a medida, ya que la mayoría de las aplicaciones tienen diferentes tipos de necesidades según el tamaño, la forma y otras especificaciones. Por ello, los productos en aleaciones base titanio *incluyen*:

- Láminas.
- Barras de varios perfiles.
- Palanquillas.
- Formas y cavidades extruidas.
- Lingotes.
- Tuberías.
- Placas.
- Hojas.
- Otras formas especializadas.

En la tabla 4.2 se observan las aleaciones base titanio de RTI International Metals, Inc., disponibles:

Tabla 4.2. Aleaciones base titanio de RTI International Metals, Inc.

ALEACIÓN	ALEACIÓN
Ti-0.3Mo-0.8Ni (Ti 12)	Ti-6Al-7Nb
Ti-3Al-2.5V (Ti-3-2.5)	Ti-6Al-6V-2Sn (Ti-6-6-2)
Ti-3Al-2.5V-Pd (Ti-3-2.5-Pd)	Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo (Ti-6-2-4-6)
Ti-3Al-2.5V-Ru (Ti-3-2.5-Ru)	Ti-4Al-4Mo-2Sn-0.5Si (Ti-550)
Ti-5Al-2.5Sn (Ti-5-2.5)	Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr-0.15Si (Ti-6-22-22)
Ti-5Al-2.5Sn ELI (Ti-5-2.5 ELI)	Ti-4.5Al-3V-2Mo-2Fe (SP-700)
Ti-8Al-1Mo-1V (Ti-8-1-1)	Ti-5Al-4Cr-4Mo-2Sn-2Zr (Ti-17)
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si (Ti-6-2-4-2-S)	Ti-10V-2Fe-3Al (Ti-10-2-3)
Ti-6Al-4V (Ti-6-4)	Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo
Ti-6Al-4V ELI (Ti-6-4 ELI)	Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo-0.05Pd
Ti-6Al-4V-0.1Ru (Ti-6-4-Ru)	

4.6.2. AEHI, Inc.

AEHI, Inc., es una empresa metalúrgica reconocida en todo el mundo como proveedor para toda la industria aeroespacial, aeronáutica e industria de procesos, que produce y distribuye materiales de alto rendimiento como son: aleaciones de titanio, aleaciones de cobre, aleaciones de aluminio, aceros inoxidable, entre otros.

Las aleaciones de alta calidad, junto con precios competitivos y conocimientos del producto, los hacen líderes en materiales de alto rendimiento.

La gama de productos en aleaciones base titanio incluyen principalmente:

- Barras.
- Placas.
- Láminas.
- Tubos.
- Alambres.

En la tabla 4.3 se observan las aleaciones base titanio de AEHI, Inc., más usuales.

Tabla 4.3. Aleaciones base titanio de AEHI, Inc.

Grados de titanio				
Ti-13V-11Cr-3Al	Ti-13-11-3	Ti-15-3-3-3	Ti-3-8-6-4-4	Ti-6Al-4V
Ti-4Al-2V	Ti-5Al-2.5Sn	Ti-6-2-1-1	Ti-6-2-4-2	Ti-6-2-4-6
Allvac 30	Allvac 40	Allvac 55	Allvac 6-6-2	Allvac 70
Allvac 6-4	Timetal 40A	Timetal 230	Timetal 15-3	Timetal 17
Timetal 21S	Timetal 550	Timetal 3-2.5	Timetal 35A	Timetal 367
Timetal 50A	Timetal 685	Timetal 551	Timetal 62S	Timetal 65A
Timetal 679	Timetal 75A	Timetal 829	Timetal 834	Timetal 1100
Titanal				

4.6.3. TIMET

Timet, es una empresa que se especializa en titanio y sus aleaciones, cumpliendo con los requerimientos de las aplicaciones tecnológicas más sofisticadas del mundo. Timet desarrolla la mayoría de las aleaciones de titanio en uso hoy en día, y distribuye materiales para todo el campo aeronáutico, industrial y de defensa, que continúa innovando para satisfacer las cambiantes necesidades de los clientes.

La gama de productos en aleaciones base titanio incluyen:

- Lingotes.
- Losas.
- Laminas.
- Barras.
- Hojas.
- Tubulares y accesorios.
- Formas especializadas.

En la tabla 4.4 se observan las aleaciones base titanio de TIMET más usuales.

Tabla 4.4. Aleaciones base titanio de TIMET.

Aleaciones Timetal				
Timetal 18	Timetal 542	Timetal 54M	Timetal 21S	Timetal 17
Timetal 40A	Timetal 230	Timetal 75A	Timetal 35A	Timetal 367
Timetal 50A	Timetal 550	Timetal 551	Timetal 62S	Timetal 65A
Timetal 679	Timetal 685	Timetal 829	Timetal 834	Timetal 1100

CAPÍTULO 5

ALEACIONES BASE HIERRO

5.1. EL HIERRO

Aspectos generales

El **hierro o fierro** (en muchos países hispanohablantes se prefiere esta segunda forma) de símbolo Fe es un elemento químico de número atómico 26 situado en el grupo 8, periodo 4 de la tabla periódica de los elementos y de masa atómica de 55.847 g/mol.

Este metal de transición de color gris plateado es el cuarto elemento más cuantioso (presente) en la corteza terrestre, representando un 5% y, entre los metales, sólo el aluminio es más abundante; y ha sido históricamente muy importante ya que un período de la historia recibe el nombre de Edad de Hierro. Se encuentra en la naturaleza formando parte de numerosos minerales que contienen hierro, entre ellos la magnetita (Fe_3O_4), la pirita (FeS_2), la hematites (Fe_2O_3), la limonita ($\text{FeO}(\text{OH})\cdot n\text{H}_2\text{O}$) y la siderita (FeCO_3), y raramente se encuentra libre. Es uno de los metales más importantes ya que se utiliza ampliamente con respecto a cualquier otro metal.

Para obtener hierro en estado elemental, los minerales se reducen con carbono y luego es sometido a un proceso de refinado para eliminar las impurezas presentes. Su fabricación en altos hornos ha sido extensamente estudiada. Sin embargo es reactivo y forma fácilmente una capa de óxido hidratado en su superficie en presencia de aire húmedo. Esta capa no es coherente y se separa en escamas revelando superficies nuevas que pueden ser atacadas posteriormente por el medio ambiente.

El hierro experimenta transformaciones alotrópicas a elevadas temperaturas y presión atmosférica. Este fenómeno de la alotropía, se debe a que los átomos que forman las moléculas, se agrupan de distintas maneras, provocando características físicas diferentes como: color, dureza y textura. Según la temperatura y presión, el hierro existe en diferentes formas estructurales. A presión atmosférica:

- El hierro tiene una red *cúbica centrada en el cuerpo* (*hierro α*) a temperaturas inferiores a los 768°C, con parámetro de 2.88Å y es magnético.
- A temperaturas superiores a los 768°C pero inferiores a los 910°C el parámetro de red cambia a 2.90Å, manteniendo la misma *estructura (bcc)* pero llamado *hierro β* .

En realidad esta *estructura cubica centrada en el cuerpo* es estable hasta los 910°C, solo con el ligero cambio de parámetro observado.

- Por arriba de 910°C hasta los 1,400°C presenta una red *cúbica centrada en las caras* (*hierro γ*), con parámetro igual a 3.64Å. Es no magnético, su campo de estabilidad ésta reducido por la presencia de carbono, magnesio y níquel siendo la base de soluciones sólidas austeníticas.
- De 1,400°C a 1,539°C que es su punto de fusión, vuelve a presentar una red *cúbica centrada en el cuerpo* (*hierro δ*), pero con parámetro igual a 2.93Å.

En general se puede observar en la figura 5.1, que el tramo horizontal en la curva del hierro a 768°C (A2), no está ligada con el cambio de estructura de la red (salvo que las distancias interatómicas cambian de 2.88 a 2.90Å), sino con el surgimiento de propiedades magnéticas en el hierro a temperaturas menores. A temperaturas superiores a 770°C, el hierro β es no magnético.

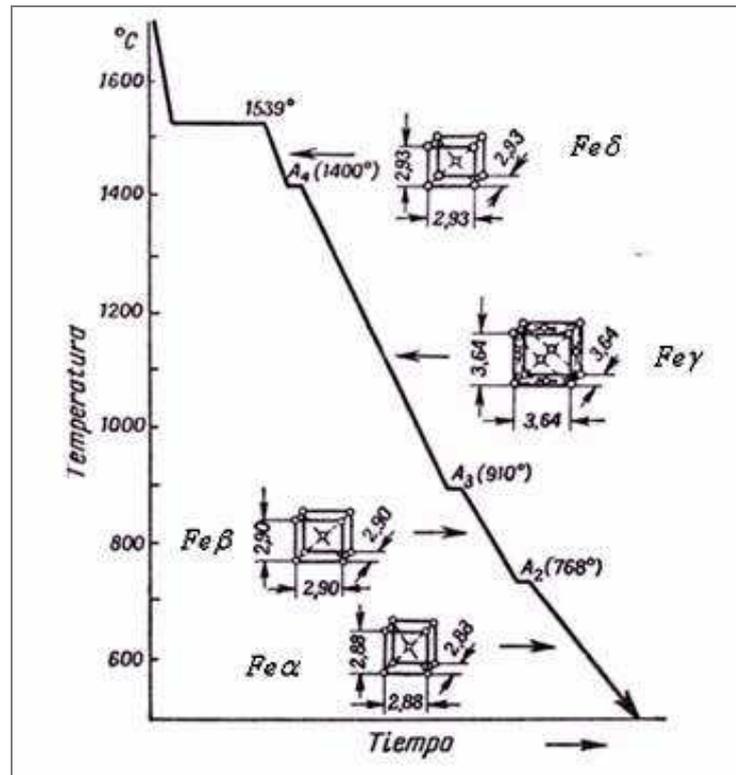


Figura 5.1. Curva de formas alotrópicas del hierro.

El cambio estructural de la red cristalina del hierro, trae consigo la modificación de algunas otras de sus propiedades: por ejemplo el hierro α casi no disuelve el carbono, la solubilidad máxima de carbono en el hierro α es de 0.025% a una temperatura de 723°C y de 0.0025% a 20°C; el hierro γ lo disuelve hasta 2%, y el hierro δ lo disuelve hasta 0.1% a 1,490°C.

Además de estas formas estructurales del hierro se puede agregar otra llamada **hierro epsilon** que puede estabilizarse a altas presiones, presentando una estructura *hexagonal compacta (hcp)*.

Las características generales del hierro son las siguientes:

- Es extremadamente duro y pesado.
 - Dureza de 120-300 Vickers.
 - Densidad de 7.87 g/cm³ a 20°C.
- Punto de fusión de 1,539°C
- Limite elástico de 120-150 MPa.
- Módulo de elasticidad de 211.4 GPa.

- Resistencia a la tracción de 180-210 MPa.
- Es muy maleable.
- Presenta propiedades magnéticas; es ferromagnético a temperatura ambiente y presión atmosférica.
- Conductor eléctrico y térmico.

Aplicaciones

El hierro ya era conocido y utilizado por civilizaciones antiguas, y es el metal más empleado en la actualidad, con el 95% en total de la producción mundial de metales. No tiene demasiadas aplicaciones, salvo excepciones para utilizar su potencial magnético. El hierro tiene su gran aplicación para formar los productos siderúrgicos, utilizando éste como elemento matriz para alojar otros elementos aleantes tanto metálicos como no metálicos, que confieren distintas propiedades al material.

Hoy en día, la mayor parte del hierro se usa en la forma de diversos aceros, que es una de las aleaciones más comunes, y las propiedades de este se obtienen por la aleación de hierro con carbono, níquel, cromo y otros elementos de proporciones variadas, obteniendo materiales con propiedades mecánicas y físicas muy diferentes. Por lo tanto, el acero es una solución sólida intersticial.

5.2. SUPERALEACIONES BASE HIERRO

Aspectos generales

Las *superaleaciones base hierro* son básicamente aceros *inoxidables* reforzados con carburos (aleaciones Fe-Cr-Ni), las cuales son aleaciones resistentes al calor con temperaturas de fusión que va desde los 1,360°C hasta los 1,425°C. Los *aceros inoxidables* fueron inventados a principios del siglo XX cuando se descubrió que una *pequeña cantidad de cromo* (habitualmente un mínimo de 10%) añadido al acero común, le daba un aspecto *brillante* y lo hacía altamente resistente a la suciedad y a la oxidación. Esta resistencia a la oxidación, denominada *resistencia a la corrosión*, es lo que hace al acero inoxidable diferente de otros tipos de acero.

Las superaleaciones de hierro por ser considerados aceros inoxidable son muy resistentes a la oxidación y corrosión, *llamados así por ser un material sólido (aleación) y no un revestimiento especial* aplicado al acero común para darle características "inoxidables". Aceros comunes, e incluso otros metales, son a menudo cubiertos o "bañados" con metales blancos como el cromo, níquel o zinc para proteger sus superficies o darles otras características superficiales. Mientras que estos baños tienen sus propias ventajas y son muy utilizados, el peligro radica en que la capa puede ser dañada o deteriorarse de algún modo, lo que anularía su efecto protector. *La apariencia del acero inoxidable puede, sin embargo, variar y dependerá en la manera que esté fabricado y en su acabado superficial.*

Así que, los *aceros inoxidables son básicamente aleaciones Fe-Cr o Fe-Cr-Ni* con un contenido de al menos 10% de cromo y el menor contenido posible de carbono, y poseen como se dijo una buena resistencia a la corrosión y a la oxidación conferida por una capa de óxido de cromo que se forma sobre su superficie y origina la pasivación de ésta, sellándola y protegiéndola de la oxidación ulterior del hierro contenido en la aleación (mínima concentración de cromo para producir eso es del 10% en peso). Sin embargo, esta película puede ser afectada por algunos ácidos dando lugar a un ataque y oxidación del hierro por mecanismos ínter granulares o picaduras generalizadas.

El cromo aumenta la dureza y la resistencia al calor y resulta necesario para hacer que el acero sea inoxidable. *El níquel* por otro lado impide la formación de carburos de cromo, los cuales aportan fragilidad y potencian la oxidación intergranular, además de que mejora la resistencia a la tracción, aumenta la tenacidad y confiere una mayor resistencia a la corrosión. También suele tener otro tipo de aleante en pequeña proporción como *el molibdeno*, el cual mejora la resistencia a la corrosión contra ataque de muchos químicos industriales y solventes, y en particular impide la penetración de cloruros. Como tal, el molibdeno es uno de los únicos aditivos de aleación más útiles en la lucha contra la corrosión.

Las normas reguladoras del acero inoxidable son el AISI (de hace 70 años, y de uso mucho más extenso internacionalmente), ASTM [y](#) la ISO 3506.

Concepto

Las *superaleaciones de hierro (aceros inoxidable)* son aquellas que tienen como elemento principal al *hierro y al carbono en menor cantidad posible (no excediendo 0.08%)*, es decir, forman una *base hierro-carbono* que se encuentra en mayor proporción, conteniendo adiciones elementales principales como son el *romo, el níquel y el molibdeno*, y otras adiciones en un porcentaje menor, que en conjunto de todos estos les hacen tener las propiedades adecuadas para resistir el medio ambiente al que están expuestos, como son la corrosión y las condiciones extremas a altas temperaturas (resistencia al calor).

A continuación se muestran las propiedades mecánicas principales que aportan algunos elementos de aleación en las superaleaciones base hierro (aceros inoxidable austeníticos).

Cromo: Es uno de los elementos especiales más empleados para la fabricación de aceros inoxidable ya que le da características de inoxidable y refractarios. Se emplea en cantidades diversas desde 0.30% a 30% según los casos, y sirve para aumentar la dureza y la resistencia a la tracción de los aceros inoxidable, además de que mejora la templabilidad, impide las deformaciones en el temple, aumenta la resistencia al desgaste, aumenta la inoxidable (con concentraciones superiores al 12%), y mejora la tenacidad a cualquier temperatura.

Níquel: Es un elemento de extraordinaria importancia en la fabricación de acero inoxidable austenítico ya que le da la cualidad de resistir altas temperaturas. Se emplea en porcentajes variables de 8 a 20%. Es el principal formador de austenita, que aumenta la tenacidad, la resistencia al impacto y la resistencia a la corrosión. Además evita el crecimiento de grano en los tratamientos térmicos, lo que sirve para producir en ellos su gran tenacidad.

Molibdeno: Los aceros inoxidable austeníticos contienen molibdeno para mejorar la resistencia a la corrosión y aumentar la tenacidad.

Titanio y Niobio: Mantiene estable las propiedades del acero inoxidable austenítico a alta temperatura.

Nitrógeno: Se agrega a los aceros inoxidable para promover la formación de austenita.

Manganeso: Aparece prácticamente en todos los aceros, debido principalmente a que se añade como elemento de adición para neutralizar la perjudicial influencia del azufre y del oxígeno, que siempre suelen contener los aceros cuando se encuentran en estado líquido en los hornos durante los procesos de fabricación. Los aceros ordinarios y los aceros inoxidables en los que el manganeso no es elemento fundamental, suelen contener generalmente porcentajes de manganeso variables de 0.30 a 0.80%. Si los aceros inoxidables no tuvieran manganeso, no se podrían laminar ni forjar porque el azufre que suele encontrarse en mayor o menor cantidad en los aceros, formarían sulfuros de hierro, que son cuerpos de muy bajo punto de fusión (981°C aproximadamente) que a las temperaturas de trabajo en caliente (forja o laminación), y al encontrarse contorneando los granos de acero crean zonas de debilidad y las piezas y barras se abren en esas operaciones de transformación.

Tungsteno: Forma con el hierro carburos muy complejos estables y durísimos, soportando bien altas temperaturas.

Vanadio: Forma carburos complejos con el hierro, proporcionando al acero inoxidable una buena resistencia a la fatiga y a la tracción.

Aluminio: Todos los aceros aleados en calidad como los inoxidables contienen aluminio en porcentajes pequeñísimos, variables generalmente desde 0.001 a 0.008%. Esto con el fin de aumentar la resistencia a la oxidación a altas temperaturas.

Los porcentajes de cada uno de los aleantes que pueden configurar un tipo determinado de acero inoxidable están normalizados.

Por otra parte, debido a que las superaleaciones de hierro tienen una *base hierro-carbono* el cual se encuentra en mayor proporción, se estudiará el *diagrama hierro-carbono*.

5.2.1. Microestructura

Las superaleaciones base hierro como se dijo son básicamente aceros inoxidables auténticos las cuales se clasifican de acuerdo a la *microestructura metalúrgica* que se pueden obtener en ellos, tal y como se muestra enseguida:

- Aceros inoxidable martensíticos.
- Aceros inoxidable ferríticos.
- Aceros inoxidable austeníticos.
- Aceros inoxidable dúplex (austenítico-ferrítico).

Aceros inoxidable martensíticos

Son la primera rama de los aceros inoxidable, llamados simplemente al cromo (entre 12 y 14%) y el contenido de carbono no debe exceder el 0.4 %. Fueron los primeros desarrollados industrialmente. En los aceros inoxidable martensíticos, el carbono está en una concentración tal, que permite la formación de austenita a altas temperaturas, que a su vez se transforma en *martensita durante el enfriamiento* debido a los elevados porcentajes de carbono.

La martensita es una fase rica en carbono, frágil, extraordinariamente dura, gran facilidad de maquinado, y la resistencia a la corrosión es relativamente pobre comparada con los austeníticos y ferríticos. Los aceros inoxidable martensíticos tienen la característica común de ser magnéticos y endurecibles por tratamiento térmico, presentando una microestructura acicular (en forma de agujas) cuando son templados, figura 5.12.

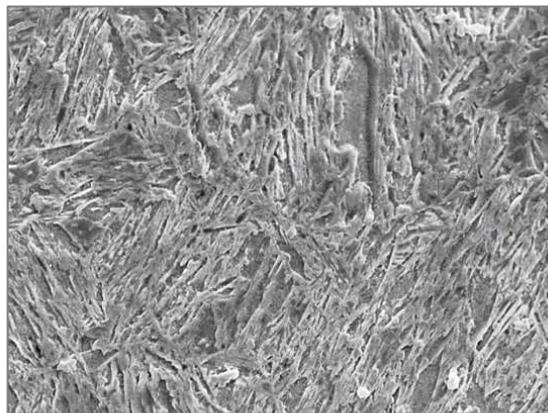


Figura 5.12. Acero inoxidable martensítico.

Es importante observar que estos aceros son normalmente producidos por la industria siderúrgica en estado de recocido, con ductilidad razonablemente buena. Solamente después de templados serán muy duros, poco dúctiles y muy resistentes a la corrosión.

Aceros Inoxidables Ferríticos

También se consideran simplemente al cromo (entre el 15 y 25 %) con un contenido de carbono que no debe exceder el 0.1 %, teniendo la aleación una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo. Tienen una microestructura metalográfica formada básicamente por ferrita, aunque se tornan parcialmente austeníticos a altas temperaturas, figura 5.13.

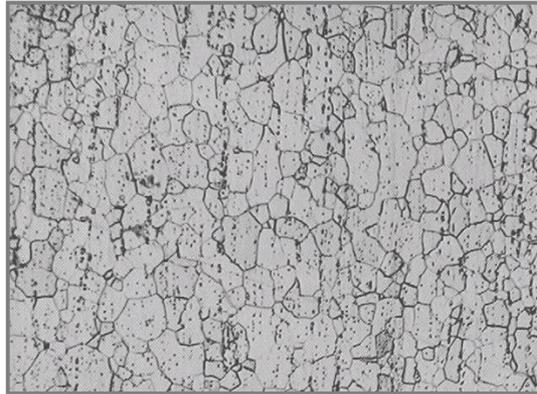


Figura 5.13. Acero inoxidable ferrítico.

Los aceros inoxidable ferríticos contienen, de un modo general, una cantidad de cromo superior al de los martensíticos. Este aumento en la cantidad de cromo mejora la resistencia a la corrosión en diversos medios, pero sacrifica en parte otras propiedades, como la resistencia al impacto.

Son magnéticos, tienen una buena ductilidad y son resistentes a la corrosión y oxidación a temperaturas elevadas, pero su dureza no es muy alta y no pueden incrementarla por tratamiento térmico. Son relativamente baratos por no contener níquel.

Aceros Inoxidables Austeníticos

Son aquellos aceros inoxidable que contienen **cromo** (entre el 15 y 25 %), **níquel** (en un rango de 7 al 15 %), **molibdeno** (entre el 1.5 y 6%), y el contenido de carbono no debe exceder el 0.08 %, teniendo la aleación una estructura cristalina cúbica centrada en las caras. Son los más utilizados por su amplia variedad de propiedades. Tienen una microestructura metalográfica formada básicamente por austenita a temperatura ambiente (el níquel es un elemento de fase " γ " que estabiliza el campo de la austenita) debido a que se pueden endurecer por deformación (el carbono estabilizado de manera metaestable en forma de hierro γ , se transforma a la forma estable de hierro α y martensita, pues el carbono es menos soluble en la matriz de hierro α , y

este expulsa el carbono). La microestructura austenítica se aprecia en la figura 5.14.

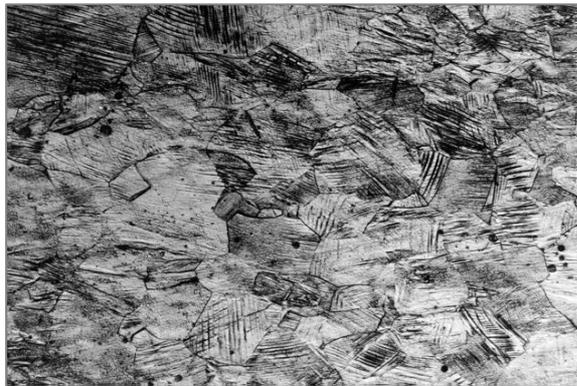


Figura 5.14. Acero inoxidable austenítico.

No son magnéticos, y por tanto no son atraídos por un imán. Los aceros inoxidables austeníticos proporcionan excelente resistencia a la corrosión (es el acero que tiene mejor resistencia a la corrosión), excelente factor de higiene-limpieza, fáciles de transformar, excelente soldabilidad, no se endurecen por tratamiento térmico y se pueden utilizar tanto a temperaturas criogénicas como a elevadas temperaturas, además de tener buenas propiedades de fabricación.

Aceros Inoxidables Dúplex (austenítico-ferrítico)

Son aquellos aceros inoxidables que contienen cromo (entre el 20 y 30%), níquel (en un rango de 5% al 8%), y el contenido de carbono no debe exceder el 0.03%. Tiene una microestructura metalográfica formada por dos fases: *ferrita y austenita*, figura 5.15. No son endurecibles por tratamiento térmico.

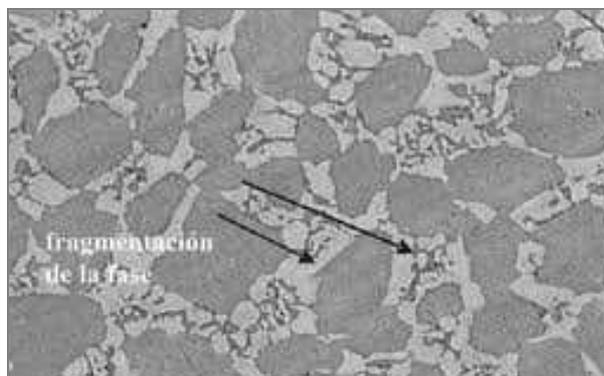


Figura 5.15. Acero inoxidable dúplex (austenita y ferrita).

Los aceros inoxidable dúplex tienen una resistencia mecánica elevada (alcanzando valores de límite elástico entre 700-900 MPa, el doble de límite elástico que los aceros inoxidable austeníticos) y también una alta resistencia al desgaste, con una muy buena resistencia a la corrosión bajo tensión y por picaduras.

Cabe recordar, que a todos los aceros inoxidable se les puede añadir un pequeño porcentaje de *molibdeno*, para mejorar su resistencia a la corrosión por cloruros.

Así, los aceros inoxidable austeníticos y dúplex son, en general, los grupos más empleados en aplicaciones estructurales.

5.2.2. Características o propiedades de las superaleaciones base hierro

En general, las principales características o propiedades de las superaleaciones base hierro o aceros inoxidable son las siguientes:

- Excelente resistencia a la corrosión y oxidación.
- Altamente resistentes a alta temperatura (calor), como a temperaturas criogénicas.
- Excelente resistencia al creep.
- Altamente resistentes al desgaste.
- Gran resistencia mecánica, de al menos dos veces al del acero al carbono.
- Excelente dureza.
- Son fáciles de transformar en una gran variedad de productos.
- Tiene una apariencia estética, que puede variarse sometiendo el acero a diferentes tratamientos superficiales para obtener acabado a espejo, satinado, coloreado, texturizado, etc.

A continuación se mencionan algunas características en particular, de cada una de las familias de acero inoxidable:

Aceros Inoxidables Martensíticos

- Son magnéticos.
- Son tratables térmicamente (temple y revenido).
- Poseen regular resistencia a la corrosión y a la oxidación.

- Son los más económicos dentro de los aceros inoxidable.
- Según AISI-NOM se identifican mediante un 4 seguido de dos dígitos.

Aceros Inoxidables Ferríticos

- Poseen buena resistencia a la corrosión y a la oxidación.
- No son tratables térmicamente.
- Endurecibles mediante trabajo en frío.
- Son magnéticos.
- Según AISI- NOM se identifican mediante un 4 seguido de 2 dígitos.

Aceros Inoxidables Austeníticos

- Son no magnéticos.
- No son tratables térmicamente.
- Son endurecibles mediante trabajo en frío.
- Se utilizan hasta los 650°C cuando son pobres en níquel ($Ni < 25\%$).
- Se utilizan hasta los 850°C cuando son ricas en níquel ($40\% < Ni < 50\%$).
- Son caros.
- Se identifican mediante un 3 seguido de 2 dígitos, y los que contienen manganeso mediante un 2 seguido de 2 dígitos.

Aceros Inoxidables Dúplex

- Tienen muchas mejores propiedades mecánicas que los aceros inoxidable austeníticos.
- No son endurecibles por tratamiento térmico.
- Tienen una excelente resistencia al desgaste.
- Su resistencia mecánica aumenta con el trabajo en frío.

5.2.3. Métodos de elaboración de superaleaciones base hierro

Las técnicas de elaboración más usuales por las cuales se pueden llevar a cabo la fabricación de acero inoxidable (superaleaciones base hierro) son las siguientes:

- Fundición convencional.
- Pulvimetalurgia.

Fundición convencional

El acero inoxidable normalmente se fabrica fundiendo una pieza de hierro y cromo (para proteger de la corrosión al producto final), reduciendo el contenido de carbono. Además, generalmente se les agrega níquel y molibdeno para aumentar aún más la dureza y la corrosión del material, en especial los aceros inoxidables austeníticos. Todos estos elementos se combinan en estado de fusión para hacer el material "inoxidable en toda su masa" (por este motivo, los aceros inoxidables no necesitan ser ni chapeados, ni pintados, ni de ningún otro tratamiento superficial para mejorar su resistencia a la corrosión). Luego, la mezcla líquida se enfría, apareciendo la microestructura de acuerdo a la velocidad de enfriamiento y de la composición de elementos de la aleación.

Posteriormente son sometidos a tratamientos térmicos (temple, revenido y recocido) con la finalidad de endurecerlos y mejorar las propiedades mecánicas de la aleación.

Moldeo por inversión o cera perdida

El proceso de moldeo por inversión consiste en una caja refractaria donde se mete el modelo hecho de cera, para que posteriormente la caja se caliente, de manera que la cera se derrita y se plasme el molde en la misma caja. Luego, entra el material fundido y se llena la cavidad, formándose así la pieza. Por último, se rompe la caja refractaria dejando solo la pieza fundida.

Esta técnica de procesado presenta las siguientes características:

- Realiza piezas en una sola operación con un mínimo de gasto de material y de energía.
- Las piezas no necesitan un maquinado posterior.
- Puede fabricar cualquier pieza complicada y de cualquier tamaño.
- Los materiales más duros de trabajar son los primeros candidatos para este tipo de fundición.

Las ventajas del moldeo por inversión son:

- Fabricación de piezas de cualquier forma, tamaño y material.
- Excelente tolerancias.
- No requiere posicionamiento de la pieza, ni salidas para desmoldeo.
- Uniformidad en las piezas.

- Económicamente rentable para una gran cantidad de piezas.

Poliestireno expandido

Es muy similar al proceso anterior, solo que aquí se utiliza arena refractaria compactada en vez de una caja refractaria. En este proceso se obtienen los modelos de poliestireno, revisando muy bien que no tengan defectos que se reproduzcan en las piezas. Luego, se recubre el modelo con arena refractaria compactada. Posteriormente, se vacía el material en la arena para que la temperatura evapore el poliestireno. Por último, el material llena la cavidad y toma la forma de la pieza.

Las ventajas de la fundición con poliestireno expandido son:

- Evita el almacenamiento de modelos no permanentes.
- Permite obtener tolerancia que se ajustan bien a las requeridas.
- Permite el reciclaje de la arena ya utilizada.
- No es necesaria la utilización de machos.
- Los modelos se pueden fabricar uniendo partes más sencillas.
- Mejor acabado superficial.
- Libertad de diseño.

Pulvimetalurgia

La pulvimetalurgia ha alcanzado hoy en día gran importancia en la preparación de aceros inoxidable, alcanzando características especiales, y está basado en la compactación y sinterización de pequeñas partículas de la aleación en cuestión. En este proceso, se preparan las aleaciones mezclando los materiales secos en polvo (Fe, Cr, Ni y Mo) previamente preparados, prensándolos a alta presión y calentándolos después a temperaturas justo por debajo de sus puntos de fusión, con el fin de eliminar la porosidad. El resultado es una aleación sólida sin heterogeneidades en la composición química, y se obtienen microestructuras homogéneas controladas, ya que se evitan los rechupes (contracciones de volumen producidos en la solidificación).

5.2.4. Tratamientos térmicos del acero inoxidable

Un proceso de tratamiento térmico adecuado permite aumentar significativamente las propiedades mecánicas de los aceros inoxidables como son dureza, tenacidad y resistencia mecánica. Los tratamientos térmicos cambian la microestructura del material, con lo que las propiedades macroscópicas del acero inoxidable también son alteradas.

Los tratamientos térmicos más usados son los siguientes:

- *Temple*
- *Revenido*
- *Recocido*
- *Normalizado*

Estos tratamientos térmicos no cambian la composición química del acero inoxidable.

5.3. SUPERALEACIONES BASE HIERRO MÁS USUALES

Las aleaciones de acero inoxidable (superaleaciones base hierro) más usuales, importantes y comerciales en México, son las siguientes (sus nombres son identificados o denominados de acuerdo al sistema AISI):

5.3.1. Aceros inoxidables serie 200

Aceros inoxidables austeníticos que contienen por lo regular un *menor contenido de níquel*. Estas aleaciones tienen propiedades magnéticas como el acero inoxidable 304, pero propiedades muy diferentes en cuanto a corrosión.

Aceros inoxidables 201

Esta aleación tipo AISI 201 es un acero inoxidable austenítico cromo-níquel-manganeso, la cual tiene la composición química mostrada en la tabla 5.2:

Tabla 5.2. Composición Química (%).

Fe	C	Mn	P	Sulfuro	Si	Cr	Ni
Resto	0.15max	5.5-7.5	0.060max	0.030max	1.0max	16.0-18.0	3.5-5.5

Este acero tiene una alta resistencia a la corrosión y oxidación en muchos ambientes a elevadas temperaturas hasta 840°C, buena formabilidad y soldabilidad, y buenas propiedades mecánicas en condiciones de recocido y trabajado en frío, tales como: resistencia máxima a la tensión de 515MPa, límite elástico de 260MPa, elongación de 40%, y dureza Rockwell de B95 máximo. Ésta aleación no es magnética en condiciones de recocido y se vuelve ligeramente magnética cuando es trabajada en frío.

Las aplicaciones típicas incluyen molduras, adornos y cubiertas de llanta para automóviles, limpiadores, marco de ventanas, puertas, bisagras, contenedores, equipo para el procesamiento y manejo de alimentos, transportadores de productos lácteos, cerveza, vino y bebidas. Además también las podemos encontrar en trenes y camiones de carga, utensilios de comida y cuchillería, vajillas, alacenas, fregaderos, componentes del lavavajillas y partes del horno.

Acero inoxidable 202

Esta aleación tipo AISI 202 es un acero inoxidable austenítico cromo-níquel-manganeso, la cual tiene la composición química mostrada en la tabla 5.3:

Tabla 5.3. Composición Química (%).

Fe	C	Mn	P	Sulfuro	Si	Cr	Ni
Resto	0.15max	5.5-7.5	0.060max	0.030max	1.0max	16.0-18.0	4.0-6.0

Este acero es utilizado en los aparatos domésticos, ornamentales, escaleras, ganchos, manillas, o en otras aplicaciones con exposición limitada a la corrosión.

Acero inoxidable 286

La aleación tipo AISI 286 es un acero inoxidable austenítico para aplicaciones de alta resistencia mecánica y corrosión (hasta 816°C), la cual tiene la siguiente composición química, tabla 5.4:

Tabla 5.4. Composición Química (%).

Fe	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
Resto	0.08max	0.35max	0.015max	0.015max	0.35max	17.0-21.0	20.0-25.0
Mo	Ti	Al	Co	B	Cu	Ta	
2.80-3.30	0.65- 1.15	0.20- 0.80	1.0max	0.006max	0.30max	0.05max	

Esta aleación tiene una resistencia a la corrosión y oxidación alta de hasta 816°C para servicio continuo. Además tiene buenas propiedades mecánicas, tales como: resistencia máxima a la tensión de 620MPa, límite elástico de 275MPa, y elongación de 40%.

Este acero es empleado en la industria nuclear y aeroespacial, debido a su buen rendimiento mecánico a elevada temperatura. También tiene aplicaciones moderadas de la corrosión en soluciones acuosas y en motores a reacción.

5.3.2. Aceros inoxidables serie 300

Son *generalmente aceros inoxidables austeníticos al cromo-níquel*, contienen aproximadamente 18% de cromo y 8% de níquel, y tienen una resistencia a la corrosión superior a los de la serie 400. Generalmente son no magnetizables, poseen excelente resistencia mecánica a altas temperaturas y son endurecibles solamente al trabajarse en frío.

Se utilizan principalmente para la construcción de alabes de turbinas, ejes de bombas, utensilios de cocina, cuchillería, etc.

Acero inoxidable 301

Esta aleación tipo AISI 301 es un acero inoxidable austenítico cromo-níquel, la cual tiene la composición química mostrada en la tabla 5.5:

Tabla 5.5. Composición Química (%).

Fe	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S
Resto	0.15max	2.0max	1.0max	16.0-18.8	6.0-8.0	0.040max	0.030max

Este acero posee mayor resistencia a la corrosión que los tipos 430 y 434, pero menor al tipo 316. Es capaz de alcanzar alta resistencia mecánica y ductilidad por medio de trabajo en frío, no es endurecible por tratamiento térmico y es no magnético en la condición de recocido.

Las aplicaciones típicas incluyen resortes, tornillos, pernos, muelles, partes de computadora, conectores eléctricos, variedad de piezas estampadas, y por su recocido brillante se ha extendido su uso en piezas de carrocería curvadas por medio de cilindros.

Acero inoxidable 302

Esta aleación tipo AISI 302 es un acero inoxidable austenítico cromo-níquel, la cual tiene la siguiente composición química, tabla 5.6:

Tabla 5.6. Composición Química (%).

Fe	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
Resto	0.15max	2.0max	0.045max	0.030max	1.0max	17.0-19.0	8.0-10.0

Esta aleación es altamente resistente a la corrosión con buenas propiedades mecánicas, además de tener buena tenacidad.

Acero inoxidable 304

El acero inoxidable tipo AISI 304 es la aleación más versátil y más ampliamente usada de los aceros inoxidables austeníticos. Generalmente conocido como 18-8, la cual tiene la siguiente composición química, tabla 5.7:

Tabla 5.7. Composición Química (%).

Fe	C	Mn	P	Sulfuro	Si	Cr	Ni
Resto	0.08max	2.0max	0.045max	0.030max	0.75max	18.0-20.0	8.0-10.5
N							
0.10max							

Este acero tiene una alta resistencia a la corrosión y oxidación en muchos ambientes, en un rango de temperatura de 426 a 900°C, excelente formabilidad y ductilidad, facilidad de fabricación y de limpieza, buena soldabilidad y apariencia, buena resistencia a altas temperaturas, y buenas propiedades mecánicas en condiciones de recocido y trabajado en frío, tales como: resistencia máxima a la tensión de 515MPa, límite elástico de 205MPa, elongación de 40%, y dureza Rockwell de B92 máximo.

Las aplicaciones principales de este acero inoxidable las podemos encontrar en equipo para el proceso de alimentos, utensilios de cocina, equipo y aplicaciones en electrodomésticos, ambientes marinos, paneles en arquitectura, estructuras, contenedores químicos (incluyendo la transportación), intercambiadores de calor, cubiertas de hornos comerciales y filtros de agua, equipo utilizado en hospitales, equipo de aire acondicionado, evaporadores, tambores, y barriles.

AISI 304L

Es una versión del tipo AISI 304 pero con bajo contenido en carbono. El propósito del bajo carbono es mantener una buena resistencia a la corrosión en las partes fabricados por medio de soldadura.

Se utilizan cuando es determinante el comportamiento frente a la corrosión, como en estructuras soldadas, partes arquitectónicas y variedad de piezas estampadas.

Acero inoxidable 310

Esta aleación tipo AISI 310 es un acero inoxidable austenítico cromo-níquel, la cual tiene la composición química mostrada en la tabla 5.8:

Tabla 5.8. Composición Química (%).

Fe	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
Resto	0.15max	2.0max	0.045max	0.030max	1.0max	24.0-26.0	19.0-22.0

Es un material clasificado como acero inoxidable refractario y resiste temperaturas de hasta 1,150°C.

Las principales aplicaciones de este acero incluyen calentadores de aire, escudos para caldera de vapor, hornos de fundición, intercambiadores de calor, compuertas de hornos, componentes de

turbinas, cajas de cementación, equipos para fábrica de tinta, los componentes de quemadores de óleo, equipos de las refinerías de petróleo, y conjuntos de diafragma de los bocales para motores turbojet.

Acero inoxidable 316

La aleación tipo AISI 316 es un acero inoxidable austenítico que contiene molibdeno, la cual hace que mejore la resistencia a la corrosión en agua salina, a ataques químicos industriales y solventes, y a la corrosión en general que otros aceros inoxidables austeníticos (como la aleación 304). Este acero tiene la composición química mostrada en la tabla 5.9:

Tabla 5.9. Composición Química (%).

Fe	C	Si	Mn	Cr	P	Ni	S
Resto	0.08max	1.0max	2.0max	16.0-18.0	0.045max x	10.0-14.0	0.030max
Mo							
2.0-3.0							

Este acero inoxidable es no magnetizable, y no endurecible térmicamente (sólo puede endurecerse mediante trabajo en frío). Ofrece mayor resistencia a la fractura bajo tensión y a elevadas temperaturas, tales como: resistencia máxima a la tensión de 515MPa, límite elástico de 205MPa, elongación de 40%, y dureza Rockwell de B92 máximo. Además de su excelente resistencia a la corrosión y resistencia mecánica, esta aleación ofrece excelentes características de maquinabilidad y formabilidad, que son típicas de los aceros inoxidables austeníticos.

Por consiguiente, esta aleación está especificada para el equipo industrial que se ocupa de los químicos del proceso corrosivo usados para producir tintas, químicos fotográficos, papel, textiles, blanqueadores, y caucho. Sin embargo, este acero inoxidable es usado principalmente en el ambiente marino, con la excepción de broches y otros artículos donde se necesitan fuerza y resistencia al desgaste, además de ser un acero inoxidable para implantes (industria médica).

Acero inoxidable 316L

Es una versión del tipo AISI 316 pero con bajo contenido en carbono. Tiene una mejor resistencia a la corrosión que el tipo 316 y permite un fácil maquinado.

Las aplicaciones principales de este acero inoxidable las podemos encontrar en equipos de procesos químicos, tanques de almacenaje y transportación, tubos para procesos químicos, procesamiento de alimentos, refinación de aceites, procesamiento de papel, equipos de industria farmacéutica, partes para la industria textil, y aplicaciones marítimas.

Acero inoxidable 321 y 347

Son conocidos como aceros inoxidables estabilizados. Tienen aplicaciones en equipos que operan entre 400 y 900°C, ya que conservan mejores sus propiedades mecánicas a esas temperaturas; notoriamente la resistencia al creep.

5.3.3. Aceros inoxidables serie 400

Son *generalmente aceros inoxidables ferríticos al cromo*, un acero al cromo con el 12 % desarrollará una película de óxido superficial al cabo de varias semanas de exposición a una atmósfera industrial. La película una vez formada, actúa como barrera contra la corrosión más pronunciada. Estos aceros no son templables y tiene buena resistencia a la corrosión y oxidación. Se utilizan principalmente para la fabricación de elementos de máquinas, alabes de turbinas, válvulas, y para fines industriales (debido a sus condiciones de resistencia a la oxidación).

Acero inoxidable 409

Esta aleación tipo AISI 409 es un acero inoxidable ferrítico estabilizado a base de titanio, la cual tiene la composición química mostrada en la tabla 5.10:

Tabla 5.10. Composición Química (%).

Fe	C	Mn	Si	Cr	Ni	Ti	P
Resto	0.02max x	1.0max	1.0max	10.5-11.7	0.5max	6x(C+N)min , 0.50max	0.040max
S	N						
0.020max	0.03max x						

Este acero posee moderada resistencia a la corrosión y al calor, no es susceptible al tratamiento térmico, es magnético y tiene una buena ductilidad, así como buenas propiedades mecánicas en condiciones de recocido, tales como: resistencia máxima a la tensión de 380MPa, límite elástico de 170MPa, y elongación de 20%.

Se usa principalmente en partes para sistema de escape de los automóviles y en donde no se requiere alta calidad de apariencia.

Acero inoxidable 410

La aleación tipo AISI 410 es un acero inoxidable martensítico, la cual tiene la composición química mostrada en la tabla 5.11:

Tabla 5.11. Composición Química (%).

Fe	C	Mn	P	Si	Cr
Resto	0.15max	1.0max	0.040max	1.0max	11.5-13.5max

Presenta buena resistencia a la corrosión por humedad atmosférica (vapor de agua) y puede ser tratado térmicamente para lograr una dureza 39-41 HRC. Además puede ser sometido a tratamiento térmico de temple y revenido, con la finalidad de incrementar la resistencia a la corrosión. Debido a su dureza relativamente elevada, éste acero se suministra en estado de recocido para facilitar el maquinado.

Es utilizado en aplicaciones donde se requiere alta resistencia mecánica, tales como: válvulas, bombas, tubería de control de la calefacción, placa para muelles, cubiertos (cuchillos, cortaplumas, etc.), instrumentos de medición, ejes de funcionamiento, y máquinas de minería.

Acero inoxidable 420

La aleación tipo AISI 420 es un acero inoxidable martensítico, la cual tiene la siguiente composición química, tabla 5.12:

Tabla 5.12. Composición Química (%).

Fe	C	Mn	P	Si	Cr
Resto	0.15max	1.0max	0.040max	1.0max	12.0-14.0max

Puede ser tratada térmicamente para lograr una dureza de $\pm 49-53$ HRC. La alta dureza y la consecuente resistencia al desgaste de este acero, determinan las aplicaciones de este, utilizado en cuchillería, discos de freno, equipos quirúrgicos, y turbinas a gas.

Acero inoxidable 430

El acero inoxidable tipo AISI 430 es la aleación más comúnmente usada de los aceros inoxidables ferríticos, el cual tiene la composición química mostrada en la tabla 5.13:

Tabla 5.13. Composición Química (%).

Fe	C	Ni	Cr	Si	S	P	Mn
Balance	0.12max	0.75max	16.0- 18.0	1.0max	0.030max	0.040max	1.0max

Debido a su relativo alto contenido de cromo, esta aleación presenta buena resistencia a la corrosión en ambientes medianamente agresivos y es resistente a la oxidación hasta los 816°C. El grado 430 es dúctil en condiciones de recocido, no se endurece excesivamente durante el trabajado en frío y puede ser formado usando los procesos más comunes de embutido y doblado.

La aleación es magnética en todas las condiciones y no es susceptible a corrosión por fractura por esfuerzos de tensión. Además tiene buenas propiedades mecánicas, tales como: resistencia máxima a la tensión de 450MPa, límite elástico de 205MPa, elongación de 22%, y dureza Rockwell de B89 máximo.

El grado 430 tiene limitada soldabilidad y no debe ser usado en servicio riguroso. Esta aleación se puede forjar en frío por los métodos comunes, tales como: doblado, embutido, formado de perfil, etc.

Las aplicaciones las podemos encontrar en lavadoras, lava vajillas, campanas de cocina, componentes decorativos, ornamentos, equipo de restaurante y componentes para edificios.

Acero inoxidable 434

El acero inoxidable tipo AISI 434 fue introducida como alternativa del tipo AISI 430, la cual tiene la composición química mostrada en la tabla 5.14:

Tabla 5.14. Composición Química (%).

Fe	C	Mn	P	Si	Cr	Mo	Sulfuro
Resto	0.12max	1.0max	0.040max	1.0max	16.0-18.0	0.75-1.25	0.030

La aleación es un acero inoxidable ferrítico resistente al calentamiento (hasta 816°C que es la formación de escamas) con excelente resistencia a la oxidación y corrosión para componentes automotrices calientes, así como buenas propiedades mecánicas, tales como: resistencia máxima a la tensión de 450MPa, límite elástico de 240MPa, elongación de 22%, y dureza Rockwell de B89 máximo.

La adición de molibdeno incrementa dicha resistencia a la corrosión y al ataque de muchos químicos descongelantes. También cabe mencionar que es adaptable a operaciones de formado en caliente.

Las aplicaciones típicas incluyen acabado y moldeo automotriz, hornos de combustión, lava vajillas, exteriores electrodomésticos, quemadores de gases en unidades de calentamiento, cubiertos, etc. Desde el rango de aplicaciones comerciales e industriales como son desde arquitectura interior hasta plantas de ácido nítrico, equipo en refinación de combustible, techos y

equipo para restaurantes. Esta aleación no es tan fácil de fabricar como las aleaciones con bajo nivel de cromo debido a su pobre tenacidad y soldabilidad.

Acero inoxidable 439

Esta aleación tipo AISI 439 es un acero inoxidable ferrítico estabilizado a base de titanio, desarrollado en Europa y procesado en México, la cual tiene la composición química mostrada en la tabla 5.15:

Tabla 5.15. Composición Química (%).

Fe	C	Mn	P	Sulfuro	Si	Cr	Ni
Resto	0.03max	1.0max	0.040ma x	0.030ma x	1.0max	17.0-19.0	0.5max
Ti	N						
[0.20+4(C+N)] min, 1.10max	0.03max						

Esta aleación es resistente al calor, con buena resistencia a la oxidación y a la corrosión, contando con una excelente ductilidad, formabilidad y soldabilidad. Además posee buenas propiedades mecánicas, tales como: resistencia máxima a la tensión de 415MPa, límite elástico de 215MPa, elongación de 22%, y dureza Rockwell de B89 máximo.

Las aplicaciones principales de este acero inoxidable las podemos encontrar en tanques domésticos de agua caliente, componentes de sistemas de escape automotriz, aplicaciones de transferencia de calor, entubado para plantas de agua dulce, usos en manejos de alimentos, y edificios industriales.

Acero inoxidable 441

Esta aleación tipo AISI 441 es un acero inoxidable ferrítico estabilizado a base de niobio y titanio, el cual provee buena resistencia a altas temperaturas (excediendo la de los tipos de acero inoxidables 409 y 439), la cual tiene la composición química mostrada en la tabla 5.16:

Tabla 5.16. Composición Química (%).

Fe	C	Mn	P	Sulfuro	Si	Cr	Nb
Resto	0.03max	1.0max	0.040ma x	0.015ma x	1.0max	17.5-18.5	9xC+0.3 a 1.0
Ti	Mo						
0.10-0.60	0.015max						

Este acero inoxidable tiene buena resistencia a la corrosión y oxidación (al escamado a altas temperaturas) en muchos ambientes de gases de combustión, y es resistente al calor. Además tiene una excelente formabilidad y soldabilidad, así como buenas propiedades mecánicas, tales como: resistencia máxima a la tensión de 400-550MPa, límite elástico de 230MPa, y elongación de 18%.

La doble estabilización con niobio y titanio es para proveer buena ductilidad en la soldadura y resistencia a la corrosión.

Las aplicaciones principales de este acero inoxidable se pueden encontrar en recipientes de almacenamiento, vehículos de motor, aplicaciones domésticas, componentes de sistemas de escape automotriz, calentadores de condensación, y estructuras soldadas expuestas a atmósferas moderadamente corrosivas o sujetas a temperaturas de hasta 950°C.

Acero inoxidable 904L

La aleación tipo AISI 904L es un acero inoxidable dúplex superaustenítico, el cual tiene la composición química mostrada en la tabla 5.17:

Tabla 5.17. Composición Química (%).

Fe	C	Ni	Cr	Cu	Mo
Balance	0.020max	24.5-25.5	20.0- 21.0	1.2-1.8	4.5-5.0

Las aplicaciones principales de este acero se encuentran en la industria de la producción de lácteos, almacenamiento y transporte de ácido sulfúrico, y en las fábricas de papel y celulosa.

Cada tipo de acero inoxidable tiene sus características mecánicas y físicas, y será fabricado de acuerdo con la normativa nacional o internacional establecida (AISI, ASTM, ISO 3506, etc.).

5.4. FABRICANTES Y DISTRIBUIDORES DE SUPERALEACIONES BASE HIERRO EN MÉXICO

Las empresas que fabrican y distribuyen acero inoxidable (superaleaciones base hierro) en México son varias, así que solo se mencionaran tres importantes.

5.4.1. Mega Mex “Metales especiales bajo demanda”

Mega Mex es un proveedor estable de metales de alta calidad como lo es en “acero inoxidable”, acero al carbono, aleaciones base níquel, aluminio, cobre, latón y bronce en todos los grados y especificaciones ASTM. Su fuerte relación con diferentes molinos le permite ofrecer *virtualmente metales de "cualquier tipo"*.

Los productos en acero inoxidable incluyen:

- Barras, placas, laminas, tubos, y conexiones.
- Perfiles y barras.
- Tornillos, Tuercas, y válvulas.

También ofrece:

- Bridas y conexiones de todas las clases en aleaciones base níquel, titanio, acero inoxidable, y acero al carbono.

- Forjas en todos los grados de las aleaciones base níquel, acero al carbón, y acero inoxidable.

El acero inoxidable que comercializan es usado en su mayor parte en la fabricación de varios productos ASME que incluyen recipientes de presión, hornos industriales, intercambiadores de calor, calentadores industriales y mucho más.

5.4.2. Aceros Palmexico

Aceros Palmexico ofrece la distribución de aceros inoxidables especiales (superaleaciones base hierro) y de múltiples productos relacionados con el ramo, que satisfacen los requisitos de los clientes, adoptando nuevas tecnologías, normas de calidad, desarrollo del personal y trabajo en equipo, que garanticen un proceso de mejora continua. Entre *los productos en acero inoxidable incluyen:*

- Barras.
- Laminas.
- Alambres.

También ofrece en acero inoxidable formas especiales como:

- Birlos, pernos, tuercas, remaches, y tornillos.
- Flechas y partes para maquinaria.
- Partes para válvulas.
- Flechas para propelas.
- Moldes y recipientes.
- Partes para turbinas de vapor.
- Martillos para molino.

5.4.3. ATRESA Aceros y tubos regio S.A. de C.V.

Es una empresa líder en su ramo que orgullosamente forma parte de GIM (Grupo Industrial Mexicano). Está dedicada a la distribución y servicio integral de productos de acero inoxidable en diversas presentaciones, como son:

- Lamina, placa y rollo.
- Ángulos.
- Soleras.
- Barras (diferentes diámetros).
- Tubos cuadrados.
- Tubería ornamental y de conducción (gruesa y delgada).
- Accesorios para tubos (codos, coples, codos de pared delgada sin rosca).

Además:

- Tubería de acero al carbono para diversas aplicaciones.

Gracias a la preferencia de sus clientes y al desempeño de su gente, han logrado posicionarse como líderes en la comercialización de estos productos en la región noreste del país.

BIBLIOGRAFÍA

1. Metales y aleaciones para altas temperaturas

Juan M. de la Torre Cursach

Montecorvo. España. 1964

2. metales resistentes a la corrosión.

Pere Molera Solá.

Marcombo. España. 1990.

3. Metalurgia y metales industriales.

John E. Nelly.

Limusa. México. 1999.

4. Metalurgia no ferrosa.

Zbigniew Szczygiel Jordens.

Limusa. México. 1984.

5. La microestructura de superaleaciones..

Madeleine Durand- Charre.

CRC. United States of America. 1998

6. Materiales avanzados: Las superaleaciones.

Herlinda Valdez Reyes y Leandro Barragán.

ITT. México. 1980.

7. Cobalt and cobalt alloys. Third Edition.

F.R. Morral.

Cobalt Information Center. Belgium. 1967

8. Nickel based superalloys for blade application: production, performance and application.

Tin S. and Pollock T.M.

Illinois Institute of Technology. EUA. 2010.

9. The superalloys, fundamentals and applications.

Roger C. Reed

Cambridge University Press. EUA. 2006

10. The physical metallurgy of titanium alloys.

Collings E.W.

American Society for Metals. EUA. 1984.