



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
CAMPUS ARAGÓN

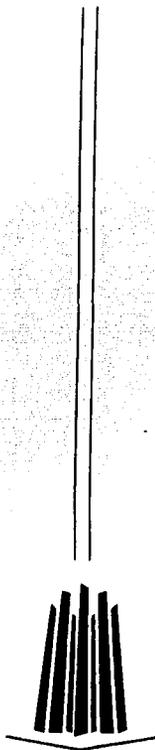
ESTUDIO GENERAL DEL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES.
CASO PRACTICO LAS ALEACIONES PARA FUNDICIÓN
A319 Y A365.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A N:

EDUARDO GALICIA GÓMEZ /
JAVIER GÓMEZ ARGÜELLO



ASESOR: M. EN ING. ALBERTO REYES SOLIS

MÉXICO,

2002

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*A la Universidad Nacional Autónoma
de México.*

*Mi total agradecimiento por haberme
dado el privilegio de pertenecer a ella, en
especial a la Escuela Nacional de
Estudios Profesionales "Aragón" por
abrirme sus puertas y darme la
oportunidad de forjarme en sus aulas.*

Al M in I. Alberto Reyes Solís.

*Por su capacidad como catedrático,
su calidad como ser humano, su sincero y
desinteresado afán de ayudar, hizo posible
la realización de este trabajo.*

A los Profesores.

*Por dedicar gran parte de su valioso tiempo
A mi formación académica.*

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ÍNDICE.

<u>ÍNDICE.</u>	<u>1</u>
<u>INTRODUCCIÓN.</u>	<u>4</u>
<u>Capítulo I. GENERALIDADES SOBRE LOS SISTEMAS DE ALEACIÓN.</u>	<u>6</u>
I.1.- Estructura de los metales.	6
I.1.1.- Estructura atómica y electrónica de los átomos.	9
I.1.2.- Estructura cristalina en metales puros.	13
I.1.3.- Arreglo atómico en metales.	16
I.2.- La solidificación en metales puros.	19
I.2.1.- Fases y su proceso de solidificación.	19
I.2.2.- Crecimiento cristalino.	23
I.3.- Aleaciones binarias.	24
I.3.1.- Formación de una solución sólida.	24
I.3.2.- Formación de una segunda fase.	26
I.3.3.- El proceso de difusión.	27
I.3.4.- Transformaciones de fase en estado sólido. Crecimiento cristalino y dendrítico.	29
I.4.- Diagramas de equilibrio binario.	31
I.4.1.- Curvas de enfriamiento para metales puros y aleaciones.	31
I.4.2.- La solubilidad en el estado sólido y su efecto en la formación de diagramas de fase binarios.	34
I.4.3.- Principales reacciones en diagramas de fase	48
<u>Capítulo II. EL ALUMINIO Y SUS PROPIEDADES.</u>	<u>50</u>
II.1.- Historia del aluminio.	50
II.1.1.- Producción del aluminio.	51
II.1.1.1.-Producción anual de aluminio.	51
II.1.2.- Crecimiento comercial.	53
II.1.3.- Extracción del aluminio.	54
II.1.3.1.-Métodos de refinamiento.	56
II.1.3.2.-Tecnología de fundición.	58
II.1.3.3.-Reciclaje del aluminio.	58
II.2.- Propiedades del aluminio.	59
II.2.1.- Propiedades físicas.	60
II.2.2.- Propiedades químicas.	62
II.2.3.- Propiedades mecánicas.	62
II.3.- El aluminio como material de ingeniería.	64

Capítulo III. LAS ALEACIONES DE ALUMINIO. 66

III.1.- Generalidades sobre las aleaciones base aluminio.	66
III.1.1.-Propiedades generales de las aleaciones de aluminio.	67
III.2.- Principales sistemas de aleación y sus diagramas de equilibrio.	69
III.2.1.-Grupo 1XX.X Aluminio con un mínimo de pureza del 99%.	70
III.2.2.-Grupo 2XX.X Aleaciones Aluminio-cobre.	70
III.2.3.-Grupo 3XX.X Aleación Aluminio-silicio con adición de cobre y/o magnesio.	73
III.2.4.-Grupo 4XX.X Aleaciones de Aluminio-silicio.	74
III.2.5.-Grupo 5XX.X Aleaciones Aluminio-magnesio.	76
III.2.6.-Grupo 7XX.X Aleaciones Aluminio-zinc.	78
III.2.7.-Grupo 8XX.X Aleaciones Aluminio-estaño.	80
III.2.8.-Grupo 9XX.X aleaciones de otros elementos.	80
III.3.- Tratamientos térmicos.	82
III.3.1.-Designación de los tratamientos térmicos.	82
III.3.2.-Principales tratamientos térmicos. Aplicados a las aleaciones.	83

Capítulo IV. EL PROCESO DE FUNDICIÓN EN MOLDE DE ARENA. 85

IV.1.- Generalidades.	85
IV.2.- Las arenas para fundición.	86
IV.2.1.- Tipos de arena.	86
IV.2.2.- Acondicionamiento de la arena.	87
IV.2.2.1.-Permeabilidad.	88
IV.2.2.2.-Resistencia.	88
IV.2.2.3.-Refractariedad.	89
IV.2.2.4.-Tamaño y forma y grano.	89
IV.2.2.5.-Colapsabilidad.	90
IV.2.3.- Pruebas de la arenas.	90
IV.2.3.1.-Prueba de dureza.	91
IV.2.3.2.-Prueba de finura.	91
IV.2.3.3.-Pruebas sobre contenido de humedad.	92
IV.2.3.4.-Pruebas de contenido de arcilla.	93
IV.2.3.5.-Prueba de permeabilidad.	93
IV.2.3.6.-Pruebas de resistencia.	94
IV.2.4.- Equipo para el acondicionamiento de la arena.	95
IV.3.- Equipo de moldeo.	96
IV.4.- Moldeo en arena verde.	98
IV.5.- Moldeo en arena seca.	100
IV.6.- Porosidad.	101
IV.7.- Desgasificación.	102
IV.7.1.- Filtración.	103

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Capitulo V. LAS ALEACIONES PARA FUNDICIÓN A319 Y A365	
 CARACTERIZACIÓN TEÓRICA.	105
V.1.- Aleación A319, datos generales.	105
V.1.1.-Propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas.	106
V.1.2.-Características de fabricación.	108
V.2.- Aleación A365.1	109
V.2.1.-Composición química.	110
Capitulo VI. LAS ALEACIONES PARA FUNDICIÓN A319 Y A365	
 CARACTERIZACIÓN PRACTICA.	111
VI.1.- Generalidades.	111
VI.2.- Ensayo de tensión.	111
VI.2.1.- Preparación de las probetas bajo norma.	112
VI.2.2.- Realización del ensayo de tensión.	112
VI.3.- Pruebas de dureza.	113
VI.3.1.- Preparación de probetas.	114
VI.3.2.- Realización de la prueba de dureza Brinell.	114
VI.4.- Ensayos microscópicos.	114
VI.4.1.- Preparación de las muestras metalográficas.	115
VI.4.2.- Los medios de ataque.	116
VI.4.5.- Composición química.	117
Capitulo VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS.	119
VII.1.- Análisis de tensión.	119
VII.2.- Análisis de dureza.	135
VII.3.- Metalografías de las Aleaciones A 319 Y A 365.	136
VII.3.1.- Observación metalográfica.	138
Conclusiones.	144
Bibliografía.	146
Anexo.	147

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

INTRODUCCIÓN.

El estudio general del aluminio nos dará un amplio panorama de la realidad en la industria fundidora del aluminio así como de los avances que este material ha tenido.

Este tema de investigación lo desarrollamos debido al avance de los programas de investigación y desarrollo que se han creado y se siguen creando para nuevos materiales. Actualmente y a futuro el aluminio se ve como un elemento de gran importancia para la industria, debido a sus características físicas, mecánicas y ópticas.

Es por esto que en materia de ingeniería nos interesa el estudio del aluminio ya que a tenido una evolución continua y sigue mejorando con el desarrollo de materiales aleantes, para mejorar productos científicos y tecnológicos para ponerlos en practica en la industria, ya que desempeñan un papel importante de la vida moderna, por ejemplo en el campo biomédico, comunicación, aeroespacial, industria alimenticia, automotriz, construcción, agropecuaria, etc.

Este trabajo presenta un análisis y observación sobre dos de las aleaciones utilizadas en la industria fundidora de aluminio por la compañía (FUMISA), empresa que realmente esta conciente en el cambio e importancia que tiene el estudio del aluminio.

Los ingenieros son los encargados de diseñar la mayoría de los productos y los procesos necesarios para su fabricación, los ingenieros deberán conocer la estructura interna y propiedades de los materiales de modo que sean capaces de seleccionar el más adecuado para cada aplicación, así también capaces de desarrollar los mejores métodos de proceso al igual que analizar el comportamiento de los materiales, esto involucra investigar y desarrollar nuevos materiales para modificar las propiedades ya existentes con un propósito, mejorarlos.

Los ingenieros de diseño usan los materiales existentes, los modificados o los nuevos para diseñar o crear nuevos productos y sistemas, algunas veces el problema surge de modo inverso, los ingenieros de diseño tienen dificultades en un diseño y requieren que sea creado un nuevo material para cumplir los objetivos de diseño, como es el caso de este trabajo de investigación para la empresa ya mencionada.

El propósito de este trabajo de investigación es de conocer las estructuras, diagramas de equilibrio, propiedades, aleaciones base aluminio, proceso de fundición en molde de arena, caracterización practica de tensión, dureza así como su ensayo microscópico para las aleaciones A319 y la especial A365.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En el capítulo uno se hablara de las generalidades sobre aleaciones, conociendo la estructura de los metales, su solidificación, aleaciones binarias, diagramas de equilibrio, que nos ayudaran a comprender el comportamiento de un metal puro y aleado.

En el capítulo dos estudiaremos las propiedades del aluminio, conociendo brevemente la historia que tiene éste material, así como los métodos de extracción, refinamiento, reciclaje y producción y crecimiento comercial.

En el capítulo tres se estudiaran ampliamente los 9 grupos de aleaciones base aluminio para fundición designadas por la ASM, y sus tratamientos térmicos aplicados a estas.

En el capítulo cuatro hablaremos de la importancia que tiene la arena sílica dentro de la industria fundidora, siendo esta un tema de estudio muy interesante ya que de las características que presenten las piezas fundidas y coladas en este método dependerán a gran medida de las propiedades de la arena.

En el capítulo cinco y seis se caracterizaran teórica y prácticamente las aleaciones A319 y A365, en donde se dará a conocer las propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas, su composición química comparándola con laboratorios especializados en espectrofotometría y sus características de fabricación .

En el capítulo siete se dará a conocer los análisis de las pruebas de tensión dureza y metalografía realizadas por nosotros comparando con las normas mexicanas de cada una de estas pruebas.

En el Anexo se encuentran las normas mexicanas vigentes para estas pruebas, las tablas de los ataques químicos por el ASTM, y la comparación de la observación metalográfica para determinar las inclusiones, porosidad, y oxidación globular.

I.- GENERALIDADES SOBRE LOS SISTEMAS DE ALEACIÓN

I.1.- ESTRUCTURA DE LOS METALES.

Ciertas propiedades mecánicas y físicas de los materiales de ingeniería dependen en gran parte de la estructura. Estas propiedades incluyen la densidad, la conductividad térmica y eléctrica, la resistencia, la ductilidad y la dureza.

Sin embargo, el concepto de estructura puede ser un poco más difícil de comprender. El término "estructura" se aplica a los diversos arreglos geométricos o químicos que representan condiciones específicas en un material.

Los materiales de uso de ingeniería se pueden clasificar en tres grandes grupos

- Metales
- Polímeros
- Cerámicos

Cada uno de estos grupos está formado por la unión de átomos formando un arreglo ordenado en el espacio. Este arreglo depende del tipo de unión entre los átomos y las propiedades de los materiales dependen de dicha unión y del arreglo adquirido.

A continuación se da una explicación breve de las estructuras pertinentes, que afectan las propiedades y el comportamiento de los materiales.

- Estructura Electrónica: configuración de los electrones asociados con un átomo o con un grupo de átomos. Distinguiéndose de la estructura atómica interna (esto es, del núcleo), porque la mayor parte de las reacciones entre los materiales tecnológicos, se puede interpretar en términos de los cambios en la configuración de los electrones que rodean el núcleo.
- Estructura Molecular: arreglo espacial de grupos pequeños de átomos que están unidos fuertemente entre sí dentro del grupo o molécula. Sin embargo, moléculas similares están unidas de forma comparativamente más débil y con frecuencia exhiben un patrón aleatorio.
- Estructura Cristalina: átomos situados en un arreglo ordenado y repetitivo, en el espacio. Este arreglo en el espacio produce sólidos cuya estructura cristalina posee formas geométricas familiares como cubos, prismas, pirámides y así sucesivamente.

- **Macroestructura:** por lo general se resuelve y se observa sin la ayuda del microscopio. Este tipo de estructura, también resulta de la combinación de elementos químicos y con frecuencia se mejora con trabajo mecánico (deformación) y/o con tratamientos térmicos del material.

Con excepción de los elementos radioactivos por lo regular la estructura del interior del núcleo de un átomo no cambia de modo importante en un material. Sin embargo, la configuración de los electrones asociados con los átomos en un sólido lo hace de modo significativo; especialmente en los electrones más alejados del núcleo. Estos electrones y la estructura electrónica correspondiente, ejercen una influencia preponderante en las propiedades físicas y mecánicas del material. Por ejemplo, la interacción entre los electrones exteriores (electrones de valencia) de átomos adyacentes es la base para unir o enlazar átomos en los sólidos.

La estructura molecular como la estructura cristalina, ejercen una influencia grande en el comportamiento del material. El arreglo de los átomos en un sólido, afecta propiedades físicas como la densidad, la conductividad eléctrica (o su contraria, la resistividad), la conductividad térmica, la expansión térmica y el comportamiento magnético. Desde el punto de vista mecánico, esta configuración estructural también afecta la resistencia, la dureza y la ductilidad. Aún más, la estructura molecular o la cristalina, influyen mucho en el comportamiento de deflexión de un material, esto es, en su respuesta a la aplicación de cargas y fuerzas. Por ejemplo, si los átomos de una molécula, tienen la capacidad de formar distintos arreglos estructurales o geométricos sin modificar la composición química, tenemos un isómero. En ambos casos y dependiendo de la estructura adoptada, los comportamientos físicos y mecánico son diferentes (a veces mucho muy diferentes).

De modo correspondiente, las propiedades de los materiales se encuentran íntimamente relacionadas a la proximidad con que las estructuras moleculares o cristalinas se asemejen a una estructura perfecta. En forma simplista, una estructura perfecta significa que no falta ningún átomo o ión de su posición indicada y que la estructura respectiva, no presenta desviaciones de la perfección geométrica. En otras palabras, no se pueden presentar fallas o defectos. Naturalmente, una situación ideal como ésta es virtualmente imposible de obtenerse en los experimentos más controlados, ni mucho menos en materiales que se fabrican a granal para aplicaciones comerciales.

Como se comprenderá más adelante, en las estructuras cristalinas son posibles una gran variedad de imperfecciones en su arreglo cristalino y estos defectos ejercen una influencia profunda en el modo como se comportan los materiales. Estas imperfecciones también proporcionan explicaciones razonables para las diferencias de comportamiento que se observan entre las predicciones teóricas y las condiciones reales.

Por último, las microestructuras y las macroestructuras que presentan los materiales tienen un efecto importante en sus propiedades resultantes. Estas estructuras pueden ser muy complejas, dependiendo de una cantidad de factores

que incluyen la composición química y su uniformidad en el material, el grado (cantidad) de trabajo mecánico que recibe un producto en particular y ciertos tratamientos o procesos térmicos que puede recibir un material con el objeto de obtener las propiedades deseadas. Estos factores afectan de manera sinérgica la micro/macroestructura de un material y por consecuencia, a sus propiedades. Por consiguiente, para predecir y controlar el comportamiento de un material, se debe entender las relaciones básicas entre la estructura y las propiedades, así como los factores que las influyen. De igual forma, se puede aplicar este conocimiento para controlar la estructura y, por lo tanto, las propiedades finales de un material en servicio.

Las propiedades de los materiales están íntimamente relacionadas a las dimensiones de la estructura involucrada, como se muestra en la figura 1.

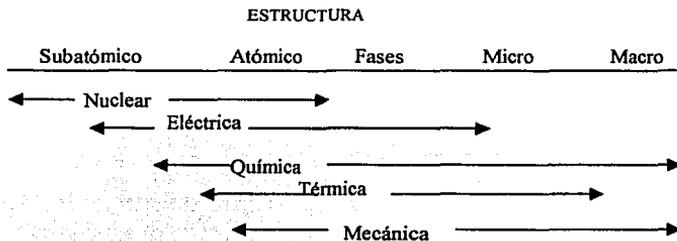


Figura 1.- Relación general del tamaño de la estructura del material en relación a sus propiedades

En nuestro caso estamos interesados principalmente en los materiales metálicos. Los metales sólidos en su forma pura están compuestos por un solo tipo de átomo. Estos adquieren un arreglo ordenado en el espacio. Este arreglo ordenado constituye lo que se conoce como red cristalina, la cual se extiende a través de todo el material.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

I.1.1.- ESTRUCTURA ATÓMICA Y ELECTRÓNICA DE LOS ÁTOMOS

• ESTRUCTURA ATÓMICA

Las propiedades físicas y mecánicas de los materiales de ingeniería, dependen en gran medida de la naturaleza y el comportamiento de los átomos que los constituyen.

Se reconoce universalmente a los átomos como los constituyentes básicos de la materia; se unen para formar materiales cristalinos o amorfos. Este ensamble de átomos puede estar en la forma de gases, líquidos o sólidos. Las diferencias específicas entre los átomos y la forma como se comportan mecánica, física y químicamente se deben principalmente a sus estructuras atómicas o electrónicas individuales.

El corazón de un átomo, su núcleo, está compuesto estructuralmente, de partículas cargadas positivamente que se conocen como protones y de partículas sin carga, llamadas neutrones. También se conoce a la cantidad de protones como el número atómico (Z) y determina la identidad del elemento. La suma de protones y neutrones en el núcleo, determina el peso atómico.

El núcleo está rodeado de electrones asociados con un átomo particular. Los electrones son partículas cargadas, relativamente pequeñas, con una masa igual a $1/1836$ de la masa de un protón y su carga es igual en magnitud, pero de signo opuesto, a la carga del protón. Por otra parte, el número de electrones en un átomo iguala al número de protones. El diámetro típico de los átomos es del orden de una unidad conocida como ángstrom (\AA) y que equivale a $1 \text{\AA} = 10^{-10} \text{ m}$.

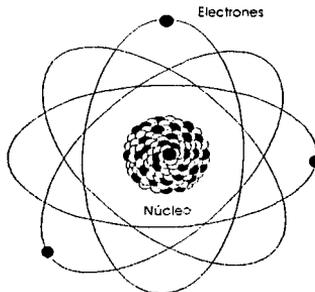


Figura 1-1 Nuestra imagen del átomo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El núcleo de cada átomo que está formado a su vez por protones y neutrones se puede representar como un racimo de partículas, pues neutrones y protones se encuentran en contacto unos con otros, figura 1-1.

A pesar de que la tendencia es a modelar convenientemente a los átomos como esferas discretas, uniformes y duras, de hecho son cuerpos más bien difusos, no uniformes y deformables. El concepto actual de la estructura atómica representa a los electrones asociados con átomos como una nube "gaseosa", con fronteras mal definidas. Esta nube de electrones exhibe una densidad mayor en las proximidades del núcleo, que está cargado positivamente.

Los electrones orbitales o nube de electrones de un átomo, se puede alterar o perturbar con fuerzas eléctricas, magnéticas y mecánicas. Estas alteraciones o perturbaciones de la estructura electrónica de los átomos, contribuye a una parte importante del comportamiento que se observa en materiales tecnológicos a granel: Por ejemplo, su conductividad eléctrica y térmica, sus propiedades magnéticas y su resistencia a la corrosión.

- ESTRUCTURA ELÉCTRICA

Los átomos normalmente son eléctricamente neutros, pues el número de electrones orbitales es igual al número de protones en el núcleo. A este número se le denomina número atómico (Z) y distingue a los elementos químicos. Ahora bien, los electrones orbitales se encuentran colocados en capas. La capa más cercana al núcleo es la capa K; le siguen la capa L, la M, la N, etc. Una clasificación de los elementos la constituye la tabla periódica, en que a cada elemento se le asocia su correspondiente Z . En el cuadro 1 se dan ejemplos de algunos elementos ligeros, incluyendo el número de electrones que corresponde a cada capa; la capa K se llena con 2 electrones, la L con 8, etc. Se conocen más de 100 elementos. Nótese que nombrar el elemento equivale a establecer su número atómico.

CUADRO 1. Configuración electrónica de los elementos.

Elemento	Z	Número de electrones en la capa						
		K	L	M	N	O	P	Q
		s	sp	spd	spdf	spdf	spdf	spdf
H (hidrogeno)	1	1						
He (helio)	2	2						
Li (litio)	3	2	1					
Be (berilio)	4	2	2					
B (boro)	5	2	3					
C (carbono)	6	2	4					
N (nitrógeno)	7	2	5					
O (oxígeno)	8	2	6					
F (flúor)	9	2	7					
Ne (neón)	10	2	8					
Na (sodio)	11	2	8	1				
Mg (magnesio)	12	2	8	2				
Al (aluminio)	13	2	8	3				

Si por algún proceso físico un electrón se separa de su átomo correspondiente, se dice que sucede una ionización. El átomo resultante, ahora con una carga neta positiva, se llama ion positivo, o átomo ionizado. En los metales la ionización se da en la última capa atómica,

En un compuesto químico se unen átomos de diferentes elementos para formar una molécula, de acuerdo con la valencia de cada tipo de átomo. También pueden formarse moléculas de átomos iguales, como en el caso del nitrógeno o del oxígeno, que en su estado natural existen como moléculas diatómicas (dos átomos).

Los átomos son mantenidos juntos por medio de las fuerzas interatómicas, que son una consecuencia directa de la estructura electrónica de los átomos.

Podemos distinguir tres tipos de enlaces entre átomos, conocidos como enlaces primarios, enlace metálico, iónico y covalente. Este último no será tratado aquí, ya que se caracteriza por formar moléculas, las cuales son la unidad que forman polímeros.

a) ENLACE METÁLICO

Ciertos elementos tienden con facilidad a perder electrones de valencia, se les conoce como metales. Si solamente hay unos pocos electrones de valencia asociados con un átomo, se pueden remover con bastante facilidad mientras que el resto de los electrones (las capas interiores) se mantienen unidos firmemente con el núcleo. Este proceso resulta en un ion positivo y una cantidad de electrones "semilibres".

Entonces, los electrones de valencia, que son semilibres de derivar por ahí y asociarse con varios iones positivos. Por esta razón, constituyen lo que con frecuencia se describe como una nube o gas electrónico. Es esta combinación de iones con carga positiva y de la nube electrónica que los rodea, lo que produce las fuerzas de atracción del enlace metálico. Más aún, los electrones de valencia desligados o nube electrónica, son los que originan ciertas características metálicas como:

- 1.- Alta conductividad térmica
- 2.- Alta conductividad eléctrica
- 3.- Opacidad a la luz

b) ENLACE IÓNICO

Este tipo de enlace atómico resulta de la atracción mutua de cargas positivas y negativas. Se da entre un metal (el cual cede electrones al ionizarse) y un no metal (el cual acepta electrones al ionizarse), los cuales al ionizarse forman iones cargados positivamente y negativamente, respectivamente, por lo que sienten una fuerza de atracción mutua, que es la que proporciona una fuerza de unión de gran fortaleza. El resultado de esta unión es la formación de un arreglo de iones positivos y negativos alternados en un arreglo ordenado tridimensional, de tal manera, que un ion positivo se encuentra rodeado por iones negativos y viceversa. Este tipo de arreglo nos lleva a poder distinguir entre las posiciones para un ion positivo de las posiciones para un ion negativo, ya que no son iguales por estar rodeadas por iones de signo contrario.

Esta situación impide que se pueda desplazar una hilera de iones respecto a otra, debido a que las fuerzas de repulsión que se originarían son de magnitud suficiente para ocasionar la fractura del material antes de que puedan quedar alineados iones de igual signo. Esto nos lleva a considerar que no es posible deformar plásticamente un material con enlace de tipo iónico.

1.1.2.- ESTRUCTURA CRISTALINA EN METALES PUROS

Como se menciono anteriormente, los metales sólidos poseen una estructura cristalina en la que los átomos adquieren un arreglo ordenado en el espacio, conocido como Red Espacial o Red Cristalina.

El término sólido, generalmente describe un estado en el que se tiene un agregado de átomos o iones, en el que la materia posee un volumen y forma definida. La habilidad que poseen los sólidos para soportar fuerzas cortantes, así como recuperar su forma original después de haber sufrido una pequeña deformación, los distingue de los gases y los líquidos.

Podemos decir que la característica fundamental de un metal sólido cristalino es la periodicidad de su estructura. Esta periodicidad implica que un cristal representa un arreglo ordenado de átomos en una forma repetitiva regular. Esta forma resulta de la repetición regular infinita en el espacio de unidades estructurales idénticas o bloques de construcción, los cuales pueden ser muy simples. Los sólidos cristalinos se caracterizan entonces, por poseer un orden de largo alcance, formado por millones y millones de estas unidades estructurales, mejor conocidas como celdas unitarias.

En base a lo anteriormente dicho, se puede considerar una red espacial como un arreglo infinito de puntos en el espacio, colocados de tal forma que dividen el espacio dentro de volúmenes iguales, llenando totalmente el espacio considerado.

La celda unitaria, considerada como la unidad o bloque más pequeño de la red cristalina, posee el arreglo atómico básico cuya repetición, forma dicha red. Se considera como unitaria debido a que cada lado de la celda tiene una dimensión unitaria.

Bravais mostró que existen únicamente catorce posibles arreglos de puntos en una red tridimensional, conocidas como estructuras cristalinas, las cuales surgen de siete sistemas cristalinos en las que todos los sólidos cristalinos entran. Estos sistemas cristalinos son:

SISTEMA CRISTALINO	TIPO DE CELDADA UNITARIA	EJES	ANGULOS AXIALES
CUBICO	CS,FCC,BCC	$a=b=c$	$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$
TETRAGONAL	TS, BCT	$a=b \neq c$	$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$
ORTORROMBICO	OS,bCO,BCO,FCO	$a \neq b \neq c$	$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$
ROMBICO	RS	$a=b \neq c$	$\alpha=\beta=\gamma \neq 90^\circ$
HAXAGONAL	HS,HC	$a=b \neq c$	$\alpha=\beta=90^\circ$ $\gamma=120^\circ$
MONOCLINICO	MS,bCM	$a \neq b \neq c$	$\alpha=\gamma=90^\circ \neq \beta$
TRICLINICO	TS	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma$

La geometría de una red espacial o sistema cristalino, está completamente definida por las constantes de la red (longitud de los lados) a, b y c y los ángulos interaxiales α , β , γ . Del total de las 14 celdas unitarias existentes, mostradas en la figura 1-2, sólo algunas poseen importancia para el estudio de los metales. Se puede considerar que son 6 las celdas unitarias que se presentan con mayor frecuencia en los metales y aleaciones de uso en ingeniería, a saber: cúbica a cuerpo centrado, cúbica a caras centradas, tetragonal a cuerpo centrado, ortorrómbica a caras centradas, hexagonal y la romboidal o rómbica simple. En los cristales cúbicos el parámetro de la red tiene el mismo valor en las tres direcciones del cristal y suele denotarse por la letra "a". Sin embargo, en otros cristales el parámetro de la red puede tener tres valores diferentes. La red hexagonal compacta característica del magnesio y algunos otros metales puros, está formada por un plano más intercalado entre los dos planos basales mostrados; figura 1.2

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

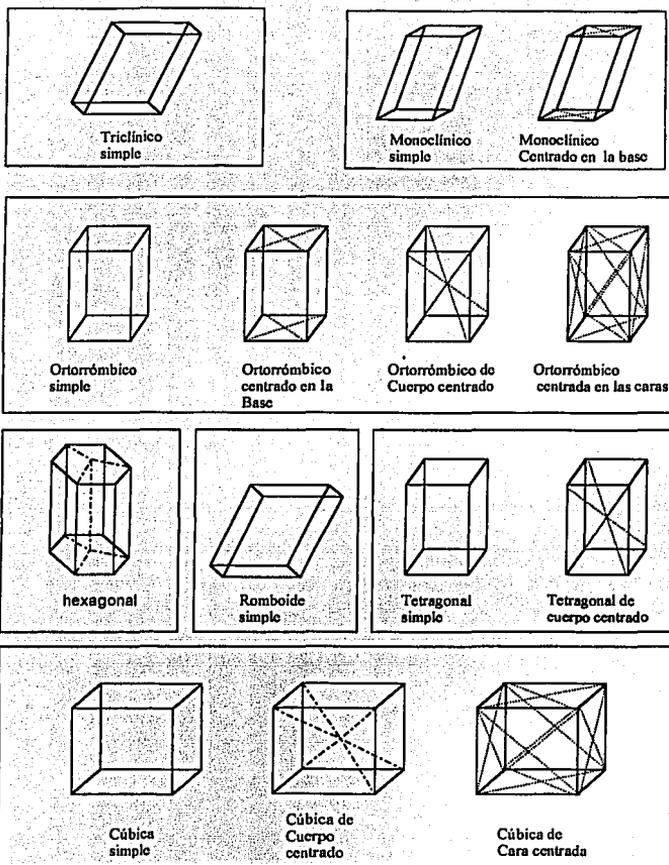
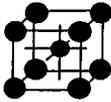


Figura 1-2 Representación esquemática de las 14 celdas unitarias existentes para los 7 sistemas cristalinos

I.1.3.- ARREGLO ATÓMICO EN METALES

En la mayoría de los casos, los cristales metálicos pertenecen a uno de los tres arreglos atómicos siguientes clasificados como: cúbica centrado en el cuerpo figura 1-3a, cúbico centrado en las caras figura 1-3b, y hexagonal compacta figura 1-3c, 1-3d

cúbica centrada en el cuerpo
figura 1-3a



cúbica centrada en las caras
figura 1-3b

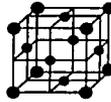
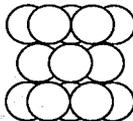
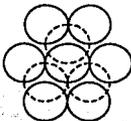
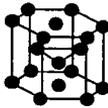
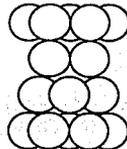


Figura 1-3c
Estructura hexagonal
compacta



A
B
A



A
C
B
A

Figura 1-3d estructura cúbica centrada en las caras

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La disposición geométrica de los átomos en la estructura cúbica centrada en las caras, es tal que cada átomo tiene un número de coordinación de 12 (cada uno está rodeado por otros 12 átomos a igual distancia). Si los átomos se consideran como esferas, existe un mínimo de espacio vacío en estos dos tipos de cristales y ambas redes cristalinas se llaman estructuras compactas.

La estructura centrada en el cuerpo es ligeramente más abierta que las compactas, cada átomo de un cristal cúbico de cuerpo centrado tiene un número de coordinación de 8.

La diferencia entre las dos estructuras compactas puede derivarse de una observación de la figura 1-4:

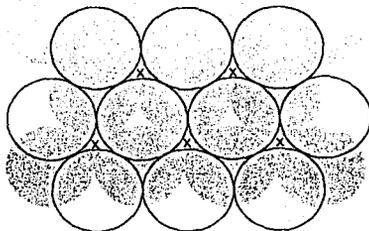


Figura 1-4

Los círculos sombreados del diagrama representan la primera capa de esferas, las que se colocan tan juntas como sea posible. La segunda capa de esferas (círculos vacíos), se colocan en los espacios formados entre esferas adyacentes de la primera capa. Las primeras dos capas de ambas estructuras, la cúbica centrada en las caras y la hexagonal compacta son iguales; la diferencia se presenta en la tercera capa y en las subsiguientes.

En la estructura hexagonal compacta, las esferas de la tercera capa se colocan de tal forma que están directamente sobre las de la primera capa; la secuencia de capas puede representarse como ababab....

Sin embargo, en la estructura cúbica centrada en las caras, las esferas de la tercera capa están colocadas sobre los espacios marcados con x en la figura 1-5, formados por la disposición de las dos primeras capas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.2.- LA SOLIDIFICACIÓN DE METALES PUROS

1.2.1.- FASES Y SU PROCESO DE NUCLEACIÓN

FASE

El primer paso en el crecimiento de un cristal es la formación de núcleos, los cuales pueden considerarse como un pequeño agregado de átomos o moléculas que han adquirido el arreglo cristalino que va a poseer el cristal. Este proceso se conoce como nucleación e involucra la formación espontánea de una nueva fase dentro de la fase que ya existía.

Cuando el metal fundido se enfría por debajo de su temperatura de fusión se empiezan a formar núcleos en muchas partes del líquido al mismo tiempo. Para que un núcleo sea estable y pueda crecer, debe de alcanzar un cierto radio, llamado "radio crítico", denotado por r^* . Así, un agregado que tiene un tamaño por debajo del radio crítico se denomina embrión, y cuando alcanza el radio crítico será un núcleo. Núcleos con un tamaño o radio más pequeños que el crítico serán disueltos.

La nucleación puede ocurrir por dos mecanismos: Nucleación Homogénea y Nucleación Heterogénea.

a) NUCLEACIÓN HOMOGÉNEA

La estabilidad de un núcleo esta gobernada por dos factores:

- 1) El cambio en la energía durante la transición líquido-sólido.
- 2) El valor de la energía de superficie del núcleo que se formó.

De aquí que el cambio total en la energía libre asociado con la formación de un embrión esta dado por:

$$\Delta G = 4\pi r^2 \gamma + \frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_v$$

donde:

ΔG_v = cambio en la energía libre entre líquidos y sólidos por unidad de volumen, asociada a la formación de un volumen de sólido

γ = energía libre superficial específica

r = radio del embrión

En la ecuación anterior el signo del segundo termino a la derecha del signo igual es negativo ya que ΔG_v es negativo para cualquier temperatura bajo el punto de fusión, T_m . El primer término, que representa la energía de superficie entre el embrión y la matriz es positivo, ya que γ siempre es positivo.

Para un embrión de forma esférica el segundo termino de la ecuación, el cual es considerado como la fuerza motriz para la creación de la interfase sólido-líquido, disminuye como r^2 , mientras que la fuerza que retarda el proceso de formación del embrión, que es la energía de superficie, aumenta como r^2 . La figura 1-6 muestra una grafica de ΔG contra el radio del embrión, en ella se puede apreciar que ΔG alcanza su máximo para $r = r^*$, denotada por ΔG^* , siendo r^* el radio crítico del embrión

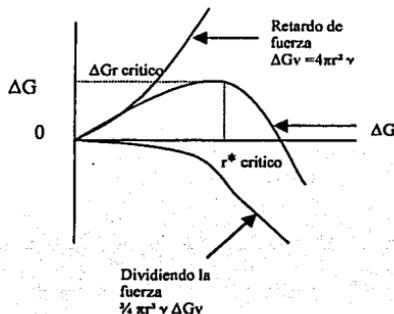


Figura 1-6

Diferenciando la ecuación con respecto a r , igualando a cero y evaluando en $r = r^*$ obtenemos:

$$4 \pi r^2 \Delta G_v + 4\pi(2r) \gamma = 0$$

donde:

$$r^* = \frac{-2\gamma}{\Delta G_v}$$

Para $r > r^*$ la energía libre del sistema disminuye, lo cual promueve el crecimiento del (núcleo), además de que posteriores decrementos en la energía libre total tienen como consecuencia un continuo crecimiento del grano.

Por otra parte, ΔG_v , esta relacionada al grado de sobre enfriamiento y al calor latente de fusión por unidad de volumen, por medio de la relación:

$$\Delta G_v = \frac{\Delta H_f \Delta T}{T_m}$$

Donde:

ΔH_f = calor de fusión por unidad de volumen

ΔT = grado de sobre enfriamiento = $T_m - T$

T = temperatura del metal

T_m = temperatura de fusión = temperatura de equilibrio en la interfase sólido-líquido

Es importante notar que para núcleos con $r < r^*$ la energía de superficie es mucho mayor que la energía libre volumétrica, de manera que la energía libre neta del sistema aumentara, ocasionando que el núcleo no sea estable por lo que se disolverá.

Si la nucleación tiene lugar dentro de un sólido cristalino, los efectos de la deformación causada por la formación de un núcleo debe considerarse para la energía libre:

$$\Delta G = (4/3) \pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma + (4/3) \pi r^3 \epsilon$$

Los defectos estructurales de la fase cristalina, tales como vacancias y dislocaciones y la presencia de impurezas tendrán un efecto profundo sobre la nucleación dentro de una fase sólida. De forma semejante, la presencia de límites de grano en materiales policristalinos favorecerá la nucleación. Sin embargo, debido a esos factores la nucleación dentro de una fase cristalina rara vez ocurre en forma homogénea, teniendo lugar principalmente en forma heterogénea.

b) NUCLEACIÓN HETEROGÉNEA

Se caracteriza por que la formación de los núcleos se lleva a cabo sobre la superficie del recipiente que contiene el metal, sobre la superficie de partículas de impurezas. Tales superficies presentan la característica de bajar la energía libre

neta asociada con la formación de un núcleo, es decir, la energía superficial es menor.

El núcleo heterogéneo se considera como una cubierta o tapa semiesférica sobre un sólido (sustrato plano). Utilizando un sustrato de pequeños valores para el ángulo de contacto en la unión núcleo-líquido-sustrato, puede reducirse considerablemente el valor para el término energía de superficie, de manera que la energía libre neta necesaria para la nucleación disminuye considerablemente. De esta forma, el cambio en la energía asociada con la formación del embrión está dada por:

$$\Delta G = V\Delta G + A_{cl}\gamma_{cl} + \pi r^2\gamma_{sc} - \pi r^2\gamma_{sl}$$

Donde:

V = volumen de la tapa semiesférica (núcleo)

A_{cl} = Área de la superficie de la interfase entre el líquido y la tapa

r = radio de la tapa semiesférica (núcleo)

γ_{cl} , γ_{sc} y γ_{sl} = tensiones superficiales de las interfases entre tapa-líquido, tapa-sustrato y sustrato-líquido, respectivamente.

De la ecuación de Young podemos escribir $\gamma_{cl} \cos\theta = \gamma_{sl} - \gamma_{sc}$ y sustituyendo en la ecuación anterior obtenemos

$$\Delta G = V\Delta G + A_{cl}\gamma_{cl} + \pi r^2 \cos\theta \gamma_{cl}$$

Es importante notar que la energía libre volumétrica no cambia apreciablemente y por tanto el factor que controla es el cambio en la energía de superficie, la cual disminuye grandemente por la presencia del sustrato.

En la nucleación homogénea el tamaño crítico del núcleo es independiente del ángulo de contacto. Sin embargo, en la nucleación heterogénea el valor de γ_{cl} , la tensión superficial de la interfase, es mucho más pequeño, por ello el radio crítico del núcleo será mucho más pequeño, como se puede ver de $r^* = -2\gamma_{cl} / \Delta G_v$. Esto nos lleva a que el número de átomos que deberán cristalizar para que el radio crítico sea alcanzado es mucho menor para la nucleación heterogénea que para la nucleación homogénea y por lo tanto, se requieren cantidades más pequeñas de sobre enfriamiento para que se lleve a cabo la nucleación heterogénea.

1.2.2.- CRECIMIENTO CRISTALINO

La solidificación es la transición del estado líquido al sólido y ocurre en dos etapas:

- a) Formación de núcleos
- b) Crecimiento de núcleos.

Aunque los átomos en el estado líquido no tienen ningún orden definido, es posible que algunos en cualquier instante dado estén en posiciones que corresponden exactamente a la red espacial que adoptan cuando se solidifican.

Estos agregados o grupos causales no son permanentes, sino que continuamente se deshacen y se forman de nuevo en otros puntos. El tiempo que existen está determinado por la temperatura y tamaño del grupo: a mayor temperatura, mayor energía cinética de los átomos y menor la vida del grupo. Los grupos pequeños son muy inestables, ya que sólo están formados por un corto número de átomos y la pérdida de uno solo puede destruir el grupo. Cuando la temperatura del líquido disminuye, el movimiento del átomo decrece, alargando la vida del grupo y mayor número de grupos estarán presentes al mismo tiempo.

Los átomos en un material tienen energía tanto cinética como potencial. La energía cinética está relacionada con la velocidad con que se mueven los átomos y es estrictamente una función de la temperatura. A mayor temperatura, los átomos son más activos y la energía cinética es mayor. Por otro lado, la energía potencial está relacionada con la distancia entre átomos. A mayor distancia promedio entre átomos, mayor será su energía potencial.

Ahora considérese un metal puro en su punto de solidificación en el que ambos estados, líquido y sólido, se encuentran a la misma temperatura. La energía cinética de los átomos en el líquido y en el sólido debe ser la misma, pero hay una diferencia significativa en energía potencial. Los átomos en el sólido están mucho más próximos, de modo que la solidificación ocurre con una liberación de energía. Esta diferencia en energía potencial entre los estados líquido y sólido se conoce como calor latente de fusión; sin embargo, se requiere energía para establecer una superficie entre el sólido y el líquido. En materiales puros, en el punto de solidificación, el calor de fusión libera energía insuficiente para crear una frontera estable, y siempre se necesita algún subenfriamiento para formar núcleos estables. La subsecuente liberación del calor de fusión elevará la temperatura al punto de solidificación. La cantidad de subenfriamiento necesaria puede reducirse por la presencia de impurezas sólidas que reducen la cantidad de energía superficial requerida.

Cuando la temperatura del metal líquido ha disminuido en forma suficiente por debajo de su punto de solidificación, aparecen espontáneamente agregados o

núcleos estables en diversos puntos del líquido. Estos núcleos, que ahora se han solidificado, actúan como centros para cristalización ulterior. Conforme continúa el enfriamiento, más átomos tienden a solidificarse y pueden unirse a aquellos núcleos ya existentes o formar por sí mismos nuevos núcleos. Cada núcleo crece al atraer átomos del líquido e incluirlos en su red espacial. El crecimiento del cristal continúa en tres dimensiones, con los átomos uniéndose entre ellos en ciertas direcciones preferentes, generalmente a lo largo de los ejes del cristal. Esto da lugar a una estructura característica con apariencia de árbol, llamada dendrita.

Como cada núcleo se forma de manera casual, los ejes del cristal están apuntados al azar y las dendritas que crecen de ellos se desarrollarán en diferentes direcciones en cada cristal, cabe mencionar que es muy difícil de que se formen dendritas aún en metales puros. Finalmente, al disminuir la cantidad de líquido, las separaciones entre las ramas de la dendrita se llenarán y el crecimiento de la dendrita lo obstruirá mutuamente el de sus vecinos. Esto da lugar a una forma externa muy irregular. Los cristales encontrados en todos los metales comerciales comúnmente se llaman granos, debido a esta variación en forma externa. El área a lo largo de la cual están unidos los cristales se conoce como límite de grano, y es una región de embonamiento o apareamiento deficiente. Esto da lugar a una estructura (amorfa) no cristalina en el límite de grano, estando los átomos espaciados irregularmente. Como los últimos residuos del líquido se solidifican, por lo general a lo largo de los límites de grano, tiende a haber mayor concentración de impurezas atómicas en esa área.

I.3.- LAS ALEACIONES BINARIAS

I.3.1.- FORMACIÓN DE UNA SOLUCIÓN SÓLIDA

A pesar de que se usan en forma comercial metales relativamente "puros" como el aluminio y el cobre, que contienen solamente cantidades pequeñas de impurezas, metales con purezas muy altas se dan muy pocas veces en la naturaleza e incluso en la industria son poco comunes. La preparación de metales tan puros requieren de un esfuerzo grande para eliminar las diminutas cantidades de elementos que se encuentran de ordinario como impurezas. Anteriormente se consideraba la mezcla de átomos de una especie elemental con otra como un defecto estructural. Sin embargo, la combinación de ciertos elementos en las proporciones apropiadas puede producir cambios benéficos en las propiedades mecánicas y físicas de muchos sistemas metálicos. El proceso de añadir especies elementales a un metal base se llama alear. El alear tiene efectos adicionales en el sistema básico, y uno de ellos es el de producir una mezcla de átomos de tal manera que una especie se disuelve en la otra, en otras palabras, se produce una solución sólida. De esta

forma en una aleación se refiere a los átomos de la especie huésped como el solvente y aquellos de la especie disuelta como el soluto.

Las soluciones sólidas se dividen en dos clases distintas, que difieren por la posición que asumen los átomos de soluto en la celda unitaria. Estas son:

a) Soluciones Sólidas Sustitucionales o Substitutivas y b) Soluciones Sólidas Intersticiales.

a) SOLUCIONES SÓLIDAS SUSTITUCIONALES

Se forma cuando los átomos de soluto sustituyen a algunos átomos del solvente en posiciones propias de la red cristalina formada por este último. La solubilidad del soluto en el solvente depende principalmente del tamaño comparativo de los átomos de ambos elementos, sin embargo, algunos otros factores deben tomarse en cuenta si se quiere asegurar una solubilidad de átomos de soluto en la estructura del metal solvente. Estos factores se resumen en las reglas de Hume-Rothery:

I.- Los dos elementos deben de solidificar en la misma estructura cristalina.

II.- La diferencia en los radios atómicos no debe ser mayor de 15%.

III.- La electronegatividad de ambos elementos debe ser semejante.

Debemos de tener en cuenta que la solubilidad generalmente aumenta conforme aumenta la temperatura y disminuye cuando disminuye la temperatura. Este hecho es responsable de que se presente la precipitación de una fase, dentro de una solución sólida o fases homogénea, resultando un efecto de endurecimiento en una aleación.

Las soluciones sólidas pueden ser primarias o secundarias. Las soluciones sólidas primarias se caracterizan por tener la estructura del elemento solvente, mientras que las soluciones sólidas secundarias se caracterizan por poseer una estructura cristalina diferente de la que poseen sus elementos componentes.

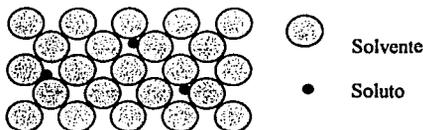
Otra característica que exhiben las soluciones sólidas es un punto de fusión incongruente, esto es, la fusión inicia a una temperatura significativamente más baja, que la temperatura a la cual la aleación es completamente líquida.

b) SOLUCIONES SÓLIDAS INTERSTICIALES

En este tipo de solución sólida, los átomos de soluto ocupan posiciones en los intersticios de la celda unitaria, como se ilustra en la figura 1-7. Esta ilustración destaca un detalle importante relacionado con las soluciones sólidas intersticiales; esto es, que el diámetro del átomo de soluto debe ser pequeño en comparación con el del átomo solvente. La solubilidad sólida intersticial extensa sólo se presenta cuando la relación entre el diámetro aparente del átomo de soluto y el del solvente es menor que 0.59. Algunas de las especies atómicas importantes que

forman soluciones sólidas intersticiales con facilidad son el carbono, el nitrógeno, el boro, el hidrógeno y el oxígeno. Mientras que el carbono, el nitrógeno y el boro desarrollan papeles benéficos importantes como elementos de aleación, el hidrógeno y el oxígeno pueden tener un efecto devastador en las propiedades mecánicas de muchas aleaciones. Las especies disueltas en los intersticios pueden ejercer una influencia en el elemento huésped que es desproporcionada con respecto a la concentración del soluto. Una razón de esto es que los átomos intersticiales, debido a su tamaño pequeño, se pueden difundir con mucha facilidad desde una posición intersticial a otra y no requiere de una concentración alta de vacancias para que haya difusión.

Un factor adicional en la formación de este tipo de soluciones sólidas es que los átomos pequeños se disuelven de forma intersticial con mucha mayor facilidad en los metales de transición que en otros metales. Si se recuerda la tabla periódica, los metales de transición incluyen el hierro, cromo, níquel, cobalto, titanio, vanadio, molibdeno y tungsteno. Un repaso de la estructura electrónica de estos elementos revela que tienen una configuración electrónica especial; una capa incompleta de electrones dentro de la capa exterior de valencia. Parece ser que esta condición contribuye a su habilidad para acomodar con tanta facilidad los átomos intersticiales del soluto.



Figural-7 Diagrama esquemático que ilustra las posiciones relativas del solvente y el soluto en una solución sólida intersticial.

1.3.2.- FORMACIÓN DE UNA SEGUNDA FASE

Debido a que en la mayoría de los sistemas de aleación existe una solubilidad limitada del soluto en el solvente en estado sólido, al solidificar totalmente una aleación, por lo general se presenta una segregación de los átomos de soluto, lo que trae como consecuencia la formación de una segunda fase que se caracteriza por:

a) Poseer la estructura cristalina del elemento de aleación o soluto, disolviendo un pequeño porcentaje de átomos del solvente, formando una solución sólida. Esto sucede principalmente para sistemas que muestran un diagrama de equilibrio sencillo.

b) Formación de soluciones secundarias para el caso de sistemas binarios de aleaciones que muestran un diagrama de equilibrio complejo.

c) Formación de un compuesto intermetálico. Se puede definir como un compuesto de dos o más elementos en una proporción estequiométrica, es decir, un diagrama de fases con una línea recta paralela al eje de las temperaturas.

1.3.3.- EL PROCESO DE DIFUSIÓN

La difusión se puede definir como el movimiento o transporte de átomos dentro de las estructura cristalina que forma el metal, como resultado de la existencia de un gradiente de concentración. Este movimiento de los átomos se lleva a cabo de una posición reticular a otra o de una posición intersticial a otra.

El movimiento de los átomos de un metal puro o de los átomos de solvente se conoce como difusión propia, mientras que la difusión de un metal como elemento de aleación en otro metal (base), se conoce como difusión sustitucional (si la solución que forman ambos elementos es de tipo sustitucional) o difusión intersticial (si la solución formada es de tipo intersticial).

El movimiento de los átomos dentro de un sólido metálico, en el caso de difusión propia y difusión sustitucional, depende de la existencia de sitios vacantes o vacancias, las cuales son un tipo de defecto que posee todo metal y que es dependiente de la temperatura; su dependencia es en forma exponencial, por lo que a mayor temperatura mayor difusión atómica, además de que a mayor temperatura mayor energía poseen los átomos, aumentando por lo tanto la frecuencia de salto de los mismos.

Cuantitativamente el fenómeno de la difusión puede evaluarse por medio de las dos leyes de Fick. La primera aplicable para aquellos fenómenos de difusión que pueden considerarse como independientes del tiempo, se expresa matemáticamente como:

$$J = -D(dc/dx)$$

Donde:

J= Flujo de átomos dado átomos /cm² seg
 D= Coeficiente de difusión cm²/seg
 C= concentración de átomos átomos /cm³

La ecuación indica que el gradiente de concentración dc/dx es directamente proporcional al flujo J, pero ocurriendo en dirección opuesta.

Con excepción de algunos casos especiales, la difusión no es un proceso de estado estacionario, ya que la concentración depende de la posición en el espacio y en esta posición depende además del tiempo, es decir, la concentración se puede expresar de la siguiente forma:

$$C = f(x, t)$$

Los fenómenos dependientes del tiempo son evaluados por una ecuación de la forma:

$$\partial C / \partial t = D \partial^2 C / \partial x^2$$

conocida como la segunda ley de Fick, cuya solución puede ser expresada en términos de una función de error y es de la forma:

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_0} = f_{ER} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$$

Donde:

C_s= concentración en la superficie del metal
 C₀= concentración original del metal
 C_x= concentración en el punto x
 t= tiempo en seg
 D= coeficiente de difusión

Es importante tener presente que el coeficiente de difusión, es una cantidad dependiente de la temperatura y esta dependencia es de tipo exponencial. El coeficiente de difusión se puede expresar en términos de una energía de activación para la difusión y esta expresado por la siguiente ecuación:

$$D = D_0 e^{(-Q_0/RT)}$$

Donde:

$D_0 =$ Cte. (cm²/seg)

$Q_0 =$ Energía de activación para la difusión (Cal / mol)

$R = 1.987$ (cal / mol- K)

$T =$ temperatura (K)

Las transformaciones alotrópicas del hierro y otros metales, la formación de constituyentes como la perlita y la formación de las distintas fases que aparecen en sistemas de aleaciones según los distintos diagramas de equilibrio, están asociados a fenómenos de transporte en estado sólido, que requieren del movimiento de los átomos a través de la estructura cristalina del sólido, es decir, requiere del fenómeno de la difusión para llevarse a cabo.

1.3.4.- TRANSFORMACIONES DE FASE EN ESTADO SÓLIDO. CRECIMIENTO CRISTALINO Y DENDRÍTICO.

La alotropía que presentan algunos materiales se da por un proceso de transformación de fases, que depende del movimiento de los átomos en el interior del material, es decir, las transformaciones de fase en un material sólido están gobernadas por la difusión de los átomos a través de la estructura cristalina que posee.

La solidificación es una de las transformaciones de fase más importantes en los materiales y un entendimiento apropiado de ella es esencial en el control de muchos procesos de fabricación. Los metales cristalizan al solidificar y la cristalización involucra la iniciación de una fase sólida, denominando esto como nucleación, y el subsecuente crecimiento de los núcleos los cuales constituyen los cristales o granos que formaran el sólido. En general, la solidificación de metales fundidos da como resultado la formación de un material policristalino. El tamaño y forma del grano, la orientación del grano y su homogeneidad química juegan un papel muy importante en la determinación de las propiedades finales del material.

Las soluciones sólidas de uno o más elementos en otro, en ocasiones tienden a producir en la solidificación una estructura especial, conocida como dendrítica, la cual se caracteriza por la formación de dendritas, que es una estructura lineal ramificada con brazos paralelos a direcciones cristalográficas específicas y ramas separadas a intervalos muy uniformes como se muestra en la figura 1-8.

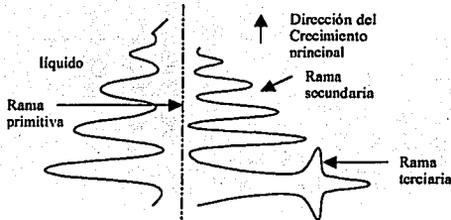


Figura 1-8

Si un metal cristaliza en una red cúbica, los núcleos tienen un cierto número de direcciones cristalográficas equivalentes, a lo largo de las cuales puede darse el crecimiento del cristal. Una cantidad considerable de calor latente se desprende en la dirección de crecimiento del cristal, ocasionando que la temperatura del líquido adyacente se eleve. Esta temperatura puede exceder a la temperatura de solidificación del metal, de manera que el crecimiento del cristal en esta dirección se parara. En una dirección perpendicular, la región del líquido tendrá una temperatura menor, debido a que ahí no ha habido una cristalización y consecuentemente no ha habido un desprendimiento de calor. Esto ocasiona que el cristal crezca en la nueva dirección, hasta que el calor se disipa de la región inicial de crecimiento, cuando la temperatura de esta región cae a un valor suficientemente bajo respecto al punto de solidificación, el cristal asumirá su dirección original de crecimiento, hasta alcanzar un punto tal donde otra vez la temperatura se elevara y el crecimiento del cristal se detendrá. Entonces otra vez el crecimiento del cristal se llevara a cabo en una dirección perpendicular a la dirección original de crecimiento.

Esta secuencia de procesos nos lleva finalmente a la estructura característica de las dendritas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

I.4.- DIAGRAMAS DE EQUILIBRIO BINARIOS

Cabe mencionar que los sistemas de aleaciones se clasifican de acuerdo con la cantidad de componentes o elementos que constituyen el sistema. Por ejemplo, dos componentes forman un sistema binario; tres componentes un sistema ternario; cuatro componentes uno cuaternario y así sucesivamente.

Una de las fuentes de información más importantes respecto al comportamiento y procesos de los materiales, son los diagramas de equilibrio o diagramas de fase, estos nos proporcionan un conocimiento de la composición y estabilidad de las fases, como una función de la temperatura, presión y la composición general de la aleación.

También, nos permite estudiar y controlar procesos importantes como: separación de fase (fase, se llama a una porción de un sistema de aleación físicamente diferenciada y homogénea; uniforme en su composición química), solidificación de metales, purificación de materiales, crecimiento de monocristales para aplicaciones tecnológicas, y cambios estructurales producidos por tratamientos térmicos, fundición y operaciones relacionadas. Aunque los diagramas de fase proporcionan información a cerca del sistema en equilibrio, también pueden utilizarse para predecir relaciones de fase, cambios en la composición y estructuras que se presentan en un sistema que no está en equilibrio.

El equilibrio químico se define como aquella condición en donde la energía potencial de un átomo o molécula dados es la misma en cada parte del sistema en estudio.

I.4.1.- CURVAS DE ENFRIAMIENTO PARA METALES PUROS Y PARA ALEACIONES

Los diagramas de fase generalmente se construyen a partir de datos que se obtienen de curvas de enfriamiento. Estas curvas se obtienen graficando datos de temperatura contra tiempo, durante el periodo de enfriamiento desde el metal fundido hasta temperatura ambiente, la figura 1-9 muestra 3 tipos de curvas de enfriamiento, para un metal puro, una aleación formando una solución sólida y una aleación binaria con un punto eutéctico.

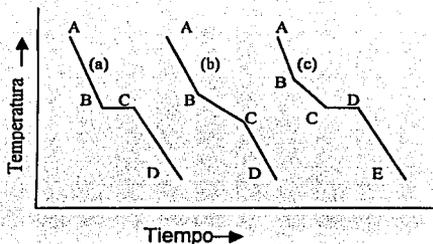


Figura 1-9 Curvas de enfriamiento, (a) metal puro, (b) solución sólida binaria, (c) sistema eutéctico binario

En la curva (a), correspondiente a un metal puro fundido, el enfriamiento procede uniformemente a lo largo de AB con una velocidad constante hasta llegar al punto B; aquí los primeros cristales empiezan a formarse. Conforme la solidificación continúa, se libera calor latente de fusión en tal cantidad que la temperatura permanece constante desde B a C, hasta que la masa total ha solidificado completamente. El periodo BC se conoce como una "parada térmica horizontal". El enfriamiento posterior a partir de C causa que la temperatura caiga a lo largo de CD.

La curva (b) muestra el enfriamiento de un sistema binario consistiendo de dos metales formando una solución sólida. La sección AB de la curva es semejante en carácter a la curva (a), pero durante el periodo de solidificación, sección BC, la temperatura no permanece constante, si no que cae a lo largo de BC hasta que la masa total ha solidificado completamente. La pendiente de la recta cambia debido a la evolución del calor latente de cristalización. A partir del punto C, donde habrá una sola fase sólida, la temperatura disminuye de acuerdo a CD con una pendiente distinta a AB y BC. Los rangos requeridos para la fusión o solidificación de la aleación se deben a cambios en la composición del sólido y el líquido.

La curva (c) muestra el enfriamiento de un sistema binario cuyas dos componentes son completamente solubles en el estado líquido pero enteramente insolubles en el estado sólido. El líquido se enfría según AB hasta que la temperatura B se alcanza, en este punto uno de los componentes, el que está en exceso solidifica (se nuclea) ocasionando un cambio en la pendiente de la curva de enfriamiento que será ahora BC. En el punto C el líquido ha llegado a una composición tal a la cual dos componentes solidifican (nuclean) simultáneamente, permaneciendo constante la temperatura hasta que se completa la solidificación. Esto es conocido como la reacción eutéctica. A partir de D el sólido, compuesto

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

por dos fases sólidas, se enfría según DE con una pendiente distinta a las curvas anteriores.

Un diagrama de equilibrio de fases se puede construir a partir de una serie de curvas de enfriamiento, obtenidas para diferentes composiciones del sistema de aleación. Los puntos extremos del diagrama corresponderán a los elementos que forman el sistema de aleación considerados como elementos puros.

La figura 1-10a muestra las curvas de enfriamiento para algunas aleaciones Cu-Ni y para el Cu y Ni puros. Las temperaturas correspondientes a los puntos superiores sobre las curvas de enfriamiento (B, B1, B2,...), cuando se grafican con la composición correspondiente nos dan la curva superior de la figura 1-10b, llamada "línea de líquidus". Una grafica de las temperaturas correspondientes a los puntos inferiores sobre las curvas de enfriamiento (C,C1,C2,C3,...) contra la composición correspondiente nos da la curva inferior de la figura (a), llamada "línea de sólidos".

La línea de sólidos representa el punto de inicio de la fusión de las diferentes soluciones sólidas, mientras que la línea de líquidos representa el punto de inicio de la solidificación de las diferentes aleaciones. Los puntos B y B4 corresponden a los puntos de fusión o solidificación de los metales puros. La región entre las líneas de sólidos y líquidus es una región de dos fases: líquido y sólido.

Por arriba de la línea de líquidus existe una fase líquida y por debajo de la línea sólidos se tiene el material totalmente sólido, en este caso compuesto por una sola fase sólida (fase α).

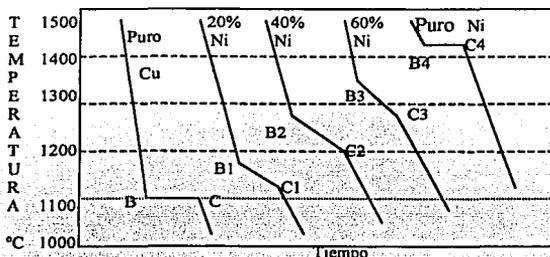
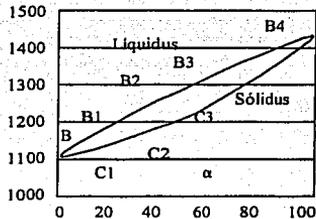


Figura 1-10 (a) Curvas de enfriamiento para Cu y Ni puros y aleaciones Cu + Ni

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



(b)

(b) Diagrama de equilibrio Cu-Ni

I.4.2.- LA SOLUBILIDAD EN EL ESTADO SÓLIDO Y SU EFECTO EN LA FORMACIÓN DE DIAGRAMAS DE FASE BINARIOS.

Tipo I.

Cada aleación en el sistema examinado del tipo I, tiene un punto de fusión entre los puntos de fusión de A y B. Es posible tener un sistema en que las líneas líquidas y sólidas vayan a través de un mínimo o de un máximo (figura 1-11a y 1-11b). La composición de la aleación x en la figura 1-11a se comporta exactamente como un metal puro. No hay diferencia en la composición líquida y sólida. La solidificación comienza y termina a una temperatura constante sin cambio en la composición, y su curva de enfriamiento mostrará una línea horizontal. Tales aleaciones se conocen como aleaciones de fusión congruente.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

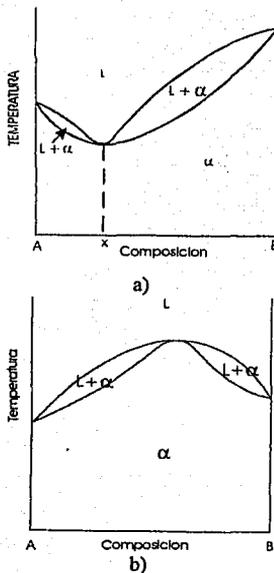


Figura 1-11a Sistema de solución sólida que muestra un mínimo. Figura 1-11b Sistema de solución sólida que muestra un máximo.

En éste Tipo I, los dos metales son completamente solubles en los estados líquido y sólido, y como los dos metales son completamente solubles en el estado sólido, el único tipo de fase sólida formada será una solución sólida sustitucional. Los dos metales tendrán generalmente el mismo tipo de estructura cristalina y deferirán en sus radios atómicos..

El resultado de correr una serie de curvas de enfriamiento para varias combinaciones o aleaciones entre los metales A y B, variando en composición del 100% de A y 0% de B hasta 0% de A y 100% de B, se muestra en la figura 1-12.

A fin de ver la relación que existe entre las curvas de enfriamiento, se han graficado en un solo conjunto de ejes; no obstante, es importante darse cuenta de que cada curva de enfriamiento tiene sus propias coordenadas. Las curvas de enfriamiento para los metales puros A y B muestran sólo una línea horizontal, porque el inicio y el fin de la solidificación tienen lugar a una temperatura

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

constante; sin embargo, como las composiciones intermedias forman una solución sólida, estas curvas de enfriamiento muestran dos cambios en la pendiente. Para una aleación que contiene 80 de A y 20 de B, el primer cambio ocurre a la temperatura T_1 , lo cual indica el principio de la solidificación, y el cambio inferior a una temperatura T_2 muestra el final de la solidificación. Todas las composiciones de aleaciones intermedias mostrarán un tipo de curva de enfriamiento semejante.

La forma del diagrama de fase, puede obtenerse al dibujar una línea que vincule todos los puntos que muestran el principio de la solidificación (la línea de puntos superior de la figura 1-12) y otra línea que una todos los puntos que muestran el final de la solidificación (la línea punteada inferior de la figura 1-12).

A partir de esto, es posible determinar el diagrama de fases real como una gráfica de temperatura contra composición. Los puntos apropiados se toman de la serie de curvas de enfriamiento y se grafican en el nuevo diagrama; por ejemplo, en la figura 1-13 como el eje izquierdo representa al metal puro A, T_A se grafica a lo largo de esta línea. De manera análoga se grafica T_B . Como todas las composiciones intermedias son porcentajes de A y B, por simplicidad se omite el símbolo % .

Se dibuja una línea vertical que representa la aleación 80A-20B, y T_1 y T_2 , de la figura 1-12 se grafican a lo largo de esta línea. El mismo procedimiento se emplea para otras composiciones.

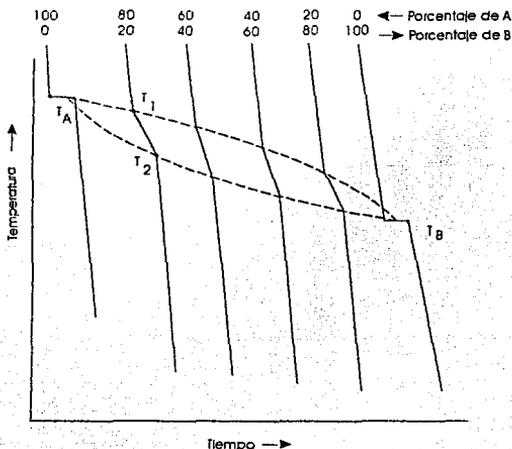


Figura 1-12 Serie de curvas de enfriamiento para diferentes aleaciones en un sistema completamente soluble. Las líneas punteadas indican la forma del diagrama de fase.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El diagrama de fases consta de dos puntos, dos líneas y tres áreas. Los puntos T_A y T_B representan los puntos de solidificación de los dos metales puros. La línea superior, obtenida al unir los puntos que muestran el inicio de la solidificación, se llama línea de líquidus, en tanto que la línea inferior, determinada al unir los puntos que muestran el final de la solidificación, se llama línea de sólídus. El área por arriba de la línea líquidus es una región unifásica y cualquier aleación en esta región consistirá en una solución líquida homogénea. Así mismo, el área por debajo de la línea sólídus es una región unifásica y cualquier aleación en esta región constará de una solución sólida homogénea. Al marcar diagramas de equilibrio, es una práctica común representar las soluciones sólidas y las aleaciones intermedias con letras griegas. En este caso, la solución sólida se marca con la letra α (alfa). Las letras mayúsculas, como A y B, se usarán para representar los metales puros. Entre las líneas líquidus y sólídus existe una región bifásica. Cualquier aleación en esta región constará de una mezcla de una solución líquida y de una sólida.

Especificar a la temperatura y a la composición de una aleación en un área de dos fases indica que la aleación consta de una mezcla de dos fases, pero no da ninguna información referente a esta mezcla.

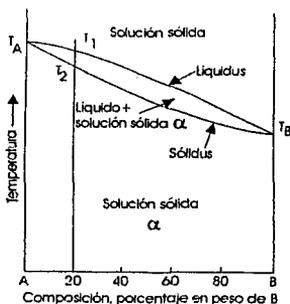


Figura 1-13 Diagrama de fase real respecto con la figura 1-12

Algunas veces es deseable conocer la composición química real y las cantidades relativas de las dos fases presentes. Para determinar esta información, es necesario aplicar dos reglas:

Regla I: Composición química de las fases, para determinar la composición química real de las fases de una aleación en equilibrio a cualquier temperatura específica en una región bifásica, se debe trazar una línea horizontal para la temperatura, llamada línea vínculo, a las fronteras del campo. Estos puntos de intersección se abaten a la línea base y la composición se lee directamente.

En la figura 1-14, considérese una aleación constituida por 80A-20B a la temperatura T. La aleación está en una región de dos fases. Aplicando la regla I, se debe dibujar la línea vínculo *mo* a las fronteras del campo. El punto *m*, la intersección de la línea vínculo con la línea sólidos, cuando se abate a la línea base, da la composición de la fase que existe en esa frontera. En este caso, la fase es una solución sólida de composición 90A-10B. Así mismo, el punto *o*, cuando se abate a la línea base, dará la composición de la otra fase que constituye la mezcla; en este caso, la composición de la solución líquida es 74A-26B.

Regla II: Cantidades relativas de cada fase Para determinar las cantidades relativas de las dos fases en equilibrio, a cualquier temperatura específica en una región bifásica, se debe trazar una línea vertical que representa la aleación y una línea horizontal (como la temperatura) , a los límites del campo. La línea vertical dividirá a la horizontal en dos partes cuyas longitudes son inversamente proporcionales a la cantidad de las fases presentes. Ésta también se conoce como regla de la palanca inversa. El punto donde la línea vertical interseca a la horizontal se considerará como el fulcro, o eje de oscilación de un sistema de palanca. Las longitudes relativas de los brazos de palanca multiplicadas por las cantidades de las fases presentes deben balancearse.

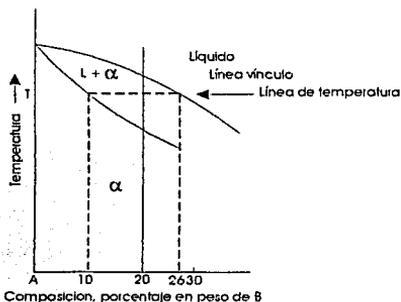


Figura 1-14 Diagrama que muestra la línea vínculo *mo*, trazada en la región de dos fases a la temperatura T.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En la figura 1-14, la línea vertical, que representa la aleación 20B, divide la línea de vinculación horizontal en dos partes: mn y no . Si se toma toda la longitud de la línea de vinculación mo para representar al 100%, (el peso total de las dos fases presentes a temperatura T), la regla de la palanca puede expresarse matemáticamente como:

$$\begin{aligned} \text{Líquido (porcentaje)} &= (mn / mo) \times 100 \\ \alpha \text{ (porcentaje)} &= (no / mo) \times 100 \end{aligned}$$

Si la línea vínculo se elimina del diagrama de fases y se insertan los valores numéricos, ésta aparecerá como se muestra en la figura 1-15. Al aplicar las ecuaciones mencionadas en el párrafo anterior, se tiene:

$$\begin{aligned} \text{Líquido (porcentaje)} &= (10/16) \times 100 = 62.5\% \\ \alpha \text{ (porcentaje)} &= (6/16) \times 100 = 37.5\% \\ \text{Líquido (porcentaje)} &= \alpha_2 T_2 / \alpha_2 L_2 \times 100 = 20/35 \times 100 = 57\% \\ \alpha \text{ (porcentaje)} &= T_2 L_2 / \alpha_2 L_2 \times 100 = 15 / 35 \times 100 = 43\% \end{aligned}$$

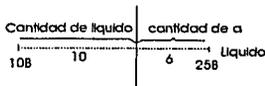
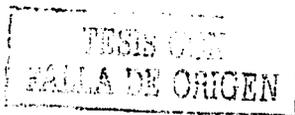


Figura 1-15 de vinculación mo de la figura 1-14 que muestra la aplicación de la regla de la palanca.

Para resumir ambas reglas, la aleación de composición 80A-20B a la temperatura T consta de una mezcla de dos fases. Una es una solución líquida de composición 74A-26B que constituye el 62.5% de todo el material presente y la otra una solución sólida de composición 90A-10B que comprende el 37.5% de todo el material presente.

Enfriamiento en equilibrio de una aleación de solución sólida.

El enfriamiento muy lento, bajo condiciones de equilibrio, de cierta aleación 70A-30B se estudiará ahora para observar los cambios de fase que ocurren (figura 1-16). Esta aleación a temperatura T_0 es una solución homogénea de una sola fase líquida (figura 1-16) y permanece así hasta que se alcanza la temperatura T_1 . Como T_1 está en la línea líquidus, la solidificación se inicia ahí. El primer núcleo de solución sólida que se formará, α_1 será muy rico en el metal de mayor punto de fusión A y estará constituido por 95A-5B (regla I). Como la solución sólida en formación toma material muy rico en A del líquido, este último deberá ser más rico



en B. Precisamente después de iniciarse la solidificación, la composición del líquido es de alrededor de 69A-31B (figura 1-16b). Cuando se alcanza la temperatura menor T_2 , la composición líquida está en L_2 . La única solución sólida en equilibrio con L_2 y por tanto la única solución sólida que se forma en T_2 es α_2 . Aplicando la regla I, α_2 está constituida por 10B; en consecuencia, conforme la temperatura disminuye, no sólo hace que la composición del líquido sea más rica en B, sino también la solución sólida. En T_2 los cristales de α_2 se forman rodeando los centros de composición α_1 y también separan las dendritas de α_2 (figura 1-17). Para que se establezca el equilibrio en T_2 la fase sólida entera deberá estar a una composición α_2 . Esto requiere difundir los átomos de B al centro rico en A no sólo del sólido apenas formado, sino también del líquido. Esto es posible sólo si el enfriamiento es extremadamente lento, de modo que la difusión pueda ir al mismo ritmo que el crecimiento cristalino (figura 1-16c). En T_2 las cantidades relativas del líquido y de la solución sólida pueden determinarse mediante la regla II: conforme la temperatura disminuye, la solución sólida continúa su crecimiento a expensas del líquido. La composición de la solución sólida sigue la línea sólidos, en tanto que la composición del líquido sigue la línea líquidus, haciéndose ambas fases más ricas en B. En T_3 (figura 1-16d), la solución sólida formará aproximadamente las tres cuartas partes de todo el material presente.

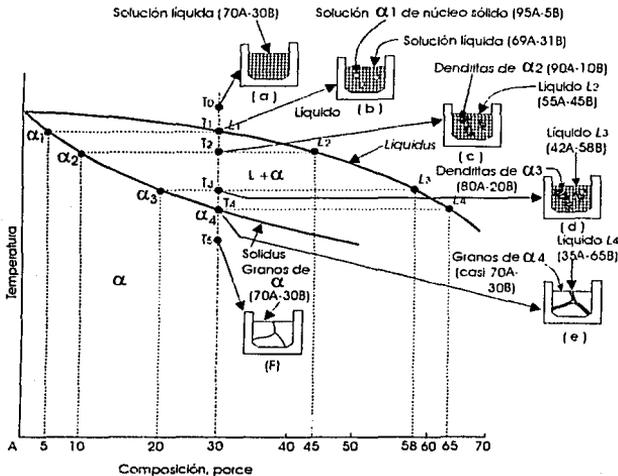


Figura 1-16 Enfriamiento lento de una aleación 70A- 30B, que muestra la microestructura en varios puntos durante la solidificación, y figuras 1-16a,b,c,d,e,f.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Finalmente, la línea sólidos se alcanza en T_4 y lo último del líquido L_4 muy rico en B, solidifica sobre todo en los límites de grano (figura. 1-16e); no obstante, la difusión tendrá lugar y toda la solución sólida adquiere una composición uniforme que es la composición general de la aleación (figura 1-16f).

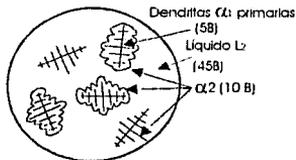


Figura 1-17 esquema de la aleación 30B a la temperatura T_2 antes de la difusión.
Tipo II

Dos metales completamente solubles en el estado líquido y completamente insolubles en el estado sólido.

Desde el punto de vista técnico, dos metales no pueden ser completamente insolubles entre sí; sin embargo, en algunos casos, la solubilidad es tan restringida que para propósitos prácticos podrían considerarse como insolubles. La ley de Raoult establece que el punto de solidificación o fusión de una sustancia pura lo abate la adición de una segunda sustancia, con tal que esta última sea soluble en la sustancia pura. La cantidad de abatimiento del punto de solidificación es proporcional al peso molecular del soluto.

Este tipo de diagrama de fases puede diseñarse a partir de una serie de curvas de enfriamiento de manera análoga, pero en este caso, las curvas experimentales muestran diferente tipo de comportamiento. La serie de curvas de enfriamiento para los metales puros y varias aleaciones, además de las microestructuras a temperatura ambiente se muestran en la figura 1-18.

Las curvas de enfriamiento para los metales puros A y B muestran una línea horizontal única en sus puntos de solidificación, como cabía esperar. A medida que se agrega B a A, la temperatura para el comienzo de la solidificación disminuye. A medida que se agrega A a B, la temperatura para el comienzo de la solidificación para aquellas aleaciones también disminuye. Por tanto, como cada metal disminuye el punto de solidificación del otro, la línea que une los puntos que indican el comienzo de la solidificación (la línea líquidus) debe mostrar un mínimo. Esto lo señala la línea punteada superior en la figura 1-18, que muestra un mínimo en el punto E, conocido como *punto eutéctico*, para una composición 40A-60B. Nótese que sobre un amplio intervalo de composiciones, una porción de la curva de enfriamiento que muestra el final de la solidificación se presenta a una temperatura fija. Esta línea horizontal más baja en T_E , mostrada con puntos en la figura 1-18, se conoce como temperatura eutéctica.

En una aleación, la composición eutéctica 40A-60B, ocurre la solidificación completa a una sola temperatura: la eutéctica. Aun cuando la solidificación de la composición eutéctica se parece a la de un metal puro, no es una aleación de fusión congruente, ya que más adelante se verá que el sólido que resulta está constituido por dos fases.

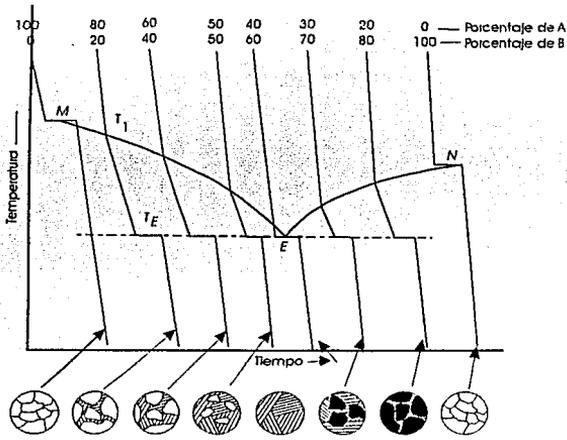


Figura. 1-18 Curvas de enfriamiento y microestructuras a temperatura ambiente para una serie de aleaciones de dos metales insolubles en el estado sólido. La línea punteada superior indica la forma de la línea líquida y la línea punteada inferior muestra la forma de la línea sólida.

El diagrama de fase real puede ahora construirse si se transfieren los quiebres sobre las curvas de enfriamiento a una gráfica de temperatura contra composición, como se muestra en la figura 1-19. Los puntos de fusión de los dos metales puros, M y N, se dibujan sobre las líneas verticales que representan los metales puros. Para una aleación con 80A-20B, el comienzo de la solidificación T_1 y la terminación de la solidificación T_E se grafican como se muestra. El mismo procedimiento se sigue para las aleaciones restantes. La línea superior sobre el diagrama de fase que une los dos puntos de fusión, MEN, es la líquida e indica el comienzo de la solidificación. El punto en que las líneas líquidas se intersectan, el mínimo E, se conoce como punto eutéctico. T_E se llama temperatura eutéctica, en tanto que 40A-60B es la composición eutéctica. La línea sólida es siempre una

línea continua que une los puntos de fusión de los metales puros, de modo que la línea sólídus completa es MFGN .

Este diagrama de fase está formado por cuatro áreas. El área arriba de la línea líquidus es una solución líquida homogénea de una sola fase, ya que los dos metales son solubles en el estado líquido. Las áreas restantes son de dos fases. Cada área de dos fases sobre un diagrama de fase debe estar limitada a lo largo de una línea horizontal por fases simples. Si las áreas de una sola fase se marcan primero, las áreas de dos fases podrán determinarse fácilmente; por ejemplo, en la figura 1-19, para determinar las fases que existen en el área de dos fases M FE, se traza una línea de unión horizontal OL, la cual interseca la líquidus en L, lo que significa que el líquido es una de las fases que existen en el área de dos fases e interseca al eje izquierdo en el punto O. El eje izquierdo representa una sola fase, el metal puro A, el cual es sólido por debajo de su punto de fusión. Por tanto, las dos fases que existen en el área M FE son líquido y sólido A. El mismo razonamiento se aplica para determinar las dos fases que existen en el área NEG, mismas que son líquido y sólido B.

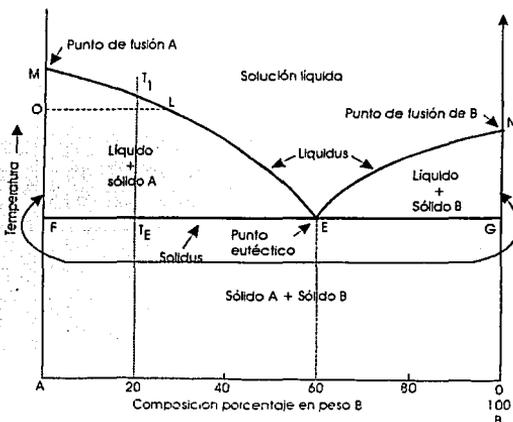


Figura 1-19 Diagrama de fase tipo eutéctico.

Como se supone que los dos metales son completamente insolubles en el estado sólido, debe ser obvio que, cuando la solidificación empieza, el único sólido que se puede formar es un metal puro. También, cuando cada aleación está completamente solidificada, debe ser una mezcla de los dos metales puros. Es práctica común considerar las aleaciones a la izquierda de la composición eutéctica como hipoeutécticas y aquellas que están a la derecha se consideran

como hipereutécticas. La forma en que la solidificación tiene lugar es de interés y se estudiará ahora siguiendo el enfriamiento lento de varias aleaciones.

La aleación 1, figura 1-20 es la composición eutéctica 40A-60B. A medida que se enfría desde la temperatura T_0 , permanece una solución líquida uniforme hasta el punto E, la línea de temperatura eutéctica. Como ésta es la intersección de las líneas líquidas y sólidas, el líquido debe ahora empezar a solidificarse y la temperatura no podrá descender hasta que la aleación esté completamente sólida. El líquido se solidificará en una mezcla de dos fases, las cuales siempre son las que aparecen en cualquier extremo de la línea horizontal de la temperatura eutéctica; horizontal, en este caso el punto F, que es el metal puro A, y el punto G, que es el metal puro B. Supóngase que una pequeña cantidad de un metal puro A se solidifica. Esto deja el líquido restante más rico en B; la composición del líquido se ha desplazado ligeramente a la derecha. Para restaurar la composición del líquido, a su valor de equilibrio, B se solidificará. Si B se solidifica más de lo normal, la composición del líquido se habrá desplazado a la izquierda, requiriendo que A se solidifique para restablecer el equilibrio. Por tanto, a temperatura constante, el líquido solidifica alternativamente A y B puros, resultando una mezcla muy fina, generalmente visible sólo bajo el microscopio. Esta se conoce como mezcla eutéctica. El cambio de este líquido de composición E en dos sólidos a temperatura constante se conoce como reacción eutéctica.

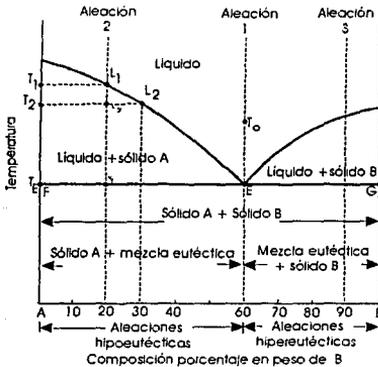


Figura 1-20 Diagrama de fases tipo eutéctico

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tipo III

El tercer tipo de diagramas de fases consiste de componentes que son solubles en su totalidad en el estado líquido, pero que en el estado sólido sólo son solubles parcialmente, a este tipo de solubilidad se le conoce como, solubilidad parcial sólida. Muchas aleaciones comerciales exhiben este tipo de comportamiento de solubilidad.

El sistema de aleación binaria hipotética de los componentes A y B como se ilustra en la figura 1-21

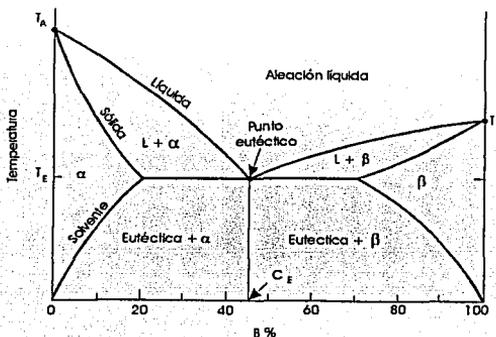


Figura 1-21 Diagrama de fases de un sistema binario hipotético que exhibe solubilidad parcial sólida.

Este diagrama presenta una diferencia notable con respecto a los diagramas de fase tipo I y tipo II, Vale la pena enfatizar tres regiones que componen el estado sólido de este tipo de aleación:

- 1.- Solución sólida alfa α ; átomo de B (soluto) dispersos en A (solvente).
- 2.- Solución sólida beta β ; átomo de A (soluto) dispersos en B (solvente).
- 3.- Eutéctica: mezcla de α y β ; la composición eutéctica de este sistema es 45% B-55% A.

La diferencia esencial en este tipo de sistema de aleación es la solución sólida que se forma a cada lado de la región eutéctica ($20 \leq \% B \leq 70$). Las características de solubilidad parcial de estos componentes en el estado sólido producen regiones limitadas por las líneas sólidas y solventes. La solvente indica la

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

solubilidad máxima de los componentes en sus soluciones sólidas respectivas (α y β).

En la región eutéctica, el sólido que se forma consiste de una de las soluciones sólidas (α o β) más la mezcla eutéctica. Recuerde: la propia eutéctica consiste de una solución sólida α más una solución sólida β . Se puede diferenciar entre las fases en el estado sólido refiriéndose a la α o β que se forman antes de la reacción eutéctica (T_E) como a la α o β proeutéctica (a veces llamada α o β libres). Esto sólo significa que la solución sólida que se forma por encima de la temperatura eutéctica no se asocia íntimamente con la mezcla eutéctica. En este caso aparece como un constituyente separado en la microestructura. En forma correspondiente, se refiere a la α y a la β en la eutéctica como α eutéctica y β eutéctica. La visualización de estos conceptos se muestran en la figura 1-22.

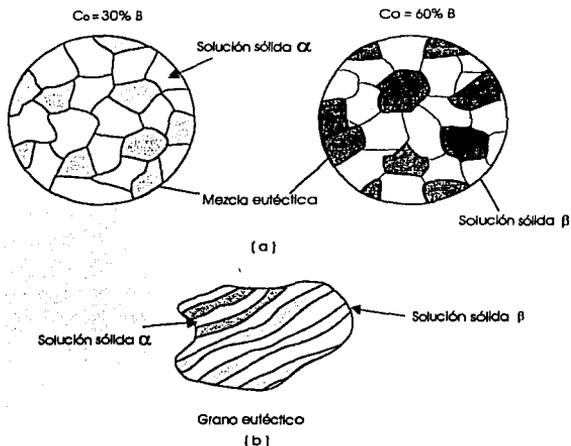


Figura 1-22 (a) ilustración esquemática de microestructuras que contienen constituyentes eutécticos; (b) constituyentes eutécticos compuestos de las fases α y β

Esta representación esquemática muestra dos arreglos microestructurales en el estado sólido: uno para composición nominal de 30% B y el otro para 60% B. En la figura anterior (a), los granos equiaxiales claros consisten de α proeutéctica. Los granos eutécticos se muestran como bandas alternadas de fases claras y oscuras. La estructura de la aleación 60% B consiste de granos equiaxiales,

sombreados ligeramente, compuestos de solución sólida β aunque no se modifica la apariencia de la mezcla eutéctica. Por supuesto, esta representación de la eutéctica es mucho muy esquemática, pero permite ilustrar la naturaleza de la composición de este constituyente. En la figura 1-22(b) se muestra una vista más cercana de esta característica.

Como recordatorio, el grano eutéctico que se ilustra en la figura 1-22(b) está formado por una "mezcla mecánica" de las soluciones sólidas α y β . Se conoce a este constituyente como una mezcla mecánica debido a las fronteras tan definidas entre las fases alternantes. Un constituyente estructural se define como una asociación reconocible de fases. La eutéctica cumple con esta definición, a pesar de que su morfología no tiene que ser laminar por necesidad. Por ejemplo, considere las formaciones eutécticas posibles que se ilustran en la figura 1-23,

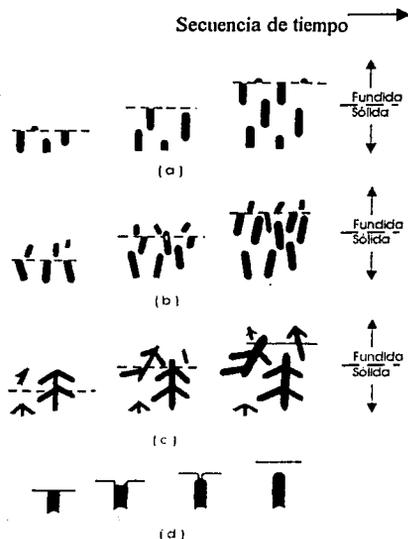


Figura 1-23 Ejemplos ilustrativos de varias morfologías eutécticas: (a) eutéctica laminar; (b) eutéctica no laminar; (c) eutéctica dendrítica; (d) cierre de la palanca discontinua.

Las eutécticas con frecuencia tienen propiedades físicas y mecánicas muy diferentes a las de las fases individuales que las forman. Por lo común, la morfología de la forma eutéctica influye a estas propiedades y en ciertos casos se pueden controlar con varias técnicas de solidificación. Por ejemplo, se utilizan eutécticas solidificadas direccionalmente en varias aplicaciones que requieren de resistencia en una orientación preferida. Los cubos y las láminas de las turbinas de gas para aviación son componentes para los que se puede desarrollar en especial una "fibra" longitudinal de refuerzo, por medio del alineamiento uniaxial de la estructura eutéctica durante la solidificación.

1.4.3.- PRINCIPALES REACCIONES EN DIAGRAMAS DE FASE

REGLAS DE FASE

También conocida como, Regla de Fases de Gibbs, relaciona el número de componentes y el número de grados de libertad en un sistema de equilibrio, por medio de la fórmula:

$$F = C - P + 2$$

Donde:

F = Al número de grados de libertad o el número de variables independientes.

C = Número de componentes en un sistema en equilibrio.

P = Número de fases.

El dígito 2 permanecerá para las variables: presión y temperatura.

El número de grados de libertad de un sistema, es el número de variables que se pueden cambiar, en otras palabras, es el número de variables necesarias para especificar totalmente un sistema.

C es el número de constituyentes químicos que describen la composición de cada una de las fases presentes.

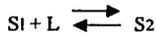
Dentro de cualquier diagrama de equilibrio se tienen puntos en los cuales, de acuerdo a la regla de fases de Gibbs, coexisten tres fases.

Tres son las principales reacciones que aparecen en los diagramas de equilibrio:

- a) Reacción Peritética
- b) Reacción Eutéctica
- c) Reacción Eutectoide

Una reacción queda caracterizada por las fases involucradas, por la composición de la aleación y por la temperatura a la que se lleva a cabo.

- a) Reacción Peritética.- Involucra la transformación de dos fases (líquido y sólido), en un sólido cuando es en enfriamiento. Cuando es en calentamiento será lo recíproco. La reacción se puede escribir como:



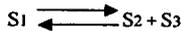
Con $S_1 \neq S_2$

- b) Reacción Eutéctica.- Involucra la transformación de la fase líquida en dos fases sólidas, cuando es en enfriamiento. Cuando es en calentamiento será lo contrario. La reacción se puede escribir como:



Con $S_1 \neq S_2$

- c) Reacción Eutectoide.- Involucra la transformación de una fase sólida en otras dos fases sólidas, cuando es en enfriamiento. Cuando es en calentamiento dos fases sólidas se transforman en una sola fase distinta de las anteriores. La reacción puede ser escrita como:



Con: $S_1 \neq S_2 \neq S_3$

II.- EL ALUMINIO Y SUS PROPIEDADES

II.1.- HISTORIA DEL ALUMINIO

El aluminio es el metal de uso común, más recientemente descubierto. Este metal sólo existe en la naturaleza en combinación con otros elementos formando silicatos y óxidos. Como éstos son muy estables, tomó varias décadas para desarrollar métodos para obtener el aluminio en un estado razonablemente puro.

Las primeras civilizaciones utilizaban adobes ricos en aluminio para crear cerámica y sales de aluminio para hacer medicinas y colorantes.

En 1808, Sir Humphrey Davy de Gran Bretaña, estableció la existencia del aluminio y le dio su nombre. En 1821, el francés P. Berthier, descubrió al sur de Francia, cerca de la villa de Les Beaux, un material duro, rojizo y parecido a la arcilla que contenía 52% de óxido de aluminio, él lo llamó bauxita, el más común de los minerales de aluminio. El elemento no fue aislado como tal hasta 1825, el danés Hans Christian Oersted redujo cloruro de aluminio con una amalgama de potasio, posteriormente otros químicos realizaron diferentes experimentos para estudiar las propiedades del metal; destaca Friedrich Wohler, alemán que en 1827 descubrió el proceso para producir aluminio como polvo haciendo reaccionar al potasio con clorato de aluminio anhídrico. Este científico estableció la densidad específica del aluminio y su ligereza.

En 1854, el francés Henri Saint-Claire de Ville mejoró el método de Wohler para crear el primer proceso comercial. En 1885, Hamilton Y. Cassner (USA) mejoró el proceso de de Ville con una producción anual de 15 toneladas.

Al año siguiente, dos científicos jóvenes y desconocidos, Paul Louis Toussaint Héroult (francés) y Charles Martin Hall (USA) trabajando de manera separada y sin conocer uno el trabajo del otro, inventaron simultáneamente un nuevo proceso electrolítico, que es la base para la producción actual del aluminio: el proceso Hall-Héroult. Ellos descubrieron que si disolvían óxido de aluminio (alúmina) en un baño de criolita fundida y pasaban una fuerte corriente eléctrica a través de ésta, el metal fundido se deposita en el fondo del recipiente y se obtiene el metal en bruto (aluminio). El proceso Hall-Héroult sigue siendo el método principal para la producción comercial de aluminio, aunque se están estudiando nuevos métodos. La pureza del producto se ha incrementado hasta un 99.5% de aluminio puro en un lingote comercialmente puro; más tarde puede ser refinado hasta un 99.99 %.

II.1.1.- PRODUCCIÓN DEL ALUMINIO.

El aluminio sólo se ha producido comercialmente durante 144 años, esto indica que es un metal muy joven. El hombre ha usado bronce, plomo y estaño por miles de años; a pesar de esto, el aluminio los ha ido reemplazando poco a poco.

Algunos otros datos:

1888, se fundan las primeras compañías de aluminio en Francia, Suiza y Estados Unidos.

1889, Freidrick Bayer (Austria), hijo del fundador de la compañía química Bayer, inventó el proceso Bayer para la producción a gran escala, de alumina a partir de la bauxita.

1900, se producen anualmente 8,000 toneladas de aluminio.

1913, se producen anualmente 65,000 toneladas de aluminio.

1920, se producen anualmente 128,000 toneladas de aluminio.

1938, se producen anualmente 537,000 toneladas de aluminio.

1946, se producen anualmente 681,000 toneladas de aluminio.

1997, se producen anualmente 29,000,000 toneladas de aluminio.

1998, se producen anualmente 35,000,000 toneladas de aluminio

1999, se producen anualmente 37,000,000 toneladas de aluminio

2000, se producen anualmente 43,000,000 toneladas de aluminio

2001, se producen anualmente 47,000,000 toneladas de aluminio

2002, se estima una producción anual de 50,000,000 toneladas de aluminio

II.1.1.1.- PRODUCCIÓN ANUAL DEL ALUMINIO

La industria mundial produce alrededor de 22 millones de toneladas de aluminio primario al año. La mayoría de este metal proviene, aproximadamente, de 120 fundidoras de aluminio primario localizadas en todo el mundo (Fig. 1), que reportan sus cifras al IPAI (International Production Aluminium) y se incluyen en el sistema estadístico del mismo. Estas fundidoras son las responsables del 90% de la producción de aluminio primario; pero excluyen a China, quien planea producir 2.7 millones de toneladas para el año 2000, arriba de su producción actual de 2 millones de toneladas. Hay arriba de 100 fundidoras en China aunque la mayoría son pequeñas.

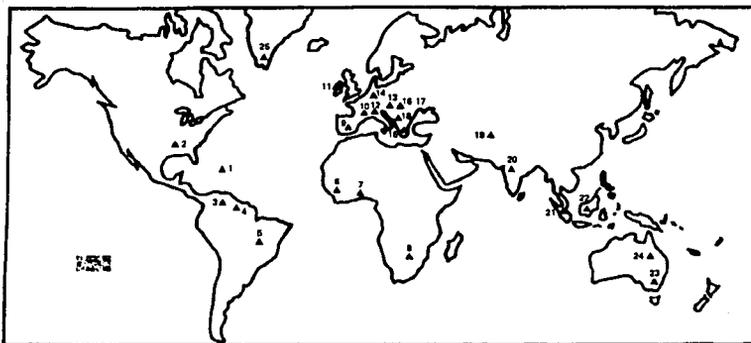


Fig. 1. Distribución mundial de las áreas de explotación minera de las menas de aluminio, principalmente para la bauxita: 1. Jamaica, 2. EEUU (Alabama, Arkansas, Georgia,). 3. Guyana, 4. Surinam, 5. Brasil, 6. Guinea, 7. Ghana, 8. Sudáfrica, 9. España, 10. Francia, 11. Irlanda del Norte, 12. Norte de Italia, 13. Austria, 14. Alemania, 15. Grecia, 16. Hungría, 17. Rumania, 18. Yugoslavia, 19. URSS, 20. Noreste de la India, 21. Malasia, 22. Borneo, 23 y 24. Australia, 25. Groenlandia (para la criolita).

Además de la producción primaria, más de 7 millones de toneladas de aluminio primario provienen del reciclaje; casi el 100% de toda la producción de pedacería de este metal, así como, más del 60% del desecho viejo de aluminio es reciclable. La proporción de aluminio producido del desecho (aluminio secundario), ha ido aumentando rápidamente.

Producción de aluminio		primario en miles de toneladas métricas			
ÁREA	REGIÓN	1995	1996	1997	1998
1	África	631	1,015	1,106	1,043
2	Norte América	5,546	5,860	5,930	6,086
3	América Latina	2,058	2,107	2,116	2,075
4/5	Asia	1,656	1,624	1,910	1,843
6 ^a	Europa occidental	5,885	3,192	3,297	3,549
6b	Europa oriental y central			3,316	3,419
7	Oceania	1,566	1,656	1,804	1,934
	Total mundial	17,342	18,639	19,479	19,949
	Promedio diario mundial	47.51	50.93	53.37	54.65

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ÁREA REGIÓN

- 1 Camerún, Egipto, Ghana, Nigeria, Sudáfrica
- 2 Canadá, Estados Unidos
- 3 Argentina, Brasil, México, Surinam, Venezuela
- 4/5 China, India, Indonesia, Irán, Japón, Turquía, Corea del Norte, Corea del Sur
- 6^a Austria, Francia, Alemania, Grecia, Islandia, Italia, Holanda, Noruega, España, Suecia, Suiza, Reino Unido
- 6b Bosnia-Herzegovina, Croacia, Hungría, Polonia, Rumania, Federación Rusia, Eslovaquia, Eslovenia, Ucrania, Montenegro
- 7 Australia, Nueva Zelanda

El área 6 (Europa), se divide en dos secciones a partir del primero de Enero de 1996.

II.1.2.- CRECIMIENTO COMERCIAL

Durante los periodos correspondientes a las dos guerras mundiales hubo un gran aumento en la demanda del aluminio, el cual fue seguido por un abatimiento en las ventas. Al contar ya con la capacidad de reducción instalada para solventar los requerimientos en tiempo de guerra, se recurrió a toda clase de incentivos para hallar salida a la capacidad de producción de estas plantas. Después de la segunda guerra mundial se hizo frente a este desafío no sólo con el descubrimiento de nuevas aleaciones, si no también con la búsqueda de otros usos para las aleaciones existentes y con el diseño de practicas y procesos encaminados a mejorar la calidad y la productividad. Grandes tonelajes de metal recuperado de los aviones destruidos se usaron para la fabricación de viviendas temporales prefabricadas y, al mismo tiempo, hubo una creciente demanda de material laminado para la manufactura de utensilios domésticos y de productos de aleaciones para los vehículos de transporte, la ingeniería estructural y de edificación, la distribución de energía eléctrica y las aplicaciones marinas.

En las aplicaciones comerciales de aluminio ha habido una diversidad de composiciones de aleaciones, introducidas para afrontar las necesidades de una parte pequeña del mercado, de la industria o para utilizar los materiales de fácil acceso como los metales recuperados. Las firmas individuales tienen sus propios sistemas de identificación de las aleaciones y cada país tiene sus propias especificaciones y normas. Estas prácticas han originado complicaciones cuando se ha tratado de evaluar la conveniencia del material de una fuente determinada con el procedente de otra, o de establecer la aplicabilidad de la información publicada sobre una aleación dada a un material que tenga una designación diferente. En años recientes ha habido una acción internacional concertada para adoptar un sistema unificado de designaciones de las aleaciones, y para que cada

nación uniformice sus especificaciones, de tal manera que un material que esté de acuerdo a los requerimientos nacionales cumpla también los límites acordados internacionalmente para materiales que tengan la misma designación de aleación y así facilitar la importación y exportación de los productos.

II.1.3.- EXTRACCIÓN DEL ALUMINIO.

Las fábricas de alúmina (óxido de aluminio) más importantes están en los países de Europa y Estados Unidos y se extiende a países en vías de desarrollo, en los cuales su disponibilidad energética garantiza una producción competitiva. La alúmina la obtienen a partir del método químico desarrollado por el químico austriaco Karl Joseph Bayer (en la Fig. 2 se muestra el diagrama de flujo del proceso Bayer) que consiste en la obtención del óxido de aluminio por medio de una serie de reacciones químicas desencadenadas cíclicamente, una extracción selectiva de hidróxido de aluminio obtenido de la mezcla de la bauxita triturada con soda cáustica líquida y calentada a baja presión. La separación del residuo insoluble (lodo rojo), precipitación, enfriamiento y posterior calcinación del hidróxido, obteniéndose así la alúmina con apariencia de un polvo blanco como la sal de cocina.

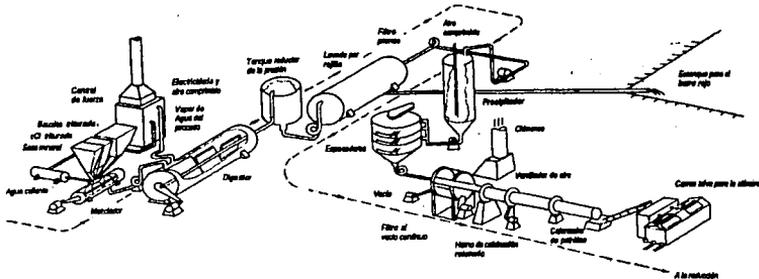


Fig. 2. Diagrama de flujo de los metales: bauxita a alúmina; en el proceso Bayer

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Para la extracción del aluminio se requiere de alúmina, criolita, carbono y energía. La alúmina es descompuesta en oxígeno y aluminio con corriente continua mediante el proceso de electrólisis. La electrólisis se realiza en cubas especiales para resistir la temperatura de fusión de la alúmina pura que es de 1800 °C, por lo cual hay que mezclarla con criolita para fundir. El electrolito es criolita fundida y el carbono como fondo catódico de las células de electrólisis y para los ánodos que entran en el baño.

De este proceso sale el aluminio con una pureza entre 93.3 y 99.8%. Las tensiones que se registran en los bornes son de 4-5 voltios bajo una intensidad de 10000 Amperes.

El aluminio obtenido se denomina primario y no es utilizado en esta forma, sino aleado con otros metales que le aumentan sus cualidades y propiedades como resistencia a la corrosión y características mecánicas y de elasticidad. Las aleaciones del aluminio se presentan en forma de tochos para extrusión, placas para laminación y lingote para fundición y son materia prima para las industrias transformadoras.

La producción del aluminio todavía requiere de una serie de operaciones complejas que requieren un elevado consumo energético; (el metal reciclado requiere solo 5% de la energía necesaria para producir el metal nuevo. Mezclar metal reciclado con un metal nuevo permite un ahorro considerable de energía. No hay diferencia entre el metal primario y el metal reciclado en términos de calidad y propiedades) por motivos ecológicos se prefiere la energía de origen hidroeléctrico.

Hoy en día los avances tecnológicos han logrado reducir el consumo de energía para obtener un kilo de aluminio de 25 Kw/H a 13Kw/H. Los procesos de reciclaje del aluminio requieren de mucho menos energía. Es la industria del futuro y de las más rentables.

Las reservas mundiales se estiman en 40.000 millones de toneladas que se calculan bastan para cuatro siglos más. Pero si tenemos en cuenta las casi 7 millones de toneladas de aluminio recicladas, a un menor costo que el aluminio electrolítico, la disponibilidad de este metal está asegurada.

II.1.3.1.- MÉTODOS DE REFINAMIENTO

La roca bauxita es principalmente un óxido de aluminio hidratado $Al_2O_3 \cdot 2H_2O$, pero por lo general tiene impurezas de óxido de hierro y compuestos de fósforo y titanio; la forma común de la bauxita es como masa terrosa, granular, amorfa, con una gama de colores que varía entre blanco sucio, grisáceo, café amarillo o café rojizo, con un promedio de 60% de alúmina en comparación a un 40% de caolín o arcilla de buena calidad.

Existen numerosos depósitos de bauxita principalmente en la zona tropical y subtropical del mundo y también en Europa. Forman estratos que se encuentran generalmente a 12 metros o más abajo del suelo o de una cubierta de vegetación. La clase comercial de bauxita debe de contener al menos 40% de óxido de aluminio. La bauxita es extraída generalmente de una mina de tiro abierto. Se lava y se tamiza para eliminar materia indeseable, la cubierta se quita, se remueve la bauxita y se transporta a la refinería y se somete al proceso Bayer. Una vez que la extracción ha sido terminada, la capa del suelo y la vegetación se reemplazan. En Brasil y Australia, por ejemplo, hay programas de plantación y conservación que ayudan a la vegetación a regenerarse por sí misma. Dos o tres toneladas de bauxita son requeridas para producir una tonelada de alúmina dependiendo de la clase de bauxita.

La bauxita es refinada a alúmina usando el proceso Bayer. La bauxita se lava y se disuelve en sosa cáustica (hidróxido de sodio) a una presión y temperatura alta. El resultado es un licor que contiene una solución de aluminato de sodio y residuos de bauxita sin disolver que contienen hierro, silicio y titanio. Estos residuos se hunden gradualmente hasta el fondo del tanque y son removidos. Se denominan comúnmente como "barro rojo".

La solución clara de aluminato de sodio es bombeada a un tanque muy grande llamado precipitador; se agregan partículas finas de alúmina para despepitar la precipitación de partículas de alúmina puras; mientras el licor se enfría, las partículas se hunden hasta el fondo del tanque y son removidas y luego se pasan a un calcinador rotador o fluidizador a $1100^{\circ}C$ para apartar el agua que está combinada, el resultado es un polvo blanco, alúmina pura. La sosa cáustica se regresa al principio del proceso y se vuelve a utilizar. Dos toneladas de alúmina se requieren para producir una tonelada de aluminio.

La criolita (fluoruro doble de aluminio y sodio) se presenta en una veta de pegmatita (rocas de cuarzo de grano grueso y feldespato formadas por la última porción del magma de la roca ígnea) en el granito, en Evigtuk, Groenlandia Occidental, asociada con la galena, la blenda, la siderita, el flúor y otros minerales. Este depósito fue la fuente principal de criolita para la industria durante los primeros años del siglo XX; posteriormente, la creciente demanda ha llevado a elaborar criolita sintética.

La roca natural tiene un contenido promedio de criolita (Na_3AlF_6) de un 78 %, con un 5 a 12 % de Fe_2O_3 y un 1.8 a 5 % de SiO_2 . La roca que se extrae de la cantera se clasifica a mano antes de triturarse a un tamaño entre 3 y 6 mm y secarse en un horno rotatorio. Luego se alimenta a un separador magnético con una banda continua, donde los imanes de otra banda que se mueve en ángulo recto con respecto a la banda que transporta la carga principal, eliminan el material magnético y lo descargan en tolvas a lo largo de la banda. La eliminación del óxido de hierro da un producto con un contenido de criolita de 96 %.

Este material se pasa sobre una mesa Wiffier (una mesa vibratoria inclinada provista con tablillas) que trabaja con base en la diferencia de densidades entre la criolita y sus impurezas la cual separa más óxido de hierro y elimina la galena. El material rico en criolita se mezcla con sosa comercial y se tritura antes de pasarlo por celdas de flotación que se utilizan para quitar más impurezas del material. Este proceso depende de las características de humedecimiento de los componentes y de la capacidad de agitación por aire para producir una espuma que lleve a la superficie a los constituyentes específicos como el óxido de hierro. Se añaden pequeñas cantidades de un espumante, como el ácido oleico, a la corriente de agua y al material triturado para disminuir la tensión superficial y producir una espuma con agitación por aire. Una sustancia patentada que produce un efecto heteropolar aplica selectivamente una película repelente al agua y a las impurezas, volviéndolas hidrofóbicas, de manera que las burbujas de aire las atrapan y flotan hacia la superficie. El material que no se humedece al atravesar por una serie de tanques de flotación, pasa a un espesador, se filtra y se deseca. Se obtiene así de 98.5 a 99.8 por ciento de criolita.

Los fluoruros sintéticos de composición óptima reemplazan cada vez más a la criolita natural, para las condiciones que se emplean en electrólisis. La criolita sintética se puede producir haciendo pasar flúor gaseoso a través de una solución de aluminato de sodio en proporciones que den una parte de aluminio por tres partes de sodio. La criolita se precipita al burbujear dióxido de carbono a través de la solución tratada. El análisis de la criolita producida por este proceso muestra un contenido de hasta un 10% de Al_2O_3 y cerca de un 3% de agua.

II.1.3.2.- TECNOLOGÍA DE FUNDICIÓN:

Existen principalmente dos tipos de tecnologías de fundición de aluminio: el Söderburg y el precalcinado. La principal diferencia entre estas dos fundiciones es el tipo de ánodo que utilizan.

La tecnología Söderburg utiliza un ánodo continuo que se pone en la celda en forma de pasta que se calcina en la misma celda.

La tecnología del precalcinado utiliza múltiples ánodos precalcinados que están suspendidos en cada celda por medio de unas varillas. Los ánodos nuevos se cambian por los ánodos gastados o terminales que se reciclan en nuevos ánodos.

Mientras el progreso significativo que se ha hecho en mejorar la actuación del medio ambiente, la tecnología Söderburg está siendo remplazada gradualmente por tecnología precalcinada.

II.1.3.3.- RECICLAJE DE ALUMINIO

Al final de la vida útil de una pieza que contiene aluminio éste puede ser utilizado una y otra vez sin que se pierda su calidad, ahorrando energía y materiales en bruto. Reciclando un kilogramo de aluminio se pueden ahorrar 8 kilogramos de bauxita, 4 Kg de productos químicos y 14 kW/hr de electricidad.

Cualquier cosa hecha de aluminio puede ser reciclada repetidamente; no solo latas, también hojas, láminas, moldes, marcos de ventanas, muebles de jardín, componentes de automóvil, etc., se funden y se usan para hacer los mismos productos de nuevo. La tasa de reciclaje para latas de aluminio está ya por encima del 70% en algunos países. La industria del aluminio ha iniciado varios proyectos para alentar el reciclaje en varios países.

El material de desecho en todas sus fases es meticulosamente recolectado y clasificado por tipos de aleación por todas las compañías de aluminio. A diferencia de otros metales, el aluminio de desecho tiene un valor significativo y buenos índices de precios en el mercado.

El aluminio es el único material de empaque que cubre más allá de su costo de recolección, procesado y traslado al centro de reciclaje. La industria del aluminio está trabajando con los fabricantes de componentes de automóviles para permitir que los carros con componentes de aluminio sean fácilmente desmantelados y

que los desechos sean clasificados y reutilizados para partes nuevas idénticas. En la mayoría de otros proyectos de reciclaje los desechos de material son rara vez reutilizados para su misma aplicación, este tiene que ser degradado a una aplicación que tiene menos propiedades de metal.

La tasa de reciclaje para aplicaciones de construcción y transporte va desde el 60 al 90% en varios países. El metal es reutilizado en aplicaciones de alta calidad.

II.2.- PROPIEDADES DEL ALUMINIO.

El aluminio es el tercer elemento más común encontrado en la corteza terrestre. Los compuestos de aluminio forman el 8% de la corteza de la tierra y se encuentran presentes en la mayoría de las rocas, de la vegetación y de los animales.

Se encuentra normalmente en forma de silicato de aluminio puro o mezclado con otros metales como sodio, potasio, hierro, calcio y magnesio, pero nunca como metal libre. Los silicatos no son menos útiles, porque es extremadamente difícil, extraer el aluminio de ellas y por tanto muy caro. La bauxita, un óxido de aluminio hidratado impuro, es la fuente comercial de aluminio y de sus compuestos.

El aluminio puede ser fuerte, ligero, dúctil y maleable. Es un excelente conductor del calor y de la electricidad; el valor de su densidad es de 2.7 g/cm^3 y las temperaturas de fusión y ebullición son de 660°C y 2.467°C , respectivamente. No se altera en contacto con el aire ni se descompone en presencia de agua, debido a que su superficie queda recubierta por una fina capa de óxido que lo protege del medio. Sin embargo, su reactividad con otros elementos es elevada: al entrar en contacto con oxígeno produce una reacción de combustión que origina una gran cantidad de calor, y al combinarse con halógenos y azufre da lugar a la formación de haluros y sulfuros.

Pero una de las mayores ventajas del aluminio es que puede ser reciclado una y otra vez sin perder su calidad ni sus propiedades.

El aluminio ha conseguido una importancia muy especial en muchos dominios de la industria, a causa de poseer una serie de propiedades muy benéficas que le han convertido en uno de los materiales más idóneos y ventajosos, desde el punto de vista económico.

Constantes Físicas y Químicas del Aluminio:

» Peso atómico	26.9 g/mol
» Punto de fusión	660°C
» Punto de ebullición	2.467°C
» Gravedad específica	2.7 g/ml
» Estructura cristalina	red cúbica centrada en las caras (fcc)
» Radio atómico	1.43 Å
» Valencia	3
» Configuración electrónica	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$

II.2.1. PROPIEDADES FÍSICAS.

Su número atómico es 13, se encuentra en la familia III-A de la tabla periódica, junto con el boro, galio e indio, esta en el segundo periodo después del sodio y el magnesio y es seguido por el silicio.

Densidad:

De 2.6 a 2.8 g/cm³ (para el aluminio puro 2.7 g/cm³) supone un tercio de la densidad del acero. Debido a la escasa densidad se obtienen disminuciones de masa en los vehículos para el transporte terrestre, marítimo y aéreo, los sistemas de elevación y todas aquellas partes de instalaciones que han de ser cambiadas y transportadas con frecuencia. Este descenso en las fuerzas necesarias conduce a un gran ahorro energético a la vez que a una disminución de los costos de mantenimiento. En las construcciones estáticas pueden disminuirse las masas y, con ello, los cimientos y los soportes pueden ser ligeros.

Color:

Es un metal plateado, por lo general, las aleaciones tienen una coloración similar algunas de ellas tienen un color azulado.

Elevada conductividad eléctrica:

Todas las aleaciones de aluminio presentan una conductividad eléctrica relativamente alta. El valor máximo, comprendido entre 38 y 34 $m/\Omega\cdot mm^2$ corresponde al aluminio en sus grados puro y purismo, para conductores eléctricos se utiliza aluminio puro y aleaciones AlMgS.

Elevada conductividad térmica:

La conductividad térmica de las aleaciones normalizadas de aluminio, se encuentra comprendida entre los valores de 80 y 230 $W/m \cdot ^\circ K$. Se hace uso de esta buena conductividad en pistones, cilindros y culatas de motores de combustión, en compresores e intercambiadores de todo tipo, así como en otros muchos campos de aplicación obteniéndose considerables ventajas.

Buenas propiedades ópticas:

Las superficies de aluminio desnudo se caracterizan por poseer un alto poder de reflexión para las radiaciones luminosas y térmicas, por lo que presentan baja absorción. Mediante tratamientos adecuados de estas superficies se pueden modificar, entre amplios límites, la reflexión y la absorción.

Neutralidad magnética:

Todas las aleaciones de aluminio están libres de magnetismo.

Favorable comportamiento frente a la irradiación radioactiva:

La vida media del aluminio, después de ser irradiado, es particularmente baja.

Mantenimiento mínimo :

El elemento aluminio y todas sus aleaciones normalizadas son atóxicas. Los productos de aluminio son fáciles de limpiar, esterilizables y cumplen con todas las exigencias higiénicas y asépticas.

II.2.2.- PROPIEDADES QUÍMICAS.

Buena resistencia a los productos químicos:

El aluminio puro y el de alto grado de pureza, así como las aleaciones libres de cobre muestran buena resistencia frente a muchos medios, como a la intemperie y al agua de mar. Por esta razón los materiales de aluminio se emplean ampliamente en la construcción, en la industria química, en la alimenticia, artículos de consumo, en la construcción de vehículos, barcos y otros sectores. Una prueba convincente de la resistencia a la intemperie de los materiales de aluminio son los tendidos eléctricos aéreos y las cubiertas de tejados de aluminio puro o AlMn, que expuestos a los agentes atmosféricos, se conservan intactos al cabo de varias décadas. Sometidas a la acción del agua de mar y atmósfera costera o medios ligeramente alcalinos, las aleaciones de AlMg y AlMgMn se han mantenido perfectamente. Mediante una conveniente protección superficial adicional puede aumentarse este comportamiento.

Las superficies admiten diversos tratamientos:

A todos los materiales de aluminio se les puede aplicar la mayoría de los procesos generales, además de otros específicos, encaminados a conseguir efectos decorativos, alta resistencia o dureza superficial, resistencia al desgaste. etc.

II.2.3.- PROPIEDADES MECÁNICAS.

Propiedades de resistencia:

Existen materiales de aluminio normalizados para las aplicaciones más diversas con propiedades óptimas en cuanto a su resistencia (resistencia mín. a la tracción desde 60 hasta aprox. 530 N/mm²). Si se toman en cuenta las demás propiedades, se pueden encontrar soluciones óptimas para casi todos los campos de aplicación.

Buena conformación:

La excelente capacidad de conformación hace posible la fabricación mediante extrusión, de perfiles y tubos con secciones transversales complejas. También, con casi todos los demás procesos habituales de conformación en frío y en caliente, se pueden fabricar toda clase de productos semielaborados y piezas terminadas, a partir de aleaciones de aluminio.

Buen mecanizado:

Todos los materiales de base aluminio admiten el mecanizado con facilidad, en particular los materiales especiales para tornos automáticos. Debido a las altas velocidades de corte que pueden soportar, se consiguen tiempos muy cortos de mecanizado.

Buenas cualidades para los trabajos de unión:

Todos los procedimientos usuales para unir materiales se pueden utilizar en los materiales de aluminio. La soldadura por fusión se realiza, la mayoría de las veces, por el procedimiento de electrodo en atmósfera en gas inerte. Gran importancia tienen las uniones por pegado.

No produce chispas, es incombustible:

En las aleaciones de aluminio no se producen chispas por golpe, no siendo combustibles ni siquiera sus virutas; ocasionalmente partículas muy finas de aluminio, al igual que otros polvos pueden en determinadas circunstancias oxidarse y explotar. Una pequeña adición de berilio elimina completamente el peligro de producir chispas al ser golpeado con hierros oxidados; existen aleaciones especiales que se recomiendan para el uso en los trabajos de minería a causa de su seguridad frente a la formación de chispas.

Mantenimiento mínimo :

El aluminio como el elemento y todas sus aleaciones normalizadas son atóxicas. Los productos de aluminio son fáciles de limpiar, esterilizables y cumplen con todas las exigencias higiénicas y asépticas.

II.3.- EL ALUMINIO COMO MATERIAL DE INGENIERÍA.

El aluminio ha reemplazado al cobre desde 1945 en las líneas de transmisión de alto voltaje y hoy en día es la forma más económica de transmitir electricidad. El aluminio pesa sólo un tercio de lo que pesa el cobre y puede llevar el doble de electricidad que una onza de cobre. Por esta razón, las líneas de electricidad de aluminio son más ligeras y no requieren de grandes estructuras para sostenerse. Además, el aluminio tiene otras aplicaciones en este campo: los sistemas de electricidad de grandes edificios como los del World Trade Center en Nueva York, estaban hechos de aluminio; desde la década de los 50's, la base de los focos se hace de aluminio y no de cobre o latón; también miles de antenas para televisores y para satélites son hechas de aluminio.

El aluminio en el deporte lo podemos encontrar en las bicicletas, en el marco de las raquetas para tenis, squash o badminton, y también en los esquíes. Los campistas pueden encontrarlo en las estructuras de sus tiendas de campaña o en el marco de sus mochilas.

Para el transporte, el aluminio es un elemento ideal gracias a que es ligero, fuerte y es fácil de moldear. El gasto en energía es menor ya que el vehículo ahorrará gasolina por requerir menor fuerza o potencia para moverse.

Los aviones no podrían haber existido si no fuera por la ligereza del aluminio. Desde que los hermanos Wright fabricaron el primer aeroplano, el aluminio formó parte importante de los materiales constituyentes y posteriormente comenzó a reemplazar piezas de madera, acero y de otros elementos. El primer avión de aluminio se fabricó en los años 20's.

La combinación de fuerza, ligereza y maleabilidad hacen del aluminio un elemento ideal para la fabricación de aviones comerciales, además de que al crear aleaciones de aluminio con otros metales, se adquieren características en el metal que permiten la resistencia a grandes presiones y la tensión que debe soportar el artefacto a grandes alturas. Así mismo, gracias a que el material es resistente a la corrosión, muchas líneas aéreas no pintan sus aviones ahorrándose así muchos kilos de peso.

El uso de aluminio en las partes de componentes de coches y camiones ha aumentado en forma constante en la última década. La utilización de este metal reduce ruido y vibración. Gracias al aluminio, muchas partes de los vehículos son recicladas. Además, el aluminio absorbe energía cinética lo cual evita que en un accidente la reciban los pasajeros.

El aluminio no se oxida como el acero; ésto significa que los vehículos en zonas climatológicas de gran humedad tengan una vida más larga. Los autos con cuerpo de aluminio duran tres o cuatro veces más que los que tienen un chasis de acero.

El aluminio también se utiliza en la fabricación de carros de ferrocarril y del metro. Las primeras cajas para ferrocarril hechas de aluminio, datan de 1931. En los 60's, las primeras cajas de 100 toneladas de capacidad se construyeron con cuerpos de aluminio. Cada caja necesitaba 6,800 Kg. de aluminio y pesaba 10 toneladas menos que las de acero. Los carros para transportar carbón se tenían que reconstruir cada 15 años si eran de acero, al ser de aluminio ya no fue necesario.

En 1892, los franceses construyeron el primer navío de aluminio. Para 1893, una compañía estadounidense estaba haciendo botes de este metal. Los cruceros utilizan, también, grandes toneladas de aluminio en su construcción para evitar un peso mayor. La misma aplicación se hace para los transbordadores.

Los usuarios reportan que en 30 años de uso, los artefactos hechos de aluminio no presentan fatiga del material.

El aluminio se utiliza de manera extensa en la protección, el almacenamiento y la preparación de comidas y bebidas. Al conducir de manera muy eficiente el calor, es muy útil para preparar tanto alimentos calientes como congelados.

El aluminio se utiliza en diversos tipos de empaques por servir como importante barrera contra los microorganismos, el aire y la luz, evitando que estos afecten el contenido.

El papel aluminio tiene características sobresalientes, es ligero, fuerte, flexible y durable. Con sólo una micra de espesor es completamente impermeable. Al enrollarlo sobre la comida, la protege contra la luz ultravioleta, las bacterias y su entorno. Los paquetes de aluminio son seguros, higiénicos, fáciles de abrir e impermeables.

Las latas de aluminio son excelentes contenedores ya que son fuertes, ligeras, compactas, impermeables y reciclables. Además, no afecta el sabor natural del contenido y mantiene el oxígeno, la luz y la humedad afuera. Por su ligereza, son fáciles de transportar, de llevar a casa y de recolectar para ser recicladas. Se almacenan con mayor facilidad en los estantes, en el refrigerador y en los camiones que el vidrio y el plástico, y necesitan menor protección.

Además de las aplicaciones anteriores, el aluminio se emplea en la construcción (ventanas, puertas, coladeras, etc.); en el tratamiento de agua (con el sulfato de aluminio); en la comida (cubiertos, sartenes, ollas, etc.) y en la industria farmacéutica (hidróxido de aluminio y compuestos de aluminio soluble).

III.- LAS ALEACIONES DE ALUMINIO

III.1.- GENERALIDADES SOBRE LAS ALEACIONES BASE ALUMINIO

El aluminio y sus aleaciones se dividen en tres amplias clases: lingotes para el refundido, formas vaciadas y productos trabajados mecánicamente (forjados). La última clase se subdivide en aleaciones endurecidas por el trabajo (no aptas para tratamiento térmico) y aleaciones que se someten a tratamiento térmico, además de las diversas formas producidas mediante el trabajo mecánico, en particular el material relaminado, placas, hojas, hojas delgadas, barras, extrusiones, secciones huecas, material para forjar, piezas forjadas, tubos, alambres, material para remaches y pernos y conductores sólidos.

El polvo de aluminio se utiliza en varias aplicaciones y en términos generales se clasifica en dos clases: partículas de polvo producidas por pulverización del metal fundido, que tienen aproximadamente ejes iguales; y polvo en escamas el cual se produce de manera principal al tratar el polvo pulverizado o la hoja delgada en un molino de bolas para obtener escamas con una relación elevada entre el diámetro y el espesor.

Lingotes

Lingote es un término aplicado al aluminio sólido o a las aleaciones de aluminio sin forjar en una gran variedad de formas y tamaños que dependen de su uso posterior. Los lingotes para la segunda fundición se diseñan para que se ajusten al equipo de manejo y fundición; el de hojas o placas es rectangular y el destinado a extrusión es, por lo general, cilíndrico.

El contenido de impurezas del lingote para segunda fundición, fabricado directamente del material procedente de la planta de reducción es, por lo común, mucho menor que el del material recuperado. Los límites de la composición química en los lingotes para la segunda fundición se rigen por el producto para el cual se usarán. La temperatura de fusión es la propiedad física de mayor interés de un lingote para refundición. Es conveniente una baja temperatura de fusión, puesto que permite que la aleación final se funda sin necesidad de utilizar una temperatura en exceso alta, de aquí el empleo de aleaciones patrones. El manganeso tiene una temperatura de fusión de 1244°C mientras que una aleación patrón de aluminio-10% de manganeso funde a una temperatura de cerca de 790°C. El cobre funde a 1083°C y una aleación patrón de aluminio-33% de cobre funde a 548°C .

Para determinar a las aleaciones de fundición, el dígito (0) es usado para determinar la composición química del lingote y los dígitos (1) y (2) para la composición química de las piezas coladas.

319.0 Composición química del lingote

365.1 Composición química de la pieza colada

Vaciados

Los tres procesos de uso más común son: fundición en molde de arena, fundición en molde permanente y fundición por inyección. Los moldes de arena se alimentan por gravedad con el metal fundido. Los moldes metálicos que se emplean en la fundición en molde permanente se alimentan ya sea por gravedad o mediante aire y otro gas a baja presión para obligar a que el metal suba por un cuello de llenado (o canal) hasta dentro del molde; se pueden usar bombas electromagnéticas para este fin. Cuando se utilizan núcleos de arena en los moldes permanentes el proceso se conoce a veces como fundición en moldes semipermanentes. En la fundición por inyección, el metal fundido se obliga a pasar al dado o matriz a una elevada presión por la acción de uno o más arietes hidráulicos.

Las aleaciones empleadas para fundición en moldes de arena o moldes permanentes se seleccionan con frecuencia a partir de composiciones que se ajustan al tratamiento térmico de las soluciones y al templado para producir componentes con una resistencia relativamente alta y buenas características de maquinado. Debido a su contenido de gases, la fundición por inyección no es, por lo común, adecuada para tratamiento térmico a menos que se usen técnicas especiales de vaciado, como el vaciado por inyección al vacío, el sistema "libre de poros" patentado por Japón o el sistema "Accurad", diseñado por la *General Motors*. El proceso produce componentes con propiedades mecánicas comparativamente altas y muy estrechas tolerancias dimensionales

III.1.1.- PROPIEDADES GENERALES DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO

Las propiedades mecánicas a la temperatura ambiente de las aleaciones de aluminio, en general, son inferiores a las del acero, casi iguales a las de las aleaciones de cobre y superiores a las de las aleaciones de magnesio. Las aleaciones de cobre pueden usarse a temperaturas más altas que las aleaciones de aluminio, pero ninguna de ellas es conocida por propiedades en especial buenas de fluencia o fractura por esfuerzo. Por supuesto hay considerable superposición de las propiedades entre las aleaciones de los diversos metales y deben usarse referencias confiables para determinar propiedades específicas.

Además de las propiedades mecánicas, deben tenerse presentes otros factores. Uno de los más importantes es el peso específico de las aleaciones de aluminio. Al dividir los valores de resistencia entre la gravedad específica se obtiene un número conocido como la resistencia específica. La comparación de las resistencias específicas muestra que la mayoría, pero no todas, de las aleaciones de aluminio son superiores a muchas de las composiciones de acero. Las resistencias específicas tienen un peso importante cuando se consideran la carga útil y el peso muerto. Cuando se establecen limitaciones en el tamaño y volumen de la sección, puede favorecerse el acero sobre las aleaciones de aluminio. Cuando se requiere rigidez estructural, el volumen adicional de las aleaciones de aluminio es ventajoso. Consideraciones como la necesidad de desarrollar propiedades óptimas por tratamiento térmico y la necesidad de mantener estas después del armado son también importantes para decidir cuándo deben usarse aleaciones de acero o aluminio en una aplicación específica.

Además del peso específico y la resistencia específica debe considerarse el costo del aluminio. En base a masas iguales, las formas estructurales de las aleaciones de aluminio cuestan cerca de ocho veces más que el acero. Las consideraciones de costo por kilogramo (libras) y peso específico favorecen las aleaciones de aluminio sobre las aleaciones de cobre y las aleaciones de magnesio, pero no sobre las de acero.

La fabricación de aleaciones de aluminio se lleva a cabo con cierta facilidad. Estas aleaciones pueden colarse por cualquiera de los métodos de fundición, incluyendo la fundición en dado. Los factores principales para determinar qué tan adecuada es una selección para fundición en dado son su temperatura de fusión y la naturaleza corrosiva de la aleación fundida con respecto a los dados y a la máquina de fundición en dado. Las aleaciones de aluminio en este aspecto son tan buenas como las aleaciones de cobre, pero son inferiores a las fundidas en dado con base de zinc.

En general, las aleaciones de aluminio se consideran de maquinado fácil, aun cuando en algunos casos es difícil obtener un buen acabado de la superficie. Esto puede mejorarse utilizando fluidos de corte. Otro problema en conexión con el maquinado del aluminio surge para su coeficiente relativamente grande de expansión térmica y bajo módulo de elasticidad. Estas propiedades son propensas a dificultar el control dimensional ya sea debido a enfriamiento inadecuado por la deflexión excesiva de los miembros que resulta por las fuerzas de corte.

La unión de aleaciones de aluminio se lleva a cabo con éxito por una variedad de métodos de soldadura y soldadura fuerte. Es de uso común la soldadura con arco protegido con gas inerte. La soldadura fuerte se dificulta y no se recomienda en general a menos que la aleación haya sido revestida con estaño.

Las aleaciones de aluminio se trabajan mecánicamente con facilidad, ya sea en frío o a temperaturas elevadas, ya que son relativamente suaves y tienen buena ductilidad.

Aunque las aleaciones de aluminio pueden revestirse por electrólisis, son más difíciles de electrorrevestirse que las aleaciones ferrosas de cobre y de zinc.

III.2.- PRINCIPALES SISTEMAS DE ALEACIÓN Y SUS DIAGRAMAS DE EQUILIBRIO.

Se han diseñado un gran número de aleaciones para satisfacer necesidades específicas y las principales se encuentran dentro de una serie de normas nacionales e internacionales que especifican sus composiciones y propiedades mecánicas.

Las aleaciones se pueden dividir en dos grupos principales, uno es el que se usa para fundición, siendo éste, el grupo que estudiaremos más adelante y el otro se emplea para fabricar formas forjadas. Para facilidad de referencia, las aleaciones tanto para fundición como para forja se indican por la designación del sistema de la Aluminium Association, mediante un acuerdo internacional de un sistema de cuatro dígitos.

Para fundición, la utilización de un número de cuatro dígitos con un período entre los dos últimos dígitos.

El primero de ellos indica el elemento principal de la aleación dentro del grupo como sigue:

1XX.X	Aluminio con un mínimo de pureza del 99.00%
2XX.X	Cobre
3XX.X	Silicio, con adición de cobre y/o magnesio
4XX.X	Silicio
5XX.X	Magnesio
7XX.X	Zinc
8XX.X	Estaño
9XX.X	Otros elementos
6XX.X	Serie no utilizada

El primero indica el grupo de aleación, el segundo señala el cambio de la aleación original o límites de impureza: el cero se utiliza para la aleación original, y los enteros del 1 al 9 indican las modificaciones de la aleación. En el grupo 1xx.x para aluminio con un mínimo de purezas del 99% y mayores, los dos últimos dígitos son los mismos que los dos a la derecha del punto decimal en el porcentaje de mínimo de aluminio cuando se expresa a casi el 0.01%. De este modo, 1060 indica un material de 99.60% mínimo de pureza de aluminio y ningún control especial sobre las impurezas individuales.

En los grupos de aleación del 2xx.x al 8xx.x, los dos últimos dígitos sirven sólo para identificar las diferentes aleaciones de aluminio en el grupo.

III.2.1.-GRUPO 1XX.X

ALUMINIO CON UN MÍNIMO DE PUREZA DEL 99%

Las principales impurezas son por lo general, hierro y silicio, con la posible presencia de cobre o zinc en cantidades menores a 0.1% en peso y otros elementos en cantidades inferiores a 0.5% cada uno, lo que totaliza menos de 0.15%.

III.2.2.- GRUPO 2XX.X

ALEACIONES ALUMINIO-COBRE.

En las aleaciones de aluminio-cobre ricas en aluminio, figura 3-1(a), éste forma un eutéctico con el constituyente designado como θ Al a 548°C con 66.8% Al.

La región θ funde a 591°C. A ésta temperatura, el intervalo de homogeneidad de θ es de 53.5 a 52.5% de cobre. La solución sólida Al contiene 5.65% en peso de cobre a la temperatura eutéctica en condiciones de equilibrio; el cobre es el elemento más importante en las aleaciones de aluminio ya que es la base del endurecimiento por precipitación y también se emplea para reducir la porosidad que se produce por la contracción durante la solidificación.

Figura 3-1 (b). La solubilidad del cobre en el aluminio se reduce de 5.65% a 548°C a menos de 0.25% a temperatura ambiente. (a) Se forma una eutéctica con 33.2% de cobre. Estas aleaciones también se hacen más resistentes con la precipitación de la fase teta (θ) (CuAl_2) desde la solución sólida (Al) por medio de un tratamiento de envejecimiento con calor.

Las aleaciones binarias de aluminio-cobre no se utilizan en el comercio más que como aleaciones principales para la preparación de aleaciones más complejas.

Estas aleaciones ofrecen excelentes propiedades como resistencia mecánica, alta dureza y excelente resistencia a la abrasión, y a la corrosión.

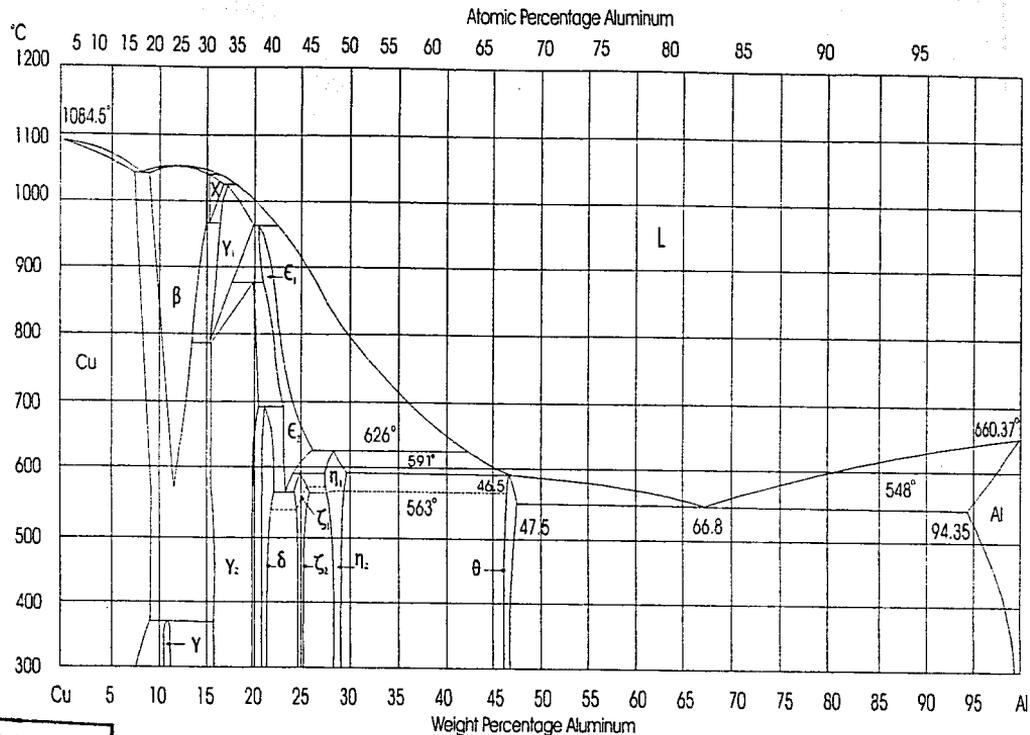


Figura. 3-1(a). Diagrama de equilibrio: cobre-aluminio.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

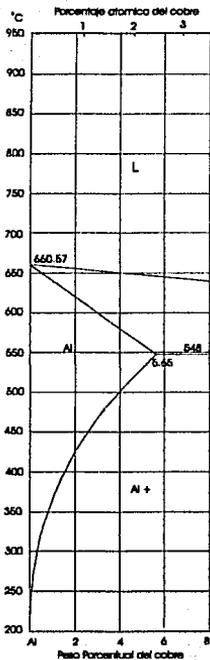


Figura 3-1(b) Porción rica en aluminio.

TEJES CON
FALLA DE ORIGEN

III.2.3.- GRUPO 3XX.X

ALEACIÓN ALUMINIO-SILICIO, CON ADICIÓN DE COBRE Y/O MAGNESIO.

Al-Cu-Si

Los diagramas 3-1(a) del sistema Al-Cu y 3-1(b), de una región rica en aluminio. Para el sistema Al-Cu-Si, el Silicio se encuentra formando un sistema quasibinario con Cu-Al. Este sistema quasibinario es de un tipo simple eutéctico ya que contiene regiones formadas por aleaciones eutécticas de Cu, Si, al solidificar el Al a 548°C, justo a la derecha del diagrama 3-1(a).

No hay fases ternarias intermetálicas en la región de el sistema (Al) + CuAl_2 + (Si). Esta región es ternaria y también es del tipo simple eutéctica. En el estudio de esa aleación ternaria eutéctica conteniendo 27.0 % Cu y 5.25 % Si, se solidifica a 577°C. Figura 3-3. El silicio parece tener poco efecto en la solubilidad de cobre en aluminio, así mismo el cobre no parece cambiar la solubilidad del silicio en el aluminio.

El Silicio es reportado para reducir el rango de composición, pero tiene poco efecto en la descomposición de temperatura de la fase Cu_3Al del sistema Al-Cu. Sin embargo se ha reportado también para extender el rango de composición de estabilidad de las fases Cu_2Al y Cu_9Al_4 del sistema Al-Cu.

ALEACIÓN ALUMINIO-SILICIO, CON ADICIÓN DE COBRE Y/O MAGNESIO.

Al-Mg-Si.

En la figura 3-4 se muestra el diagrama Al-Mg, y al integrar Si, el magnesio y el silicio se combinan para formar un compuesto siliciuro de magnesio (Mg_2Si) que a su vez forma un sistema eutéctico simple con aluminio. Estas aleaciones se caracterizan por la excelente resistencia a la corrosión y se pueden trabajar más que otras, son tratables térmicamente. Entre las aplicaciones típicas se incluyen mallas de refuerzo en pistas de aterrizaje para aviones, canoas, muebles, tubería para aspiradora; pasamanos para puentes, y aplicaciones arquitectónicas. Las aleaciones de fundición aluminio-silicio-magnesio 355, 356 y 360 proporcionan una deseable combinación de capacidad de fundido, aguante a fugas de presión, resistencia en general y resistencia a la corrosión. En la condición de tratamiento

térmico, sus propiedades mecánicas se aproximan a las de las aleaciones aluminio-cobre. Se usan ampliamente con fines aeronáuticos, en piezas para máquina-herramienta y en piezas fundidas para propósitos generales.

III.2.4.- GRUPO 4XX.X ALEACIONES ALUMINIO-SILICIO.

Los sistemas binarios de muchos materiales tecnológicos importantes se pueden formar de compuestos más que de elementos individuales; como por ejemplo, el sistema binario que se forma entre la alúmina (Al_2O_3) y el silicato (SiO_2). En este caso los componentes son compuestos iónicos de aluminio-oxígeno y silicio-oxígeno. El diagrama de fases de este sistema se muestra en la figura 3-3.

Una inspección superficial de este diagrama de fases revela que la porción rica en alúmina produce materiales con temperaturas de fusión relativamente más altas, lo que demuestra la unidad del diagrama en la selección y diseño de los materiales.

Algunas aplicaciones de altas temperaturas se relacionan con las fases que se presentan en este diagrama, incluyendo ladrillos refractarios para el recubrimiento de hornos, crisoles y cucharones, tejas refractarias, equipo de cerámica para laboratorios y utensilios de cocina resistentes al calor.

El eutéctico de aluminio y silicio contiene 12.6% de silicio y solidifica a $577^\circ C$. El componente rico en aluminio, en condiciones de equilibrio, tiene 1.65% de silicio a ésta temperatura.

El silicio también es un elemento de aleación con el aluminio importante. Se utiliza tanto como agente para incrementar la resistencia de la solución sólida como para mejorar las cualidades de la colada, como la fluidez, la tenacidad y la consistencia. La solubilidad sólida del silicio en el aluminio disminuye desde un máximo de 1.65% a $577^\circ C$ a prácticamente cero a temperatura ambiente.

Estas aleaciones suelen ser no tratables térmicamente.

Las aleaciones aluminio-silicio de fundición tienen excelentes sus propiedades metalúrgicas tales como vaciabilidad aumentando la fluidez y alimentación de la pieza, reduciendo la deformación en caliente y la contracción durante la solidificación, resistencia a la corrosión. Se utilizan para piezas fundidas complicadas, equipo para manejo de alimentos y accesorios marinos. Las aleaciones aluminio-silicio de fundición tienen excelentes capacidad (facilidad) de fundido y resistencia a la corrosión. Se utilizan para piezas fundidas complicadas, equipo para manejo de alimentos y accesorios marinos.

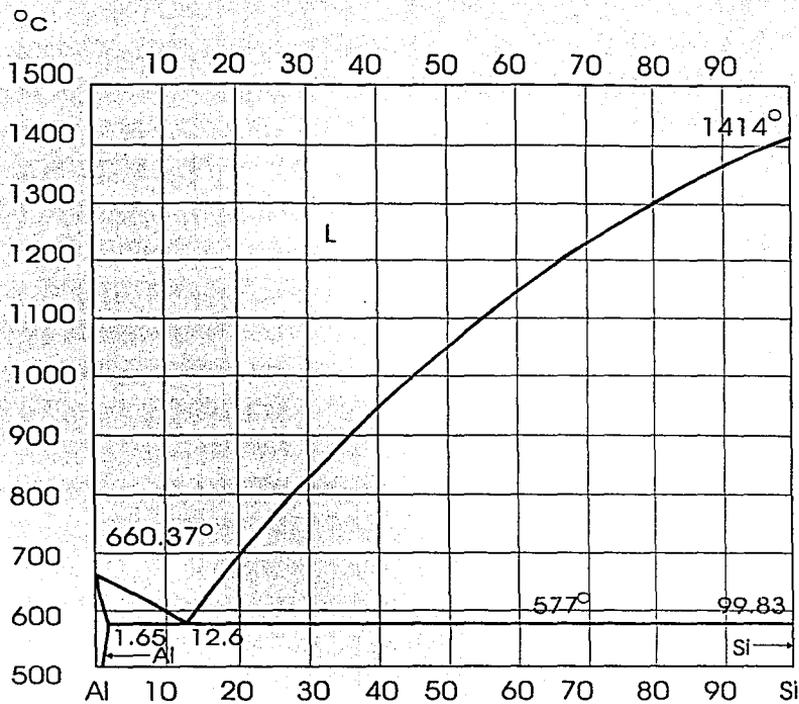


Diagrama de equilibrio Aluminio-Silicio

Figura 3-3 Diagrama de fases del sistema aluminio-silicio.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

III.2.5.- GRUPO 5XX.X

ALEACIONES ALUMINIO-MAGNESIO.

En la figura 3-4 se presenta el diagrama de fases binario Al-Mg. Este sistema presenta una solubilidad sólida decreciente. El magnesio tiene una solubilidad sólida máxima de 14.9 % a 451 °C, que disminuye a menos de 2% a temperatura ambiente.

Las aleaciones binarias de aluminio-magnesio ricas en aluminio forman una serie eutéctica con gran solubilidad del sólido en el extremo del aluminio. El eutéctico, cuyo segundo constituyente se designa como β ó Mg_2Al_3 , está a 35% de Mg y 451°C. La solución sólida rica en aluminio contiene 15.35% de magnesio a la temperatura eutéctica y desciende a 11.8% a 400°C, 6% a 300°C, 4% a 200°C y cerca de 2% a 100°C.

Tenemos otra región eutéctica a 437 °C con 67.7% de Mg.; encontramos la solución sólida rica en Mg. 87.3% a la misma temperatura.

Este elemento, incrementa la resistencia a la tracción y dureza de manera especial imparte mejores propiedades a temperaturas elevadas y características de terminado superficial a espejo . Sin embargo aleaciones son difíciles de vaciar, con tendencia a alta formación de escorias y contracción durante la solidificación.

Las aleaciones aluminio- magnesio de fundición incluyen la aleación 214 (3.8% de magnesio), la 218 (8% de magnesio) y la 220 (10% de magnesio). Las dos primeras se emplean para equipo de manejo de leche y alimentos, accesorios para utilizar sustancias químicas y drenaje, accesorios marinos y zapatas para frenos de avión.

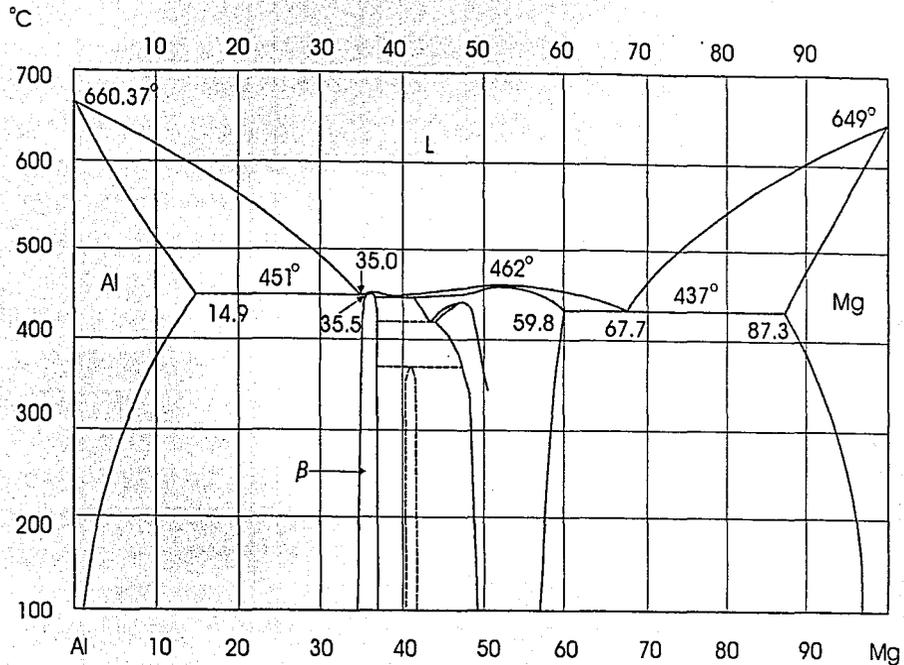


Diagrama de equilibrio Aluminio/Magnesio

Figura 3-4 Diagrama de equilibrio Aluminio-Magnesio

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

III.2.6.- GRUPO 7XX.X ALEACIONES ALUMINIO-ZINC.

El aluminio y el zinc forman un eutéctico a 95% de zinc, que solidifica a 382°C, donde los dos constituyentes son una solución sólida que contiene 82.8% de zinc a la temperatura eutéctica, y una solución sólida de zinc que tiene 1% de aluminio. Así, todas las aleaciones ricas en aluminio de este sistema solidifican como soluciones sólidas y ninguna otra fase puede existir en esta etapa, aunque dicha solución sólida se descompone a temperaturas más bajas 275°C. Figura3-5.

La solubilidad del zinc en aluminio es del 31.6% a 275°C, disminuyendo hasta 5.6% a 100°C.

Se encuentra una región peritectoide a 275°C con 78% de Zn.

Mediante la adición de cromo y el tratamiento térmico adecuado, la susceptibilidad de estas aleaciones a la corrosión por esfuerzo se ha minimizado. Tienen aplicaciones en las que se requiere alta resistencia en general y buena resistencia a la corrosión tales como piezas de aviones.

La aleación de fundición aluminio-zinc conocida como 40E, que contiene 5.5% de zinc, 0.6% de magnesio, 0.5% de cromo y 0.2% de titanio, proporciona altas propiedades mecánicas sin tratamiento térmico. Esta aleación también tiene regulares características de fundición, buena resistencia a la corrosión y muy buena maquinabilidad. Se emplea en accesorios para avión, cubiertas para torres y equipo de radio.

El Zinc es un elemento común de aleación en las aleaciones de fundición, en cantidades hasta 3%. En concentraciones menores que 3%, zinc tienen poco efecto en las propiedades. Se han desarrollado recientemente aleaciones Aluminio-Zinc-Magnesio, que desarrollan alta resistencia a temperatura ambiente, estas son susceptibles a alta contracción y tendencia al agrietamiento en caliente.

ESTA TESIS NO SALI
DE LA BIBLIOTECA

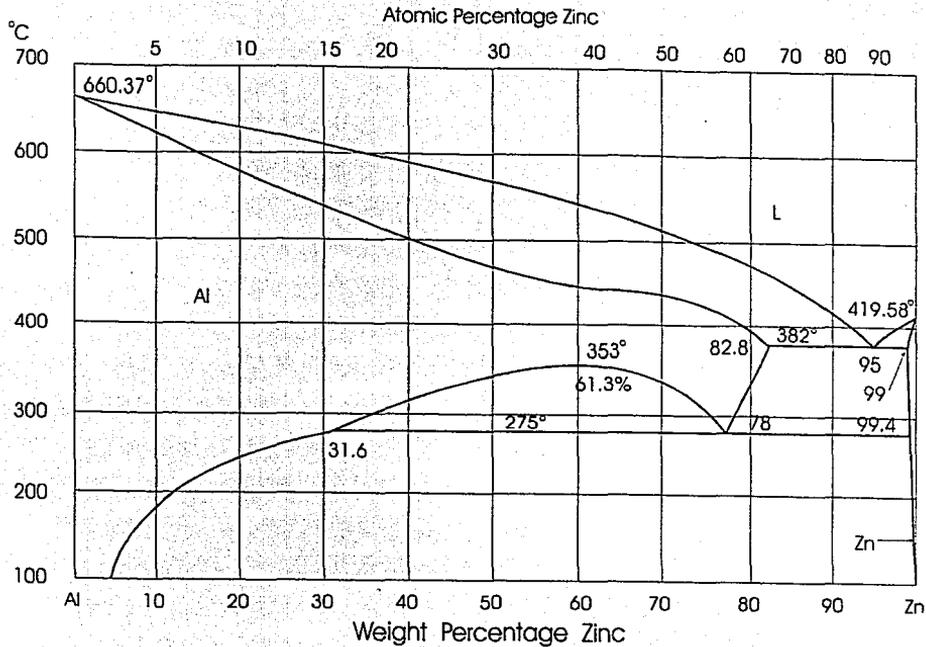


Diagrama de Equilibrio Aluminio Zinc

Figura 3-5. Diagrama de equilibrio: Aluminio-Zinc

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

III.2.7.- GRUPO 8XX.X ALEACIONES ALUMINIO-ESTAÑO.

En la figura 3-6, el aluminio y el estaño forman un eutéctico a 99.5% de estaño que solidifica a 228.3°C.

Estas aleaciones tiene al estaño como el elemento aleable principal junto con pequeñas adiciones de silicio, hierro, cobre y níquel. Las aleaciones de este tipo se emplean como aleaciones de aluminio para los metales de los cojinetes automotrices.

Estaño y plomo una combinación de estos elementos mayor 0.5% provoca rompimiento.

III.2.8.- GRUPO 9XX.X ALEACIONES DE OTROS ELEMENTOS.

En este grupo se reúnen el resto de las aleaciones base aluminio como por ejemplo:

- Aleaciones de aluminio-litio

Es probable que estas aleaciones para las que se pronostica ahorro en el peso 10-15%, tengan un impacto considerable en el diseño, fabricación y economía de la aviación en el futuro.

- Aleaciones de aluminio-níquel
- Aleaciones de aluminio-titanio
- Aleaciones de aluminio-cromo
- Aleaciones de aluminio-cobalto
- Aleaciones de aluminio-hierro
- Aleaciones de aluminio-manganeso
- Etc.

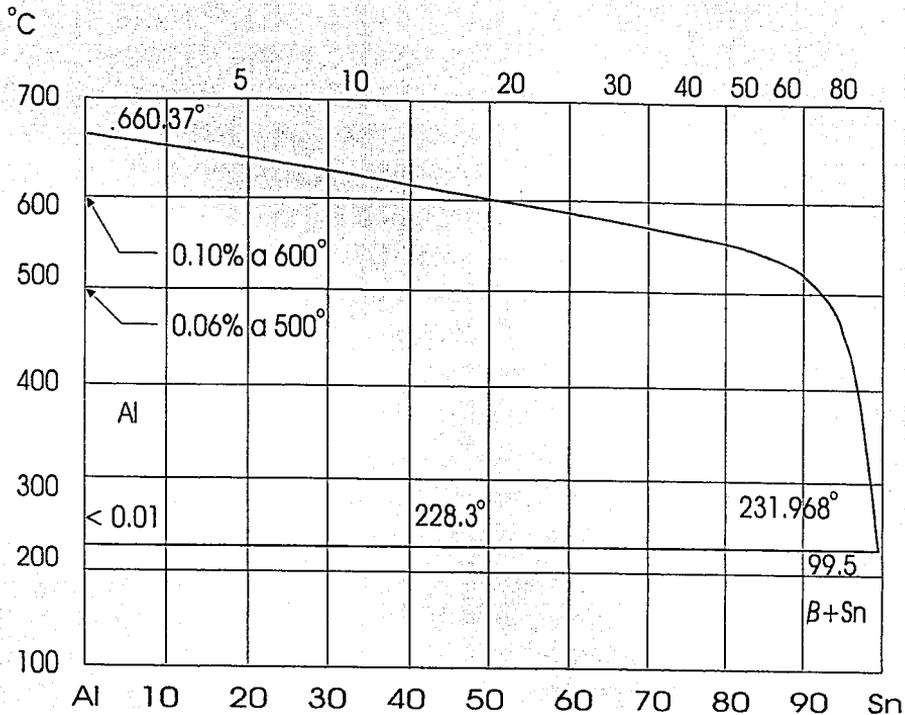


Diagrama de equilibrio Aluminio-Estaño

Figura 3-6. Diagrama de equilibrio: Aluminio-Estaño

TESIS CON
FALLA DE CRITERIO

III.3.- TRATAMIENTOS TERMICOS

III.3.1.-DESIGNACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS.

Esta designación sigue a la de aleación y se halla separada de ésta por un guión. The Aluminum Association Temper Designation System, La adoptada en 1948, y se utiliza para el aluminio y aleaciones de aluminio forjadas y fundidas.

Se basa en las secuencias de los tratamientos básicos utilizados para producir los diversos temple. El sistema estándar de designación de temple consta de una letra que indica el temple básico. Excepto para los de condición de recocido y aquellos en condición de fabricado sin tratamiento térmico se define más específicamente por la adición de uno o más dígitos. Hay cuatro designaciones básicas:

F - Tal como se fabricó, sin control sobre la cuantía del endurecimiento por deformación, ningún límite a las propiedades mecánicas.

Aplicado a productos que adquieren alguna dureza como resultado de las operaciones de manufactura. No hay garantía de propiedades mecánicas.

O - Recocida y recristalizada. Endurecimiento con mínima resistencia y máxima ductilidad.

H - Endurecimiento por deformación. Se aplica a productos susceptibles de incrementar sus propiedades mecánicas mediante trabajado en frío, únicamente. La - H siempre es seguida por dos o más dígitos. El primero indica la combinación específica de las operaciones básicas.

T - Tratado térmicamente (endurecida por envejecimiento). Se aplica a productos tratados térmicamente con o sin endurecimiento por deformación suplementario, para producir temple estables. La -T sigue de los números 2 al 10, designando una combinación específica de operaciones básicas. Las variaciones deliberadas de las condiciones, que dan lugar a características significativamente distintas para el producto, se indican añadiendo uno o más dígitos a la designación básica.

W: Tratados térmicamente en solución. Es un temple inestable que se aplica sólo a aleaciones que envejecen espontáneamente a temperatura ambiente debido al envejecimiento natural, esta designación es específica sólo cuando se indica el periodo de envejecimiento; por ejemplo, 2024-W(1/2 hr.).

III.3.2.-PRINCIPALES TRATAMIENTOS TERMICOS APLICADOS A LAS ALEACIONES.

La subdivisión de los principales tratamientos térmicos aplicables a aleaciones de aluminio se enumeran de la forma siguiente:

- T2. Recocido (sólo productos fundidos).
- T3 Tratados térmicamente a solución y luego trabajado en frío.
- T4 Tratados térmicamente y envejecida en forma natural hasta una condición sustancialmente estable.
- T5 Sólo envejecido artificial. Se aplica a productos envejecidos artificialmente después de un proceso de fabricación a alta temperatura seguido por enfriamiento rápido, tal como fundición o extrusión.
- T6. Tratados térmicamente y luego envejecido artificialmente.
- T7. Tratados térmicamente y luego estabilizada se aplica a productos en que las condiciones de temperatura y tiempo para estabilización son tales que la aleación se lleva más allá del punto de dureza máxima, proporcionando control de crecimiento y/o esfuerzo residuales.
- T8. Tratados térmicamente, trabajo en frío y luego envejecida en forma artificial.
- T9. Tratados térmicamente, envejecida artificialmente y luego trabajo en frío.
- T10. Envejecida artificialmente y luego trabajado en frío, lo mismo que en -T5, pero seguida por trabajado en frío a fin de mejorar la resistencia.

- ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN

- H 1: Endurecido por deformación solamente. El segundo dígito designa la cantidad de trabajo en frío realizada, cuyo número 8 representa la condición de dureza total; por tanto, una dureza media es – H14, una dureza de un cuarto es

-H12, etc. los extraduros se designan con el 9. Un tercer dígito se emplea a menudo para indicar el grado de control del temple o para identificar un conjunto de propiedades mecánicas en específico.

- H2: Templado por deformación y luego recocido parcialmente. Se aplica a productos trabajados en frío para obtener un temple más duro y luego, mediante un recocido parcial, se les reduce su resistencia al nivel deseado. La cantidad residual de trabajado en frío se designa mediante el mismo método que los de la serie - H1

- H3: Endurecido por deformación y luego estabilizado. Se aplica sólo a aleaciones que contienen magnesio a las cuales se da un calentamiento a baja temperatura para estabilizar sus propiedades. El grado de endurecimiento por deformación emanante después del tratamiento de estabilización se indica en la forma usual por uno o más dígitos.

IV.- EL PROCESO DE FUNDICIÓN EN MOLDE DE ARENA

IV.1.-GENERALIDADES

La fundición es el proceso de producir objetos o piezas llenando un molde o cavidad, por gravedad o por presión con un metal líquido y permitiendo que éste solidifique y enfríe. No hay otro proceso de trabajo de metales el cual proporcione al diseñador una libertad ilimitada o tantas opciones en términos de los requerimientos del producto como son; complejidad, rango de tamaño, selección de materiales disponibles, propiedades deseadas, rango de textura superficial, tolerancia dimensional y una alta producción.

El diseño ideal para una fundición en particular deberá determinarse en base a consultas de especialistas con experiencia en fundición. Es útil en el diseño de cualquier fundición, tratar de visualizarla dentro de un par de mitades de molde que tengan cavidades las cuales nos dan su forma, a menudo usando núcleos y partes móviles deslizables y de las cuales la fundición deberá removerse sin que se rompa ni se distorsione.

Generalmente no es necesario para el diseñador de un producto, diseñar el molde en el cual se va a producir la fundición. Sin embargo, el diseño de la fundición y su facilidad para manufacturarse por medio de un proceso de fundición particular, es probablemente más fácil si él puede visualizar como serán la mayoría de los elementos que forman el molde, además, un minucioso conocimiento de las técnicas que están relacionadas al proceso de fundición será de igual importancia para el diseñador.

Por otra parte, es fuertemente recomendable que el diseñador consulte con expertos en el campo, el procesado apropiado del material antes de que el diseño de la parte haya avanzado hasta un punto en que sea demasiado costoso hacer algún cambio.

Cada sistema de fundición tiene limitaciones dimensionales definitivas, por lo que se deberá revisar cuando se seleccione un proceso particular.

Los factores para la selección del proceso de fundición dependerán de las propiedades específicas y particulares del material, así como de las propiedades específicas y particulares deseadas para las piezas a producir.

La fundición en molde de arena es el proceso de fundición de mayor producción y en términos de toneladas de metal empleado se produce 90% de todo el metal utilizado en fundiciones.

A continuación se enuncian los procesos de fundición utilizados en las industrias:

- a) Fundición en molde de arena
- b) Fundición en molde de cáscara
- c) Fundición por inversión
- d) Fundición en molde permanente
- e) Fundición en dado
- f) Fundición en molde de yeso
- g) Fundición centrífuga

IV.2.- LAS ARENAS PARA FUNDICIÓN

La arena a ocupar para moldeo debe tener buenas propiedades refractarias, expresadas como la capacidad de resistir altas temperaturas sin fundirse o degradarse, las características más importantes son: el tamaño de grano, la distribución de tamaños de grano en la mezcla y la forma de los granos. Respecto al tamaño de grano, es importante considerar que granos pequeños proporcionan mejor acabado superficial en las piezas fundidas, pero los granos grandes son más permeables, facilitando esto la salida de los gases durante el vaciado.

IV.2.1.- TIPOS DE ARENA

La arena sílica (SiO_2) se encuentra en muchos depósitos naturales, y es adecuada para propósitos de moldeo porque puede resistir altas temperaturas sin descomponerse. Esta arena es de bajo costo, tiene gran duración y se consigue en un amplia variedad de tamaños y formas de granos. Por otra parte, tiene una alta relación de expansión cuando está sometida al calor y tiene cierta tendencia a fusionarse con el metal. Si contiene un alto porcentaje de polvo fino, puede ser un peligro para la salud.

La arena sílica pura no es conveniente por sí misma para el trabajo de moldeo, puesto que adolece de propiedades aglomerantes. Las propiedades aglomerantes se pueden obtener por adición de 8 a 15% de arcilla. Los tres tipos de arcilla comúnmente usados son la caolinita, illita y bentonita; sódica y cálcica. La bentonita, es usada con más frecuencia, y proviene de cenizas volcánicas.

Algunas arenas de moldeo naturales, se mezclan adecuadamente con arcilla al extraerla en las canteras y sólo se requiere agregarles agua para obtener una arena conveniente para moldeo de piezas fundidas de hierro y metales no ferrosos. La gran cantidad de materia orgánica encontrada en las arenas naturales impide que sean lo suficientemente refractarias para usos en temperaturas elevadas, tal y como en el moldeo de metales y aleaciones con alto punto de fusión.

Las arenas de moldeo sintéticas se componen de sílice lavada de granos agudos, a los que se añade 3 a 5% de arcilla. Con las arenas sintéticas se genera menos gas, ya que se requiere menos del 5% de humedad para que desarrolle su resistencia adecuada.

El tamaño de los granos de arena depende del tipo de la pieza que se ha de moldear. Para piezas de tamaño pequeño y complicadas es más conveniente una arena fina con objeto de que los detalles del molde aparezcan precisos. A medida que aumenta el tamaño de la pieza, las partículas de arena deberán de ser más grandes para permitir que los gases generados en el molde se escapen. Los granos agudos, de forma irregular, por lo general se les prefiere porque se entrelazan y le dan mayor resistencia al molde.

Aunque el sílice y los subgrupos de sílice constituyen la mayoría de los sistemas de arena, otros tipos de arena pueden ser usadas. Dependiendo de la localización geográfica de la fundición y, más importante, debido a las cualidades técnicas, otros agregados pueden ser utilizados. Existe una amplia variedad disponible de agregados para el fundidor, incluyendo olivina, cromita y zirconio. Estas arenas pueden ser utilizadas como base o arenas de careo para reducir y/o eliminar defectos de expansión y penetración de metal mientras se promueve la solidificación.

IV.2.2.- ACONDICIONAMIENTO DE LA ARENA.

Las características propias para una buen proceso de fundición dependen críticamente del acondicionamiento de la arena, y del sistema de fundición que se ha de emplear, así mismo, la examinación periódica de la arena dará como resultado piezas fundidas de buena calidad.

La arena verde está siempre en un estado de trabajo ya sea que se encuentre en el proceso de enfriamiento, molienda, moldeo, en espera del proceso de solidificación de vaciados o templándose en un silo de arena de retorno. El hecho de que la arena verde es constantemente reciclada con pequeñas adiciones de materias primas es una de sus ventajas inherentes. Sin embargo, para conocer y controlar un sistema de arena verde, existen ciertos cambios que deben ser entendidos cuando la temperatura de la arena es elevada durante el proceso de vaciado y enfriamiento de piezas dentro del molde.

Primero, el agua es removida en forma de vapor. Si la temperatura de la arena es elevada arriba de 100°C el agua libre en la superficie es removida. La cantidad de agua libre removida puede ser estimada por el contenido de humedad determinado en el laboratorio de arena. Este cambio es reversible. Si la adición de calor fuera detenida en un punto debajo de aproximadamente 316 °C, una adición de agua y molienda podría restituir la mezcla de arena-arcilla a las propiedades normales de trabajo.

Segundo, a temperaturas mayores que aproximadamente 316 °C para la bentonita cálcica y 648 °C para la bentonita sódica, el agua cristalina, a menudo referida como agua combinada químicamente, es removida de la estructura enrejada de la bentonita. Esta etapa es irreversible y la fuerza aglutinante de la bentonita se pierde. Cuando secciones de la arena de moldeo alcanzan estas temperaturas, las bentonitas contenidas en estas áreas son térmicamente destruidas y son algunas veces llamadas arcilla muerta.

Una cierta cantidad de bentonita nueva debe ser agregada después de cada ciclo del sistema para reemplazar la bentonita destruida térmicamente. Aún más, arcilla adicional debe ser agregada para cubrir la arena proveniente de los corazones, así como para reemplazar las pérdidas por colección de polvos y las pérdidas naturales.

Dependiendo de la temperatura y la atmósfera del molde durante el vaciado, el aditivo de carbón que regresa al molino consistirá de una combinación de carbón, coque y ceniza. Si existiera oxígeno presente en el molde, a elevadas temperaturas, el carbón se quemará y formará partículas de ceniza. Si la atmósfera en el molde fuera inerte a elevadas temperaturas, el carbón sería transformado en coque. Coque y ceniza son a menudo referidos como formas muertas de carbón y deben ser reemplazados.

Aditivos especiales, tal como celulosa, es térmicamente destruido a temperaturas de 93-204°C. Estos aditivos deben ser reemplazados. A continuación se enuncian algunas propiedades para determinar la calidad esencial de la arena.

IV.2.2.1.- PERMEABILIDAD

Es la propiedad porosa de la arena que permite el escape de los vapores y gases que se forman dentro de la cavidad del molde, para así producir piezas de buena calidad y no presenten porosidad, mal llenado o formado de la piezas.

IV.2.2.2.- RESISTENCIA

La arena debe ser cohesiva hasta el grado de que tenga suficiente ligazón, tanto el contenido de agua como el de arcilla afectan la propiedad de la cohesión.

La resistencia a la compresión en verde puede incrementarse o disminuirse por la cantidad y/o efectividad de la molienda. Existen también una variedad de otras variables del proceso que pueden contribuir a la variación de la resistencia a la compresión en verde. Estos podrían incluir, pero ciertamente no limitado a; arena caliente, contenido de humedad, dilución de arena de corazones, adición de arena nueva, contenido de arcilla, compactabilidad, afino del grano de arena, calibración del equipo de laboratorio, calidad y variaciones de las materias primas, mejores y más eficientes sistemas de desmoldeo y cambios en la relación arena / metal.

Cambiar la cantidad total de arcilla y agua puede alterar la resistencia a la compresión de la arena verde, la permeabilidad y otras propiedades físicas. Generalmente, un porcentaje más alto de arcilla, hasta 12%, traerá como resultado aumento en la resistencia.

La cantidad de agua puede también tener un gran efecto en las resistencias a la compresión en verde, en seco y en caliente. Generalmente, incrementando el agua se incrementa la resistencia a la compresión en verde hasta un punto, referido como el punto de templado. Incrementos adicionales de agua traerán como resultado un decremento en la resistencia a la compresión en verde. Ambas resistencias a la compresión, en seco y en caliente, muestran un incremento en la resistencia con forme se incrementa la humedad dentro de un rango normal.

IV.2.2.3.- REFRACTARIEDAD

Es la propiedad de la arena para resistir altas temperaturas, sin fundirse.

Un molde de arena debe resistir la temperatura de vaciado de la aleación fundida. Una arena sílice en forma pura, 98% SiO_2 , tiene un punto de fusión de aproximadamente 1704 °C. Si el contenido de SiO_2 en la arena se reduce, entonces el punto de fusión también descenderá. Existen varios subgrupos de arena base sílice, como la arena de lago por ejemplo, que tienen porcentajes reducidos de SiO_2 y temperaturas correspondientes de fusión de aproximadamente 1538 °C dependiendo de la composición de la arena. Las temperaturas de vaciado para el aluminio están por debajo de estas temperaturas de fusión.

Es más importante comprender que si el contenido de sílice de la arena del sistema se reduce a un nivel crítico, el acabado superficial de los vaciados de aleaciones con altas temperaturas de vaciado puede deteriorarse debido a la pérdida de refractariedad de la arena. Una adición constante de arena nueva en el sistema ayuda a reponer el contenido de sílice del mismo y a drenar las cantidades excesivas de ceniza, polvos finos y arcilla destruida térmicamente. Este flujo de arena nueva puede ser el resultado de arena proveniente de corazones que es separada de las piezas durante el desmolde.

IV.2.2.4.- TAMAÑO Y FORMA DE GRANO

La arena debe tener un tamaño de grano de acuerdo a la superficie de la pieza a fabricar y los granos deben de ser irregulares hasta tal grado que mantengan suficiente resistencia a la cohesión.

Todo las arenas de fundición se agrupan en cuatro categorías de formas de grano: redondeado, subángular, angular y compuesto. Estas características también afectan la habilidad del molde para apoyar la evacuación de gases formados durante la transformación de agua a vapor y la descomposición de los constituyentes orgánicos de los aglutinantes de los corazones y los aditivos de la arena verde. La correcta distribución de la arena es también crítica para reducir la ocurrencia de defectos por expansión de arena.

Un grano de arena redondeado requerirá la menor cantidad de arcilla y agua, porque los granos de arena redondeados no tienen cualquier esquina afilada y los bordes quebradizos que pueden separarse fácilmente, ellos tienden a ser más estable y retienen su tamaño original y forma a través de muchos ciclos de moldeo.

Las arenas con granos de formas angulares tienden a estropearse durante los procesos de la fundición. En la mayoría de estos el deterioro ocurre temprano, en su introducción en el sistema. Cuando los granos angulares permanecen en un sistema de arena, se vuelven más redondeados y muestran características más cercanas a aquellos de arenas redondeadas.

Muchas fundiciones de aluminio usarán mezclas de arenas de granos angulares y granos finos para mejorar el acabado de la superficie del modelo sacrificando la permeabilidad del molde.

La forma de grano subángular mucho más angosta, y con bordes angulares más afilados y redondeados, exhiben propiedades entre granos redondeados y angulares.

IV.2.2.5.- COLAPSABILIDAD.

Es la propiedad de la arena para permitir al metal contraerse después de la solidificación.

IV.2.3.- PRUEBAS DE LA ARENAS

Existe una variedad de pruebas de laboratorio que se efectúan en la arena para auxiliar a los operadores y al personal de control de calidad en la eliminación de los problemas de calidad asociados con el vaciado y moldeo. Los resultados de las pruebas cuantifican importantes propiedades de la arena para establecer condiciones en el sistema y finalmente ayudar a reducir la variación de la arena y las materias primas que se alimentan.

Estas mismas pruebas también son en extremo útiles para asegurar la eficiencia y precisión de las máquinas de producción y los dispositivos de control en línea, Es

en extremo importante que los técnicos del laboratorio sigan los procedimientos de prueba estándares y mantengan un programa regular de calibración de instrumentos para asegurar la precisión de los resultados del laboratorio.

Para determinar la calidad esencial de la arena de fundición se hacen necesarias algunas pruebas periódicas. Las propiedades cambian por contaminación con materiales extraños, por la acción de lavado en el recocido, por el cambio gradual y la distribución de los tamaños de grano, y por la continua exposición a altas temperaturas. Las pruebas pueden ser tanto químicas como mecánicas, pero aparte de la determinación de los elementos indeseables en la arena, las pruebas químicas son de poco uso.

La mayoría de las pruebas mecánicas son simples y no requieren equipo elaborado. Varias de las pruebas están diseñadas para determinar las siguientes propiedades de la arena de moldeo.

IV.2.3.1.- PRUEBA DE DUREZA

Opera bajo el principio de que la profundidad de una bola de acero penetre en la arena, con un probador de dureza. Una bola de acero de 5.08 mm. de diámetro bajo la presión de un resorte (2.3N) se oprime contra la superficie del molde y la profundidad de penetración se indica en la carátula en milímetros.

IV.2.3.2.- PRUEBA DE FINURA

El afino de grano es uno de los aspectos más importantes en el control de la arena verde. Una fundición puede mantener todas las materias primas que restituyen la arena con una especificación muy cerrada, Si tienen una molienda y/o prácticas de molienda deficientes, los problemas del control de la arena persistirán. La función de un molino es activar la bentonita disponible dentro de la arena. Esta es una tarea en extremo difícil que requiere una cantidad extremada de energía. Debido a que una mezcla de agua y arcilla es en extremo tenaz. La prueba consiste en un molino que utiliza ruedas que incorporan fuerzas tanto de compresión como de corte para activar las partículas de bentonita y untar la masilla de bentonita sobre los granos de arena. Las ruedas del molino son extremadamente importantes para generar las cargas apropiadas de compresión y corte requeridas para desarrollar plenamente las propiedades físicas de la arena de moldeo. Un completo conocimiento de la secuencia del ciclo de molienda debe ser mantenido para ayudar a minimizar el tiempo del ciclo y optimizar la efectividad del molino. Adicionalmente las variaciones en las adiciones de materias primas deben ser minimizadas.

Esta prueba es para determinar también el porcentaje de distribución del tamaño de grano en la arena, se realiza en una muestra de arena seca de la cual se extrae toda la sustancia de arcilla. Una serie de tamices normales para pruebas son usados, con mallas, 6,12,20,30,40,50,70,100,140,200, y 270 correspondientes a la especificación U.S. National Bureau of Standard. Estos tamices se apilan y colocan en uno de los muchos tipos de agitadores movidos a motor. La arena se coloca en el tamiz más ralo de la parte superior y después de 15min, de vibración el peso de la arena retenido en cada malla se convierte a un porcentaje base.

IV.2.3.3.- PRUEBAS SOBRE EL CONTENIDO DE HUMEDAD

El agua es un aditivo de la arena extremadamente crítico que puede impactar grandemente la calidad de los vaciados y la operación del equipo para preparación de arena. La prueba de compactabilidad es el mejor método para controlar las adiciones de agua en el molino. La adición de agua variará, puesto que la cantidad de agua agregada a la arena es una función de las variables de composición y proceso. Controlar la compactabilidad cuenta para los cambios ligeros en la composición de la arena y asegura que se efectúe la correcta adición de agua para alcanzar propiedades de moldeo constantes. Si la cantidad de agua cambia drásticamente para mantener un valor meta de compactabilidad, podría indicar que otro componente de la arena se ha salido de control. Los controladores de compactabilidad automáticos instalados en línea con el molino reducen la variación y aseguran un control apropiado.

El contenido de humedad de una arena de moldeo, varía de acuerdo con el tipo de molde que se ha de hacer y la clase de metal que se va a colar. Para una condición dada hay un rango dentro del cual deberá mantenerse el porcentaje de humedad con objeto de obtener resultados satisfactorios.

El método más preciso para la determinación de la humedad en las arenas de moldeo es el de secar la arena y anotar su peso antes y después del secado. El indicador de humedad contiene unidades calefactoras eléctricas y un ventilador para forzar el aire caliente a través del platillo filtro que contiene la muestra de arena. Pesando la arena después de que ha secado y notando la diferencia entre las lecturas iniciales y final se puede determinar el porcentaje de humedad. El contenido de humedad debe variar de 2 a 8%, dependiendo del tipo de moldeo que se haga.

IV.2.3.4.-PRUEBA DE CONTENIDO DE ARCILLA

La prueba del azul de metileno determina el porcentaje de bentonita disponible en una muestra de arena. Esta prueba de laboratorio proporciona información crítica acerca de las correctas adiciones de arcilla para mantener los niveles de ésta entre los límites de control superior e inferior. La prueba no puede diferenciar entre bentonita sódica y cálcica. Por lo tanto puede sólo indicar la cantidad total de bentonita disponible en el sistema.

A diferencia de la prueba del azul de metileno, la prueba de la AFS (American Foundrymen's Society) de la arcilla es una prueba de laboratorio que indica el porcentaje total de material fino en la arena. Esto incluye materiales menores a 20 micrones y/o materiales que sedimentan en el agua a una velocidad menor a una pulgada / minuto. Estos materiales incluyen la arcilla disponible, arcilla muerta, granos finos de arena, ceniza, coque, carbón y celulosa. Los porcentajes de la AFS de arcilla siempre serán más altos cuando se comparan a los del azul de metileno, debido a que contiene ambas bentonitas, disponible y térmicamente destruida, junto con cualquier otra partícula extremadamente fina. Rastreando la diferencia entre los porcentajes de la arcilla de la AFS y los de azul de metileno, una fundición puede determinar si el contenido de material fino se está incrementando. Esta diferencia puede ser grandemente afectada por las adiciones de arena nueva o la dilución de arena de corazones. Generalmente, conforme el porcentaje de arcilla de la AFS se incrementa mientras el nivel de arcilla de azul de metileno permanece constante o disminuye, se requiere más agua para mantener una compactabilidad constante debido a un incremento en la superficie de contacto del sistema.

Otra prueba para determinar el porcentaje de arcilla en la arena de moldeo consiste en un horno quemador, una balanza y pesos y un lavador de arena. Se saca una cantidad de arena y luego se agrega una solución a base de sosa cáustica. En seguida se mezcla durante un tiempo, y la solución cáustica absorbe a la arcilla. Este proceso se repite tres veces. La muestra de arena se seca, después se pesa, y se compara con la muestra original seca y luego se determinan las pérdidas de arcilla.

IV.2.3.5.- PRUEBA DE PERMEABILIDAD

Una de las cualidades esenciales de la arena de moldeo, es la permeabilidad suficiente para permitir el escape de los gases generados por el metal caliente. Depende de varios factores, incluyendo la forma de los granos de arena, su finura, su grado de compactación, contenido de humedad, y de la calidad de aglutinante presente. La permeabilidad se mide por la cantidad de aire que pasa a través de una muestra dada de arena en un tiempo prescrito y bajo condiciones normales. Las arenas de grano grueso son naturalmente más permeables, pero cuando la arena de grano grueso se añade a la de grano fino, primero disminuye la

permeabilidad y después aumenta. La permeabilidad aumenta con el contenido de humedad, hasta aproximadamente 5% de humedad.

Existe un número de permeabilidad, el cual puede ser determinado rápidamente con la fórmula siguiente:

$$\text{Numero de Permeabilidad} = \frac{V \times H}{P \times A \times T}$$

Donde el número de la permeabilidad es igual al volumen de flujo de aire en centímetros cúbicos que pasa por el espécimen, en un centímetro cúbico en área con una presión de 1 gramo por centímetro cuadrado.

V = volumen de aire = 2000 centímetros cúbicos.

H = Altura del espécimen de arena = 1 centímetro.

P = aire presurizado = 10 gramos por centímetro cuadrado.

A = sección de cruz = 20.268 centímetros cuadrados.

T = tiempo para 2000 centímetros cúbicos de aire de flujo a través del espécimen.

Donde: V, H, P, A, son constantes.

IV.2.3.6.- PRUEBAS DE RESISTENCIA

Se han desarrollado varias pruebas de resistencia para probar la fuerza de agarre de varios materiales aglomerantes en la arena en verde y en arena seca. Las pruebas de compresión son las más comunes, aunque algunas veces se hacen pruebas de tensión, corte y algunas ocasiones pruebas en sentido transversal. El procedimiento varía de acuerdo al tipo de equipo utilizado, pero, en general, las pruebas son similares a las hechas por otros materiales. La naturaleza frágil de la arena requiere una consideración especial al manejar y someter a carga un espécimen de prueba.

La prueba de la resistencia a la compresión en verde es útil para ayudar en la determinación del grado de molienda alcanzado. Un incremento en la resistencia a la compresión en verde se dará de acuerdo a cómo está procediendo el proceso de molienda. Para maximizar la eficiencia de la molienda, todo esfuerzo debe hacerse para mantener los elementos mecánicos del molino. Es importante reemplazar las piezas de desgaste ya gastadas, tales como ruedas y arados y rutinariamente ajustar estos componentes a los ajustes recomendados para maximizar su desempeño y minimizar su desgaste. Un programa de mantenimiento preventivo debe ser establecido para asegurar que el molino es efectivo. Es también importante que tanto el personal de mantenimiento como el de operación sea detalladamente entrenado. En el ambiente actual de

incrementos en producción y carga proveniente de corazones al sistema, es imperativo que se efectúe todo intento para maximizar la efectividad de los molinos y el proceso de molienda.

Las máquinas universales someten a cargas al espécimen previamente hecho de 50 mm. de longitud, 50 mm. de diámetro mediante un péndulo de peso muerto movido por un motor, que tiene una velocidad uniforme de carga. Esta máquina está prevista con dispositivos para probar la resistencia a la tensión y compresión de las arenas de moldeo o de los corazones así como sus características de resistencia y deformación.

IV.2.4.- EQUIPO PARA EL ACONDICIONAMIENTO DE LA ARENA.

Propiamente la arena bien acondicionada es un factor importante en la obtención de una buena pieza fundida. Las arenas nuevas así como las usadas preparadas adecuadamente, contienen los siguientes resultados:

- 1.- El aglutinante está distribuido más uniformemente en los granos de arena.
- 2.- El contenido de humedad está controlado y además las superficies particulares están humedecidas.
- 3.- Las partículas extrañas son eliminadas de la arena.
- 4.- La arena se ventila de tal manera que no se compacta y esté en condiciones propias para el moldeo.
- 5.- La arena es enfriada a la temperatura próxima a la de una habitación.

Por razones de que acondicionar la arena a mano es difícil, la mayoría de las fundiciones tienen equipo apropiado para esta operación. El mezclador para la preparación de la arena tiene dos rodillos en los cuales está montado una combinación de rastras y muelas trituradoras impulsadas por medio de una flecha vertical. Las dos muelas trituradoras están dispuestas de tal manera que la arena puede ser procesada en forma continua. Las muelas trituradoras proporcionan una acción intensa de frotamiento y amasado. El resultado es una mezcla de los granos de arena con el material aglutinado.

IV.3.- EQUIPO DE MOLDEO

Las máquinas pueden eliminar mucho del trabajo de moldeo, produciendo al mismo tiempo mejores moldes. Las máquinas de moldeo varían considerablemente en diseños y métodos de trabajo y se denominan de acuerdo con la forma en que se realice el trabajo de apisonado.

Las máquinas que utilizan este principio se describen a continuación.

- **Máquina de Percusión.**

La máquina de moldeo simple por percusión está equipada con pernos ajustables para permitir el uso de diferentes tamaños de cajas dentro de la capacidad de la máquina. En las operaciones de esta máquina, el molde es llenado a una corta distancia por salidas de aire a presión y luego es sacudido. Esta acción causa que la arena se empaque sólo alrededor del modelo y en la línea de separación, variando de acuerdo con la altura de la caída o la profundidad de la arena en la caja. El apisonado uniforme en torno del modelo suministra mayor resistencia al molde y reduce la posibilidad de protuberancias, costras o derrumbes. Las piezas producidas bajo estas condiciones varían ligeramente en tamaño o peso. Los pernos elevadores en la máquina se ajustan a la caja y la elevan de la placa de coincidencia después de que el molde ha sido terminado. Las máquinas de moldeo por percusión obviamente manejan una parte de la caja cada vez, adaptándose especialmente para trabajos de gran tamaño.

- **Máquinas de Prensado**

Las máquinas de prensado comprimen la arena de la caja entre la mesa de la máquina y un pistón superior. La mayor densidad del molde se obtiene en el lado sobre el cual se aplica la presión. Debido a que es imposible obtener una densidad uniforme en el molde por este método, las máquinas de prensado están limitadas a moldes de sólo unos cuantos centímetros de espesor .

- **Máquinas de Percusión Prensado.**

Muchas máquinas como la que se muestra en la figura 4-1, utilizan los 2 principios de percusión y prensado. Para producir un molde en dichas máquinas, se arma la caja con la placa de coincidencia entre la tapa y la base, colocando el conjunto invertido sobre la mesa de la máquina. Se patea la arena dentro de la base y se nivela poniéndole un tablero inferior arriba. Luego la acción de percusión apisona la arena en la base. El conjunto se voltea, se llena la tapa con arena y se nivela. En la tapa de la caja se coloca un tablero de presión y la plancha del pistón de la máquina se pone en posición. Al aplicar la presión la caja se encuentra prensada entre la plancha y la mesa, comprimiendo la arena de la tapa a la densidad apropiada. Después que se quita la presión, se retira la plancha. La placa de

coincidencia se hace vibrar después de lo cual se retira la base. Esta máquina elimina seis operaciones manuales diferentes: apisonado, alisado de la superficie de separación, aplicación de la arena de separación, pincelado alrededor de los moldes, golpeteo del modelo y corte del alimentador.



Figura IV -1. Máquina de Percusión Prensado

- Máquina de Percusión Prensado con Volteo

Esta máquina similar a la convencional de moldeo por percusión prensado tiene dos brazos que sujetan a la caja después de vibrarla y levantarla a suficiente altura para poder ser volteada. Luego se llena la tapa con arena y se apisona por la acción de prensado, a continuación se sujeta con dos grapas sobre la plancha superior, retirándose de la placa de coincidencia. Este aditamento de elevación maneja la tapa en tanto que la placa de coincidencia se quita manualmente de la base. Cuando el modelo está listo para cerrarse, se regresa la tapa a la posición conveniente y se levanta la base hasta que las dos partes del molde quedan juntas. Esta máquina ha sido diseñada para manejar cajas grandes que también son manejadas convenientemente en la máquina común de percusión prensado.

- Máquina de Percusión con volteo y Extracción del Modelo.

Este tipo de máquinas fueron diseñadas para moldes grandes arriba de 5500 Kg. Ya que son difíciles de manejar a mano. Primero se compacta la arena por percusión. Después de que la arena se empareja se coloca una placa de fondo sobre el molde, fijándola en esa posición y luego todo el conjunto se voltea y el modelo se extrae del molde hidráulicamente. Esta máquina se usa para moldeo por separado de la tapa y la base; en la mayoría de los casos la cavidad queda solamente en la base.

NEGINDO DE VITIVA
FALTA DE ORIGEN
NO SISSEL

- Lanzadora de Arena.

El apisonado uniforme de la arena en un molde es una operación importante en la producción de piezas fundidas. Para moldes grandes, se ha desarrollado un dispositivo mecánico conocido como lanzadora de arena. Es una unidad automotivada sobre una vía angosta. El suministro de arena se lleva en un gran depósito de aproximadamente 8.5 m³ de capacidad que se puede volver a llenar a intervalos por medio de un equipo aéreo. Una banda transportadora, alimenta desde una tolva sobre el marco del extremo fijo transporta la arena hasta el cabezal impulsor rotativo. El cabezal impulsor que se encuentra cerrado contiene una pieza rotatoria en forma de copa que arroja la arena al molde. Esta pieza girando a alta velocidad lanza más de un millar de cubos pequeños de arena por minuto. La capacidad de apisonado de esta máquina es de 0.2 a 0.28 m³, o 450 Kg. de arena por minuto. La densidad del apisonado se puede controlar por la velocidad del cabezal impulsor. Para altas producciones se dispone de máquinas con capacidad de 30 Kg. de arena por segundo.

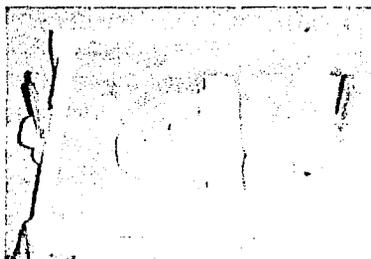
IV.4. -MOLDEO EN ARENA VERDE

No hay ninguna correlación entre el término verde y el color del molde, Verde, es llamada así debido al contenido de humedad en la arena. Es quizás el método empleado más común, la arena, mezclada con un aglutinante y agua, se mantiene húmeda de manera que no se seque durante el proceso de vaciado. Así, el metal fundido se vierte tan pronto como sea posible inmediatamente después de la formación de la cavidad del molde. Los moldes de arena verde tienen suficiente resistencia en la mayoría de sus aplicaciones, así como buena retractibilidad, permeabilidad y reutilización, también son los menos costosos. Por lo tanto, son los más ampliamente usados, aunque también tienen sus desventajas, ya que la humedad en ella puede causar defectos en algunas fundiciones, dependiendo del metal y de la forma geométrica de la pieza.

La fundición en molde de arena verde se emplea para producir fundiciones de configuración intrincada, ya que la arena verde ofrece menos resistencia a la contracción normal del modelo cuando el metal solidifica.

Un conocimiento básico de los materiales que constituyen un sistema de arena verde y del equipo requerido para preparar y mantener la integridad del sistema es en extremo importante para asegurar la calidad de los vaciados. La condición y tipo del equipo para preparación pueden tener un efecto pronunciado en el tipo y cantidad de las materias primas utilizadas en una operación particular. Además, el tipo de aleación, tamaño y geometría, junto con la cantidad de material para hacer los corazones requeridos por la pieza, también determinan la exacta recuperación por composición del sistema de arenas, se debe tener un conocimiento completo de las materias primas y las interrelaciones entre estos componentes y el equipo utilizado para la preparación.

La forma de la cavidad del molde de arena como se muestra en la figura 4-2 se da recubriendo un modelo (patrón que consiste en un duplicado de la pieza o parte que se va a fundir), apisonando ésta perfectamente alrededor del modelo de manera que reproduzca su forma con toda precisión.



(a)



(b)

Figuras IV-2 (a) y (b). Muestran diferentes Cavidades de modelos a reproducir y corazones en "café"

Este proceso se realiza dividiendo el molde en dos partes. Después se remueve el modelo, haciendo la misma operación para la otra mitad del molde.

El molde debe contener el sistema de vaciado, figura IV-3 y de mazarotas, así como corazones en caso de tener el modelo partes huecas o agujeros.

En la figura IV-4 se muestran corazones listos para ser usados en los moldes, su forma es cilíndrica según las partes huecas a formar en las piezas.



Figura 4-3. Vaciado del metal



Figura 4-4. Ejemplo de corazones

Debido a que el molde debe romperse para poder sacar la fundición, se tiene que hacer un molde para cada pieza que se quiere fundir figura 4-5. Después de un cierto período de enfriamiento, el metal solidifica, se enfría y por último se separa la arena. La fundición se saca del molde, y posteriormente pasa por un proceso de limpieza e inspección. En algunas ocasiones requiere de un tratamiento térmico para mejorar sus propiedades metalúrgicas.

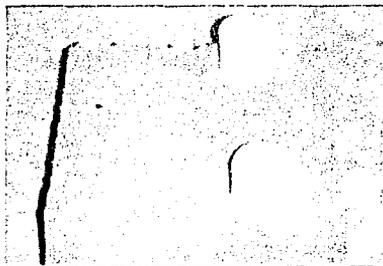


Figura 4-5. Molde listo para ser roto y sacar la fundición

IV.5.- MOLDEO EN ARENA SECA

En arena seca, se emplea un aglutinante orgánico en lugar de arcilla, la humedad se elimina completamente calentando la arena en un horno o estufa a una temperatura que fluctúa entre 200°C y 316 °C. Esto da como resultado un molde más duro y más resistente con una menor tendencia a la formación de vapor.

Los moldes de arena seca se usan para producir fundiciones de mayor exactitud dimensional que las producidas en moldes de arena verde. Sin embargo, el molde de arena seca es más costoso y la velocidad de producción es más reducida debido al tiempo de secado. Sus aplicaciones se limitan generalmente a fundiciones de tamaño medio y grande y a velocidades de producción bajas.

TESIS CON
FALTA DE ORIGEN

IV.6.- POROSIDAD

Uno de los mayores problemas asociados con la fundición de aleaciones de aluminio es la formación de cavidades a escala micrométrica, llamada micro porosidad.

La microporosidad es un de las principales causas en la reducción de propiedades mecánicas, particularmente, resistencia a la fatiga, así como es una pérdida de presurización y una degradación de la apariencia de la superficie de las piezas.

La formación de la microporosidad es generalmente atribuida a dos factores, por rechupe y por evolución de burbujas de gas de hidrógeno.

La mayoría de los estudios de microporosidad fueron efectuados usando mediciones por densidad, que proporcionan valores de contenidos a granel de microporosidad. Con el desarrollo de la computadora basada en un sistema de análisis visual ahora es posible estudiar la microporosidad, poro por poro, de éste modo, haciendo factible la determinación entre gas y porosidad de rechupe, basado en diferencias en sus características micro estructurales.

En una fundición práctica el ingeniero encontrará posible el identificar si la causa de microporosidad en una muestra es debido primeramente a evolución de gas de hidrógeno, que es provocado por un exceso de agua o humedad en la composición de la arena de moldeo, necesitando así encontrar la cantidad de agua o aditivo requerido en la arena para la fundición, es importante considerar que granos pequeños de arena proporcionan mejor acabado superficial en las piezas fundidas, pero los granos grandes son más permeables, facilitando esto la salida de los gases durante el vaciado.

Por rechupe o contracción se presenta como el resultado de la disminución de solubilidad de los gases como función de la temperatura del líquido. A medida que la temperatura disminuye, la solubilidad del gas disminuye y el gas es atrapado en el frente de solidificación del metal.

Ahora bien, un método para eliminar o reducir la porosidad por contracción en aleaciones coladas y forjadas de aluminio, consta de utilizar en ellas el cobre, ya que es el elemento base del endurecimiento por precipitación y también para la reducción de porosidad que se produce por la contracción durante la solidificación de las aleaciones.

IV.7.- DESGASIFICACIÓN

Ya a que la absorción del hidrógeno es común en la fusión de aleaciones de para fundición, la remoción de hidrógeno es necesaria a fin de evitarla la porosidad ocasionada por la deserción de Hidrógeno durante la solidificación. Ya que la evolución de porosidades por hidrógeno es función de la rapidez de enfriamiento, de igual manera una solidificación rápida como la presente en el proceso de fundición, puede minimizar los de porosidades en las piezas, ya que el gas atrapado queda de una manera más dispersa, presentándose en forma de microporosidades y quizás no sea perjudicial, para los requerimientos de la pieza. Históricamente el desgasificado de aleaciones de aluminio se ha realizado por descomposición de compuestos químicos tales como sales o pastillas, finalmente nos generan gases (cloro o dióxido de carbono), o por la inyección gases (Nitrógeno, Cloro, SF₆) purga por medio de lanzas o tubos. En al actualidad se usan comúnmente tapones porosos o sistemas tipo Flecha/ rotor ofreciendo una mejor eficiencia de desgasificación, debido a la generación de grandes cantidades de burbujas de un diámetro muy pequeño < 5 mm mejorando la cinética de la reacción entre el líquido y el gas. El desgasificado de aleaciones para fundición se logra por medio de un gas inerte tal como argón o nitrógeno, en algunos casos se agrega pequeñas cantidades gases halógenos (cloro) o recientemente se ha usado el Hexafluro de azufre en combinación con algún gas inerte. De acuerdo a estudios las prácticas han mostrado, que no solo el hecho algún gas halogenado, nos intuirá una mejor desgasificado es necesario controlar el diámetro de la burbuja de gas de purga sea lo suficientemente pequeña (normalmente 5 mm o menos) a fin de obtener una eficiencia de desgasificación adecuada. El uso de gases halogenados contribuye a una mejor remoción de actuando como agente colector de inclusiones y reforzando la remoción de hidrógeno del baño. Por otro lado la selección de gas de la purga afecta a la formación de impureza resultante durante el proceso de desgasificado.

Por otra parte el proceso de Desgasificado puede afectar el efecto de la modificación y la respuesta de la refinación de grano. A tiempos largos de desgasificación y alto flujos se tienden a afectar de alguna manera la modificación/ refinación de grano, cuando se realiza la desgasificación posterior a la modificación/ refinación de grano. Por lo que es muy recomendable realizar el proceso de desgasificación antes de el proceso de modificación/ refinación de grano.

Recientemente la inyección de fundente se ha acoplado con la técnica de Flecha / rotor, ganando amplia aceptación en el procesamiento de las aleaciones de aluminio para fundición en las técnicas de tratamiento de metal. La inyección de fundente mejora la acción de limpieza y dosificación del flujo que la operación de adición manual del mismo. La reciente tecnología de Inyección de fundente acoplada con dispersión de gases con la tecnología de Flecha/ Rotor da por resultado tratamientos mas cortos, reducción de formación de impureza, mejorando de manera global el proceso de adición de fundente y de desgasificado. No obstante que en el proceso la acción de desgasificado es

generada por la acción de dispersión del gas inyectado por la flecha / rotor se genera una mejor mezcla entre el fundente y el metal, mejorando la limpieza del metal.

El proceso de inyección de fundente puede usarse como sistema de adición de elementos de aleación, modificadores de estructura de Silicio, ó refinadores de grano. La aplicación de inyección de fundente generalmente da por una mayor eficacia en la recuperación de los elementos inyectados.

IV.7.1.- FILTRACIÓN

La eliminación de las inclusiones en aleaciones de aluminio para fundición puede lograrse por (a) Sedimentación en el horno; las inclusiones más grandes se sedimentarán al fondo del horno; (b) Flotación normalmente obtenida con la inyección de fundente o desgasificado tipo dispersión (o ambos en conjunción) donde por lo menos una porción de inclusiones del baño separarán hacia la superficie, siendo retiradas posteriormente por el desnatado; o (c) filtración positiva.

Recientemente se ha encontrado que la mayoría de inclusiones no se separan fácilmente por las técnicas convencionales, debido a su gran similitud de densidad con respecto al aluminio. Actualmente se cuenta con dos principales sistemas de filtración:

Tipo formación de pastel, donde la acción de filtración se realiza en la superficie del cuerpo del filtro, que está expuesto al flujo, esta filtración es obtenida por los filtros de espuma cerámica. Tipo de filtración profunda, que ocurre dentro del cuerpo del filtro, ofrecido por los filtros de partícula aglomerada. (Figura 4-6)

Los Sistemas empleados actualmente en fundiciones incluyen los filtros de espuma. Filtros de cerámica celular, Camas filtrantes, y filtros de la partícula Aglomerada.

Filtros celulares y de espuma cerámica.- Operan por el modo del pastel, generalmente remueven películas de óxido muy grandes.

El filtro de partícula aglomerada opera con todo el cuerpo del filtro removiendo partículas más finas.

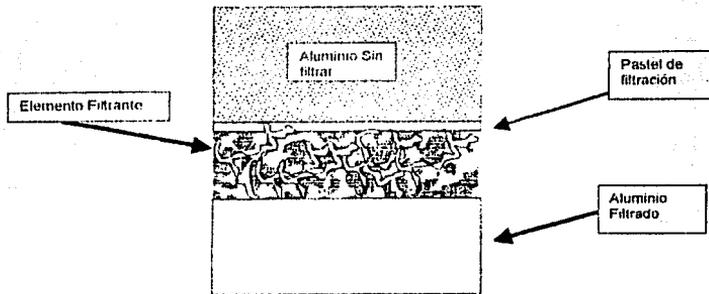


Figura 4-6 Filtración tipo pastel.

En el proceso de fundición de aluminio, como el vaciado en arena y molde se utilizan filtros de espuma cerámica y celulares insertados, en los sistema de colada y alimentación. El filtro de partículas aglomeradas, usadas principalmente En general, los procesos de desgasificado y filtración incrementan la fluidez metal reduce la incidencia de puntos duros en el maquinado, mejora propiedades mecánicas y ofrecen mejores propiedades para el acabado superficial durante las operaciones subsecuentes. Adicionalmente la filtración reduce poros por inclusiones nucleadas por el Hidrógeno solubilizado. El punto más importante radica en el entendimiento apropiado del medio filtrante ya sea la filtración en molde ó en hornos de mantenimiento, y realizar seguimiento de los resultados de la aplicación. Los sistemas de filtración no son la panacea para practicas de fusión inadecuadas y deficiente manipulación del metal aunque a menudo pueden reducir los efectos de tales prácticas. Sin embargo, aún con las mejores prácticas empleadas actualmente, los requerimientos de calidad son cada vez más estrictos, la única manera de cumplir estos requerimientos es la aplicación adecuada de los procesos de desgasificación y filtración, como un final paso antes del proceso de vaciado.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

**V.- LAS ALEACIONES PARA FUNDICIÓN A319 Y A365
CARACTERIZACION TEORICA.**

V.1.-Aleación A319 Datos generales

Esta aleación

A 319.0 designada así por el Sistema ASM por contener 6% Si -3.5% Cu

Nombre comercial:

Aleación A319

NOMBRE ESPECIFICO: Por los diferentes tipos de asociaciones internacionales.

ASTM; SC64D

SAE; 328

UNS número; A03190

ISO; AISI₆Cu₄

COMPOSICIÓN QUÍMICA

Límites de composición Química respecto ASM:

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Otros Elementos
5.5-6.5	1.0	3.0-4.0	0.5	0.1	0.35	1.0	0.25	0.5

Tabla V.1

En el capítulo 3 se mostró la forma de designar las aleaciones. Se determinan las aleaciones de fundición con el dígito (0) para determinar la composición química del lingote y los dígitos (1) y (2) para la composición química de las piezas coladas.

319.0 Composición química del lingote

319.1 Composición química de la pieza colada

Esta aleación es hipereutéctica debido a que contiene un alto contenido de silicio de hasta un 13% es de bajo coeficiente de expansión térmica teniendo una

1981-01-01
FALLA DE ORIGEN

resistencia superior, durabilidad y desgaste, siendo estas de gran importancia por el tamaño y distribución de las partículas del silicio.

Las aplicaciones típicas para las fundiciones en arena de estas aleaciones son en cabezas de cilindros para motores de combustión interna a gasolina y diesel, cárters de cigüeñal, tanques de aceite, y cacerolas para uso en cocina.

En molde permanente, piezas de máquinas de escribir, partes de eje traseros de uso (automotriz).

V.1.1.-PROPIEDADES MECÁNICAS, TÉRMICAS Y ELÉCTRICAS

Temple	Resistencia a la Tensión		Fuerza de Tensión cedida (a)		Elongación (a)(b)	dureza	Fuerza compartida		Resistencia a la fatiga		resistencia cedida de Compresión	
	MPa	ksi	MPa	ksi	%	HB	MPa	ksi	MPa	Ksi	MPa	ksi
Fundición en arena												
Fundición	185	27	125	18	2.0	70	150	22	70	10	130	19
T6	250	36	165	24	2.0	80	200	29	75	11	170	25
Molde permanente												
Fundición	235	34	130	19	2.5	8.5	165	24	70	10	130	19
T6	280	40	185	27	3.5	9.5	185	27

(a) la resistencia y la elongación son mejoradas a bajas temperaturas. b) en 50 mm o 2 in. c) 500 Kg. de carga; bola de 10 mm. d) a 5×10^8 ciclos; R.R. tipo de prueba Moore.

Tabla 1. Propiedades Mecánicas de la aleación A319.0

Módulo de elasticidad en tensión, 74 GPa (10.7×10^6 psi); , 28 GPa (4.0×10^6 psi)

Las propiedades mecánicas de la aleación son relativamente sensibles, cuando hay una cantidad de impurezas mayor que el límite aceptado.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CARACTERÍSTICAS DE LA MASA

Densidad 2.79 g/cm³ (0.101 lb/in³) a 20 °C (68 °F)

PROPIEDADES TÉRMICAS:

Temperatura de líquido 605 °C (1120 °F)

Temperatura de sólido 515 °C (960 °F)

Temperatura de fusión 677 a 815 °C (1250 a 1500 °F)

Coefficiente de expansión térmica lineal:

Rango de temperaturas		Coeficiente promedio	
°C	°F	μm/m K	μin/in°F
20-100	68-212	21.5	11.9
20-200	68-392	23.0	12.8
20-300	68-572	23.5	13.1

Calor específico:

963 J/Kg (K) (0.230 Btu/lb (°F) a 100 °C (212 °F)

Calor latente de fusión:

389kJ/kg (167 Btu / lb)

Conductividad térmica:

109 W/m K (62.9 Btu / ft (h) (°F) a 25 °C (77 °F)

PROPIEDADES ELÉCTRICAS:

Conductividad eléctrica. Volumétrica, 27% IACS a 20 °C (68 °F)

Resistibilidad eléctrica en Arena:

63.9 nΩm a 20 °C (68 °F)

Solución potencial electrolítica:

-0.81 V (arena) y -0.76 V (molde permanente) contra 0.1 N calomel electrodo contenido en una solución de aqueous 53 g NaCl más 3g H₂ O₂ por litro

V.1.2.- CARACTERÍSTICAS DE FABRICACIÓN:

Temperatura de fusión

675 a 815 °C (1250 a 1500 °F)

Temperatura de fundición en Arena:

675 a 790 °C (1250 a 1450 °F)

Temperatura de solución:

500 a 505 °C (935 a 945 °F); conservar una temperatura de 12 h (arena), 8 h (moldé permanente); enfriar en agua a 65 a 100 °C (150 a 212 °F)

Temperatura de envejecimiento para obtener T6:

Es templado el material desde una solución-tratada, 150 a 155 °C (305 a 315 °F) y mantener a temperatura de 2 a 5 h

MAQUINABILIDAD:

Las características de Maquinabilidad son buenas. Para evitar posibles efectos adversos de abrasivos e inclusiones, se recomiendan herramientas de carburo.

ACABADO:

Los acabados en electroplastía son muy buenos en estas aleaciones. En acabados mecánicos o maquinados son de buena imagen y los acabados del anodizado son exactos.

SOLDADURA:

Los resultados en las soldaduras por arco son muy satisfactorias, en métodos de electrodo en atmósfera de gas inerte, pero no se recomienda soldarlas por no tener las mismas características que una pieza fundida.

RESISTENCIA DE CORROSIÓN:

Las aleaciones A319.0 exhiben buena resistencia a la mayoría de las formas comunes de corrosión y reaccionan bien a las capas de conversión química para su protección adicional (anodizado)

V.2 ALEACIÓN A 365.1

Esta aleación es de fabricación especial por la compañía FUMISA que pretende darle a sus piezas de fabricación características especiales como una mejor imagen, brillo, maquinabilidad, reducción de poro, fluidez en el momento de colada, excelente resistencia a la corrosión, menor desgaste por arrastre de material al ser usado, menor contaminación en alimentos y un excelente alargamiento, además de las características que presenta la aleación A319.

La aleación A365.1 esta conformada de dos elementos adicionales Cr y Pb y uno menos Ti, que la aleación A319. Estos tres elementos son los que FUMISA considera, por la experiencia de sus ingenieros lo que le da las características especiales a la aleación A365.1. Denominándola así debido a que se encuentra dentro del grupo de aleaciones donde el contenido de cobre es bajo.

Cromo Cr;

Este elemento tiene como función controlar la "porosidad", su dureza es equivalente hasta 1050 HVickers, por lo que contribuye a la reducción del desgaste por el bajo coeficiente de fricción, otra propiedad del cromo es que no se suelda con el calor creado por la fricción, la alta resistencia a la corrosión es útil para reducir el desgaste bajo condiciones corrosivas, su alto brillo da mejores propiedades ópticas, provoca sedimentos en la aleación a elevadas temperaturas mayor a 0.5%

Plomo Pb;

Entre las principales propiedades del plomo se encuentran peso elevado, alta densidad, suavidad, maleabilidad, bajo punto de fusión y baja resistencia mecánica; además, tiene propiedades de lubricación, baja conductividad eléctrica, alto coeficiente de expansión y alta resistencia a la corrosión. Su alta densidad lo hace adecuado para proteger contra rayos β y α , además siendo ocupado para permitir maquinabilidad en las piezas fabricadas.

Estaño y plomo una combinación de estos elementos mayor 0.5% provoca rompimiento (fragilidad)

Los productos fabricados en esta aleación A365.1 por FUMISA son:

Tolvas para máquinas de tortillas

V.2.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA

Los límites de la composición química no existen en tablas, pero FUMISA estableció los propios.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Cr	Pb
4.09	0.526	1.43	0.154	0.322	0.29	0.131		0.042	0.08

Tabla V.2

VI.- LAS ALEACIONES A319 Y A365 FABRICADAS POR FUMISA Y SU CARACTERIZACIÓN PRACTICA.

VI.1. GENERALIDADES.

En este capítulo veremos la forma en que realizamos las pruebas con las que contamos y se pudieron realizar por medio de los instrumentos, maquinaria y equipo que nos proporciono la escuela (ENEP Aragón).

Después de ponernos en contacto con la empresa FUMISA y plantearles los objetivos que se querían obtener, nos proporcionaron tochos de material con los que se fabrican partes de máquinas tortilladoras (Tolvas, cubre cadenas, sinfín cubre polvos etc.).

Estos tochos se fundieron por medio de un horno que esta basado en el convertidor Bessemer (recipiente en forma de pera) con chumaceras lo que permite se pueda inclinar el recipiente; el horno cuenta con una caja de viento por donde se introduce gas LP y aire por medio de toberas que están en la base del horno; aquí se prepara la carga de material para fundir la aleación; se compone de pistones de automóvil y lamina mil cien, adicionándole plomo y cromo; obtiendose la aleación especial (A365.1) que posee una mejor presentación debido a que tiene mejor acabado superficial y brillo después de maquinado.

La fundición se efectúa en un molde de arena verde; cuya cavidad se hace con un modelo de la pieza (que nos proporciono FUMISA al ya contar con el modelo del tocho) a fundir en un recipiente con arena que se apisona alrededor del modelo de manera que la forma de la pieza se reproduzca con precisión, este proceso se hace dividiendo el molde en dos partes para la fácil remoción del modelo y llenar la cavidad tan pronto como es posible con metal fundido. Después de cierto periodo de enfriamiento el metal solidifica y luego pasa por un proceso de limpieza e inspección.

VI.2.- ENSAYO DE TENSIÓN

Después de la prueba de dureza, la prueba de tensión es la realizada más frecuentemente para determinar ciertas propiedades mecánicas. Una muestra o probeta preparada específicamente se coloca en los cabezales de la máquina de prueba y se somete a una carga axial por medio de un sistema de carga de palanca, mecánico o hidráulico. La fuerza se indica en un disco calibrado. Si se conoce el área transversal original de la muestra, puede calcularse el esfuerzo desarrollado a cualquier carga. La deformación o alargamiento se mide en una longitud establecida, generalmente 2 pulgadas, por un disco medidor llamado extensómetro. Entonces, la deformación unitaria puede determinarse dividiendo el alargamiento medido entre la longitud original marcada en la probeta. En algunos casos, puede utilizarse un medidor de deformación eléctrico para medir la deformación total.

Para maquinarse las probetas y hacerles la prueba de tensión y de dureza Brinell se consiguieron en la Dirección General de Normas, las normas **NMX-W-047-1999-SCFI** para tensión y **NMX-W014-1979-SCFI** para la dureza las cuales se pueden ver en el anexo. (dimensiones Fig. 1)

VI.2.1.- PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS BAJO NORMA.

Las probetas se maquinaron en un torno paralelo en el cual se desbastaron las piezas y se refrentaron, se les hizo un barreno con una broca de centros para poder tornearse a dos centros y tener una mejor concentricidad de la probeta así como evitar vibraciones al maquinarse; se dieron las dimensiones especificadas y se procedió a pulir las probetas, para que tuvieran un acabado superficial a espejo con el cual se aseguraba tener un mejor resultado de las pruebas ya que las rayas residuales de maquinado pueden provocar la fractura prematura de la probeta, falseando los resultados de la prueba.

VI.2.2.- REALIZACIÓN DEL ENSAYO DE TENSIÓN.

En la maquina para tensión se montan las probetas y se sujetan con las mordazas para poder realizar la prueba y se somete a una carga axial por medio de un sistema de carga mecánico; por medio de un extensómetro se pudo medir la elongación de la probeta antes de fracturarse, se tomaban las lecturas de deformación así como de tiempo y la lectura de carga.

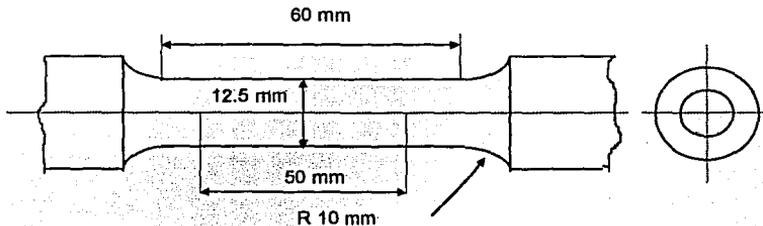


Fig. 1 Dimensiones de la probeta especificadas en la norma.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Carga de Fractura de probetas	A319	
Kg/ cm ²	Ksi	Pa
1223.0321	17.39151646	1.247E-02
1186.9463	16.87837639	1.211E-02
1259.12157	17.90470873	1.284E-02
1219.02219	17.33449554	1.243E-02
1275.16134	18.13279425	1.301E-02
1219.02216	17.33449512	1.243E-02
1219.02216	17.33449512	1.243E-02
1198.97245	17.04938824	1.223E-02
Carga de Fractura de probetas	A365	
Kg/ cm ²	Ksi	Pa
1070.65433	15.22470457	1.092E-02
986.445564	14.02725592	1.006E-02
1098.72392	15.82385414	1.121E-02
1190.95257	16.93534555	1.215E-02
1110.75375	15.79491833	1.133E-02
1114.76369	15.85193967	1.137E-02
1186.9463	16.87837639	1.211E-02

Lecturas de carga de fractura de probetas en diferentes unidades
 Graficas aleación A319.1

VI.3.- PRUBAS DE DUREZA.

Debe tenerse en cuenta que un número o valor de dureza no puede utilizarse directamente en trabajos de diseño, como se puede hacer con un valor de resistencia a la tensión, ya que los números de dureza no tienen significado intrínseco.

La dureza no es una propiedad fundamental de un material, sino que está relacionada con las propiedades elásticas y plásticas. El procedimiento de prueba y la preparación de la muestra suelen ser sencillos y los resultados pueden utilizarse para estimar otras propiedades mecánicas. La prueba de dureza se utiliza ampliamente para inspección y control. El tratamiento térmico o el trabajo efectuado en una pieza metálica resulta generalmente en un cambio de dureza. Cuando se establece el valor resultante de la dureza de un tratamiento térmico a un material dado por un proceso determinado, esa estimación proporcionará un método rápido y sencillo (de inspección y control) para el material y proceso particulares

VI.3.1.PREPARACIÓN DE PROBETAS.

Después de tener los resultados de las pruebas de tensión, de los mismos tochos se cortaron unas probetas, a las cuales se les hizo la prueba de dureza y se prepararon para observar su microestructura, se seccionaron en dos y de una parte se efectuó la prueba de dureza con un durometro Brinell.

VI.3.2.REALIZACIÓN DE LA PRUEBA DE DUREZA BRINELL.

La máquina consta de una prensa mecánica vertical de operación manual la cual esta diseñada para forzar el penetrador de bola en el material, primero se selecciona la base adecuada para hacer la prueba, esta depende de la superficie que se tenga para realizar la prueba, se hacen 6 pruebas en distintos puntos de las probetas teniendo el cuidado de no hacer las pruebas una cerca de la otra ya que esto nos puede ocasionar error en la información, con un penetrador de 2.5 mm a 50 Kg. de carga en la superficie durante 30 seg. en el cual se obtuvo la siguiente información:

VI.4.- ENSAYOS MICROSCOPICOS

Las aleaciones de aluminio abarcan una amplia gama de composiciones químicas y una amplia gama de dureza. Por consiguiente, las técnicas requeridas para las preparaciones metalográficas y su examinación, varían considerablemente.

Las aleaciones más suaves generalmente son mas difíciles de preparar, por pulido mecánico, porque, la deformación causada por cortes se extiende a una profundidad mayor, el empotramiento de partículas abrasivas en el metal durante el pulido es más usual, y el alivio en medio de la matriz y las partículas de la segunda-fase que son considerablemente más duros que el de la matriz, desarrollan aleaciones más duras y rápidas durante el pulido, aunque es más fácil de preparar, presentan una gran variedad de fases y complejidades de estructuras. Sin embargo, existen métodos para sobre llevar las dificultades de preparar y examinar aleaciones suaves y duras.

Muchos métodos son generales y aplican a todos los metales, pero algunos se han desarrollado específicamente para las aleaciones de aluminio.

El metal no debe sobrecalentarse durante la preparación del espécimen, el cuidado extra debe tomarse al usar métodos no convencionales o materiales.

El aluminio es un metal químicamente activo, que deriva su estabilidad y resistencia corrosiva de una película protectora de óxido, que previene como del pulido y grabado de superficies con deterioro rápido. El óxido protege con una

película más espesa, que no permite formar sales de manera controlada, Estas películas pueden usarse para revelar rasgos microestructurales.

Cuando se forman algunos tipos de películas anódicas, en una superficie pulida y cuando la superficie es examinada en una superficie polarizada, reflejando la luz a través de un analizador, se producen efectos de contraste llamativos, que revelan el tamaño de grano y formas de la orientación del mismo.

VI.4.1.- PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS METALGRÁFICAS.

MONTAJE.

En un medio plástico para formar una pieza cilíndrica es un procedimiento aceptado, a menos que el espécimen sea lo suficientemente grande para ser sostenida en la mano, para el lijado y el pulido.

Los problemas especiales relacionados con la selección del método de montaje o del material puede ser causado por incluir aleaciones que no tienen una dureza similar en el mismo montaje, y la necesidad de tener una planicie hasta las orillas.

El montaje medio no debe ser tan duro que impida el pulido del aluminio más suave contenido en el montaje o tan blando que provoque el volado de las esquinas.

LIJADO.

Las aleaciones de aluminio pueden lijarse usando las mismas técnicas para todos los metales, el lijado se realiza sucesivamente por pasos, usando papeles abrasivos para metales de 180, 220,320,400,600,800,1200,1500.

PULIDO

El pulido final en las probetas son generalmente hechas con un alto grado de polvo de óxido de alumina con agua destilada sobre una textura uniforme a través de una corta servilleta de tela. Una suspensión de dióxido de silicio (SiO_2) en agua destilada también es posible usar. Este medio tiene un pH ligeramente básicos y un tamaño del arenisca de 0.04 μm .

Las mismas pautas de limpieza aplican para el óxido de alumina como para el SiO_2 , la tela para pulir debe limpiarse cuidadosamente, inmediatamente después de cada uso para prevenir que el compuesto la endurezca.

Cuando se hace un pulido final, una cucharada del abrasivo se aplica cerca del centro de la tela, humedecida con agua destilada o agua deionizada para formar una pasta. La rueda deberá girar a velocidad constante de 350 rpm aproximadamente.

Se usa la presión de la mano considerable y la rotación frecuente del espécimen durante los primeros pocos minutos, y sólo basta agregar agua para evitar sequedad y jalones del espécimen con la tela. Gradualmente la presión es reducida, y más agua se agrega.

Durante el pulido se agregan cantidades pequeñas de abrasivo de vez en cuando a la rueda para reponerlas. Hacia el final del pulido puede usarse agua para quitar todo el abrasivo.

El enjuague final pueden hacerse enjuagando con agua tibia o caliente y el espécimen debe secarse con aire seco.

VI.4.2.- LOS MEDIOS DE ATAQUE.

Los ataques a seleccionar dependen del material y grupo en el que se encuentra la aleación, los ataques pueden ser del tipo:

El ataque cáustico se prefiere por revelar defectos, grietas finas exageradas y muestra a los ingenieros como fluyen las fibras del material observado.

Mixtos.- Son ataques ácidos y son excelentes para el revelado del tamaño de grano, forma y contraste, pero puede disimular cosas como grietas de la probeta, inclusiones o porosidad.

A continuación se describen los dos ataques que se utilizaron para la observación de la microestructura de las probetas.

ATAQUE	COMPOSICIÓN	FORMA PARA PROCEDER
1 Ataque cáustico	10g NaOH para atacar 90 ml.	sumerja el espécimen de 5-15 min en la solución a Temp. 60-70 °C, enjuague en agua, sumerja en 50% HNO ₃ solución para , enjuague en agua y seque.
3A (el reactivo de Keller)	2 mL HF (48%), 3 mL HCL (conc). 5 mL HNO ₃ (conc). 190 mL H ₂ O	Sumerja por 8-15 s. lave con agua caliente. No quita el ataque de la superficie.

Una vez atacadas las muestras se observan a través de un microscopio el cual tiene adaptada una cámara con la cual se tomaron fotografías de la metalografías de las aleaciones A319 y A356.

VI.4.5.- COMPOSICIÓN QUÍMICA

Límites de composición Química respecto ASM:

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Otros Elementos
5.5 -6.5	1.0	3.0-4.0	0.5	0.1	0.35	1.0	0.25	0.5

Tabla V.1

ANÁLISIS QUÍMICO POR FUMISA

Aleación A319

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Otros Elementos
6.55	0.839	3.40	0.174	0.194	0.19	2.09	0.25	0.0

x	✓	✓	✓	x	✓	x	✓	✓
---	---	---	---	---	---	---	---	---

x Parámetros fuera del límite máximo de la aleación A319 respecto a ASM

✓ Parámetros dentro del límite máximo de la aleación A319 respecto a ASM

Aleación A365

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Cr	Pb
4.09	0.525	1.43	0.154	0.322	0.29	0.131		0.042	0.08

Tabla V.2 Parámetros establecidos por FUMISA

ANÁLISIS QUÍMICO POR Almonti

Aleación A319

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Otros Elementos
6.50	0.826	3.48	0.17	0.201	0.16	2.15	0.3	0.0

✓	✓	✓	✓	x	✓	x	x	✓
---	---	---	---	---	---	---	---	---

x Parámetros fuera del límite máximo de la aleación A319 respecto a ASM

✓ Parámetros dentro del límite máximo de la aleación A319 respecto a ASM
(ver tabla V.1)

Aleación A365 por Almonti

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Cr	Pb
4.12	0.532	1.41	0.16	0.319	0.282	0.136		0.040	0.10

Tabla V.2 Parámetros establecidos por FUMISA

VII.- ANALISIS DE RESULTADOS

VII.1.- ANÁLISIS DE TENSIÓN.

A continuación se presentan los diagramas de las aleaciones A319 y A365 de los ensayos de tensión.

Estos diagramas presentan baja resistencia a la tensión debido a su alto contenido de porosidad, la porosidad se pudo observar al maquinar las probetas para el ensayo de tensión, comparándolas con la aleación A319 del ASM. Estas probetas se pueden ver en la Figura VII-1 y no presentan el alargamiento de cono y embudo que deberían de presentar con fractura dúctil, presentando una fractura frágil con muy poca o baja deformación plástica causada por la porosidad.

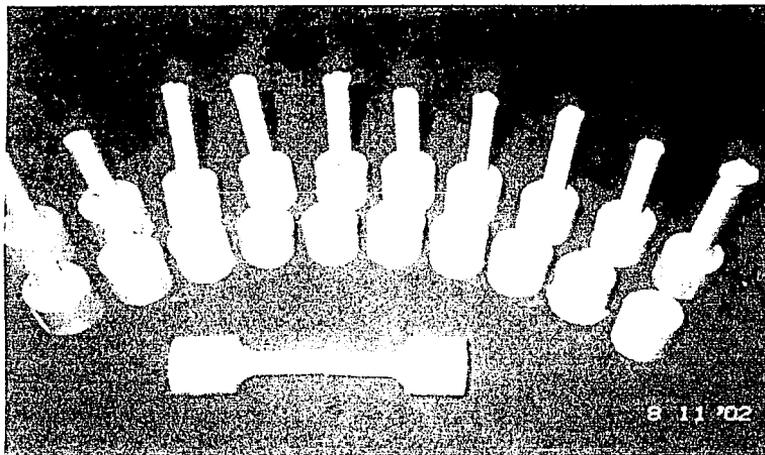
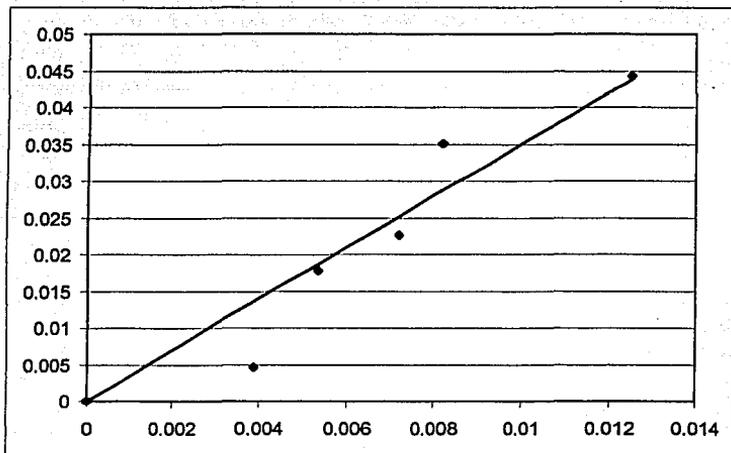


Figura VII-1

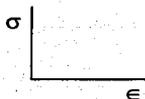
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Graficas aleación A319.1

σ	ϵ
3,886E-03	4,528E-03
5,317E-03	1,772E-02
7,158E-03	2,264E-02
8,180E-03	3,504E-02
1,247E-02	4,429E-02

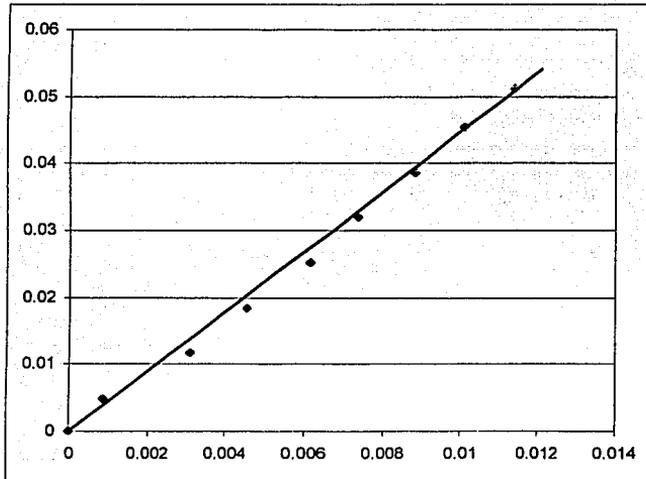


Nota: para todas las graficas



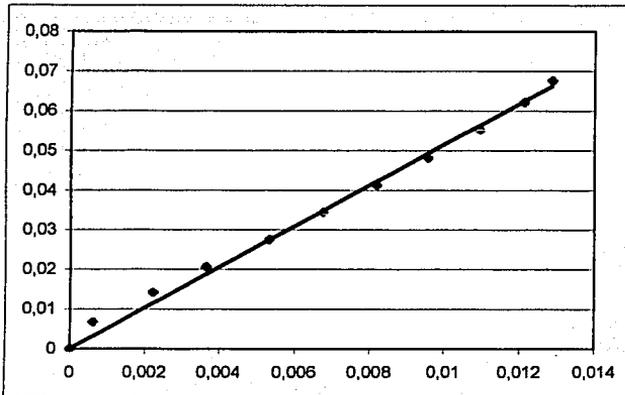
TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

σ	ϵ
8,589E-04	4,921E-03
3,068E-03	1,161E-02
4,540E-03	1,831E-02
6,135E-03	2,520E-02
7,362E-03	3,189E-02
8,794E-03	3,858E-02
1,010E-02	4,547E-02
1,137E-02	5,118E-02
1,211E-02	5,709E-02



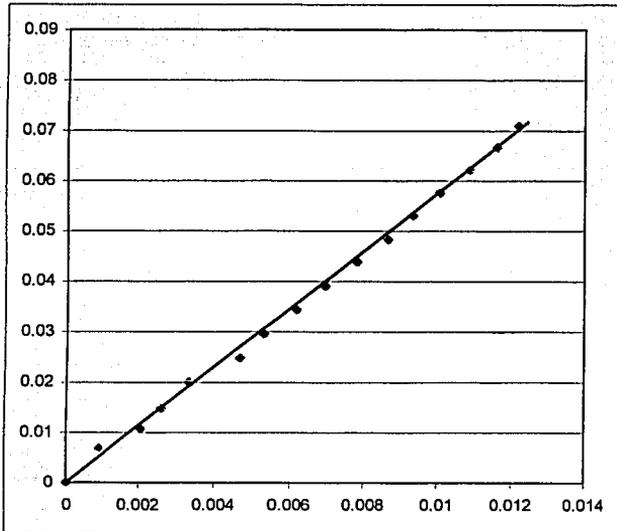
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

σ	ϵ
6,135E-04	6,693E-03
2,209E-03	1,417E-02
3,640E-03	2,067E-02
5,317E-03	2,756E-02
6,749E-03	3,445E-02
8,180E-03	4,134E-02
9,571E-03	4,823E-02
1,092E-02	5,531E-02
1,211E-02	6,220E-02
1,284E-02	6,772E-02



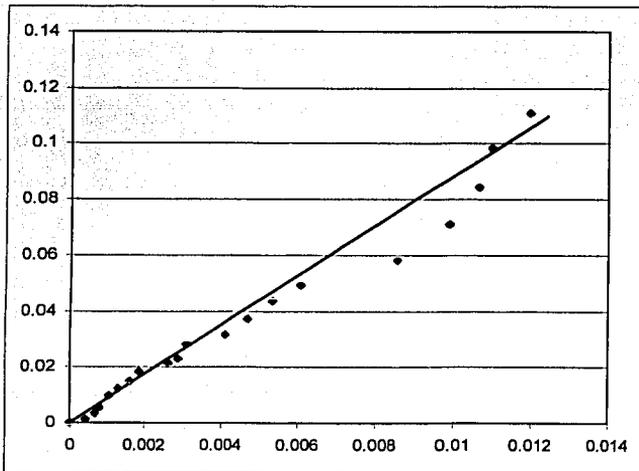
TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

σ	ϵ
8,998E-04	6,890E-03
2,045E-03	1,083E-02
2,618E-03	1,476E-02
3,313E-03	2,008E-02
4,704E-03	2,480E-02
5,317E-03	2,953E-02
6,176E-03	3,425E-02
6,953E-03	3,898E-02
7,812E-03	4,370E-02
8,630E-03	4,843E-02
9,326E-03	5,315E-02
1,006E-02	5,768E-02
1,084E-02	6,220E-02
1,162E-02	6,673E-02
1,219E-02	7,087E-02
1,243E-02	7,717E-02



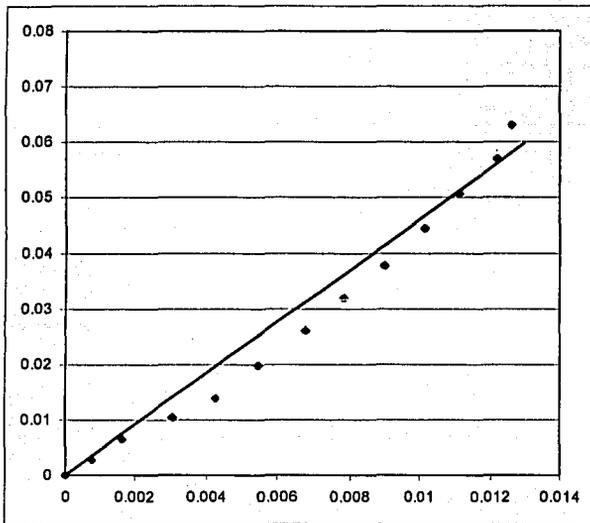
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

σ	ϵ
4,090E-04	1,378E-03
6,544E-04	3,543E-03
8,180E-04	5,512E-03
1,063E-03	1,004E-02
1,309E-03	1,240E-02
1,595E-03	1,516E-02
1,841E-03	1,850E-02
2,618E-03	2,146E-02
2,863E-03	2,303E-02
3,068E-03	2,815E-02
4,090E-03	3,150E-02
4,704E-03	3,740E-02
5,317E-03	4,350E-02
6,053E-03	4,921E-02
8,589E-03	5,807E-02
9,898E-03	7,087E-02
1,063E-02	8,445E-02
1,100E-02	9,843E-02
1,198E-02	1,108E-01
1,227E-02	1,220E-01
1,243E-02	1,309E-01



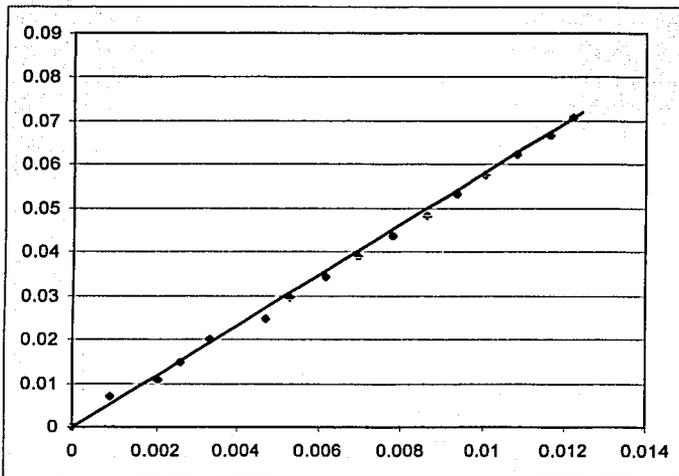
**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

σ	ϵ
7,362E-04	2,756E-03
1,636E-03	6,496E-03
3,068E-03	1,043E-02
4,254E-03	1,398E-02
5,481E-03	1,969E-02
6,790E-03	2,598E-02
7,812E-03	3,189E-02
8,998E-03	3,780E-02
1,014E-02	4,449E-02
1,113E-02	5,079E-02
1,219E-02	5,709E-02
1,260E-02	6,319E-02
1,301E-02	6,929E-02



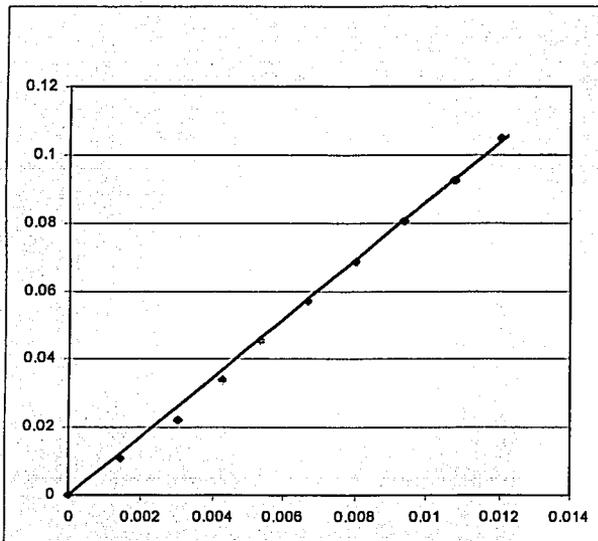
TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

σ	ϵ
8,998E-04	6,890E-03
2,045E-03	1,083E-02
2,618E-03	1,476E-02
3,313E-03	2,008E-02
4,704E-03	2,480E-02
5,317E-03	2,953E-02
6,176E-03	3,425E-02
6,953E-03	3,898E-02
7,812E-03	4,370E-02
8,630E-03	4,843E-02
9,326E-03	5,315E-02
1,006E-02	5,768E-02
1,084E-02	6,220E-02
1,162E-02	6,673E-02
1,219E-02	7,087E-02
1,243E-02	7,717E-02



TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

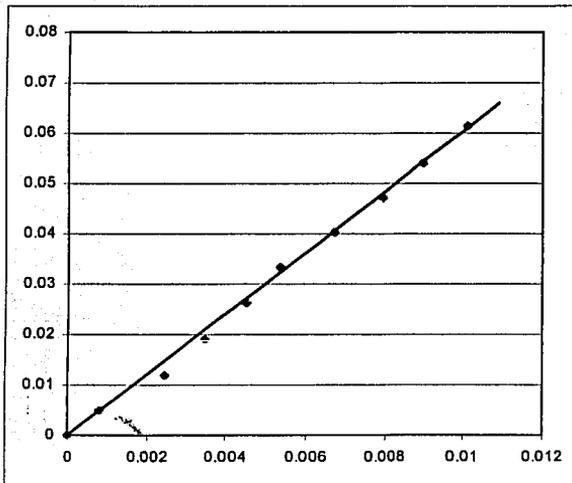
σ	ϵ
1,432E-03	1,083E-02
3,027E-03	2,205E-02
4,254E-03	3,386E-02
5,358E-03	4,547E-02
6,708E-03	5,709E-02
8,017E-03	6,870E-02
9,407E-03	8,071E-02
1,080E-02	9,272E-02
1,207E-02	1,047E-01
1,223E-02	1,085E-01



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

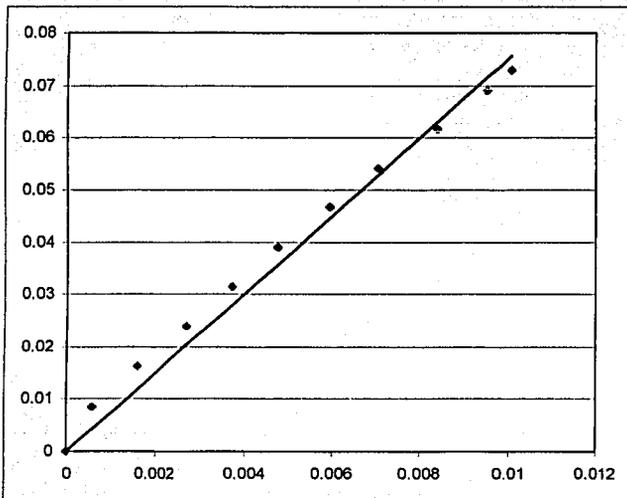
Graficas aleación A365.1

σ	ϵ
8,180E-04	4,921E-03
2,454E-03	1,201E-02
3,477E-03	1,909E-02
4,499E-03	2,618E-02
5,358E-03	3,327E-02
6,708E-03	4,035E-02
7,935E-03	4,724E-02
8,998E-03	5,413E-02
1,010E-02	6,142E-02
1,092E-02	6,732E-02



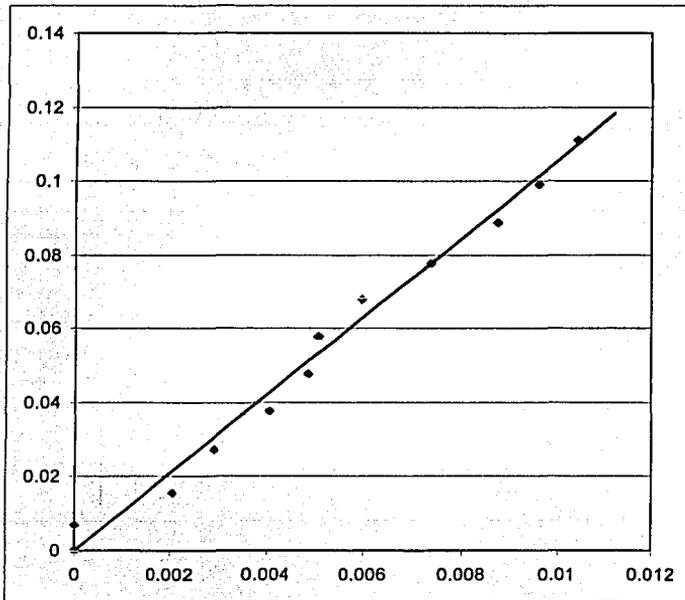
TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

σ	ϵ
5,726E-04	8,465E-03
1,554E-03	1,634E-02
2,699E-03	2,382E-02
3,722E-03	3,150E-02
4,745E-03	3,898E-02
5,931E-03	4,665E-02
7,035E-03	5,413E-02
8,385E-03	6,161E-02
9,530E-03	6,909E-02
1,006E-02	7,283E-02



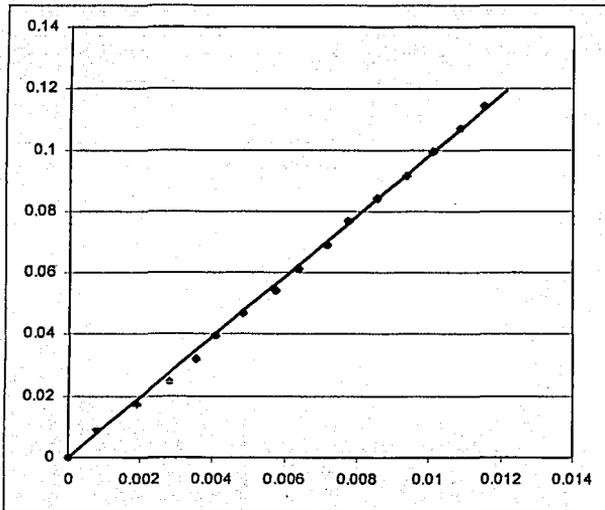
TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

σ	ϵ
1,227E-05	6,890E-03
2,045E-03	1,575E-02
2,904E-03	2,717E-02
4,049E-03	3,760E-02
4,867E-03	4,783E-02
5,072E-03	5,787E-02
5,972E-03	6,791E-02
7,362E-03	7,776E-02
8,753E-03	8,858E-02
9,612E-03	9,921E-02
1,043E-02	1,112E-01
1,121E-02	1,230E-01



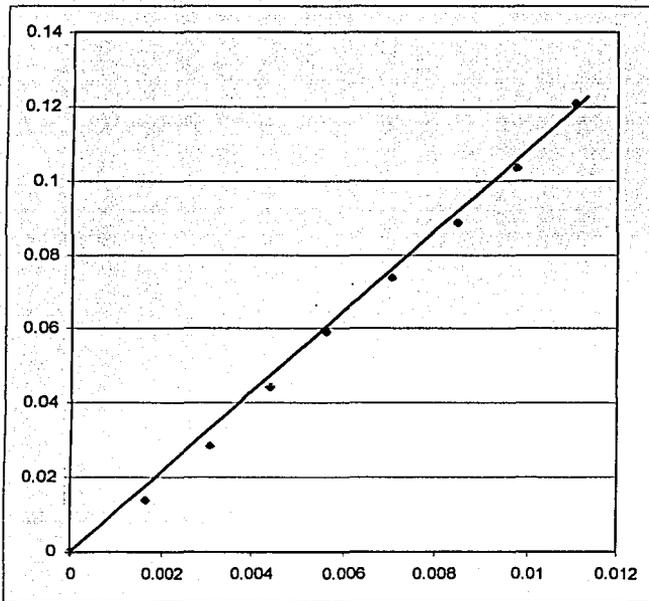
**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

σ	ϵ
8,180E-04	8,858E-03
1,922E-03	1,732E-02
2,822E-03	2,461E-02
3,558E-03	3,189E-02
4,090E-03	3,937E-02
4,867E-03	4,685E-02
5,726E-03	5,413E-02
6,381E-03	6,142E-02
7,158E-03	6,909E-02
7,730E-03	7,677E-02
8,589E-03	8,425E-02
9,366E-03	9,173E-02
1,010E-02	9,941E-02
1,084E-02	1,069E-01
1,153E-02	1,142E-01
1,215E-02	1,220E-01



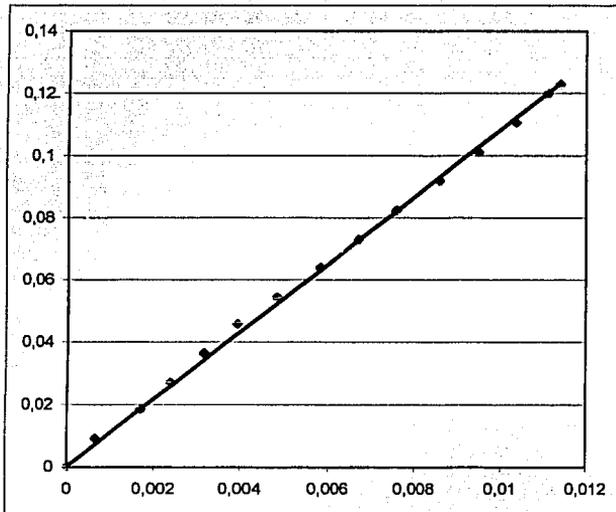
**TESIS CON
FALTA DE ORIGEN**

σ	ϵ
1,636E-03	1,378E-02
3,068E-03	2,854E-02
4,376E-03	4,429E-02
5,603E-03	5,906E-02
7,035E-03	7,382E-02
8,467E-03	8,858E-02
9,735E-03	1,033E-01
1,104E-02	1,211E-01
1,133E-02	1,299E-01



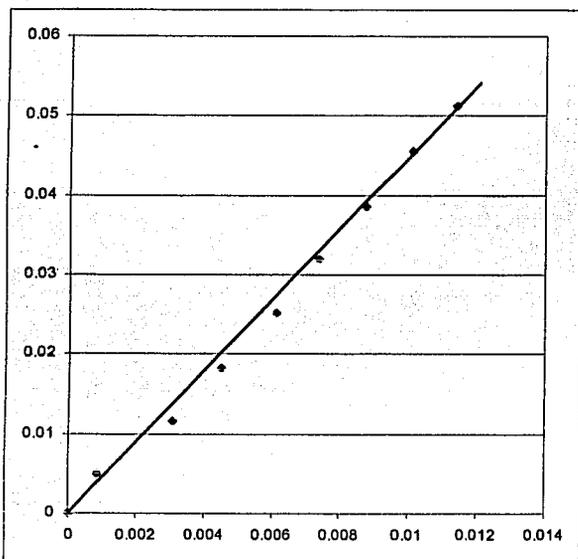
TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

σ	ϵ
6,544E-04	9,252E-03
1,718E-03	1,850E-02
2,372E-03	2,717E-02
3,149E-03	3,642E-02
3,927E-03	4,587E-02
4,826E-03	5,453E-02
5,808E-03	6,398E-02
6,708E-03	7,303E-02
7,567E-03	8,248E-02
8,589E-03	9,193E-02
9,489E-03	1,012E-01
1,035E-02	1,106E-01
1,108E-02	1,201E-01
1,137E-02	1,230E-01



TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

σ	ϵ
8,589E-04	4,921E-03
3,068E-03	1,161E-02
4,540E-03	1,831E-02
6,135E-03	2,520E-02
7,362E-03	3,189E-02
8,794E-03	3,858E-02
1,010E-02	4,547E-02
1,137E-02	5,118E-02
1,211E-02	5,709E-02



TESIS CON
 PALA DE ORIGEN

VII.2.- ANÁLISIS DE DUREZA.

Generalmente se acostumbra definir dureza como la resistencia que opone un material a ser penetrado; en términos de la deformación, podemos definir la dureza como la resistencia a la deformación plástica. Conviene aclarar que la resistencia a la deformación elástica depende únicamente del módulo de elasticidad. El concepto de endurecimiento, entonces, se refiere a aumentar la dureza de un cierto material.

Las pruebas que se realizaron sobre la superficie de las probetas lo suficientemente lisa como para que pueda medirse el diámetro de la huella con precisión como lo marca la norma. Se prepararon previamente las superficies mediante esmerilado, pulido, teniendo cuidado de no alterar las condiciones de la superficie por calentamiento o por deformación.

Debe tenerse en cuenta que la dureza Brinell de casi todos los materiales está afectada por la magnitud de la carga de prueba, así como por el diámetro y las propiedades elásticas del penetrador.

El resultado de las prueba de dureza Brinell debe darse de forma específica, evitando conversiones a otras escalas de dureza.

En la Norma ASTM E 10-1978 se encuentran tablas para cálculo directo de HB a partir de d , para $D=10\text{ mm}$ y $F=500\text{ kgf}$.

Realización de la prueba de dureza A319

Probeta	Prueba						Ø de huella Dureza Brinell
	A	B	C	D	E	F	
1	0.97	0.97	0.95	0.89	0.94	1.1	mm
	65.01	65.01	67.89	77.73	69.4	49.929	HB
2	0.94	0.95	0.91	0.90	0.93	0.95	mm
	69.4	67.89	74.24	75.96	79.96	67.89	HB
3	0.98	0.91	1.08	0.91	0.89	0.96	mm
	63.63	74.24	51.90	74.24	77.73	66.42	HB
4	1.22	0.96	0.88	0.92	0.92	0.92	mm
	40.05	66.42	79.57	72.57	72.57	72.57	HB
5	1.02	0.92	1.05	0.97	0.88	1.12	mm
	58.52	72.57	55.07	65.01	79.57	48.06	HB
6	1.00	0.92	0.89	0.87	0.89	1.01	mm
	61.00	72.57	77.73	81.84	77.73	59.74	HB
7	0.93	1.00	0.99	0.88	0.99	0.91	mm
	67.89	61.00	62.29	79.57	62.29	74.24	HB

Realización de la prueba de dureza A365

Probeta	Prueba						Ø de huella Dureza Brinell
	A	B	C	D	E	F	
1	0.95	0.94	0.96	0.95	0.90	0.92	mm HB
	67.89	69.40	66.42	67.89	75.96	72.57	
2	0.99	1.00	0.88	0.91	1.05	1.02	mm HB
	62.29	61.00	79.57	74.24	55.07	58.52	
3	0.98	0.96	0.97	0.99	0.92	1.00	mm HB
	63.63	66.42	65.01	62.29	72.57	61.00	
4	0.98	0.91	1.08	0.87	0.89	1.01	mm HB
	63.63	74.24	51.90	81.84	77.73	59.74	
5	0.93	0.95	1.02	0.92	1.08	0.91	mm HB
	79.96	67.89	58.52	72.57	51.90	74.24	
6	0.92	0.92	0.89	0.96	0.89	0.96	mm HB
	72.57	72.57	77.73	66.42	77.73	66.42	
7	0.89	0.87	1.22	0.96	1.08	1.1	mm HB
	77.73	81.84	40.05	66.42	51.90	49.929	

VII.3.- METALOGRAFÍAS DE LAS ALEACIONES A 319 Y A 365.

La inspección visual cuidadosa y completa, de la parte o forma que será probada, deberá procederse cortando al material con un corte plano y es determinado por la dirección de las fibras, debido al funcionamiento del proceso de trabajo, de la parte formada, por la forma sospechosa o conocida del defecto, y por la forma general o naturaleza de la parte (por ejemplo, forjado, extrusión, o soldadura).

La figura VII-2 es el patrón de comparación de la aleación A319 por el ASM en porosidad para las muestras metalográficas que continuación se muestran.

De la figura 3 a 16 se utilizó un ataque cáustico NaOH₃

De la figura 17 a 23 se usó el reactivo de Keller.

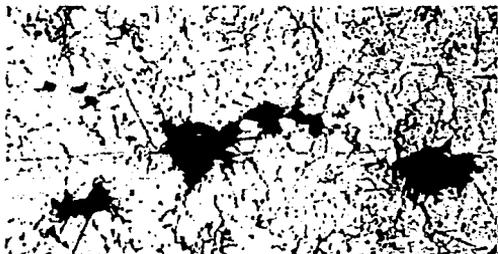


Figura VII-2 aleación A319 muestra porosidad por ASM.

El siguiente cuadro muestra la simbología que utilizamos para determinar fácilmente los defectos en las diferentes probetas que analizamos.

<input type="checkbox"/> Inclusiones silicio.	<input type="checkbox"/> Porosidades.
<input type="checkbox"/> Inclusiones alumina.	<input type="checkbox"/> Oxidación
<input type="checkbox"/> Células dendríticas.	<input type="checkbox"/> Grietas

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

VII.3.1.- OBSERVACIÓN METALGRÁFICA



Figura VII-3 A319. 250X



Figura VII-4 A319. 50X



Figura VII-5 A365. 100X



Figura VII-6 A365. 250X

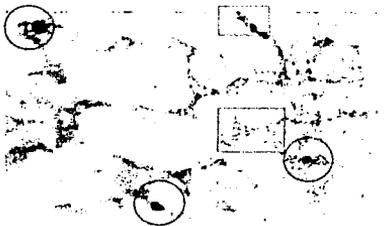


Figura VII-7 A319. 500X

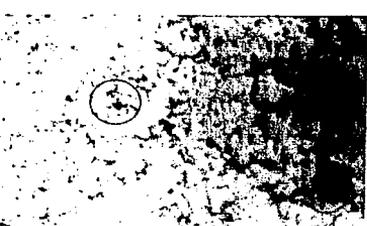


Figura VII-8 A319. 50X

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

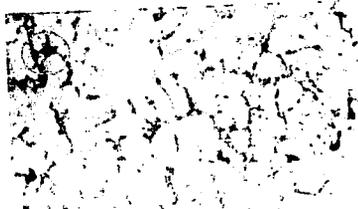


Figura VII-9 A365. 250X

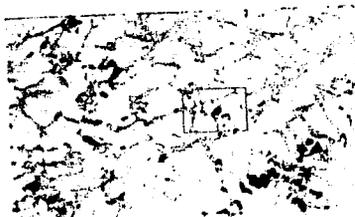


Figura VII-10 A365 50X



Figura VII-11 A319. 100X

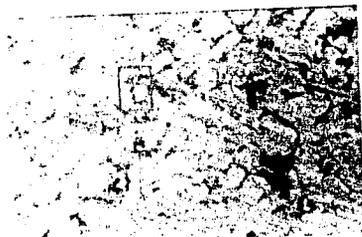


Figura VII-12 A319. 100X

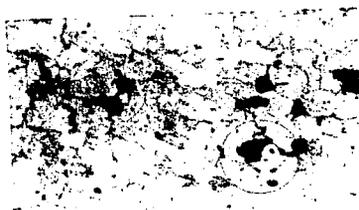


Figura VII-13 A365. 250X



Figura VII-14 A365. 100X

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

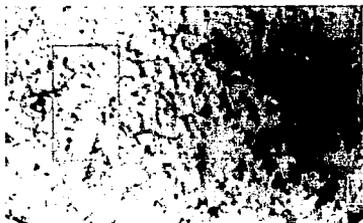


Figura VII-15 A319. 100X



Figura VII-16 A319. 500X

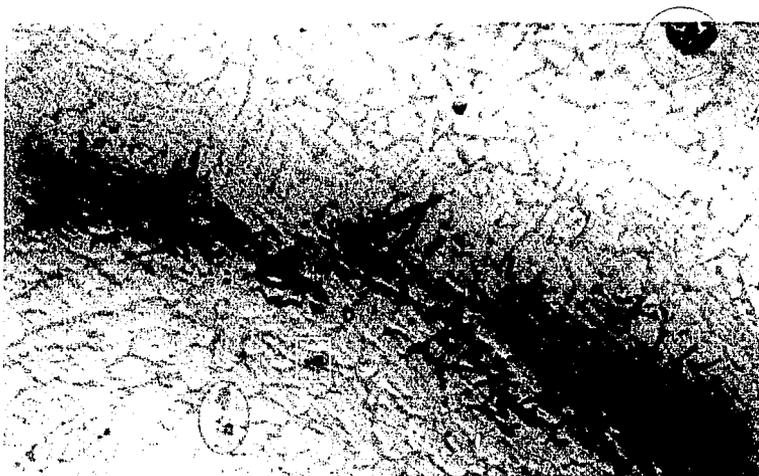


Figura VII-17 A319. 250X

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

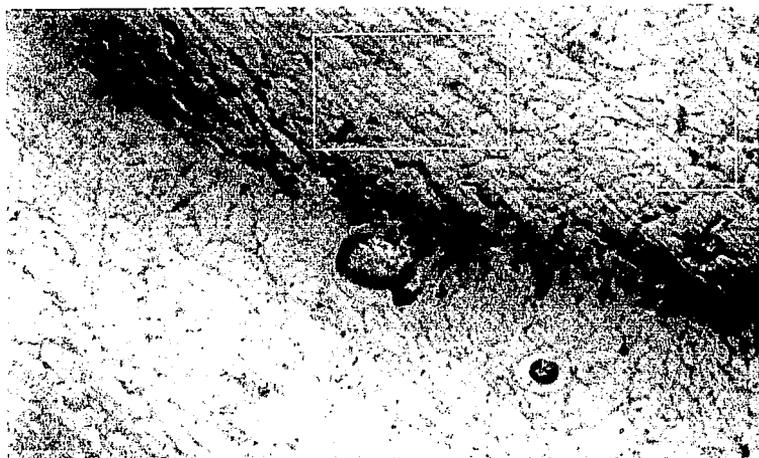


Figura VII-18 A319. 250X

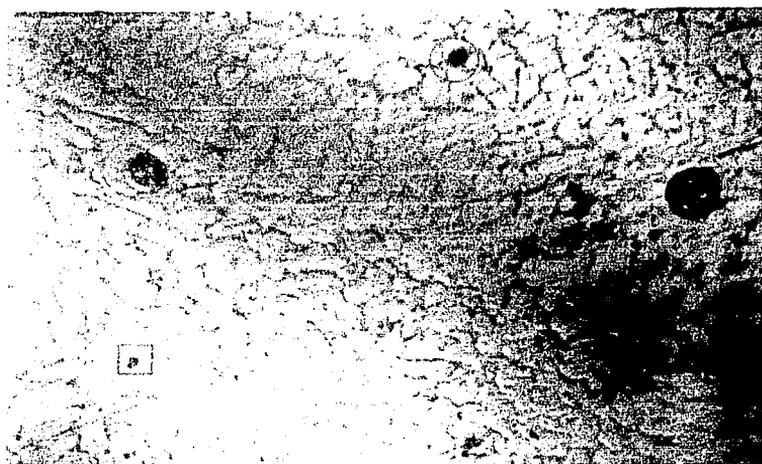


Figura VII-19 A319. 250X

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

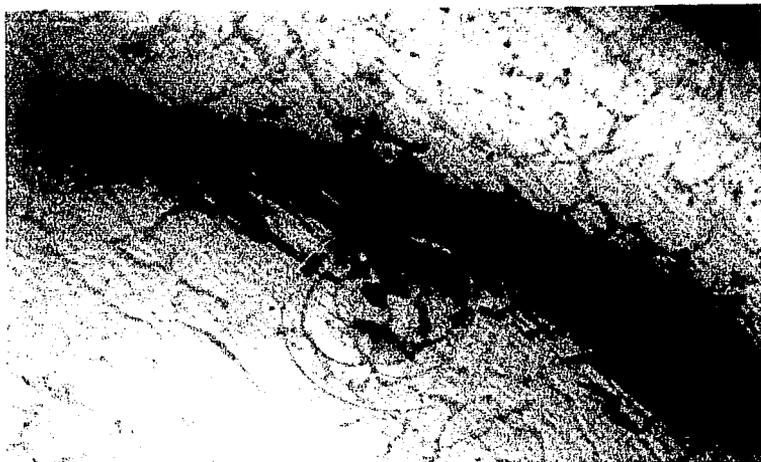


Figura VII-20 A319. 500X

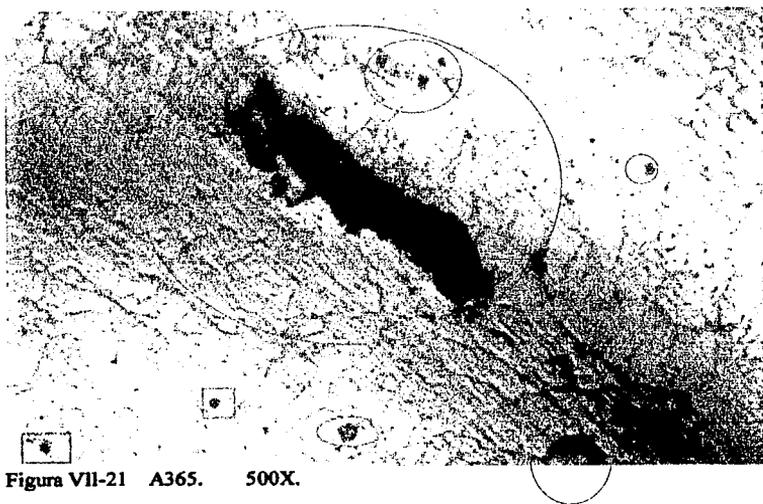


Figura VII-21 A365. 500X.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

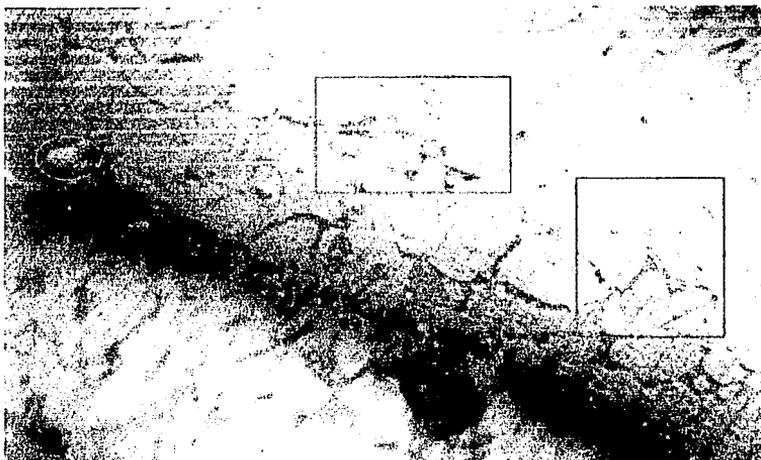


Figura VII-22 A365. 500X

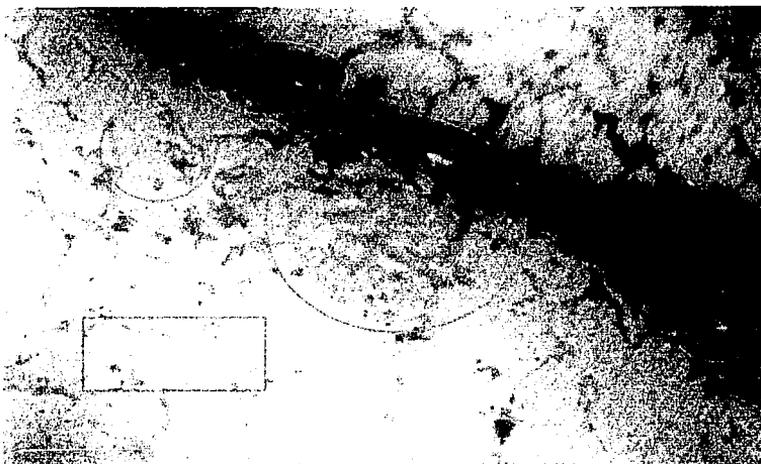


Figura VII-23 A365. 500X.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CONCLUSIONES

En la actualidad las sociedades industriales mundiales están afrontando nuevos retos en lo que respecta en su operación, organización, en general a su cultura industrial. Particularmente se están enfrentando a nuevos paradigmas en la producción, en los principios y practicas de fabricación, en todo el mundo registran una revolución de grandes alcances por los sistemas de producción con calidad, México no puede ni debe escapar más a la influencia de los mercados y de la competencia mundial ya que nuestro país ha ingresado a la tendencia de los mercados globales con todas las ventajas y retos que esto implica. La mano de obra, los recursos naturales y la capacidad de innovación tecnológica permitirán el desarrollo de la industria manufacturera así como del país.

Este trabajo es un análisis que puede ayudar a reflexionar sobre los procesos empleados en la fundición por FUMISA, al igual que para la mayoría del las empresas fundidoras en México.

Estas aleaciones cumplen con los propósitos para esta empresa, ya que sus piezas fabricadas para maquinas tortilladoras tales como tolvas, cubrepolvos, cubre cadenas, bases etc. no están sujetas a cargas de tensión ,además el objetivo de haber creado una aleación especial es debido a que su acabado óptico es mejor para sus fines, lo que no lograban con otro tipo de aleaciones, de fundiciones con estas condiciones, no se deberá fabricar piezas que estén sometidas en trabajos de tensión, presión o algún esfuerzo mecánico debido a que tienen un alto contenido de porosidad, las pruebas realizadas y la observación microscópica y macroscópica así lo demuestran.

En las diferentes pruebas que se realizaron obtuvimos resultados no favorables para estas piezas, debido a un alto contenido de porosidad en estas, en las pruebas de tensión se observo que las probetas no alcanzaron una elongación en forma de cuello de botella debida al exceso de porosidad obteniendo así una fractura frágil en la que se observa una nula deformación de la probeta. En las pruebas de dureza se obtuvieron resultados pero no son similares a los de norma debido también a la gran cantidad de porosidad de las piezas y en la observación de la microestructura se observan inclusiones, porosidad y oxidación que también las afecta, por lo que nosotros recomendamos un análisis más profundo de su proceso de moldeo en arena para que se pueda resolver este problema y obtener una mejor fundición. Las pruebas que recomendamos que se le hagan a la arena son para el control de humedad, afino de grano, contenido de arcilla, permeabilidad, colapsabilidad, tamaño y forma de grano.

Esto problema puede ser debido a: Una falla de los operadores a la hora de verter la colada a su molde, se recomienda una preparación correcta de la arena utilizada; que los moldes no contengan los suficientes orificios de salida de los gases y no se produzca una desgasificación adecuada.

De los estudios de composición química realizados por FUMISA con los laboratorios de Almonti (realizados en espectrómetro) a la conclusión que se llega es que las composiciones de las aleaciones son muy similares variando de una colada a otra.

Gracias a la información de los anexos se comparo con precisión y determinar cuales son las inclusiones de silicio, alumina y oxido que presentan más comúnmente estas aleaciones, así como el proceso para obtener las probetas de tensión y dureza por las normas mexicanas de la secretaria de comercio y fomento industrial que se encuentran en el anexo.

Este trabajo de investigación nos ayudo a poder entender por que es tan importante le estudio a nivel ingeniería debido a los problemas que se presentan en la industria.

Una recomendación que hacemos es que se realice un análisis de arenas , y de desgasificación de colada, ya que consideramos que sus problemas de porosidad disminuirían considerablemente.

BIBLIOGRAFIA.

Fundamentos de la ciencia y la ingeniería de materiales.
William F. Smith. Ed. Mc. Graw Hill. 2a Edición.

Ciencia de materiales para ingeniería .
Peter A. Thornton / Vito J Colangelo. Ed. Prentice Hall hispanoamericana. 1ª Edición.

Introducción a la metalurgia física.
Sydney H. Avner. Ed. Mc Graw Hill. 2a Edición.

AFS mold and core test handbook.
American Foundrymen's Society.

ASM Casting Aluminum and aluminum alloys
American Foundrymen's Society.

ASM.

ASTM

ATM.

IMEDAL Información técnica de las aleaciones y estudios del aluminio actualizados.
(Instituto Mexicano del Aluminio.)

Sociedad de Fundidores A. C. Información técnica y asesoramiento en problemas de fundición más frecuentes.

ANEXO 1

NORMA DE TENSIÓN NMX-W-047-1999-SCFI

ALUMINIO Y SUS ALEACIONES, PROPIEDADES MECÁNICAS, DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TENSIÓN

1 OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma mexicana establece el método de prueba a la tensión para determinar las propiedades mecánicas en el aluminio y sus aleaciones, en cualquier forma física, exceptuando las de papel, polvos y sinterizados, a la temperatura ambiente y a baja velocidad de deformación.

2 DEFINICIONES

Para los propósitos de esta norma se establecen las siguientes definiciones:

2.1 Alargamiento

Es el incremento en la longitud entre dos marcas de referencia impresas en una probeta antes de una prueba, equidistantes de su centro y expresado en por ciento de la distancia inicial entre ambas marcas (véase inciso 5.1.2).

2.2 Deformación

En la prueba mecánica de tensión, es el aumento de longitud relativa de la probeta, correspondiente a un esfuerzo determinado, dividida en dos tipos:

2.2.1 Deformación convencional o ingenieril a la tensión

Es la diferencia entre la longitud de la probeta sometida a tensión y su longitud inicial, dividida por esta última.

2.2.2 Deformación verdadera a la tensión

Es el logaritmo natural del cociente entre la longitud de la probeta sometida a tensión y su longitud inicial.

NOTA 1- Para los efectos de esta norma, se entiende por deformación, la deformación convencional o ingenieril a la tensión.

2.3 Diagrama esfuerzo-deformación en tensión

Es el resultado de una prueba mecánica de tensión cuyos datos se registran en una gráfica, con los esfuerzos como ordenadas y las deformaciones como abscisas (véase figura 1).

2.4 Esfuerzo

En la prueba mecánica de tensión, es la fuerza media que actúa en la dirección de la tensión, dividida por el área de la sección transversal de la probeta.

2.5 Esfuerzo de cedencia a la tensión (σ_c)

Es el esfuerzo que se imprime a la probeta en la prueba de tensión, la cual se determina a una deformación permanente (no elástica) del 0,2 % respecto al comportamiento de la probeta, y se expresa en N/mm^2 (MPa) (véase figura 1).

2.6 Esfuerzo convencional o ingenieril de tensión (σ)

Es el que se calcula a partir del área de la sección transversal inicial de la probeta.

NOTA 2- Para los efectos de esta norma, se entiende por esfuerzo, el esfuerzo convencional o ingenieril de tensión y se expresa en N/mm^2 (MPa).

2.7 Esfuerzo máximo de tensión (σ_m)

En el diagrama esfuerzo-deformación, es el valor máximo del esfuerzo. Este valor se expresa en N/mm^2 (MPa) como se indica en la figura 1.

2.8 Límite proporcional (σ_p)

Es el límite de la porción inicial lineal del diagrama esfuerzo-deformación. Dentro de este límite, la probeta se deforma proporcionalmente al esfuerzo (comportamiento proporcional o lineal) (véase figura 1).

2.9 Método de prueba a la tensión

Es el proceso de alargamiento progresivo a que se sujeta una probeta del material en estudio. El alargamiento se provoca con una fuerza de tensión en aumento hasta la ruptura, de manera que los extremos de la probeta se muevan a una velocidad constante. Debe indicarse la temperatura a la que se realiza la prueba.

Con los resultados de la prueba se hace el diagrama esfuerzo-deformación, a partir del cual se obtienen los parámetros que sirven para determinar algunas de las más importantes propiedades mecánicas del material (véase tabla 1).

2.10 Módulo de elasticidad (módulo elástico o de Young, de extensión, de estirado o coeficiente de elasticidad)

Es la relación entre el incremento de longitud y el esfuerzo, dentro del límite proporcional del material, y se expresa en N/mm^2 (MPa).

2.11 Propiedades mecánicas

Son aquellas propiedades del material asociadas a sus reacciones elásticas, las cuales se determinan al someter el material a la acción de una fuerza.

2.12 Rapidez de deformación en tensión

Es la deformación de la probeta sometida a la tensión, por unidad de tiempo y se expresa en 1/s.

3 SÍMBOLOS

Para los propósitos de esta norma se establecen los siguientes símbolos:

TABLA 1.- Símbolos

Símbolos	Parámetros
σ	Esfuerzo
ϵ	Deformación
σ_m	Esfuerzo máximo de tensión
σ_C	Esfuerzo de cedencia a la tensión
ϵ_f	Alargamiento
E	Módulo de elasticidad
Ω_m	Carga máxima
σ_p	Límite proporcional
$\sigma_{0,2}$	Esfuerzo de cedencia al 0,2 %

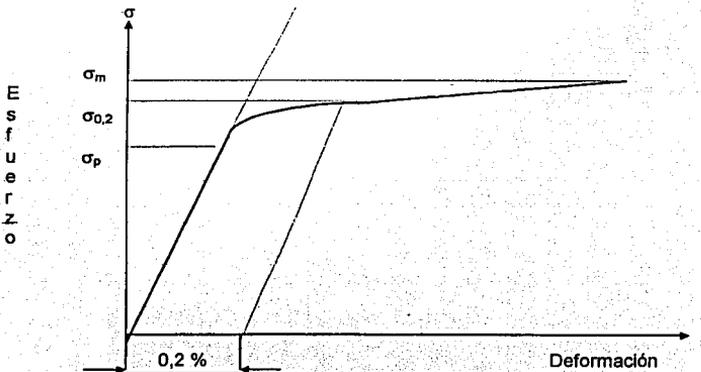


FIGURA 1.- Diagrama esfuerzo-deformación para la determinación del esfuerzo de cedencia por el método de "Deformación al 0,2 %"

4 APARATO

4.1 Máquina para prueba de tensión

4.2 Micrómetro o calibradores

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

NOTA 3- Los micrómetros y otros dispositivos usados para medir longitudes, deben tener una aproximación de por lo menos 0,5 (un medio) de la unidad más pequeña que se utilice. Se recomienda usar extensómetro con errores máximos de 1 %.

5 PREPARACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE LAS PROBETAS

5.1 Preparación

Las probetas del material a probar, se seleccionan conforme a lo siguiente:

5.1.1 Selección del material para probetas:

Las probetas se confeccionan con muestras obtenidas del material a probar. La obtención de muestras debe hacerse con los siguientes criterios:

Alambre, alambón y barra

Las muestras se toman en la dirección longitudinal. Las muestras para probetas maquinadas en material con diámetro o espesor menor a 40 mm, se toman en el centro de la sección. Para productos con dimensiones mayores, la muestra se toma a una distancia de la superficie que sea la cuarta parte del diámetro o espesor. Igual procedimiento se sigue en el caso de secciones rectangulares con espesores mayores a 40 mm.

Si la forma y/o el tamaño del material a probar no permiten el uso de probetas de sección completa, se debe usar la probeta maquinada de sección circular, excepto para barra rectangular con espesor menor a 15 mm en la cual se usa la probeta maquinada de sección rectangular.

5.1.2 Marcas de referencia

Las marcas de referencia sirven para medir la deformación que experimenta la probeta al ser sometida a tensión. Se trata de dos señales trazadas en el cuerpo de la probeta antes de su deformación y equidistantes del centro de la misma. Estas marcas deben hacerse con tinta y no con instrumentos punzantes. La distancia inicial entre marcas debe ser cuatro veces el diámetro central inicial, o cuatro veces el ancho central inicial, en el caso de probetas maquinadas (véase figuras 2, 3 y 4), en el caso de probetas de sección completa, la distancia inicial entre marcas debe ser cuatro veces el diámetro inicial del material cuando éste es de sección circular, y de 50 mm para otras secciones. Para alambre (conductor eléctrico), la distancia inicial entre marcas debe ser de 250 mm. En todo caso, la distancia entre marcas debe medirse con aproximación de 0,25 mm.

5.1.3 Medición del área de la sección transversal inicial

Las dimensiones que se usen para determinar el área de la sección transversal inicial de la probeta, se mide en el punto central con aproximación del 1 %.

5.1.4 Acabado superficial

Las rayas residuales de maquinado pueden provocar la fractura prematura de la probeta, falseando los resultados. Por esta razón la superficie de la probeta debe pulirse

cuidadosamente, por ejemplo con óxido de cerio (CeO), después del maquinado, para asegurar la eliminación de rayas.

En probetas de sección completa, está permitido reducir ligeramente el diámetro o ancho central, mediante papel de esmeril, para asegurar que la fractura se producirá entre las marcas de referencia.

Las probetas pueden ser piezas especialmente maquinadas, o pueden ser piezas cortadas directamente del material a ensayar (probetas de sección completa).

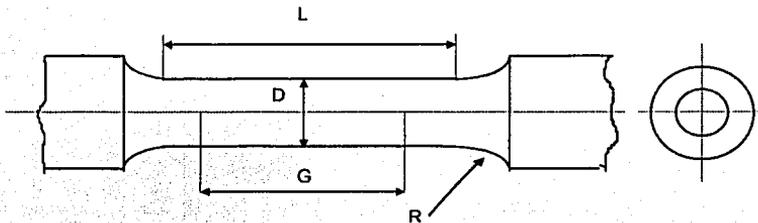
5.2 Acondicionamiento

5.2.1 Probetas maquinadas

Son de los tipos: de sección circular y de sección rectangular. En la figura 2 se detallan las dimensiones, precisión y nomenclatura para probetas de sección circular, y en las figuras 3 y 4 se hace lo propio para probetas de sección rectangular. Está permitido utilizar probetas de menor tamaño, siempre que sus magnitudes lineales mantengan las proporciones de las figuras 2, 3 y 4.

5.2.2 Probetas de sección completa

Se usan cuando el material a ensayar tiene la forma de alambre-barra, tubo o perfil, con dimensiones transversales compatibles con la capacidad de las mordazas de la máquina de tensión. En el caso de tubos y perfiles, las mordazas deben adaptarse para evitar la deformación de la probeta en la zona de sujeción. Inclusive, se permite rellenar las partes huecas de esta zona con un inserto metálico.



donde:

- G es la distancia entre marcas;
- D es el diámetro;
- R es el radio del chafán, y
- L es la longitud de la sección reducida.

FIGURA 2.- Probeta con sección circular de 12,5 mm, con longitud entre marcas de 50 mm, y ejemplos de probetas de menor tamaño, las cuales son proporcionales a la probeta normal

TABLA 2.- Dimensiones de probeta con sección circular

Dimensiones en mm

Diámetro nominal	Probeta normal	Probetas de menor tamaño proporcionales al normal			
	12,5	8,75	6,25	4,00	2,50
G	50 ± 0,10	35,0 ± 0,10	25,0 ± 0,10	16,0 ± 0,10	10 ± 0,10
D ⁴⁾	12,5 ± 0,25	8,75 ± 0,18	6,25 ± 0,12	4,0 ± 0,08	2,5 ± 0,05
R mínimo	10	6	5	4	2
L ⁵⁾ mínima	60	45	32	20	16

NOTAS:

4- La sección reducida puede tener una conicidad gradual partiendo de los extremos hacia el centro, de manera que los extremos tengan un diámetro no mayor del 1 % del diámetro de la porción central, cuyo diámetro es la dimensión de control.

5- Si se desea utilizar un extensómetro, la longitud de la sección reducida puede aumentarse para poder instalar el extensómetro que se pretenda usar. Desde luego las marcas de referencia para la medición del alargamiento, deben asociarse a la distancia prescrita por el extensómetro.

6- La longitud de calibración y los chaflanes de la probeta deben tener la forma que se ilustra en la figura 2, pero sus extremos pueden tener cualquier forma que se ajuste a la forma de las mordazas de la máquina de prueba que se utiliza, de modo tal que la carga aplicada sea axial.

7- En las probetas redondas, tal como se ilustra en la figura 2, las distancias entre marcas son iguales a cuatro veces el diámetro nominal. Para algunas especificaciones del producto, pueden proporcionarse otras probetas, pero a menos que se mantenga una proporción de 4 a 1 dentro de las tolerancias dimensionales, los valores de extensión no pueden compararse con los que se obtengan de la probeta normal de la prueba.

8- El uso de probetas menores a 6,25 mm de diámetro, deben limitarse a casos en que el material a probarse no tenga el tamaño suficiente para obtener probetas mayores, o cuando las partes estén de acuerdo en que se usen para las pruebas de aceptación. Las probetas menores requieren equipo adecuado y más habilidad en el maquinado y en las pruebas.

6 PROCEDIMIENTO

Las probetas seleccionadas, maquinadas y dimensionadas de acuerdo con lo establecido en el capítulo 5, se instalan en la máquina para prueba, y se deforman hasta fractura, a temperatura ambiente y con baja velocidad de deformación (velocidad de desplazamiento de los extremos de la probeta: 5 cm/min o menos). Si la fractura se produce fuera de las marcas de referencia, o si las superficies interiores de la fractura muestran señales de porosidad, grietas o cualquier tipo de imperfección localizada, la prueba debe repetirse con otra probeta. Ordinariamente, el diagrama esfuerzo-deformación se obtiene automáticamente por medio de un registrador-graficador. En máquinas desprovistas de dispositivos de registro, el diagrama debe dibujarse manualmente, punto por punto, haciendo mediciones simultáneas de carga y desplazamiento.

7 EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS

7.1 Determinación del límite proporcional

Se superpone una regla sobre la porción inicial del diagrama esfuerzo deformación, y se señala el punto en que se aprecia el comienzo de la desviación de la curva respecto de la recta (véase figura 1).

7.2 Determinación del esfuerzo máximo de tensión

En el diagrama esfuerzo-deformación, es la ordenada del máximo esfuerzo (véase figura 1).

7.3 Determinación del esfuerzo de cedencia a la tensión

En el diagrama esfuerzo-deformación, se traza por el punto correspondiente a una deformación del 0,2 % ó 0,002, una recta o paralela a la porción inicial lineal de la curva. La ordenada de la intersección de esta recta con la curva es el esfuerzo de cedencia a la tensión (véase figura 1).

7.4 Determinación del alargamiento

Después de la fractura, se vuelven a unir cuidadosamente los fragmentos de la probeta, y se mide su alargamiento con una aproximación del 1 %.

7.5 Determinación del módulo de elasticidad

Se obtiene a partir del diagrama esfuerzo-deformación, como el cociente entre la ordenada y la abscisa del punto que señala el límite proporcional.

ANEXO 2
NORMA DE DUREZA.
SECRETARIA DE COMERCIO
Y
FOMENTO INDUSTRIAL NORMA MEXICANA

NMX-W-014-1979

"ALUMINIO Y SUS ALEACIONES DETERMINACION DE LA DUREZA
BRINELL"

DIRECCION GENERAL DE NORMAS

1 OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACION

Esta Norma establece el método Brinell para medir la dureza por penetración en el aluminio y sus aleaciones.

2 DEFINICIONES

2.1 Dureza Brinell

Es una medida de la oposición que presenta la superficie de un metal a la acción de un penetrador esférico de acero duro, midiéndose después el diámetro de la huella resultante al suprimir la acción de la carga.

2.2 Número de Dureza Brinell

Es el cociente entre la carga de prueba y el área de la superficie curvada de la huella, que se considera un casquete esférico para fines de cálculo. El valor numérico obtenido se anota anteponiendo las iniciales mayúsculas HB.

3 SIMBOLOS Y ABREVIATURAS

3.1 En la figura 1 y en la tabla 1 se incluyen los símbolos usuales y su significado expresados en el Sistema Internacional de unidades.

3.2 El número de dureza Brinell se expresa seguido por las letras HB y por otros tres números que especifica las condiciones de la prueba en el orden siguiente:

- a) Diámetro del penetrador en mm.
- b) Carga de prueba en Newtons.

c) Duración de la carga en segundos.

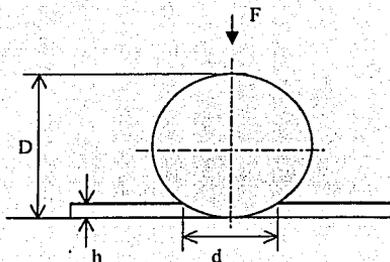


FIGURA 1

TABLA 1.- SIMBOLOS Y SIGNIFICADO

Símbolo	Significado	Unidades
D	Diámetro del penetrador	Milímetros
F	Carga de prueba	Newton
d	Diámetro medio de la huella	Milímetros
h	Profundidad de la huella	Milímetros

$$\text{Dureza Brinell} = \frac{\text{Cte.} \times \text{carga de prueba}}{\text{Area de la sup. de la huella}}$$

$$HB = \frac{0.204F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Ejemplos:

150 HB 5 / 7355 / 20.- Indica que se obtuvo una dureza Brinell de 150, con un penetrador de acero de 5 mm de diámetro, carga de prueba de 73.55 N, aplicada durante 20 segundos.

NOTA.- En la tabla 3 del apéndice se presentan las formas de cálculo y de expresión actualmente usadas en México.

4 APARATOS Y EQUIPO

4.1 Máquina de prueba

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

4.1.1 La máquina de prueba es el dispositivo que permite forzar entre sí el espécimen y el penetrador con una carga predeterminada.

4.1.2 Las cargas a usar deben ser las siguientes:

$F = 2,5 D^2$ para materiales con dureza Brinell igual o menor que 35.

$F = 5 D^2$ para materiales con dureza Brinell comprendida entre 35 y 80.

$F = 10 D^2$ para materiales con dureza Brinell mayor que 80.

La tolerancia en la carga debe ser en todo caso $\pm 1 \%$.

4.1.3 El ángulo entre la línea de carga y la normal al espécimen debe ser menor que dos grados sexagesimales.

4.2 Dispositivo de medición de la huella

Para medir el diámetro de la huella debe usarse un microscopio u otro dispositivo óptico provisto de escala micrométrica que permita medir el diámetro d de la huella con una precisión de $\pm 0,5\% d$.

4.3 Penetrador

4.3.1 El diámetro del penetrador no debe ser menor de un mm. Los diámetros usuales son los siguientes; 1; 2; 2,5; 5 y 10 mm, con las tolerancias sobre los diámetros indicadas en la tabla 2.

4.3.2 El penetrador debe ser de acero endurecido con una dureza 850 HV 98,07 (teniendo en cuenta la corrección por curvatura de su superficie). Debe estar pulido y libre de defectos superficiales. Si después de la prueba el penetrador muestra deformaciones o defectos superficiales, los resultados son nulos y el penetrador debe ser desechado.

TABLA 2.- ESPECIFICACIONES DEL PENETRADOR

Diámetro del penetrador (mm)	Tolerancias en el diámetro (mm)	Valor máximo de la diagonal media hecha con un penetrador Vickers a 10 kgf (mm)
10	+/- 0.0045	0.146
5	+/- 0.0040	.0145
2.5	+/- 0.0035	0.143
2	+/- 0.0035	0.142
1	+/- 0.0035	1.139

4.4 Espécimen

4.4.1 La prueba debe realizarse sobre una superficie suficientemente lisa como para que pueda medirse el diámetro de la huella con una precisión de $\pm 0,01$ mm. Si es necesario, debe prepararse previamente la superficie mediante pulido, cepillado, maquinado, esmerilado o cualquier otro método, cuidando de no alterar las condiciones de la superficie por calentamiento o por deformación.

4.4.2 El espesor del espécimen no debe ser menor que ocho veces la profundidad de la huella $h = 0,102 F / D \times HB$. No debe quedar deformación visible en el lado del espécimen directamente opuesto a la huella después de realizada la prueba.

5 REQUISITOS DE PRUEBA

5.1 La prueba debe ser realizada a la temperatura ambiente dentro de los límites de 10° y 35°C , a menos que se especifiquen otras condiciones. Es importante que durante el desarrollo de la prueba, la máquina esté protegida contra golpes y vibraciones y el espécimen contra desplazamientos laterales.

5.2 Las superficies de contacto entre el espécimen y el penetrador deben estar libres de toda materia extraña (suciedad, aceite, etc.).

5.3.1 Cuando el espesor del espécimen lo permita, debe preferirse un penetrador con $D = 10$ mm.

5.4 La carga debe aplicarse sobre el penetrador en forma gradual, evitando choques y sobrecargas por efectos inerciales. La carga de prueba debe mantenerse durante 10 a 15 segundos.

5.5 La distancia desde el centro de la huella al borde del espécimen debe ser por lo menos tres veces el diámetro de la misma (d). La distancia entre centros de dos huellas adyacentes debe ser por lo menos cuatro veces el diámetro de las mismas.

5.6 Debe evitarse cualquier condición que conduzca a resultados falsos por ejemplo, el "rizado" del borde, o cualquier otra distorsión del espécimen.

5.7 El diámetro de cada huella debe ser medido en dos direcciones perpendiculares entre sí. Se usará el promedio de ambas mediciones para determinar el número de dureza Brinell (HB) según la fórmula de la tabla 2.

5.8 Se recomienda que el diámetro de la huella (d), quede comprendido entre $0,25 D$ y $0,5 D$.

5.9 Es posible determinar la dureza Brinell de un espécimen curvado, siempre que el radio de curvatura sea mayor que 25 mm (para un penetrador con $D = 10$ mm). En tal caso,

se debe considerar como diámetro de la huella el promedio de los dos diámetros principales.

APENDICE

A.1 No obstante lo especificado en 5.2, con el propósito de mejorar el contraste de la huella y favorecer la medición del diámetro, está permitido usar un pigmento sobre el penetrador (por ejemplo, azul de Prusia).

A.2 Debe tenerse en cuenta que la dureza Brinell de casi todos los materiales está afectada por la magnitud de la carga de prueba, así como por el diámetro y las propiedades elásticas del penetrador.

A.3 El resultado de la prueba de dureza Brinell debe darse en la forma especificada en 3.2, evitando conversiones a otras escalas de dureza.

A.4 En la Norma ASTM E 10-1978 se encuentran tablas para cálculo directo de HB a partir de d, para D= 10 mm y F = 500 kgf.

A.5 Para todo lo referente a selección de penetradores y calibración de las máquinas de prueba consúltese Bibliografía.

A.6 Forma de uso actual en México:

TABLA 3.- ECUACION PARA EL CALCULO DE LA DUREZA BRINELL

Símbolo	Significado	Unidades
D	Diámetro del penetrador	mm
F	Carga de prueba	Kgf
d	Diámetro medio de la huella	mm
h	Profundidad de la huella	mm

$$\text{Dureza Brinell} = \frac{\text{Cte.} \times \text{carga de prueba}}{\text{Area de la sup. de la huella}}$$

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

A.7 El número de dureza Brinell debe ser antecedido por otros tres números, especificando las condiciones de la prueba bajo el siguiente orden:

- Diámetro del penetrador en mm.
- Carga de prueba en kgf.
- Duración de la carga en s.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Ejemplo:

HB 5 / 250 / 15 = 23, indica que se obtuvo una dureza Brinell de 23 en una prueba con un penetrador de 5 mm de diámetro y una carga de 25 Kgf, aplicada durante 15 segundos.

7 CONCORDANCIA CON NORMAS INTERNACIONALES

Esta Norma coincide básicamente con la Recomendación ISO/R 191: Light Metals and Their Alloys.

ANEXO 3

ATAQUES PARA LA EXAMINACIÓN MICROSCÓPICA DE ALEACIONES DE ALUMINIO

Vea Tabla 2 para aplicar a los especímenes de las aleaciones.

ATAQUE	COMPOSICIÓN	FORMA PARA PROCEDER
1 Ataque cáustico	10g NaOH para atacar 90 ml.	inmersa el espécimen de 5-15 min en la solución a Temp. 60-70 °C, enjuague en agua, sumerja en 50% HNO ₃ , solución para , enjuague en agua y seque.
2	45 ml HCl concentrada, 15 ml HNO ₃ , concentrada, 15 ml HF (48%), 25 ml H ₂ O	Antes de 50 ml HCl concentrada, 15 ml HNO ₃ concentrada, 3 ml HF (48%), 5 ml FeCl ₃ concentrada usar. Sumerja el espécimen de 10-15 seg, enjuague en agua tibia, seque y examine
3	1 ml HF (48%), 9 ml H ₂ O	
4	12 ml HCl concentrada, 6 ml HNO ₃ concentrada, 1 ml HF (48%), 1 ml H ₂ O	
5	50 ml HCl concentrada, 15 ml HNO ₃ concentrada, 3 ml HF (48%), 5 ml FeCl ₃ concentrada	
6	10 ml HCl concentrada, 30 ml HNO ₃ concentrada, 20 ml H ₂ O, 5 g FeCl ₃	
7	60 ml HCl concentrada, 40 ml HNO ₃ concentrada,	
8	20 g CuCl, 100 ml H ₂ O	

La tabla 2 indica los ataques que se aplican a las varias clases de aleaciones de la tabla 1.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Tabla 2 Aplicación de ataques en la tabla 1 para macroexaminación de aleaciones de Aluminio.

Aleación	Ataque
Alla-pureza de aluminio.....	4 o 5
Pureza comercial de aluminio: series 1xx.x.....	1, 2, o 4
Series 2xx.x Todas las aleaciones de alto contenido de cobre.....	1, 6 o 7
Series 3xx.x Aleaciones de Al-Si-Cu y Al-Si-Mg.....	1,2,4,o 6
Aleaciones Al-Si : Series 4xx.x y fundición de aleaciones.....	2, 3, 4, o 8
Aleaciones Al-Mg : Series 5xx.x y fundición de aleaciones.....	1, 2, 4, o 6
Aleaciones Al-Zn: Series 7xx.x.....	1, 2, 4, o 6
Aleaciones Al-Sn : Series 8xx.x.....	1 ó 6

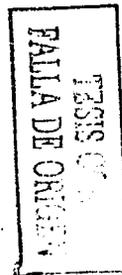


Tabla 3 ataques para el uso en examen microscópico de aleaciones de aluminio. Vea la Tabla 4 para las aplicaciones de aleaciones específicas.

ATAQUE	COMPOSICION	MODO DE USO
1 (HF) ataque	1 mL HF(48%), 200 mL H ₂ O	fregar por 15seg o sumergir por 30-45 seg.
2	1gm NaOH, 100mL H ₂ O	fregar por 5-10 seg.
3A (el reactivo de Keller)	2 mL HF (48%), 3 mL HCL (conc). 5 mL HNO ₃ (conc). 190 mL H ₂ O	Sumerja por 8-15 s. lave con agua caliente. No quita el ataque de la superficie.
3B (dituya el reactivo de Keller)	20 mL del ataque 3A, 80 mL H ₂ O	Mezcle nuevamente antes de usar. Sumerja el espécimen por 5-10 s.
4 (modifique el reactivo de Keller)	2 mL HF (48%), 3 mL HCL(conc). 20 mL HNO ₃ (conc), 175 mL H ₂ O	Sumerja por 10-60 s, lave con agua caliente, no quita el ataque de la superficie.

5 (reactivo de Barker)	4-5 mL HBF ₄ (48%). 200 mL H ₂ O	Electrolítico: use aluminio como conductor, acero inoxidable para el cátodo, el espécimen es el ánodo. Anodize 40-80 seg, aproximadamente 0.2 A/cm ² (1.3 A/in ² , o cerca de 20V cd). Cheque los resultados en microscopio con polarización cruzada.
6	25 mL HNO ₃ (conc), 75 mL H ₂ O	Sumerja en la solución a 70°C (160°F), por 45-60 s.
7	20 mL H ₂ SO ₄ (conc), 80 mL H ₂ O	Sumerja a 70 °C (160 °F) por 30 s, enjuague en agua fría.
8	10 mL H ₃ PO ₄ (85%), 90 mL H ₂ O	Sumerja a 50 °C (120 °F) 1 min. o 3-5 min. (vea tabla 4).
9	5 mL HF (48%), 10 mL H ₂ SO ₄ , 85 mL H ₂ O	Sumerja por 30s.
10	4g KMnO ₄ , 2g Na ₂ CO ₃ , 94 mL	La superficie deberá estar bien pulida y prelimpiada en 20% H ₂ PO ₄ , a 95 °C (205 °F) uniforme. Después del prelimpiado enjuague con agua fría e inmediatamente sumerja en el ataque por 30 s.
11	2g NaOH, 5g NaF, 93 mL H ₂ O	Sumerja por 2-3 min.
12	50 mL el reactivo de Poulton (ataque 4 en tabla 1), 25 mL HNO ₃ (conc), 40 mL de Solución de 3g de ácido Crómico por 10 mL de H ₂ O	Poner un poco de gotas sobre un rodillo y pasarlo por la superficie durante 1-4 min. enjuagar y fregarlo con una escobetilla. Examinar en un microscopio con polarización cruzada para mostrar granos. Repita la técnica si es necesario para. Algunas aleaciones 5xxx incrementa HNO ₃ en una solución a 50 mL.
13	8 mL HNO ₃ (conc), 2 mL HCL (conc), 45 mL H ₂ O, 45 mL metanol	Sumerja por 10 s.
14	5 mL ácido acético (glacial), 1 mL HNO ₃ (conc), 94 mL H ₂ O	Sumerja por 20-30 min.
15 (reactivo de Graff/Sargent)	15.5 mL HNO ₃ (conc), 0.5 mL HF (48%), 3.0 g CrO ₃ , 84 mL H ₂ O	Mezcle nuevamente antes de usar. Use a temperatura ambiente. Sumerja una muestra y agite moderadamente por 20-60 s, en seguida ataque con el reactivo de Keller y podrá desarrollar la estructura.

Tabla 4. Aplicaciones de ataques en tabla 3 para examinación microscópica de aleaciones de aluminio.

Aleación	Ataque	Evidencia Revelada
Examinación de forma y tamaño de grano		
Series 1xx.x, 3xx.x, 5xx.x, aleaciones de fundición	5 ó 12	Gran contraste utilizando polarización cruzada, o con tinta sensitiva.
Series 2xx.x, 7xx.x, aleaciones de fundición aluminio cobre ó aluminio zinc.	3A ó 11, 15	Gran contraste ó líneas del limite de grano.
Serie 5xx.x aleación con más de 3% de Mg.	8 (3-5min)	Precipitación en limite de grano.
Examinación para trabajo en frío		
Series de aleaciones 1xx.x, 3xx.x, 5xx.x.	5 ó 12	Deformación en las bandas ó marcas, causa un efecto de rayas cuando se usa polarización cruzada.
Series de aleaciones 2xx.x, 7xx.x.	3A ó 11	Deformación en las bandas ó marcas, acompañadas relativamente con grandes cantidades de trabajo en frío
Series xx.x aleaciones con más de 3% de Mg.	8 (3-5min.)	Precipitación en las bandas de cambio.
Examinación para recristalización incompleta		
Series de aleaciones 1xx.x, 3xx.x, 5xx.x.	5 ó 12	
Series de aleaciones 2xx.x, trabajo en caliente y tratamiento térmico	3A ó 11, 15	Múltiples granos sin recristalizar. Subgranos muy finos.
Series de aleaciones 3xx.x, trabajo en caliente y tratamiento térmico.	9, 15	Múltiples granos sin recristalizar. Subgranos muy finos.
Series de aleaciones 7xx.x, trabajo en caliente y	8 (3-5 min.) ó 14, 15	Múltiples granos sin recristalizar. Subgranos

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

tratamiento térmico.		muy finos.
Examinación para la orientación preferida		
Series de aleaciones 1xx.x, 3xx.x, 5xx.x.	5 ó 12	Predomina
Serie de aleación 2xx.x, en tratamiento T4	3A ó 11, 15	
Examinación para constituyentes de identificación		
Series de aleaciones xx.x	1 ó 7	Ver tabla 5
Series 2xx.x, 3xx.x; aluminio cobre, y aluminio magnesio aleaciones de fundición.	8 (1min.)	Ver tabla 5
Aleaciones de fundición serie 7xx.x, aluminio zinc.	3B	Ver tabla 5
Examinación para		
Serie de aleaciones 2xx.x	8 (1min.)	
Serie de aleaciones 3xx.x	2	
Serie de aleaciones 7xx.x	3B	
Examinación para distribución y constitución general de piezas		
Todas las aleaciones de fundición y aleaciones forjadas.	1, 8, 15, (1min.) ó cualquier ataque deberá	Entre más tiempo de ataque exagera el tamaño de las partículas finas.
Examinación de distinción entre soluciones tratamiento térmico (T4) y envejecimiento (T6) templado		
Series de aleaciones 2xx.x,	3A ó 11,	La pérdida del contraste de granos, obscurecimiento general, en T6 comparado con T4
6061	9	Claro delineamiento de los límites de grano en T6, débil delineación en T4.
7075 recristalizado	4	Mayor contraste de grano,

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

		delineamiento con mayor contraste en los granos.
Examinación para segregación y difusión de efectos		
Serie de aleaciones de fundición 3xx.x, 5xx.x, aluminio magnesio	10	Interferencia de color sobre la superficie
Serie de aleaciones 2xx.x, y otras con más de 1% Cu.	3A ó 11	Color tostado por redeposición de cobre.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ANEXO 4

DEFECTOS CARACTERÍSTICOS QUE SE PUEDEN ENCONTRAR EN ALEACIONES DE ALUMINIO.

C

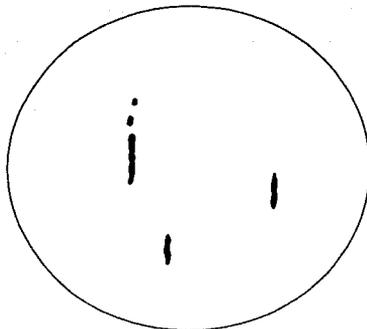
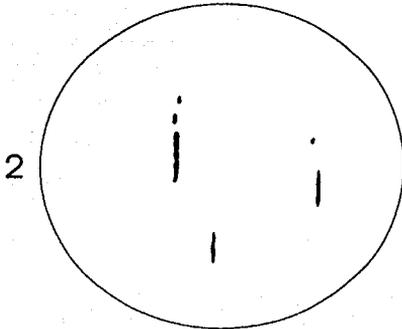
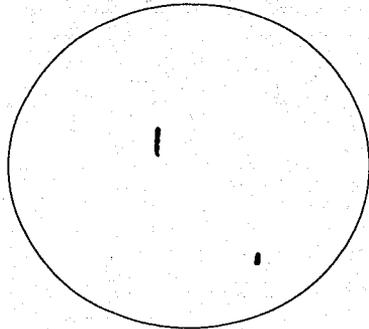
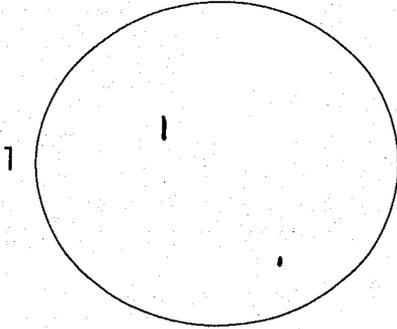
(Silicate Type)

THIN SERIES

Thickness up to approx. 5 microns (0.0002 in.)

HEAVY SERIES

Thickness up to approx. 9 microns (0.00035 in.)



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

B

(Alumina Type)

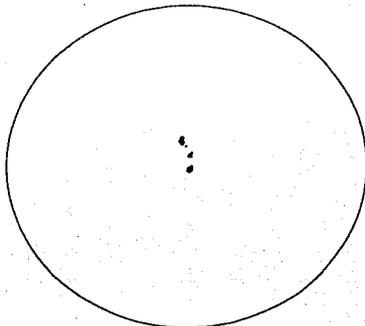
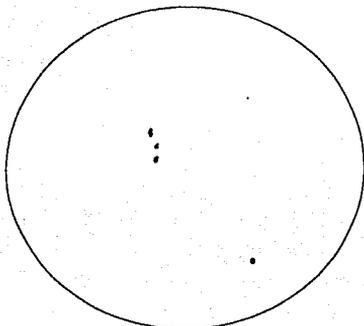
THIN SERIES

Thickness up to approx. 9 microns (0.00035 in.)

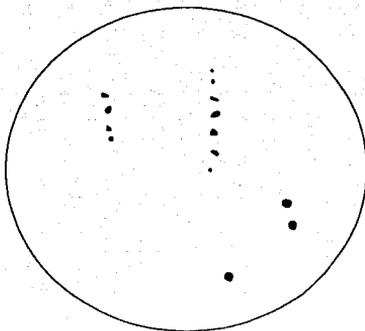
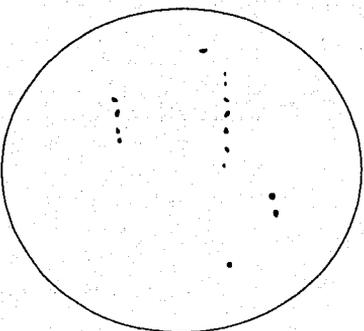
HEAVY SERIES

Thickness up to approx. 15 microns (0.0006 in.)

1



2



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

D

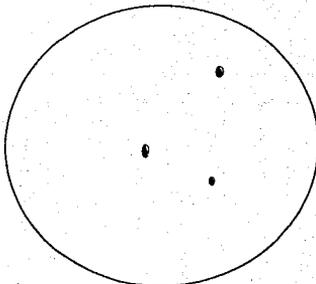
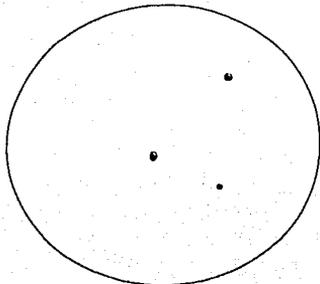
Globular Type Oxides

THIN SERIES

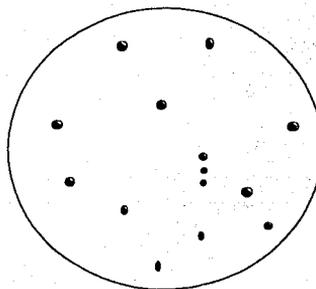
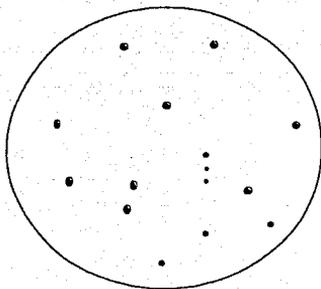
Thickness up to approx. 9 microns (0.00035 in.)

HEAVY SERIES

Thickness up to approx. 12 microns (0.0005 in.)

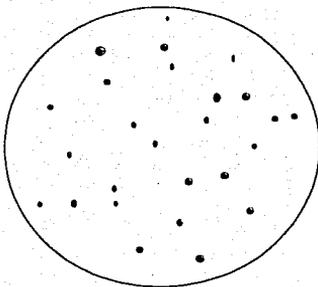
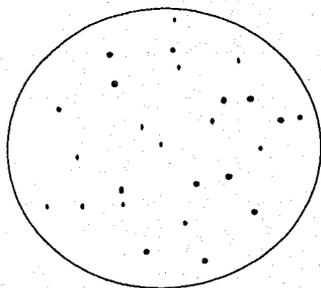


1

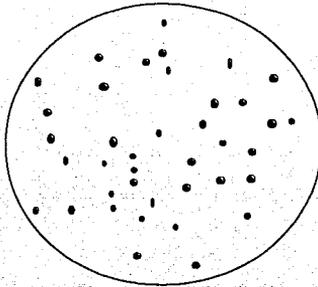
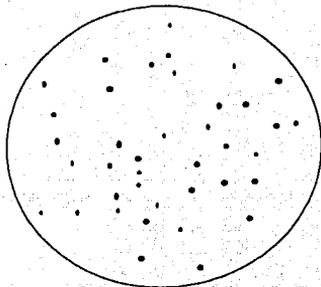


2

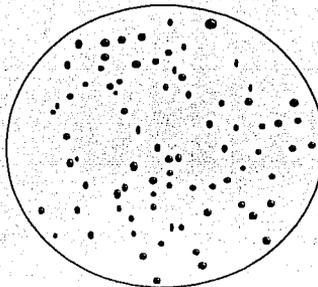
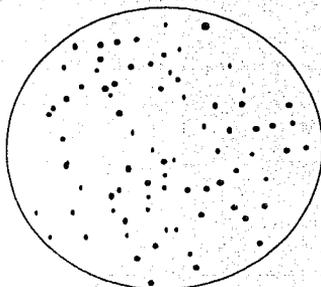
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



3



4



5

TESIS CON
FECHA DE ORIGEN

ANEXO 5



FECHA: Abril-16-2002

CERTIFICADO DE CALIDAD

Cert. de Pruebas Num. 2002/0106

ESPECIFICACIÓN	MIN	MAX
RES. TENSIÓN	0	0

EDUARDO GALICIA GOMEZ
ANÁLISIS QUÍMICO FUMISA.
A319 - A365
COMPARACIÓN /ASM

ANÁLISIS QUÍMICO A319 No. DE COLADA S/N

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Elementos
6.50	0.826	3.48	0.17	0.201	0.16	2.15	0.3	% en peso

✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✗	
---	---	---	---	---	---	---	---	--

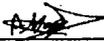
✗ Parámetros fuera del límite máximo respecto a ASM
✓ Parámetros dentro del límite máximo respecto a ASM
Se certifica que el material A319 no cumple con requerimientos de ASM

ANÁLISIS QUÍMICO A365 No. DE COLADA S/N

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Cr	Pb
4.12	0.532	1.41	0.16	0.319	0.282	0.136		0.040	0.10

N/A Parámetros fuera del límite máximo respecto a ASM
N/A Parámetros dentro del límite máximo respecto a ASM
Se certifica que el material A365 cumple con requerimientos de FUMISA

GRUPO INDUSTRIAL ALMONTI, S.A. DE C.V.


Arturo Márquez
Gerente de Aseguramiento de Calidad.

GRUPO INDUSTRIAL ALMONTI S.A. de C.V.
FELIX GUZMÁN No. 16 C.P. 53398
NAUCALPAN, EDO. DE MÉXICO
Tel: 5329-31-74 Fax: 5329-32-46

PLANTA: ANTIGUA CARRETERA A QUERÉTARO
KM. 71.5 C.P. 42850
TEPEJI DEL RÍO, HGO.
Tel: 01-773-30617, 30435, 30735

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN