

51  
2ej



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN

CONDICIONES OPTIMAS DE TRATAMIENTO POR ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL PARA OBTENER MAXIMAS PROPIEDADES EN UNA ALEACION DE ALUMINIO 356.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
P R E S E N T A N :  
MURO CHAVEZ ROBERTO  
PAEZ CEDILLO ROGELIO JAVIER

ASESOR: M.I. FELIPE DIAZ D CASTILLO RODRIGUEZ.

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

1999

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

271773



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLÁN



DEPARTAMENTO DE

ATENCIÓN de la Srta. Carmen García Mijares  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

"CONDICIONES OPTIMAS DE TRATAMIENTO POR ENVEJECIMIENTO  
ARTIFICIAL PARA OBTENER MAXIMAS PROPIEDADES EN UNA  
ALEACION DE ALUMINIO 356 "

que presenta EL pasante: MIRO CHAVEZ ROBERTO  
con número de cuenta: 8505606-0 para obtener el TITULO de:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO

ATENTAMENTE.  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 23 de NOVIEMBRE de 199 8

PRESIDENTE ING. FILIBERTO LEYVA PIÑA

VOCAL ING. GERARDO SOSA

SECRETARIO M.I. FELIPE DIAZ D CASTILLO RODRIGUEZ

PRIMER SUPLENTE ING. ENRIQUE CORTES GONZALEZ

SEGUNDO SUPLENTE ING. JESUS GARCIA LIRA



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVANZADA DE  
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN



DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN  
PRESENTE

ATN: Q. María Carmen García Mijares  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

"CONDICIONES OPTIMAS DE TRATAMIENTO POR ENVEJECIMIENTO  
ARTIFICIAL PARA OBTENER MAXIMAS PROPIEDADES EN UNA  
ALEACION DE ALUMINIO 356 "

que presenta EL pasante: PAEZ CEDILLO ROGELIO JAVIER  
con número de cuenta: 8528038 - 4 para obtener el TITULO de:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO

ATENTAMENTE.

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 23 de NOVIEMBRE de 199 8

PRESIDENTE ING. FILIBERTO LEYVA PIÑA

VOCAL ING. GERARDO SOSA

SECRETARIO M.I. FELIPE DIAZ D CASTILLO RODRIGUEZ

PRIMER SUPLENTE ING. ENRIQUE CORTES GONZALEZ

SEGUNDO SUPLENTE ING. JESUS GARCIA LIRA

## *Agradecimientos*

*A Dios*

*Por guiarme siempre en el camino correcto*

*A mis padres*

*Por su apoyo para lograr la meta anhelada y en especial a mi madre por que a pesar de todos los problemas siempre alentó en mí la superación*

*A Sandra*

*Por su amor, comprensión, apoyo y ejemplo a seguir en todo momento*

*A mis hermanos*

*América, Roberto, Carmen, Diana y Jesús por su estímulo y quererme tal como soy*

*A mis amigos*

*Por sus consejos y los inolvidables momentos vividos*

*Rogelio*

*A Dios*

*Por permitirme estar aquí a pesar de tantos sobresaltos.*

*A mi Madre*

*Que fue y sigue siendo mi mayor motivación para superarme, y aunque ya no está conmigo para disfrutar estos momentos, sé que donde se encuentre, estará orgullosa de mí. ¡Lo logramos Mamá!*

*A mis hermanos, cuñados y demás familiares*

*Porque siempre conté con su apoyo en todo momento. Especialmente a Lidia, porque gracias a su confianza y generosidad, pude continuar con mi superación.*

*A ti*

*Porque eres un gran impulso para mí y mantuviste viva la llama de culminar este esfuerzo. Gracias, te quiero mucho.*

*A mis 2 tesoros y a mis sobrinos*

*Porque espero sembrar en ellos la inquietud de la superación y tengan la libertad mental y espiritual que da el conocimiento.*

*A mis amigos*

*Gracias por su compañía, consejos y por ayudarme a encontrar el camino adecuado para mí.*

*A Rogelio*

*Que por su tenacidad hizo posible la conclusión de este trabajo.*

*Roberto*

*A la U.N.A.M. - F.E.S.C.*

*Por permitirnos ser parte de ella y brindarnos sus conocimientos a través de sus profesores quienes, a su manera, aportaron su experiencia y dominio de las materias para permitir nuestro desarrollo profesional.*

*Muy en especial al M. I. Felipe Díaz del Castillo*

*Por haber aceptado asesorarnos, su confianza, apoyo e infinita paciencia para realizar este trabajo*

*Y a todos los que en su momento nos apoyaron muchas gracias*

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
--------------------	---

### CAPITULO I

#### GENERALIDADES

1.1 Panorama general de las aleaciones de aluminio en nuestro país .....	2
1.2 Ventajas del uso de las aleaciones de aluminio en general .....	3

### CAPITULO II

#### EL ALUMINIO PURO Y SUS ALEACIONES

2.1 El Aluminio como metal puro	
2.1.1 Historia .....	5
2.1.2 Obtención del aluminio .....	6
2.1.3 Propiedades físicas o mecánicas del aluminio puro .....	11
2.1.4 Procesos de reciclaje .....	13
2.1.4.1 Aspectos generales de la chatarra .....	14
2.1.4.2 Clasificación de la chatarra .....	15
2.2 Aleaciones del aluminio	
2.2.1 Principales elementos de aleación del aluminio y sus efectos .....	17
2.2.2 Designación de las aleaciones de aluminio .....	22
2.2.2.1 Las aleaciones de aluminio forjadas .....	22
2.2.2.2 Las aleaciones de aluminio fundidas.....	24
2.3 Clasificación de los temple básicos .....	31
2.4 Tratamiento térmico .....	34

### CAPITULO III

#### TRATAMIENTO DE ENDURECIMIENTO POR PRECIPITACIÓN.

3.1 Tratamiento de Solución .....	37
3.2 Enfriamiento .....	40
3.3 Endurecimiento por precipitación o envejecimiento .....	41

---



## CAPITULO IV

## PARTE EXPERIMENTAL

4.1 Obtención de muestras .....	42
4.2 Aplicación del tratamiento térmico T6 .....	42
4.3 Preparación de muestras .....	43
4.4 Pruebas mecánicas .....	45
4.4.1 Dureza .....	45
4.4.2 Prueba de tensión .....	46
4.4.3 Difracción de rayos X .....	46

## CAPITULO V

## RESULTADOS

5.1 Microscopía Óptica .....	48
5.2 Dureza .....	51
5.3 Prueba de tensión .....	53
5.4 Difracción de rayos X .....	53
CONCLUSIONES .....	68
BIBLIOGRAFÍA .....	70
ANEXOS .....	72

---

## INTRODUCCIÓN

El aluminio y en especial la aleación A356 en los últimos años ha alcanzado un amplio uso dentro de la industria Metal-Mecánica, más que el resto de los otros materiales debido al amplio campo de aplicaciones y una extensa gama de propiedades mecánicas tales como, una excelente resistencia a la corrosión, buena resistencia a la tensión, buena fluidez, etc., y además cuenta con la ventaja de poder incrementar sus propiedades mecánicas aplicando el tratamiento térmico adecuado, todo esto, es lo que el aluminio ofrece a una gran gama de áreas industriales.

El uso del aluminio seguirá creciendo día con día y la finalidad de este trabajo es ofrecer un poco más de información general desde su descubrimiento, los avances en su obtención, las aleaciones más comunes, su reciclaje y sus posteriores avances como material comercial.

Así mismo, se busca establecer las condiciones óptimas en el tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación aplicado a una aleación 356, para obtener sus máximas propiedades. Además de observar la microestructura del aluminio antes y después de aplicado el tratamiento térmico T6, para determinar el comportamiento de los límites de grano y los elementos aleantes.

# CAPITULO I

## GENERALIDADES

### 1.1 Panorama general de las aleaciones de aluminio en nuestro país.

En México existen 618 empresas activas dedicadas a la fundición (De la Garza, 1995). Sin embargo, se dispone de la información de 250 empresas; las cuales producen 701, 243 toneladas anuales. El 51% del metal vaciado corresponde a la fundición de hierro gris, 33% al aluminio, 9% al hierro nodular, 3% a lingotes de aluminio y 1% a cobre y aleaciones. El metal fundido para el mercado nacional representa el 70% de lo producido, y el 30% restante es para exportación.

El aumento espectacular en el consumo del aluminio es prueba de lo que este metal significa en la industria moderna. El aluminio como se mencionó anteriormente sigue al hierro entre los metales de mayor consumo anual en México. Es el más importante de los metales no ferrosos y siguen aumentando las facilidades de producción por la expectativa de una creciente demanda mundial. La variedad de usos a los que se presta el aluminio es un detalle sobresaliente de este desarrollo y cada nuevo uso es el resultado del éxito obtenido en la aplicación de alguna de las propiedades del metal, siendo las principales su peso liviano, resistencia a la corrosión y alta conductividad eléctrica.

Este metal ofrece una amplia variedad de aplicaciones por lo que el rango de productos es inmenso, desde productos de cocina donde lo importante es una buena conductividad térmica, hasta partes para aviones en las que se necesita buena resistencia mecánica.

La industria del aluminio y en especial en la fundición Mexicana durante la última década, ha ido tomando un gran auge, en gran parte debido a las exigencias cada vez mayores del sector automotriz. Exigencias tales como menor peso de la unidad, ahorro de combustible, mayor resistencia, etc., pudiéramos decir que una mejor relación costo-beneficio.

Tabla 1.1. Consumos de Aluminio en México.

Denominación		1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996 Nov.
Lámina	Ton	29300	27952	15916	26617	37010	37263	29062
Lingotes	Ton	56825	42763	17371	25547	28988	33067	65214
Papel	Ton	9060	8681	10390	12074	7453	7703	9316
Perfiles diversos	Ton	25374	28622	29508	33857	51246	30180	42182
Tubos	Ton	2303	2341	2310	2680	1217	612	674
Productos de aluminio escaleras y celosías	Ton					6728	4768	5595
Piezas fundidas de metales de aluminio	Ton					3012	1817	1977
<b>Total anual</b>	<b>Ton</b>	<b>122862</b>	<b>110359</b>	<b>75495</b>	<b>100775</b>	<b>135654</b>	<b>115410</b>	<b>154020</b>

En la tabla N° 1.1 se aprecia el incremento de uso del aluminio en nuestro país de acuerdo a datos estadísticos del INEGI, y se espera que siga creciendo por las características ya antes mencionadas.

## 1.2 Ventajas del uso de las aleaciones de aluminio en general

El aluminio es el más versátil de todos los metales comunes. El aluminio y sus aleaciones pueden ser trabajados con gran facilidad en frío o en caliente, mediante los procesos de estirado, laminado, rolado, extrusión, embutido, doblado o forjado para darle una gran variedad de formas aplicables a una multitud de usos.

Asimismo, se cuelean fácilmente en piezas y componentes esenciales mediante procesos de fundición como la arena, cáscara, centrifugación, cera perdida, molde permanente ya sea por gravedad o baja presión, etc.

Generalmente, las técnicas empleadas para el formado mecánico y la fundición del aluminio y sus aleaciones, son comparativamente menos complicadas y menos costosas que las requeridas para metales ferrosos y la mayoría de los metales no ferrosos. Esta ventaja es una consecuencia de las numerosas características convenientes del aluminio, como su baja densidad, baja temperatura para trabajo en caliente, facilidad para trabajo en frío, baja

temperatura de fusión, manejo de metal más fácil, moldes y matrices más simples, entre otras.

Una característica en comparación con otros materiales es que es muy ligero pesa 2.7 g. por centímetro cubico, en cambio este mismo volumen de acero pesa 7.86 g., de Cu 8.92, de Pb 11.34 g. y de Zn 7.13 g.

Es un excelente conductor de la electricidad. La conductividad eléctrica del Al es de 61% con relación al Cu. Solamente que como el Al pesa menos de la 3ra parte que el Cu, kg. por kg. es dos veces más efectivo como conductor eléctrico.

El maquinado del aluminio y sus aleaciones se hace fácilmente mediante herramientas adecuadas partiendo de barras, piezas moldeadas o forjadas, para dar piezas de mayor precisión o de una forma determinada.

Admiten también una amplia variedad de acabados mediante procesos mecánicos, químicos, recubrimientos electroquímicos y de pintura con objeto de mejorar simplemente la apariencia, hacer más funcional la superficie o darle mayor resistencia a la corrosión.

Todas estas características hacen del aluminio uno de los metales más usados por la industria en comparación con otros metales.

## CAPITULO II

### EL ALUMINIO PURO Y SUS ALEACIONES

#### 2.1 El aluminio como metal puro

##### 2.1.1 Historia

“Este metal precioso posee la blancura de la plata; la resistencia a la corrosión del oro; la dureza del fierro; la conductividad del cobre; es tan ligero como el vidrio; es fácilmente maquinable y se le encuentra en cualquier parte del planeta. En pocas palabras, parece haber sido creado con el único fin de proporcionarnos el material para fabricar nuestro proyectil”. “Luego entonces... ¡ vamos a fabricar nuestro proyectil !”. Este es un pasaje de la novela de Julio Verne “De la Tierra a la Luna”. En la medida del progreso científico-espacial de nuestros días, más se reconoce la increíble exactitud de las predicciones surgidas de la pluma iluminada del gran escritor. En este caso su referencia corresponde a una precisa descripción del aluminio.

Una leyenda relatada por Plinio “el viejo” en su “Historia Naturalis” nos dice que en el reinado de Tiberio, se conocía un metal más ligero que el hierro que se retrabajaba después de haber sido preparado a partir de la arcilla, (se ha pretendido ver en él al aluminio). La fábula cuenta que el emperador mando decapitar al inventor, para evitar que su oro se devaluase a causa del descubrimiento de este nuevo metal.

Mucho antes de Verne, 5000 años antes de Cristo la gente que poblaba lo que es actualmente el norte de Irak, descubrió que sus mejores piezas de cerámica fueron las que se formaron con una arcilla, que la tecnología moderna ha reconocido como depositaria de un gran porcentaje de óxido de aluminio. Hoy en día, el óxido de aluminio es un ingrediente esencial en muchos productos cerámicos, incluyendo las famosas vajillas chinas.

Hace más o menos 4000 años, los egipcios y babilonios utilizaron compuestos de aluminio en varios reactivos químicos y medicinas. Los compuestos de aluminio son ahora ingredientes muy importantes en las industrias química, farmacéutica y cosmética.

A mediados del siglo XIX, el Rey Christian X, de Dinamarca, lució una brillante corona de aluminio. Napoleón III hizo que sus artesanos diseñaran un servicio de mesa de aluminio, con el deseo de ofrecer "este metal nuevo y extraño" a aquellos invitados que merecían algo mejor que cubiertos de oro y vajillas de porcelana.

El desarrollo de un método económico para la obtención del aluminio, produjo una serie de aplicaciones muy ingeniosas en su grado y naturaleza pero, sobre todo, reflejando el interés de la gente hacia este nuevo metal como si fuera una "panacea" largos años esperada.

Así, se interesaron en la primera etapa comercial del aluminio lo mismo fábricas de violines que de tinas de baño, máquinas de escribir, fundas para espadas y mesas de operación para cirujanos. Una de las propuestas se refería a zapatos de aluminio, que serían más ligeros, tan durables como la vida del usuario y fáciles de limpiar. Otra compañía fabricó brazaletes, mancuernillas, cigarreras y vasos a prueba de golpes.

No se trataba sino de una inquietud potencial, pues ya las personas de aquellas épocas adivinaban la proyección del aluminio que poco más tarde, con la aplicación del ingenio humano y de la tecnología gradualmente perfeccionada, lo colocaron en una era de grandes realizaciones.

No fue hasta el siglo XIX, sin embargo, cuando el hombre pudo separar el aluminio del oxígeno con el que se combina en su estado natural y clasificarlo como elemento metálico con propiedades únicas y valiosas.

### **2.1.2 Obtención del aluminio**

La presencia del aluminio en las tierras de alumbre ha sido debatida durante la Edad Media sobre todo por los filósofos y alquimistas. En el siglo XIII el inglés Roger Bacon había presentado la naturaleza metálica del componente base (alúmina). El francés Maquer describió las propiedades de la alúmina e indicó que los alumbres se parecen a las tierras metalíferas.

Lavoasier es más explícito "todas las sustancias a las que llamamos tierras pueden ser óxidos metálicos irreductibles por los métodos que hasta ahora conocemos". La alúmina

( $Al_2O_3$ ) forma el 15 % de la corteza terrestre y sólo el silicio es más abundante. Humprey Davy fracasó en sus intentos por separar el aluminio de la alúmina por métodos electrolíticos utilizando pilas, a pesar de su fracaso estaba convencido de que había un metal en la alúmina y le puso el nombre de ALUMINUM (derivado de alumbre), lo que obtuvo fue una aleación de aluminio con hierro.

En 1709 Margraf lo identificó como elemento y F. Whöler determina algunas de sus propiedades en 1827, en 1854 el francés Saint Claire Deville obtiene los primeros lingotes de aluminio, que en aquella época fue considerado como metal precioso.

En 1866 en Europa, el francés Paul Heroult y en América el norteamericano Charles Martin Hall descubren por procedimientos semejantes la forma económica de producir aluminio a gran escala por medios electrolíticos en un baño de criolita fundida.

El mineral industrial más importante es la "bauxita" llamada así por el lugar donde fue descubierto este mineral (Les Baux en Francia) en el año de 1821, con un contenido de más del 50% de alúmina, y se encuentra principalmente en los trópicos.

Tabla 2.1. Fechas importantes en la historia del aluminio

1809	Davy	Obtención de la aleación aluminio-hierro en horno eléctrico
1821	Berthier	Descubrimiento de la bauxita
1824	Oersted	Primeros glóbulos de aluminio
1827	Woler	Producción del polvo de aluminio
1854	S C. Deville	Primer lingote de aluminio
1866	Hall y Heroult	Producción del aluminio por electrólisis
1889		Primera fabrica de producción de aluminio en Francia
1890	Bayer	Puesta a punto de la fabricación de alúmina
1905	Claessen	Temple de las aleaciones de aluminio
1906	Wilm	Envejecimiento y maduración de las aleaciones de aluminio
1911	De Saint-Martin	Anodización de aluminio
1920	Paéz	Modificación con sodio de las aleaciones de aluminio-silicio



La extracción del aluminio de la bauxita se efectúa en tres etapas: “minería”, “refinación” y “reducción”. La bauxita se extrae, se lava y se seca antes de ser embarcada a la refinería donde se separa el aluminio.

Hay muchos métodos para extraer la alúmina, pero el de Bayer es el que más se usa en la industria del aluminio. Este es un procedimiento químico por el cual la alúmina se disuelve en sosa cáustica; como se muestra en la figura 2.1, la sosa se filtra para separar todo el material sólido, concentrándose el filtrado para que cristalice la alúmina. Los cristales se secan y calcinan para expulsar el agua, y el polvo blanco de alúmina pura queda listo para ser enviado a la refinería. La alúmina se reduce al aluminio en unas células electrolyticas del procedimiento Hall-Hérout. En estas células se usa criolita fundida a 980°C para disolver la alúmina, la que al someterse a electrólisis se divide en aluminio y oxígeno.

El aluminio baja al fondo de la célula de donde se extrae periódicamente y el oxígeno se combina con el carbono del ánodo para producir  $\text{CO}_2$ . La Fig. 2.2 contiene el diagrama de una célula. En cifras redondas, se requiere 10 kg. de bauxita para producir 5 kg. de alúmina y un kg. de aluminio.

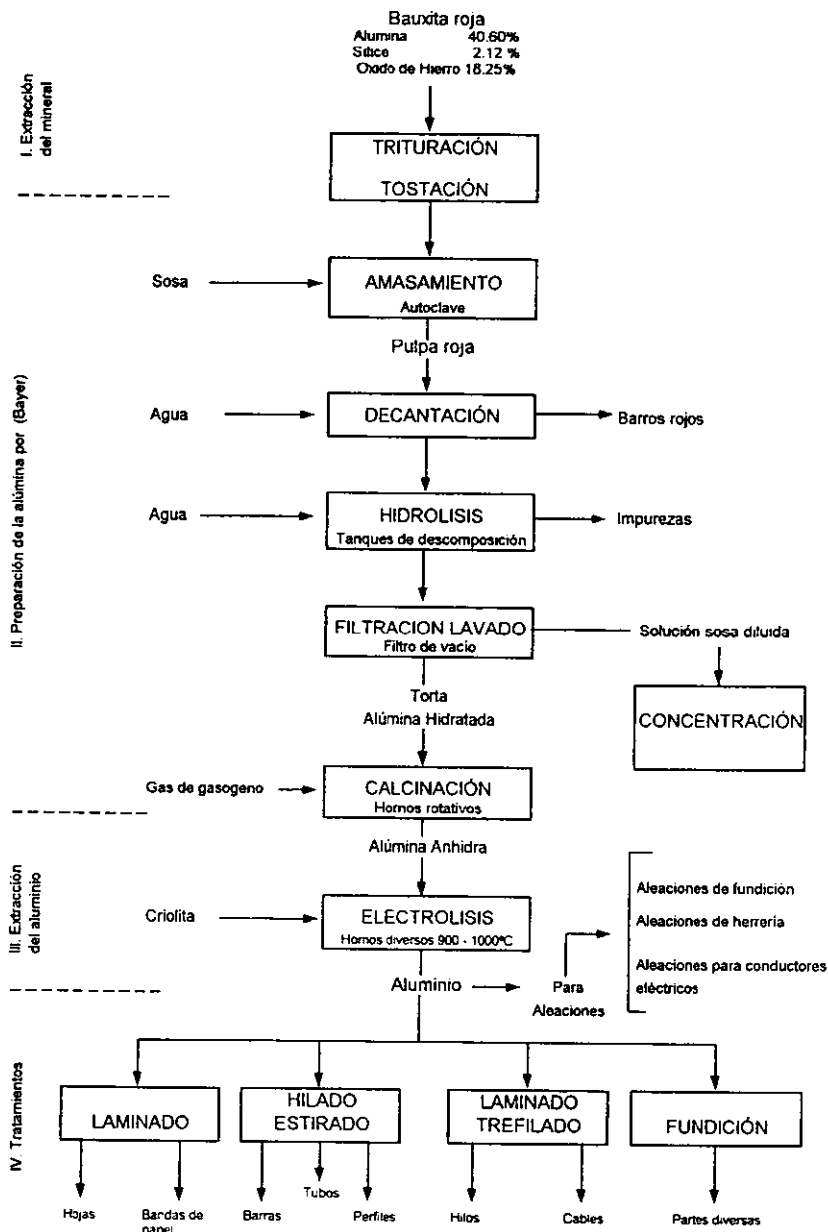


Figura 2.1. Proceso para la obtención del Aluminio

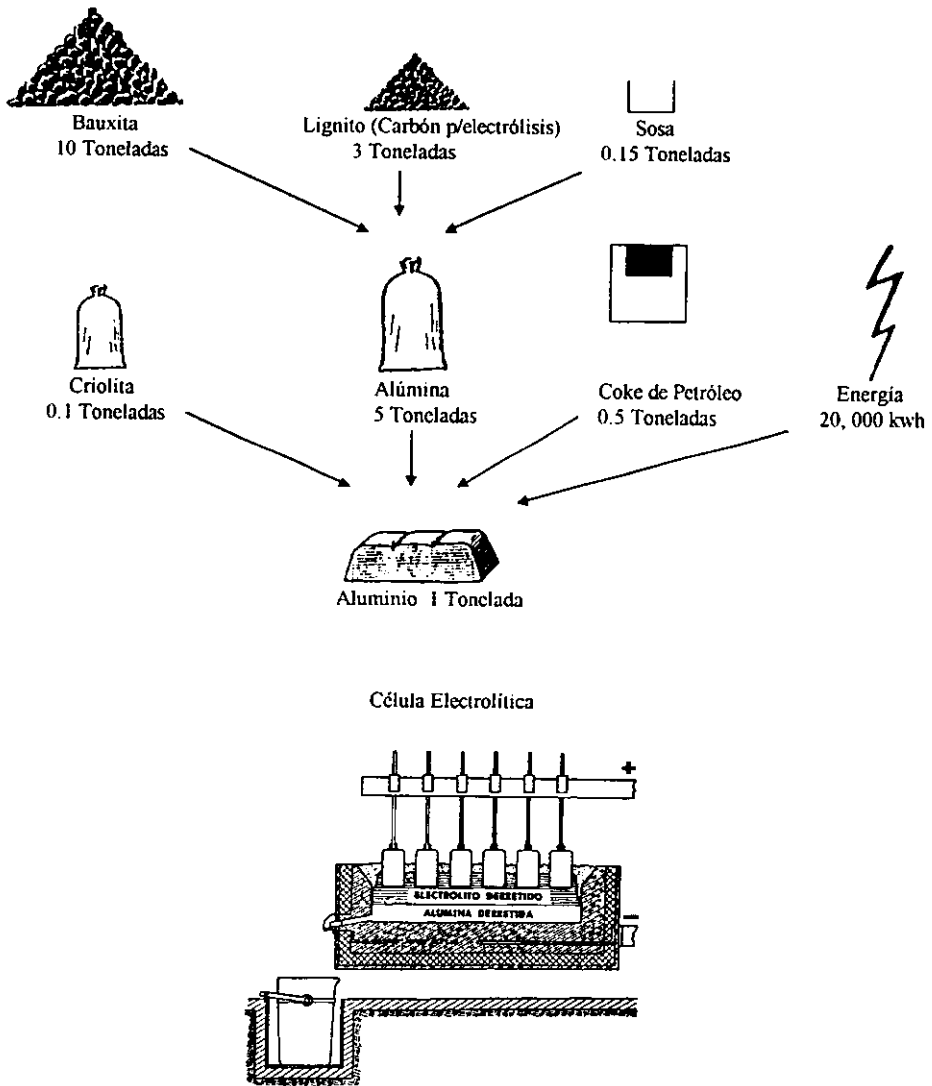


Figura 2 2 Fabricación del aluminio primario

### 2.1.3 Propiedades físicas y mecánicas del aluminio puro

El aluminio es el metal más abundante de la tierra (8%) siendo aventajado solamente por el oxígeno (45%) y el silicio (28%). Posee una serie de cualidades que lo hacen destacar entre los demás metales, razón por la cual es preferido para la satisfacción de diversas necesidades en aplicaciones domésticas e industriales. Entre las principales propiedades físicas del aluminio puro se encuentran las siguientes:

• Elemento	Aluminio
• Símbolo	Al
• Peso atómico	26.97
• Densidad a 20 °C	2.70 g/cc
• Punto de fusión	660 °C
• Punto de ebullición	1800 °C
• Coeficiente de expansión de 20 -100 °C	23.86x10 <sup>6</sup> por °C
• Calor específico a 100 °C	0.225 Cal/g°C
• Calor latente de fusión	93 Cal/g
• Conductividad térmica a 25 °C	0.53 Cal.g/cm <sup>2</sup> / cmc °C/S
• Resistividad eléctrica a 20 °C	2.63 Mμ/cm <sup>3</sup>
• Conductividad eléctrica a 20 °C	61.94 % del cobre
• Reflectividad a X=5000 A	90 %
• Elongación	48.8 %
• Dureza a la penetración	<u>17 Brinell</u>

A continuación se pueden mencionar algunas de las características y propiedades mecánicas del aluminio puro como son:

#### *Resistencia a la corrosión*

El aluminio tiene una excepcional resistencia a la corrosión atmosférica, del agua y de muchos agentes químicos. Esta propiedad se ve aumentada por la formación espontánea de una película de óxido de aluminio al contacto con el aire.

***Resistencia a la tensión***

Cuando el aluminio puro es recocido en hornos, tiene una resistencia a la tensión de 9 14 kg/mm<sup>2</sup>. Esta resistencia aumenta al doble cuando el aluminio se lamina en frío, pero las aleaciones y los tratamientos térmicos pueden hacer que el aluminio adquiera resistencias hasta de 52.73 kg/mm<sup>2</sup>, que es aproximadamente seis veces más que la del aluminio puro y en algunos casos mayor que en aceros de uso común.

***Conductividad térmica***

Esta propiedad hace del aluminio el metal preferido para una gran variedad de usos, pasando desde gigantescos intercambiadores de calor, hasta utensilios de cocina. Para esta última aplicación resulta ideal, debido a la rapidez y uniformidad con que transmite el calor.

***Reflectividad***

El aluminio puede proporcionar en algunas de sus aleaciones y acabados superficiales una buena reflectividad, la cual puede incrementarse con un acabado adicional, como en el caso de métodos químicos, con los cuales puede obtenerse un índice de reflexión de 80% a 85% en comparación 65% para un metal cromado y 90% para un metal plateado.

***Apariencia natural***

En muchas aplicaciones el aluminio puede usarse sin acabados, pero tratándose de darle mayor vista es el metal que más fácilmente acepta los acabados electrolíticos y mediante el anodizado se le puede dar una amplia gama de coloraciones.

***Magnetismo***

El aluminio es antimagnético y no produce chispa al choque, características que lo hacen muy útil e indispensable para gabinetes de conductores eléctricos, equipos automáticos, herramientas, equipos a prueba de explosión en instalaciones eléctricas de refineries, estructuras marinas, fábricas de pinturas y en cualquier aplicación donde el magnetismo es un factor negativo

### ***Otras propiedades***

Además de las propiedades ya mencionadas pueden señalarse algunas otras como buen reflector del calor, de las ondas de radio y radar; no es tóxico y es fácil de trabajar y ensamblar.

#### **2.1.4 Procesos de reciclaje**

La chatarra de aluminio juega un papel cada vez más importante en la industria nacional de artículos de aluminio especialmente en la de productos fundidos. Ello sucede no sólo en nuestro país sino en todo el mundo. Así, la industria consumidora de aluminio secundario ha ido viviendo la transición desde un negocio simple en donde se funde la chatarra y se producen lingotes o piezas fundidas, tirando el dross en el patio trasero, hasta una industria de la mayor especialización para poder procesar chatarras más pobres en una manera más eficiente y manejar los residuos en forma apropiada.

Tomando como referencia EUA, la fracción de aluminio suministrado por la chatarra para cubrir la demanda pasó del 5% en el periodo 1950-1974 al 20% en 1988 (esto equivale a 2.1 millones de toneladas); de este porcentaje, la mitad aproximadamente proviene de chatarra vieja esto es, artículos después de su uso final.

Se estima que existe un comportamiento similar en México, especialmente desde que ya no se produce más aluminio primario.

Al examinar esta situación para nuestro país desde tres perspectivas; energética, tecnológica y socio-económica, se tiene lo siguiente. Desde el punto de vista energético, es bien conocido el hecho de que al utilizar chatarra de aluminio el consumo de energía para producir una pieza es de sólo el 5% con respecto a la energía necesaria cuando se parte desde el mineral. Este ahorro es la razón principal de que se haya ido utilizando más cada vez el aluminio secundario, particularmente el originado de la chatarra vieja.

Por otra parte, si se analiza el lado tecnológico, el avance de procesos de producción y refinación ha ido haciendo posible el tratamiento de chatarras más pobres o con más elementos residuales. Es conocido por los técnicos los efectos detrimentales de estos

elementos en las propiedades del producto final. En dicho aspecto se cuentan con mejoras pero aún resta trabajo por hacer, especialmente en procesos que minimicen el impacto hacia el medio ambiente y en las operaciones de clasificación y separación de chatarra.

En tercer término, si se aproxima el asunto desde el punto de vista socio-económico, queda mucho por avanzar. Aún cuando se cuenta con centros “naturales” de acopio de chatarra existen variadas alternativas de mejorar e incrementar la recuperación del metal, pero que deberán contar con mayor participación del binomio sociedad-gobierno, así como con el interés del consumidor industrial de la chatarra.

El avance hasta ahora logrado en otros países hacia la mayor participación del aluminio secundario se ha obtenido haciendo converger objetivos de los diferentes sectores involucrados: el sector industrial consumidor, el sector comercial de la chatarra, el sector gubernamental y el público usuario. Este uso cada vez mayor del aluminio secundario deberá incrementarse en general, y en México también, debido no solamente a aspectos económicos, sino también del ámbito ecológico.

#### **2.1.4.1 Aspectos generales de la chatarra**

La industria del aluminio secundario se inicia con la materia prima: la chatarra. Como ya ha sido presentado antes por convención se consideran tres tipos generales o definiciones de chatarra.

*Chatarra interna* es la cual se genera dentro de las plantas de producción: lingotes descartados, alimentadores, cortes, material de rechazo, etc. que normalmente se recircula en la planta y rara vez aparece en las estadísticas.

*Chatarra nueva* que es aquella producida por los usuarios del metal semiterminado e incluye limaduras, rebabas, perforaciones, recortes y material terminado rechazado.

*Chatarra vieja* llamada también obsoleta que es la generada por los productos que han completado su vida útil, ejemplo: latas de bebidas y comida, automóviles, carcazas, radiadores, cables, etc.

La selección, acopio y distribución constituyen una parte integral del proceso de producción de artículos de aluminio, ya que se ha determinado que más del 50% del costo del producto final lo conforma la chatarra como materia prima. Un aspecto extra que es importante de considerarse dentro de la clasificación de chatarra es el método de muestreo y análisis.

#### **2.1.4.2 Clasificación de la chatarra.**

En la tabla 2.2 se presenta la clasificación de Estados Unidos de América de acuerdo a la NARI (Asociación Nacional de Industrias de Recirculación). Como se puede ver de los 33 tipos de chatarra clasificados, 14 corresponden a chatarra vieja solamente. Esto indica que las principales definiciones están dirigidas a chatarra nueva si se retoma el concepto de que aproximadamente 50% de la materia prima de chatarra la constituye la chatarra vieja entonces debe proponerse ampliar clasificaciones hacia ésta.

Esto se puede inferir también al analizar la tabla 2.3 en la cual se presentan los usos principales del aluminio por sector en el Reino Unido y en México. Aquí habrá que examinar el tiempo que tarda en integrarse al círculo de chatarra los materiales para construcción por ejemplo. Aunque por otra parte, una fracción importante (17%) del aluminio entra a la industria de los empaques y prácticamente no se recicla nada. Sobre esto por ejemplo, se han desarrollado interesantes demostraciones (organizadas por los productores de aluminio) como la siguiente. En EUA se organizó muy recientemente un concurso en las escuelas primarias para recolectar papel aluminio usado. Se demostró que era posible reunir una cantidad significativa (22 kg/escuela, en 1600 escuelas) contando con los lugares de recepción adecuados. Otro ejemplo de algo que está por incrementar su participación, son las latas pero para contener alimentos y no sólo bebidas. Aquí el problema previsto lo constituye la mayor contaminación del envase.



Tabla 2.2. Tipos clasificados de chatarra de aluminio (NARI NF-85)

1	Recorte de aluminio nuevo puro	18	Perforado y virutas de aluminio segregado
2	Recortes y sólidos de aluminio bajo en cobre mezclado	19	Perforado y viruta de aluminio mezclado
3	Lámina de aluminio de aleaciones viejas mezcladas	20	Fundiciones de aluminio mezclado
4	Chatarra de lamina y utensilios de lamina de aluminio	21	Láminas de aluminio de aviones destruidos
5	Almacén de latas de aluminio nuevo	22	Laminillas de aluminio nuevo
6	Almacén de latas viejas	23	Laminillas de aluminio viejo
7	Padecería de aluminio usado en bebidas	24	Trituraciones de aluminio
8	Aluminio empaquetado usado	25	Escoria, salpicadura, derrame, cobertura y basura de aluminio
9	Tablas de forro pintadas	26	Aluminio soldado
10	Chatarra cubierta	27	Recortes y sólidos de aleaciones de aluminio nuevas segregadas
11	Radiadores de cobre aluminio	28	Recortes y sólidos de aleaciones de aluminio nuevas mezcladas
12	Nódulos de aluminio E.C.	29	Fundiciones, forja y extrusiones de aluminio nuevo segregado
13	Cable y alambre de aluminio nuevo puro	30	Fundiciones automotrices de aluminio
14	Cable y alambre de aluminio nuevo mezclado	31	Chatarra de alambre de aluminio aislado
15	Alambre y cable de aluminio viejo puro	32	Fundiciones de aviones de aluminio
16	Alambre y cable de aluminio viejo mezclado	33	Chatarra de aluminio fragmentada
17	Pistones de aluminio		

Tabla 2.3. Usos de los productos de aluminio en el Reino Unido y en México

Industria Usaria	Reino Unido 1985 %	México 1991 %
Transporte	19	20
Eléctrica	15	20
Empaques	18	17
Construcción	24	12
Doméstico	9	10
Química	15	6
Otras	0	15
Total	100	100

Lo anterior nos conduce a examinar la clasificación de la chatarra de aluminio en México. De acuerdo a Martínez M., existen los tipos de chatarra mostrados en la Tabla 2.4. Entonces, es posible tratar de establecer una clasificación más detallada de la chatarra en nuestro país, contando con la participación de los señores chatarreros, de los consumidores de la chatarra y del IMEDAL mismo

Tabla 2.4. Clasificación de chatarra de aluminio en México

Tipo de Chatarra	Observaciones
A. Cable	"Chopcado", sin centro de acero
B. Perfil de Prensa	
C. Perfil de Patio	
D. Delgado	De prensa o troquel; utensilios
E. Grueso Industrial	Piezas automotrices (industrial)
F. Grueso Patio	Piezas automotrices (deshuesaderos)
G. Bote	
H. Rebaba	
I. Revuelto	
J. Escorias	

## 2.2 Aleaciones de aluminio

### 2.2.1 Principales elementos aleantes del aluminio y sus efectos

El aluminio metálico que se produce mediante los modernos procesos de reducción, se obtienen en las tinas electrolíticas, con un contenido de pureza mínima de 99.5 % . El 0.5% restante consiste en residuos de otros elementos que el proceso de reducción no pudo remover. De este aluminio básico puede producirse "una gran familia de aleaciones". Puede obtenerse metal con más del 99.5% de aluminio y hasta 99.85% a un costo algo más elevado y se usa cuando se requiere conductividad eléctrica superior o muy alta resistencia a la corrosión. Un proceso intenso de refinación puede producir aluminio de alta pureza, hasta de 99.99% que se utiliza como catalizador en la producción de gasolina de alto octanaje y para piezas de joyería; en forma de "foil" se emplea vastamente en la industria electrónica. Sin embargo , la mayor parte del aluminio se emplea en forma de aleaciones.

Al agregar una pequeña cantidad de manganeso, aumenta la resistencia del aluminio forjado. El magnesio y silicio, usados juntos o separadamente, imparten a las aleaciones características anticorrosivas con una resistencia parecida a la del acero de bajo carbono. El cobre y zinc se aplican cuando se desea obtener aleaciones con la mayor relación posible entre resistencia y peso. Se usan pequeñas cantidades de otros metales, tales como níquel, cromo, titanio, cadmio y estaño para refinar el grano del aluminio, modificar el silicio o para impartirles características especiales.

Aun cuando no se han aplicado elementos de aleación, los pequeños porcentajes de dichos elementos que se encuentran como impurezas, tienen que controlarse cuidadosamente, y de ahí que el metal resultante pueda considerarse como una aleación. La más común de estas "aleaciones" contiene entre 99.0% y 99.5% de aluminio, el resto es principalmente hierro y silicio.

A continuación se enlistan algunos de los principales metales aleantes y sus efectos sobresalientes:

### ***Hierro (Fe)***

Es la impureza más común encontrada en aleaciones comerciales de fundición. Mejora en algunas aleaciones la resistencia a la tensión y en ocasiones se utiliza para reducir la contracción, ya que puede actuar como refinador de grano, pero arriba del 0.8% en aleaciones con silicio tiende a aumentar el tamaño de grano, dando una estructura cristalina que afecta gravemente las propiedades mecánicas de las piezas.

### ***Cobre (Cu)***

Incrementa la fuerza y la dureza de la aleación, ya sea con o sin tratamiento térmico, hace a las aleaciones tratables térmicamente, reduce contracciones internas e imparte maquinabilidad, tiende a reducir la fluidez e incrementar las grietas en caliente. En general el cobre afecta la resistencia a la corrosión, siendo ésta mínima, en porcentajes del 0.3% al 1% y en cantidades mayores la aleación tiende a una severa corrosión por reacciones galvánicas, sobre todo en piezas expuestas a sales atmosféricas, humedad y óxidos.

### ***Magnesio (Mg)***

Incrementa la resistencia a la tensión, la resistencia a la corrosión en atmósferas marinas, la maquinabilidad, la dureza y la facilidad para soldarse. Además dadas sus características de solubilidad en estado sólido hace a las aleaciones de aluminio susceptibles al tratamiento térmico. En porcentajes menores del 8% reacciona al tratamiento térmico siempre y cuando se encuentre en combinación con el silicio o el cobre o con ambos elementos. Su presencia

en las aleaciones de aluminio, tiende a que estas formen mucha escoria y óxidos, dificultando su colada, ya que reduce la fluidez.

### ***Manganeso (Mn)***

Actúa como refinador de grano para reducir contracciones. Incrementa poco los esfuerzos naturales y la resistencia a la corrosión. Cuando se adiciona en aleaciones que contienen cobre y silicio, imparte a las piezas resistencia mecánica a elevadas temperaturas. Debe ser controlado en su combinación con el hierro ya que puede formar partículas o cristales grandes de los componentes primarios que afectarían la resistencia mecánica o fortaleza de la aleación. Se recomienda 0.4% max. de Mn para contrarrestar el porcentaje de Fe presente en la aleación la cantidad de Mn es siempre la mitad del contenido de Fe. En concentraciones hasta del 0.7% en aleaciones de fundición, incrementa la dureza y disminuye la ductilidad.

### ***Silicio (Si)***

Hace descender el punto de fusión, incrementa la dureza, imparte fluidez al aluminio fundido, reduce contracciones externas y grietas en la pieza terminada, reduce el coeficiente de expansión y ayuda a la soldabilidad. En combinación con el magnesio, produce aleaciones tratables térmicamente, con una buena ductilidad y resistencia a la corrosión. Afecta la maquinabilidad arriba del 4%.

### ***Zinc (Zn)***

Tiende a aumentar la dureza y a crear una muy alta contracción en las aleaciones de aluminio cuando se usan elevados porcentajes. Su adición combinado con el magnesio, produce en las aleaciones una buena resistencia al impacto y hace a las aleaciones tratables térmicamente. No obstante sus defectos, proporciona una gran estabilidad dimensional y buena resistencia a la tensión sin necesidad de tratamiento térmico. La cantidad máxima permisible debe ser del 0.3%

Además de los elementos aleantes antes mencionados, pueden agregarse muchos otros elementos metálicos como los que a continuación se presentan, que son utilizados para mejorar las propiedades de los grupos básicos de las aleaciones o para proporcionar efectos especiales.

### ***Plomo (Pb)***

Es difícil de absorber dentro del baño en su estado líquido, debido a su alta densidad y limitada solubilidad aún en estado líquido. El plomo se utiliza como elemento de aleación debido a que mejora la maquinabilidad de la aleación especialmente cuando se usa junto con estaño o bismuto usualmente menos del 0.5% es suficiente, siendo cuidadosamente controlada la cantidad final.

### ***Estaño (Sn)***

Es regularmente fácil de agregar después de que el metal se ha fundido, aunque requiere una considerable agitación debido a su densidad. Este es agregado para mejorar la maquinabilidad de las aleaciones con cobre, mejora la respuesta al endurecimiento por precipitación y la resistencia a la corrosión, también funciona para proporcionar una fina aleación antifriccionante, cuando se usa en combinación con adiciones de cobre y níquel. Las aleaciones más comunes de aluminio para vaciado utilizan estaño, variando las cantidades de acuerdo a la aleación, se recomienda un 0.05% como máximo.

### ***Bismuto (Bi)***

Este al igual que el plomo y el estaño ofrece a la aleación una mejor maquinabilidad.

### ***Berilio (Be)***

Mejora las características de soldadura, fluidez y vaciado. Se usa muy controlado en cantidades menores del 0.01% para reducir la oxidación durante la fusión de aleaciones de aluminio que contengan arriba del 4% de Mg, asimismo, ayuda a evitar en parte la pérdida del Mg que tiende a quemarse (oxidarse) durante la operación de fusión. En concentraciones de más del 0.04% mejora la resistencia y la ductilidad en algunas aleaciones.

***Boro (B)***

Es un refinador de grano y ayuda a incrementar la conductividad eléctrica, usado en combinación con el titanio, ayuda a que la refinación no se vea muy afectada en subsecuentes fusiones de la aleaciones de aluminio. Se debe controlar su contenido en un máximo del 0.01%.

***Cromo (Cr)***

Es un refinador de grano, refuerza la resistencia a la corrosión y evita rajaduras en caliente, aumenta la resistencia mecánica en las piezas sometidas a elevadas temperaturas. Su uso más común es en proporciones de 0.5 al 3.0%.

***Circonio (Zr) y Vanadio (V)*** se utilizan como refinadores de grano en condiciones de vaciado

***Níquel (Ni)***

Imparte estabilidad dimensional y fortaleza a la aleación para piezas que trabajarán a elevadas temperaturas. Sin embargo reduce la ductilidad. Se usa siempre en combinación con otros elementos y en un porcentaje no mayor del 5%, porque igual o mayor cantidad produce una elevada tendencia a la contracción al solidificar.

***Titanio (Ti)***

Se usa como refinador de grano (0.05 - 0.20%). En los procesos por arena y molde permanente, el grano fino ayuda a mejorar las propiedades mecánicas de las piezas fundidas. El titanio hace que las fundiciones bajen su conductividad térmica, pero mejora su resistencia tensil y ductilidad. Para mejores resultados su utiliza generalmente en combinación con el boro.

***Sodio (Na)***

Se utiliza para modificar el silicio y aumenta las propiedades mecánicas, la ductilidad y mejora el vaciado

*Fosforo (P)* se utiliza como modificador del silicio.

### **2.2.2 Designación de las aleaciones de aluminio**

Las aleaciones de aluminio se hacen con muchos metales y combinaciones: el gran alcance de las aleaciones ofrece a la industria una variedad sumamente amplia de combinaciones de resistencia mecánica, ductilidad, conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión. Naturalmente, en una aleación no pueden combinarse las propiedades óptimas para cada aplicación, siendo necesario conocer las ventajas y limitaciones de cada aleación para poder hacer la mejor selección.

#### **2.2.2.1 Las aleaciones de aluminio forjadas**

##### ***Aleaciones de aluminio - serie 1000***

Estas aleaciones están formadas básicamente por aluminio puro y aquellas con un contenido máximo del uno por ciento de otros elementos. Entre sus principales propiedades están la de su facilidad para adquirir formas diversas y para soldarse, así como para lograr buenos acabados; es muy alta su conductividad eléctrica y su resistencia a la corrosión; su resistencia es limitada. Se le usa habitualmente en reflectores, intercambiadores de calor, en aplicaciones arquitectónicas y en adornos para la decoración.

##### ***Aleaciones del aluminio/cobre - serie 2000***

El cobre es el principal elemento de aleación de este grupo. La resistencia a la corrosión y la facilidad de soldarse son limitadas. Algunas aleaciones de esta familia tienen una maquinabilidad superior y otras, son particularmente adecuadas para partes y estructuras que requieren una alta resistencia con relación a su peso, por lo que son comúnmente utilizadas para construir carrocerías "trailers", partes estructurales de aviones y para cuando se requiere una buena resistencia a temperaturas elevadas.

***Aleaciones de aluminio/manganeso - serie 3000***

La adición de aproximadamente el uno por ciento de manganeso, produce aleaciones de aluminio que tienen cerca del 20 por ciento más de resistencia que el aluminio puro comercial, conservando un alto grado de facilidad de trabajo. La aleación 3003 es "el caballito de la batalla" de la industria y sus usos finales típicos incluyen utensilios para la cocina, intercambiadores de calor, tanques de almacenamiento, techos, muebles, señales de carretera y numerosas aplicaciones arquitectónicas.

***Aleaciones de aluminio/silicio - serie 4000***

La adición de silicio en proporciones de más del 12% produce aleaciones de aluminio particularmente adecuadas como material para soldaduras, por su bajo punto de fusión. Las aleaciones de aluminio con silicio se usan para producir piezas fundidas en las que el silicio imparte alta fluidez al metal fundido que se está vaciando. Para usos arquitectónicos esas aleaciones se anodizan rápidamente para dotarlas de coloraciones que van del gris al negro. La aleación para forja 4032 proporciona un bajo coeficiente de expansión térmica y alta resistencia al desgaste.

***Aleaciones aluminio/magnesio - serie 5000***

Cuando se agrega del 0.3% de magnesio las aleaciones resultantes tienen una resistencia que varía según su contenido, buena facilidad para soldarse y generalmente buena resistencia a la corrosión en atmósferas marinas. Los usos de esta aleación son frecuentes en la rama arquitectónica, en adornos para decoración y ornamentos, en artículos domésticos, en postes para alumbrado público, en barcos y lanchas, en tanques criogénicos y parte de grúas viajeras.

***Aleaciones aluminio/magnesio/silicio - serie 6000***

Los miembros más conocidos de esta familia son las aleaciones 6061 y 6063 que tienen gran facilidad para darles forma, alta resistencia a la corrosión, facilidad para soldarse, facilidad para el maquinado y pueden adquirir numerosos terminados. Los usos finales incluyen instalaciones arquitectónicas, equipo para transportación y pasamanos para puentes.



***Aleaciones aluminio/zinc - serie 7000***

La adición del tres al ocho por ciento de zinc, más un pequeño porcentaje de magnesio, y cuando se le trata térmicamente, resulta una familia de aleaciones de aluminio con muy alta resistencia. Se usa principalmente para estructuras de aviones, equipo móvil y equipo que requiere una alta resistencia con relación a su peso.

***Otras aleaciones - serie 8000***

El aluminio puede alearse también con otros elementos aparte de los ya mencionados, tales como berilio, bismuto, boro, fierro, níquel, plomo, sodio, estaño, titanio y circonio. Siempre que alguno de estos elementos sea el aleante predominante, la aleación será designada con un número a partir del 8000.

**2.2.2.2 Las aleaciones de aluminio fundidas**

Las características de fundición del aluminio puro son relativamente pobres por carecer de un “alcance” definitivo de solidificación. La adición de elementos de aleación mejora tanto la resistencia como sus características de fundición, y pueden afectar la resistencia a la corrosión, soldabilidad, maquinabilidad y otras propiedades tales como el coeficiente de dilatación térmica, conductividad eléctrica y apariencia.

***Aluminio comercialmente puro***

Por su excelente conductividad eléctrica y resistencia al ataque químico, esta aleación de alta pureza resulta sumamente adecuada para los rotores de motores de inducción, accesorios para líneas de transmisión, así como recipientes y herrajes para las industrias de alimentos y productos químicos, ejemplo: aleación con no menos del 99.5% de aluminio.

Tabla 2.5. Aleaciones de aluminio forjado.

N° AA	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Zn %	Ti %	Otros C/U %	TOTAL %	Aluminio
1050	0.25	0.40	0.05	0.05	0.05		0.05	0.03	0.03		99.50
1060	0.25	0.35	0.05	0.03	0.03		0.05	0.03	0.03		99.60
1070	0.20	0.25	0.04	0.03	0.03		0.04	0.03	0.03		99.70
1080	0.15	0.15	0.03	0.02	0.02		0.03	0.03	0.02		99.80
1100	0.95 Si+Fe		0.05 - 0.20	0.05			0.10		0.05		99.00
1200	1.0 Si+Fe		0.05	0.05			0.10	0.05	0.05	0.15	99.00
1235	0.65 Si+Fe		0.05	0.05	0.05		0.10	0.06	0.03	0.15	99.35
1350	0.10	0.40	0.05	0.01		0.01	0.05		0.03		99.50
2011	0.40	0.7	5.0 - 6.0				0.30		0.05	0.15	
2014	0.50 - 1.2	0.7	3.9 - 5.0	0.40 - 1.2	0.20 - 0.8	0.10	0.25	0.15	0.05	0.15	
2017	0.20 - 0.8	0.7	3.5 - 4.5	0.40 - 0.8	0.40 - 0.8	0.10	0.25	0.15	0.05	0.15	
2024	0.50	0.50	3.8 - 4.9	0.30 - 0.9	1.2 - 1.8	0.10	0.25	0.15	0.05	0.15	
3003	0.60	0.7	0.05 - 0.20	1.0 - 1.5			0.10		0.05	0.15	
3004	0.30	0.7	0.25	1.0 - 1.5	0.8 - 1.3		0.25		0.05	0.15	
3005	0.60	0.7	0.30	1.0 - 1.5	0.20 - 0.6	0.10	0.25	0.10	0.05	0.15	
3105	0.60	0.7	0.30	0.30 - 0.8	0.20 - 0.8	0.20	0.40	0.10	0.05	0.15	
4043	4.5 - 6.0	0.8	0.30	0.05	0.05		0.10	0.20	0.05	0.15	
4045	9.0 - 11.0	0.8	0.30	0.05	0.05		0.10	0.20	0.05	0.15	
4047	11.0 - 13.0	0.8	0.30	0.15	0.10		0.20		0.05	0.15	
5005	0.30	0.7	0.20	0.20	0.50 - 1.1	0.10	0.25		0.05	0.15	
5042	0.20	0.35	0.15	0.20 - 0.50	3.0 - 4.0	0.10	0.25	0.10	0.05	0.15	
5050	0.40	0.7	0.20	0.10	1.1 - 1.8	0.10	0.25		0.05	0.15	
5052	0.25	0.40	0.10	0.10	2.2 - 2.8	0.15 - 0.35	0.10		0.05	0.15	
5252	0.08	0.10	0.10	0.10	2.2 - 2.8		0.05		0.03	0.10	
5154	0.25	0.40	0.10	0.10	3.1 - 3.9	0.15 - 0.35	0.20	0.20	0.05	0.15	
5454	0.25	0.40	0.10	0.50 - 1.0	2.4 - 3.0	0.05 - 0.20	0.25	0.20	0.05	0.15	
5182	0.20	0.35	0.15	0.20 - 0.50	4.0 - 5.0	0.10	0.25	0.10	0.05	0.15	
5183	0.40	0.40	0.10	0.50 - 1.0	4.3 - 5.2	0.05 - 0.25	0.25	0.15	0.05	0.15	
6101	0.30 - 0.7	0.50	0.10	0.03	0.35 - 0.8	0.03	0.10		0.03	0.10	
6201	0.50 - 0.9	0.50	0.10	0.03	0.6 - 0.9	0.03	0.10		0.03	0.10	
6351	0.7 - 1.3	0.50	0.10	0.40 - 0.8	0.40 - 0.8		0.20	0.20	0.05	0.15	
6061	0.40 - 0.8	0.7	0.15 - 0.40	0.15	0.8 - 1.2	0.04 - 0.35	0.25	0.15	0.05	0.15	
6261	0.40 - 0.7	0.40	0.15 - 0.40	0.20 - 0.35	0.7 - 1.0	0.10	0.20	0.10	0.05	0.15	
6262	0.40 - 0.8	0.7	0.15 - 0.40	0.15	0.8 - 1.2	0.04 - 0.14	0.25	0.15	0.05	0.15	
6463	0.20 - 0.6	0.15	0.20	0.05	0.45 - 0.9		0.05		0.05	0.15	
7001	0.35	0.40	1.6 - 2.6	0.20	2.6 - 3.4	0.18 - 0.35	6.8 - 8.0	0.20	0.05	0.15	
7011	0.15	0.20	0.05	0.10 - 0.30	1.0 - 1.6	0.05 - 0.20	4.0 - 5.5	0.05	0.05	0.15	
7016	0.10	0.12	0.45 - 1.0	0.03	0.8 - 1.4		4.0 - 5.0	0.03	0.03	0.10	
7070	0.15	0.25	0.05				1.3 - 1.8		0.05	0.15	
7072	0.7 Si+Fe		0.10	0.10	0.10		0.8 - 1.3		0.05	0.15	
7075	0.40	0.50	1.2 - 2.0	0.30	2.1 - 2.9	0.18 - 0.28	5.1 - 6.1	0.20	0.05	0.15	
8001	0.17	0.45 - 0.7	0.15				0.05		0.05	0.15	
8005	0.20 - 0.50	0.40 - 0.8	0.05		0.05		0.05		0.05	0.15	
8007	0.40	1.2 - 2.0	0.10	0.30 - 1.0	0.10		0.8 - 1.8		0.05	0.15	
8011	0.50 - 0.9	0.6 - 1.0	0.10	0.10	0.05	0.05	0.20	0.08	0.05	0.15	

### *Aleaciones de aluminio y silicio*

Por lo general, las aleaciones de aluminio y silicio son de uso corriente en las fundiciones porque combinan buenas características de fundición, son herméticas a presión y resistentes a la corrosión, teniendo también un buen alcance de propiedades mecánicas y físicas. Estas aleaciones tienen excelente fluidez. Las aleaciones de aluminio y silicio se prefieren para piezas fundidas que tienen paredes delgadas y diseño complejo, incluyendo las que tienen que ser herméticas a presión, ejemplo: aleación aluminio-silicio 356.

### *Aleaciones de aluminio y cobre*

Las aleaciones de aluminio y cobre fueron las primeras aleaciones para piezas fundidas aceptadas generalmente en las fundiciones de aluminio. Todas tienen excelente maquinabilidad. Además, las diversas aleaciones de este grupo ofrecen buen alcance de características mecánicas de donde escoger. Las aleaciones de aluminio y cobre tienen la tendencia a hacerse quebradizas en caliente y a encogerse, lo cual disminuye según se aumenta el contenido de cobre, pero el uso de una buena técnica en la fundición generalmente elimina esta desventaja. La resistencia al ataque químico de las aleaciones de aluminio y cobre no es tan buena como la de las aleaciones de aluminio y silicio, ejemplo: aleación aluminio-cobre 242.

### *Aleaciones de aluminio y magnesio*

Las aleaciones de aluminio y magnesio son algo más difíciles de manejar en la fundición que las aleaciones de otros grupos. Requieren cuidado especial al ser fundidas y en el vaciado por ser susceptibles a la oxidación. Debe controlarse el contacto con el hierro poniendo mucho cuidado en los métodos de fundición y mediante una limpieza perfecta de todo el equipo de hierro. La combinación debe controlarse cuidadosamente para lograr las excelentes características mecánicas y físicas de estas aleaciones, ejemplo: aluminio-magnesio 520.

Las tablas 2.7 y 2.8 muestran algunas principales características de las aleaciones de aluminio tanto para molde permanente como para moldeo en arena y la manera en que se comportan estas dependiendo del tipo de aleación.

Tabla 2.6. Aluminio para fundición en arena y molde permanente.

N° AA	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Zn %	Ti %	Otros C/U %	TOTAL %	Aluminio
201.0	0.10	0.15	4.0 - 5.2	0.20 - 0.50	0.15 - 0.55			0.15 - 0.35	0.05	0.10	Restante
204.0	0.20	0.35	4.2 - 5.0	0.10	0.13 - 0.35		0.10	0.15 - 0.35	0.05	0.05	Restante
208.0	2.5 - 3.5	1.2	3.5 - 4.5	0.50	0.10		1.0	0.25		0.50	Restante
222.0	2.0	1.5	3.7 - 4.5	0.50	0.15 - 0.35		0.8	0.25		0.35	Restante
242.0	0.7	1.0	9.2 - 10.7	0.35	1.2 - 1.8	0.25	0.35	0.25	0.05	0.15	Restante
A242.0	0.6	0.8	3.7 - 4.5	0.10	1.2 - 1.7	0.15 - 0.25	0.10	0.07 - 0.20	0.05	0.15	Restante
295.0	0.7 - 1.5	1.0	4.0 - 5.0	0.35	0.03		0.35	0.25	0.05	0.15	Restante
319.0	3.5 - 6.5	1.0	3.0 - 4.0	0.50	0.10		0.10	0.25		0.50	Restante
328.0	7.5 - 11.5	1.0	1.0 - 2.0	0.20 - 0.6	0.20 - 0.6	0.35	1.5	0.25		0.50	Restante
355.0	4.5 - 5.5	0.6	1.0 - 1.5	0.50	0.40 - 0.6	0.25	0.35	0.25	0.05	0.15	Restante
C355.0	4.5 - 5.5	0.20	1.0 - 1.5	0.10	0.40 - 0.6		0.10	0.20	0.05	0.15	Restante
356.0	6.5 - 7.5	0.6	0.25	0.35	0.20 - 0.45		0.35	0.25	0.05	0.15	Restante
A356.0	6.5 - 7.5	0.20	0.20	0.1	0.25 - 0.45		0.10	0.20	0.05	0.15	Restante
443.0	4.5 - 6.0	0.8	0.6	0.5	0.05	0.25	0.50	0.25		0.35	Restante
B443.0	4.5 - 6.0	0.8	0.15	0.35	0.05		0.35	0.25	0.05	0.15	Restante
514.0	0.35	0.50	0.15	0.35	3.5 - 4.5		0.15	0.25	0.05	0.15	Restante
520.0	0.25	0.30	0.25	0.15	9.5 - 10.6		0.15	0.25	0.05	0.15	Restante
535.0	0.15	0.15	0.05	0.10 - 0.25	6.2 - 7.5			0.10 - 0.25	0.05	0.15	Restante
705.0	0.20	0.8	0.20	0.40 - 0.6	1.4 - 1.8	0.20 - 0.40	2.7 - 3.3	0.25	0.05	0.15	Restante
707.0	0.20	0.8	0.20	0.40 - 0.6	1.8 - 2.4	0.20 - 0.40	4.0 - 4.5	0.25	0.05	0.15	Restante
710.0	0.15	0.50	0.35 - 0.65	0.05	0.6 - 0.8		6.0 - 7.0	0.25	0.05	0.15	Restante
712.0	0.30	0.50	0.25	0.10	0.50 - 0.65	0.40 - 0.60	5.0 - 6.5	0.15 - 0.25	0.05	0.20	Restante
713.0	0.25	1.1	0.40 - 1.0	0.6	0.20 - 0.50	0.35	7.0 - 8.0	0.25	0.10	0.25	Restante
771.0	0.15	0.15	0.10	0.10	0.8 - 1.0	0.06 - 0.20	6.5 - 7.5	0.10 - 0.20	0.05	0.15	Restante
850.0	0.7	0.7	0.7 - 1.3	0.10	0.10			0.20		0.30	Restante
851.0	2.0 - 3.0	0.7	0.7 - 1.3	0.10	0.10			0.20		0.30	Restante
852.0	0.40	0.7	1.7 - 2.3	0.10	0.6 - 0.9			0.20		0.30	Restante

Tabla 2.7. Comparación relativa de las características de las aleaciones del aluminio para molde en arena.

Aleación	Resistencia a la fractura en caliente	Presión	Vaciado (Fluidez)	Tendencia a la contracción	Resistencia a la corrosión	Maquinabilidad	Soldabilidad
201.0	4	3	3	4	4	1	2
208.0	2	2	2	2	4	3	3
213.0	3	3	2	3	4	2	2
222.0	4	4	3	4	4	1	3
240.0	4	4	3	4	4	3	4
242.0	4	3	4	4	4	2	3
A242.0	4	4	3	4	4	2	3
295.0	4	4	4	3	3	2	2
319.0	2	2	2	2	3	3	2
354.0	1	1	1	1	3	3	2
355.0	1	1	1	1	3	3	2
A356.0	1	1	1	1	2	3	2
357.0	1	1	1	1	2	3	2
359.0	1	1	1	1	2	3	1
A390.0	3	3	3	3	2	4	2
A443.0	1	1	1	1	2	4	4
444.0	1	1	1	1	2	4	1
511.0	4	5	4	5	1	1	4
512.0	3	4	4	4	1	2	4
514.0	4	5	4	5	1	1	4
520.0	2	5	4	5	1	1	5
535.0	4	5	4	5	1	1	3
A535.0	4	5	4	4	1	1	4
B535.0	4	5	4	4	1	1	4
705.0	5	4	4	4	2	1	4
707.0	5	4	4	4	2	1	4
710.0	5	3	4	4	2	1	4
711.0	5	4	5	4	3	1	3
712.0	4	4	3	3	3	1	4
713.0	4	4	3	4	2	1	3
771.0	4	4	3	3	2	1	
772.0	4	4	3	3	2	1	
850.0	4	4	4	4	3	1	4
851.0	4	4	4	4	3	1	4
852.0	4	4	4	4	3	1	4

Nota: 1 = Mejor 5 = Peor

Tabla 2.8. Comparación relativa de las características de las aleaciones del aluminio para molde permanente.

Aleación	Resistencia a la fractura en caliente	Presión	Vaciado (Fluidez)	Tendencia a la contracción	Resistencia a la corrosión	Maquinabilidad	Soldabilidad
201.0	4	3	3	4	4	1	2
213.0	3	3	2	3	4	2	2
222.0	4	4	3	4	4	1	3
238.0	2	3	2	2	4	2	3
240.0	4	4	3	4	4	3	4
296.0	4	3	4	3	4	3	4
308.0	2	2	2	2	4	3	3
319.0	2	2	2	2	3	3	2
332.0	1	2	1	2	3	4	2
333.0	1	1	2	2	3	3	3
336.0	1	2	2	3	3	4	2
354.0	1	1	1	1	3	3	2
355.0	1	1	1	2	3	3	2
C355.0	1	1	1	2	3	3	2
356.0	1	1	1	1	2	3	2
A356.0	1	1	1	1	2	3	2
357.0	1	1	1	1	2	3	2
A357.0	1	1	1	1	2	3	2
359.0	1	1	1	1	2	3	1
A390.0	2	2	2	3	2	4	2
443.0	1	1	2	1	2	5	1
A444.0	1	1	1	1	2	3	1
512.0	3	4	4	4	1	2	4
513.0	4	5	4	4	1	1	5
711.0	5	4	5	4	3	1	3
771.0	4	4	3	3	2	1	
772.0	4	4	3	3	2	1	
850.0	4	4	4	4	3	1	4
851.0	4	4	4	4	3	1	4
852.0	4	4	4	4	3	1	4

Nota 1 = Mejor 5 = Peor

### 2.3 Clasificación de los temple básicos

El temple es una condición que se produce en el metal o aleación por medio de un tratamiento mecánico o térmico, impartiendo una estructura y propiedades mecánicas específicas. Algunas aleaciones pueden aumentar sus propiedades mecánicas mediante tratamientos térmicos y a estas se les conoce como "Aleaciones Tratables Térmicamente"; en cambio otras aleaciones muestran sus propiedades mecánicas mediante el laminado o bien el estirado (trefilado) en frío, y son llamadas "Aleaciones No Tratables Térmicamente".

#### Nomenclaturas de los temple.

F - De fabricación, Sin control sobre la cantidad de endurecimiento en frío ; Sin límites de propiedades mecánicas

O - Recocido y recristalizado. Temple con la más baja resistencia y la más alta ductilidad.

H - Endurecimiento por trabajo en frío

T - Tratamiento térmico para producir más temple estables que los de F ó O .

#### Subdivisión de endurecimiento por trabajo en frío ( H )

H1 - Solo endurecimiento por trabajo en frío . El grado de endurecimiento por trabajo en frío se indica mediante el uso de un segundo dígito y varía desde un cuarto de dureza (H12) hasta dureza completa (H18), la cual es producida con aproximadamente un 75 por ciento de reducción en su área.

H2 - Endurecimiento por trabajo en frío y parcialmente recocido. Rangos del temple desde un cuarto de dureza hasta dureza completa, obtenida por recocido parcial de materiales trabajados en frío con esfuerzos iniciales más grandes que el deseado. Los temple son H22, H24, H26 y H28

H3 - Endurecimiento por trabajo en frío y estabilizado. Temple por ligero envejecimiento en aleaciones Aluminio-Magnesio que son endurecidas por trabajo en frío y entonces calentadas a una baja temperatura para incrementar la ductilidad y estabilizar las propiedades mecánicas . Los temple son H32, H34, H36 y H38



**Subdivisión de tratamiento térmico ( T )**

La combinación de tratamientos térmicos incluye la etapas de solución y envejecimiento; liberación de esfuerzos y estabilización; y recocido. El método de enfriamiento no esta especificado. El primer dígito de la designación de un temple representa la secuencia de tiempo y temperatura del tratamiento térmico. Uno o dos dígitos adicionales pueden ser adheridos para indicar una variación. La siguiente sección describirá los temples básicos y las variantes más comunes.

T4 - Tratamiento de solución y envejecimiento natural a una condición substancialmente estable. El envejecimiento natural puede continuar lentamente, particularmente a elevadas temperaturas de servicio, así que la estabilidad de la estructura puede ser no satisfactoria.

El temple T4 puede ser considerado como el punto inicial para otros temples de solución y envejecimiento. Las fundiciones que van a ser envejecidas artificialmente pueden envejecer naturalmente a temperatura ambiente después del tratamiento de solución. En aleaciones Al - Si - Mg, la incubación a temperatura ambiente antes del envejecimiento artificial puede reducir ambos, el esfuerzo y la ductilidad. El temple T4 también es usado para indicar el tratamiento de solución para las así llamadas aleaciones no tratables térmicamente, las cuales no incrementan la dureza por envejecimiento.

T5 - Enfriamiento desde la temperatura de vaciado y artificialmente envejecido o estabilizado (sin un tratamiento de solución previo). Mejora las propiedades mecánicas y la estabilidad dimensional. Este es un temple común para fundiciones en molde permanente, tales como pistones. El envejecimiento es entre 205 - 260°C de 7 - 10 horas.

Para mejorar las propiedades mecánicas dadas por el temple T5 , las fundiciones pueden ser enfriadas en agua inmediatamente después de vaciadas. Esto es llamado "tratamiento de supersaturación simplificado" es muy efectivo y conveniente después de vaciar en arena o molde permanente.

T6 - Tratamiento de solución y envejecimiento artificial. En fundiciones de gravedad, El T6 desarrolla óptimas propiedades mecánicas, buena ductilidad y estabilidad dimensional.

El envejecimiento es típicamente entre 145 - 160°C de 3 - 5 horas.

T61 - Tratamiento de solución y envejecimiento artificial para una dureza y esfuerzo máximos. Esta variante del T6 produce buenas propiedades mecánicas y estabilidad dimensional pero a una ductilidad reducida. El envejecimiento es típicamente entre los 150 - 170°C de 6 - 10 horas.

T7 - Tratamiento de solución y sobre-envejecimiento o estabilidad artificial. Este temple mejora la ductilidad, estabilidad térmica y resistencia al esfuerzo de fractura por corrosión. El envejecimiento es típicamente entre los 190 - 235°C de 4 a 6 horas.

T71 - Tratamiento de solución y sobre-envejecimiento artificial hasta una condición estable substancialmente. Este temple además incrementa la estabilidad térmica y resistencia a la fractura por corrosión y reduce las propiedades mecánicas. El envejecimiento es típicamente entre los 225 - 260°C de 4 - 6 horas.

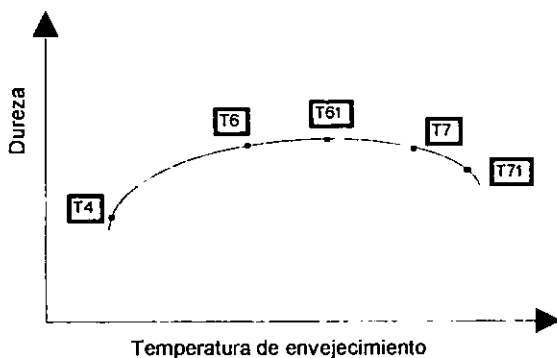


Figura 2.3. Estos temple forman una curva de máxima dureza.

## 2.4. Tratamiento Térmico

Dependiendo de la aleación y del proceso de fundición usado el aluminio en estado de colada es susceptible a un crecimiento dimensional y baja resistencia, dureza y resistencia a la corrosión. Para resolver estos problemas y para aumentar la resistencia y la ductilidad, las fundiciones son procesadas térmicamente por uno ó más ciclos de calentamiento y enfriamiento, sin llegar a la fusión, manteniendo el estado sólido, afectando solamente la estructura cristalina del metal, con cambios en el tamaño, la forma y la localización de los constituyentes de la estructura. El proceso trae consigo 3 operaciones básicas: *solución*, *enfriamiento* y *envejecimiento*. La combinación de estos tratamientos térmicos los cuales incluyen estabilización, liberación de esfuerzos, recocido y envejecimiento por precipitación son llamados temple

Los cambios en la estructura, tales como la evolución de precipitados de transición o la precipitación de partículas finas de silicio, pueden causar que las fundiciones crezcan dimensionalmente por sobretiempo. Para mantener tolerancias dimensionales estrechas durante y después del maquinado, las fundiciones deben ser tratadas térmicamente para formar fases de precipitado estables y para reducir la matriz de excesos de solutos.

El uso más importante del tratamiento térmico es para mejorar las propiedades mecánicas y corrosivas. Las propiedades mecánicas se mejoran esferoidizando las partículas de la fase constituyente y por endurecimiento por precipitación. La resistencia a la corrosión se puede aumentar homogeneizando la distribución de elementos aleantes en solución y disolviendo las fases oxidadas fácilmente, tales como  $Mg_2Si$ . Sin embargo raramente, se pueden optimizar todas las propiedades en una fundición. Casi siempre, un tratamiento térmico es un compromiso, maximizando las propiedades importantes a expensas de otras. Con ésta estrategia se explotan los principios de endurecimiento por envejecimiento para ajustar los tratamientos térmicos en cada aplicación.

**Beneficios**

- Homogeneización
- Liberación de esfuerzos.
- Estabilidad dimensional y maquinabilidad.
- Ductilidad, dureza y resistencia a la corrosión optimizadas.

Las tablas 2.9 y 2.10 muestran las aleaciones para vaciado en arena y molde permanente clasificadas de acuerdo al tratamiento térmico correspondiente que ellas reciben.

Tabla 2.9. Tratamientos térmicos estándar de aleaciones de aluminio para moldeo en arena.

F	0	T4	T43	T5	T51	T52	T53	T571	T6	T61	T62	T7	T71	T72	T75
100.1	222	204	201	319	355	771	771	242	201	222	295	201	355	224	A242
170.1	242	206	A390	356					295	242	359	208	356		
208		295	535	A356					319	355		295	A356		
213		A444		705	357				328			355	771		
240		520		707	771				355			356			
242				710					C355			357			
319				712					356			A390			
328				713					A356			707			
355				771					357						
356				850					A357						
A356				851					A390						
357				852					771						
A390															
443															
B443															
A444															
511															
514															
535															
A535															
B535															
713															

Tabla 2.10. Tratamientos térmicos estándar de aleaciones de aluminio para molde permanente

F	T1	T4	T43	T5	T51	T52	T551	T571	T6	T61	T62	T63	T65	T7	T71
100.1	711	204	201	324	355	222	222	242	201	242	324	249	336	201	355
170.1		206		332	356		336		208	354	354			206	
213		296		333	A356				296	C355	355			208	
238		A444		A390	357				319	A356	C355			249	
308				705					333	359	359			296	
319				713					355					333	
324				850					C355					355	
333				851					356					356	
355				852					A356					357	
356									357					A390	
A356									A357					707	
357									A390						
A390									851						
443															
A444															
535															

## CAPITULO III

### TRATAMIENTO TÉRMICO DE ENDURECIMIENTO POR PRECIPITACIÓN

#### 3.1 Tratamiento de solución

El tratamiento térmico de solución requiere calentar rápida y uniformemente la aleación tratable por debajo de la temperatura eutéctica (anexo A), mantenerla a esa temperatura por el tiempo requerido y enfriarla rápidamente. El rango de calentamiento es de 426°C hasta 540°C dependiendo de la aleación.

Cuando dos metales han sido fundidos juntos y aparentemente combinados dejándose solidificar la mezcla, los metales pueden estar completamente disueltos entre sí, o solamente disueltos en parte, de modo que se forma una mezcla de los cristales de los metales no disueltos y de la solución sólida. Además, también es posible que esas aleaciones contengan compuestos intermetálicos o “constituyentes”, como suelen llamarse. La solubilidad de un metal con otro depende en gran parte de la temperatura, en forma similar que la sal en el agua. Si se vierte cierta cantidad de sal en un vaso de agua, se disuelve determinada cantidad hasta que el agua queda saturada, pero si se aumenta la temperatura del agua también aumenta su solubilidad de modo que puede disolverse más sal. Si el agua se enfría el exceso de sal a la temperatura normal se precipita. Pero si la solución se enfría rápidamente no se precipita todo el excedente de sal y la solución queda “sobresaturada”. Esta condición no es estable, y se corrige por la precipitación gradual de la sal en exceso.

Los metales también pueden ser solubles entre sí, excepto que la solución o precipitación puede ocurrir en el estado sólido. El cobre en el aluminio, por ejemplo, tiene una solubilidad de aproximadamente 0.5% a la temperatura ambiente, pero a 520°C la solubilidad aumenta al 4.5%.

Tres eventos ocurren durante el tratamiento de solución:

1. Disolución de elementos que más tarde causaran endurecimiento por precipitación.
2. Esferoidización de constituyentes no disolubles.
3. Homogeneización.

1.- En el estado de colada, una larga proporción de los elementos formadores de precipitado están contenidos en fases constituyentes, por lo tanto el propósito primario del tratamiento de solución es disolver las fases constituyentes y enriquecer la solución sólida aluminio- $\alpha$  en soluto.

La fase aluminio- $\alpha$  es una solución sólida de aluminio, el solvente y los elementos aleantes los solutos.

2.- El segundo efecto del tratamiento de solución es la esferoidización de los constituyentes que están presentes en cantidades que no pueden ser completamente disueltos. En las aleaciones 3XX (Al - Si - Mg y Al - Si - Cu - Mg) el exceso de silicio siempre está presente. En estado de colada el silicio eutéctico forma hojuelas (escamas), fibras o laminillas (los últimos dos resultan de tratamientos de modificación del eutéctico)

Durante el tratamiento de solución, las partículas de silicio se globulizan y comienzan a engrosarse por Ostwald Ripening (Ref. 2) Estos eventos se ilustran en la fig. 3.1 Al comparar un silicio sin modificar con un silicio fibroso eutéctico modificado, este último esferoidiza, rápidamente. A pesar de su forma anterior, las partículas de silicio engrosan mientras el tratamiento de solución continúa.

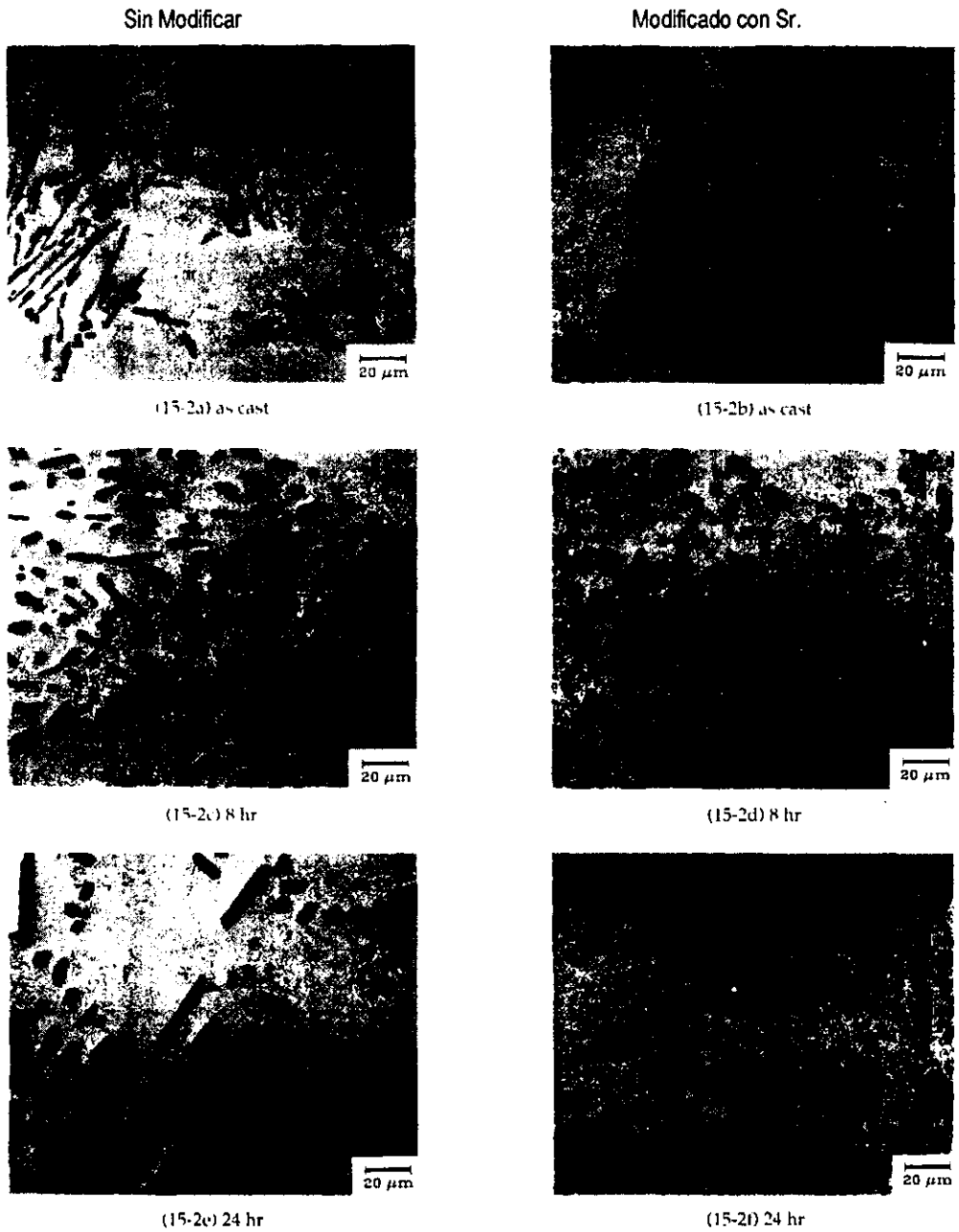


Figura 3.1. Efectos de el tiempo en el tratamiento de solución y la modificación de las partículas del silicio



3.- El tercer efecto del tratamiento de solución es homogeneizar la microestructura. Además de eliminar los efectos de nucleación. Los elementos en la fase constituyente son redistribuidos cuando se disuelven. Sin embargo, algunas fases constituyentes intermetálicas, particularmente ricas en hierro, contienen elementos insolubles y son poco cambiados por el tratamiento de solución.

Anterior al endurecimiento por envejecimiento es deseable tener la mayor concentración posible de elementos formadores de precipitado en solución. Por lo tanto la temperatura de solución debe ser alta para facilitar la difusión de átomos de elementos aleantes e incrementar su solubilidad.

Los tratamientos de solución pueden incluir un procedimiento de dos pasos para evitar una fusión inicial. Las fundiciones son primeramente calentadas justamente debajo de la temperatura eutéctica para disolver colonias de eutécticos no equilibrados. Entonces se calientan cuidadosamente a la temperatura final de la solución, para disolver los elementos de endurecimiento adicionales y lograr una mayor homogeneización.

### 3.2 Enfriamiento

Esta operación termina el tratamiento de solución. Cuando se enfría la fundición desde la temperatura de solución, la solubilidad para los elementos de endurecimiento decrece. Casi todos los temple requieren enfriamiento en agua caliente, usualmente a los 85°C. El rango de la temperatura de enfriamiento es de 40°C hasta 85°C. Los elementos aleantes (solutos) se disuelven en la solución sólida enriquecida en aluminio- $\alpha$  por precipitación y por difusión a los límites de grano, procesos que ocurren más rápidamente entre 260 y 400°C. Por lo tanto es necesario un enfriamiento rápido para retener las altas concentraciones que estaban en equilibrio a la temperatura de solución, particularmente cercana a los límites de grano. Sin embargo, aunque un enfriamiento rápido incrementa la respuesta al endurecimiento por envejecimiento, también se crean esfuerzos residuales y distorsión, factores que deben ser probados para cada diseño de fundición.

La duración del enfriamiento debe ser tal, que todas las partes de la fundición estén en contacto con el agua. Esto asegura que la velocidad de enfriamiento sea uniforme en toda la fundición

### 3.3 Endurecimiento por precipitación ó envejecimiento.

Esta es la parte de el tratamiento térmico que incrementa la resistencia de las fundiciones bajo la influencia del calor. Los excesos de elementos aleantes (solutos) que están sobresaturadas en aluminio- $\alpha$  eventualmente se precipitarán como una fina y uniformemente segunda fase dispersa dentro de la existente fase aluminio- $\alpha$ , esta nueva fase es llamada fase theta  $\Theta$ , pero esto ocurre lentamente a temperatura ambiente. Después de días y semanas a temperatura ambiente, algunas aleaciones, tales como las pertenecientes al sistema Al - Zn - Mg (7XX), endurecen apreciablemente - un proceso llamado envejecimiento natural. Sin embargo el envejecimiento puede ser acelerado calentado las fundiciones después de enfriadas, a temperaturas por debajo de la línea de solvus en un proceso llamado envejecimiento artificial.

Se logra el envejecimiento artificial calentando la fundición a alguna temperatura intermedia dependiendo del temple deseado. El rango usual es de 150°C hasta 260°C.

Después de las etapas iniciales de envejecimiento, la estructura se dice que esta sub-envejecida. Incrementando el tiempo a la temperatura o envejeciendo a una mayor temperatura, mejora la precipitación de la estructura, y la dureza se incrementa a un máximo, la máxima condición de dureza. Mayor tiempo de envejecimiento reduce la dureza y la estructura se vuelve sobre-envejecida. La secuencia del proceso de envejecimiento también afecta la ductilidad. La ductilidad que es alta después de enfriada la fundición, se reduce durante el envejecimiento. Durante el sobre-envejecimiento, las dislocaciones se mueven a posiciones de menor energía, lo cual permite que ocurra más deformación plástica antes de la fractura. (i.e. la ductilidad incrementa).

## CAPITULO IV

### PARTE EXPERIMENTAL

#### 4.1 Obtención de muestras

- Se adquirió una barra de 35 cm de largo por 2.5 cm. de ancho y 4 probetas para pruebas de tensión de una aleación A356 con la siguiente composición química.

Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Zn	Al
7.01	0.31	0.23	0.30	0.26	0.01	Resto

- Posteriormente se cortaron 17 probetas aproximadamente de 2 cm de largo, con una sierra cinta utilizando abundante líquido refrigerante para evitar calentar las probetas y así conservar las condiciones metalográficas iniciales.
- Se dejaron las probetas 1 y 2 (primer elemento comparativo contra los resultados finales) en el estado de colada.

#### 4.2 Aplicación del tratamiento térmico T6

##### *Solución*

- Se introdujeron las restantes 15 probetas en una mufla de resistencias marca Thermolyne con capacidad de hasta 1200°C y se gradúo a  $525 \pm 10^\circ\text{C}$  manteniendo esta temperatura durante un periodo de 12 horas.

##### *Enfriamiento*

- Se sacaron las probetas números 3 y 4 (segundo elemento comparativo contra los resultados finales) cerrando la puerta de la mufla inmediatamente, para evitar pérdidas de calor dejándose estas probetas a la intemperie y evitando las corrientes de aire.

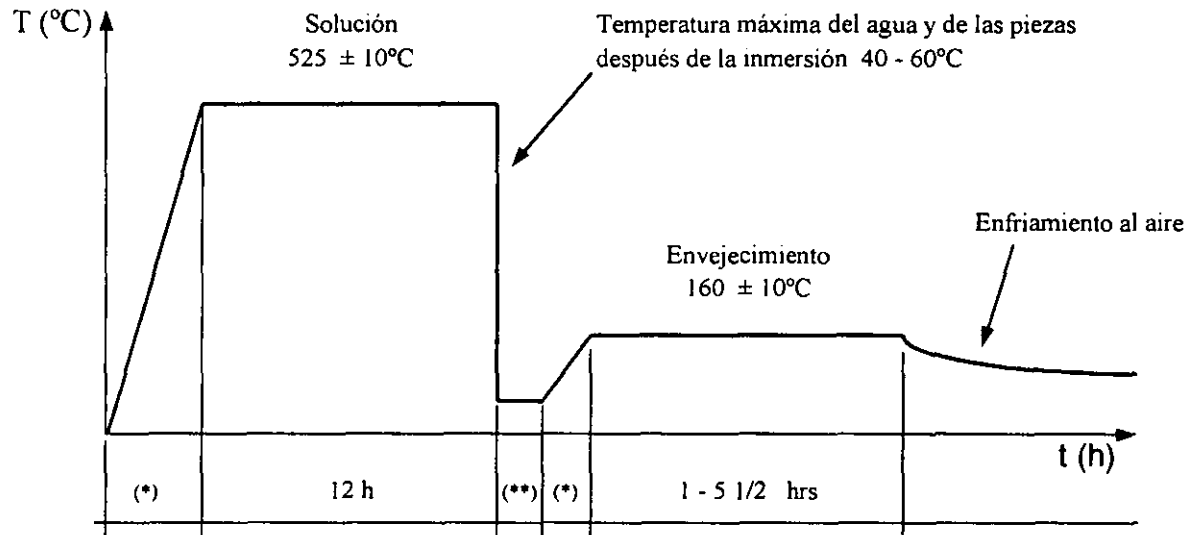
- A continuación se sacaron el resto de las probetas una a una y se fueron enfriando inmediatamente en agua tibia (40 - 60°C), finalmente se dejaron a la intemperie, evitando las corrientes de aire.
- Fue importante que la temperatura del agua no sobrepasara en ningún momento los 60°C y emplear el tiempo mínimo de traslado (5 segundos máximo), del horno al medio de enfriamiento así como mantener una agitación constante del agua, para obtener un enfriamiento uniforme. En el tratamiento, las probetas tuvieron un tiempo de traslado de 3 segundos desde el momento en que se abrió la puerta de la mufla, hasta que se sumergió en el agua.
- Se retiró la probeta número 5 (tercer elemento comparativo contra los resultados finales) con tratamiento de solución y enfriamiento en agua .

#### *Envejecimiento Artificial*

- El resto de las probetas se calentaron a una temperatura de  $160 \pm 10^\circ\text{C}$  y se fueron sacando a diferentes tiempos dejándolas enfriar lentamente y evitando las corrientes de aire (figura 4.1.), hasta alcanzar la temperatura ambiente, para observar en cual de estos momentos se obtenían las máximas propiedades mecánicas. Los tiempos empleados fueron los siguientes: 1, 2, 3, 3.5, 4, 5 y 5.5 horas. Fue importante aplicar el tratamiento de envejecimiento artificial, inmediatamente después del tratamiento de solución y enfriamiento para evitar o minimizar el envejecimiento natural propio del material

#### **4.3 Preparación de muestras**

- Se procedió a desbastar una de las caras de las probetas con lijas para agua iniciando con la de grano grueso, dejando todas las líneas en un solo sentido posteriormente, se fue reduciendo el tamaño de grano hasta llegar a la lija más fina . El orden fue el siguiente 100, 120, 180, 240, 320, 400 y por último 600. En cada cambio se giró la probeta 90°.



- (\*) Tiempo de calentamiento
- (\*\*) Tiempo entre solución y envejecimiento  $t \leq 15$  minutos

Figura 4.1. Diagrama tiempo/temperatura para el tratamiento térmico T6.

- Se pulieron en un paño de lana aplicando alúmina de tamaño de partícula de una micra hasta borrar casi todas las líneas dejadas por el desbaste.
- Nuevamente se pulieron las probetas en un paño de lana aplicando alúmina de 0.3 de micra hasta lograr el acabado espejo.
- Finalmente se aplicó el ataque químico con hidróxido de sodio para observar la microestructura de las probetas y se tomaron fotografías a 100 y 400 aumentos.

## 4.4 Pruebas mecánicas

### 4.4.1. Dureza

Posteriormente se procedió a medir la dureza en 3 posiciones diferentes. El primer punto fue en el centro de las probetas y los otros dos en los extremos de las mismas como se muestra en la figura 4.2

- La prueba empleada fue la Rockwell escala "F" que utiliza una carga de 60 kg. con penetrador de bola de 1/16 pulgadas.
- Los datos obtenidos fueron promediados para obtener medias.

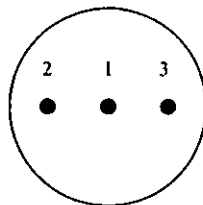


Figura 4.2. Posición de las medidas tomadas.

#### 4.4.2. Prueba de tensión

- Se procedió a maquinar dos probetas de acuerdo a la norma ASTM E8-87A cuyas dimensiones se muestran en la figura 4.3; una sin tratamiento térmico y la otra con solución, enfriamiento y envejecimiento artificial de 4 horas.
- Las probetas fueron enviadas al Centro de Asistencia y Servicios Tecnológicos Cuautitlán Izcalli - Conalep donde se realizaron las pruebas de tensión en una maquina universal de ensayos marca Shimadzu modelo UMH-20 con una exactitud de 1% a una temperatura de prueba de 19°C y bajo la norma NMX-B-310, 1981.

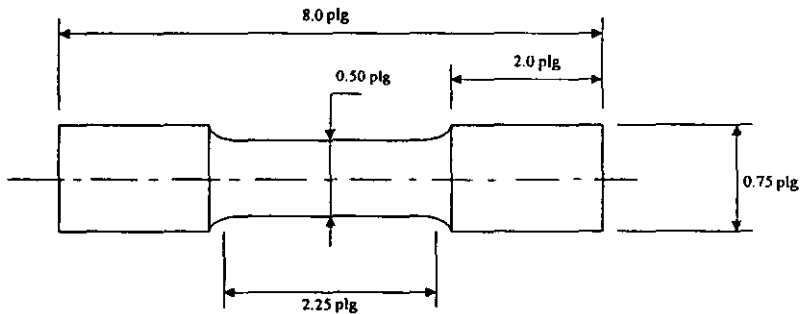


Figura 4.3. Probeta para pruebas de tensión

#### 4.4.3. Difracción de rayos X

- Para realizar este análisis se seleccionaron las probetas siguientes:

Probeta	Tratamiento Aplicado
1	Fundición
5	Solución y temple en agua
7	Solución, temple en agua y envejecimiento a 1 hora
14	Solución, temple en agua y envejecimiento a 4 horas
15	Solución, temple en agua y envejecimiento a 5 horas
17	Solución, temple en agua y envejecimiento a 5.5 horas

Luego, se obtuvieron muestras con un espesor de 2 a 3 mm, debiendo mencionar que el corte se hizo bajo la presencia abundante de líquido refrigerante para evitar un calentamiento en las muestras y conservar la microestructura después del envejecimiento artificial.

- Posteriormente se desbastaron las muestras con lijas para agua del número 180 y 400, y se solicitó al Instituto de Investigación de Materiales de la UNAM, la realización del análisis mediante difracción de rayos X que nos permitió determinar las fases existentes y los correspondientes planos de difracción. Dicho análisis se realizó en un difractómetro marca Siemens D-500, y utilizando un ángulo  $2\theta$  de prueba en el rango de 30 a 60°.



## CAPITULO V

### RESULTADOS

#### 5.1 Microscopia óptica

Las micrografías que se muestran en las figuras 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4 dejan ver que la estructura de las probetas sin tratar térmicamente y aquellas ya tratadas, están constituidas fundamentalmente por aluminio (fase  $\alpha$ ), además de silicio eutéctico que aparece en forma de agujas en el material sin tratar y que adquiere una forma más redondeada en el material tratado térmicamente lo que ocasiona un incremento en la dureza y resistencia mecánica debido a que se interrumpe con menos brusquedad la continuidad de la matriz, esto es, se produce una menor concentración de esfuerzos.



Figura 5.1. Micrografía de la aleación de aluminio 356 tal y como se obtiene de fundición 100 X.

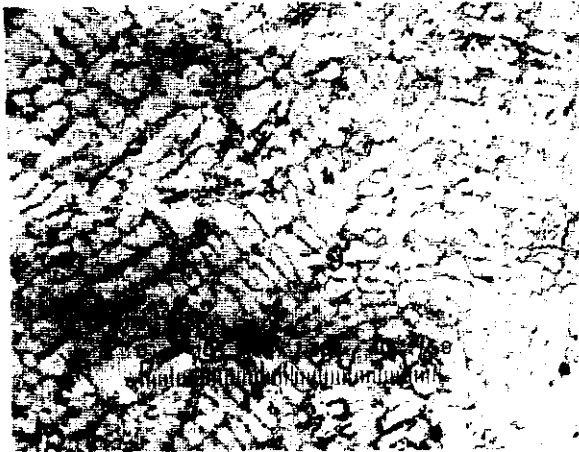


Figura 5.2 Micrografia de la aleación de aluminio 356 tratada en solución y envejecida 4 horas a 160 °C 100 X

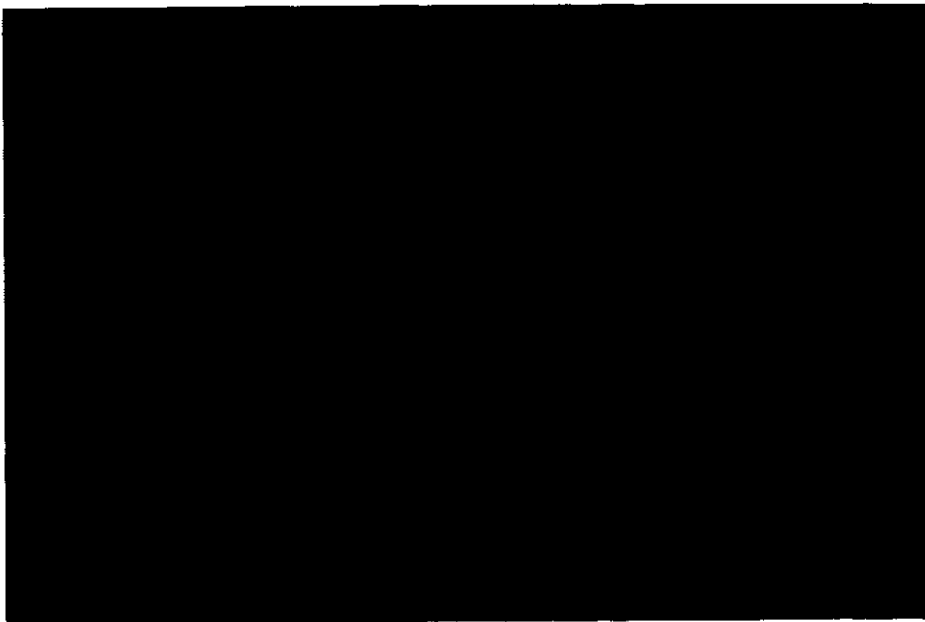


Figura 5.3 Micrografia de la aleación de aluminio 356 tal y como se obtiene de fundición 400 X



Figura 5.4. Micrografia de la aleación de aluminio 356 tratada en solución y envejecida 4 horas a 160 °C 400 X

## 5.2 Dureza

La tabla 5.1 muestra las medidas de dureza obtenidas en las diferentes probetas de aluminio y con los valores promedio se obtuvo la gráfica mostrada en la figura 5.5. Puede observarse que la dureza en el material tal como se obtiene del proceso de fundición fue de 59.50 R<sub>F</sub>, y disminuyó a 56.00 R<sub>F</sub> en el material tratado en solución; posteriormente, la dureza aumentó a un valor máximo de 91.92 R<sub>F</sub> en el material sometido a tratamiento de envejecimiento durante un tiempo de 4 horas a 160°C y a partir de ese momento la dureza empezó a disminuir alcanzando un valor de 83.50 R<sub>F</sub> para un tiempo de envejecimiento de 5.5 horas, lo cual implica que ya existe un sobre-envejecimiento de la aleación.

Tabla 5.1. Medidas de dureza.

N° Probeta	Medio de temple	Tiempo de envejecimiento (horas)	Punto 1 R <sub>F</sub>	Punto 2 R <sub>F</sub>	Punto 3 R <sub>F</sub>	Media de los puntos	Media total
1			59.5	59.0	59.0	59.17	59.50
2			60.5	59.0	60.0	59.83	
3	Aire		42.5	38.5	33.5	38.17	40.83
4	Aire		43.5	42.5	44.5	43.50	
5	Agua		57.5	58.0	52.5	56.00	<b>56.00</b>
6	Agua	1	62.5	59.0	60.5	60.67	<b>58.08</b>
7	Agua	1	53.5	56.5	56.5	55.50	
8	Agua	2	74.5	74.5	75.5	74.83	<b>79.08</b>
9	Agua	2	85.5	81.5	83.0	83.33	
10	Agua	3	72.0	74.0	76.5	74.17	<b>81.25</b>
11	Agua	3	87.5	88.5	89.0	88.33	
12	Agua	3.5	91.0	89.5	90.5	90.33	<b>90.17</b>
13	Agua	3.5	89.5	91.0	89.5	90.00	
14	Agua	4	92.5	92.5	93.0	92.67	<b>91.92</b>
15	Agua	4	91.5	91.5	90.5	91.17	
16	Agua	5	87.5	87.5	90.5	88.50	<b>88.50</b>
17	Agua	5.5	82.0	82.0	86.5	83.50	<b>83.50</b>

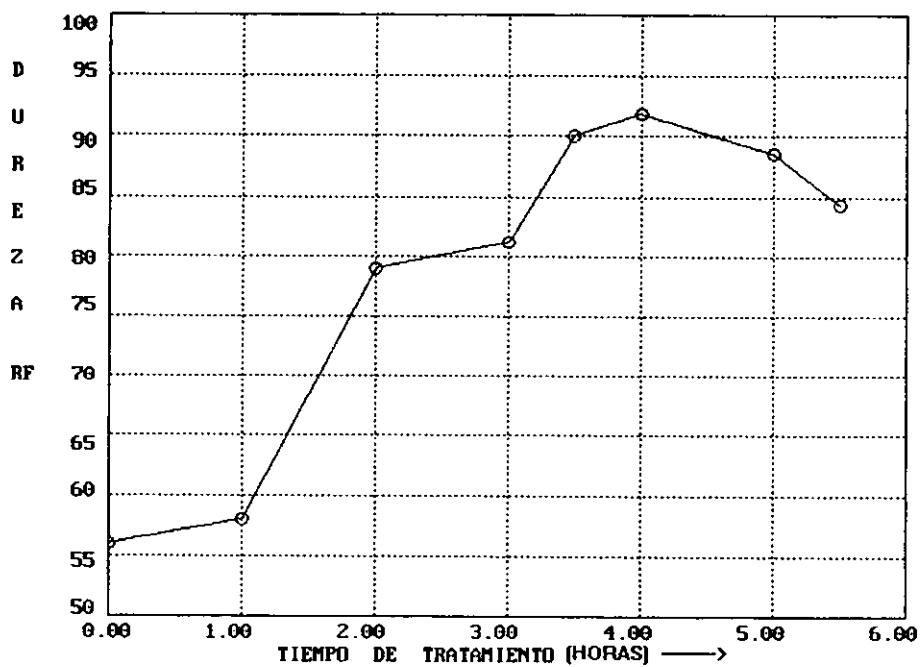


Figura 5.5. Variación de la dureza en función del tiempo de tratamiento.

### 5.3 Prueba de tensión

En el informe de resultados que se muestra en el anexo B, se puede apreciar que la resistencia máxima del material sin tratamiento térmico es de  $17.83 \text{ kg}_f/\text{mm}^2$  y que la misma propiedad en el material tratado en solución y envejecido durante cuatro horas es de  $25.13 \text{ kg}_f/\text{mm}^2$ , lo cual implica un incremento del 40%, haciéndose notar que en las probetas no se formó un cuello o estricción, lo cual denota poca ductilidad en el material tanto tratado térmicamente como aquel sin tratar.

### 5.4 Difracción de rayos X

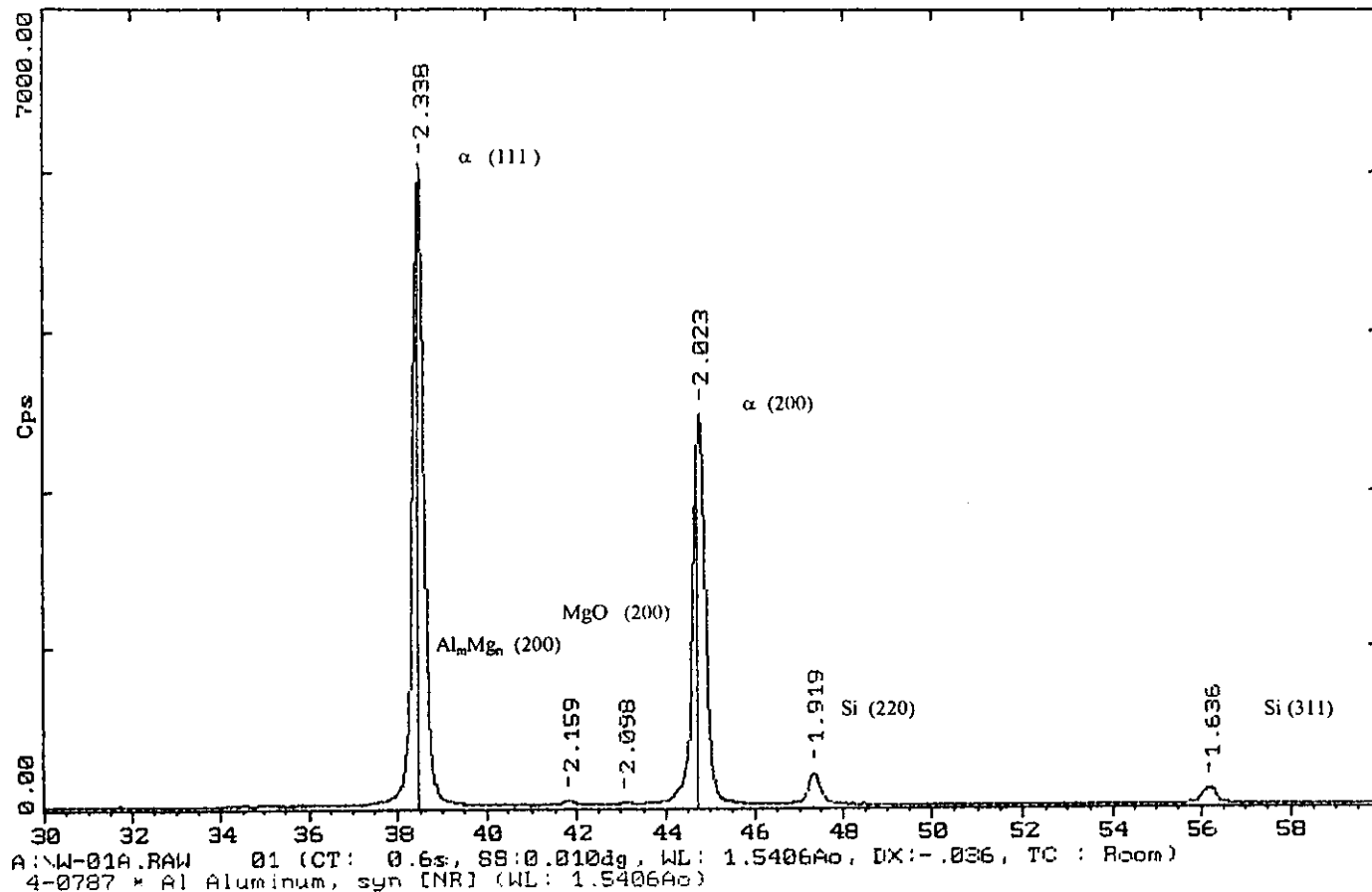
Los difractogramas obtenidos se muestran en las figuras 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 y 5.11. Luego apoyándose en la ley de Bragg que establece lo siguiente:

$$n \lambda = 2d \sin \theta$$

Donde

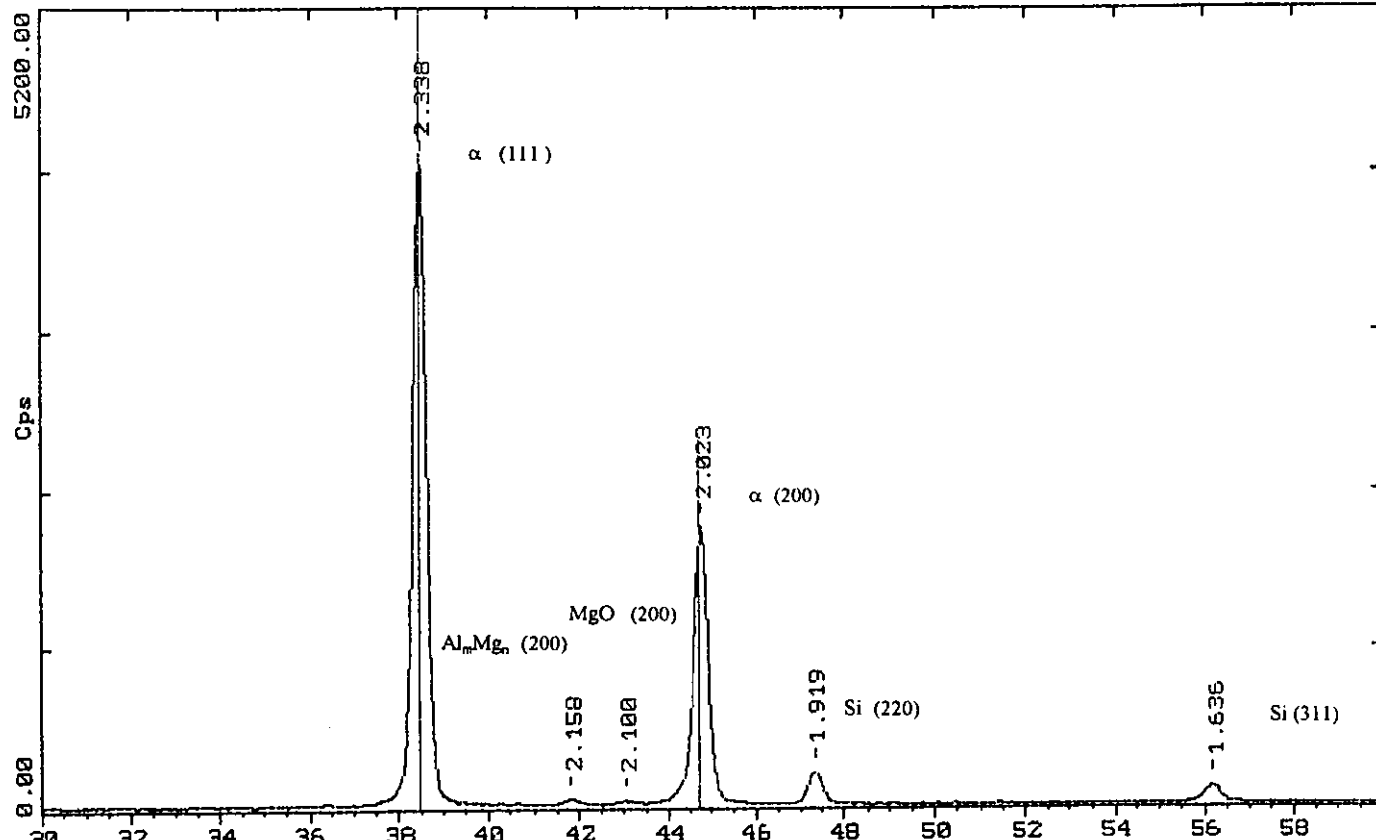
- n = Orden de difracción (1)
- $\lambda$  = Longitud de onda del rayo x empleado
- d = Distancia interplanar
- $\theta$  = Ángulo de difracción

Y con ayuda de la bibliografía consultada (Pearson's handbook of crystallographic data for intermetallic phases) se construyeron las tablas 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 y 5.7.



165

Figura 5.6. Difractograma del material de fundición



A:\W-05.RAW 05 (CT: 0.6s, SS:0.010dg, WL: 1.5406Ao, TC : Room)  
4-0787 \* Al Aluminum, syn [NR] (WL: 1.5406Ao)

Figura 5.7. Difractograma del material tratado en solución y templado en agua.



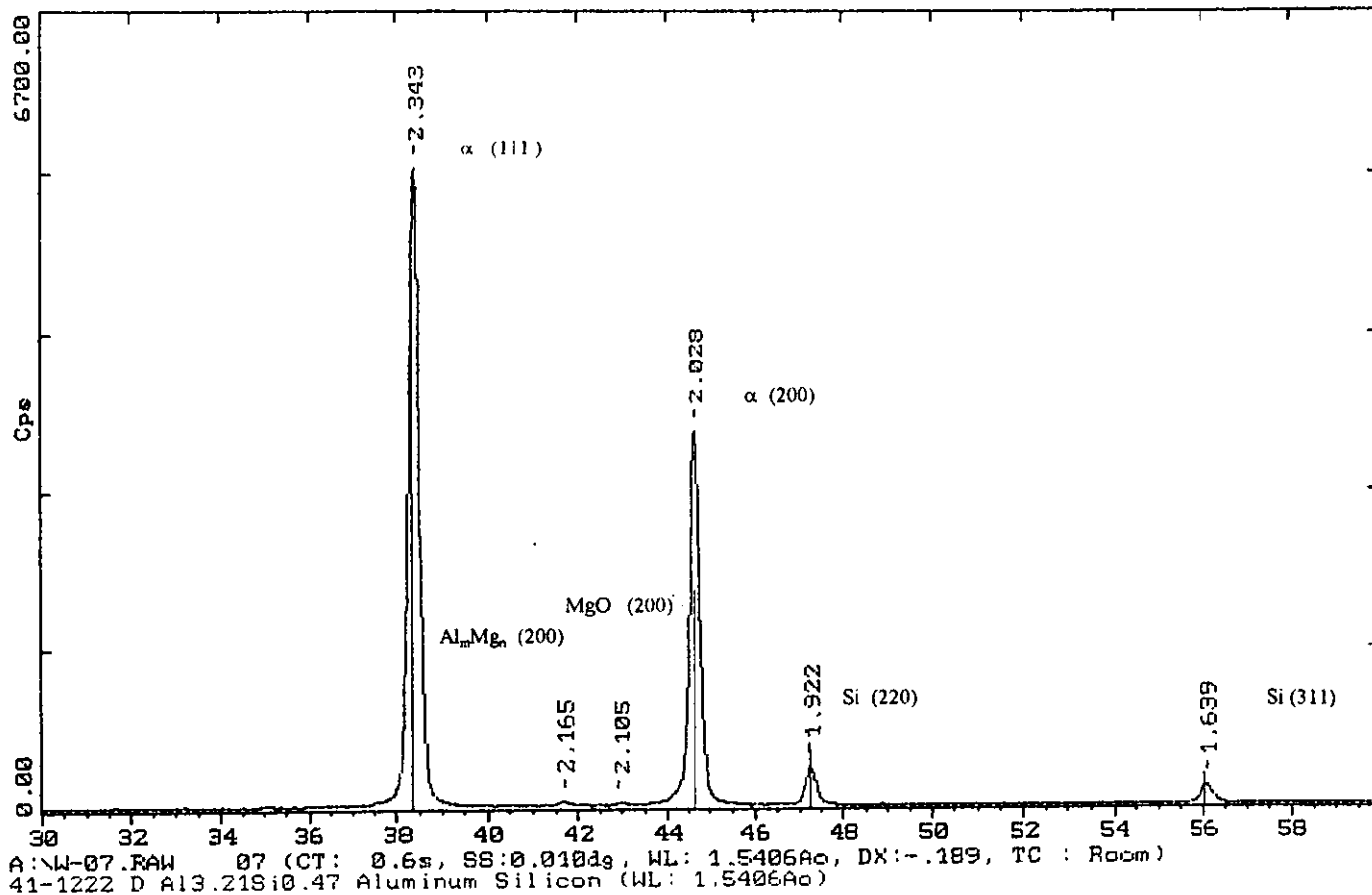


Figura 5 8 Difractograma del material tratado en solución, templado en agua y envejecido a 160°C durante una hora.

2-Theta - Scale

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES. 10-Jun-1998 11:33

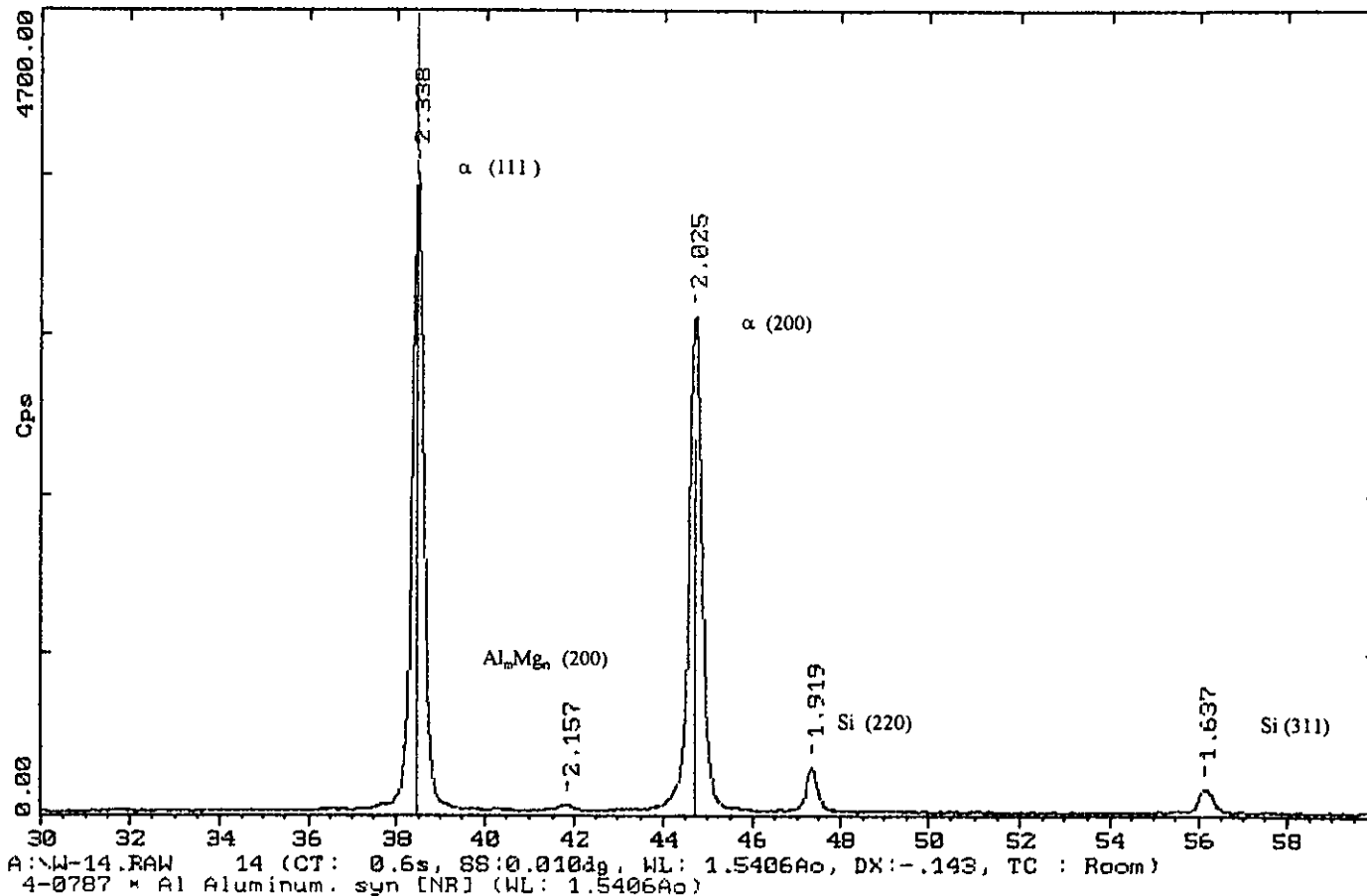


Figura 5.9. Difractograma del material tratado en solución, templado en agua y envejecido a 160°C durante 4 horas.

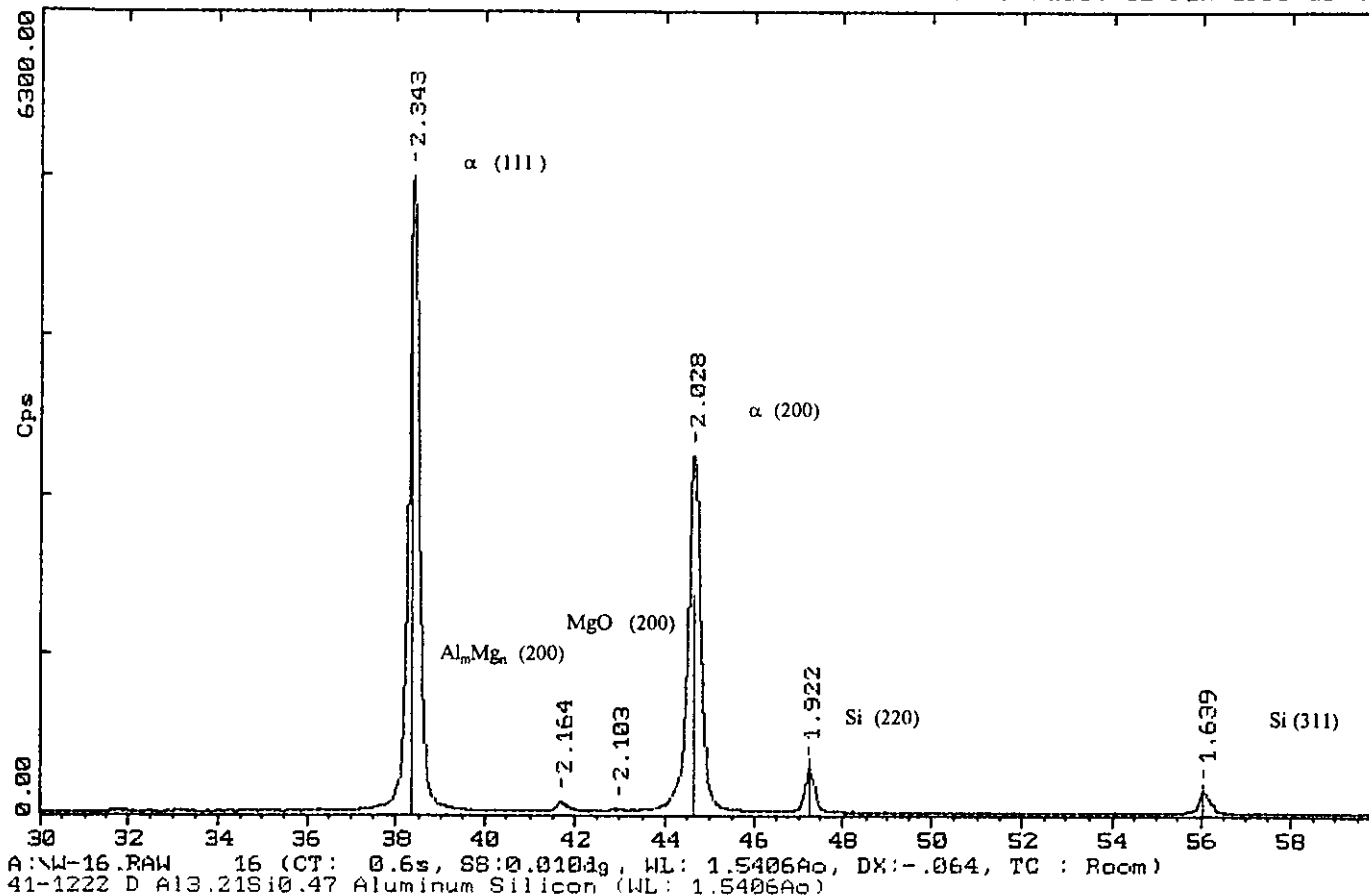


Figura 5.10. Difractograma del material tratado en solución, templado en agua y envejecido a 160°C durante 5 horas.

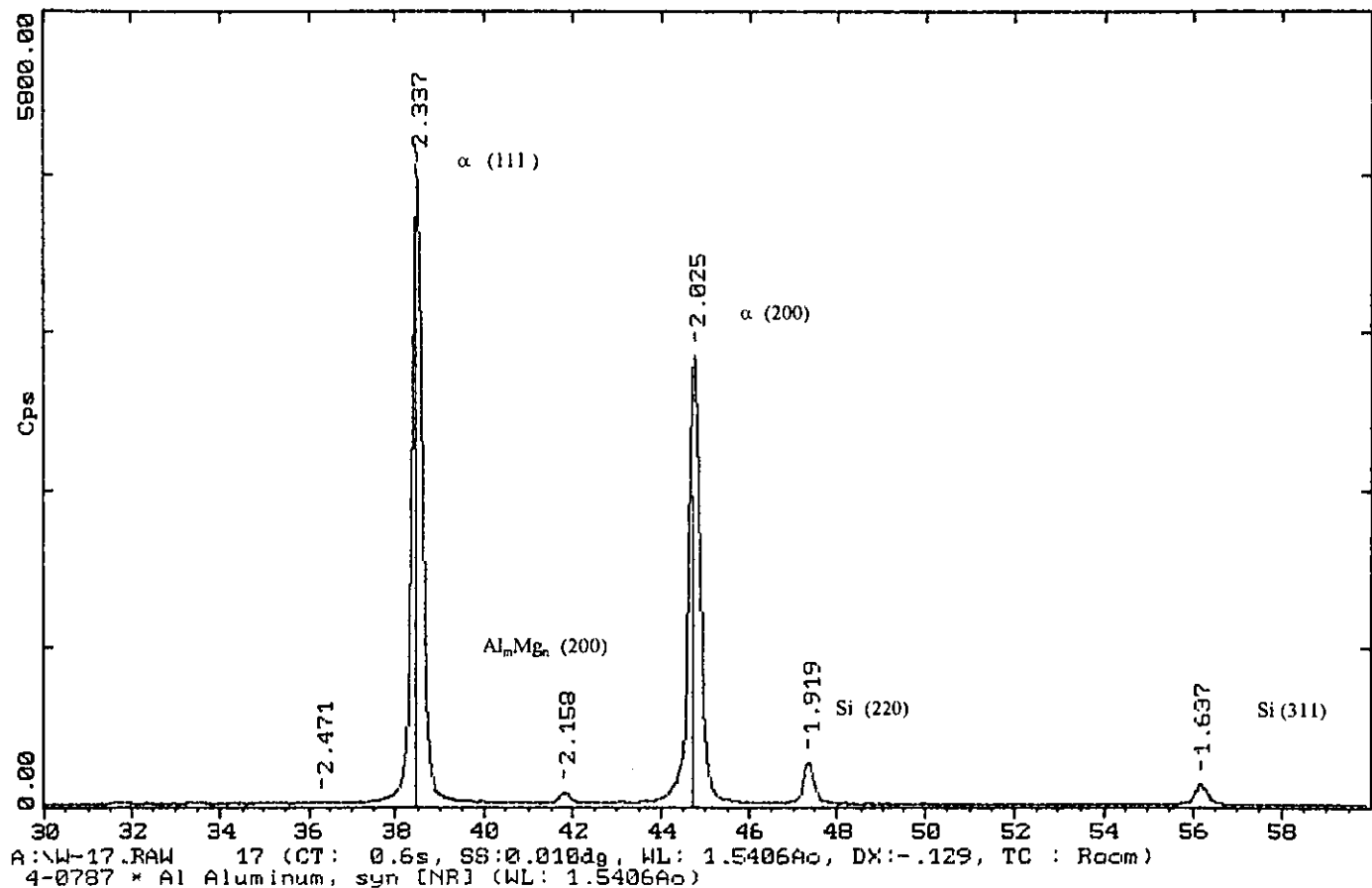


Figura 5.11. Difractograma del material tratado en solución, templado en agua y envejecido a 160°C durante 5.5 horas.

Tabla 5.2. Planos de difracción correspondientes al difractograma W-01A (material de fundición).

Pico N°	Ángulo de Difracción ( $2\theta$ )	Distancia entreplanos ( $A^\circ$ )	Fase	Estructura	Plano de difracción
1	38.45	2.338	$\alpha$	FCC	(111)
2	41.8	2.159	$Al_mMg_n$	FCC	(200)
3	43.2	2.098	MgO	FCC	(200)
4	44.7	2.023	$\alpha$	FCC	(200)
5	47.4	1.919	Si	FCC	(220)
6	56.2	1.636	Si	FCC	(311)

Tabla 5.3. Planos de difracción correspondientes al difractograma W-05 (material tratado en solución y templado en agua).

Pico N°	Ángulo de Difracción ( $2\theta$ )	Distancia entreplanos ( $A^\circ$ )	Fase	Estructura	Plano de difracción
1	38.45	2.338	$\alpha$	FCC	(111)
2	41.8	2.158	$Al_mMg_n$	FCC	(200)
3	43.2	2.100	MgO	FCC	(200)
4	44.7	2.023	$\alpha$	FCC	(200)
5	47.4	1.919	Si	FCC	(220)
6	56.2	1.636	Si	FCC	(311)

Tabla 5.4. Planos de difracción correspondientes al difractograma W-07 (material tratado en solución, templado en agua y envejecido a 160°C durante una hora).

Pico N°	Ángulo de Difracción ( $2\theta$ )	Distancia entreplanos ( $A^\circ$ )	Fase	Estructura	Plano de difracción
1	38.4	2.343	$\alpha$	FCC	(111)
2	41.7	2.165	$Al_mMg_n$	FCC	(200)
3	43	2.105	MgO	FCC	(200)
4	44.6	2.028	$\alpha$	FCC	(200)
5	47.3	1.922	Si	FCC	(220)
6	56	1.639	Si	FCC	(311)

Tabla 5.5. Planos de difracción correspondientes al difractograma W-14 (material tratado en solución, templado en agua y envejecido a 160°C durante 4 horas).

Pico N°	Ángulo de difracción (2θ)	Distancia entreplanos (Å°)	Fase	Estructura	Plano de difracción
1	38.45	2.338	α	FCC	(111)
2	41.8	2.157	Al <sub>m</sub> Mg <sub>n</sub>	FCC	(200)
3	44.7	2.025	α	FCC	(200)
4	47.4	1.919	Si	FCC	(220)
5	56.1	1.637	Si	FCC	(311)
6					

Tabla 5.6. Planos de difracción correspondientes al difractograma W-16 (material tratado en solución, templado en agua y envejecido a 160°C durante 5 horas).

Pico N°	Ángulo de difracción (2θ)	Distancia entre planos (Å°)	Fase	Estructura	Plano de difracción
1	38.4	2.343	α	FCC	(111)
2	41.7	2.164	Al <sub>m</sub> Mg <sub>n</sub>	FCC	(200)
3	43	2.103	MgO	FCC	(200)
4	44.7	2.028	α	FCC	(200)
5	47.3	1.922	Si	FCC	(220)
6	56	1.639	Si	FCC	(311)

Tabla 5.7. Planos de difracción correspondientes al difractograma W-17 (material tratado en solución, templado en agua y envejecido a 160°C durante 5.5 horas).

Pico N°	Ángulo de difracción (2θ)	Distancia entreplanos (Å°)	Fase	Estructura	Plano de difracción
1	38.45	2.338	α	FCC	(111)
2	41.8	2.158	Al <sub>m</sub> Mg <sub>n</sub>	FCC	(200)
3	44.7	2.025	α	FCC	(200)
4	47.4	1.919	Si	FCC	(220)
5	56.1	1.637	Si	FCC	(311)
6					

Así, fue posible identificar a las fases siguientes: Fase  $\alpha$  que es rica en aluminio y que posee una estructura FCC; también se identificó la presencia de silicio con una estructura FCC; se halló la presencia de la fase metaestable  $Al_mMg_n$  con estructura FCC y por último se identificó el compuesto MgO (periclasa) que se puede considerar como impureza dentro de la aleación y por encontrarse en pequeñas cantidades (en función de la altura pico de difracción,  $2\theta=43^\circ$ ) sus efectos se pueden despreciar. También se puede establecer que durante el tratamiento térmico no se observó la solución o segregación de alguna de las fases que se tenían en el material tal y como se obtiene de fundición. Los parámetros de red de las fases  $\alpha$ ,  $Al_mMg_n$  y silicio para cada tiempo de tratamiento se muestran en las tablas 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 y 5.13. con dichos datos se trazaron las gráficas que se muestran en las figuras 5.12, 5.13 y 5.14. En consecuencia, se puede establecer que el parámetro de red de las fases  $\alpha$ ,  $Al_mMg_n$  y del silicio se incrementa en la primera hora del tratamiento de envejecimiento, pero a las cuatro horas se contrae de manera significativa, por lo tanto, los planos compactos están mas cercanos entre sí lo que ocasiona un aumento en la dureza y en la resistencia mecánica, finalmente, el parámetro de red se vuelve a incrementar a las cinco horas de tratamiento y se reduce nuevamente a las 5.5 horas.

Tabla 5.8. Parámetros de red de las fases identificadas en el material obtenido de fundición

Fase	Parámetro de red a Å	Parámetro de red a de equilibrio Å
$\alpha$	4.0495	4.049
$Al_mMg_n$	4.3180	Metaestable *
Si	5.4278	5.4307

Tabla 5.9. Parámetros de red de las fases identificadas en el material tratado en solución y templado en agua.

Fase	Parámetro de red $a$ Å	Parámetro de red $a$ de equilibrio Å
$\alpha$	4.0495	4.049
$Al_mMg_n$	4.316	Metaestable *
Si	5.4278	5.4307

Tabla 5.10. Parámetros de red de las fases identificadas en el material tratado en solución, templado en agua y envejecido a 160 °C durante una hora

Fase	Parámetro de red $a$ Å	Parámetro de red $a$ de equilibrio Å
$\alpha$	4.0582	4.049
$Al_mMg_n$	4.330	Metaestable *
Si	5.4362	5.4307

Tabla 5.11. Parámetros de red de las fases identificadas en el material tratado en solución, templado en agua y envejecido a 160 °C durante 4 horas

Fase	Parámetro de red $a$ Å	Parámetro de red $a$ de equilibrio Å
$\alpha$	4.0495	4.049
$Al_mMg_n$	4.314	Metaestable *
Si	5.4278	5.4307



Tabla 5.12. Parámetros de red de las fases identificadas en el material tratado en solución, templado en agua y envejecido a 160 °C durante 5 horas.

Fase	Parámetro de red $a$ Å	Parámetro de red $a$ de equilibrio Å
$\alpha$	4.0582	4.049
$Al_mMg_n$	4.328	Metaestable *
Si	5.4362	5.4307

Tabla 5.13 Parámetros de red de las fases identificadas en el material tratado en solución, templado en agua y envejecido a 160 °C durante 5.5 horas.

Fase	Parámetro de red $a$ Å	Parámetro de red $a$ de equilibrio Å
$\alpha$	4.0478	4.049
$Al_mMg_n$	4.316	Metaestable *
Si	5.4278	5.4307

\* Metaestable.- Al modificarse la composición química del compuesto también se modifica su parámetro de red en el rango de 4.05 a 4.035Å°

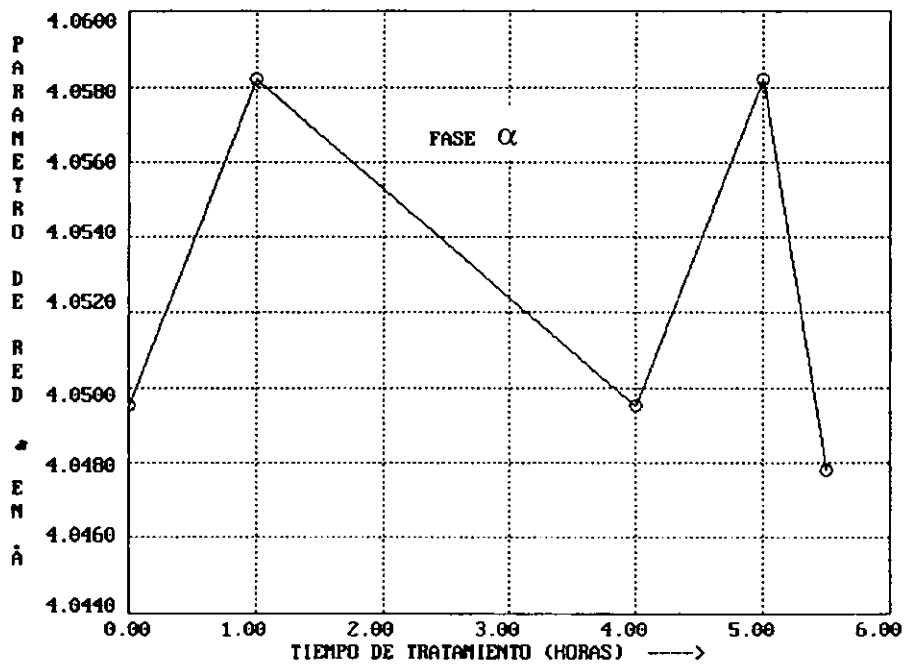


Figura 5.12. Variación del parámetro de red  $a$  de la fase  $\alpha$  en función del tiempo de tratamiento

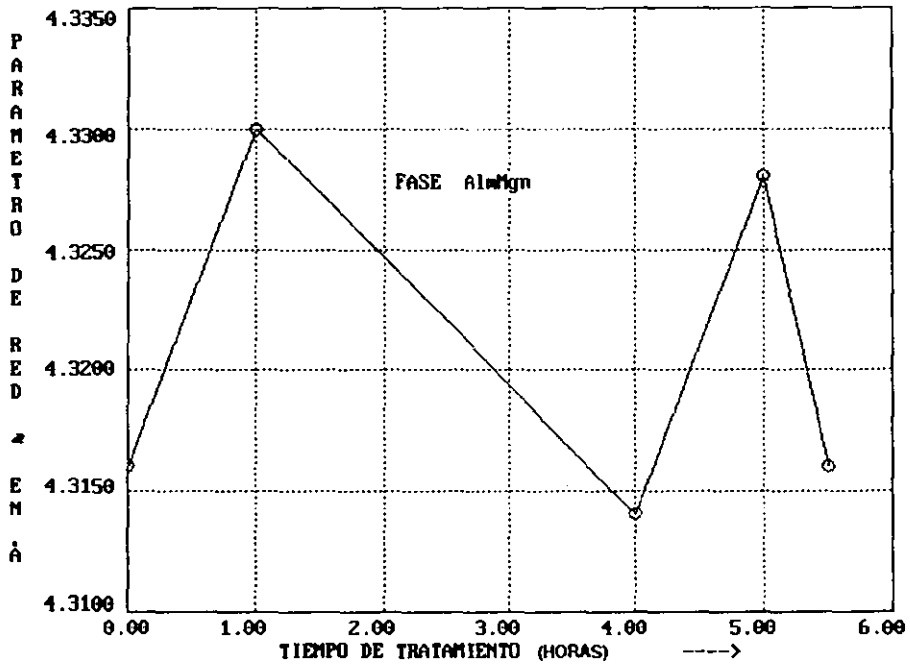


Figura 5.13. Variación del parámetro de red  $a$  de la fase metaestable  $Al_mMg_n$  en función del tiempo de tratamiento.

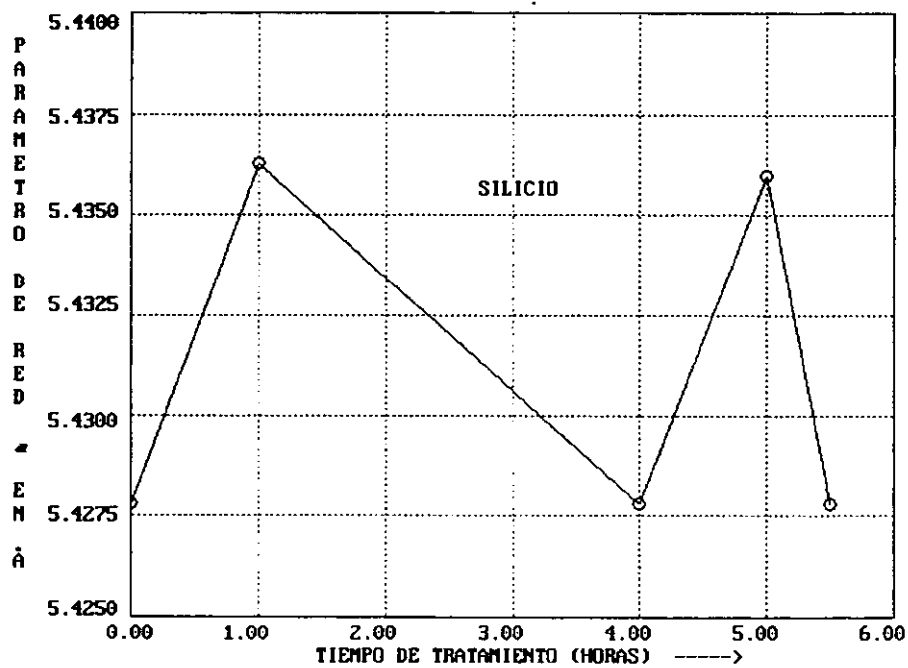


Figura 5.14. Variación del parámetro de red a del silicio en función del tiempo de tratamiento

## CAPITULO VI

### CONCLUSIONES

Después del trabajo experimental realizado (microscopía óptica, medidas de dureza, prueba de tensión y difracción mediante rayos X ) se pueden establecer las conclusiones siguientes:

- 1.- La estructura de la aleación de aluminio 356 tal y como se obtiene de fundición y tratada térmicamente está constituida por las fases  $\alpha$  ,  $Al_mMg_n$  , Si y MgO, la cual se puede considerar como una impureza.
- 2.- No se observó la solución o segregación de alguna fase durante el tratamiento térmico de solución y de envejecimiento aplicado al material objeto de nuestro estudio.
- 3.- No se detectó la presencia del compuesto intermetálico  $Mg_2Si$ , la cual según la bibliografía consultada es la responsable del endurecimiento del material durante el tratamiento de envejecimiento, por lo tanto, se debe asumir que el precipitado es tan fino que no fue posible detectarlo por medio del análisis mediante rayos X, y que posiblemente a mayor tiempo de tratamiento el precipitado aumente de tamaño y sea posible su detección e identificación.
- 4.- Los demás elementos de aleación, tales como el cobre, el hierro, etc., se encuentran en solución sólida, puesto que no se detectó la presencia de algún compuesto donde intervengan dichos elementos.
- 5.- El tiempo óptimo para el tratamiento de envejecimiento a 160 °C es de 4 horas, donde se alcanzó una dureza máxima de 91.92 R<sub>F</sub>, lo que significa un incremento del 35 % con respecto al material obtenido directamente de fundición.

6.- Para ese mismo tiempo de tratamiento se obtuvo un aumento del 40 % en la resistencia máxima del material.

Finalmente, se puede establecer que debido al aumento en el uso del aluminio y sus aleaciones como metal de uso de ingeniería y muchas otras aplicaciones se eligió este tema como base del presente trabajo de Tesis, además, de que se observó que muchos usuarios de la aleación comercial 356 no obtienen el máximo aprovechamiento de sus propiedades y características. Por consiguiente, el estudio realizado muestra que la aleación 356 tratada térmicamente es una buena opción, ya que cumple con las características necesarias para una gran variedad de aplicaciones, y que dependiendo de las condiciones requeridas se puede seleccionar de entre la gran variedad de aleaciones de las cuales los usuarios no conocen siempre sus propiedades fundamentales.

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

## BIBLIOGRAFÍA

1. Introducción a la Metalurgia Física  
Sidney H. Avner  
Mc Graw Hill 2º Edición
  
- 2.- Aluminum Casting Technology (2nd Edition).  
Reviewed and Revised by John L. Jorstad, Reynolds Metals Co.  
and Wayne M. Rasmussen, AFS  
American Foundrymen's Society, Inc., 1993
  
- 3.- Manual del Aluminio  
Aluminio Industrial Mexicano S.A.  
Almexsa, 1975
  
- 4.- Manual de Control de Calidad Aplicado a las Fundiciones de  
Aluminio-Silicio-Magnesio  
Manuel Chiu G. y Armando Ojeda T.  
Tesis
  
- 5.- Moldeo y Fundición  
Revista Técnica de la Sociedad Mexicana de Fundidores A.C.  
Nº 85, Febrero 1993
  
- 6.- Fusión y Tratamiento de las Aleaciones de Aluminio  
Ing. Jaime Trujano E.  
Sociedad Mexicana de Fundidores, A.C., 1996

- 7.- The Treatment Of liquid Aluminum-Silicon Alloys  
John E. Gruzleski and Bernard M. Closset  
American Foundrymen's Society, Inc., 1990
  
- 8 - Metals Handbook Vol 5 y 8  
ASM 8° Edición
  
- 9.- The NFFS Guide to Aluminum Casting Design: Sand and Permanent Mold.  
David D. Bradney, M.A.  
Non-Ferrous Founders' Society, 1994
  
- 10.- Die-Cast Metals; Aluminum and Magnesium Alloys Vol. 02.02  
Section 2.0 Nonferrous Metal Products  
American Society for Testing and Materials, 1998
  
- 11.- Ingeniería Metalurgica  
Raymond A. Higgings, Tomo 2  
Cecsa 1° Edición
  
- 12.- Catalogo de Productos Laminados de Aluminio  
Grupo Aluminio  
Almexsa
  
- 13 - El Metal más Abundante y Útil de Nuestro Planeta  
Aluminio S.A.  
Alumsa



## ANEXO A

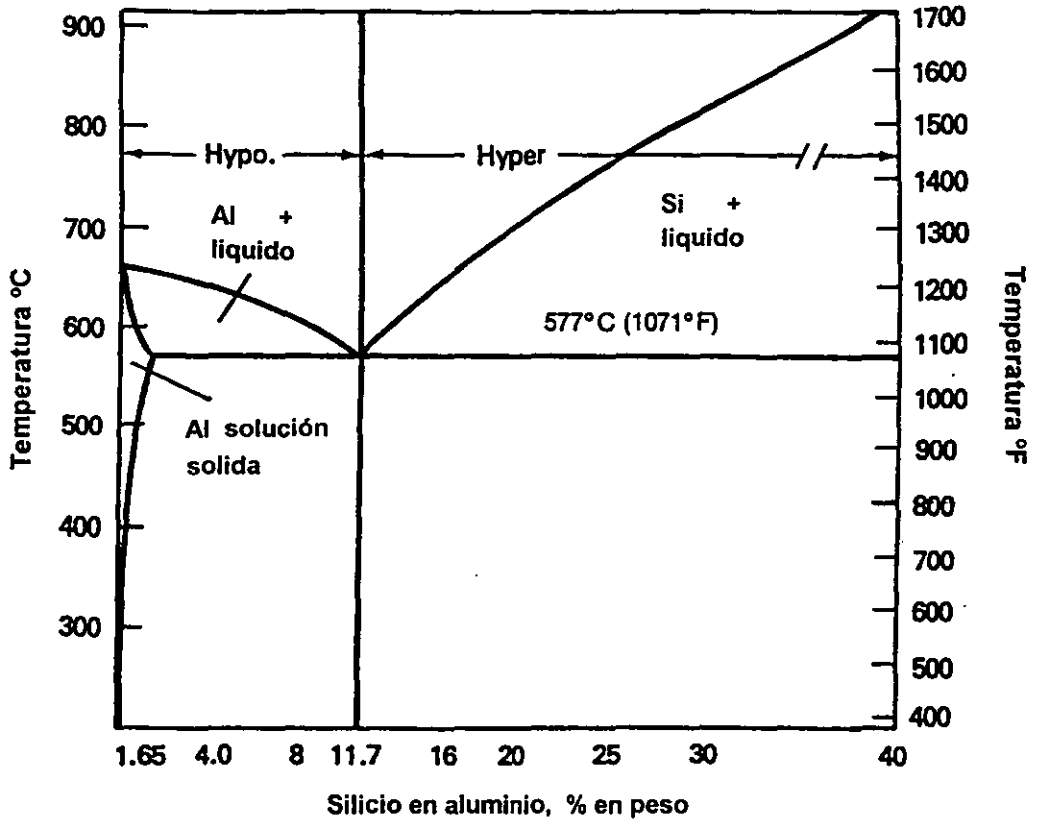


Diagrama de equilibrio Al - Si

## ANEXO B

Forma - IRPT

No. de Informe: LPF98057

 Laboratorio de Pruebas Físicas  
 Unidad de Certificación y Control

## Informe de Resultados de Prueba de Tensión

Descripción del Material: Probetas de Aluminio

Fecha de recepción de material: 15/09/98

Identificación: P. de fundición y P. con T. T.

Fecha de ejecución de prueba: 15/09/98

Fecha de emisión de informe: 17/09/98

 Empresa: Facultad de Estudios Superiores C. I.  
 km 45, Carretera Cuautitlán Teoloyucan,  
 Edo. de México

Representante: Rogelio Pérez Cedillo

Identificación de Probeta	Carga		Resistencia	Límite		Elongación (%)	Reducción de Área (%)
	Máxima (kgf)	Carga Límite Elástico (kgf)		Máxima (kgf/mm <sup>2</sup> )	Elástico (kgf/mm <sup>2</sup> )		
P. de fundición	2 365	-----	17,83	-----	-----	-----	-----
P. con T. T.	3 440	-----	25,13	-----	-----	-----	-----

## Descripción de Equipo

 Nombre: Máquina Universal de Ensayos  
 Marca: Shemadru.  
 Modelo: UMH-20  
 Serie: 81288  
 Alcance de Medición: 0-20 000 kgf  
 Exactitud: 1%

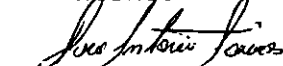
## Condiciones de Prueba

 Intervalo de Medición: 0 - 5 000 gf  
 Temperatura de prueba: 19° C  
 Procedimiento: SCLPF 04-96  
 Norma de referencia: NMX - B 310 1981

Observaciones: Ninguna

Anexos: Gráfica Carga - Deformación

Realizó



 José Antonio Torres Echeverría  
 Jefe de Área de Pruebas Físicas  
 Metalográficas

Revisión



 Maura Margarita Nuñez Rodríguez  
 Técnico Especializado

Nota: Este informe respalda únicamente a las probetas ensayadas y no puede ser alterado ni reproducido total o parcialmente sin la autorización previa por escrito de este Laboratorio