



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**"ESTUDIO DEL EFECTO DE DIVERSOS  
TRATAMIENTOS EN LA MICROESTRUC-  
TURA Y MICRODUREZA  
DE UNA ALEACION  
Al-Mg-Si-Cu-Mn"**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A :

**EDUARDO GARCIA GARCIA**

DIR. ING. ARTURO BARBA PINGARRON

MEXICO, D. F.

1984



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.

# INDICE

I

Pág.

## CAPITULO I

|                       |   |
|-----------------------|---|
| I. INTRODUCCION ..... | 2 |
|-----------------------|---|

## CAPITULO II

### II. EL ALUMINIO Y SUS PRINCIPALES ALEACIONES

|  |    |
|--|----|
| 2.1 Generalidades .....  | 4  |
| 2.2 El aluminio .....  | 5  |
| 2.2.1 Producción de aluminio .....   | 6  |
| 2.2.2 Obtención de alúmina a partir de la bauxita por el proceso Bayer .....             | 6  |
| 2.2.3 Obtención del aluminio a partir del óxido de aluminio (Proceso Hall-Heroult) ..... | 8  |
| 2.3 Historia de las aleaciones de aluminio .....   | 10 |
| 2.3.1 Los precursores de las aleaciones de aluminio .....                                | 10 |
| 2.4 Principales elementos aleantes .....   | 12 |
| 2.5 Sistema de designación de las aleaciones de aluminio .....                           | 13 |
| 2.5.1 Aleaciones de aluminio serie 1000 .....  | 15 |
| 2.5.2 Aleaciones de aluminio/cobre serie 2000 .....                                      | 18 |
| 2.5.3 Aleaciones de aluminio manganeso serie 3000 .....                                  | 21 |
| 2.5.4 Aleaciones de aluminio/silicio serie 4000 .....                                    | 23 |
| 2.5.5 Aleaciones de aluminio/magnesio serie 5000 .....                                   | 24 |
| 2.5.6 Aleaciones de aluminio/magnesio silicio serie 6000 .....                           | 29 |
| 2.5.7 Aleaciones de aluminio/zinc serie 7000 .....                                       | 34 |
| 2.5.8 Otras aleaciones serie 8000 .....  | 37 |

## CAPITULO III

### III. TRATAMIENTOS TERMICOS DE ALEACIONES DE ALUMINIO

|   |    |
|---|----|
| 3.1 Introducción .....  | 38 |
| 3.2 Finalidad de los tratamientos térmicos .....                            | 38 |
| 3.3 Sistema de designación de los tratamientos térmicos .....               | 39 |
| 3.4 Teoría de los tratamientos térmicos de las aleaciones de aluminio ..... | 44 |
| 3.4.1 El tratamiento de solubilización (T. de disolución) .....             | 46 |
| 3.4.2 Tratamiento de solubilización usuales .....                           | 49 |
| 3.4.3 Tratamiento térmico de temple .....                                   | 53 |
| 3.4.4 Temple y endurecimiento estructural .....                             | 54 |
| 3.4.5 Temperatura de temple .....   | 56 |
| 3.4.6 Intervalo crítico de temperatura .....                                | 57 |
| 3.4.7 Enfriamiento .....  | 59 |
| 3.5 La velocidad del temple .....   | 60 |
| 3.6 El tiempo de retardo .....  | 65 |
| 3.6.1 Propiedades del estado templado .....                                 | 66 |
| 3.6.2 Tensiones de temple .....   | 66 |
| 3.6.3 Temple invertido .....  | 66 |
| 3.7 Tratamiento térmico de maduración .....                                 | 68 |
| 3.7.1 Generalidades sobre la maduración o envejecimiento natural .....      | 68 |
| 3.7.2 Influencia de la temperatura de maduración .....                      | 68 |

|          |   |     |
|----------|---|-----|
| 3.7.3    | Influencia de los temple repetidos .....                                      | 69  |
| 3.7.4    | Influencia de una deformación en frío sobre el material recién templado ..... | 70  |
| 3.7.5    | Características mecánicas y eléctricas .....                                  | 70  |
| 3.8      | Generalidades sobre la maduración artificial .....                            | 71  |
| 3.8.1    | Tratamiento térmico de maduración de las diferentes aleaciones .....          | 73  |
| 3.8.2    | Precauciones a tomar en el tratamiento de maduración artificial .....         | 77  |
| 3.8.3    | Supermaduración artificial .....  | 78  |
| 3.8.4    | Comparación entre los estados de maduración artificial y natural .....        | 80  |
| 3.8.5    | Influencia de la dilatación entre el temple y la maduración artificial .....  | 80  |
| 3.8.6    | Premaduración artificial .....  | 80  |
| 3.8.7    | Enfriamiento posterior a la maduración artificial .....                       | 81  |
| 3.9      | Recocido .....  | 82  |
| 3.9.1    | Distensión espontánea .....   | 83  |
| 3.9.2    | Restauración .....  | 83  |
| 3.9.3    | Recristalización primaria .....   | 84  |
| 3.9.4    | Recristalización secundaria .....   | 85  |
| 3.9.5    | Quemado .....   | 85  |
| 3.10     | Recristalización del aluminio y sus aleaciones .....                          | 85  |
| 3.11     | Recocido de coalescencia .....  | 89  |
| 3.12     | Diversos tratamientos térmicos .....  | 89  |
| 3.12.1   | Estabilización .....  | 89  |
| 3.12.2   | Relevación de esfuerzos .....   | 90  |
| 3.12.3   | Homogenización .....  | 90  |
| 3.12.3.1 | Consecuencia de la homogenización .....                                       | 91  |
| 3.13     | Equipo de tratamiento térmico .....   | 91  |
| 3.13.1   | Hornos de aire .....  | 92  |
| 3.13.2   | Hornos de sales .....   | 93  |
| 3.13.3   | Tanques de refrigeración .....  | 95  |
| 3.14     | Defectos introducidos en los tratamientos térmicos y su control .....         | 96  |
| 3.15     | Aleaciones no tratables térmicamente .....                                    | 100 |
| 3.15.1   | Nomenclatura .....  | 100 |

## CAPITULO IV

|   |     |
|---|-----|
| EXPERIMENTACION (descripción de lo realizado) ..... | 102 |
|---|-----|

## CAPITULO V

|                  |     |
|------------------|-----|
| RESULTADOS ..... | 104 |
|------------------|-----|

## CAPITULO VI

|  |     |
|--|-----|
| INTERPRETACION Y DISCUSION DE RESULTADOS ..... | 111 |
|--|-----|

CAPITULO VII

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES ..... | 114 |
| Apéndice Bibliográfico .....       | 116 |

**"ESTUDIO DEL EFECTO DE DIVERSOS TRATAMIENTOS EN LA  
MICROESTRUCTURA Y MICRODUREZA DE UNA ALEACION  
Al-Mg-Si-Cu-Mn"**

## CAPITULO I

### INTRODUCCION

El aluminio es un metal puro, pero se ha empleado, sobre todo en forma de aleaciones alcanzando un lugar muy importante en el campo de los materiales.

La cantidad de aluminio que se produce en el mundo toma el segundo plano después del acero. El incremento de la producción de aluminio por año es tres veces mayor que el del acero. Se ha estimado que para después del año 2000, con la población cercana a  $6 \times 10^9$  personas, el consumo promedio de aluminio será de aproximadamente 15 Kg/persona, lo que corresponde a un nivel en la producción anual del aluminio de alrededor de 90 millones de toneladas.

El aluminio en México, es un producto de importación, debido a la carencia de materia prima convencional utilizada -- para extraer el aluminio. Sin embargo, debido a las constantes innovaciones en las aplicaciones de este metal, el consumo aumenta a un ritmo anual superior al 22%. Así en 1978, el consumo total fué de 121,000 toneladas, en 1979 de 148,000 y en 1980, fué superior a las 165,000 toneladas.

Los tratamientos térmicos constituyen asimismo, uno de los medios más importantes empleados con frecuencia en el medio industrial, con objeto de obtener mejores propiedades en los materiales y se aplica en gran escala a aleaciones de aluminio.

En este contexto el presente trabajo pretende observar, como parte de un estudio más completo, el efecto de la modificación de algunos parámetros (temperatura de disolución, tiempo de permanencia a esa temperatura y medio de enfriamiento) durante el temple, en la microestructura y microdureza de una aleación comercial Al-Mg-Si-Mn-Cu, a fin de estimar variaciones que pudieran resultar de interés respecto a los tratamientos térmicos tradicionales de las aleaciones de aluminio.



## CAPITULO II

### II. EL ALUMINIO Y SUS PRINCIPALES ALEACIONES

#### 2.1 GENERALIDADES.

Una de las principales características del aluminio es su ligereza, ya que un centímetro cúbico de aluminio pesa 2.7 gramos. En cambio, este mismo volumen de acero pesa 7.86 gramos, de cobre 8.92, de plomo 11.34 y de cinc 7.13 gramos.

La conductividad eléctrica del aluminio es de aproximadamente 61% con relación al cobre. Como el aluminio pesa menos de la tercera parte que el cobre, kilo por kilo es dos veces más efectivo como conductor eléctrico. Además el aluminio es más fácil de fabricar por ser más dúctil que el cobre. El aluminio es un buen conductor del calor, esta propiedad hace del aluminio el metal preferido por su 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 calor.

Asimismo, el aluminio puede dar superficies con reflectividad del 95% en comparación con espejos de plata.

Tiene también una excepcional resistencia a la corrosión atmosférica del agua y de muchos agentes químicos, propiedades que se aprovechan para el empaque de alimentos y el manejo de ácidos y solventes. Esta propiedad se ve aumentada por la formación espontánea de una película de óxido de aluminio al contacto con el aire, lo que hace que el aluminio juegue un papel muy importante en la industria de la construcción, ya que, esta capa, por la acción del viento y del agua, es eliminada periódicamente, haciendo que las fachadas de los edificios luz--

can siempre frescos.

Debido a su no magnetismo, el aluminio es muy útil para gabinetes de conductores eléctricos, estructuras marinas, equipos automáticos y en cualquier equipo donde el magnetismo es un factor negativo.

En muchas aplicaciones el aluminio puede usarse aún sin acabados, pero tratándose de darles una mejor vista, es el metal que más fácilmente acepta acabados electrolíticos y al que se le puede dar la mayor gama de coloraciones.

Además de las propiedades mencionadas, pueden señalarse las de que es un magnífico reflector del calor, y de las ondas de radio y radar; es no tóxico y fácil de trabajar y ensamblar; no produce chispas por lo que su uso es muy seguro alrededor de materiales inflamables ó explosivos.

## 2.2 EL ALUMINIO.

El aluminio puro se funde a los 1220°F (660°C) y es un metal blando y dúctil, de estructura cúbica, de caras centradas. Las propiedades mecánicas del aluminio son mucho más bajas que las del acero, pero pueden mejorarse por medio de la aleación y el tratamiento térmico. La resistencia a la fluencia de las aleaciones de aluminio disminuyen bruscamente cerca de los 350°F (175°C) y por lo tanto se utilizan principalmente para aplicaciones que deben someterse a temperaturas bastante bajas.

El aluminio puede ser fundido y trabajado en casi cualquier forma y pueden darse una extensa variedad de acabados superficiales. Con estas propiedades no es sorprendente que algunas de estas aleaciones de aluminio sean de gran importancia como material de ingeniería.

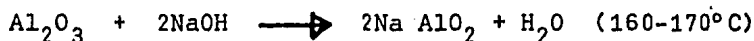
### 2.2.1 PRODUCCIÓN DE ALUMINIO.

El aluminio es el elemento metálico más abundante en la corteza de la tierra, sin embargo, siempre se encuentra en el estado combinado con otros elementos tales como el hierro, silicio y oxígeno. La bauxita es el mineral más usado para la producción de aluminio. Los óxidos de aluminio son extraídos de la bauxita por el proceso Bayer.

### 2.2.2 OBTENCIÓN DE ALUMINA A PARTIR DE LA BAUXITA POR EL PROCESO BAYER.

En el proceso Bayer, la bauxita es finamente molida y mezclada con hidróxido de sodio (sosa caústica) caliente. Diagrama 1.

Según la reacción:



Esta solución se bombea a unos tanques de presión o digestores formando aluminato de sodio soluble y el óxido de fierro, silicato de sodio y aluminio y titanato de sodio, que son insolubles.

Esta mezcla de sólidos y líquidos que contiene a la alúmina soluble, es enfriada por medio de una serie de tanques de separación y filtros prensa, donde son retenidos los sólidos que son conocidos como "lodos rojos". La solución filtrada de aluminato de sodio pasa a una torre de enfriamiento y luego a los tanques de precipitación que son de acero y tienen una altura de 16 m, donde se precipita hidróxido de aluminio  $[\text{Al}(\text{OH})_3]$  según la reacción:



# PROCESO BAYER

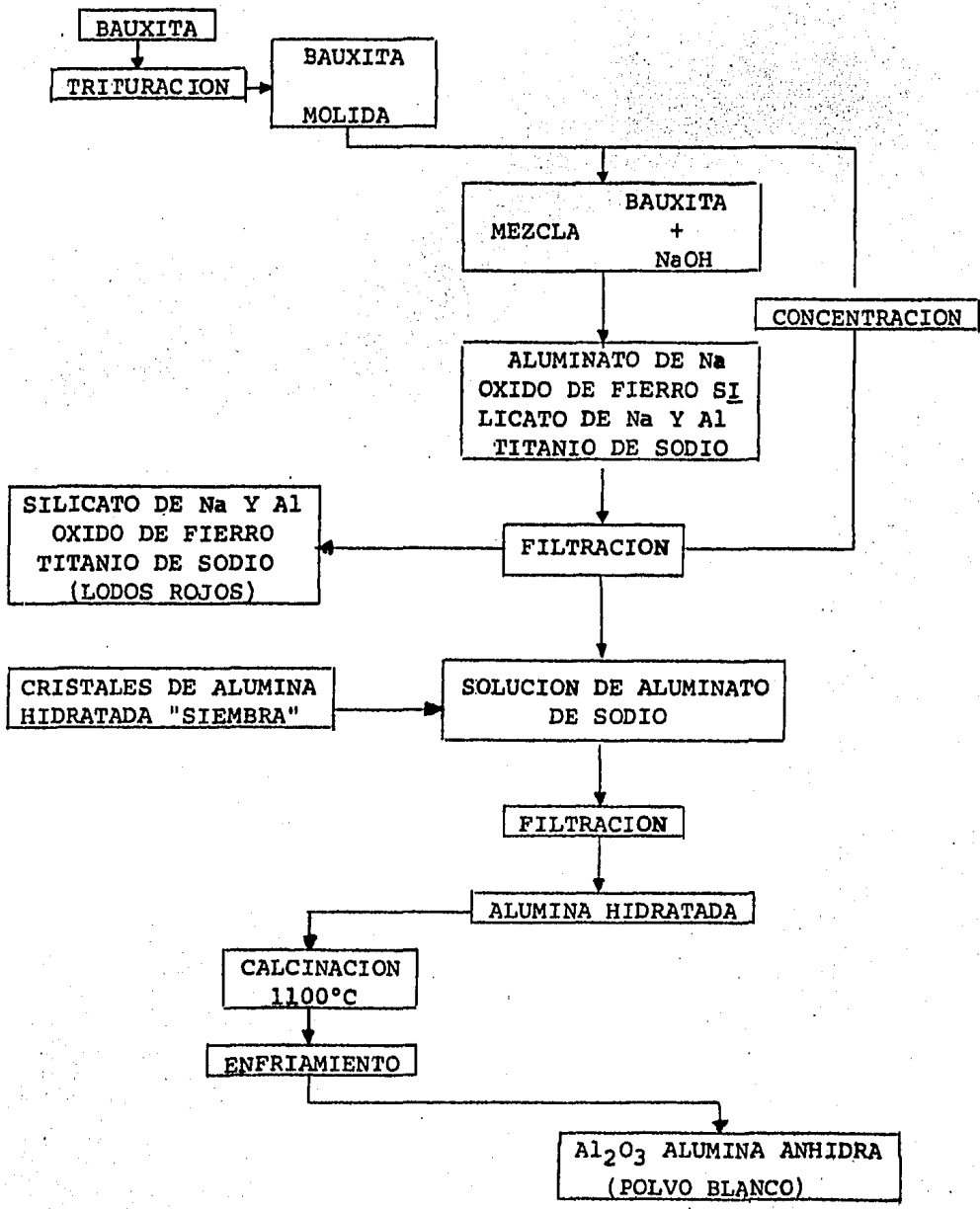


DIAGRAMA 1

En dichos tanques se agregan por la parte superior cristales de alumina hidratada para que se vayan depositando nuevos cristales de óxido de aluminio.

A este proceso se le llama "siembra". Este precipitado  $\text{Al}(\text{OH})_3$  es filtrado, lavado y calcinado a  $1100^\circ\text{C}$  en hornos rotatorios, y enfriado para obtener el óxido de aluminio  $\text{Al}_2\text{O}_3$  anhidro y no higroscópico, que es un polvo blanco y fino de apariencia semejante al azúcar.

### 2.2.3 OBTENCION DEL ALUMINIO A PARTIR DEL ÓXIDO DE ALUMINIO - (PROCESO HALL-HEROULT).

La reducción, es el proceso por medio del cual la alúmina es disociada y separada en sus dos componentes; el aluminio metálico y el oxígeno como se muestra en la figura 1.

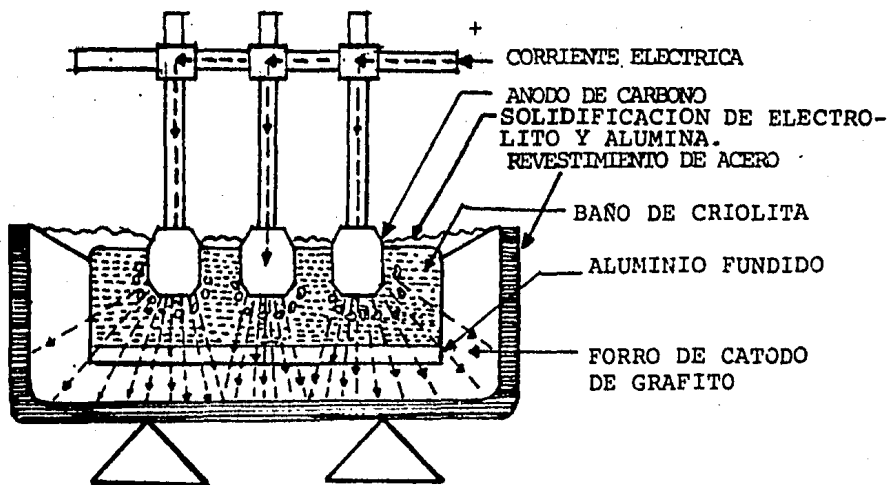


FIGURA 1. Celda electrolítica usada para producir aluminio.

El óxido de aluminio es disuelto en un baño de criolita fun

dida ( $\text{NaAlF}_6$ ) y en grandes hornos electrolíticos, llamados "tin-  
nas".

Estas tinas están formadas de una coraza de fierro de apro-  
ximadamente ocho metros de largo, dos y medio de ancho y uno de  
profundidad, recubiertas en su interior con bloques de carbón.  
Por medio de un ánodo de carbón, de aproximadamente siete metros de largo,  
uno y medio de ancho y uno de altura, que está suspendido encima de cada ti-  
na, se hace pasar una corriente eléctrica de bajo voltaje y alto amperaje,  
hacia el fondo de la tina que sirve de cátodo, a través de un baño de crio-  
lita fundida.

Esta energía eléctrica disocia la alúmina en aluminio fundido que se  
deposita en el fondo de la tina y el oxígeno que se combina con el carbón  
del ánodo se elimina en forma de bióxido de carbono.

La capa de aluminio fundido depositada en el fondo de la tina, se con-  
vierte de esta manera en el cátodo ó polo negativo.

Este proceso es continuo pues se va agregando alúmina para reemplazar  
la que se ha consumido por la reducción.

El calor generado por la resistencia que ofrece el baño de criolita al  
paso de la corriente eléctrica, mantiene ésta fundida y a una temperatura  
de  $980^\circ\text{C}$ , lo que permite que las cargas nuevas de alúmina sean disueltas --  
con mayor facilidad.

El aluminio se extrae periódicamente de las tinas por medio de sifones,  
hacia crisoles y se transporta a los hornos de retención. Este metal fundi-  
do puede ser embarcado al fabricante en crisoles especialmente aislados que  
logran mantener la temperatura aproximadamente de  $800^\circ\text{C}$ .

El aluminio obtenido de las tinas electrolíticas alcanzan una pureza  
de 99.5% y el 0.5% restante esta formada por elementos que no pueden ser se-  
parados por este proceso.

Para fabricar una tonelada de aluminio se necesitan 4 toneladas de bauxita, o sea dos toneladas de aluminio, 17 000 Kwh., 450 kg de coque de petróleo y 100 kg. de criolita, en los hornos electrolíticos.

Existe un proceso para producir aluminio con una pureza de 99.99%, este proceso de refinación se denomina CADEU-PECHINEY y es utilizado para casos - en que sea necesaria tal pureza.

### 2.3 HISTORIA DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO.

Las investigaciones que han provocado el desarrollo del aluminio ilustran de una manera particular las influencias respectivas de la composición y de los tratamientos térmicos sobre las propiedades de los metales y aleaciones.

Parece bastante cierto que Davy, en 1807, obtuvo una aleación aluminio-hierro, pero el mal funcionamiento del proceso y la pequeña cantidad de aleación obtenida no permiten determinar las propiedades de la aleación.

En 1825, Oerted prepara una amalgama de la que retira una pequeña masa de Al impuro y en Alemania, Woehler, en 1827, obtiene Al en forma de polvo gris.

Es en 1854, cuando Saint-Claire Deville, fabrica un aluminio suficientemente puro como para que puedan conocerse las propiedades fundamentales del metal. Una vez obtenido el metal relativamente puro, los estudios de las aleaciones comienzan a dar resultados interesantes.

En 1856, Sainte-Claire Deville, produce una aleación Al-Si.

#### 2.3.1 LOS PRECURSORES DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO.

En 1905, se anuncia el primer fenómeno de temple de las aleaciones de aluminio, escribiendo Konrad Claessen: "Experiencias muy completas han conducido a hacer del temple un procedimiento generalmente aplicable a las aleaciones de Al, obteniéndose en este sentido un aumento de la resistencia y de la ductilidad de la aleación, por medio de un enfriamiento rápido, a partir

de una temperatura característica físicamente bien definida, hasta una temperatura más baja". Para una aleación de 4% de cobre, colada en coquilla, Claessen indica una temperatura de temple de  $525 \pm 25^\circ\text{C}$ .

Son los trabajos de Alfred Wilm (1869-1937), desde 1906, concretados por sus patentes y publicaciones de 1910 y 1911, los que evidencian el interés del tratamiento térmico de ciertas aleaciones de aluminio.

La patente de Wilm de 1910, trata del procedimiento para la mejora de las aleaciones metálicas y en particular del aluminio que contiene magnesio, caracterizándose por someterse las aleaciones, después de finalizado el tratamiento térmico, a un nuevo calentamiento a temperatura superior a  $420^\circ\text{C}$  y después de haber sufrido, si fuera necesario, algunas ligeras deformaciones, se les deja durante un cierto tiempo para producir la mejora del material.

Resulta bastante paradójico constatar que el origen del tratamiento térmico de las aleaciones de aluminio se encuentre precisamente en la familia de aleaciones Al-Mg que no es muy sensible a estos tratamientos y que los primeros resultados de Wilm sobre el temple y la maduración natural -- sean debidos a la presencia del silicio como impurezas. No se menciona la presencia de Cu.

En 1911, Will precisa la influencia del temple sobre la aleación Al - 3.5% de Cu - 0.5% de Mg y, escribe "La aleación queda blanda después del temple, pero al cabo de unas horas la dureza aumenta, rápidamente al principio y después cada vez más lentamente". La temperatura de temple de  $500^\circ\text{C}$  está indicada, así como el aumento de resistencia y de alargamiento por maduración natural; la presencia de Mn aumenta la dureza; el Ni aumenta la tenacidad; Wilm concluye: " La gran resistencia que se puede dar por este tratamiento a estas aleaciones, les dá la posibilidad de múltiples aplicaciones militares y aeronáuticas. Una de estas aleaciones es la como



cida en el comercio con el nombre de DURALUMINIO y parece que está llamada a tener cierto porvenir".

#### 2.4 PRINCIPALES ELEMENTOS ALEANTES.

El aluminio metálico, que se produce mediante los modernos procesos de reducción, se obtiene en las tinas electrolíticas, con un contenido de pureza mínima de 99.5%. El 0.5% restante consiste de residuos de otros elementos que el proceso de reducción no pudo remover. De este Aluminio básico puede producirse una gran familia de aleaciones. Un proceso de refinación puede producir aluminio de alta pureza, hasta 99.99%, que se utiliza como catalizador en la producción de gasolina de alto octanaje y para piezas de joyería. En forma de "hoja" se emplea vastamente en la industria electrónica.

Sin embargo, la mayor parte del aluminio se emplea en forma de aleaciones. A continuación enlistamos algunos de los principales metales aleantes y sus efectos sobresalientes.

##### COBRE.

Hace a las aleaciones tratables térmicamente, e incrementa la resistencia y la dureza, y facilita el mecanizado con herramientas de corte y disminuye la resistencia a la corrosión.

##### MAGNESIO.

Incrementa la resistencia a la tensión, la resistencia a la corrosión en atmósferas marinas, la dureza y facilidad para soldarse.

##### MANGANESO.

Incrementa la resistencia mecánica y mejora la resistencia a la corrosión.

##### SILICIO.

Hace descender el punto de fusión, incrementa la facilidad para fundirse y en combinación con el magnesio, produce aleaciones tratables térmica-

mente, con una buena ductilidad y resistencia a la corrosión.

#### ZINC.

Tiende a aumentar la dureza y, en combinación con reducidos porcentajes de magnesio, produce aleaciones tratables térmicamente, con un alto grado de resistencia, es soluble en el aluminio a 382°C, puede llegar a 83%.

Además de los elementos aleantes arriba mencionados, pueden agregarse muchos otros elementos metálicos, para mejorar las propiedades de los grupos básicos de las aleaciones ó para proporcionar propiedades especiales.

Ejemplos representativos incluyen:

- a) El bismuto, el plomo y el estaño, imparten una mejor maquinabilidad.
- b) El boro ayuda a incrementar la conductividad eléctrica.
- c) El berilio mejora las características de soldadura y vaciado.
- d) El cromo, el zirconio y el vanadio se utilizan para producir efectos especiales.
- e) El níquel imparte una mayor resistencia a temperaturas elevadas.
- f) El titanio ejerce un poderoso efecto de refinamiento de grano, lo que mejora la resistencia y la ductilidad, y sirve para afinar la estructura cristalina.

#### 2.5 SISTEMA DE DESIGNACION DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO.

La designación del aluminio y de sus aleaciones en estado de forja fué normalizada por la Aluminum Association en 1954. Esta designación se realiza mediante cuatro números dígitos de los cuales, el primero indica el tipo de aleación, el segundo la modificación de la aleación original ó los límites de impurezas, y los últimos dos indica el ó las aleaciones de aluminio de que se trate ó la pureza del aluminio.

El cero designa la aleación original y los números dígitos del 1 al 9 expresan distintas modificaciones de la aleación.

La siguiente tabla enlista al grupo de las aleaciones.

TABLA 1.- Grupo de las aleaciones de aluminio.

| Principal elemento de aleación.               |      |
|---|------|
| Aluminio de grado de pureza 99.00% ó superior | 1XXX |
| Cobre   | 2XXX |
| Manganeso                                     | 3XXX |
| Silicio                                       | 4XXX |
| Magnesio                                      | 5XXX |
| Magnesio y Silicio                            | 6XXX |
| Cinc  | 7XXX |
| Otros elementos                               | 8XXX |
| Serie no utilizadas                           | 9XXX |

Y a continuación enlistamos en la tabla 2, la designación numérica del aluminio y sus aleaciones según UNE, debido a que en el siguiente capítulo nos estaremos refiriendo también a estas normas y con ello estaremos mejor ubicados.

TABLA 2.—Designación numérica del aluminio y sus aleaciones según UNE 38 001 1.ª R.

|              |   |
|--------------|---|
| Serie L-1xxx | Metales ligeros (*) y aleaciones madre.       |
|              | Grupo L-11xx Aluminio.                        |
|              | Grupo L-18xx Aleaciones madre base Al.        |
| Serie L-2xxx | Aluminio y aleaciones de aluminio para moldeo |
|              | Grupo L-20xx Aluminio.                        |
|              | Grupo L-21xx Aleaciones Al-Cu.                |
|              | Grupo L-23xx Aleaciones Al-Mg.                |
|              | Grupos L-25xx y L-26xx Aleaciones Al-Si.      |
|              | Grupo L-27xx Aleaciones Al-Zn.                |
|              | Grupo L-29xx Aleaciones Al-Sn.                |
| Serie L-3xxx | Aluminio y aleaciones de aluminio para forja. |
|              | Grupo L-30xx Aluminio.                        |
|              | Grupo L-31xx Aleaciones Al-Cu.                |
|              | Grupo L-33xx Aleaciones Al-Mg.                |
|              | Grupo L-34xx Aleaciones Al-Mg-Si.             |
|              | Grupo L-35xx Aleaciones Al-Si.                |
|              | Grupo L-37xx Aleaciones Al-Zn.                |
|              | Grupo L-38xx Aleaciones Al-Mn.                |
|              | Grupo L-39xx Aleaciones Al-Sn.                |

\*) Lingotes u otras formas que no sean piezas moldeadas o productos forjados.

### 2.5.1 ALEACIONES DE ALUMINIO SERIE 1000.

Estas aleaciones están formadas básicamente por aluminio puro que varía de 99.3% al mínimo hasta 99.7%.

El aluminio de alta pureza tiene propiedades importantes tales como la facilidad de adquirir formas diversas y entre sus aplicaciones en este estado están en conductores eléctricos, reflectores, para fines decorativos, intercambiadores de calor y aplicaciones arquitectónicas.

El metal, de más baja pureza, con hierro y cobre agregados en caso necesario, es usado para producir la aleación 1100, que es la aleación de aluminio de norma comercial.

Es relativamente blanda y dúctil, con excelente formabilidad y soldabilidad.

La aleación 1050 con contenido de 0.25% Si, 0.40% Fe, 0.05% Cu, se aplica en tubos enrollados y extruidos, la aleación 1060 (0.25% Si 0.35% Fe, 0.05% Cu) tiene su aplicación en equipo químico y tanques de ferrocarril, la aleación 1100 (1.0% Si + Fe, 0.05% hasta 0.20% Cu) son aplicables a hojas delgadas de metal para capacitores y manijas, la 1230 (0.7% SiFe, 0.10% Cu) tiene su aplicación en cubiertas para placas y láminas y la aleación 1350 (0.10% Si, 0.40% Fe, 0.05% Cu) se usa en conductores eléctricos.

### ESTRUCTURA

La estructura del aluminio serie 1XXX es caracterizada por una matriz de aluminio relativamente pura. Los constituyentes insolubles en el aluminio (comercialmente puro) son principalmente hierro y silicio. La cantidad de constituyentes está en función de la aleación y su distribución depende del tipo de fabricación.

### PROPIEDADES MECANICAS

Las propiedades mecánicas del Al comercialmente puro están enlistadas en la tabla 3. Los esfuerzos de tensión de aluminio recocido de 99.99% es cerca de 4.5 Kg/mm<sup>2</sup> con un límite de cedencia de 1.05 Kg/mm<sup>2</sup> y un alargamiento del 50%. El aluminio superpuro no permanece en la condición de severamente endurecido por deformación a temperatura ambiente y probablemente recristalizará a medida que las impurezas se incrementa uniformemente. La resistencia del aluminio comercialmente puro se incrementa alcanzando un máximo en la serie 1100. La aleación muy dura 1100 tiene una resistencia a la tracción de cerca de 16.8 Kg/mm<sup>2</sup>, con un límite de cedencia de 15.4 Kg/mm<sup>2</sup> y un alargamiento de únicamente 5%.

Tabla 3. Propiedades mecánicas típicas del aluminio comercialmente puro.

| ALEACION | TEMPERATURE | RESISTENCIA A LA TENSION<br>Psi<br>(Kg/mm <sup>2</sup> ) | LIMITE DE CE-<br>DENCIA<br>Psi<br>(Kg/mm <sup>2</sup> )<br>* | ALARGAMIENTO EN 2 PULGADAS<br>(50.8 mm) | DUREZA<br>BHN<br>** | RESISTENCIA AL CORTE<br>Psi<br>(Kg/mm <sup>2</sup> ) | LIMITE DE FATIGA<br>Psi<br>(Kg/mm <sup>2</sup> )<br>*** |
|----------|-------------|--|--|---|---------------------|--|---|
| 1199     | O           | ( 4.5 )  | ( 1.055 )  | 50                                      |                     |  |   |
|          | H18         | ( 11.9 )   | ( 11.25 )  | 5                                       |                     |  |   |
| 1180     | O           | ( 6.3 )  | ( 2.11 )   | 45                                      |                     |  |   |
|          | H18         | ( 12.6 )   | ( 11.9 )   | 5                                       |                     |  |   |
| 1060     | O           | ( 7 )  | ( 2.8 )  | 43                                      | 19                  | ( 4.9 )  | ( 2.1 )   |
|          | H14         | ( 9.8 )  | ( 9.1 )  | 12                                      | 26                  | ( 6.3 )  | ( 3.5 )   |
|          | H18         | ( 13.3 )   | ( 12.66 )  | 6                                       | 35                  | ( 7.7 )  | ( 4.57 )  |
| 1145     | O           | ( 7.7 )  | ( 3.5 )  | 40                                      |                     | ( 5.6 )  |   |
|          | H18         | ( 14.7 )   | ( 11.9 )   | 5                                       |                     | ( 8.9 )  |   |
| 1100     | O           | ( 9.1 )  | ( 3.5 )  | 35                                      | 23                  | ( 6.3 )  | ( 3.5 )   |
|          | H18         | ( 12.6 )   | ( 11.9 )   | 9                                       | 32                  | ( 7.7 )  | ( 4.9 )   |
|          | H18         | ( 16.8 )   | ( 15.48 )  | 5                                       | 44                  | ( 9.1 )  | ( 6.3 )   |

\* Rendimiento en la resistencia, 0.2% equivalente.

\*\* Carga 500 Kgr. bola de 10 mm

\*\*\* Basada en 500 millones de ciclos usando un tipo R.R. More

### 2.5.2 ALEACIONES DE ALUMINIO/COBRE SERIE 2000.

La figura 2 representa la región del diagrama de equilibrio aluminio-cobre, rica en aluminio, y en ella vemos que la solubilidad máxima del cobre en aluminio es de 5.65%, a la temperatura eutéctica de 548°C, disminuyendo hasta 0.45% a 300°C. Por consiguiente, las aleaciones cuyo contenido en cobre este comprendido entre 2.5% y 5% podrán tratarse térmicamente, aumentando su dureza y posteriormente por un proceso de envejecimiento.

La fase  $\theta$  que aparece en el diagrama, es una fase intermedia cuya composición responde aproximadamente al compuesto  $\text{CuAl}_2$  (aluminio de cobre). El tratamiento de disolución se realiza calentando la aleación hasta alcanzar la región monofásica Kappa ( $\text{K}$ ) y enfriándola a continuación rápidamente. Durante el proceso posterior de envejecimiento artificial ó natural -- precipitará la fase  $\theta$ , dando lugar a un aumento de la resistencia de la aleación.

Estas aleaciones pueden contener pequeñas cantidades de silicio, hierro, magnesio, manganeso, cromo y zinc.

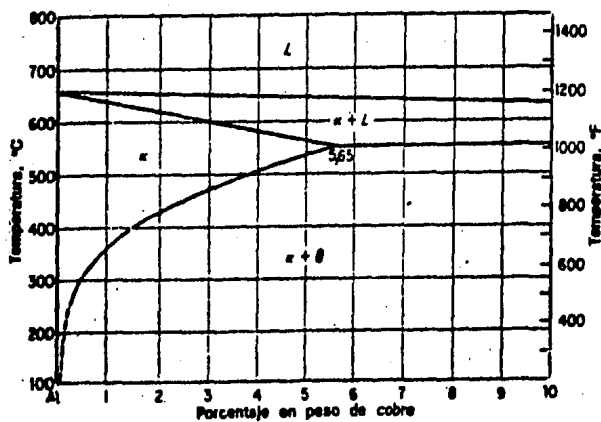


FIGURA 2.-Diagrama de equilibrio cobre-aluminio. Región rica en aluminio. (Tomado del "Metals Handbook" edición de 1948, pág. 1160, American Society for Metals, - Metals Park, Ohio.)

Las tres aleaciones cobre-aluminio de forja que han alcanzado más difusión son las 2014, 2017 y 2024. La más antigua - de todas las aleaciones de aluminio tratables térmicamente es el duraluminio (2017), la cual contiene 4% de cobre y es muy utilizada en la industria aeronáutica para remachar. Como esta aleación es de envejecimiento natural se evita ésta, refrigerando el material después del tratamiento de disolución, con lo cual la aleación queda constituida por una sola fase y presenta una ductilidad tan grande que las cabezas de los roblones se forman con toda facilidad. Al enfriarse, posteriormente el material, a la temperatura ambiente la fase  $\theta$  precipita en forma de pequeñas partículas submicroscópicas, dando lugar a un aumento de la dureza y de la resistencia.

La aleación 2014 contiene más cobre y magnesio que la -- 2017 y puede someterse a un proceso de envejecimiento artificial. En este estado la aleación 2014 tiene más resistencia a la tracción y un límite práctico de elasticidad más elevado que la aleación 2017. Se emplea para la fabricación de piezas forjadas para trabajos fuertes, bastidores de camiones y armaduras de aviones.

La aleación 2024, constituida por un 4.5% de cobre y un 1.5% de magnesio, es de las aleaciones aluminio-cobre de envejecimiento natural, la que presenta una resistencia más elevada. Con relación a la aleación 2017, es más difícil de fabricar por su mayor contenido de magnesio. Pero sometiénolo a una deformación en frío y a un proceso de envejecimiento se obtienen los máximos valores del límite práctico de elasticidad que se pueden alcanzar en chapas aleadas de gran resistencia.



Algunas de las aplicaciones típicas son: estructuras de aviones, roblones, artículos de ferretería, ruedas de camión y tornillería. Para la fabricación de piezas que han de estar sometidas a temperaturas elevadas, como son culatas de los cilindros de los motores forjados y con los pistones, se ha desarrollado una aleación aluminio-cobre con un 2% de níquel (2218).

La única aleación binaria aluminio-cobre de moldeo es la 195, la cual contiene un 4% de cobre. Sometida al tratamiento térmico adecuado, presenta una combinación excelente de resistencia y ductilidad. Esta aleación se utiliza para la fabricación de volantes, cajas de los puentes traseros de los automóviles, ruedas de autobuses y aviones

Entre las aleaciones de moldeo hay varias, tales como las 112, 113 y 212, que contienen un 8% de cobre aproximadamente, pudiendo entrar también en su composición cantidades apreciables y controladas de silicio, así como hierro y zinc. El silicio aumenta la fluidez, por lo que las aleaciones 113 y 212 son utilizadas frecuentemente para la obtención de perfiles --delgados fundidos, tales como cajas, cubrejuntas y pistones de frenos hidráulicos.

La serie de aleaciones de moldeo, clasificada como aleaciones de aluminio-cobre-silicio, y entre las cuales podemos citar la aleación 85, 108, 319 y 380, contienen menos de un 5% de cobre y de 3 a 8% de silicio.

El cobre da lugar a una resistencia más elevada y a unas características de maquinabilidad mejores que las de las aleaciones formadas solo por aluminio y silicio, siendo el silicio el que proporciona mejores características de colada y estan--

queidad bajo la prueba de presión que las aleaciones aluminio-cobre. Entre sus aplicaciones se encuentran soportes, bastidores de máquinas de escribir, tubos, cuerpos de válvulas, paletas de engrase y depósitos de gasolina y aceite.

### 2.5.3 ALEACIONES DE ALUMINIO/MANGANESO SERIE 3000.

La figura 3 muestra la región del diagrama de equilibrio aluminio-manganeso, rica en aluminio, en la cual se observa que la solubilidad máxima del manganeso en la solución sólida  $\alpha$  es de --- 1.82% a la temperatura eutéctica de 658°C.

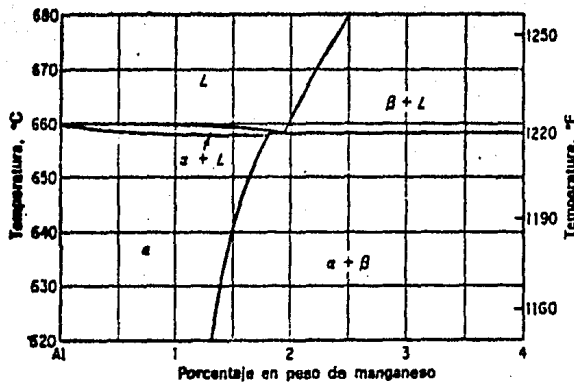


FIGURA 3.- Diagrama de equilibrio aluminio-manganeso. Región rica en aluminio. (Tomado del "Metals Handbook", edición de 1948, pág. 1163, American Society for Metals, Metals Park, Ohio.)

Aunque la solubilidad decrece al disminuir la temperatura las aleaciones pertenecientes a este grupo por lo general no -

se endurecen por envejecimiento. Como la solubilidad del manganeso es limitada, este elemento no se utiliza como constituyente principal de la aleación en ninguna de las aleaciones de moldeo, empleándose únicamente en algunas aleaciones de aluminio para forja.

Entre las aleaciones más conocidas de este grupo está la 3003, con (1.2% Mn, .12% Cu), la cual presenta una buena conformabilidad, una resistencia a la corrosión muy buena y funde con relativa facilidad. Entre sus aplicaciones típicas, podemos señalar, utensilios de cocina, equipo de almacenamiento y manejo de productos químicos y alimenticios, depósitos de gasolina y aceite, recipientes a presión y tuberías. La aleación 3004 (1.2% Mn, 1.0% Mg) tiene aplicaciones tales como placas de metal trabajadas, tanques de almacenamiento, recipientes a presión. La aleación 3005 (1.2% Mn, 0.40% Mg) que tiene su aplicación en productos arquitectónicos, señales de carretera, canales de ebanistería, y la aleación 3105 (0.5% Mn, 0.50Mg) - que tiene las mismas aplicaciones que la 3005.

#### PROPIEDADES MECANICAS

La tabla 4, enlista las propiedades mecánicas de las aleaciones aluminio-manganeso y las aleaciones de aluminio-manganeso-magnesio. La resistencia de la aleación 3003 son cerca de 2.1 - 2.8 Kgr/mm<sup>2</sup> más alto que la aleación 1100.

La aleación 3004 es todavía más resistente, debido a los efectos del magnesio en solución sólida, así que en condiciones de recocido tiene resistencias a la tensión de 18.29 Kgr/mm<sup>2</sup>.

Algunas aleaciones con resistencias bajas tales como 3005 y 3105 fueron introducidos en 1953 y 1960 respectivamente. Estas aleaciones tienen combinaciones deseables de resistencia, formabilidad y resistencia a la corrosión para aplicaciones en los edificios.

Tabla 4. Propiedades mecánicas de las aleaciones aluminio manganeso y aluminio-manganeso-magnesio no tratables térmicamente.

| ALEACION | TEMPLE | RESISTENCIA A LA PRESION<br>Psi<br>(Kg/mm <sup>2</sup> ) | LIMITE DE CENDENCIA<br>Psi<br>(Kg/mm <sup>2</sup> ) | ALARGAMIENTO EN % EN | DUREZA BHN | RESISTENCIA AL CORTE<br>Psi<br>(Kg/mm <sup>2</sup> ) | LIMITE DE FATIGA<br>Psi<br>(Kg/mm <sup>2</sup> ) |
|----------|--------|--|---|----------------------|------------|--|--|
|          |        |  | *   |                      | **         |  | ***  |
| 3003     | 0      | (11.25)  | ( 4.2 )   | 30                   | 28         | ( 7.7)   | ( 4.3 )  |
|          | H14    | (15.4 )  | (14.7 )   | 8                    | 40         | ( 9.8)   | ( 6.3 )  |
|          | H18    | (20.4 )  | (18.9 )   | 4                    | 55         | (11.2)   | ( 7.0 )  |
| 3004     | 0      | (18.2 )  | ( 7.03 )  | 20                   | 45         | (11.2)   | ( 9.85)  |
|          | H34    | (24.6 )  | (20.4 )   | 9                    | 63         | (12.6)   | (11.2 )  |
|          | H38    | (28.8 )  | (25.3 )   | 5                    | 77         | (14.7)   | (12.6 )  |
| 3005     | 0      | (13.3 )  | ( 5.629)  | 25                   | ---        | ( 8.4)   | -  |
|          | H18    | (24.6 )  | (23.22 )  | 4                    | ---        | (12.6)   | -  |
| 3105     | H25    | (18.29)  | (16.88 )  | 8                    | ---        | (11.2)   | -  |

\* Rendimiento en la resistencia 0.2 equivalente.

\*\* Carga 500 Kgr. bola de 10 mm.

\*\*\* Basada en 500 millones de ciclos usando un tipo R.R. More.

#### 2.5.4 ALEACIONES DE ALUMINIO/SILICIO - SERIE 4000.

La figura 4 representa la zona rica en aluminio del diagrama aluminio-silicio, observándose que la solubilidad máxima del silicio en la solución sólida es de 1.65% a la temperatura eutéctica de 577°C. Aunque la línea de solubilidad del solidus muestra que ésta decrece al disminuir la temperatura, estas aleaciones generalmente no responden al tratamiento térmico, la aleación 4032 para forja, la cual contiene un 12.5% de silicio, presenta buena forjabilidad y un coeficiente de dilatación térmica pequeño, utilizándose para la fabricación de pistones forjados -

en la industria de la automoción.

Las aleaciones de aluminio-silicio para moldeo presentan una colabilidad y resistencia a la corrosión excelentes. Las aleaciones 13 (con un 12% de silicio) y 43 (con un 5% de silicio) se utilizan para la fabricación de piezas fundidas de forma complicada en industrias de productos alimenticios y en accesorios marinos.

Se utilizan para usos arquitectónicos. Se anodizan rápidamente para dotarlos de coloraciones y que van del gris al negro.

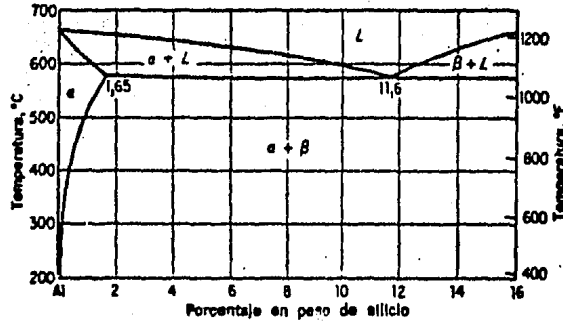


FIGURA 4.- Diagrama de equilibrio aluminio-silicio. Región rica en silicio. (Tomado del "Metals Handbook", edición de 1948, pág. 1166; American Society for Metals, Metals Park, Ohio.)

#### 2.5.5 ALEACIONES DE ALUMINIO/MAGNESIO - SERIE 5000.

Las aleaciones binarias aluminio-magnesio son la base para la serie 5XXX de las aleaciones de aluminio no tratables térmicamente. La figura 5 muestra la región del diagrama de equilibrio aluminio-magnesio, rica en aluminio.

Aunque la línea de solubilidad de solidus presenta una --

disminución considerable de la solubilidad del magnesio en el aluminio al disminuir la temperatura, la mayor parte de las aleaciones comerciales para forja de este grupo contienen menos de un 5% de magnesio, y como además su contenido en silicio es bajo, no responden al tratamiento térmico.

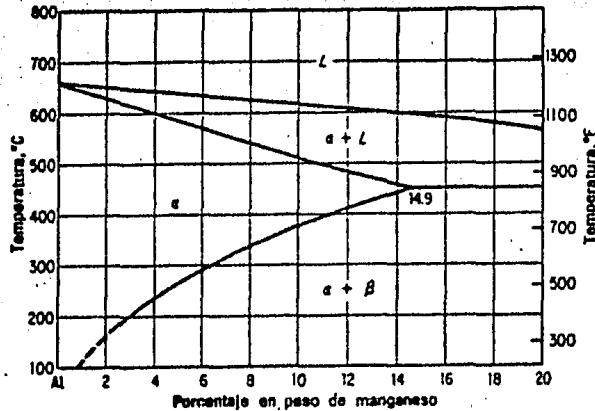


FIGURA 5.- Diagrama de equilibrio aluminio-magnesio. Región rica en aluminio. (Tomado del "Metals Handbook", edición de 1948, pág. 1163 American Society for Metals, Metals Park, Ohio.).

También se observa del diagrama que aún cuando el magnesio tiene una importante solubilidad sólida en el aluminio (14.9% Mg a 451°C) y ésta disminuye con temperaturas decrecientes. Las aleaciones de aluminio-magnesio muestran notable endurecimiento por precipitación a concentraciones menores que 7% Mg.

Las aleaciones para forja de esta serie se caracterizan por su buena soldabilidad y resistencia a la corrosión y por

su resistencia moderada.

La aleación 5005 (con 0.8% Mg) se emplean para la fabricación por extrusión de piezas utilizadas en la construcción de edificios, como conductores eléctricos. La aleación 5050 (con 1.2% Mg) se utiliza para la fabricación de tuberías y en la industria de la automoción para las conducciones de gas y aceite, la aleación 5052 (con 2.5% Mg y 0.25% Cr) se emplean para la canalización de aceite y combustible de los aviones, la aleación 5056 (0.12% Mn, 5.1% Mg, 0.12% Cr) se utiliza para la construcción de telas metálicas ó de protección contra los insectos, de revestimiento de cables y de los roblones empleados en las aleaciones de magnesio. La aleación 5083 (0.7% Mn, 4.45% Mg, 0.15% Cr) y la aleación 5086 (0.45% Mn, 4.0% Mg, 0.15% Cr) se emplean en las estructuras navales y soldadas, equipo de transporte, recipientes a presión soldados, antenas de televisión, blindajes, etc., la aleación 5154 (3.5% Mg, 0.25% Cr) se aplica en estructuras soldadas, tanques de almacenamiento, recipientes a presión. La aleación 5361 (0.12% Mn, 5.0% Mg, 0.12% Cr) se aplica en alambres y electrodos, la aleación 5454 (0.8% Mn, 2.7% Mg, 0.12% Cr) se aplica a estructuras soldadas, recipientes, servicio de marina y tuberías, la aleación 5456 (0.8% Mn, 5.1% Mn, 0.12% Cr) se utiliza en estructuras fuertemente soldadas, tanques de almacenamiento, recipientes a presión y servicio naval.

#### PROPIEDADES MECANICAS

Las propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio-magnesio de forja no tratables térmicamente son enlistadas en

la tabla 5.

La resistencia última a la tracción de las aleaciones de aluminio-magnesio comerciales en condiciones de recocido andan entre 12.66 Kgr/mm<sup>2</sup> para la aleación 5050-0, hasta más de 31.6 Kgr/mm<sup>2</sup> para la aleación 5456-0. Las aleaciones 5083-0 y 5086-0 tienen resistencias más bajas (de 29.5 Kgr/mm<sup>2</sup> y 26.74 Kgr/mm<sup>2</sup> respectivamente) que la aleación 5456-0. Los productos de forja de las aleaciones de aluminio-magnesio son siempre aprovechables en recocido o temple, y usualmente en el temple H3. El temple H2 es generalmente usado para productos endurecidos por deformación, ya que el temple H1 no es usualmente estable a temperatura ambiente. El temple H3 produce propiedades estables con alargamientos mayores y uniformes y mejora las propiedades de formado.

Aunque las aleaciones de aluminio-magnesio son clasificadas como no tratables térmicamente la cantidad de magnesio soluble a temperaturas de recocido para las aleaciones Al-Mg con más de 4% de Mg (tales como la 5083, 5056 y 5456) es más alta de el retenido en la aleación sólida a temperatura ambiente. Como resultado, si estas aleaciones son severamente endurecidas por deformación, por largo tiempo a temperatura ambiente la precipitación de Mg<sub>2</sub>Al ocurrirá a lo largo de las bandas deslizantes. También si estas aleaciones son severamente expuestas a temperaturas elevadas en la condición de recocido, la precipitación ocurrirá a lo largo de los límites de grano. Esta precipitación crece ó produce que estas aleaciones sean susceptibles a ataque intergranular y corrosión bajo tensión en medios ambientes corrosivos.



Tabla 5. Propiedades mecánicas típicas de las aleaciones de Aluminio/Magnesio de forja no tratables térmicamente.

| ALEACION | TEMPLE | RESISTENCIA A LA TENSION<br>Psi<br>(Kg/mm2) | LIMITE DE CE-<br>DENCIA<br>Psi<br>(Kg/mm2)<br>* | ALARGAMIENTO EN 2 PULGADAS<br>(50.8 mm) | DUREZA<br>BHN<br>** | RESISTENCIA AL CORTE<br>Psi<br>(Kg/mm2) | LIMITE DE FATIGA<br>Psi<br>(Kg/mm2)<br>*** |
|----------|--------|---|---|---|---------------------|---|--|
| 5005     | 0      | (12.6 )                                     | ( 4.2 )   | 30                                      | 30                  | ( 7.74 )                                | -  |
|          | H14    | (16.1 )                                     | (15.4 )   | 6                                       | 41                  | ( 9.85 )                                | -  |
|          | H34    | (16.1 )                                     | (14.0 )   | 8                                       | 41                  | ( 9.85 )                                | -  |
|          | H18    | (20.4 )                                     | (19.7 )   | 4                                       | 51                  | (11.25)                                 | -  |
|          | H38    | (20.4 )                                     | (18.99)   | 5                                       | 51                  | (11.25)                                 | -  |
| 5050     | 0      | (14.7 )                                     | ( 5.62 )  | 24                                      | 36                  | (10.5 )                                 | ( 8.4 )                                    |
|          | H34    | (19.7 )                                     | (16.88)   | 8                                       | 53                  | (12.6 )                                 | ( 9.14 )                                   |
|          | H38    | (22.5 )                                     | (20.40)   | 6                                       | 63                  | (14.07)                                 | ( 9.85 )                                   |
| 5052     | 0      | (19.70)                                     | ( 9.14 )  | 25                                      | 47                  | (12.6 )                                 | (11.25 )                                   |
|          | H34    | (26.74)                                     | (21.8 )   | 10                                      | 68                  | (14.77)                                 | (12.66 )                                   |
|          | H38    | (29.55)                                     | (26.03)   | 7                                       | 77                  | (16.88)                                 | (14.07 )                                   |
| 5056     | 0      | (29.55)                                     | (15.48)   | 35                                      | 65                  | (18.29)                                 | (14.07 )                                   |
|          | H18    | (44.33)                                     | (41.51)   | 10                                      | 105                 | (23.92)                                 | (15.58 )                                   |
|          | H38    | (42.22)                                     | (35.18)   | 15                                      | 100                 | (22.5 )                                 | (15.48 )                                   |
| 5082     | H19    | (40.1 )                                     | (37.99)   | 4                                       |                     |   |  |
| 5083     | 0      | (29.55)                                     | (14.77)   | 22                                      | 67                  | (17.59)                                 | (15.48 )                                   |
|          | H12    | (30.25)                                     | (16.18)   | 20                                      | 70                  | (17.59)                                 | (15.48 )                                   |
|          | H321   | (32.37)                                     | (23.22)   | 16                                      | 82                  | (19.70)                                 | (15.48 )                                   |
|          | H323   | (33.07)                                     | (25.33)   | 10                                      | 84                  | (18.99)                                 |  |
|          | H343   | (36.59)                                     | (28.85)   | 8                                       | 92                  | (21.11)                                 |  |
| 5086     | 0      | (26.74)                                     | (11.96)   | 22                                      | 60                  | (16.185)                                | (14.7 )                                    |
|          | H32    | (29.5 )                                     | (21.11)   | 12                                      |                     |   |  |
|          | H34    | (33.07)                                     | (26.03)   | 10                                      | 82                  | (19.7 )                                 | (16.185)                                   |
|          | H112   | (27.44)                                     | (13.37)   | 14                                      | 64                  | (16.18 )                                | (14.77 )                                   |
| 5154     | 0      | (24.62)                                     | (11.96)   | 27                                      | 58                  | (15.48 )                                | (11.9 )                                    |
|          | H34    | (29.55)                                     | (23.22)   | 13                                      | 73                  | (16.88 )                                | (13.3 )                                    |
|          | H38    | (33.77)                                     | (27.44)   | 10                                      | 80                  | (19.70 )                                | (14.7 )                                    |
|          |        | (24.62)                                     | (11.96)   | 25                                      | 63                  | (15.48 )                                | (11.96 )                                   |
| 5454     | 0      | (25.33)                                     | (11.96)   | 22                                      | 60                  | (16.18 )                                | (13.37 )                                   |
|          | H34    | (30.9 )                                     | (24.62)   | 10                                      | 81                  | (18.29 )                                | (14.77 )                                   |
|          |        | (25.33)                                     | (12.6 )   | 18                                      | 62                  | (16.18 )                                | -  |
|          | H311   | (26.74)                                     | (18.29)   | 14                                      | 70                  | (16.18 )                                |  |
|          | 0      | (31.16)                                     | (16.18)   | 24                                      | 70                  | (18.9 )                                 | (15.48 )                                   |
|          | H24    | (37.9 )                                     | (28.8 )   | 12                                      | -                   | (21.81 )                                |  |
|          | H112   | (31.6 )                                     | (16.8 )   | 22                                      | 70                  | (18.9 )                                 |  |
|          | H311   | (33.07)                                     | (23.2 )   | 18                                      | 75                  | (18.9 )                                 | (16.8 )                                    |
|          | H321   | (35.88)                                     | (26.03)   | 16                                      | 90                  | (21.1 )                                 | (16.18 )                                   |
|          |        | (35.88)                                     | (26.74)   | 10                                      | 90                  | (21.11 )                                |  |
|          |        | (39.40)                                     | (30.25)   | 8                                       | 94                  | (23.22 )                                |  |

\* Rendimiento en la resistencia, 0.2% equivalente.

\*\* Carga 500 Kgr. bola de 10 mm.

\*\*\* Basada en 500 millones de ciclos usando un tipo R.R. More.

Entre las aleaciones de aluminio-magnesio para moldeo se encuentra la aleación 214 (3.8% Mg), la 218 (8% de Mg) y la -- 220 (10% Mg). Las primeras dos se utilizan en la fabricación de equipo de manejo de los productos lácteos y alimenticios, - para accesorios de la industria naval y en las zapatas de los frenos. La 220 es la única del grupo cuyas propiedades mecánicas mejoran por un proceso de envejecimiento, lo que hace que sus características sean superiores a las del resto de las --- aleaciones de aluminio para moldeo. Sin embargo, las condicio nes de colabilidad de estas aleaciones son malas, por lo que - su fundición requiere gran experiencia.

#### 2.5.6 ALEACIONES DE ALUMINIO/MAGNESIO/SILICIO - SERIE 6000.

La combinación del magnesio (de 0.6 hasta 1.2%) y silicio (0.4% hasta 1.3%) en aluminio forman la base de la serie 6XXX de las aleaciones aluminio-magnesio-silicio de forja endurecidos por precipitación. En la mayor parte de los casos, el magnesio y el silicio están presentes en la aleación en cantida-- des, para nominalmente combinar formas de fase metaestables ó de compuestos intermetálicos  $Mg_2Si$  (siliciuro magnesico ó sili ciuro de magnesio), el cual a su vez forma un sistema eutéctico simple con el aluminio.

La región rica en aluminio del diagrama de equilibrio correspondiente a este sistema esta representado por la figura 6. Estas aleaciones alcanzan su máxima resistencia cuando se les somete a un proceso de envejecimiento artificial (estado T6), - que dá lugar a la precipitación del  $Mg_2Si$ .

El magnesio y el cromo son agregados en la mayoría de -

las veces a las aleaciones de la serie 6XXX para incrementar la resistencia y controlar el tamaño de grano.

El cobre también incrementa la resistencia de estas aleaciones pero si se presenta en cantidades arriba del 0,5% reduce su resistencia a la corrosión.

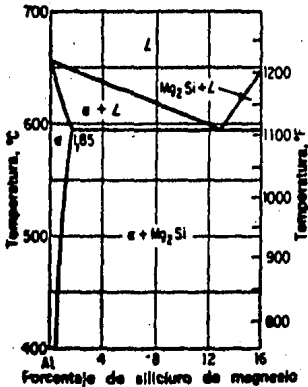


FIGURA 6.- Diagrama de equilibrio aluminio-silicio de magnesio. Región rica en aluminio. (Tomado del "Metals Handbook", edición de 1948, pág. 1246, American Society for Metals, Metals Park, Ohio.)

El grupo de las aleaciones para forja está integrado, entre otras, por las 6053, 6061 y 6063 en las cuales las cantidades en que se encuentran presentes normalmente el magnesio y el silicio son las necesarias para formar el siliciuro de magnesio.

La aleación 6053 fue descubierta en el año de 1930 y tiene un contenido de (2% Mg<sub>2</sub>Si y 0.25% Cr), a esta aleación le siguió la 6061 (1.5% Mg<sub>2</sub>Si - 0.25% Cr y 0.27% Cu) que tiene gran aplicación actualmente. La aleación 6063 contiene cerca de 1.0% Mg<sub>2</sub>Si.

Estas aleaciones se caracterizan por su excelente resisten

cia a la corrosión y por trabajarse con más facilidad que otras aleaciones endurecibles por tratamiento térmico.

Otra de las aleaciones de aluminio-magnesio-silicio que tienen más altas resistencias son las 6066 y 6070 con más contenido de silicio, fué introducido en 1960.

Una variación de la aleación 6063 es la 6463 que están -- siendo desarrolladas para mejorar sus características de acabado. En este tipo de aleación el hierro uniforme es mantenido bajo, así que la brillantez del aluminio será mejorada después de la anodización.

La aleación 6003 (1.2% Mg, 0.7% Si) se aplica en revestimientos de chapas (placas), la 6005 (0.5% Mg, 0.8% Si) en estructuras marinas y carros de ferrocarril, la 6009 (0.6% Mg, 0.8% Si, 0.38% Cu) y la 6010 (0.8% Mg, 1.0% Si, 0.5% Mn, 0.38 Cu) en chapas de automóviles, la 6053 (1.3% Mg, 0.7% Si, 0.25% Cr) en alambres y barras para remaches, la 6061 en estructuras de gran resistencia a la corrosión, estructuras marinas, vagones, muebles, tubería hidráulica, barandales de puentes, la 6063 en vagones, tubos, muebles, extrusiones arquitectónicas, la 6066 (1.1% Mg, 1.3% Si, 0.8% Mn, 0.9% Cu) en extrusiones de estructuras soldadas y forjadas, la 6070 (0.8% Mg, --- 1.4% Si, 0.7% Mn, 0.3% Cu) en estructuras soldadas de gran resistencia, la 6101 (0.6% Mg, 0.5% Si) en conductores de alta resistencia, la 6151 (0.6% Mg, 0.9% Si, 25% Cr) en máquinas y auto partes, la aleación 6162 (0.9% Mg, 0.6% Si) aplicable en

barras y estructuras de resistencia moderada, la 6201 (0.8% Mg, 0.7% Si) en conductores de corriente, la 6253 (1.2 Mg, 0.7% Si, 0.25% Cr, 2.0% Zn) aplicable en alambres y señales de carretera, la 6262 (1.0% Mg, 0.6% Si, 0.09% Cr, 0.27% Cu, 0.55% Pb, 0.55% Bi) en tornillos de máquinas (buena resistencia), - la 6463 (0.7 Mg, 0.4% Si, 0.15% Fe) aplicables a objetos extruidos y arquitectónicos.

#### PROPIEDADES MECANICAS

Las propiedades mecánicas de las aleaciones Al-Mg-Si para forja son enlistadas en la tabla 6. Estas aleaciones son de resistencia intermedias (de 31.6 hasta 40.1 Kgr/mm<sup>2</sup>) y aleada pueden endurecer por precipitación.

Las aleaciones de más alta resistencia de esta clase son la 6066 y 6070, las cuales tienen un exceso de silicio más allá del común de (1 a 2% Mg<sub>2</sub>Si).

La aleación 6061 tiene una resistencia a la tensión de 31.6 kgr/mm<sup>2</sup> en el temple T6 y contiene 1.6% pero la resistencia de la aleación 6063 es reducida hasta 24.6 kgr/mm<sup>2</sup> en el temple T6.

La baja resistencia de la aleación 6063 es necesaria para mayor extrudabilidad.

Las aleaciones de Al-Mg-Si son usualmente tratadas térmicamente en disolución hasta cerca de 520°C.

La aleación 6061 puede ser tratada térmicamente en disolución a más altas temperaturas que 520°C, siendo obtenidos algunos incrementos en la resistencia, ya que no todo el Mg<sub>2</sub>Si presente es soluble a esta temperatura. Como en el caso de las aleaciones Al-Cu-Mg, el enfriamiento rápido es requerido para obtener máxima resistencia.

Tabla 6. Propiedades mecánicas típicas de las aleaciones de Aluminio-Magnesio-Silicio, para forja tratables térmicamente.

| ALEACION | TEMPLE   | RESISTENCIA A LA TENSION<br>Psi<br>(Kg/mm <sup>2</sup> ) | LIMITE DE CENDENCIA<br>Psi<br>(Kg/mm <sup>2</sup> )<br>* | ALARGAMIENTO EN 2 PULGADAS<br>(50.8 mm) | DUREZA<br>BHN | RESISTENCIA AL CORTE<br>Psi<br>(Kg/mm <sup>2</sup> ) | LIMITE DE FATIGA<br>Psi<br>(Kg/mm <sup>2</sup> )<br>*** |
|----------|----------|--|--|---|---------------|--|---|
| 6053     | 0        | (11.25 )   | ( 5.6 )  | 35                                      | 26            | ( 7.74 )   | ( 5.6 )   |
|          | T6       | (26 )  | (22.5 )  | 13                                      | 80            | (16.18)  | ( 3.1 )   |
| 6063     | 0        | (12.6 )  | ( 5.6 )  | 25                                      | 30            | ( 8.44 )   | ( 6.33 )  |
|          | T4, T451 | (24.6 )  | (14.7 )  | 22                                      | 05            | (16.88)  | ( 9.1 )   |
|          | T6, T651 | (31.6 )  | (28.14 )   | 12                                      | 95            | (21.1 )  | ( 9.85 )  |
|          | T81      | (38.7 )  | (36.59 )   | 15                                      | -             | (22.5 )  | -   |
|          | T91      | (41.5 )  | (40.11 )   | 12                                      | -             | (23.2 )  | ( 9.85 )  |
|          | T913     | (47.14 )   | (46.44 )   | 10                                      | -             | (24.62)  | -   |
| 6066     | 0        | (15.48 )   | ( 8.44 )   | 18                                      | 43            | ( 9.85 )   | -   |
|          | T4, T451 | (36.59 )   | (21.11 )   | 18                                      | 90            | (20.40)  | -   |
|          | T6, T651 | (40.11 )   | (36.59 )   | 12                                      | 120           | (23.92)  | (11.2 )   |
| 6070     | 0        | (14.77 )   | ( 7.037 )  | 20                                      | 35            | ( 9.85 )   | ( 6.33 )  |
|          | T6       | (40.11 )   | (36.59 )   | 12                                      | 120           | (23.92)  | ( 9.85 )  |
| 6101     | T6       | (22.51 )   | (19.70 )   | 15                                      | 71            | (14.07)  | -   |
| 6151     | T6       | (33.7 )  | (30.25 )   | 17                                      | 100           | (22.5 )  | ( 8.4 )   |
| 6201     | T81      | (33.7 )  | -  | 6                                       | -             | -  | (10.5 )   |
| 6262     | T9       | (40.8 )  | (38.70 )   | 10                                      | 120           | (24.62)  | ( 9.14 )  |
| 6351     | T4, T451 | (29.55 )   | (18.9 )  | 20                                      | 60            | (15.48)  | ( 9.14 )  |
|          | T6, T651 | (34.48 )   | (30.25 )   | 13                                      | 95            | (20.40)  | ( 9.14 )  |
| 6951     | 0        | (11.25 )   | ( 4.2 )  | 30                                      | 28            | ( 7.74 )   | -   |
|          | T6       | (27.44 )   | (23.22 )   | 13                                      | 82            | (18.28)  | -   |

\* Rendimiento en la resistencia, 0.2% equivalente.

\*\* Carga de 500 Kgr, bola de 10 mm.

\*\*\* Basado en 500 millones de ciclos usando una máquina tipo R.R. More.

Las aleaciones de aluminio-magnesio-silicio para moldeo, 355, 356 y 360, la colabilidad, estanqueidad a la prueba de presión y resistencia a la tracción y a la corrosión, así como las características mecánicas después de tratadas térmicamente

próximas a las de las aleaciones de aluminio-cobre, hacen que sean utilizadas en la industria aeronáutica, en la fabricación de elementos de máquinas, herramientas y en la obtención de todo tipo de piezas fundidas.

#### 2.5.7 ALEACIONES DE ALUMINIO/ZINC - SERIE 7000.

La región rica en aluminio del diagrama de equilibrio, correspondiente a este sistema de aleación es el que se muestra en la figura 7 y en ella se observa la solubilidad del zinc en

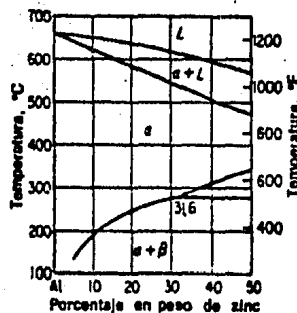


FIG. 7.- Diagrama de equilibrio aluminio-zinc. Región rica en aluminio. (Tomado del "Metals Handbook", edición de 1948, pág. 1167, American Society for Metals, Metals Park, Ohio).

aluminio, que a 275°C es de 31.6% y disminuye hasta 5.6% a una temperatura de 125°C.

Las combinaciones de 4 a 8% Zn y de 1 hasta 3% Mg en aluminio son usadas para producir la serie 7XXX de aleaciones de aluminio para forja tratables térmicamente. Algunas de estas

aleaciones desarrollan las propiedades más altas de resistencia de cualquier aleación comercial de base aluminio. El zinc y el magnesio, ambos tienen alta solubilidad sólida en el aluminio y usualmente desarrollan las características de elevado endurecimiento por precipitación. La adición de cobre de 1 hasta 2% incrementa las propiedades de resistencia de las aleaciones Al-Zn-Mg.

La aleación 7075 contiene (5.6% Zn, 2.5% Mg, 1.6% Cu, 0.30% Cr), la aleación 7079 (4.3% Zn, 3.3% Mg, 2.0% Cu), la aleación 7178 (6.8% Zn, 2.7% Mg, 2.0% Cu), la aleación 7001 (7.4% Zn, 3.0% Mg, 2.1% Cu, 0.30% Cr) ésta fué introducida en 1960 y tiene las más altas resistencias y es aplicable a objetos militares, la aleación 7475 (límites más bajos de impurezas que la aleación 7075) aplicable a embarcaciones y otras estructuras (buena tenacidad de fractura). Poseen la máxima resistencia a la tracción que se pueden obtener en las aleaciones de aluminio. La susceptibilidad de estas aleaciones a la aparición de grietas por tensiones internas se aminora mucho debido al porcentaje de cromo adicionado y al adecuado tratamiento térmico.

Se emplean estas aleaciones en aquellos casos en que se necesita una gran resistencia a la tracción y una buena resistencia a la corrosión, como sucede en muchas piezas de la estructura de los aviones y embarcaciones.



Las aleaciones de aluminio-zinc-magnesio sin cobre (menos de 0.1%) tienen una resistencia intermedia. Aleaciones tales como la 7004 con (4.2% Zn, 1.5% Mg, 0.45% Mn, 0.15% Zr) y la 7005 con (4.5% Zn, 1.4% Mg, 0.13% Cr, 0.40% Mn, 0.14% Zr) son usados para carrocerías de automóviles y partes de remolques, puentes portátiles (transportables), carros de ferrocarril y productos extruidos.

#### PROPIEDADES MECANICAS.

Las propiedades mecánicas de la aleación de forja seleccionados o escogidos de Al-Zn-Mg y Al-Zn-Mg-Cu tratables térmicamente se enlistan en la tabla 7. Las resistencias más altas a temperatura ambiente de todas las aleaciones de aluminio fueron desarrolladas en las aleaciones Al-Zn-Cu-Mg.

La aleación 7001 con (7.4% Zn, 3.0% Mg, 2.1% Cu) tiene -- una resistencia última a la tensión de 68.9 Kgr/mm<sup>2</sup> con un -- alargamiento de 9% cuando son tratadas térmicamente en el temple T651. Esta es una de las resistencias más altas de las aleaciones de la serie 7XXX.

Las aleaciones de aluminio-zinc para moldeo conocida como 40E, y contiene 5.5% de zinc, 0.6% de Magnesio, 0.5% Cr y 0.2% de titanio, presenta características mecánicas elevadas, sin que para ello sea necesario someterla a un tratamiento térmico de disolución.

Estas aleaciones cuentan también con una colabilidad aceptable, buena resistencia a la corrosión y una buena maquinabilidad. Por ello es muy utilizada para la fabricación de equi-

TABLA 7. Propiedades mecánicas típicas de las aleaciones de Aluminio-Zinc-Magnesio y Aluminio-Zinc-Magnesio-Cobre tratables térmicamente.

| ALEACION | TEMPERATURA | RESISTENCIA A LA TENSION<br>Psi<br>(Kg/mm <sup>2</sup> ) | LIMITE DE CEDENCIA<br>Psi<br>(Kg/mm <sup>2</sup> )<br>* | ALARGAMIENTO EN 2 PULGADAS<br>(50.8 mm) | DUREZA BHN<br><br>** | RESISTENCIA AL CORTE<br>Psi<br>(Kg/mm <sup>2</sup> ) | LIMITE DE FATIGA<br>Psi<br>(Kg/mm <sup>2</sup> )<br>*** |
|----------|-------------|--|---|---|----------------------|--|---|
| 7001     | 0           | (26 )  | (15.48)   | 14                                      | 60                   | -  | -   |
|          | T6          | (68.9 )  | (64 )   | 9                                       | 160                  | -  | (15.48)   |
|          | T651        | (68.9 )  | (64 )   | 9                                       | 160                  | -  | (15.48)   |
|          | T75         | (59.1 )  | (50.6 )   | 12                                      | -                    | -  | -   |
| 7005     | 0           | (19.70)  | ( 8.44)   | 20                                      | -                    | -  | -   |
|          | W           | (35.1 )  | (21.11)   | 20                                      | -                    | -  | -   |
|          | T6          | (35.8 )  | (29.55)   | 13                                      | -                    | ( 21.8 )   | (15.48)   |
| 7075     | 0           | (23.22)  | (10.55)   | 17                                      | 60                   | ( 15.48 )  | (11.96)   |
|          | T6          | (58.40)  | (51.37)   | 11                                      | 150                  | ( 33.7 )   | (16.185)  |
|          | T651        | (58.40)  | (51.37)   | 11                                      | 150                  | ( 33.7 )   | (16.185)  |
|          | T73         | (51.37)  | (44.33)   | 13                                      | -                    | -  | -   |
|          | 0           | (23.22)  | (10.55)   | 15                                      | 60                   | ( 15.48 )  | -   |
|          | T6          | (61.9 )  | (54.88)   | 10                                      | 160                  | ( 36.59 )  | (15.48)   |
| T651     | (61.9 )     | (54.88)  | 10  | 160                                     | ( 36.59 )            | (15.48)  |   |

\* Rendimiento en la resistencia, 0.2% equivalente.

\*\* Carga de 500 Kgr, bola de 10 mm.

\*\*\* Basado en 500 millones de ciclos usando una máquina tipo R.R. More.

po de radio y accesorios de los aviones.

#### 2.5.8 OTRAS ALEACIONES SERIE 8000.

El aluminio puede alearse también con otros elementos aparte de los mencionados, tales como berilio, bismuto, boro, fierro, níquel, plomo, sodio, titanio y zirconio.

Siempre que alguno de estos elementos sea el aleante, la aleación será designada con un número a partir del 8000.

## CAPITULO III

## III. TRATAMIENTOS TERMICOS DE ALEACIONES DE ALUMINIO.

## 3.1 INTRODUCCION.

Al igual que otros metales, las aleaciones de aluminio pueden mejorar sus propiedades mediante la adición de ciertos elementos aleantes, sin embargo las propiedades que se adquieren no sólo dependen de su composición. Así por ejemplo, su dureza y resistencia cambian cuando son sometidos a tratamientos mecánicos, tales como formado de metales en frío (laminado, estampado, estirado, etc.) ó un tratamiento térmico (temple, recocido, estabilización, homogenización, etc.). No todas las aleaciones de aluminio pueden recibir tratamiento térmico.

Así pues, podemos clasificar a las aleaciones de aluminio en:

- 1.- Aleaciones tratables térmicamente.
- 2.- Aleaciones no tratables térmicamente.

## TRATAMIENTO TERMICO

En su sentido más amplio, se define como tratamiento térmico a todas las operaciones, tanto de calentamiento como de enfriamiento, que se lleva a cabo sobre un metal ó aleación con objeto de alterar su estructura y /o sus propiedades.

## 3.2 FINALIDAD DE LOS TRATAMIENTOS TERMICOS

Se acude a un tratamiento térmico cuando se persigue uno de los objetivos siguientes:

- a) Ablandar la aleación para mejorar su conformabilidad ó forjabilidad.
- b) Aumentar la resistencia mecánica de la aleación y obtener las propiedades mecánicas particulares asociadas con el revenido específico final.
- c) Estabilizar las propiedades físicas ó mecánicas, ó la resistencia a la corrosión, e impedir cambios que se

producirán en el caso de no dar el tratamiento térmico al estar la aleación sometida a temperatura ambiente elevada.

- d) Asegurar la estabilidad dimensional durante el servicio, particularmente en piezas que han de trabajar a temperaturas elevadas y que requieren un estrecho control dimensional.
- e) Eliminación de las tensiones residuales, inducidas por una deformación diferencial ó un enfriamiento no uniforme al final de operaciones de colada, temple, soldadura ó conformación.

### 3.3 SISTEMA DE DESIGNACION DE LOS TRATAMIENTOS TERMICOS.

Los tratamientos térmicos pueden combinarse con tratamientos mecánicos para conferir al material las características adecuadas.

De todas las posibilidades existentes hay unas más habituales que son reconocidas en las normas de todos los países.

Como es importante conocer el estado en que se encuentra el material, bien sea este aluminio fundido ó forjado y por lo tanto los tratamientos que ha sufrido, de modo que se elabora un sistema de designación. Los distintos tratamientos básicos se indican mediante una letra, seguida por uno o más dígitos, salvo en los estados de recocido y de bruto, que no van seguidos por ninguno. Los estados básicos son cuatro, los cuales vienen representados por F, estado de bruto. O, estado de recocido; H, endurecido por deformación en frío o estado de acritud, y T, tratado térmicamente.

F: Estado Bruto de Fabricación.

Se aplica en aquellos casos en que el producto no ha sido sometido a ningún tratamiento térmico ni mecánico intencional después de su fabricación. Los materiales en este estado, en especial los forjados, no presentan características mecánicas muy precisas.

O: Recocido Total. (sólo se emplea para productos de forja)

Es el estado de máximo ablandamiento de los productos de forja.

H: Acritud.

Corresponde al estado de un producto que ha sido sometido a deformación plástica (deformación en frío) a temperatura inferior a la de recristalización seguida o no de algún tratamiento suplementario con el fin de obtener un ablandamiento parcial. La letra que designa el estado de acritud (H) nunca va sola, sino que va seguida de dos o más cifras que corresponden a distintas subdivisiones del estado. La primera de ellas indica el proceso seguido para la obtención de la acritud, según el siguiente Código:

H1: Solamente deformación en frío. Corresponde a productos que han sido endurecidos por deformación en frío únicamente para alcanzar las características mecánicas deseadas directamente, es decir, sin tratamiento térmico suplementario.

H2: Deformación en frío seguida de recocido parcial. Corresponde a productos que han sido endurecidos por deformación en frío, hasta una resistencia superior a la final deseada, la cual se obtiene, posteriormente, mediante un adecuado recocido parcial. El recocido parcial dá lugar a un aumento de ductili-

dad más acusado que la disminución de resistencia. Por ello, para un mismo nivel de resistencia, el estado H2 presenta mayor ductilidad que el estado H1. El recocido parcial elimina también tensiones.

H3: Deformación en frío seguido de estabilizado. Corresponde a productos que han sido endurecidos por deformación en frío y, posteriormente, estabilizados mediante un calentamiento a baja temperatura, que produce una ligera disminución de las características de resistencia y aumenta la ductilidad. Esta designación se aplica únicamente a aquellas aleaciones que, sino son estabilizadas, sufren un gradual ablandamiento a temperatura ambiente. El estabilizado provoca rápidamente este mismo ablandamiento obteniéndose el estado estable.

La segunda cifra indicará el grado final de endurecimiento obtenido por cualquiera de los tres procedimientos anteriores. Se ha asignado el número 8 al estado duro, es decir, al que tiene mayor grado de acritud generalmente utilizado. Los estados comprendidos entre 0 y 8; es decir, entre recocido y duro, se designan con las cifras 1 a 7. Un material que tenga una resistencia intermedia entre las correspondientes a los citados 0 y 8 se designa por la cifra 4 (semiduro) y así sucesivamente. Para indicar estados extraduros se emplea la cifra 9. En los casos en que se emplea una tercera cifra indica un estado diferente a los anteriores y se refiere generalmente a una diferencia en el proceso de fabricación ó a diferente garantía de sus propiedades.

W: Temple: Calentamiento a determinada temperatura durante cierto tiempo, seguido de enfriamiento a una velocidad adecuada

con el fin de disolver y retener en solución los constituyentes endurecedores. Es un estado inestable. Esta designación se especifica solamente cuando se índica el período de maduración natural. Por ejemplo: W media hora.

T: Tratado térmicamente. Se utiliza esta designación en los casos en que los materiales se tratan térmicamente para obtener estados estables con independencia de que posteriormente se sometan a una deformación en frío o no. El tratamiento térmico puede consistir en temple y/o maduración (envejecimiento), ó en cualquier otro tratamiento que dé lugar a estados distintos de F. O, ó H. Los tratamientos de temple y maduración pueden emplearse aisladamente o conjuntamente, constituyendo en éste último caso el tratamiento de bonificado, y en cualquier caso combinado o no con trabajado en frío.

La letra T va siempre seguida de una o más cifras. Los números 1 a 10 han sido asignados para indicar distintos estados de tratamiento de acuerdo con el siguiente Código.

T1: Maduración natural solamente (envejecimiento natural). Se aplica a aquellos productos, tales como piezas moldeadas o extruídas, enfriados durante su proceso de fabricación, desde temperaturas elevadas a velocidad suficiente para que su resistencia se incremente por envejecimiento natural.

T2: Recocido: (sólo para productos moldeados). Designa un tipo de tratamiento de recocido empleado para aumentar la ductilidad y la estabilidad dimensional de los productos moldeados.

T3: Temple, deformación en frío y maduración natural. Se aplica a productos que son trabajados en frío, después del tratamiento del temple, con el fin de aumentar su resistencia. --

También se aplica a productos para los cuales las operaciones de aplanado o enderezado tienen efecto reconocido sobre las características mecánicas.

T4: Sometido a un tratamiento térmico de temperatura y a un proceso de envejecimiento natural (maduración natural) hasta conseguir una condición totalmente estable.

T5: Maduración artificial solamente (envejecimiento artificial solamente). Esta designación se aplica a productos, que en el proceso de fabricación se enfrían rápidamente desde temperaturas elevadas tales como piezas moldeadas o extruidas, y sometidas a maduración artificial para mejorar sus características mecánicas y/o su estabilidad dimensional.

T6: Temple y maduración artificial (temple y envejecimiento artificial). Se aplica a productos que no son sometidos a trabajos en frío después del proceso del temple, ó a aquellos en que las operaciones de aplanado o enderezado no tienen efecto reconocido sobre las características mecánicas.

T7: Sometido a un tratamiento térmico de solubilización (temple) y posteriormente estabilizado. Se aplica a productos que son llevados mediante un tratamiento de estabilizado a temperatura y durante un tiempo apropiado más allá del límite que corresponde a la máxima resistencia, procurando controlar el crecimiento de grano y las tensiones residuales, con el fin de obtener a cambio algunas características especiales (por ejemplo: aleaciones que vayan a trabajar a altas temperaturas).

T8: Temple, deformación en frío y maduración artificial. Se lleva a cabo con el fin de aumentar la resistencia, también se aplica a productos para los cuales las operaciones tales --



como aplanado y enderezado no tienen efecto reconocido sobre las características mecánicas.

T9: Temple, maduración artificial y a continuación deformación en frío. Designación aplicada cuando el trabajado en frío se lleva a cabo con el fin de aumentar la resistencia mecánica del producto.

T10: Maduración artificial, y a continuación deformación en frío. Esta designación se aplica para productos, tales como: piezas moldeadas o extruidas, que han sido enfriadas rápidamente en su proceso de fabricación desde temperaturas elevadas, que han sido madurados artificialmente y a continuación trabajadas en frío con el fin de aumentar su resistencia mecánica.

#### 3.4 TEORIA DE LOS TRATAMIENTOS TERMICOS DE ALEACIONES DE ALUMINIO.

El tratamiento térmico de disolución incrementa la tenacidad y resistencia, dureza y resistencia a la corrosión sin afectar gravemente la ductilidad. El tratamiento térmico de precipitación siguiente al tratamiento térmico de disolución concediéndose máximas propiedades mecánicas a las aleaciones.

El recocido sobre los anteriores produce máxima ductilidad ó formabilidad y bajas propiedades mecánicas. Hay otras formas de tratamiento térmico tales como estabilización, recocido de estabilización y homogenización.

Los metales estan compuestos de un gran número de idénticos cristales, uno de los cuales es representado por "A" de la figura 8. Dentro de cada cristal hay muchos planos sobre los cuales pueden moverse los átomos formando un plano común y es-

tos son conocidos como planos de deslizamiento. En operaciones tales como rolado, forjado, embutido y extrusión, las presiones aplicadas tienden a deformar los cristales causando que una porción del cristal se deslice con respecto a regiones adyacentes a él sobre los planos de deslizamiento como se muestra en "B" de la figura 8.

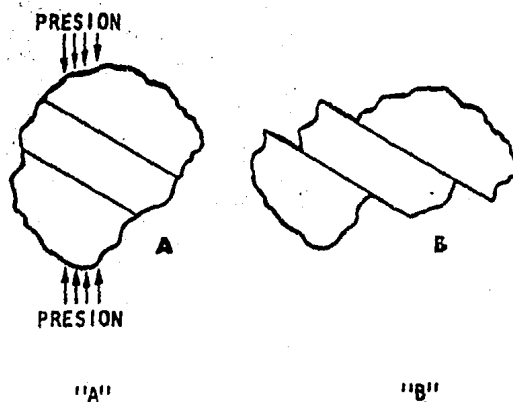


FIGURA 8. - Aquí se representa la deformación del cristal cuando es sometido a cargas que originan su deslizamiento.

Un bloque en movimiento es mostrado aquí sobre varios de los muchos planos posibles deslizables. Resultando así en una prolongación en una dirección y reducción del espesor en el otro.

La resistencia para deslizarse sobre estos planos se incrementa al ir efectuándose deslizamiento sobre planos nuevos y el proceso es repetido.

Al mismo tiempo el deslizamiento de planos (a través del movimiento, realmente de dislocaciones) está ocurriendo en la de los otros cristales del metal. De este modo la deformación se completa.

La resistencia mecánica puede incrementarse por varios métodos. El trabajo en frío de un metal incrementa la resistencia y mientras baja la ductilidad. La adición de un elemento ó elementos aleantes también incrementará la resistencia al deslizamiento o movimiento de dislocaciones y por lo tanto la tenacidad, otro método aplicable para ciertas aleaciones es mediante tratamiento térmico. Este proceso mejora la distribución y el tamaño de las partículas del constituyente el cual ~~interfieren~~ — el movimiento de las dislocaciones.

#### 3.4.1 EL TRATAMIENTO DE SOLUBILIZACION (T. de disolución).

##### GENERALIDADES.

Como se ha indicado, el objeto del tratamiento de solubilización (de disolución) es poner en solución sólida la mayor cantidad de los solutos endurecedores tales como cobre, silicio, magnesio y zinc. Según se desprende de los diagramas de equilibrio, cuanto más alta es la temperatura mayor es la cantidad de soluto que admite el solvente en solución sólida. Por ello, la temperatura de solubilización ha de estar muy próxima a la de fusión del eutéctico.

Hay que evitar, sin embargo, llegar a dicha temperatura, -- porque si se produce la fusión de algún constituyente, el material es irrecuperable y se necesita fundirlo de nuevo. Este fenómeno de fusión del eutéctico es el del quemado. El quemado es origen a veces de los agrietamientos que se observan al temple.

Cuanto más alta es la temperatura de solubilización, mayor es la resistencia mecánica y límite de elasticidad que se pue--

den alcanzar posteriormente en los tratamientos de envejecimiento. En la fig. 9 se puede ver, a modo de ejemplo, la influencia de dicha temperatura en las características mecánicas de la aleación L-3171 (Al-2CuMgNi) obtenida después de un tiempo de solubilización de 2 horas a cada temperatura y un posterior envejecimiento de 10 horas a 175°C. La zona rayada indica que se ha rebasado la temperatura de fusión del eutéctico. Al principio, aún habiendo algo quemado, las propiedades mecánicas por sí solas no delatan la existencia de dicho efecto.

Puesto que la temperatura óptima de solubilización es muy próxima a la de fusión del eutéctico, es necesario disponer de hornos con gran uniformidad de temperatura y con un control tal que permita mantener la temperatura con  $\pm 50^\circ\text{C}$ , y en ocasiones incluso con  $\pm 30^\circ\text{C}$  de precisión.

Una vez fijada la temperatura de solubilización es necesario fijar el tiempo. El tiempo de solubilización es función del tipo de producto, de la aleación y del proceso de fabricación utilizado, es decir, de las condiciones en que se encuentra el material antes del tratamiento.

La heterogeneidad estructural de las piezas moldeadas hace que requieran tiempos largos de mantenimiento. Como la homogenización es tanto mejor cuanto menores son los granos, las piezas coladas en arena requieren tiempos de solubilización más elevados que las coladas en coquilla.

Las piezas forjadas requieren tiempos de solubilización inferiores a las coladas y dentro de ellas, los productos de secciones gruesas los precisarán mayores que los de secciones delgadas, como chapas.

El tiempo de solubilización no depende de la temperatura de solubilización. La fig. 10 indica la influencia del tiempo de solubilización en las características mecánicas, para diferentes temperaturas de solubilización. Como se puede ver, independientemente de éstas, las mejores características se alcanzan al cabo de un mismo tiempo. Una vez rebasado dicho tiempo, no tiene interés prolongar el mismo, ya que pueden presentarse problemas relacionados con la recristalización, con la economía del proceso e incluso oxidaciones, sin que ningún caso llegue a una mejoría mayor de las características mecánicas.

Conviene tener cuidado también con la velocidad de calentamiento cuando se va a dar un tratamiento térmico de solubilización. En algunos casos se pueden provocar crecimientos excesivos de grano, siempre indeseables, cuando el calentamiento es demasiado lento. La velocidad de calentamiento debe ser la mayor posible.

Una máxima que podría derivarse de lo anterior es que para conseguir unas características mecánicas determinadas, no se puede rebasar la temperatura óptima para evitar riesgos de quemado y aumentar el tiempo de permanencia a dicha temperatura. En el tratamiento de solubilización, mayor tiempo no es equivalente a menor temperatura, como ocurre en otros tratamientos.

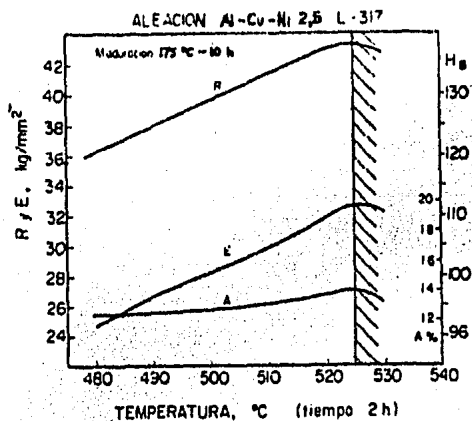


FIGURA 9.- Influencia de la temperatura de solubilización en las características mecánicas. Aleación L-317(1).

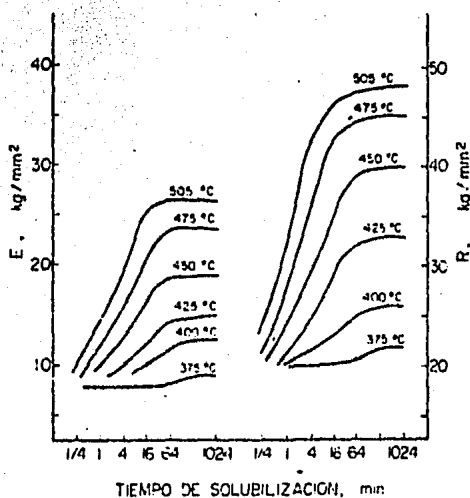


FIGURA 10.- Influencia del tiempo de solubilización en las características mecánicas (1).

### 3.4.2 TRATAMIENTOS DE SOLUBILIZACIÓN USUALES.

La tabla 8 resume las temperaturas de solubilización de las aleaciones de aluminio normalizadas, tanto de forja como de moldeo. Dichas temperaturas nominales poseen un intervalo con su máximo y su mínimo, que debe de respetarse cuidadosamente y que suele ser de  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  y en ocasiones menor. Este intervalo es muy crítico en algunas aleaciones en las que la temperatura de fusión del eutéctico es sólo unos grados más elevada que la máxima recomendada para solubilización.

Si se opta por temperaturas superiores ó inferiores a las de la tabla, las características mecánicas que se obtendrán serán inferiores a las normales.

Los tiempos de solubilización no se pueden dar con la misma precisión que las temperaturas. Son función de la composición (hay constituyentes que tardan más en disolverse que --- otros), de la deformación plástica previa que haya sufrido el material y de las dimensiones (los productos de pequeño espesor necesitan tiempos de solubilización más cortos que las chapas gruesas ó que las grandes piezas de forja).

Como guía aproximada se presenta la figura 11, expresando se el tiempo en minutos que se requiere para cada espesor, haciéndose distinción entre los dos tipos de productos antes citados. Los tiempos mencionados corresponden a tratamientos en hornos de sales; si se trata de tratamientos en hornos de aire de circulación forzada, los tiempos son algo mayores (del orden del 50% mayores).

TABLA 8. -- Temperaturas de solubilización de las aleaciones de aluminio

| ALEACIONES DE FORJA |             |                  | ALEACIONES DE MOLDO |             |  |
|---------------------|-------------|------------------|---------------------|-------------|--|
| Designación         |             | Temperatura (°C) | Designación         |             | Temperatura (°C)                         |
| Al-4CuMg            | L-3120..... | 590 ± 5          | Al-10CuMg           | L-2110..... | 510 ± 5                                  |
| Al-4CuAlPb          | L-3121..... | 495 ± 5          | Al-4CuMgTi          | L-2140..... | 525 ± 5                                  |
| Al-4CuSiMg          | L-3130..... | 505 ± 5          | Al-4Cu2NiMg         | L-2150..... | 515 ± 5                                  |
| Al-4CuMg            | L-3140..... | 495 ± 5          | Al-10Mg             | L-2110..... | 430 ± 5                                  |
| Al-2CuNi            | L-3160..... | 525 ± 5          | Al-3MgSi            | L-2341..... | 560 ± 5                                  |
| Al-2CuMgNi          | L-3171..... | 525 ± 5          | Al-12Si2Ni          | L-2550..... | 515 ± 5                                  |
| Al-2CoMg            | L-3180..... | 500 ± 5          | Al-10SiMg           | L-2560..... | 530 ± 5                                  |
| Al-6Cu              | L-3191..... | 535 ± 5          | Al-12SiNi           | L-2551..... | (515 ± 5 para T5)<br>(500 ± 10 para T7)* |
| Al-6CuPb            | L-3192..... | 510 ± 5          | Al-5SiMg            | L-2570..... | 530 ± 5                                  |
| Al-1MgSiCu          | L-3420..... | 525 ± 10         | Al-5SiCuMg          | L-2571..... | 525 ± 5                                  |
| Al-0.6MgSi          | L-3431..... | 500 a 560**      | Al-5Si3Cu           | L-2610..... | 510 ± 5                                  |
| Al-0.7MgSi          | L-3441..... | 525 ± 10         | Al-7SiMg            | L-2651..... | 540 ± 5                                  |
| Al-1SiMg            | L-3451..... | 520 ± 10         |                     |             |  |
| Al-12Si1Ni          | L-3541..... | 515 ± 5          |                     |             |  |
| Al-1SiMgPb          | L-3452..... | 520 ± 10         |                     |             |  |
| Al-5ZnMgCu          | L-3710..... | 465 ± 5**        |                     |             |  |
| Al-3Zn2Mg           | L-3731..... | 440 ± 10         |                     |             |  |
| Al-4Zn1Mg           | L-3741..... | 465 ± 10         |                     |             |  |
| Al-7ZnMgCu          | L-3751..... | 465 ± 5**        |                     |             |  |

\* Dependencia de la combinación de características mecánicas y químicas deseadas.

\*\* La cifra puede elevarse a 495°C.

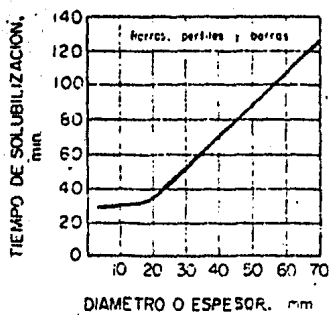
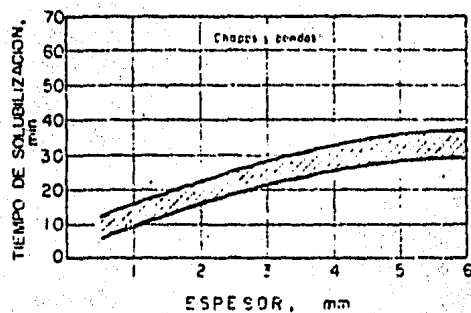


FIGURA 11.- Valores aconsejados para el tiempo de solubilización en baño de sales en función de las dimensiones de las piezas (6).



Para las aleaciones de moldeo los tiempos de solubilización han de ser mayores que para los productos forjados, ya que los constituyentes microestructurales son bastante más bastos y necesitan por tanto mayores períodos de solubilización. La tabla 9 incluye los tiempos recomendados para las diferentes aleaciones de moldeo.

Como detalle de tipo práctico, en los hornos de circulación forzada el tiempo de solubilización se empieza a contar cuando todos los termopares del horno señalan la total recuperación de la temperatura. Si los termopares van conectados a las piezas se pueden usar tiempos más cortos, incluso del mismo orden de los recomendados para los baños de sales.

Se pueden someter conjuntamente a tratamiento de solubilización diferentes aleaciones de aluminio, siempre y cuando la temperatura del tratamiento utilizada sea satisfactoria para todas ellas. En el caso de que se traten al mismo tiempo productos de diferentes espesores, el tiempo de solubilización se controlará de acuerdo con el tiempo requerido para la sección más gruesa. Si se puede separar la carga del horno en productos, aquellos que requieran tiempos más cortos pueden extraerse cuando lo permita el diseño y la forma de funcionar del horno, y siempre que la temperatura del resto de la carga no quede afectada significativamente.

| Aleación             | Designación | Tiempo<br>...<br>Horas |
|----------------------|-------------|------------------------|
| Al-10 Cu Mg.....     | L-2110      | 12-16                  |
| Al-4 Cu Mg Ti.....   | L-2140      | 4-5                    |
| Al-4 Cu 2 Ni Mg..... | L-2150      | 4-6                    |
| Al-10 Mg.....        | L-2310      | 8-16                   |
| Al-3 Mg Si.....      | L-2341      | 4-8                    |
| Al-12 Si 2 Ni.....   | L-2350      | 4-8                    |
| Al-12 Si Ni.....     | L-2351      | 4-8                    |
| Al-10 Si Mg.....     | L-2560      | 4-8                    |
| Al-5 Si Mg.....      | L-2570      | 4-8                    |
| Al-5 Si Cu Mg.....   | L-2571      | 8-12                   |
| Al-5 Si 3 Cu.....    | L-2610      | 6-10                   |
| Al-7 Si Mg.....      | L-2651      | 8-10                   |

TABLA 9.- Tiempos de solubilización recomendadas para las aleaciones de aluminio para moldeo.

### 3.4.3 TRATAMIENTO TERMICO DE TEMPLE.

#### GENERALIDADES.

El objetivo del tratamiento térmico de temple es conservar en tanto como sea posible la solución sólida que se forma a la temperatura de solubilización. Para ello se enfría desde dicha temperatura en forma brusca hasta temperatura baja, normalmente próxima a la ambiente. Este tratamiento es, en muchos aspectos el paso más crítico en la secuencia de operaciones del tratamiento térmico.

Si lo que se requiere es garantizar la solución sólida, parece lógico que se piense en buscar la velocidad más rápida posible. Esto no es siempre válido, ya que hay que tener en cuenta que para determinadas secciones ó formas, un enfriamiento muy brusco puede introducir demasiadas tensiones, e incluso romper el material. Sin embargo, las velocidades de enfriamiento

grandes son buenas también para otras características, como - resistencia a la corrosión y al agrietamiento por corrosión bajo tensión.

#### 3.4.4 TEMPLE Y ENDURECIMIENTO ESTRUCTURAL.

(Maduración Natural, Maduración Artificial).

##### INTRODUCCION.

Los tratamientos de temple y de endurecimiento estructural caracterizan a las aleaciones ligeras llamadas de TRATAMIENTO - TERMICO, TEMPLABLES ó (BONIFACABLES). Dos propiedades comunes y fundamentales, necesarias por otra parte pero no suficiente, son:

- los elementos de adición están en solución sólida a alta temperatura.
- su solubilidad decrece con la temperatura.

Mediante el calentamiento se lleva la aleación a la zona de fase homogénea a la temperatura  $t_1$ , como se ve en la fig. 12. - Si se enfría la aleación muy lentamente hay tiempo suficiente - para que el equilibrio se establezca en cada temperatura; la solución, que estará sobresaturada por debajo de  $t_2$ , se separa en varias fases: una solución sólida, cada vez menos rica a medida que decrece la temperatura y uno ó varios precipitados que contienen los elementos disueltos en proporción elevada.

Por el contrario, si se enfría la aleación a partir de la - fase homogénea alcanzando rápidamente la temperatura ordinaria  $t_3$ , se consigue apresar y conservar el estado homogéneo. Pero la solución sólida sobresaturada en  $t_3$  queda en un estado metaestable que tiende a evolucionar, generalmente, hacia un grado

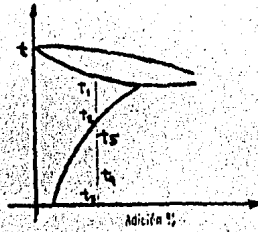


FIGURA 12.- Mecanismo de endurecimiento estructural.

estable, mediante la precipitación de la fase sobresaturada. Esta es la precipitación que produce el endurecimiento estructural, denominándose:

- maduración natural, cuando la evolución se produce a -- temperatura ordinaria ( $t_3$ ).
- maduración artificial, cuando la evolución es acelerada mediante un tratamiento a temperatura moderada  $t_4$ , muy inferior a  $t_2$ .

Si se eleva la temperatura al nivel  $t_5$ , un poco inferior a  $t_2$ , se produce un recocido y no puede realizarse el endurecimiento estructural; sin embargo, el estudio de los equilibrios que corresponden a las temperaturas intermedias (de  $t_4$  a  $t_2$ ) - permite fijar las isoterma de permanencia de los recocidos de coalescencia.

### 3.4.5 TEMPERATURA DE TEMPLE.

Si consideramos las curvas que representan la variación de las características mecánicas, obtenida después del endurecimiento estructural, en función de la temperatura de temple, se comprueba para la mayor parte de las aleaciones que todas las características pasan por un máximo en una banda más o menos estrecha de temperaturas, y a continuación disminuyen rápidamente para temperaturas de puesta en solución superiores o inferiores, siendo las temperaturas superiores a un cierto óptimo práctico, las llamadas temperaturas de quemado, que es necesario evitar. Las figuras 13 y 14 muestran la marcha del fenómeno, correspondiendo la fig. 13 al caso más general y la fig. 14 a los casos más favorables, para los que la zona de quemado vienen retardado L-3180 (2117).

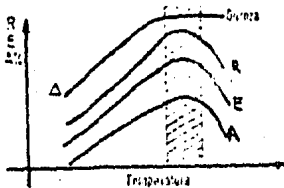


FIGURA 13.- Variación de las propiedades mecánicas con la temperatura de temple.  
Caso general.  
Rayado: zona de "quemado".

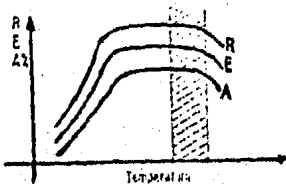


FIGURA 14.- Variación de las propiedades mecánicas con la temperatura de temple.  
Caso del Ir-3180 (2117)

A temperaturas inferiores a la óptima (que debe ser respetada con una diferencia de  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ), la disminución de características resulta de la incompleta puesta en solución del ó de los constituyentes activos. A temperaturas superiores a la óptima, hay fusión de eutécticos complejos intergranulares trayendo consigo el quemado y disolución fragilizante; el metal pierde su alargamiento, presenta un grano de fractura grosero y brillante y no es recuperable. Debemos señalar que la dureza no sufre modificación sensible por el quemado y por consiguiente no sirve para caracterizarla.

La temperatura de fusión de los compuestos que se encuentran en los límites de granos puede verse influida en un sentido desfavorable por modificaciones, aparentemente insignificantes, en la composición de la aleación. Por ejemplo, un contenido un poco elevado en silicio, en la composición química de la (L-214) provoca el quemado de la aleación a la temperatura normal de temple ( $530^{\circ}\text{C}$ ).

Debemos de señalar, por el contrario, que las aleaciones de alta maquinabilidad, que contienen normalmente plomo, se pueden temprar a las mismas temperaturas que la misma aleación sin plomo, a pesar del bajo punto de fusión de este elemento. Además, en ciertos casos, la migración de fases líquidas puede provocar una inútil globulización por agrupamiento, que no se debe confundir con el fenómeno de quemado.

#### 3.4.6 INTERVALO CRITICO DE TEMPERATURAS.

Si se da el temple para evitar que los constituyentes de la aleación que están en solución sólida precipiten, es neces

rio tener en cuenta que la velocidad de difusión que regula la precipitación es mayor a medida que lo es la temperatura. Por otra parte a medida que crece la temperatura es mayor la cantidad de soluto que permanece en solución sólida y por lo tanto, es menor la tendencia a precipitar.

Estos dos factores, velocidad de difusión y límite de solubilidad, se contraponen y dan como resultado que la velocidad de precipitación es máxima para un intervalo de temperatura, lo que se ve esquemáticamente en la fig. 15. Este es el denominado intervalo crítico de temperaturas que precisamente se pretende evitar con el temple rápido.

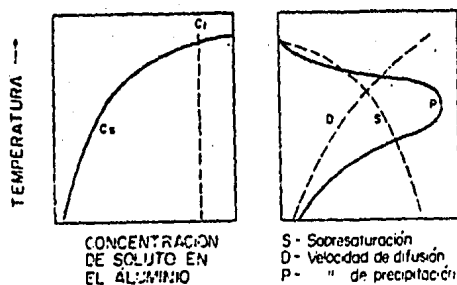


FIGURA 15.- Representación esquemática del efecto de la temperatura en los factores que determinan la velocidad de precipitación.

### 3.4.7 ENFRIAMIENTO.

La solución sólida en caliente debe ser conservada en el mismo estado mediante un enfriamiento suficientemente rápido para evitar la separación de sus constituyentes. Si se produce una precipitación, este hecho corresponde finalmente a una puesta en solución incompleta, desfavorable al endurecimiento estructural posterior y, por consiguiente, a las características mecánicas finales.

Para evitar este inconveniente, es necesario que se alcance la velocidad crítica de temple, variable con las aleaciones según la mayor o menor estabilidad de la solución sólida, correspondiente. Para ciertas aleaciones, los tiempos de permanencia al aire libre necesarios para trasladar las piezas desde la salida del horno hasta el medio en que se efectúa el temple, es suficiente para iniciar una precipitación perjudicial; este efecto de "dilatación de temple", es particularmente sensible en las aleaciones que contienen zinc y obliga a tener en cuenta también la masa de los productos, la disposición de las cargas, la velocidad de inmersión, etc..

El medio de temple más corriente en la fabricación de las aleaciones de aluminio es el agua ordinaria, que se mantiene habitualmente entre 15 y 40°C mediante una aportación conveniente de agua fría.

Cuando las piezas son sensibles a las tensiones internas y a las deformaciones, se puede practicar el temple en agua hirviendo, en aceite, o con agua pulverizada. Estos procedimientos, que actúan sobre la velocidad de temple propiamente



dicha, tienen una tendencia general a favorecer la corrosión intergranular.

### 3.5 LA VELOCIDAD DEL TEMPLE.

El temple y la velocidad de temple vienen condicionados - por tres factores fundamentales; características de la aleación forma y dimensiones del producto; y medio templante.

La sensibilidad de las aleaciones a la velocidad de temple es muy diferente, de tal manera que se puede decir que la experiencia en una aleación no sirve en general para las restantes.

La forma y dimensiones del producto no se pueden variar - arbitrariamente. Al estar limitado el transporte de calor durante el temple por la resistencia en la superficie en contacto con el medio templante, la velocidad de enfriamiento es función de la relación área a volumen. En piezas de forma sencilla, como el caso de planchas o placas. se pueden establecer - relaciones sencillas entre el espesor y la velocidad de enfriamiento media, del tipo.

$$\log. r_t = \log. r_1 - K \log. t$$

de donde:

$t$  = es el espesor.

$r_t$  = la velocidad de enfriamiento media correspondiente a - un espesor  $t$ .

$r_1$  = la misma velocidad para espesor unidad,

$K$  = una constante.

La velocidad esta determinada por el medio templante. El medio que permite mayores velocidades de temple es el agua, -- siendo más o menos rápido el enfriamiento según la temperatura

del agua. Dado que en el temple en agua se forma una película de vapor en torno a la pieza que hace de factor retardante del temple, se puede reducir la velocidad de temple añadiendo al agua sustancias que retengan la capa de vapor en torno a la pieza.

También se consiguen retardos añadiendo al agua productos que den depósitos sólidos sobre el metal. En la tabla 10 se puede ver una relación de las velocidades de temple aproximadas en diferentes medios.

El aire como medio templante se ha introducido en la tabla con fines comparativos. Sin embargo, en casos en que sea posible su utilización, puede ser aconsejable, aunque sólo sea por razones de economía.

La condición superficial de las piezas afecta sensiblemente a la velocidad de temple. Las velocidades menores se observan en piezas de superficies muy limpia por haber sido mecanizadas o pulidas; la presencia de películas de óxido aumenta la velocidad de temple. En principio, las capas de óxido, al suponer una resistencia térmica en serie debería disminuir la velocidad de temple.

En la figura 16 se puede ver la influencia de la velocidad de temple en la resistencia a la tracción de diversas aleaciones.

La velocidad de temple es afectada por la sección del material, razón por la que se deben manejar con cuidado las curvas del tipo presentado en la fig. 16. Además la resistencia a la corrosión varía también con la velocidad de temple.

Se recomienda utilizar velocidades de temple superiores -

a las mínimas aconsejables para obtener las características mecánicas y la resistencia a la corrosión deseadas.

La sección obliga a tener en cuenta otras consideraciones. Así cuando se trata de secciones muy gruesas, no se puede pretender que se obtengan las propiedades en toda la sección, si bien la disminución del valor de la resistencia mecánica no es demasiado significativa.

En la fig. 17 se representa la influencia del espesor en la velocidad de temple cuando se temple en distintos medios -- templantes.

Las contracciones debidas al enfriamiento brusco pueden introducir tensiones residuales. La magnitud de estas tensiones aumenta proporcionalmente con los gradientes de temperatura, que a su vez aumentan con la velocidad del enfriamiento. Es práctica usual emplear medios templantes que proporcionen enfriamientos menos rápidos, cuando la forma de las piezas sea irregular. Así las piezas forjadas o extruidas de formas irregulares son templadas en agua caliente a unos 60 u 80°C, incluso agua hirviendo. Los perfiles extruídos o laminados pueden enfriarse también en aire agitado, niebla o agua pulverizada. En el caso de piezas grandes o complejas se suele mecanizar antes del tratamiento térmico posterior al temple, con lo cual se evitan las tensiones a que estaría sometido el metal en el tratamiento de envejecimiento.

| Medio templante     | Velocidad de temple |
|---------------------|---------------------|
| Agua a 20° C .....  | 2.500 °C/seg.       |
| Aceite ligero ..... | 689 °C/seg.         |
| Aceite medio .....  | 153 °C/seg.         |
| Aceite pesado ..... | 71 °C/seg.          |
| Agua a 100° C ..... | 23 °C/seg.          |
| Aire agitado .....  | 7.7° C/seg.         |
| Aire en calma ..... | 2.2° C/seg.         |

TABLA 10.- Velocidades de temple en distintos medios - templantes (1).

Un cuidado especial requieren cuando son muchas piezas.. En tales casos deben moverse dentro del baño de temple para permitir que el efecto sea el mismo en todas las zonas. Además -- hay que mantener una proporción de líquido suficiente en relación a la masa de piezas a tratar, evitando que suba la temperatura del baño excesivamente.

Cuando interese que la aleación tenga al final del temple buen aspecto superficial es necesario controlar cuidadosamente la calidad del agua del baño de temple ya que la utilización de aguas duras ó contaminadas pueden dejar depósitos de materias residuales sobre la superficie, e incluso manchas.

En los casos en que se hayan usado para el tratamiento de solubilización hornos de sales, las aguas de los tanques de refrigeración empleados en el temple deberán renovarse, para controlar la concentración de sales disueltas arrastradas por las piezas. Es aconsejable lavar las piezas posteriormente al chorro de agua o en agua caliente.

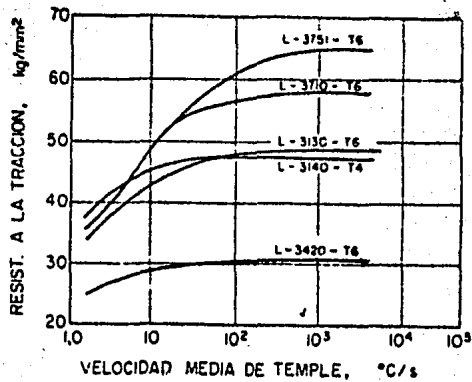


FIGURA 16.- Resistencia a la tracción de cinco aleaciones en función de la velocidad media de temple (4).

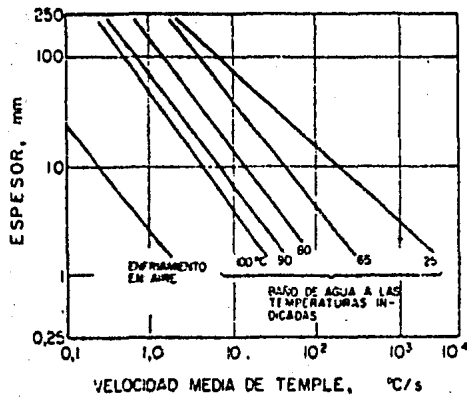


FIGURA 17.- Efecto del espesor y del medio templante en las velocidades medias de temple para chapas y placas de aluminio templadas desde la temperatura de solubilización (4).

Para comprobar la ausencia de trazas de nitratos sobre las piezas se recomienda el ensayo siguiente, que se efectuará un par de veces por lo menos cada jornada de trabajo. Con una varilla de vidrio se colocan en la superficie de la pieza dos o tres gotas de una solución transparente de difenilamina en ácido sulfúrico concentrado.

La presencia de nitratos quedará delatada por una coloración azul, lo que evidenciará un lavado incorrecto del material templado.

A continuación se debe lavar la pieza para eliminar los restos del reactivo empleado.

### 3.6 EL TIEMPO DE RETARDO.

A la salida del horno, después del tratamiento de solubilización, la pieza está sometida durante un tiempo al contacto con el aire, aún cuando dicho tiempo sea muy corto, lo que dá lugar a un cierto retraso en la inmersión en el medio templante (a no ser que este medio sea el propio aire o niebla). Este tiempo es conocido por tiempo de retardo y es de especial importancia cuando se trata de piezas de sección delgada. Si el tiempo es suficientemente largo (lo que dependerá de la sección de la pieza y de la masa de piezas tratadas) el material puede estar un tiempo dentro del intervalo crítico de temperaturas, lo que daría lugar a precipitaciones no deseadas.

A continuación se dan algunos valores indicativos de los tiempos de retardo aconsejables, según Bresson y Renourd (1), para los distintos espesores.

|                      |     |         |        |       |        |            |
|----------------------|-----|---------|--------|-------|--------|------------|
| Espesor<br>(mm)      | 0.5 | 0.6-0.8 | 0.9-10 | 11-40 | 41-140 | más de 140 |
| Tiempo máx.<br>(seg) | 5   | 7       | 10     | 15    | 30     | 45         |

### 3.6.1 PROPIEDADES DEL ESTADO TEMPLADO.

Inmediatamente después del temple y durante un cierto tiempo, variable según las aleaciones, se dice que el metal se encuentra en estado recién templado o (temple fresco).

Las cargas de rotura, los límites elásticos y las durezas, tienen valores inferiores a los de las características que han de alcanzar por endurecimiento estructural espontáneo ó provocado, mientras que los alargamientos son generalmente altos. De ello resulta un estado temporal relativamente maleable, en el curso del cual las piezas templadas pueden sufrir, sin efectos perjudiciales, ciertas deformaciones, tales como un enderezado o aplanado. Sin embargo, el metal recién templado es menos maleable que la aleación reconocida.

La resistividad eléctrica es superior a la del estado recocido.

### 3.6.2 TENSIONES DE TEMPLE.

Las bruscas variaciones de temperatura que tienen lugar en el temple originan tensiones internas y pueden provocar deformaciones y a veces grietas; en efecto, las partes delgadas se enfrían de manera más rápida que las gruesas, y las capas externas antes que las internas; además, las piezas de gran tamaño no son sumergidas siempre de forma suficientemente rápida.

### 3.6.3 TEMPLE INVERTIDO.

Se trata de un procedimiento que permite compensar el sis-

tema de tensiones internas creado por el temple normal, por medio de otro sistema de tensiones producido por un calentamiento muy fuerte. Este procedimiento consiste en enfriar lentamente las piezas hasta una temperatura como la del nitrógeno líquido ( $-190^{\circ}\text{C}$ ), después del temple normal, y calentarla rápidamente utilizando chorros de vapor de gran velocidad.

La figura 18 nos muestra la distribución de las tensiones internas sobre probetas planas que han sufrido el temple normal o el temple invertido.

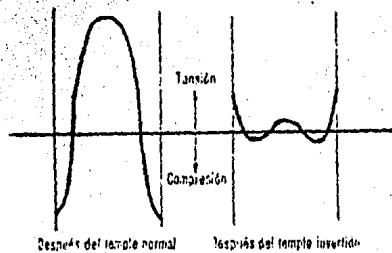


FIGURA 18.- Tensiones internas después del temple invertido.



### 3.7 TRATAMIENTO TERMICO DE MADURACION.

#### 3.7.1 Generalidades sobre la Maduración ó Envejecimiento Natural.

Llamado a veces "envejecimiento", tiene lugar espontáneamente a la temperatura ordinaria; se define por el agrupamiento de ciertos átomos.

La mayoría de las aleaciones bonificables pueden serlo a través de un tratamiento de envejecimiento natural. Sin embargo, dados los tiempos que puede implicar este tratamiento, no se suele acudir a él. Se utiliza la maduración natural en casos especiales, como por ejemplo cuando se requiere una resistencia a la corrosión aceptable. Así en las aleaciones AL-Cu hay más resistencia a la corrosión después del tratamiento de envejecimiento natural que tras el artificial.

El tratamiento de maduración natural no siempre va precedido de solubilización y temple. Esto ocurre con algunas aleaciones de moldeo en las cuales las condiciones de enfriamiento que siguen a la solidificación en coquilla mantienen en estado de solución sólida algunos constituyentes activos, que provocan el envejecimiento posterior.

#### 3.7.2 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE MADURACION.

La velocidad de maduración se halla notablemente influida por la temperatura; entre  $-10^{\circ}\text{C}$  y  $+25^{\circ}\text{C}$ , por ejemplo, la velocidad de maduración duplica su valor a medida que la temperatura se eleva unos  $5^{\circ}\text{C}$ , en el caso de una aleación laminada (L-3120) aproximadamente a la aleación 2017.

La figura 19 muestra como varía la resistencia mecánica de una aleación L-3120 (2017) en función del tiempo de mantenimien

to a diferentes temperaturas en tratamiento de maduración natural. Puede verse que para menores temperaturas se necesitan tiempos mayores de tratamiento.

Los primeros tramos de las curvas, en los cuales el material presenta unas características mecánicas muy bajas y semejantes a las del temple, son los que determinan el estado de temple fresco.

En la práctica industrial se provoca en mantenimiento del material en ese estado para su posterior conformación. Así ocurre con los remaches que se mantienen blandos, recurriendo para ello incluso a cámaras frigoríficas.

La parte posterior es la que determina el mayor valor de la resistencia mecánica, por lo que los tiempos de maduración natural se seleccionan para alcanzar aquellos valores. En el caso de la figura el tiempo de maduración a 20°C sería de unos cuatro días.

Cuando no se alcanza suficiente resistencia mecánica con estos tratamientos se acude a una deformación posterior que puede elevar la resistencia en un 5 ó 6% (este es el tratamiento T9).

La maduración natural permite una evolución favorable de las características mecánicas, con incremento de la carga de rotura, límite elástico y dureza, y con ligera disminución de los alargamientos.

### 3.7.3 INFLUENCIA DE LOS TEMPLES REPETIDOS.

Para ciertas aleaciones L-3120(2017), L3140(2024), la maduración se efectúa más rápidamente cuantas más veces se tem

ple el material.

#### 3.7.4 INFLUENCIA DE UNA DEFORMACION EN FRIO SOBRE EL MATERIAL RECIEN TEMPLADO.

La maduración natural se acelera de una manera importante por medio de la acritud, ésta última suma sus efectos a los del endurecimiento estructural, sobre todo cuando es aplicada al comienzo de este endurecimiento y entraña la creación de tensiones internas importantes.

#### 3.7.5. CARACTERISTICAS MECANICAS Y ELECTRICAS.

La aleación blanda inmediatamente después del temple, ve incrementarse rápidamente sus características; después, de manera más lenta, hasta alcanzar valores próximos al equilibrio, siendo los tiempos variables según las aleaciones, pero en general, del orden de una semana. La evolución puede proseguir todavía durante un largo período (varios años), haciéndolo, generalmente, en un sentido favorable; mejoran las cargas de rotura y los límites elásticos, sin que disminuyan los alargamientos.

- Aumenta la resistencia a la fatiga.
- Aumenta la resistividad con relación al estado templado, porque el agrupamiento de los átomos provocan un aumento de las imperfecciones de la red.

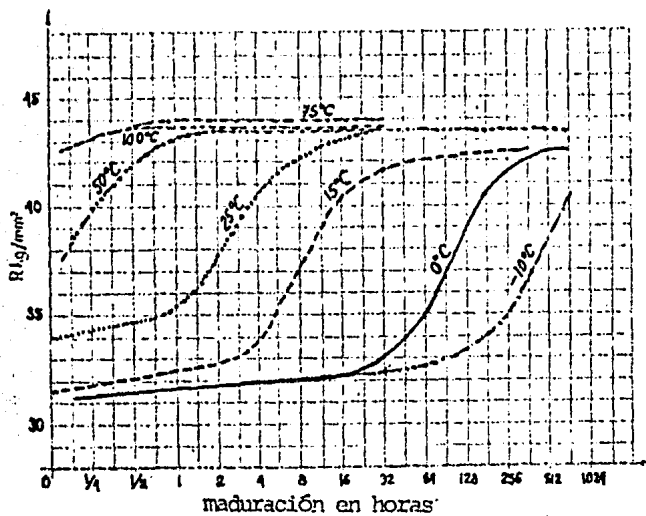


FIGURA 19.- Maduración a diversas temperaturas después del temple de la aleación L-3120 (2024) de  $-10$  a  $+160^{\circ}\text{C}$ .

### 3.8 GENERALIDADES SOBRE LA MADURACION ARTIFICIAL.

La maduración artificial no sólo se diferencia de la natural en el intervalo de temperaturas a que tiene lugar el tratamiento. Los cambios estructurales que se producen a alta temperatura son diferentes de los que ocurren a temperatura ambiente. Estas diferencias se acusan en las características mecánicas y en algunas propiedades físicas.

La figura 20 muestra una serie de curvas correspondientes a la variación de propiedades mecánicas con el tiempo a diferentes temperaturas de envejecimiento artificial, correspondientes a la aleación L-3420 (Al-1 MG-Si-Cu). Grupo Al-Mg-Si.

Las curvas correspondientes a la resistencia a lá tracc -

ión y al límite elástico presentan un máximo, lo que quiere decir que a cada temperatura hay un tiempo de envejecimiento que se puede considerar óptimo. Una vez rebasado este tiempo de maduración las propiedades vuelven a ser inferiores.

Como el tiempo es tanto más corto cuanto más alta es la temperatura, pero a la vez es más crítico, hay que buscar un equilibrio entre una duración suficientemente larga para que no haya problemas de rebasar el tiempo y a la vez suficientemente corta para que resulte económico el tratamiento.

Otro factor a tener en cuenta desde el punto de vista -- práctico y que aconseja el empleo de temperaturas bajas y tiempos prolongados en la diferente inercia térmica de las piezas cuando se utilizan en la misma carga piezas de una misma aleación pero con masas diferentes.

Por otra parte, según se use como criterio la resistencia a la tracción ó el límite elástico se puede llegar a valores diferentes. Así, para obtener la mayor carga de rotura en las curvas de la figura 20 se requerirán tratamientos de dos meses a 120°C, mientras que para el máximo de límite elástico sería precisa una semana a 150°C.

La práctica industrial sacrifica estos valores máximos, - reduciendo los tiempos excesivamente largos, fijando unas diez horas de tiempo de envejecimiento, a cambio de elevar la temperatura a 170°C, con lo cual los valores que se obtienen de todas las características mecánicas son adecuadas.

Cuando las características mecánicas no son tan importantes y si lo es la resistencia a la corrosión bajo tensión ó la

estabilidad dimensional, se acude a los tratamientos de sobre-envejecimiento que hacen disminuir enormemente la resistencia mecánica, pero no alterán la ductilidad.

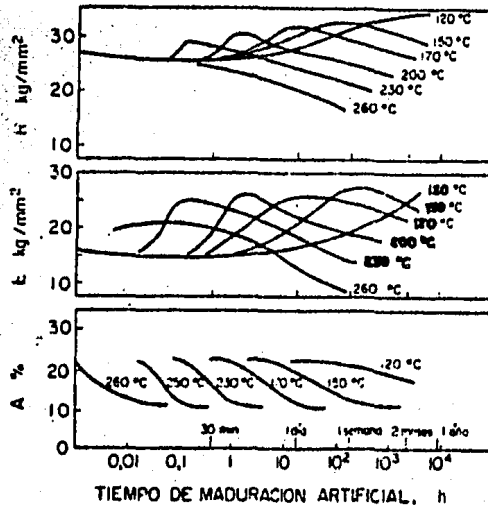


FIGURA 20.- Variación de las características mecánicas según el tiempo y la temperatura de maduración artificial. Aleación - L-3420 (1).

### 3.8.1 TRATAMIENTOS TERMICOS DE MADURACION DE LAS DIFERENTES ALEACIONES.

En la tabla 11 se pueden ver las temperaturas y tiempos de maduración recomendados para las aleaciones de forja.

En la tabla 12 se pueden ver las temperaturas y tiempos de maduración recomendados para las aleaciones de moldeo.

Ni los tiempos ni las temperaturas de estas tablas son críticos, ya que puede haber razones que motiven la elección de otros.

TABLA 11.- Temperaturas y tiempos de maduración de las aleaciones de forja

| Aleación   | Temperatura (°C)  | Tiempo      |
|------------|---|-------------|
| Al-4CuMg   | L-3120..... ambiente  | 5 días      |
| Al-4CuMgPb | L-3121..... ambiente  | 5 días      |
| Al-4CuSiMg | L-3130..... ambiente  | 5 días      |
|            | 170 ± 5   | 8-12 horas  |
| Al-4Cu1Mg  | L-3140..... ambiente  | 5 días      |
| Al-2CuNi   | L-3160..... 165 ± 10  | 10-20 horas |
|            | 200 ± 5   | 2-5 horas   |
|            | 170 ± 10  | 16-24 horas |
| Al-2CuMgNi | L-3171..... 200 ± 10  | 20-24 horas |
|            | 1 a 2 horas a 200 ± 5° C seguido de 1.5 horas 250 ± 5   |             |
| Al-2CuMg   | L-3180..... ambiente  | 5 días      |
| Al-4Cu     | L-3191..... 205 ± 5   | 15-25 horas |
| Al-4CuPb   | L-3192..... ambiente  | 5 días      |
|            | 185 ± 5   | 12-16 horas |
| Al-1MgSiCu | L-3420..... ambiente  | 5 días      |
| Al-0.6MgSi | L-3431..... 175 ± 5   | 6-10 horas  |
|            | 175 ± 5   | 4-8 horas   |
| Al-0.7MgSi | L-3441..... ambiente  | 5 días      |
|            | 215 ± 10  | 1-2 horas   |
|            | 175 ± 5   | 6-10 horas  |
| Al-1SiMg   | L-3451..... ambiente  | 5 días      |
| Al-1SiMgPb | L-3452..... 170 ± 5   | 8-12 horas  |
| Al-6SiMg   | L-3531..... 185 ± 5   | 5 horas     |
| Al-12Si1Ni | L-3541..... 170 ± 5   | 6-10 horas  |
| Al-5ZnMgCu | L-3710..... 120 ± 5   | 24 horas    |
| Al-3Zn2Mg  | L-3731..... ambiente  | 45 días     |
|            | ambiente  | 30 días     |
| Al-4Zn1Mg  | L-3741..... 8 horas a 105 ± 5° C seguido de 12 a 16 horas a 145 ± 5, debiendo empezarse la maduración 72 horas después. |             |
| Al-7ZnMgCu | L-3751..... 120 ± 5   | 24 horas    |

NOTA.- Las aleaciones que incluyen más de un tratamiento se debe a que después de los mismos se busca obtener distintos estados de temple.

TABLA 12. - Temperaturas y tiempos de maduración de las aleaciones de aluminio

| Aleación    | Temperatura (°C) | Tiempo    |  |
|-------------|------------------|-----------|--|
| Al-10CuMg   | L-2110.....      | 170 ± 5   | 18-22 horas (T5)                                   |
|             |                  | 155 ± 5   | 10-14 horas (arena) (T6)                           |
|             |                  | 170 ± 5   | 7-9 horas (coquilla) (T6)                          |
| Al-4CuMgTi  | L-2140.....      | ambiente  | 5 días   |
|             |                  | 155 ± 5   | 8-12 horas   |
| Al-4Cu2NiMg | L-2150.....      | 170 ± 5   | 20-25 horas (T5)                                   |
|             |                  | 200 ± 5   | 4-6 horas (T6)                                     |
|             |                  | 240 ± 10  | 1-3 horas (T7)                                     |
| Al-10Mg     | L-2310.....      | ambiente  | 10 horas   |
| Al-3MgSi    | L-2341.....      | 160 ± 5   | 8-10 horas   |
| Al-12Si2Ni  | L-2550.....      | 200 ± 5   | 8-12 horas (T5)                                    |
|             |                  | 170 ± 5   | 12-20 horas (T6)                                   |
| Al-12SiNi   | L-2551.....      | 210 ± 5   | 8 horas (T5)                                       |
|             |                  | 175 ± 5   | 6-12 horas (T6)                                    |
|             |                  | 250 a 300 | el necesario para obtener una dureza HB 61-85 (T7) |
| Al-10SiMg   | L-2560.....      | 160 ± 5   | 8-16 horas   |
| Al-5SiMg    | L-2570.....      | ambiente  | 5 días   |
|             |                  | 160 ± 5   | 6-12 horas   |
| Al-5SiCuMg  | L-2571.....      | 225 ± 5   | 8 horas (T5)                                       |
|             |                  | 155 ± 5   | 3-6 horas (T6)                                     |
|             |                  | 155 ± 5   | 8-10 horas (arena) (T61)                           |
|             |                  | 170 ± 5   | 14-18 horas (coquilla) (T61)                       |
| Al-5SiCu    | L-2610.....      | 165 ± 5   | 8-16 horas   |
|             |                  | 225 ± 5   |  |
| Al-7SiMg    | L-2651.....      | 155 ± 5   | 8 horas (T5)                                       |
|             |                  | 155 ± 5   | 4 horas (T6)                                       |
|             |                  | 245 ± 5   | 3 horas (arena) (T7)                               |
|             |                  | 225 ± 5   | 8 horas (coquilla) (T7)                            |
| Al-5ZnMg    | L-2710.....      | 180 ± 5   | 10 horas   |
| Al-6SnNi    | L-2910.....      | 215 ± 5   | 5-9 horas  |



Además hay casos en que la maduración artificial ha ido precedida de una maduración natural parcial o total, por haber transcurrido un tiempo desde que finalizó el temple hasta que se dió el envejecimiento artificial. Este tiempo de espera no influye prácticamente en las propiedades mecánicas en las mayorías de las aleaciones.

Para otras, sin embargo, como las Al-Si-Mg, el tiempo de espera es perjudicial obteniéndose características mecánicas inferiores que si hubiera envejecimiento inmediatamente después de templar (esto se atenúa si se añaden a las aleaciones pequeñas cantidades de Cu ó de Sn). Para las aleaciones Al-Zn-Mg-Cu el tiempo de espera es favorable dando lugar a mejores características mecánicas si la maduración artificial se realiza después de una maduración natural bastante completa.

Hay aleaciones que reaccionan al tiempo de espera de forma compleja. Así la aleación Al-3Cu-Ni, L-3170, presenta un comportamiento desfavorable para tiempos de espera de uno ó dos días, pero si se da un tratamiento de uno o dos minutos a 190°C inmediatamente después de templar, no hay influencia del tiempo de espera posterior. En caso de no dar dicho tratamiento corto de maduración artificial previa es preferible esperar hasta diez ó quince minutos después del temple.

Algunas aleaciones como las L-3420 (Al-1MgSiCu) y la L-3441 (Al-0.7MgSi) = 6063 & 6463 son relativamente insensibles a la velocidad de temple. Estas aleaciones, después del tratamiento de conformado en caliente, son enfriadas al aire ó templadas en agua. Los cambios estructurales que se producen en ellas por este tratamiento térmico son equivalentes a que

hubiesen tratado por un envejecimiento artificial normal, obteniéndose las mismas características mecánicas.

Las propiedades de las piezas coladas son mejoradas por tratamientos de bonificado semejantes a los de las piezas forjadas. Los únicos casos en que no tienen aplicación el tratamiento de bonificado son los de piezas de fundición inyectada.

### 3.8.2 PRECAUCIONES A TOMAR EN EL TRATAMIENTO DE MADURACION ARTIFICIAL.

Las temperaturas de tratamiento de maduración artificial deben de mantenerse perfectamente reguladas dentro de una oscilación de  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ .

Cuando la carga es de múltiples piezas se debe de cuidar la disposición de las mismas y deben de situarse varios termopares para obtener un control más efectivo de la temperatura del tratamiento. Así se evitarán heterogeneidades en los lotes.

El período de mantenimiento debe de contarse a partir del momento en que todos los termopares alcanzan la misma temperatura. Si tardan mucho en alcanzarla puede correrse el riesgo de una sobremaduración, como ocurre cuando se utiliza una carga demasiado compacta ó bien se emplean hornos de capacidad calorífica inadecuada. En el caso de no usar termopares dentro de la carga se corre el peligro de utilizar tiempos de permanencia inferiores a los requeridos y no lograr que se complete el proceso de maduración.

La velocidad de calentamiento puede influir en las características finales. El efecto es semejante al que corresponde a los tiempos de espera a temperaturas ambiente y puede decirse que, por regla general, no tiene importancia para las aleacio-

nes Al-Cu-Mg y Al-Zn-Mg-Cu, es desfavorable para las aleaciones Al-Mg-Si y actúa favorablemente en las aleaciones de Al-Zn-Mg. Sin embargo, hay muchas excepciones, sobre todo en productos extruídos o forjados.

Para evitar estos inconvenientes se puede regular el horno a una temperatura superior antes de introducir las piezas, para que se le vuelva a la temperatura deseada al meter las piezas. Es también norma de buena práctica no cargar excesivamente el horno.

En todos los casos es siempre posible que se realice un tratamiento incorrecto. Si la duración fué excesiva ó la temperatura demasiado elevada, o bién ambos casos a la vez, se tendrá una caída notable de las características mecánicas. En tales casos es necesario dar un tratamiento nuevo completo de bonificado para recobrar las piezas. Por el contrario, cuando las piezas hayan sufrido una maduración incompleta, se puede salvar por maduraciones posteriores ya que en general los tratamientos de maduración pueden considerarse como aditivos. Naturalmente, este segundo proceso aditivo habrá de ser fijado tras unos ensayos previos.

### 3.8.3 SUPERMADURACION ARTIFICIAL.

Mientras que en el caso de la maduración natural no hay peligro de que la evolución lleve a una disminución de las características, puede ocurrir que una maduración artificial demasiado prolongada ó efectuada a una temperatura demasiado elevada, traiga como consecuencia una disminución de todas las características; ya que, el alargamiento puede asimismo disminuir antes de aumentar de nuevo.

Si la maduración y/o la temperatura aumenta todavía, se lle

ga poco al estado de recocido o a un estado próximo a él.

La evolución de las características viene resumida en el grupo de curvas de la siguiente figura (21).

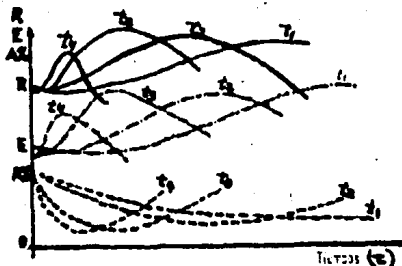


FIGURA 21.- Maduración y supermaduración artificial.

Salvo para el L-3130 ó (2014) ó (Al-4 CuSiMg), cuya fórmula se halla establecida de manera que puede ofrecer después de la maduración natural las características de la aleación -- (3120) ó (2017) ó (Al-4 CuMg), y después de la maduración artificial las del (L-3140) ó (Al-4CuLMG) (2024), las aleaciones del tipo duraluminio no deben someterse a una maduración artificial. La maduración artificial de estas aleaciones está influida por el exceso, entre otras cosas, de pequeñas variaciones en el contenido de silicio.

### 3.8.4 COMPARACION ENTRE LOS ESTADOS DE MADURACION ARTIFICIAL Y NATURAL.

Mediante la maduración artificial, especialmente para las aleaciones transformadas, se alcanzan valores más elevados que -- con la maduración natural, para las cargas de rotura (5 a 10%), - límites elásticos (25% y más) y durezas (5 a 10%), pero sensiblemente menos elevadas para los alargamientos (aproximadamente del 50%).

La resistencia a la fatiga resulta aproximadamente igual a la maduración natural debido a la aparición de precipitados, tanto más características cuando se eleva la temperatura.

### 3.8.5 INFLUENCIA DE LA DILATACION ENTRE EL TEMPLE Y LA MADURACION ARTIFICIAL.

Para ciertas aleaciones de la familia Al-Si-Mg, el tiempo que transcurre entre el temple y la maduración artificial influye notablemente sobre las características finales de la aleación. Se trata de un caso particular de un fenómeno más general, parece que en muchas aleaciones de aluminio con endurecimiento estructural, una primera maduración natural a temperatura relativamente baja, orienta el endurecimiento posterior a temperatura -- más elevada en un sentido favorable, según las aleaciones y temperaturas.

### 3.8.6 PREMADURACION ARTIFICIAL.

En el caso en que la dilatación sea desfavorable, se aplica un tratamiento de premaduración de muy corta duración (unos minutos, efectuado inmediatamente después del temple). Este - tratamiento permite frenar la maduración natural desfavorable y esperar (una semana aproximadamente) , entre el temple y la -

maduración artificial, sin perjuicio sensible para los valores de E y R.

Sin embargo, la pre-maduración artificial endurece, aunque poco, la aleación, siendo más importante cuando más prolongado sea el tratamiento; las operaciones de enderezado, aplanado, -- etc., pueden llegar a ser difíciles; por consiguiente, es necesario buscar un compromiso entre dos exigencias difícilmente -- conciliables: plasticidad y buena aptitud a la maduración artificial posterior.

**Se preconiza.**

-Una premaduración artificial de dos a cuatro minutos a 180-200°C para la aleación ( 6061) de evolución rápida;

-Una premaduración artificial de cuatro a ocho minutos a 180-200°C para la aleación L-3451 (Al-1SiMg) que es equivalente a la aleación 6151 de evolución más lenta.

Puede también insertarse, ventajosamente, un tratamiento de maduración artificial, después del temple, en los tratamientos de las Al-Mg-Si por temple-acritud-restauración.

En otros casos, por el contrario, los efectos de la maduración artificial pueden ayudar a los de la maduración natural, mejorando finalmente todas las características mecánicas; tal es el caso, por ejemplo de las aleaciones (2618).

### 3.8.7 ENFRIAMIENTO POSTERIOR A LA MADURACION ARTIFICIAL.

La velocidad y el modo de realizar el enfriamiento después de la maduración artificial, no influyen sobre las características finales.

En el caso de un enfriamiento en agua, es necesario compro

bar la ausencia total de depósitos y un secado rápido.

### 3.9 RECOCIDO

#### GENERALIDADES.

Recocer completamente un metal significa que, mediante un calentamiento de una determinada duración y una temperatura definida, se le confiere la plasticidad máxima, disminuyendo su límite elástico lo más posible, de manera que se obtenga la mejor capacidad de deformación. Este estado corresponde a una recristalización completa y el tratamiento se aplica, ya en el curso de la fabricación (recocido intermedio), y al fin de la fabricación (recocido final); generalmente, el recocido completo se efectúa sobre un metal con acritud, al que se quiere devolver completamente sus posibilidades de deformación.

La recristalización puede ser total, sin que se llegue a la óptima plasticidad; por ejemplo un tratamiento de puesta en solución antes del temple puede recristalizar completamente al metal sin dificultar su endurecimiento estructural por precipitación en caliente o en frío; si se requiere entonces recocer completamente un metal templable, endurecido por acritud, por maduración artificial o natural, es necesario dar un recocido seguido de un enfriamiento.

La elevación de resistencia mecánica que se alcanza mediante la deformación en frío o por procesos de endurecimiento, puede eliminarse mediante un recocido a unos 300 a 500°C. Este tratamiento ablandador se hace necesario cuando un material que ha sido deformado hasta el máximo de capacidad, ha de ser sometido a mayor deformación. Para poder ahorrar costos innecesarios se recomienda que los semiproductos que han de ser sometidos a deformaciones muy grandes estén en estado muy blando.

Esto es válido también para aleaciones endurecidas, que posteriormente a la deformación pueden ser sometidos a un tratamiento de bonificación. Como el proceso de recristalización que tiene lugar en este ablandamiento presenta muchas peculiaridades, se hace preciso conocerlo detenidamente para dar estos tratamientos.

Si se observan las variaciones que se producen en las características, a partir de un estado de acritud en función de la permanencia a temperatura ordinaria y la elevación de la temperatura, se observan cinco fases que son:

3.9.1. Distensión Espontánea. Cuando se ha terminado de dar la última deformación al material en frío, donde su acritud ha sido importante, un metal recién laminado, estirado o trefilado, se ve que los valores de límite elástico y de la carga de rotura disminuyen espontáneamente a temperatura ordinaria (1 a 15 días, según el tipo de aleación). Si no se eleva la temperatura de manera notable, los valores de estas características llegan a ser prácticamente definitivos y, salvo en casos particulares, como la recristalización espontánea de aluminio refinado, la evolución se debe a una mejora en el reparto de tensiones, sin que se pueda observar el menor cambio estructural.

A veces, un simple descanso de varias horas permite dar una nueva deformación o realizar un mecanizado sobre un metal que ha llegado al límite de sus posibilidades plásticas, o cuyas características varían por liberación de tensiones demasiado recientes.

3.9.2 Restauración. Se le dá el nombre de restauración a los tratamientos que dan lugar a los tamaños de grano indicados en



la figura 22. Pueden no ser completos, es decir, en función de las necesidades de mayor o menor blandura del material, puede darse un tratamiento en el que sólo se reduzcan las tensiones internas y no se llegue a producir ningún grano nuevo, es por eso que el recocido recibe éste nombre.

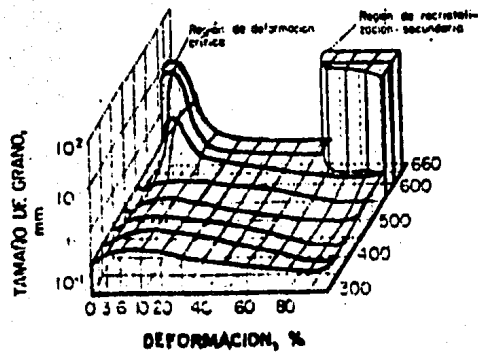


FIGURA 22.- Diagrama de deformaciones-tamaños de grano-temperaturas de recristalización en el alminio puro.

3.9.3. Recristalización Primaria. Si además de la restauración aparecen granos nuevos, y el recocido se prolonga ó si la temperatura se eleva, estos granos nuevos crecen rápidamente - hasta llegar al contacto con los otros granos, pero sin llegar a recristalizar todo el material, se habla de una recristalización primaria.

3.9.4 Recristalización Secundaria. Se le llama así, cuando para acritudes elevadas (laminado, trefilado). La temperatura supera ciertos límites, se produce la reaparición de una nueva recristalización que se caracteriza por el crecimiento exagerado de algunos granos, este crecimiento invade el origen de la recristalización primaria. Este fenómeno se produce fácilmente para el aluminio de baja pureza, y en sus aleaciones es muy raro que ocurra.

3.9.5 Quemado. Se produce el quemado cuando el calentamiento se hace por encima de la temperatura de recristalización -- que se indican para cada aleación o metal.

Si el grado de calentamiento es suficientemente pequeño es posible recuperar las propiedades perdidas por una nueva deformación en frío del material (metal) siempre y cuando su capacidad de deformación **no haya variado.**

### 3.10 RECRISTALIZACION DEL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES.

El ablandamiento del aluminio tras deformación en frío se consigue por un mantenimiento entre 300 y 500°C. Para evitar que crezca excesivamente el grano en este tratamiento debe procurarse que el grado de deformación sufrida previamente por el material sea superior al 50%. En ningún caso debe ser inferior al 20%. Al llevarse a cabo el recocido se debe de estar el menor tiempo posible en el intervalo entre 200 y 300°C, ya que en dicho intervalo el proceso de recristalización es crítico, y es mayor la tendencia a formarse pocos granos. Para evitar los tamaños de grano grandes hay que prescindir de temperaturas elevadas de recocido, tiempos largos y enfriamientos muy lentos.

En la tabla 13 se dan los recocidos de restauración, recristalización y coalescencia de diversas aleaciones de forja.

En esta tabla se indica temperatura y tiempo de recocido y medio de enfriamiento después del tratamiento. Para la temperatura, se dá un intervalo, porque la elección de la temperatura y de la duración del tratamiento dependerá en cada caso del grado de deformación previa que haya sufrido el material.

Las temperaturas de restauración estan en el mismo caso, - pero aquí es posible subir la temperatura más cuando la deformación es muy pequeña; ya que no se llega a recristalizar el material.

Para los tratamientos de restauración se puede enfriar --- siempre en aire por ser muy baja la temperatura del recocido.

En la tabla se indica el valor mínimo de la deformación, - que en definitiva establece la acritud, para el cual es posible el tratamiento de recristalización sin que conduzca a un tamaño de grano muy grande.

Como es indispensable calentar rápidamente la carga que se trate de recocer, ya que una velocidad de calentamiento baja -- puede favorecer un tamaño de grano grande, hay que tomar ciertas precauciones en los hornos. Los hornos han de tener una -- buena circulación de aire y no deben cargarse excesivamente, la carga del horno debe realizarse en caliente y a una temperatura netamente superior a la del recocido, por ejemplo a 50 ó 70°C - por encima, bajando posteriormente el regulador del horno a la temperatura correspondiente al tipo de aleación.

En muchas aleaciones bonificables la temperatura de recocido puede implicar un proceso de solubilización parcial de deter

minados elementos de la aleación, que tras un enfriamiento rápido puede mantenerse.

La aleación en tal estado de sobresaturación puede endurecerse por envejecimiento natural. En estos casos el enfriamiento debe ser hecho en aire en calma, procurando que la deformación siga a dicho enfriamiento lo antes posible. Si la deformación no se va a dar rápidamente conviene enfriar en el horno y lentamente.

En general, la velocidad de enfriamiento de los hornos normales es de 35°C/hora, con lo cual no es necesario poseer instalaciones especiales. Este enfriamiento debe proseguirse hasta que la temperatura es suficientemente baja (250°C) para que se pueda enfriar el material al aire sin que haya problemas posteriores de enfriamiento.

En el caso de las aleaciones de moldeo, el recocido no modifica sustancialmente las características mecánicas correspondientes al estado bruto de colada, dándose el tratamiento para eliminar tensiones residuales producidas durante la solidificación y para estabilizar las dimensiones y la estructura, lo cual es importante en el caso de piezas destinadas a prestar servicios a temperaturas elevadas.

TABLA 13.-Condiciones de recocido de las aleaciones de aluminio de forja.

| Aleación    | RECOCIDO DE CUALESCENCIA |      |       | RECOCIDO DE CRISTALIZACION TOTAL EN MATERIAL ACBE |         |       | RECOCIDO DE RESTAURACION EN MATERIAL ACBE |         |      |
|-------------|--------------------------|------|-------|---|---------|-------|---|---------|------|
|             | T(°C)                    | t(h) | Enfr. | Acrit. min. °C                                    | T(°C)   | t(h)  | Enfrim.                                   | T(°C)   | t(h) |
| L-3051..... | —                        | —    | —     | 20  | 320-380 | 1/2-2 | aire                                      | 250-280 | 1-4  |
| L-3120..... | 420-430                  | 2    | A     | 15  | 360-400 | 1-2   | lento (B)                                 | 270-300 | 2-8  |
| L-3130..... | 420-430                  | 2    | A     | 15  | 360-400 | 1-2   | lento (B)                                 | 270-300 | 2-8  |
| L-3140..... | 420-430                  | 2    | A     | 15  | 360-400 | 1-2   | lento (B)                                 | 270-300 | 2-8  |
| L-3160..... | 420-430                  | 2    | A     | 15  | 360-400 | 1-2   | lento (B)                                 | 270-300 | 2-8  |
| L-3320..... | —                        | —    | —     | 20  | 340-380 | 1/2-2 | aire                                      | 250-280 | 1-4  |
| L-3390..... | —                        | —    | —     | 20  | 340-380 | 1/2-2 | aire                                      | 250-280 | 1-4  |
| L-3710..... | 360-370                  | 2    | C     | 15  | 360-400 | 1-2   | lento (B)                                 | 270-300 | 2-8  |
| L-3810..... | —                        | —    | —     | 20  | 360-400 | 1/2-2 | aire                                      | 260-300 | 1-4  |

- (A) Enfriamiento muy lento, 10 a 25°C/h. hasta aproximadamente 250°C, seguido de un enfriamiento más rápido, 50°C/h hasta alrededor de 150°C, en que puede sacarse del horno.
- (B) Enfriamiento en el horno hasta unos 250°C, con una velocidad de enfriamiento menor de 35°C/h, seguido de un enfriamiento al aire por debajo de esta temperatura.
- (C) Enfriamiento lento, 20°C/h hasta unos 230°C, manteniendo esta temperatura durante 4 h, seguido de un enfriamiento a 40°C/h hasta los 150°C, en que ya se puede sacar del horno.

En la tabla 14 se da una relación de los tratamientos térmicos de diferentes aleaciones de moldeo, para estabilizar y eliminar tensiones.

El enfriamiento de las piezas moldeadas después del recocido debe ser lento para evitar que se produzcan de nuevo tensiones internas ó cambios dimensionales contrarios a la finalidad del recocido.

TABLA 14.-Temperaturas de recocido de las aleaciones de moldeo,

| Aleación                 |             | T(°C)   | Aleación                 |             | T(°C)   |
|--------------------------|-------------|---------|--------------------------|-------------|---------|
| Al-10CuMg                | L-2110..... | 300-320 | Al-7CuSi                 | L-2130..... | 300-320 |
| Al-4CuAl <sub>2</sub> Ti | L-2140..... | 300-360 | Al-4Cu <sub>2</sub> NiMg | L-2150..... | 320-350 |
| Al-10Mg                  | L-2310..... | 320-380 | Al-6Mg                   | L-2331..... | 320-380 |
| Al-3MgSi                 | L-2341..... | 320-380 | Al-12Si                  | L-2520..... | 360-400 |
| Al-12SiCu                | L-2350..... | 350-390 | Al-12Si <sub>2</sub> Ni  | L-2550..... | 350-390 |
| Al-12SiNi                | L-2561..... | 350-390 | Al-10SiMg                | L-2560..... | 340-380 |
| Al-10SiMgFe              | L-2561..... | 340-380 | Al-5SiMg                 | L-2570..... | 330-370 |
| Al-5SiCuMg               | L-2571..... | 330-370 | Al-5Si <sub>3</sub> Cu   | L-2610..... | 330-370 |
| Al-6Si <sub>4</sub> Cu   | L-2620..... | 340-380 | Al-7SiMg                 | L-2651..... | 340-380 |

### 3.11 RECOCIDO DE COALESCENCIA.

El recocido de coalescencia tiene por objeto precipitar - totalmente todos los constituyentes activos, dando lugar a una estructura completamente estable. Las temperaturas a las que se da el recocido para las diferentes aleaciones han sido indicadas en la tabla 13.

La velocidad de enfriamiento debe ser en todos los casos muy baja, ya que al ser la temperatura muy alta, si el enfriamiento fuese rápido, parte de los constituyentes quedarían en solución sobresaturada y habría un endurecimiento posterior de la aleación por maduración natural.

### 3.12. DIVERSOS TRATAMIENTOS TERMICOS.

#### 3.12.1. ESTABILIZACION.

Las propiedades mecánicas de todos los tratamientos, en

entre ellos el recocido, de las aleaciones de Al-Mg (5052) cambian ligeramente durante un período de tiempo. A este cambio se le llama "suavización" y se nota por el aumento en la ductibilidad y ligera disminución en la dureza y resistencia. Por eso para adquirir o corregir la ductilidad y para establecer la aleación en una condición estable anterior debe de recibir un tratamiento de "estabilización" a 150°C (302°F) por un período de 4 horas.

### 3.12.2 RELEVACION DE ESFUERZOS.

Las piezas coladas que son usadas en aplicación donde involucramos elevadas temperaturas ó donde requerimos tolerancias de maquinado sumamente estrictas es necesario emplear un relevado de esfuerzos y un tratamiento de "decrecimiento", el cual involucra calentamiento de la pieza colada a una temperatura de 280°C (536°F) por 10 horas.

### 3.12.3 HOMOGENIZACION.

Los lingotes de las aleaciones de fundición tratables térmicamente en su condición original, tienen sus constituyentes (cristales) distribuidos heterogeneamente en largas partículas. Para prevenir una distribución más uniforme de los constituyentes solubles y para facilitar la fabricación, estos lingotes usualmente son calentados hasta la temperatura de tratamiento térmico de disolución, a este proceso se le llama "homogenización", a esta temperatura por 8 hasta 16 horas y entonces es enfriado lentamente a temperatura ambiente.

### 3.12.3.1 CONSECUENCIAS DE LA HOMOGENIZACION.

Los tratamientos de homogenización son tanto más eficaces si se aplican en el estado fundido, o con una ligera acritud, dando lugar a la siguiente variación de propiedades:

Las aleaciones "responden" más rápidamente a los tratamientos térmicos posteriores (recocido, temple, maduración artificial).

Las características mecánicas son generalmente mejoradas.

Mejora la plasticidad en caliente, la laminación, la extrusión, la forja, son más fáciles de realizar.

Se mejora la maleabilidad en el estado recocido; disminuye el límite elástico y aumenta el alargamiento.

Aumenta la resistencia a la fatiga.

Aumenta la resistencia a la fluencia.

Disminuyen las temperaturas de recristalización, debido al empobrecimiento de la solución sólida.

La recristalización es más fina, porque la precipitación impide el crecimiento de los granos.

### 3.13 EQUIPO DE TRATAMIENTO TERMICO.

La necesidad de disponer con gran precisión de la temperatura de tratamiento y de conseguir en el menor tiempo posible el calentamiento de las piezas a tratar, hace preciso disponer de instalaciones para el tratamiento que tengan una constancia de temperaturas de  $\pm 3$  a  $5^{\circ}\text{C}$ .

Los tratamientos térmicos caen dentro de dos clases de hornos. Los hornos de aire, en el cual el aire caliente es circulado alrededor de el material a tratar, y los hornos de



sal son aquellos que contienen un recipiente de sales derretidas o disueltas y en el cual el material es sumergido.

Ambos tipos de hornos pueden ser calentados por electricidad, gas, aceite (petróleo) ó combustible sólido y el rango de diseño y tamaño casi ilimitado. Los requerimientos exactos dependen de la naturaleza de lo que se va a trabajar para estar comprometido y los productos para ser tratados térmicamente.

### 3.13.1 HORNOS DE AIRE.

Los hornos de aire de diferente tipo con calefacción eléctrica o por combustible (ésta ha de ser indirecta ya que los gases de combustible en la atmósfera del horno a altas temperaturas producen ampollas) son utilizados en gran medida para el tratamiento térmico del aluminio y sus aleaciones. Son adecuados especialmente para tratamientos de piezas con paredes delgadas, así como para piezas de forma complicada, como piezas de fundición, en las cuales sería difícil eliminar los restos de sales si se tratará en hornos de sales fundidas. Es muy importante que para conseguir un rápido calentamiento y una buena homogenización de la temperatura se tenga una buena circulación de aire. Los hornos de aire son especialmente ventajosos para tratamientos a temperaturas entre 100 y 200°C, y para temperaturas superiores a los 520°C a partir de la cual no se aconsejan los de sales. En los hornos de aire las piezas han de ser situadas a suficiente distancia unas de otras y sobre todo separadas de las paredes del horno. En estos hornos el tiempo de calentamiento es superior al de los de sal.

### 3.13.2 HORNOS DE SALES.

Son estos los hornos más adecuados para el tratamiento térmico. Consisten en un recipiente que contienen sales fundidas, generalmente mezcla de nitratos sódico y potásico, a la temperatura deseada. La gran capacidad térmica de estos baños fundidos facilita la regulación de la temperatura y posibilita que la pieza a tratar alcance la temperatura deseada en corto tiempo - gracias a la buena y uniforme distribución de calor.

Para el recipiente contenedor de las sales ha de elegirse un material resistente a la oxidación y a la corrosión, como chapa para calderas acero inoxidable. La proporción en que se encuentran los nitratos de sodio y de potasio depende de la temperatura y fluidez deseada. En la tabla 15 se presentan varios baños empleados corrientemente.

Aún cuando hay temperatura de trabajo que pueden ser de cerca de 600°C, es buena práctica procurar que la temperatura del baño de sales no sobrepase nunca los 520°C.

Los nitratos que se utilizan para estos hornos han de tener una pureza determinada. Los cloruros y cloratos no deben exceder, calculados como sal de sodio, el 0.5% la suma de sulfatos y fosfatos, también como sal de sodio no excederá el 0.25%, siendo la materia insoluble en agua inferior al 0.2%; la humedad no excederá del 1.0%. El contenido de nitratos calculado sobre una muestra seca ha de ser superior al 98% y el valor de pH ha de estar comprendido entre 6 y 7.5, medido sobre una solución al 1.0% en agua destilada.

El calentamiento mejor es por medio de resistencia eléctrica interior con espirales de calefacción montadas en el interior de cilindros no oxidables o mediante resistencia eléctrica en las paredes exteriores. Por razones de tipo económico puede usarse también como elementos calefactores, el gas, carbón o combustibles líquidos. En todos estos casos debe evitarse el

peligro de un sobrecalentamiento local de las paredes del recipiente.

Los baños de sales son potencialmente muy peligrosos por lo que se deben de tomar determinadas precauciones. Los operarios han de ser personas cuidadosamente preparadas. Deben protegerse de salpicaduras y goteos que producen quemaduras. El local ha de estar adecuadamente ventilado para evitar la exposición a los vapores nitrosos que se producen durante la descomposición de los nitratos.

Hay que impedir que queden piezas en el baño. Especialmente hay que cuidar que no se desprendan fragmentos de las piezas que se tratan y que queden en el fondo del crisol. Cuando el baño contiene estas piezas ó restos metálicos se le suele trasvasar a otro recipiente en estado líquido para que las partículas que se desea eliminar queden en el fondo. Una vez retirada así la mayor parte de las sales el resto puede disolverse y filtrarse, eliminando posteriormente el agua por evaporación.

Por el gran poder oxidante de los nitratos hay que evitar cualquier contacto con agentes reductores, razón por la cual no se aconseja tratar en estos baños las aleaciones con magnesio. También hay que evitar la introducción de agua o compuestos orgánicos por lo que las piezas que han de ser tratadas en estos hornos tienen que ser cuidadosamente limpiadas.

En caso de que se produzca incendio en estos hornos se debe de utilizar arena como elemento extintor. En ningún caso ha de usarse agua.

Los baños deben renovarse con cierta periodicidad. Si no son de funcionamiento continuo no se aconseja apagarlos. Es preferible reducir la temperatura ligeramente y mantener las sales en estado líquido, con lo cual se reducen los peligros de ataque al crisol así como las tensiones debidas a la solidificación. En cualquier caso esto responderá a consideraciones económicas.

TABLA 15. Algunas composiciones empleadas en baños de sales (según J. Kolobney)

| Composición del baño %  | Punto de Fusión °C | Temperatura de trabajo °C | Aplicaciones                     |
|---|--------------------|---------------------------|----------------------------------|
| NO <sub>3</sub> K 55,2 ....<br>NO <sub>2</sub> Na 44,8 ....                                 | 141                | 160-400                   | Maduración artificial y recocido |
| NO <sub>3</sub> K 53,0 ....<br>NO <sub>3</sub> Na 7,0 ....<br>NO <sub>2</sub> Na 40,0 ....  | 142-148            | 180-540                   | Solubilización y recocido        |
| NO <sub>3</sub> Na 18,0 ....<br>NO <sub>3</sub> K 53,5 ....<br>NO <sub>2</sub> Na 28,5 .... | 170                | 200-540                   | Solubilización y recocido        |
| NO <sub>3</sub> Na 45,8 ....<br>NO <sub>3</sub> K 54,2 ....                                 | 218                | 240-540                   | Solubilización y recocido        |
| NO <sub>3</sub> Na 100,0 ....   | 310                | 330-600                   | Solubilización y recocido        |
| NO <sub>2</sub> K 100,0 ....  | 336                | 350-600                   | Solubilización y recocido        |

### 3.13.3 TANQUES DE ENFRIAMIENTO

La velocidad de temple es magnitud crítica en el conjunto del tratamiento térmico de bonificado. Por ello la disposición y naturaleza de los baños de temple tiene especial importancia.

El agua es el fluido de enfriamiento más comúnmente usado, con temperaturas generalmente inferiores a 40°C. En algunos casos se calienta incluso hasta 100°C. Esta agua se puede aplicar por pulverización o por inmersión.

Los tanques utilizados cuando se recurre a la inmersión suelen estar fabricados de aluminio ó acero inoxidable. Si son de acero al carbono deben llevar revestimiento superficial para evitar la corrosión del tanque que puede originar manchas en las piezas templadas.

El volumen del baño debe ser tal que toda la carga pueda quedar completamente sumergida en él. Además no debe de sobrecalentarse hasta los 40°C. Si es preciso, se montan circuitos de recirculación de agua.

La uniformidad de la temperatura en el baño es de gran importancia para obtener las características óptimas de las piezas templadas.

Para asegurar una rápida inmersión de las piezas, el tanque debe de estar adyacente al horno correspondiente. En el caso de hornos de circulación forzada de aire, los tanques de enfriamiento deben estar incorporados al horno, con el fin de permitir la descarga directa de las piezas. En cualquier caso debe estar situado en forma tal que la facilidad de maniobra en el temple este garantizada.

Los tanques deben poseer un sistema de desague y limpieza, para eliminar los agentes que puedan contaminar las piezas y producir decoloraciones, corrosión, etc..

### 3.14 DEFECTOS INTRODUCIDOS EN LOS TRATAMIENTOS TERMICOS Y SU CONTROL.

El tratamiento térmico incorrecto puede dar lugar a defectos claramente visibles a simple vista ó trás una observación metalográfica. A veces, piezas que parecen haber sido tratadas en las mejores condiciones presentan estos defectos. En tales casos ha de buscarse la razón en los tratamientos de conformado; -colada ó incluso de fabricación de la aleación.

También ha de considerarse defectuoso el tratamiento cuando las propiedades finales que se obtienen, sean mecánicas, sean químicas, etc., no respondan a lo que se deseaba con el tratamiento.

La enumeración de defectos y de motivos de los mismos sería interminable por lo que en la siguiente tabla 16 se han recogido aquellos que son más habituales. En dicha tabla se indica también el tratamiento en el que se ha puesto de manifiesto el defecto, las razones que le han podido motivar y la forma de evi-

tar que se pueda volver a producir.

Conviene aclarar que una precaución inmediata cuando se tienen dudas sobre las razones de algún fallo, es comprobar -- que la aleación tiene la composición que se pensaba y que el tratamiento dado es realmente el que le corresponde.

Tabla 16.- Defectos que aparecen en piezas tratadas y origen de los mismos

S: solubilización; T: temple; M: maduración; R: recocido

| Defecto                                      | Tratamiento | Origen  | Observaciones  |
|--|-------------|---|--|
| Ampollas                                     | S y T<br>R  | Difusión de gases retenidos en el lingote durante la colada.  | Se trata de un material originalmente defectuoso. Analizar gases.  |
| Ampollas                                     | S y T<br>R  | Absorción de gases del horno, como vapor de agua o productos de combustión.   | No emplear tiempos y temperaturas innecesariamente elevados; precalentar el material para evitar condensaciones; eliminar de la superficie del material productos contaminantes. En caso necesario introducir en la atmósfera del horno inhibidores como creosota, fluoruro amónico o fluoroborato sodico. |
| Ampollas                                     | S y T<br>R  | Discontinuidades superficiales debidas a una laminación o extrusión defectuosas.  | Defecto de conformación.   |
| Ampollas                                     | S           | Exceso de temperatura de solubilización. Piezas quemadas.   | Hacer control de termopares y equipos de medida del horno. Seleccionar mejor la temperatura de solubilización.   |
| Quemado                                      | S           | Exceso de temperatura de solubilización   |  |
| Quemado                                      | S           | Calentamiento del material hasta la temperatura de solubilización de forma rápida y/o poco uniforme.  | En piezas de forma heterogénea no usar calentamientos superiores a 3° C/min. en las proximidades de la solubilización.   |
| Oxidación                                    | S           | Tiempos y temperaturas elevados.  | Reducir al mínimo posible la temperatura de tratamiento.   |
| Oxidación                                    | S           | Atmósfera del horno inadecuada.   | Evitar vapor de agua en el horno. Usar fluoroborato sodico para reducir los efectos de la atmósfera.   |
| Grietas superficiales                        | S           | Sobrecalentamiento excesivo. Quemado.   | Controlar la temperatura del horno.  |
| Grietas superficiales                        | T           | Velocidad de temple excesivamente grande. Especialmente para secciones gruesas o irregulares.   | Emplear velocidades de temple menores.   |
| Grietas superficiales                        | S           | Tiempo de transición excesivamente corto.   | Aumentar tiempo de transición.   |
| Grietas superficiales                        | S y T       | Microgrietas o microporosidades preexistentes en el material que aumentan con los sucesivos tratamientos térmicos. Especialmente en piezas soldadas.  | Controlar la existencia de microgrietas o microporosidad antes del tratamiento.  |
| Grietas en estrella                          | S y T       | Sobrecalentamiento que provoca la fusión del metalico y la aparición de una red intergranular de liquido. Las fuertes tensiones de contracción debidas al temple producen el agrietamiento intergranular. | Controlar la temperatura del horno.  |
| Grietas en estrella                          | S y T       | Defectos debidos a sobrecalentamientos en los procesos de conformación en caliente: diseño inadecuado de las hileras de conformación o utilización de material de partida no sano.                        | Revisar el estado del material antes del tratamiento.  |
| Grietas internas                             | S y T       | Normalmente es difícil; si son debidas al tratamiento térmico, se presentan a la vez que las grietas superficiales. Por ello, ver grietas superficiales.  | Ver grietas superficiales.   |
| Resistencia y limite elástico bajos          | S           | Tiempo y temperatura de solubilización insuficientes.   | La pieza se puede volver a tratar usando el tratamiento adecuado.  |
| Resistencia y limite elástico bajos          | S           | Temperatura de solidificación excesiva, sobrecalentamiento, quemado.  | Revisar temperatura y control del horno.   |
| Resistencia y limite elástico bajos          | T           | Tiempo de transición grande o baja velocidad de temple.   | Disminuir el tiempo de transición o aumentar la velocidad de temple.   |
| Resistencia y limite elástico bajos          | M           | Tiempos cortos y temperaturas bajas en la maduración. Las piezas son recuperables.  | Verificar temperatura del horno; comprobar si hay exceso de carga o distribución deficiente. Dar nuevo tratamiento suplementario de maduración.  |
| Resistencia y limite elástico bajos          | M           | Tiempos largos y temperaturas altas. Las piezas son recuperables, pero están sobrecalentadas.   | Verificar temperatura del horno. Dar nuevo tratamiento completo de bonificado.   |
| Alargamientos bajos                          | S           | Temperatura de solubilización excesiva. Sobrecalentado, quemado.  | Revisar temperatura y control del horno.   |
| Limite elástico elevado y bajo alargamiento. | M           | Malá combinación tiempo-temperatura, sin llegar a sobremaduración.  | Verificar control de temperatura del horno y re-completo el bonificado.  |

## Continuación Tabla 16.

|   |       |  |  |
|---|-------|--|--|
| Características mecánicas poco uniformes. | S     | Tratamiento de solubilización poco uniforme. Se produce en piezas complicadas.   | Repetir tratamiento aumentando tiempo de solubilización y procurando un temple uniforme de la pieza.   |
| Material excesivamente duro.              | R     | Tiempos de recocido cortos o temperatura baja.   | Repetir el tratamiento en condiciones adecuadas.   |
| Material excesivamente duro.              | R     | Tiempos muy prolongados que han podido dar lugar a precipitaciones importantes.  | Revisar las condiciones del tratamiento.   |
| Material excesivamente duro.              | R     | Enfriamiento muy brusco desde la temperatura de recocido produciéndose un temple y precipitación parcial.  | Disminuir velocidad de enfriamiento entre la temperatura de recocido y 250° C.   |
| Pequeña capacidad de embutición.          | R     | Ha habido precipitación parcial en el recocido. (Puede ser también dificultad inherente al propio proceso de embutición y no al tratamiento.)                                  | Bajar la temperatura al mínimo valor posible y limitar la duración al tiempo indispensable.  |
| Piezas deformadas.                        | S y T | Son inevitables las pequeñas deformaciones en piezas de difícil diseño. Las grandes deformaciones pueden deberse a heterogeneidad de temperatura o a gran velocidad de temple. | Verificar y mejorar la homogeneidad de temperatura del horno; templar en agua más caliente.  |
| Piezas deformadas.                        | S     | Piezas mal instaladas en el tratamiento de solubilización.   | Adoptar soportes apropiados o formas mejores de suspensión de las piezas.  |
| Manchas de agua.                          | T     | Agua de temple cargada con sales o impurezas que dejan residuos al secar.  | Renovar con más frecuencia el agua del tanque de refrigeración. Vaciar y limpiar el tanque. Las manchas se eliminan por decapado y lavado posterior. |
| Corrosión en servicio                     | T     | Tiempo de transición largo o velocidad de temple baja.   | Acorral tiempos de transición y usar velocidad mayor de temple.  |
| Corrosión en servicio                     | S y T | Baño de sales rico en cloruros que da picaduras; los nitratos aceleran el efecto corrosivo posterior.  | Analizar sales, los cloruros no han de rebasar 20,5 g/l.   |
| Corrosión en servicio                     | S y T | Lavado defectuoso después de templar, quedando ocultos nitratos en ojivales y ángulos.   | Mejorar el lavado de las piezas.   |
| Corrosión en servicio                     | M     | Condiciones inadecuadas de precipitación, con insuficiencia de temperatura y tiempo.   | Corregir las condiciones de maduración.  |
| Grano grueso                              | S     | Actitud insuficiente antes del tratamiento de solubilización.  | Dar más acritud a la pieza.  |
| Grano grueso                              | R     | Velocidad de calentamiento lenta.  | Cargar en horno caliente para aumentar la velocidad de calentamiento.  |
| Grano grueso                              | R     | Temperatura alta o gran duración.  | Limitar las condiciones de tiempo y temperatura.   |



### 3.15 ALEACIONES NO TRATABLES TÉRMICAMENTE,

Este tipo de aleaciones no responden a los tratamientos térmicos por lo que, para aumentar su resistencia y dureza es necesario trabajarlas en frío por medio de procesos como laminado ó estirado.

La resistencia inicial de este grupo de aleaciones dependen sobre todo de los efectos de endurecimiento de los elementos aleantes tales como el Mn, Si y Mg. Estas aleaciones no tratables térmicamente corresponden a las series 1000, 3000, 4000 y 5000. Para aleaciones que contienen un porcentaje elevado de Mg y se endurecen por deformación, generalmente reciben un tratamiento térmico posterior a elevadas temperaturas (proceso de estabilización) para producir una pieza con propiedades más estables.

Estas aleaciones se ofrecen en varios temple según el método final puede obtenerse por medio de trabajo en frío (endurecido por deformación) solamente, o por trabajo en frío seguido de un recocido parcial.

Las aleaciones 5056 y 5052 tienden a ablandarse con el tiempo (envejecimiento) después de su producción, de modo que deben de estabilizarse (tratamiento térmico) para asegurar que el ablandamiento ocurra antes de salir el producto y tener un control en sus propiedades mecánicas antes de ser utilizados.

#### 3.15.1 NOMENCLATURA.

El temple de estas aleaciones no tratables térmicamente se indica con la letra "H" seguida de dos dígitos, como se explicó anteriormente.

Los efectos producidos por trabajo en frío pueden ser eliminados en el aluminio puro calentándolo a 350°C. Pero para -- las aleaciones de aluminio se necesitan temperaturas elevadas -- posiblemente hasta 400°C. Por lo general sólo se necesita mantener al metal a una temperatura el tiempo suficiente para asegurarse que todas las partes tengan la temperatura especificada para este proceso de recocido.

El tipo o rapidez de enfriamiento no es de importancia a -- menos que sea especificado.

El temple "H" obtenido por trabajo en frío es aplicable -- únicamente para productos semielaborados, entendiéndose los obtenidos por medio de laminación, extrusión, diferentes a las -- piezas fundidas.

En algunas ocasiones un tercer dígito se utiliza en la nomenclatura del temple "H", cuando el control del grado del temple no es semejante, o sea sus propiedades mecánicas son diferentes para un mismo temple.

## CAPITULO IV

## IX EXPERIMENTACION (DESCRIPCION DE LO REALIZADO)

Para la realización de este trabajo se utilizó la aleación de aluminio de la serie 6XXX, 6261, de composición 0.7% - 1% Mg, 0.4% - 0.7% Si, 0.15% - 0.4% Cu, 0.20% - 0.35% Mn, 0.4% Fe, 0.2% Zn y 0.1 Ti.

Inicialmente, se cortaron probetas, partiendo de una barra cilíndrica de 300 mm de largo por 38.1 mm de diámetro, el corte se realizó empleando una sierra eléctrica, lubricando debidamente el material con el fin de evitar alteraciones de la estructura por efectos de calentamiento. Las dimensiones de las probetas son de 25 mm de largo y 18 mm de radio.

Posteriormente, a estas probetas se le practicaron operaciones de fresado, con el fin de darles una superficie perfectamente plana.

Después se tomaron 9 probetas y se les sometió a un tratamiento térmico de disolución a una temperatura de 535°C en un horno eléctrico, utilizándose tres tiempos de permanencia en el horno. Primero se sacaron tres probetas que permanecieron durante 90 minutos a la temperatura de solución e inmediatamente se templaron a cada una de ellas en un medio diferente. Los medios fueron agua a 70°C, agua con hielo a 3°C y acetona con hielo seco a una temperatura de -60°C. Posteriormente, luego de 180 minutos de permanencia a 535°C se templan otras tres probetas en cada uno de los medios mencionados anteriormente y se repite la secuencia para las probetas que permanecieron 270 minutos.

Con ello se trata de observar el fenómeno que está ocurriendo durante el transcurso de tres tiempos diferentes en tres medios diferentes y a una misma temperatura del horno.

Posteriormente se sometió a tratamiento térmico de disolución a otras 9 probetas en un horno eléctrico a una temperatura de 600°C, ligeramente arriba de la temperatura eutéctica teórica, empleando las mismas tiempos de permanencia y medios templantes descritos para las 9 primeras probetas.

Luego se llevó a cabo la preparación de estas muestras tratadas térmicamente y otras tres muestras sin tratamiento. La preparación es la utilizada, comunmente empleando en el desgate lijas de grado 180, 240, 320, 360, 400, 500, 600 y 800, y en el pulido mecánico se utilizaron paños, teniendo como abrasivo alumina de 1 micra y 0.3 micras.

Después de llevado a cabo ésta operación, se procede a el ataque químico, utilizando el reactivo hidróxido de sodio en una proporción de 10 ml de NaOH por 90 ml de agua, durante un tiempo de inmersión de 2 minutos a una temperatura de 70°C y lavado en chorro de agua fría.

Enseguida se atacó con Acido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) al 50% durante un tiempo de 2 minutos a temperatura ambiente, se lavó también la probeta en un chorro de agua fría, que reveló la microestructura ocasionada por el tratamiento térmico.

A estas probetas se les realizó el ensayo de microdureza (que sirve para medir o determinar las durezas de los constituyentes microscópicos como son fases intermedias, granos, inclusiones, etc.). Las pruebas se llevaron a cabo con un microduremetro Vickers con indentador piramidal de base cuadrada. La carga que se utilizó fué de 50 gr.

## CAPITULO V

## V RESULTADOS

Las tablas 17 y 18 muestran los resultados de la microdureza de probetas después del tratamiento de disolución y temple diversos.

Tabla 17.- Microdureza de la Aleación 6261 calentada a 535°C y Enfriada en Diversos Medios.

| MEDIO DE ENFRIAMIENTO | T°C DEL MEDIO DE ENFRIAMIENTO | TIEMPO DE PERMANENCIA EN EL HORNO (min) | MICRODUREZA VICKERS |        |
|-----------------------|-------------------------------|---|---------------------|--------|
|                       |                               |   | PROMEDIO            | MAXIMA |
| Agua                  | 70°C                          | 90                                      | 54.12               | 62.6   |
| Agua/hielo            | 3°C                           | 90                                      | 46.6                | 47.9   |
| Hielo seco/acetona    | -60°C                         | 90                                      | 48.52               | 55.2   |
| Agua                  | 70°C                          | 180                                     | 55.48               | 58.0   |
| Agua hielo            | 3°C                           | 180                                     | 50.2                | 55.2   |
| Hielo seco/acetona    | -60°C                         | 180                                     | 60.18               | 64.2   |
| Agua                  | 70°C                          | 270                                     | 64.92               | 67.7   |
| Agua/hielo            | 3°C                           | 270                                     | 64.54               | 65.9   |
| Hielo seco/acetona    | -60°C                         | 270                                     | 71.5                | 73.6   |

Tabla 18.- Microdureza de la Aleación 6261 calentada a 600°C y Enfriada en Diversos Medios.

| MEDIO DE ENFRIAMIENTO | T°C DEL MEDIO DE ENFRIAMIENTO | TIEMPO DE PERMANENCIA EN EL HORNO (min) | MICRODUREZA VICKERS |        |
|-----------------------|-------------------------------|---|---------------------|--------|
|                       |                               |   | PROMEDIO            | MAXIMA |
| Agua                  | 70°C                          | 90                                      | 73.6                | 75.7   |
| Agua/hielo            | 3°C                           | 90                                      | 75.37               | 77.9   |
| Hielo seco/acetona    | -60°C                         | 90                                      | 69.86               | 73.6   |
| Agua                  | 70°C                          | 180                                     | 74.02               | 75.7   |
| Agua/hielo            | 3°C                           | 180                                     | 77.5                | 80.2   |
| Hielo seco/acetona    | -60°C                         | 180                                     | 71.5                | 71.5   |
| Agua                  | 70°C                          | 270                                     | 74.88               | 77.9   |
| Agua/hielo            | 3°C                           | 270                                     | 80.53               | 82.6   |
| Hielo seco/acetona    | -60°C                         | 270                                     | 72.8                | 75.7   |

Adicionalmente las figuras 23 y 24 muestran la variación de la microdureza en función del tiempo de permanencia a cada una de las temperaturas de "disolución" y la temperatura del medio de enfriamiento.

Asimismo, se presentan fotografías obtenidas de la observación metalográfica.

La fotografía no. 1 ilustra la estructura de la muestra antes de realizar la experimentación de este trabajo.

Las fotografías de la no. 2 a la no. 6, ilustran resultados obtenidos con diversos tratamientos térmicos que son representativos del grupo de experiencias realizadas y que serán discutidas más adelante.

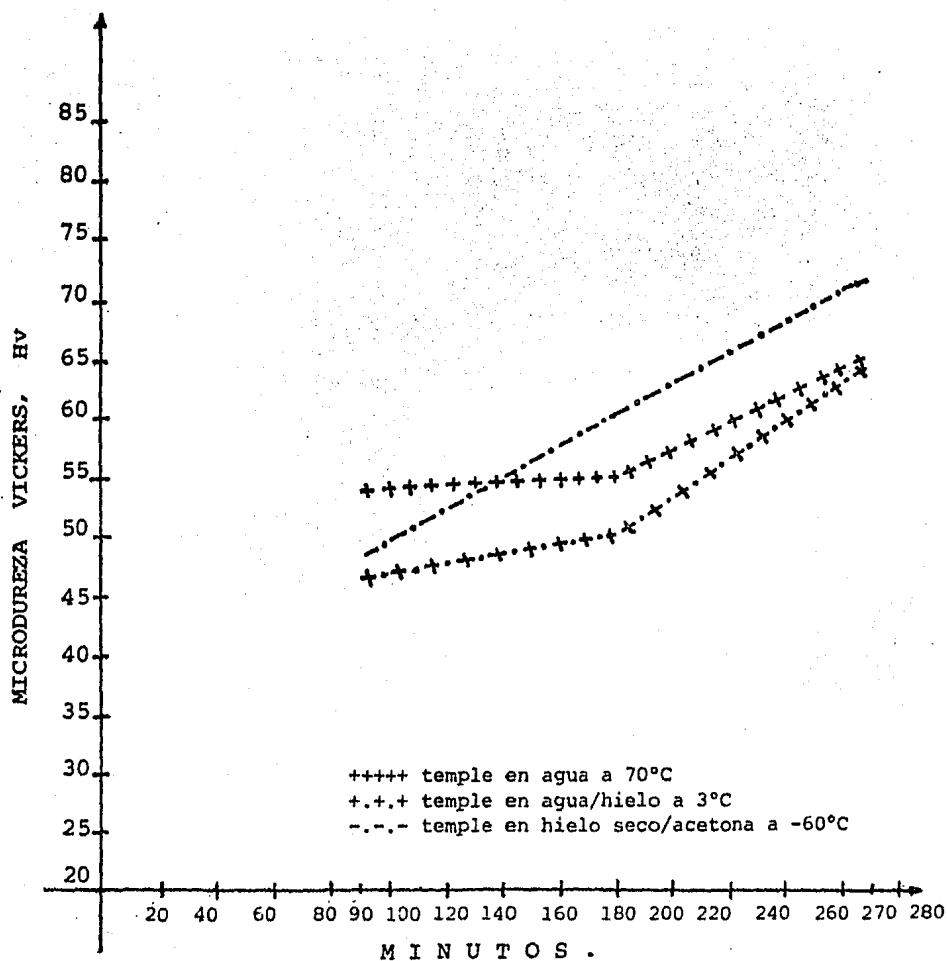


FIGURA 23.- Influencia del tiempo, en la dureza de la aleación comercial 6261, a una temperatura de 535°C.

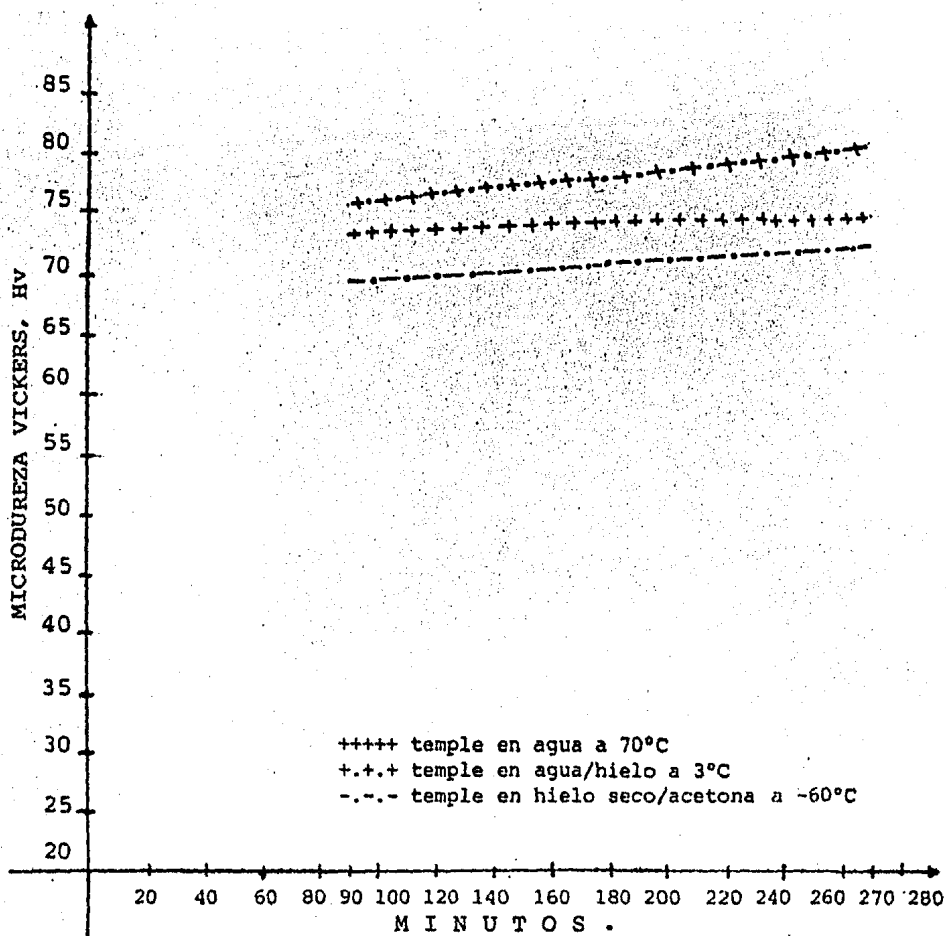


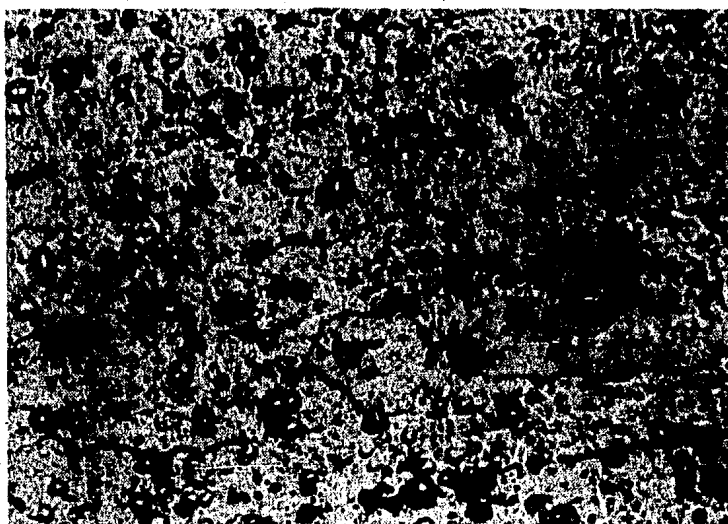
FIGURA 24.- Influencia del tiempo, en la dureza de la -- aleación comercial 6261, a una temperatura -- de 600°C.



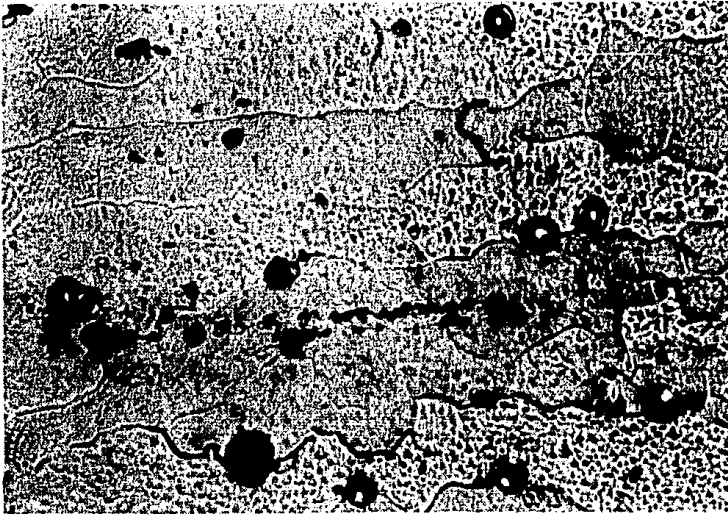
## RESULTADOS



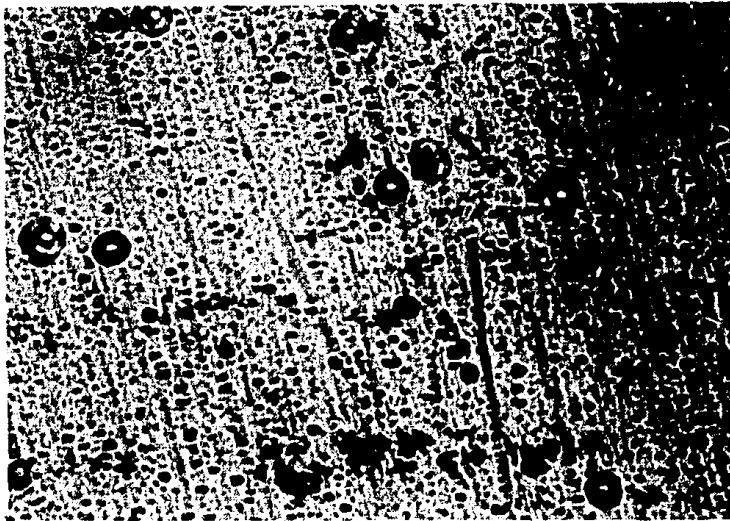
Fotografía no. 1. Estructura de la Aleación 6261-T6 previa a la experimentación. 800 aumentos.



Fotografía no. 2. Microestructura de la Aleación 6261, luego de permanecer durante 1 1/2 hrs. a 535°C y ser enfriada en agua a 70°C. 800 aumentos.



Fotografía no. 5. Microestructura de la Aleación 6261, después de permanecer 3 hrs a 600°C y ser enfriada en agua a 70°C. 800 aumentos.



Fotografía no. 6. Microestructura de la Aleación 6261, luego de permanecer a 600°C durante 4 1/2 hrs y ser tratada en agua con hielo (20°C). 800 aumentos.

## CAPITULO VI

## VI INTERPRETACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

Los datos mostrados en la tabla 17 indican que los valores más elevados de dureza parecen estar asociados con mayores tiempos de permanencia en el horno y velocidades más elevadas de enfriamiento, lo cual pudiéese, en primera instancia, tener relación con la necesidad de mayores tiempos para modificar la microestructura proveniente del tratamiento T6.

Esto se puede corroborar al observar y comparar las fotografías 2 y 3. En la primera de ellas se ve que la estructura de la fotografía no. 1 no es muy diferente de la no. 2. Por otro lado, en la no. 3 sí se puede distinguir mucho mejor una estructura granular, producto de una transformación.

Asimismo, se puede comentar respecto al tiempo de permanencia que no existe una diferencia importante entre 1 1/2 y 3 hrs., alcanzándose niveles semejantes de dureza para ambos -- tiempos de permanencia, excepto en el caso de enfriamiento con hielo y acetona, luego de 3 hrs a 535°C.

Respecto a la temperatura del medio de enfriamiento, se vislumbra que para tiempos de 90 min. de permanencia, no existen diferencias apreciables si se emplea uno ú otro medio enfriante.

Como se ha reportado (\*) la presencia del Mn y Cu retarda las transformaciones de esta clase de aleaciones y lleva a la necesidad de mayores velocidades críticas de temple. En este sentido -se piensa- está la explicación de un valor más elevado de microdureza para las aleaciones que permanecen 3 y --

\* Por ejemplo: "Aleaciones Al-Mg-Si para uso estructural": P. Allais y P. Mercher, Metals and Materials. Agosto 1972. pag. 343-346.

4 1/2 hrs a 535°C y que fueron enfriados en acetona con hielo. Apparently en el caso de las 3 hrs no se terminó la transformación a partir de T6 y es por ello que no se alcanza un valor más alto de microdureza.

La primera temperatura estudiada (535°C) está por debajo de la temperatura teórica de fusión de eutéctico (560°C) de modo que este factor, aparentemente, no participa en estos tratamientos. La revisión de las fotografías muestra partículas redondas, que a reserva de estudios más profundos, puede asociarse a fenómenos de globulización, debido a que no se alcanzase la velocidad crítica de temple.

En lo que respecta a la temperatura de disolución de 600°C se observa en general que los niveles de microdureza alcanzados son mayores que los reportados a 535°C.

Asimismo, en promedio, se puede señalar que el medio de enfriamiento no parece tener efectos de importancia en la microdureza lograda.

Respecto al tiempo de permanencia, al parecer al cabo de 1 1/2 hrs (como se puede ver en la fotografía no. 4) se ha llevado a cabo la transformación de la estructura T6 y al enfriarlo se logran microdurezas cercanas a las alcanzadas con 4 1/2 hrs a 535°C y enfriamiento en acetona con hielo.

Una microestructura y microdureza semejantes a las ilustradas en la fotografía no. 4 pueden observarse en la muestra no. 5. Respecto a la fotografía no. 6 cabe mencionar que corresponde a la muestra cuyo valor de microdureza alcanzado, -- fué el más elevado.

Es conveniente anotar, asimismo, que aunque las diferencias en microdureza no parecen ser significativas, se detecta

que la mayor microdureza no está asociada al medio de enfriamiento más severo (acetona con hielo) sino al intermedio (agua con hielo) como se puede observar en la figura 24.

Esto, se sugiere estudiarlo con mayor detalle posteriormente.

Comparando los resultados a ambas temperaturas de disolución (535 y 600°C) puede comentarse (como ya se anotó antes) que se obtienen niveles semejantes de microdureza si se calientan las muestras a 535°C (4 1/2 hrs) y se enfrían en acetona con hielo y si se calientan durante 1 1/2 hrs a 600°C y se enfrían en agua a 70°C ó agua con hielo.

Es claro, que los resultados del presente trabajo son parciales y es conveniente para caracterizar adecuadamente los efectos de los tratamientos aplicados realizar pruebas adicionales (que serán objeto de otro estudio posterior) tales como tracción, impacto, etc..

## CAPITULO VII

## VII OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

1.- Cuando la aleación 6261 es calentada a 535°C y enfriada en diversos medios, se alcanzan los valores más elevados de microdureza si se mantiene (para muestras del mismo tamaño) durante tiempos más largos y empleando medios de enfriamiento -- más severos.

2.- Asimismo, a esa temperatura de disolución se requieren tiempos mayores para lograr la transformación de la estructura proveniente del tratamiento T6.

3.- Empleando 600°C como temperatura de "disolución" (para tratar la aleación 6261) se obtienen -luego de 1 1/2 hrs de permanencia y enfriamiento en diversos medios- valores de microdureza del nivel alcanzado con temperaturas más bajas --- (535°C) y **medios enfriantes severos, aspecto que debe tomarse** en cuenta para estudios posteriores con objeto de buscar el tratamiento que, en su caso, tuviése mejores posibilidades de aplicarse en la práctica.

4.- Es necesario llevar a cabo pruebas tales como impacto, tracción, etc. que permitan completar y caracterizar adecuadamente el efecto de los tratamientos aplicados en las propiedades de la aleación.

5.- La presencia de aleantes como Mn y Cu parece ser un factor importante en el desarrollo de las transformaciones de las aleaciones durante los tratamientos, lo cual merece atención adicional.

6.- Se sugiere también llevar a cabo tratamientos de precipitación a diversas temperaturas y tiempos con el fin de ampliar los datos respecto al tratamiento de esta aleación comercial.

## BIBLIOGRAFIA

- ALUMINIO, S.A. de C.V. El metal más abundante y útil de nuestro planeta. Editorial Novaro, S.A. Naucalpan de Juárez, Estado de México. 15 de Junio de 1971.
- SIDNEY H. Avner. Introducción a la metalurgia física. 2a. edición. Mc Graw-Hill. México 1979.
- SMITH F. William. Structures and properties of engineering -- alloys. Ediciones Mc Gram-Hill.
- REGIDOR J. J. El tratamiento térmico de las aleaciones de aluminio. Información técnica. Revista metal CENIM, volumen 9. 1973. núm. 3.
- DUBOX J. Eduardo dr. Prácticas de Metalografía. Ediciones Marymar. Impreso en Buenos Aires, Argentina.
- ENCICLOPEDIA DEL ALUMINIO. Metalurgia estructural del aluminio fusión y colada de placas y tochos fabricaciones anexas volumen 2.
- ALUMINUM COMPANY OF CANADA LTD. Heat treating aluminum (metric edition).
- METALS HANDBOOK, METALLOGRAPHY, STRUCTURES AND PHASE DIAGRAMS. American Society for Metals. 1973.
- ALUMINUM STANDARDS & DATA 1972-1973. The aluminum association - third anenue, New York, N.Y..
- ALLANIS P. y MERCHER P. Aleaciones Al-Mg-Si para uso estructural. Metals and Materials. Agosto 1972. pág. 343-346.