

## ALUMINIO Y ALEACIONES LIVIANAS

(Notas para el curso de **Materiales, combustibles y ensayos**)

POR EL

**Ing. Lorenzo P. Fontana**

Profesor titular en la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

"Certains métaux se présentent dans leurs mines à l'état de pureté, comme l'or; il n'y a que les ramasser. D'autre, tels que le fer, l'étain, le cuivre, le plomb, s'y trouvent à l'état de rouille ou bien unis au soufre; mais il suffit de chauffer fortement leur minerais, soit au contact de l'air, soit au contact de charbon pour voir reparaitre dans tout leur éclat les métaux qu'il recélent. D'autres, enfin se montrèrent rebelles à ces influences. Pour separer le métal de l'argile, l'aluminium, la chimie de ces temps primitifs, ou Venus était maîtresse de forges, ne suffisait pas; toutes les ressources de la science la plus moderne étaient nécessaires".

J. B. DUMAS.

El aluminio es un producto de la época actual. Sus características de ligereza, de resistencia a la corrosión, la elevada conductividad térmica y eléctrica lo han difundido en las industrias química, eléctrica y mecánica.

Aliado con otros elementos, que permiten mejorar sus características mecánicas, ha entrado en la industria aeronáutica. Desde que Wilm estableció en 1911 el "duraluminio" y sus tratamientos térmicos, reuniendo a la ligereza la elevada resistencia, el aluminio se transformó en la materia prima más importante para las construcciones aeronáuticas. El empleo actual de maderas

prensadas y materiales plásticos, sólo son sucedáneos para suplir su escasez.

He aquí en síntesis los principales pasos de su corta y brillante historia industrial:

- 1854 — Sainte Claire Deville haciendo actuar sodio sobre cloruro de aluminio inicia su producción industrial.
- 1854 — Bunsen y Sainte Claire Deville producen el primer aluminio por electrolisis del cloruro.
- 1859 — Sainte Claire Deville publica “De l’aluminium, ses propriétés, sa fabrications et ses applications”.
- 1886 — Hérault y Hall establecen el proceso actual de producción del aluminio.
- 1890 — Proceso Bayer para el tratamiento de la bauxita.
- 1911 — Wilm establece el duraluminio y sus tratamientos térmicos.
- 1918 — National Physical Laboratories establecen la aleación Y.
- 1919 — La memoria de Merica, Waltemberg y Scott “Heat Treatment of duraluminium” coinciden con el comienzo de su difusión en las construcciones aeronáuticas.
- 1920 — Pacz establece la “modificación” iniciando la difusión de las aleaciones Al — Si.
- 1922 — Procedimiento Hoopes para el refinamiento del aluminio.
- 1923 — Tratamiento anadico para la protección de las aleaciones de aluminio.
- 1932 — Puesta a punto de las aleaciones aluminio-magnesio.
- 1937 — Puesta a punto de las aleaciones aluminio-cromo.

## METALURGIA DEL ALUMINIO

**Minerales de aluminio.** — El aluminio es el elemento metálico contenido en mayor porcentaje en la capa terrestre, alcanzando al 8 % de la misma. No obstante su gran difusión, son muy pocos los minerales, que en este caso son arcillas, que se prestan para su extracción industrial.

El más importante mineral es la **bauxita**, que contiene eleva-

dos porcentajes de alumina,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (sesquióxido de aluminio, entre el 48 y el 60 %). Su denominación deriva de la localidad de Baux, (Bouches-du-Rhône) en Francia.

Existen varios tipos de bauxita:

Las **blancas**, que son las más ricas en alumina (50 a 72 %), pero como contienen como impurezas fuertes tenores de sílice, lo que representa un serio inconveniente para la extracción del metal, son empleadas para la fabricación de materiales refractarios.

Las **grises** que también contienen como impureza sílice y óxido de hierro, empleadas como abrasivos.

Las **rojas** en las cuales el tenor en óxido de hierro, a quien deben su coloración, es muy elevado.

Son estas últimas que constituyen la materia prima para la extracción del aluminio.

Su composición es la siguiente:

60 % de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

2 a 3 % de sílice ( $\text{SiO}_2$ )

18 a 20 % del sesquióxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )

conteniendo también óxido de titanio,  $\text{TiO}_2 = 3\%$  y agua (13 %). Es condición necesaria para conseguir un rendimiento admisible, que el tenor de alumina no baje del 57 %, como también que el tenor de sílice no supere el 3 %.

Otros minerales de aluminio, con los cuales se han realizado por lo menos tentativas de extracción, son: la **leucita** (en Italia),  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $4\text{SiO}_2$ , con un 23,5 % teórico de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , y la **alunita**:  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $3\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $6\text{H}_2\text{O}$ , con 37 % teórico de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , cuya elaboración ha sido iniciada en Norte-América. Hasta ahora no se conocen en nuestro país, yacimientos de minerales de aluminio aprovechables industrialmente para su extracción.

El proceso de fabricación del aluminio consiste en dos fases principales y marcadamente distintas:

- 1) **Producir alumina pura**, a menos de 0,1 % de impurezas, saliendo de la bauxita.
- 2) **Someter la alumina puesta en solución en criolita fundida, a un proceso electrolítico.**

El problema fundamental de la metalurgia del aluminio es común a la mayor parte de los metales: reducción del óxido. Pero el óxido de aluminio se caracteriza por un elevado **calor de formación** respecto al de otros metales, entre los cuales hierro, zinc, plomo, cobre, estaño, y en esto reside las grandes dificultades que ofrece su reducción.

#### CALOR DE FORMACION DE ALGUNOS OXIDOS METALICOS

Oxido	Calorías por grami - mol.	Calorías por gramo atomo oxígeno
Oxido de aluminio ( $\text{Al}_2 \text{O}_3$ )	378.0	126
Oxido de hierro ( $\text{Fe O}$ )	65.7	65.7
„ „ „ ( $\text{Fe}_2 \text{O}_3$ )	196.5	65.5
„ „ „ ( $\text{Fe}_3 \text{O}_4$ )	270.8	67.7
Oxido de zinc ( $\text{Zn O}$ )	85.2	85.2
Oxido de plomo ( $\text{P b O}$ )	50.3	50.3
Oxido de cobre ( $\text{Cu O}$ )	37.2	37.2
Oxido de estaño ( $\text{Sn O}$ )	66.9	66.9

Los óxidos metálicos con bajo o moderado calor de formación pueden ser fácilmente reducidos por el carbono a relativamente baja temperatura, lo que no ocurre por el óxido de aluminio. Por eso se recurre al medio indicado en el segundo párrafo, es decir a la separación electrolítica, previa solución en **criolita**.

Esta última es un fluoruro doble de aluminio y de sodio ( $\text{Al}_2 \text{F}_6, 6 \text{Na F}$ ) que contiene 24.3 % de  $\text{Al}_2 \text{O}_3$  teórico, cuyos principales yacimientos se hallan en Groenlandia (Rusia).

## TRATAMIENTO DE LA BAUXITA PARA LA OBTENCION DE LA ALUMINA PURA

El primer procedimiento industrial para la separación de la alumina del mineral, es debido a Saint Claire Deville y fué el único empleado hasta 1895. Este proceso consiste en tratar el mineral, previamente molido, **con carbonato de sodio**, en hornos rotativos, como los que se emplean para la producción del cemento, con temperaturas entre 1200 - 1400°. El combustible empleado era carbón pulverizado. Por efecto de la reacción consiguiente, la alumina contenida en la bauxita se transforma en **aluminato de sodio** ( $\text{Na Al O}_2$ ), que es **soluble en agua**. Interesa conocer el comportamiento de las impurezas, es decir óxido de hierro, sílice, óxido de titanio, etc.

El  $\text{Fe}_2 \text{O}_3$  no es afectado por la reacción y permanece **insoluble**.

La **sílice**, tratada en determinadas condiciones (calentada en autoclave, bajo presión de 6 atmósferas), precipita bajo la forma de silico-aluminato de sodio **insoluble**



Cabe observar que tres moléculas de sílice contenidas en el mineral inicial, inmovilizan una molécula de alumina; de aquí el interés que la bauxita contenga tenores muy limitados de sílice, admitiéndose en general un 3 % como máximo.

El **óxido de titanio** se separa parcialmente.

Otro proceso para la concentración de la **alumina**, saliendo de la bauxita, es el Bayer, puesto a punto desde 1895, siendo el más difundido en la actualidad.

La bauxita, previamente calcinada y reducida a pequeños granos de 5 mm. aproximadamente, es atacada por soda cáustica ( $\text{Na OH}$ ) bajo presión. Se forma entonces **aluminato de sodio**, ( $\text{Na Al O}_2$ ) que entra en solución. El comportamiento de las impurezas es el siguiente:

El **óxido de hierro** no es atacado y permanece insoluble.

La **sílice** forma en vez un **aluminato** ( $\text{Al}_2 \text{O}_3, \text{Na}_2 \text{O}, 3 \text{Si}$

$O_2$ ,  $9 H_2 O$ ) insoluble, y el óxido de titanio forma un titanato de sodio también insoluble.

En esta forma las impurezas son separadas por filtración.

La sílice contenida en el mineral es motivo de serias pérdidas por cuanto la experiencia indica que por cada kilograma de sílice que contiene la bauxita, se pierden de 1.1 a 2 kg. de alumina y de 1 a 3 kg. de soda.

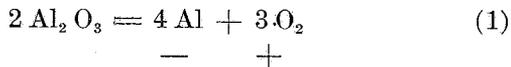
En Norte América se limita el tenor de sílice contenido en el mineral a un 7 %, mientras en Europa se considera como máximo admisible un 5 %, depreciándose el mineral cuando el tenor supera el 3 %.

Volviendo al desarrollo del proceso, la alumina que se ha transformado en aluminato se halla en solución. Esta, puesta a contacto con alumina hidratada ( $Al_2 O_3, 3 H_2 O$ ) procedente de procesos anteriores, precipita también en forma de alumina hidratada, que viene separada por filtración del líquido, el cual pasa a recuperación.

La alumina hidratada separada por filtración es lavada, seca y calcinada.

A continuación se indica un esquema de este proceso.

**Electrolisis de la alumina.** — La segunda fase del proceso para la preparación del metal consiste en descomponer por electrolisis la alumina disuelta en criolita fundida. La reacción correspondiente puede expresarse en la siguiente forma:

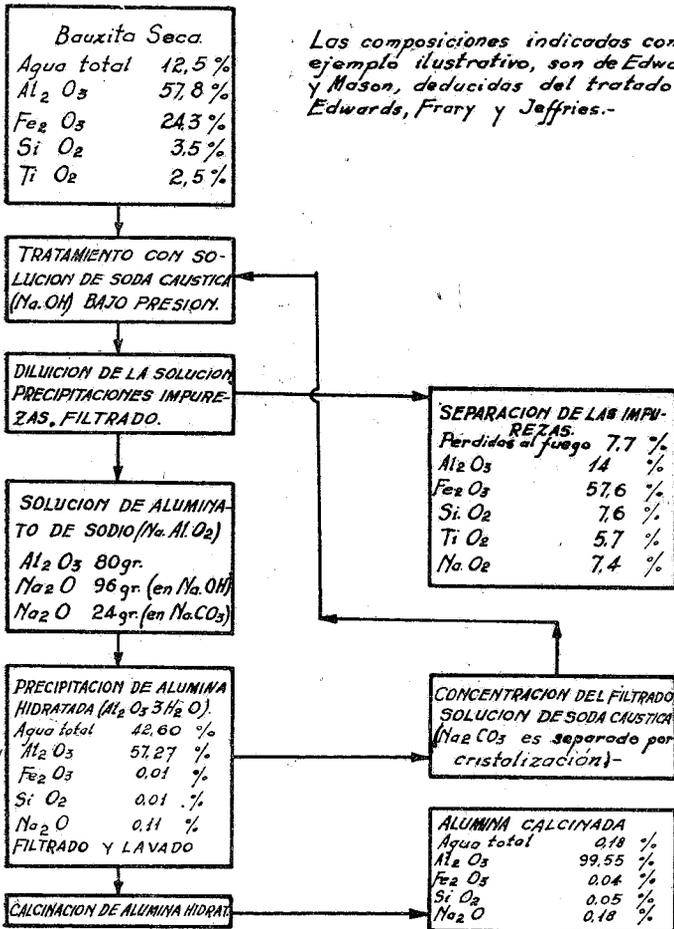


Esta reacción se realiza a la temperatura de  $950^\circ$  en horno eléctrico a corriente continua según el esquema n.º 2. La sofera de la cuba constituye el polo negativo (catodo) y el polo positivo es constituido por una serie de electrodos de carbón.

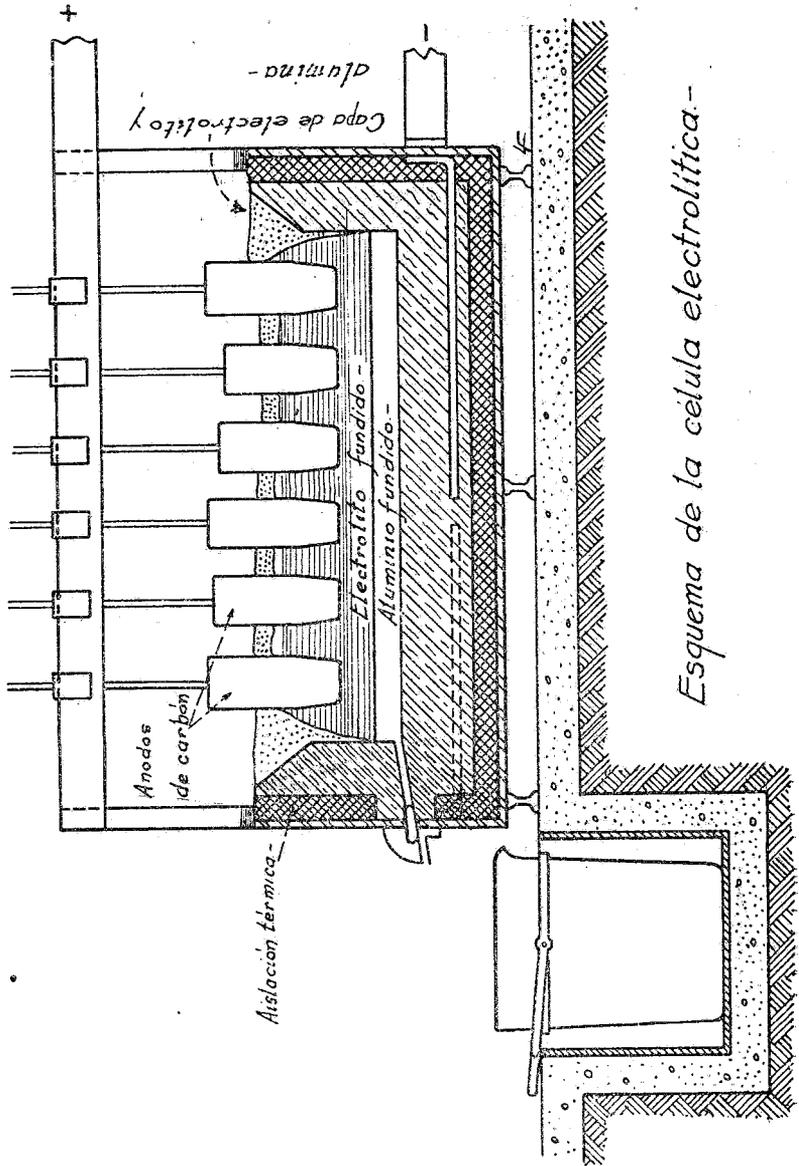
Para que la operación pueda realizarse en la forma indicada el aluminio fundido debe tener una densidad mayor que el electrolito. Las condiciones a que debe responder el electrolito son las siguientes:

## PROCESO BAYER

para concentración del mineral Bauxita en alumina.



ESQUEMA N°. 1

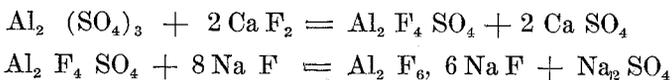


Esquema de la célula electrolítica -

ESQUEMA Nº. 2

- 1) Permitir la fácil solución de la alumina.
- 2) La alumina funde a 2020°. La sal que se emplea como electrolito debe bajar el punto de fusión en forma sensible (la criolita funde a 977°). Una mezcla de alumina con el 24 % de criolita funde a 904°.
- 3) Por el motivo indicado anteriormente el electrolito debe tener una densidad inferior al aluminio fundido (2.29 a 1000°). La densidad de la criolita fundida a 1000° es 2.09.
- 4) Evitar la fácil oxidación del aluminio fundido. La criolita cumple muy bien esta función.

De aquí la importancia de la criolita en la metalurgia del aluminio, no obstante tenga el simple rol de disolvente. Cuando no es posible disponer de la criolita natural que proviene exclusivamente de los yacimientos de Ivigtut en el Sud-Este de Groenlandia (Rusia), se recurre a la **criolita artificial** para la producción de la cual pueden emplearse como material de base, varios minerales. Entre los procesos empleados citaremos el proceso de **Grabau**, que emplea **fluorita** <sup>(1)</sup> (fluoruro de calcio) haciéndola actuar sobre sulfato de aluminio y luego fluoruro de sodio:



La fluorita puede también emplearse mezclada con la criolita, como disolvente, en la producción del aluminio, por cuanto disminuye la temperatura del baño de fusión. Se emplea en pequeños porcentajes por su mayor peso específico que tiende a aumentar la densidad del baño.

Volviendo a la consideración del proceso que se desarrolla en la cuba electrolítica, se observa que el oxígeno que se desprende en la reacción (1) va al anodo produciendo la combustión del carbono de que éste es constituido, formando CO y luego CO<sub>2</sub>.

El consumo de electrodos, en general de coke de petróleo, re-

(1) La producción nacional de fluorita ha superado en 1938 las 1400 ton. que se exportaron a Brasil y Japón. Entre las principales minas se destacan La Ciénaga (726 ton.) cerca de Carlos Paz (Córdoba) como también la de Sierra Comechingones.

sulta por este motivo muy sensible, apreciándose como un peso igual al aluminio producido.

La tensión de corriente empleada es de 8 a 10 voltios y la densidad de corriente de 1.5 a 3 amperios por centímetro cuadrado de sección de los electrodos.

Este proceso ha sido establecido casi contemporáneamente por Hérault y Hall desde 1886.

**Datos estadísticos sobre elaboración de aluminio.** — Los modernos hornos de 30.000 amperios tienen una producción diaria de 165 kg.

Para producir **una tonelada de aluminio** se requieren:

4 toneladas de bauxita, de la cual se consiguen 2 toneladas de alumina.

8 toneladas de carbón para la preparación de la alumina.

0.8 a 1 tonelada de electrodos.

~ 25.000 kw. para la electrolisis saliendo de la alumina.

80 kg. de eriolita.

El consumo de aluminio en el país es de 1.200 toneladas anuales.

## PROPIEDADES Y CARACTERISTICAS DEL ALUMINIO

**Peso específico.** — Entre las características de mayor importancia, especialmente para las construcciones aeronáuticas, está su reducido peso específico, 2,71 kg/dm<sup>3</sup>. que lo ubica entre los metales más livianos (Pb = 14,4 Cu = 8,95 Fe = 7,8 Sn = 7,3 Zn = 7,3).

**Conductibilidad eléctrica.** — La conductibilidad eléctrica es muy elevada, aproximadamente el 60 % de la que corresponde al cobre. En consideración del peso específico de este último, a igualdad de conductibilidad, el peso del conductor de aluminio resulta mitad. De aquí su aplicación en las líneas aéreas para transmisión de energía eléctrica a distancia.

**Conductividad térmica.** — El coeficiente de conductividad térmica es el número de pequeñas calorías que atraviesan en un segundo una superficie de un centímetro cuadrado de una probeta cuyo espesor es de un centímetro, estando las dos caras a una diferencia de temperatura de un grado centígrado (unidades C. G. S.).

Aluminio (99.66 %) . . . . .	0.52
Cobre . . . . .	0.95
Hierro . . . . .	0.20
Magnesio . . . . .	0.37
Níquel . . . . .	0.14

Esta propiedad del aluminio se transmite también a sus aleaciones, adquiriendo especial importancia para aquellas destinadas a la construcción de pistones y cabezas de cilindros. El reemplazo de aleaciones de aluminio a la fundición (arrabio) en estas últimas, ha provocado, para condiciones de marchas análogas, una caída de temperatura de 450° a 250° a causa de la mejor conductividad.

**División del aluminio industrial.** — Comercialmente el aluminio se divide en varias categorías, a según del grado de pureza. Las impurezas principales son constituidas por **hierro** y **silicio** provenientes del mineral. Otras impurezas que se hallan en el aluminio, pero cuya cantidad es insignificante frente a las citadas, son carburos, sulfuros, cobre, zinc, alumina, etc., debidas principalmente a los electrodos empleados en la elaboración. La división en categorías es la siguiente:

**Primera categoría.** — Metal denominado 99.5 %, es decir que el total de impurezas constituidas por hierro y silicio es inferior a 0.5 %.

**Segunda categoría.** — Metal al 99 % en que el total de hierro y silicio es inferior al 1 %. Es el metal corriente, de mayor empleo en las aleaciones.

**Tercera categoría.** — Metal al 98-99 % en que el total de impurezas alcanza al máximo el 2 %.

Cabe destacar que desde 1922 ha sido puesto a punto el proceso de refinación Hoopes que permite conseguir industrialmente aluminio al 99.9 %.

### **Propiedades químicas del aluminio.**

1) Cabe ante todo destacar al muy elevado **calor de combustión del aluminio**, es decir la gran cantidad de calor que desarrolla combinándose con el oxígeno. La reacción es muy violenta cuando el aluminio se halla en estado de extrema división. La propiedad antes mencionada es utilizada industrialmente en dos formas: a) Como energético reductor en procesos metalúrgicos, **aluminotermia**, proceso establecido en 1898 por el Dr. Hans Goldschmidt. Se mezclan en proporciones convenientes polvo de aluminio con óxidos molidos, iniciando la combustión de ésta por medio de una composición especialmente inflamable, a base de peróxido de bario. La reacción consiguiente es rápida y con gran desarrollo de calor, sin producción de productos gaseosos. Este proceso es empleado para la obtención de metales y ferroaleaciones saliendo del mineral (óxido) cuando se requieren elevadas temperaturas o ausencia del carbono, por ejemplo para la producción de cromo y ferro-cromo, manganeso, titanio y ferro-titanio, ferro-vanadio, ferro-molibdeno, ferro-tungsteno. b) Para la realización de soldaduras, especialmente de rieles, se emplea una mezcla denominada **termita** constituida por polvo de aluminio y óxido de hierro pulverizado.

2) El aluminio que demuestra tanta afinidad por el oxígeno cuando se halla finamente fraccionado, tiene en forma masica una excelente resistencia a la corrosión, tanto de resultar prácticamente inalterable al aire ambiente: esto es debido a que se produce inicialmente una ligera oxidación superficial que recubre el metal de una capa de alumina muy adherente y opaca que lo protege contra la oxidación ulterior, aislándolo del ambiente. Las impurezas contenidas en el metal alteran sensiblemente esta resis-

tencia. Así el agua dulce no tiene acción alguna contra el aluminio puro, mientras el metal comercial es ligeramente atacado.

3) El aluminio que es atacado en frío por el ácido nítrico y acético es muy sensible al ataque del ácido clorhídrico y de los alcali. Como reactivos para el ataque de probetas de aluminio y de sus aleaciones destinadas a observaciones micrográficas, se emplean principalmente:

Soluciones alcalinas diluídas de soda o potasa cáustica (entre 1 % y 25 %).

Acido fluorhídrico, desde el 0.5 % al 5 %.

Mezclas en variadas proporciones y concentraciones en agua y glicerina de HF, HNO<sub>3</sub>, HCl.

**Características mecánicas del aluminio y su comportamiento a las deformaciones en frío (Ecouissage).** — Las características mecánicas del aluminio, como también las demás, son muy sensibles al grado de pureza. Con 99.95 % la carga de rotura es de 6.32 kg./mm.<sup>2</sup> y el límite elástico 2.10 kg/mm<sup>2</sup>. con un alargamiento del 60 %, se entiende al estado recocido.

Si partimos de un aluminio usual, cuyas características al estado recocido son las siguientes: (Grard)

$$R = 9 \text{ kg/mm}^2$$

$$E = 4.5 \text{ ,,}$$

$$A = 40 \%$$

es interesante considerar las propiedades del mismo en función de un cierto grado de écouissage, propiedades que se resumen en el siguiente gráfico n° 3 del autor citado.

**Soldadura del aluminio.** — Presenta algunas dificultades, sea de orden físico que químico.

Entre las primeras contamos el coeficiente de dilatación muy elevado (0.000258 entre 20 y 300°.) que debe tenerse muy en cuenta para evitar las roturas producidas por la contracción al enfriamiento. La temperatura de fusión relativamente baja (660°) es un

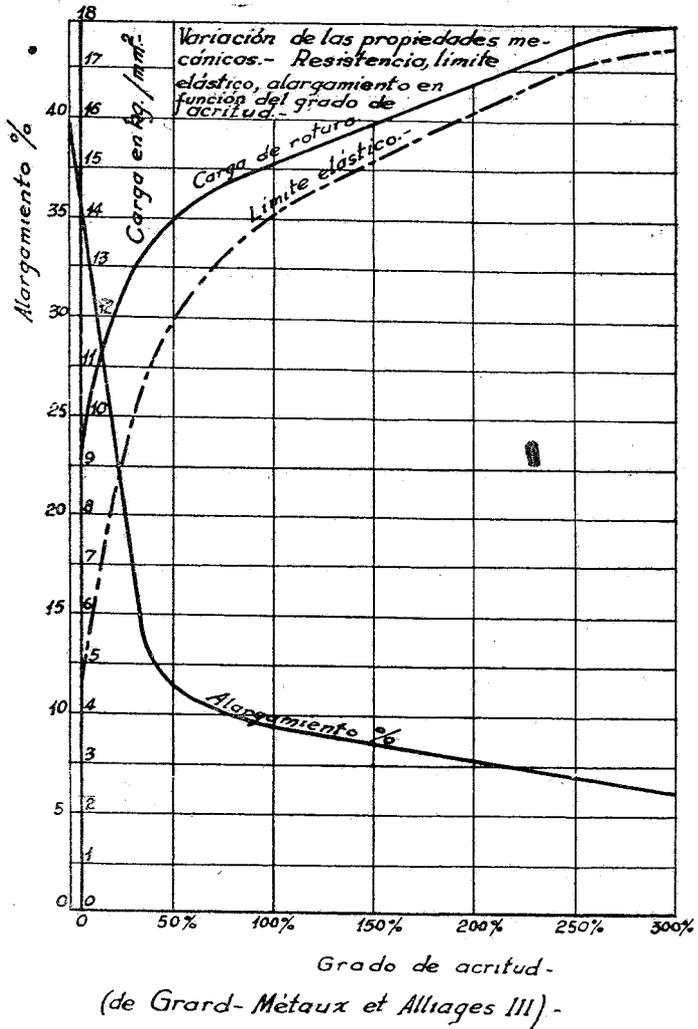


GRAFICO N° 3

inconveniente para el empleo del soplete oxiacetilénico por el peligro de quemar el material.

Las dificultades de orden químico provienen de las impurezas contenidas en metal como ser hierro y silicio y la que se forma al realizar la operación: la alumina, esta última ha sido la dificultad más seria para solucionar. Se recurre a este fin a la utilización de un fundente. Puede citarse al respecto uno constituido por cloruro de litio (15 %), cloruro de potasio (45 %), cloruro de sodio (30 %), fluoruros de potasio (7 %) y bisulfato de sodio, que actúa en la siguiente forma:

Bajo la acción del calor el **bisulfato de sodio** forma con los cloruros y fluoruros alcalinos, ácidos clorhídrico y fluorhídrico que atacan la **alumina**, dando lugar a cloruro y fluoruro de aluminio, que son volátiles.

El aluminio en chapa, con un grado de pureza 99 % es muy empleado para la construcción de tanques para combustible y lubricantes en los aviones, debido a los siguientes motivos:

- 1) Su resistencia a la corrosión.
- 2) La posibilidad de soldadura, que garantiza la hermeticidad de las uniones.

La Aluminium Company of America (Alcoa) produce esta chapa bajo la designación 2 S, con varios grados de dureza (H) conseguida por laminación en frío, es decir con un cierto grado de "écrouissage". Para tanques de combustible es de empleo corriente la 2 S 1/2 H.

## ALEACIONES LIVIANAS

Las características mecánicas del aluminio industrialmente puro son muy pobres, por esto, que si encuentra algunas aplicaciones directas fundadas especialmente sobre su resistencia a la corrosión, éstas son muy limitadas.

Por la adición de uno o más elementos las características mecánicas pueden mejorarse substancialmente. De aquí la gran difusión actual en las construcciones mecánicas y en particular en las

aeronáuticas, de las aleaciones a base de aluminio, que sin alterar sensiblemente la característica fundamental, es decir el reducido peso específico, consiguen características mecánicas muy elevadas. En algunos casos la carga de rotura aumenta a cinco veces la que corresponde al aluminio.

Por **aleación liviana** se entiende una aleación a base de aluminio cuyo peso específico es inferior a tres kg/dm<sup>3</sup>.

Las aleaciones livianas se clasifican del punto de vista industrial, en la siguiente forma:

- a) Aleaciones livianas destinadas a piezas de fundición, que también suelen ser designadas "a baja resistencia" en contraposición a las que siguen. A la vez se subdividen a según el proceso que se emplea para la fundición: en comunes formas de arena (Sand casting); fundiciones en moldes metálicos de fundición o de acero (permanent mold) denominadas corrientemente coquillas; fundiciones a presión (die casting) que también se realizan en formas metálicas, pero con el empleo de máquinas que permiten ejercer sobre el metal fundido presiones elevadas (entre 5 y 35 atmósferas).
- b) Aleaciones livianas destinadas a ser trabajadas en caliente (corroyés, wrought) es decir:

**Laminadas** para conseguir placas, láminas o chapas, barras, etc.

Pasadas por la **hilera** para conseguir alambre y barras delgadas.

Pasada a la **trefila** para conseguir tubos.

Sometidas al proceso de "**extrusión**", es decir forzadas a pasar por una abertura de forma, aplicada al cilindro de una prensa hidráulica (a temperaturas entre 400 y 450°) para conseguir perfilados,

**Forjadas** para conseguir palas de hélice, bielas, etc.

Cuando las características mecánicas a más de ser mejoradas por efecto del "corroyage" lo son también por efecto del tratamiento térmico, de la que la mayor parte de las aleaciones de aluminio son susceptibles, se consiguen, "las de elevada resistencia".

También alguna de las aleaciones para fundición pueden ser mejoradas por tratamiento térmico.

Entre los elementos que se alean al aluminio figuran el primer término, por la importancia de las aleaciones a que dan lugar, el **cobre** y el **silicio**, siguiendo luego el **magnesio**, el **manganeso** y **zinc**. También son empleados **hierro** y **níquel**; últimamente ha intervenido el **chromo** y el **bismuto**.

El **cobre** forma con el aluminio el compuesto  $\text{Cu Al}_2$ , aluminuro de cobre, que contiene aproximadamente el 54 % de Cu y que desempeña un rol muy importante en los tratamientos térmicos.

El **silicio** no forma ningún compuesto con el aluminio.

El **magnesio** adquiere especial importancia por el compuesto que forma con el silicio,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ , siliciuro de magnesio, de trascendente rol en los tratamientos térmicos.

El **níquel** y el **hierro** acentúan propiedades producidas por otros elementos contenidos en mayor tenor, o corrigen propiedades inconvenientes producidas por éstos (el hierro en las aleaciones complejas evita las grietas de contracción).

El **manganeso** es factor de dureza, contribuyendo a ésta independientemente de los tratamientos térmicos. Dado que la solubilidad de este elemento en el aluminio no es total, viene introducido por medio de "aleaciones ricas" que contienen aproximadamente el 10 % de Mn. Es empleado en tenores muy reducidos, inferiores al 2.5 % y contribuye a aumentar la resistencia a la corrosión.

El **zinc** contribuye al aumento de la colabilidad, lo que facilita el llenado, de las formas.

Han sido estudiadas últimamente las aleaciones aluminio-berilio. Las características de este metal liviano se citan a continuación, comparativamente con el aluminio:

	Berilio o glucinio	Aluminio
Peso específico	1.84	2.7
Temperatura de fusión	1280°	660°
Módulo de elasticidad		
kg/mm <sup>2</sup> .	30.000	7.000
Dureza Mohs	6 a 7	2.9

La gran dureza, a la par que el elevado módulo de elasticidad que caracteriza este metal liviano crearon la esperanza de conseguir aleaciones con el aluminio de características excepcionales. Las investigaciones realizadas al respecto desilusionaron, pues los beneficios que éste produce no superan los conseguidos por acción del **silicio**, que del punto de vista económico resulta más viable.

A continuación serán consideradas las aleaciones livianas para fundición, iniciando por las aleaciones binarias, para pasar luego a las más complejas.

### ALEACIONES ALUMINIO - COBRE

El cobre forma con el aluminio el compuesto  $\text{Cu Al}_2$  conteniendo aproximadamente el 54 % de Cu, de modo que el diagrama Al — Cu puede desdoblarse en correspondencia de esta concentración. Al y  $\text{Cu Al}_2$  forman un eutéctico en correspondencia del 33 % de Cu, que funde a 548°. La parte del diagrama de mayor interés práctico es la correspondiente al campo de solubilidad del  $\text{Cu Al}_2$  en el aluminio, que varía entre un máximo de 5.65 % a 548° hasta reducirse a menos de 0.3 % a la temperatura ambiente. Sobre esta variación de solubilidad, como será estudiado más adelante, se fundan los tratamientos térmicos de las aleaciones livianas.

La resistencia de las fundiciones en arena aumenta rápidamente con el tenor en cobre hasta un porcentaje del 4 %, luego el aumento es menos sensible hasta resultar estacionario entre el 10 y el 14 %. La curva representativa del alargamiento tiene un andar inverso a la anterior.

También a temperatura elevada la dureza resulta función del tenor en cobre.

Por lo que atañe al comportamiento de estas aleaciones al forjado se considera que el 6 % de Cu representa un límite, superando el cual solamente es posible la realización de piezas por fundición. Para tenores más bajos se prestan fácilmente a la deformación en caliente.

Las más importantes aleaciones aluminio-cobre para fundición



pueden reunirse en tres principales tipos correspondientes al 4 % de Cu, al 8 % y al 12 %.

**Aleación al 4 % de Cu.** — Esta aleación es especialmente difundida en Norte América para pequeñas piezas fundidas en arena. Dado su elevada contracción se presta poco para fusiones en coquilla.

*Diagrama Aluminio-Cobre, debido a Dix y Richardson.*

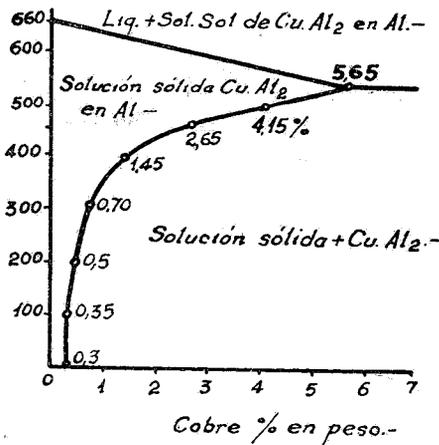


DIAGRAMA N° 4

Permite conciliar buenas cargas de rotura con alargamientos más que aceptables. Representa el equivalente para piezas fundidas del duraluminio, y como tal es susceptible de tratamientos térmicos. Siempre se la trata antes del empleo.

En Norte América es difundida bajo la designación de aleación 195 de la Alcoa.

El tratamiento térmico consiste en un calentamiento de 18 a 24 horas a 510 - 520° y enfriamiento en agua. El revenido puede

practicarse a temperatura ambiente. Después de algunas semanas se consiguen las características indicadas en la tabla N°. 1.

Practicando envejecimientos artificiales de 4 a 16 horas a 150° se aumenta la carga de rotura a expensas del alargamiento. Con el último tratamiento indicado (16 horas a 150°) se consigue

*Carga de rotura kg/mm.<sup>2</sup>*

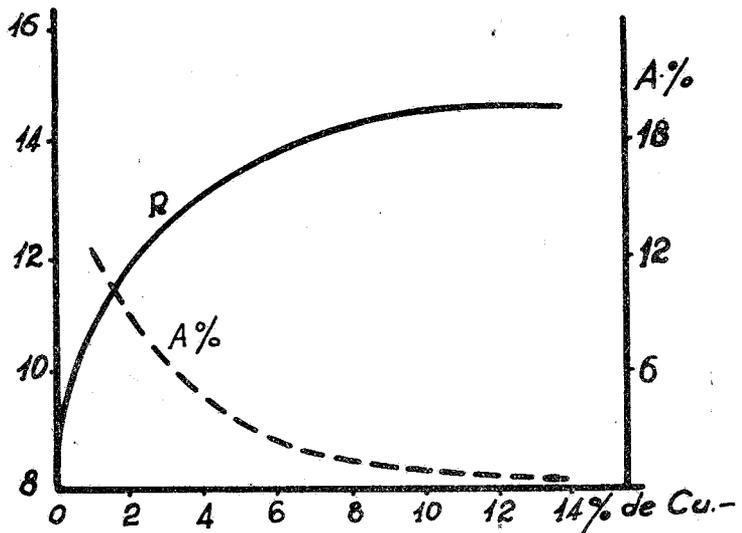


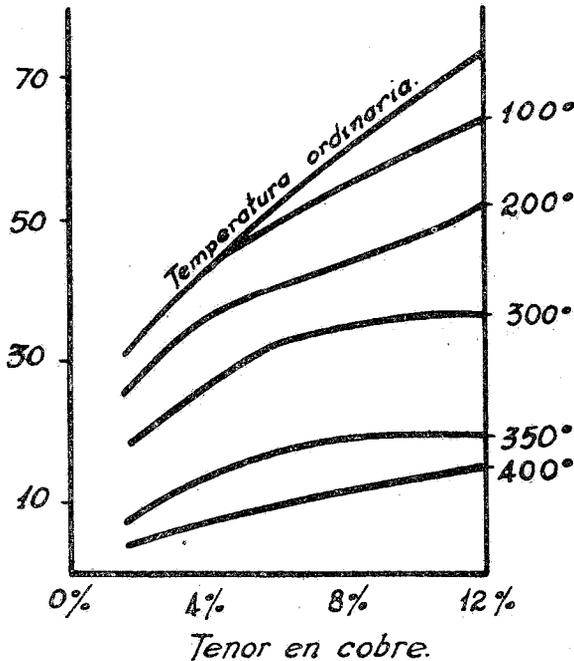
GRAFICO N°. 5

una  $R = 28 \text{ kg/mm}^2$  y  $\Delta = 95$ , reduciéndose el alargamiento a 2%. Las impurezas contenidas por esta aleación son: Si máximo admitido 1.2%, Fe max 1%, Mn y Mg max 0,3%.

El carter del Cyclone E. 1 es fundido con esta aleación. Se realizan piezas varias para avión.

**Aleación 8 % de Cu.** — Es esta la aleación característica para carters sea de automóviles que de los motores de aviación del pasado (Lorraine 450). Es la que mejor se presta para el llenado de las formas en arena entre las aleaciones aluminio cobre.

### *Aleaciones aluminio-cobre.-*



*Variación de la dureza en función del tenor en cobre a las temperaturas de 0°, 100°, 200°, 300°, 350°, y 400°.- (Grand 157).-*

ESQUEMA N° 6

En general contiene como elemento secundario hierro (entre 0.8 y 1.5 %) debido a que, correlacionando la composición de la aleación con los defectos de fundición, Collins y Gilett establecie-

ron desde 1911 que en esta aleación, pequeñas cantidades de hierro reducen sensiblemente la facilidad de grietas (cracking) de cristalización.

También pequeños tenores en silicio a la par que mejorar la colabilidad, permite conseguir una superficie más lisa.

Podemos citar como ejemplo de este tipo de aleación la 212 de la Alcoa (Cu = 8 %, Si = 1.2 % y Fe = 1 %) cuyas características mecánicas se consignan en la Tabla I, como también la 112 Alcoa (Cu = 7.5 %, Fe = 1.2 % y Zn = 2 %).

**Aleación 12 % de Cu.** — La aleación al 12 % de Cu consigue una mayor dureza y carga de rotura que con el 8 %, a expensa de una disminución de alargamiento (ver gráfico n°. 5). Esta aleación se ha difundido en Norte América para la construcción de múltiples de admisión, cuerpos de bomba y carburadores, tendiendo en la actualidad a ser remplazado con aleaciones aluminio-silicio.

En Europa la aleación el 12 % de cobre ha sido tradicional para **pistones**, aleada con otros elementos en pequeños tenores como ser zinc, silicio, hierro, níquel, estaño, etc. De esta aleación eran constituídos los pistones del Lorraine 14<sup>e</sup> (Cu = 11-12 %, Sn = 5 %, Ni = 0.8-0.9 %, Fe = 1, Pb = 1).

La carga de rotura oscila entre los 13 y 16 kg/mm<sup>2</sup>. con alargamientos muy bajos, alrededor de 1 %.

### **Consideraciones sobre las aleaciones aluminio-cobre para fundición.**

Las características de fundición de estas aleaciones son consideradas como excelentes. Las que contienen bajo tenor en cobre tienen una elevada contracción al enfriamiento (del 6 al 7 %, hasta 8 % de contenido en Cu).

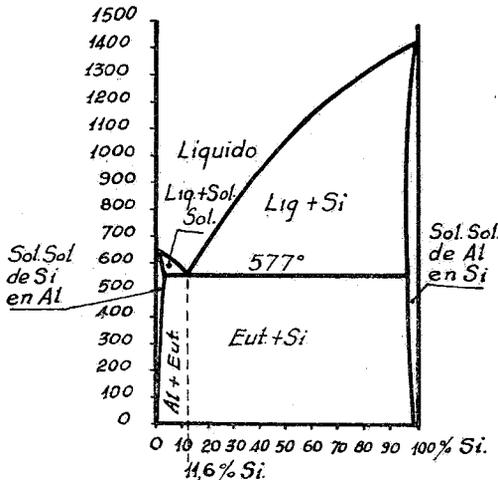
La resistencia a la corrosión de estas aleaciones es muy reducida debido a la presencia del aluminio de cobre.

**Aleaciones aluminio silicio.** — Estos elementos no forman ningún compuesto. Completamente solubles al estado líquido, tienen al estado sólido una solubilidad muy reducida, cuyo valor máximo

alcanza 1.65 % de silicio en correspondencia da 577°, bajando sensiblemente por efecto de la temperatura, pues a 200° ésta se reduce a apenas 0.05 %.

El diagrama de equilibrio de esta aleación presenta un eutéctico a la temperatura de 577° y en correspondencia del 11.6 % de Si. Sea de la parte del aluminio que de la parte del silicio el

*Diagrama de equilibrio de la aleación Aluminio-Silicio.*



ESQUEMA N° 7

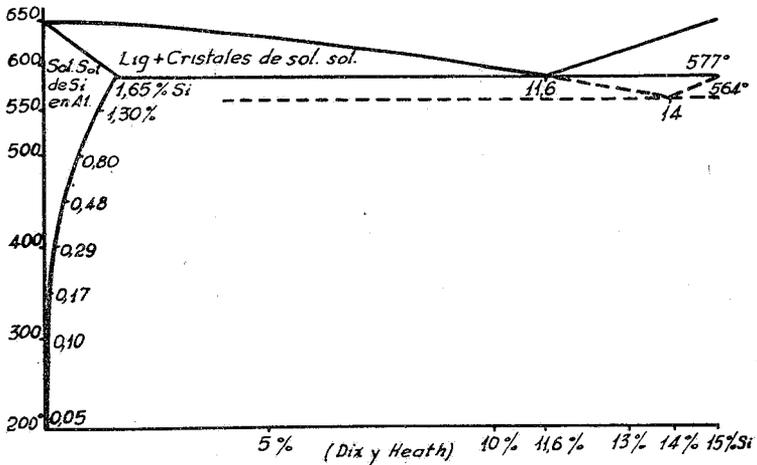
diagrama incluye campos de solución sólida: de silicio en aluminio y de aluminio disuelto en silicio, que tienden a anularse en correspondencia de la temperatura ordinaria. En base a este diagrama de equilibrio, queda establecido que las estructuras posibles serán de cristales de aluminio en campo eutéctico para las aleaciones hipoeutécticas y de silicio primario en eutéctico para las hipereutécticas.

**Fenómeno de sobrefusión o "modificación".** — Si considera-

mos en particular la aleación hipereutética correspondiente al 13 % de Si, ubicada a la derecha y en proximidad de eutético, la estructura micrográfica **normal** que le corresponde, será constituida por cristales de silicio primario en campo de eutético.

Ahora bien, las aleaciones como la citada, próximas al eutético (11.6 a 14 % de Si) presentan un interesante fenómeno de

Diagrama de equilibrio de la aleación Aluminio-Silicio -



ESQUEMA N° 8

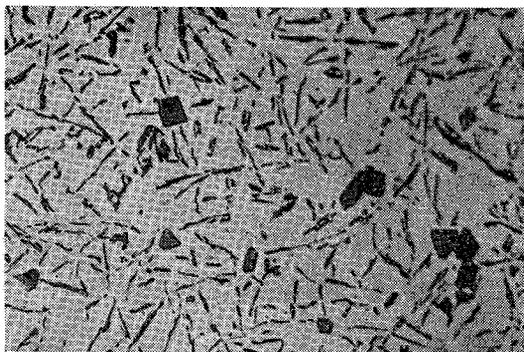
**sobrefusión**, por el cual solidifican totalmente en vez que a 577°, a temperaturas algo más bajas, como ser 564°, presentando al examen microscópico, una estructura en que falta silicio primario, siendo constituida exclusivamente por eutético.

Este hecho, denominado "modificación" se produce, sea por enfriamiento rápido a la solidificación (como ser fundiendo en coquillas, en vez que en arena) que por la presencia de elementos especiales, como ser sodio o potasio.

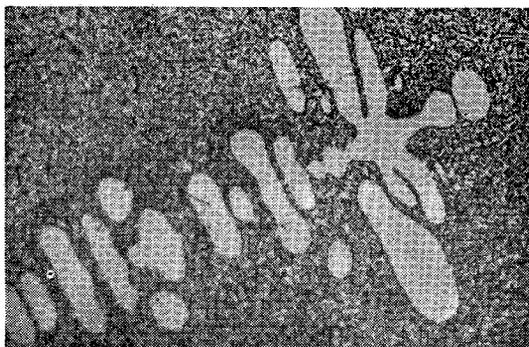
Fundiendo en arena también puede producirse este fenómeno por la presencia de los elementos antes citados.

El punto de fusión del eutéctico, normalmente ubicado a  $577^{\circ}$  y en correspondencia del 11.6 % de silicio, es rebajado por efecto de la modificación a  $564^{\circ}$  y la concentración llevada al 14 %. La "modificación" ha sido constatada por primera vez por Aladar Pacz en 1920, siendo objeto de una patente en Estados Unidos.

De los cambios estructurales que ésta importa, dan cuenta las siguientes micrografías:



MICROGRAFIA N° 9. — Estructura "normal" correspondiente a una aleación aluminio-silicio con 14 % de este último elemento, fundida en arena. Se observan cristales de silicio primario en un campo de entectico grueso



MICROGRAFIA N° 10. — Estructura de la misma aleación "modificada". Se observa en un campo de entectico finísimo una formación dendrítica de solución sólida rica en aluminio.

El cambio de estructura ocasionado por la "modificación" tiene mucho interés industrial por cuanto trae aparejada, como consecuencia, una sensible mejora en las características mecánicas, como ser carga de rotura y alargamiento.

Como ejemplo se citan a continuación las características mecánicas referentes a una aleación conteniente el 13 % de silicio fundida en arena. Al estado normal dió los siguientes valores:  $R = 12 \text{ kg/mm}^2$ . y  $A = 0.5 \%$ ; y "modificada" por medio de la adición de 0.05 % de sodio:  $R = 23 \text{ kg/mm}^2$ . y  $A = 8 \%$ .

Es sensible que la mejora atañe simultáneamente a la carga de rotura y al alargamiento. Otros datos que ilustran las ventajas de la "modificación" son los siguientes, referentes a aleaciones con variado tenor de silicio y con 0.35 % de Fe, fundidas en arena:

Tenor en Si %	Alargamiento %		Carga de rotura $\text{kg/mm}^2$ .	
	normal	modificada	normal	modificada
3	11.5	13	8	12
7	12.6	15.6	5	12
11	15	18	5	12

El mecanismo de la modificación ha dado lugar a considerables discusiones y teorías sin llegar de otra parte a un resultado concreto. Indudablemente la modificación consiste en una fuerte reducción del grano de cristalización del silicio debida al rápido enfriamiento, o por causa de los agentes modificadores, o a la acción conjunta de ambos factores. La fineza del silicio en la constitución del eutéctico "modificado" puede atribuirse a la rápida formación de numerosos gérmenes cristalinos, o a la acción de interferencia creada por los agentes modificadores. De las varias teorías surtas, que se inician con una debida a Guillet que invoca como causal la acción del sodio como desoxidante del aluminio y del silicio; otra sobre la existencia de dos sistemas Al — Si, uno estable

y otro metaestable (por analogía con la aleación Fe — C); y todavía sobre la formación de una aleación ternaria Al — Si — Na que no se concilia con la modificación producida por sólo enfriamiento; queda como más probable la teoría del “coloide protector” formulada en 1926 por Gwyer y Phillips que se sintetiza a continuación: Silicio y aluminio al estado líquido forman solución es decir, se hallan en un estado de verdadera dispersión atómica. Al solidificar pasan gradualmente de este estado de dispersión atómica, al estado cristalino. Puede concebirse fácilmente un estado intermedio entre ambos, durante el cual la dimensión de los dos elementos es “coloidal”. Una característica de la materia en este estado, es la tendencia a la **coalescencia**, es decir la tendencia de las partículas a agruparse para formar individuos de mayores dimensiones. El sodio o el potasio, a la par que la gran velocidad de enfriamiento, reducirían esta coalescencia, actuando como “coloides protectores”.

La “modificación” aparenta ser un fenómeno no solamente limitado a la aleación Al — Si, habiendo sido verificado por Gwyer y Phillips también en la aleación Al — Cu y Al — Mn, por adición de Na F (5 a 6 % a 950°) y en Pb — Sb, por acción de Al (0.2 % a 700°).

La modificación de las aleaciones Al — Si, tiene gran importancia del punto de vista industrial, pues con la mejora de carga de rotura, alargamiento y límite de fatiga, ha contribuido sensiblemente a su difusión, que en orden de importancia son las que siguen a las Al — Cu.

**Práctica de la modificación.** — Cuando la aleación ha alcanzado a la temperatura más apta para la modificación, es decir alrededor de los 770°, se introduce sodio metálico en el fondo de la aleación contenida en un crisol, mediante una oportuna campana metálica agujereada.

El sodio metálico es conservado bajo petróleo debido a su fácil oxidabilidad en el aire; pesado en la cantidad conveniente, es envuelto en papel de aluminio, antes de ser puesto en la super-

ficie del metal líquido, de donde por medio de la campana antes citada será llevado al fondo del crisol. Las cantidades de sodio empleado varían con el porcentaje de Si de la aleación según la siguiente escala debida a Archer y Kempf:

Si por ciento	Na por ciento
4	0.035
8	0.044
12	0.060
14	0.100

**Aleación al 13 % de silicio (Alpax, silumin).** — La aleación correspondiente al 13 % de silicio encontró particular difusión en Europa, bajo la denominación de Silumín en Alemania y de Alpax en Francia, no obstante ser de creación norteamericana, debida a Aladar Pacz, quien la patentó en 1920.

Esta aleación tiene excepcionales características en lo que atañe a fundición, como ser buena **colabilidad** que facilita la fusión de piezas complicadas, con variaciones bruscas de sección, o para piezas delgadas y que requieren **compactez** para resistir presiones. Tiene también un reducido coeficiente de contracción. Se presta tanto para la fundición en arena como en moldes metálicos (coquillas), para los cuales es especialmente indicada.

Su composición química oscila alrededor de 13 % de silicio. El hierro constituye una impureza inconveniente, pues forma con el silicio un compuesto complejo, denominado  $\beta$  (Fe — Si), y que se distingue en las micrografías como “escritura china” o forma acicular. Se admite en un tenor máximo del 0.8 %.

Se añade en general **manganeso**, en tenores próximos al de hierro, pues forma con éste un compuesto que transforma aquellas estructuras aciculares en nódulos, contribuyendo a un ligero aumento de la dureza de la aleación. Otras variantes posibles en la composición, son adiciones de cobre (0.8 %) y de magnesio (formándose entonces el compuesto  $Mg_2 Si$ ), que permite mejorar por tratamiento térmico las características mecánicas de acuerdo al concepto general de tratamiento de las aleaciones livianas que se considera más adelante.

Las características mecánicas que se consiguen del **silumin debidamente modificado** son las siguientes:

	R	E	A	$\Delta$	f
	kg/mm <sup>2</sup> .	kg/mm <sup>2</sup> .	%		kg/mm <sup>2</sup> .
Silumin fundido					
en arena	17 — 20	8.5 — 9	4 — 8	50 — 60	4,3
Silumin fundido					
coquilla	20 — 25	12 — 13	3 — 5	65 — 75	—
Silumin fundido					
a presión	25 — 30	—	2 — 5	80 — 90	—

Valores éstos que indican excelentes cargas de rotura aunadas con buenos alargamientos, debidos a una ajustada "modificación". Según Archer un silumin bien modificado contiene al análisis químico 0.014 % de sodio.

Un exceso de sodio da lugar a una estructura "hipermodificada" que se reconoce al examen macroscópico de la fractura por el grano fino pero irregular, con cavidades a canto redondo.

La falta de sodio produce una estructura hipomodificada, que se observa en la fractura por grano grosero, irregular y con puntos brillantes. La fractura de la aleación perfectamente modificada resulta con grano uniforme, compacto y claro.

Las ventajas que esta aleación ofrece son, en resumen:

Excelentes características de fundición, es decir buena colabilidad, poca contracción y compactez, que la hacen especialmente apta para fundiciones en coquilla y a presión.

Buenas cargas de rotura aunada con alargamientos aceptables.

Excelente resistencia a la corrosión por agua y neblinas marina.

A éstas se debe su difusión, especialmente en Europa a donde ha sido muy empleada en la construcción de carter sea para motores de automóviles que para aviación.

Frente a las ventajas antes citadas presenta algunos inconvenientes, que pueden resumirse en la siguiente forma:

- 1) En las partes gruesas de las piezas fundidas se produce un rechupado que exige el empleo de enfriadores locales o au-

mento en las cargas de colada, lo que constituye un serio inconveniente para las producciones en fuertes series, por la inmovilización de material que produce.

- 2) Algunas características mecánicas como ser límite elástico y límite de fatiga, son inferiores al promedio de otras aleaciones (ver Tabla I).
- 3) Ofrece dificultades al usinaje debido al efecto abrasivo de las partículas duras de silicio que se hallan empotradas en una matriz de aluminio de gran plasticidad, lo que produce desgarramiento y empastado de la herramienta. Esto es subsanable con el empleo de herramientas al carburo de tungsteno (Estellita, Widia, etc.).

Dada la preferente atención que se asigna en Norte América al grado de usinabilidad del material, no obstante ser éste el país de origen de esta aleación, se la reemplaza con otras.

El silumin es muy empleado en Europa para la producción de **carfers**. sea para motores de automóviles que para motores de aviación cuando por su reducida potencia admitan carter fundido. En Norte América la aleación tradicional para este fin ha sido la aluminio-cobre al 8 %. En este país el silumin es muy empleado para pequeñas piezas fundidas a presión, como ser enfriadores de bujías, piezas de unión para recubrimiento conductores eléctricos de alta tensión en motores de aviación, que evitan interferencia a los aparatos de radio, etc.

**Aleación al 5 % de Si.** — Esta aleación es muy difundida en Norte América bajo la designación de 43 Alloy de la Alcoa, debido a sus excelentes características de fundición y a su resistencia a la corrosión. Las piezas resultan compactas, sin porosidades y apropiadas, cuando tienen paredes delgadas para soportar presiones de agua, aceite, etc. Como la aleación al 13 % de Si, resiste a la corrosión de agua de mar, mejor que cualquiera otra aleación liviana que no esté especialmente establecida para este fin, puede ser empleada para pequeñas piezas fundidas en hidroaviones.

Los demás elementos que se hallan presentes en esta aleación como ser Fe, Cu, Zn, deben ser considerados como impurezas. Pe-

queños tenores de Mn (0.2 %) pueden interpretarse como correctivos de la acción del Fe, de acuerdo a la consideración indicada al ocuparnos de la aleación anterior.

La preparación de esta aleación puede realizarse añadiendo aluminio al silumin o directamente partiendo del aluminio como material de base y empleando aleación madre Al - Si por ejemplo 50 : 50.

A más del empleo aeronáutico antes citado, es usada para adornos arquitectónicos, piezas para naves, aparatos para química, cajas para instrumentos fundidas a presión, etc.

Presenta al usinaje dificultades como el silumin, pero en grado más reducido.

Como características mecánicas pueden tomarse como base:  $R = 12 \text{ kg/mm}^2$ .  $A \% = 3.5$ , fundida en arena. Es muy empleada para piezas fundidas a presión, mejorando sus características (ver Tabla I). Es susceptible también de ser mejorada por "modificación".

También son empleadas aleaciones al 10 % de Si con características mecánicas análogas a la anterior, es decir, con una mayor carga de rotura a expensa de una disminución en el alargamiento.

## ALEACIONES ALUMINIO - MAGNESIO

El diagrama aluminio-magnesio presenta particular interés sea para las aleaciones livianas que para las ultralivianas que tienen como base este último metal.

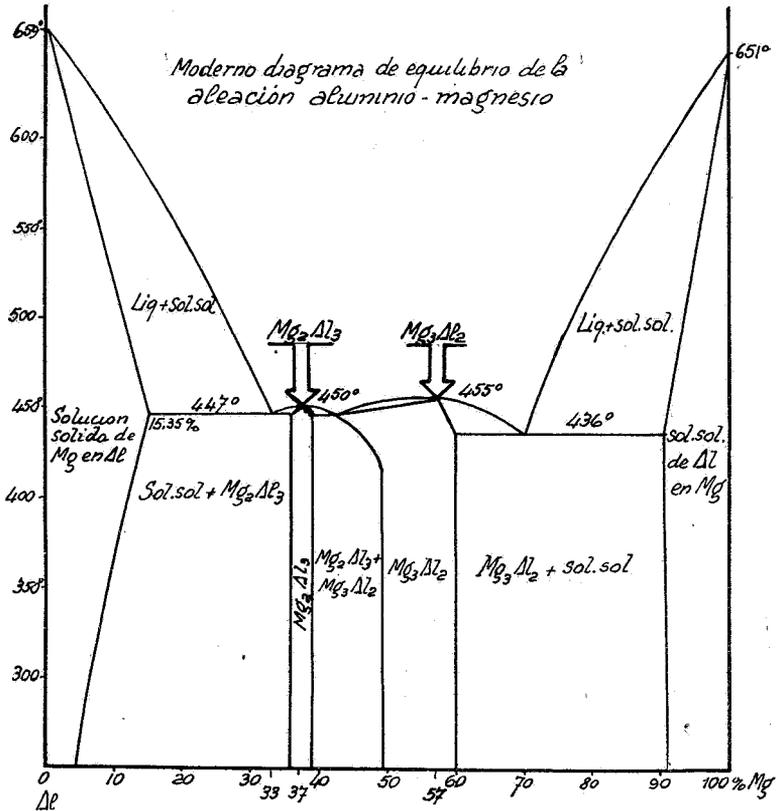
Aluminio y magnesio son totalmente solubles al estado líquido. Al estado sólido dan lugar a la formación de dos compuestos:  $Al_3Mg_2$  correspondiente aproximadamente el 37 % de Mg y  $Al_2Mg_3$  con 57 % de Mg.

De ambos lados del diagrama existen dos amplios campos de solución sólida correspondientes a la solubilidad de magnesio en aluminio y de aluminio en magnesio respectivamente.

La determinación del primero ha dado lugar a numerosos estudios, entre los cuales se destacan los de Hanson y Gayler (1920),

corregidos por Dix y Keller (1929) y conseguidos por vía metalográfica, siendo confirmado estos últimos por estudios röntgenográficos de Schmid y Siebel en 1931.

Se destaca la analogía de este diagrama en las proximidades del aluminio con el aluminio-cobre.



ESQUEMA N° 11

La solubilidad del magnesio que alcanza un máximo del 15 % en correspondencia de 447° se reduce sensiblemente con la temperatura.

Las aleaciones aluminio magnesio del punto de vista industrial han sido empleadas entre las primeras desde 1910, en conside-

ración de la elevada resistencia a la corrosión que las distingue, aun si las características mecánicas no sobresalen.

Cabe al respecto recordar los **magnaliums**, con tenores de magnesio entre 2 y 25 %. Estas aleaciones abandonadas por un cierto tiempo volvieron a ser consideradas en 1934 - 35, destacándose entre ellas los **Hydrionaliums** en Alemania y **Alumág** en Francia con variados tenores en magnesio, inferiores al 14 % y con adiciones de manganeso que a la vez contribuye a disminuir la susceptibilidad corrosiva, aumenta la carga de rotura.

Estas aleaciones son susceptibles de tratamientos térmicos para mejorar las características mecánicas. Es posible que en el porvenir hallen un mayor desarrollo.

En Estados Unidos es empleada para fundición en arena la 220 Alloy de la Alcoa, (ver Tabla I) con el 10 % de Mg, cuyas características mecánicas, después de templada en agua a 450° y envejecida, son las siguientes:  $R = 31 \text{ kg/mm}^2$ .  $A \% = 13$ , aleación que ha adquirido una notable difusión en consideración de su buen alargamiento y su resistencia a la corrosión.

La presencia de silicio o manganeso aumentan la carga de rotura y el límite elástico a expensas del alargamiento.

## ALEACION ALUMINIO-SILICIURO DE MAGNESIO

Cuando silicio y magnesio se encuentran presentes en relaciones de peso correspondientes a la fórmula  $\text{Mg}_2 \text{Si}$ , (a 100 partes de siliciuro de magnesio corresponden 64 de Mg y 36 de Si) se forma este compuesto que como todos los compuestos intermetálicos, es duro y frágil.

Dado que el silicio es una impureza corriente del aluminio, es suficiente la presencia del magnesio para que se forme este compuesto. Su característica de dureza y su solubilidad en el aluminio variable con la temperatura, tienen un rol muy importante en el tratamiento térmico de las aleaciones livianas, de aquí el interés que tiene el diagrama de equilibrio del sistema aluminio-siliciuro de magnesio, que se indica a continuación, debida a Dix, Keller y Graham.

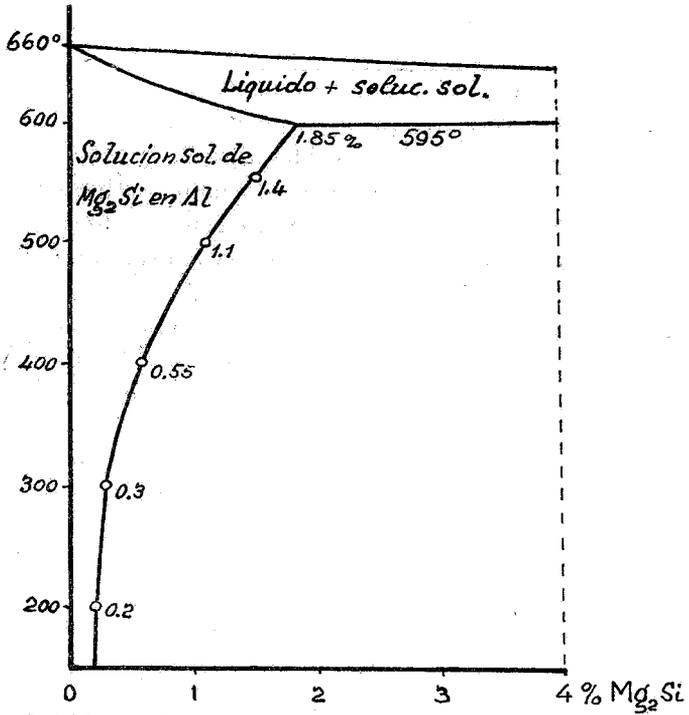
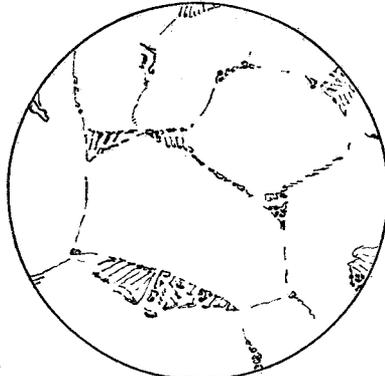


DIAGRAMA DE EQUILIBRIO DE LA ALEACION ALUMINIO-SILICIURO DE MAGNESIO. 4-



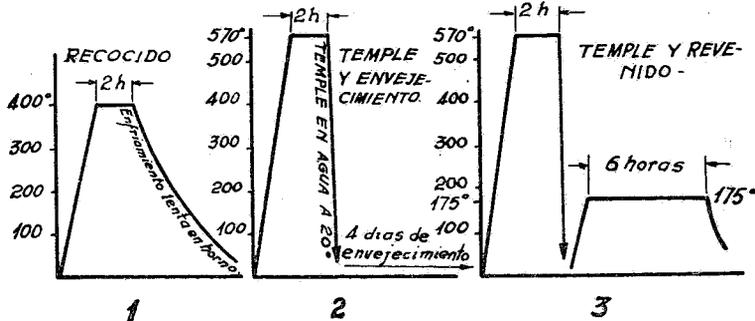
"ESCRITURA CHINA" aspecto micrografico del Mg<sub>2</sub>Si - 500φ dibujo

Aluminio y siliciuro de magnesio forman un eutéctico en correspondencia del 13 % de este compuesto, a la temperatura de 595°.

El siliciuro de magnesio se presenta en las micrografías coloreado en azul de variada tonalidad hasta alcanzar el negro. Da lugar a dibujos parecidos a la "escritura china" que es característica del constituyente Al — Si — Fe, como se indicó anteriormente.

Como aplicación práctica inmediata de este diagrama, podemos citar como ejemplo la aleación **almasilium**, establecida en Francia y cuya composición es la siguiente: Mg = 1 % y Si = 2 %; como consecuencia Mg<sub>2</sub> Si = 1.50 % siendo 0.58 % el silicio que corresponde a este compuesto, y quedando libre 1.42 %.

Los tratamientos térmicos a que se somete esta aleación son indicados en los gráficos siguientes:



ESQUEMA N° 13

Las características mecánicas de esta aleación en varias condiciones de tratamiento térmico son las siguientes:

	R. kg/mm <sup>2</sup> .	E. kg/mm <sup>2</sup> .	A %
Recocido, de acuerdo grá. 1	10.6	5.4	29.5
Inmediatamente después de templado al agua, a 570° . .	25.1	12.1	27.5
Envejecido 4 días a temperatura ambiente . . . . .	31.3	18.4	26
Revenido 6 horas a 175° . .	40	36.4	6.5

Las características indicadas corresponden a un **producto laminado**, que aquí se indica para ilustración del efecto de los tratamientos térmicos.

Al calentarse a 570° el Mg<sub>2</sub> Si contenido en la aleación se disuelve, de acuerdo al diagrama de equilibrio, totalmente en aluminio. Tratamiento éste llamado “de solución” de acuerdo a la función que cumple. Al enfriarse violentamente la aleación en agua, el siliciuro de magnesio permanece disuelto, si bien en estado anormal de equilibrio físico-químico.

Las características mecánicas determinadas inmediatamente después del temple acusan  $R = 25.1$  kg/mm<sup>2</sup>. y  $E = 12$  kg/mm.

Dejando permanecer la pieza a temperatura ambiente varios días y determinando las características mecánicas después de este período, denominado de **envejecimiento**, la carga de rotura y el límite elástico acusan un sensible aumento ( $R = 31$  y  $E = 18.4$  kg/mm<sup>2</sup>).

Esto significa que se ha producido una alteración en la estructura del material. En efecto el siliciuro de magnesio, compuesto duro, que se halla forzosamente disuelto inmediatamente después del temple, tiende al equilibrio físico químico, precipitando bajo forma de pequeños cristales distribuidos en la masa de la aleación, por cuanto la elevada viscosidad del medio, masa sólida a temperatura ambiente, no permite la formación de cristales normales.

Estos pequeños cristales sumamente duros, distribuidos en forma homogénea en la masa metálica, actúan como otras tantas cuñas en los planos de clivaje de los cristales, oponiéndose al deslizamiento que según los mismos ocurre por acción de los esfuerzos exteriores. A esto se atribuye el aumento de dureza que el material ofrece después de este período de estacionamiento, denominado comúnmente “envejecimiento”, o con términos más ajustados a la función, **tratamiento de precipitación**.

Esta precipitación puede ser acelerada, a la par que intensificada, disminuyendo la viscosidad del medio, con un aumento de temperatura. En nuestro ejemplo se han empleado 175°. Se observa, después de seis horas de este “**envejecimiento artificial**”, un aumento sensible de la carga de rotura y del límite elástico, que

son ahora respectivamente 40 y 36.4 kg/mm<sup>2</sup>. a expensas de una disminución del alargamiento, que de 26 % correspondiente al tratamiento anterior, baja a 6.5 %.

Los tratamientos térmicos de las aleaciones livianas de los cuales se ha esbozado aquí un ejemplo serán tratados más adelante al considerarse las aleaciones a elevada resistencia. Estos se rigen por conceptos generales, fundados sobre la diferente solubilidad en función de la temperatura, de un compuesto duro, en el aluminio de acuerdo a cuanto acabamos de considerar.

### ALEACIONES ALUMINIO-MANGANESO

Aluminio y manganeso forman dos compuestos:  $Mn Al_3$  en correspondencia del 43.5 % de Mn, y  $Mn_3 Al$ , al 85.5 % de Mn.

En las aleaciones comerciales el manganeso nunca supera el 2.5 %, empleándose en general como elemento accesorio de aleaciones binarias o más complejas.

La introducción del manganeso en las aleaciones se realiza en general por medio de "aleación madre" que contiene el 10 % de este elemento.

La solubilidad del Mn. en el aluminio, es decir del compuesto  $Mn Al_3$  que se forma, es muy limitada, pues su valor máximo es de 0.65 % a 657°.

El manganeso en aleación con el aluminio tiene como efecto aumentar la dureza, contribuyendo también a disminuir la susceptibilidad corrosiva fomentada por otros elementos.

La Alcoa, bajo la designación de 3 S, produce una aleación que contiene el 1.5 % de Mn, que reemplaza ventajosamente las chapas, tubos, barras de aluminio puro en muchos usos.

### ALEACIONES ALUMINIO-ZINC

Aluminio y zinc forman dos compuestos:  $Al Zn$  en correspondencia del 70.7 % de Zn, y  $Zn_3 Al_2$  (78.4 % de Zn).

No obstante ser el zinc uno de los principales elementos para conferir dureza al aluminio, las aleaciones binarias no son empleadas en la industria, porque son excesivamente frágiles en caliente, y presentan una elevada contracción al solidificar.

El zinc aumenta la colabilidad del aluminio en función casi lineal del tenor añadido.

Son empleadas las aleaciones ternarias, con Zn y Cu con tenores entre 10 y 14 % de Zn y 2 a 3 % de Cu, especialmente en Inglaterra y Alemania.

La aleación 12 % Zn y 3 % Cu, es conocida bajo la denominación de "aleación alemana" dada su larga difusión en ese país. De esta aleación, como de la 145 Alloy de la Alcoa (10 % de Zn y 2.5 % de Cu) se indican las características mecánicas en la Tabla I. Estas aleaciones son susceptibles de tratamientos térmicos.

#### ALEACIONES ALUMINIO-SILICIO-COBRE

Una aleación que tiene alguna difusión especialmente por sus excelentes características de fundición, para formas en arena es la que se encuadra en la siguiente composición química:

Si	=	4.5	—	5.5	%
Cu	=	1	—	1.5	„
Mg	=	0.4	—	0,6	„

de la cual la 355 de la Alcoa es un ejemplo (ver Tabla I). La presencia de  $Mg_2$  Si y  $Al_2$  Cu la hace susceptible de tratamientos térmicos, con una cierta variabilidad en los mismos para conseguir características mecánicas variadas.

La microfotografía n°. 14 que se indica a continuación corresponde a esta aleación, sometida al siguiente tratamiento: Calentada por 16 horas a 325 - 530° C (tratamiento de solución). Templado en agua calentada a 80°. Luego enyejecida artificialmente dos horas en agua hirviendo.

## ALEACIONES PARA USOS ESPECIALES

Bajo esta designación se consideran aquellas aleaciones que han sido estudiadas para soportar particulares condiciones de trabajo como ser pistones para motores a explosión y Diesel, cabezas de cilindros o también aleaciones en las cuales priman sobre otras características la resistencia a la susceptibilidad corrosiva.



MICROGRAFIA N°. 14

Por lo que atañe a las condiciones que requieren los pistones, las aleaciones a base de aluminio tienen la importante ventaja del bajo peso específico (aproximadamente 2.9 frente a 7.1 corriente en la fundición) lo que reduce las acciones de inercia de las masas dotadas de movimiento alternado. Otra ventaja que es común a estas aleaciones, si bien con ligeras variaciones de una a otra, es el elevado coeficiente de conductividad térmica, que por ejemplo en la aleación 122 de la Alcoa, más adelante considerada es 0.34, en unidades C G S, frente a 0.11 característica de la fundición.

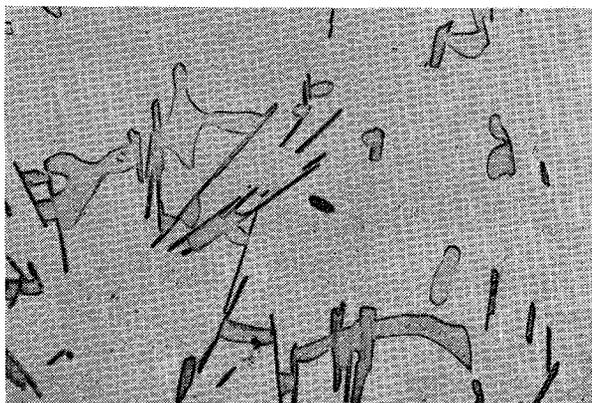
Descontadas, entonces, estas ventajas que son corrientes en gra-



Se presta especialmente para ser fundida en moldes metálicos (coquillas).

El coeficiente de dilatación de la aleación 122 (Alcoa) es:

Entre 20° C y 100°	0.00002196
Entre 20° y 200°	0.00002286
Entre 20° y 300°	0.00002340



MICROGRAFIA N°. 15. — Estructura típica de la aleación 122 de la Alcoa, fundida en coquilla y tratada térmicamente (C. Panseri).  $\text{CuAl}_2$  constituyente claro en relieve, con canto redondeado. Las agujas oscuras son constituyentes complejos de Fe.

Otra aleación de este tipo es la "Bohnalite" (10 % Cu, 0.25 Mg) que no contiene hierro, muy difundida en Norte América para la fundición de pistones en coquilla y cuyas características mecánicas son similares a las antes citadas.

#### ALEACION Y

(Composición: Cobre 4 %. Niquel 2 %. Magnesio 1.5 %)

La puesta a punto de esta aleación es el resultado de prolonga-

das investigaciones realizadas en los National Physical Laboratories de Teddington, a los fines de la pasada guerra, especialmente por obra de Rosenhain y Archbutt.

El fin propuesto era conseguir una aleación resistente a elevada temperatura, destinada a la fabricación de **pistones y cabezas de cilindros** para motores de aviación.

La aleación Y se presta bien tanto para piezas fundidas en arena, como en moldes metálicos, pudiéndose emplear también en piezas forjadas.

Su composición química oscila entre los siguientes valores:

Cu	≡	3.5 — 4.5 %
Ni	≡	1.8 — 2.3 %
Mg	≡	1.2 — 1.7 %
Fe	max	0.8 %
Si	max	0.7 %

La estructura micrográfica de la aleación Y es algo compleja y difiere en forma sensible de una muestra a la otra. Se observan los siguientes constituyentes:

Cristales de aluminio que contienen pequeñas cantidades de cobre y de níquel en solución sólida.

Una red constituída por  $\text{Ni Al}_3$ .

Un constituyente **ternario** Al - Cu - Ni, denominado T.

Siliciuro de magnesio  $\text{Mg}_2 \text{Si}$ .

Aluminio de cobre  $\text{Cu Al}_{12}$ .

Se considera que la resistencia en caliente es debida especialmente al constituyente ternario.

Esta aleación es muy sensible a tratamientos térmicos. Estos consisten en dejar permanecer las piezas por varias horas —el tiempo es función de las dimensiones de la pieza— a temperaturas de  $500^\circ$  a  $520^\circ$ , siendo preferida esta última. El calentamiento se realiza en baño de sal. **Tratamiento éste de solución.**

El enfriamiento se practica sumergiendo la pieza en agua hirviendo o en aceite de colza. Se procede luego al **envejecimiento** que puede ser **lento**, dejando demorar la pieza a temperatura ordinaria unos 5 días o **rápido** en dos horas a  $100^\circ$  (agua hirviendo).

A veces, para conseguir mayor dureza, el envejecimiento se produce en hornos, por 1 ó 2 horas a temperatura entre 150 y 250°.

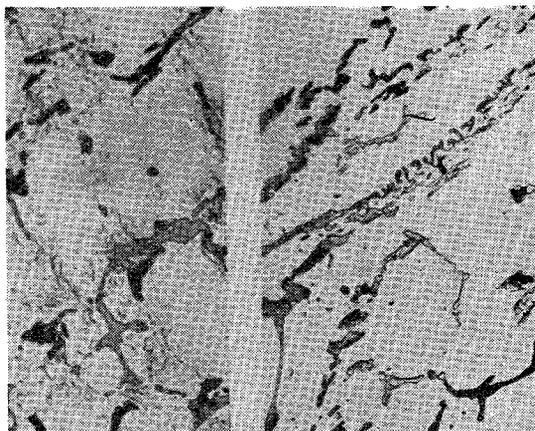
Un ejemplo, citado por Jeffries, de las ventajas que se consiguen con los tratamientos térmicos, es el siguiente:

La pieza fundida da en bruto de colada:

R = 19 kg/mm<sup>2</sup>.

A =  $\phi$  1.2 %

$\Delta$  = 87



MICROGRAFIA N°. 16. — Aleación Y fundida en coquilla (C. Panseri). En bruto de colada a la izquierda y tratada a la derecha. El constituyente negro es  $NiAl_3$  y los claros  $CuAl_2$  y el ternario T.

Después de tratada de 1 a 3 horas e 520° seguido por temple y recalentamiento da una hora a 230°, da:

R = 21 a 24 kg/mm<sup>2</sup>.

A = 1.5 %

$\Delta$  = 110 a 120

Esta aleación, producida por la Alcoa bajo la designación de 142 Alloy, es muy empleada en Norte América para la construcción de **cabezas de cilindros** para motores de aviación, fundidas en arena, dadas sus excelentes características de resistencia a temperatura elevada.

La elaboración resulta algo costosa, sea por el costo inicial debido a la presencia de níquel, como también a alguna dificultad de fundición.

La aleación al estado líquido absorbe fácilmente gases y vapor de agua, de modo que debe evitarse cualquier contacto con los productos de la combustión de los hornos y las formas deben ser prolijamente secadas en horno.

Para pistones, en Norte América se prefiere la aleación 122, de modo que en ese país su empleo se limita exclusivamente a las cabezas de cilindros.

### ALEACION LO EX (A 132 DE LA ALCOA)

Una aleación para pistones de reciente puesta a punto es la A 132 de la Alcoa que se caracteriza entre las livianas por su bajo coeficiente de dilatación, según los siguientes valores:

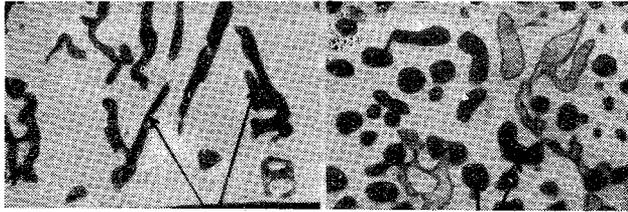
Entre 20 y 100° C	0.00001890
Entre 20 y 200° C	0.00001998
Entre 20 y 300° C	0.00002088

Es destinada especialmente a la fundición en moldes metálicos (coquillas).

Su composición es la siguiente:

Si = 12 %    Ni = 2.5 %    Mg = 1 %    Cu = 0.8    Fe = 0.8

Es susceptible de varios tratamientos térmicos. Sus características mecánicas sea a temperatura ordinaria que elevada, están indicadas en la tabla de la página siguiente, comparativamente con las aleaciones para pistones antes citadas.



MICROGRAFIA N°. 17

Estas micrografías a 1500  $\phi$  corresponden a la aleación LO EX, demuestran el efecto del recocido sobre el silicio . (C. Panseri).

En la micro de la izquierda se observa el **Si** primario conseguido directamente por solidificación bajo forma de láminas. En la micro de la derecha el silicio por efecto del recocido se halla en estado esferoidal producido por coalescencia. Los elementos carlos son de Cu Al<sub>2</sub>.

El recocido produce un efecto contrario a la "modificación" de la estructura eutéctica, favoreciendo alargamientos elevados.

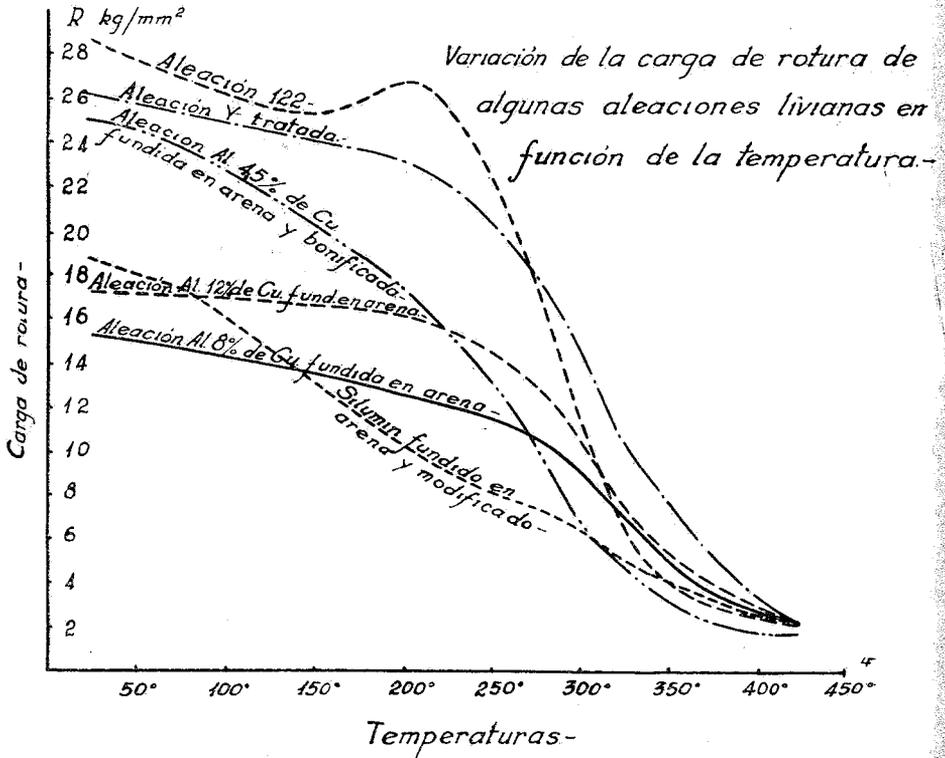
CARACTERISTICAS MECANICAS DE ALEACIONES LIVIANAS PARA PISTONES A  
VARIAS TEMPERATURAS (ALCOA)

TEMPERATURA	LYNITE (122 ALLOY)			Y (142 ALLOY)			LO EX (A 132)		
	R kg/mm2.	E kg/mm2.	A %	R	E	A %	R	E	A %
75° F ( 25° C)	25.3	21	1	26	22.5	0.5	25.3	19.7	0.5
300° F (156° C)	24.6	21	1.2	21	19.7	0.5	21.8	15.5	1
400° F (205° C)	15.5	11.2	1	19	17.6	1	16.2	9.4	2
500° F (260° C)	7.0	3.5	6	8.4	3.5	9	11.4	6.7	2
600° F (315° C)	5.6	3.2	14	5.3	2.5	10	7.7	3.5	8

ALEACIONES DEL GRUPO RR (ROLLS ROYCE)

Estas aleaciones, puestas a punto por la Rolls Royce Ltd. y preparadas por la High Duty Alloys Ltd. de Slough, bajo la denominación de Hiduminium, son derivadas de la Y pues disponen como ésta de Cu, Ni, y Mg, si bien en tenores menores, compensando esta reducción por la adición de Si, Fe y Ti.

El titanio se introduce comúnmente en la aleación bajo la forma de tetracloruro (Ti Cl<sub>4</sub>), gas que se hace burbujear en la ma-



ESQUEMA N° 18

sa líquida, inyectándolo en el fondo del crisol. Se consiguen con esto, dos sensibles beneficios: el cloro es un elemento **degasificante**, es decir elimina los gases disueltos, evitando las porosidades en la pieza fundida y el Ti produce afinado de la macroestructura, es decir se consigue un grano sensiblemente más fino.

Estas aleaciones tienen la designación, composición química y empleo indicado en la siguiente tabla:

## HIDUMINIUM

COMPOSICION QUIMICA %	RR 50 (Piezas fundidas en arena y co- quilla)	RR 53 (Pistones en coquilla)	RR 56 (Piezas for- jadas)	RR 59 (Pistones for- jados)
Cu	1.3	2.25	2	2.25
Ni	1.3	1.3	1.3	1.3
Mg	0.1	1.6	0.8	1.6
Fe	1	1.4	1.4	1.4
Ti	0.18	0.1	0.1	0.1
Si	2.2	1.25	0.7	0.5

Ejemplos de piezas realizadas con estas aleaciones, son los siguientes:

Con la RR 50: múltiples de admisión para motores radiales, carters fundidos en general, monoblock para Diesel de aviación.

Con la RR 56: turbinas para sobrealimentadores de motores de aviación, cuerpo de bomba estampados, carters forjados para motores, palas de hélices, etc.

Con la RR 59: pistones forjados para motores de aviación y Diesel.

Las características de la aleación RR 53 son análogas a la Y sea a temperatura ordinaria que elevada y posiblemente un poco mejores. Es más fácil de fundir que la Y, pues el silicio favorece la colabilidad y disminuye la contracción y la fragilidad es caliente. Esta aleación, más que para pistones fundidos en coquilla, se presta para cabezas de cilindros para Diesel, cabezas de cilindros para motores de aviación refrigerados de aire, fundidas en arena, etc. Para pistones fundidos en coquilla se emplea el siguiente tratamiento térmico:

- 1) Tratamiento de solución: 2 a 4 hs. a 510-540°C. Temple en agua fría.

2) Tratamiento de precipitación (envejecimiento artificial):  
20 hs. a 155 - 175° C.

Las características **mínimas** de estas aleaciones, según las "Air Ministry Provisional Specification", son las siguientes:

Aleación	RR 50	RR 53	RR 56	RR 59
Especif.	D. T. D. 133 B	D. T. D. 243	D. T. D. 246	L. 43
Cu	0.8—2	2—3	1.5—2.5	1.5—3
Mg	0.05—0.3	0.6—1	0.6—1.2	1.2—1.8
Si	2.5—3.8	0.7—1.5	1	1—3
Fe	0.8—1.4	1.2—1.5	0.8—1.5	1—1.5
Ni	0.8—1.75	1—2	0.5—1.5	0.5—1.5
Ti	0.25	0.3	0.12	0.2
Tratamiento	Envejecimiento 16 hs. 150 - 175° C	Tratamiento solución: 525° Envej.: 165° C.		
R. kg/mm2.	18	28	25	40
E. kg/mm2.	12	27	12	32
A %	2.5	—	16 %	6 %

### ALEACIONES LIVIANAS RESISTENTES A LA CORROSION

El aluminio tiene una excelente resistencia a la corrosión, a la cual debe su empleo, a pesar de características mecánicas, como ser la carga de rotura, sumamente pobre.

Esta resistencia a la susceptibilidad corrosiva es debida a la **homogeneidad química primaria**, siendo como metal puro, constituido por una única fase y a las posibilidades industriales de conseguirlo con un buen grado de pureza, a la cual se debe su única auto-protección.

El aluminio **extra puro**, conseguido con el proceso Hoopes, alcanza hasta títulos del 99.98 %. De otra parte las impurezas que incluye, provenientes del mineral y de la elaboración, hierro y silicio, no son tan perjudiciales como podrían serlo otros elementos como por ejemplo cobre y zinc.

Del punto de vista electro-químico, el aluminio a 99.5 % puede ser protegido al ataque del agua de mar por otros elementos

deducidos de la escala de los potenciales electrolíticos, que ocupan posiciones de más reactivos, como ser cadmio, aceros ordinarios, zinc, manganeso y magnesio.

La resistencia a la corrosión del aluminio disminuye en forma más o menos sensible en sus aleaciones.

Esta disminución es poco sensible cuando la aleación admite la homogeneidad química primaria, como ocurre en el caso del aluminio-magnesio, oportunamente considerado.

Estas aleaciones se destacan precisamente por su resistencia a la susceptibilidad corrosiva, como ser los magnaliums, hydronaliums, etc.

En otros casos, aun si la aleación está constituida por dos fases, como por ejemplo las aleaciones el 13 % de silicio, la fineza de estructura conseguida por "modificación" confiere una buena resistencia a la corrosión.

Las aleaciones que contienen cobre y las que contienen zinc, son muy pobre bajo este punto de vista, pues cobre y zinc contribuyen a fomentar la susceptibilidad corrosiva.

Desde 1915 ha sido establecido por Desch que la presencia de aluminuros de cobre,  $\text{Cu Al}_2$ , provoca el fenómeno corrosivo en las aleaciones de aluminio.

En vez el magnesio, silicio y manganeso no perjudican cuando se hallan solos. Las aleaciones que contienen juntos **magnesio y silicio** son particularmente sensibles a la corrosión **intercristalina**, después de temple y revenido que provoca la precipitación de siliciuro de magnesio,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ , entre los granos.

El **cobre**, a través del compuesto aluminuro de cobre  $\text{Cu Al}_2$ , en presencia de magnesio y de silicio provoca la corrosión por **picaduras**.

En las aleaciones livianas hasta ahora consideradas el concepto principal que ha prevalecido para su determinación ha sido el de las características mecánicas, a temperatura ordinaria o elevada, consiguiéndose sólo accidentalmente una buena resistencia a corrosión, como en las aluminio-magnesio y aluminio-silicio. También han sido preparadas aleaciones que han puesto como funda-

mental condición la antes citada, supeditando a ésta las demás características.

Algunas de estas aleaciones serán indicadas a continuación, en las cuales cobre y zinc son excluidos por los motivos antes expuestos, compareciendo otros elementos como ser el antimonio:

	Si	Mg	Mn	Sb	Ti
Anticorodal G . . . . .	2 %	0.6	0.7	—	0.2
K. S. Seewasser . . . . .	—	2	1.5	—	—
Anticorodal 198 . . . . .	0.6	2	1.3	0.2	—

**Anticorodal.** — En estas aleaciones cobre, zinc y estaño son admitidos solamente como vestigios no dosables.

En el anticorodal G el porcentaje de silicio en relación al magnesio es muy superior al que corresponde para la obtención del  $Mg_2Si$ , a los fines de que silicio permanezca libre. La parte combinada permite mejorar por tratamiento térmico las características mecánicas de esta aleación.

El manganeso a la par que contribuye a la dureza de la aleación, actúa como correctivo del hierro, contenido como impureza.

Esta aleación es muy empleada para piezas fundidas en formas metálicas como ser manijas, cerrajes, elementos arquitectónicos y decorativos. Sus características mecánicas **mínimas** son:

Colada en arena y tratada:	R = 22	A = 1.5 %
Colada en coquilla y tratada:	R = 25	A = 1.5 %

**Aleación K. S. Seewasser.** — Esta aleación establecida por la firma Karl Schmidt de Nekarsulm, denominada en Francia Thala-sal, está especialmente destinada a resistir al agua de mar.

Su composición es la siguiente: 2.25 % de magnesio, 2.5 % de manganeso y 0.2 % de antimonio.

Se atribuye su resistencia a la corrosión a la formación de una capa protectora de oxicluros de antimonio ( $SbOCl$ ) si bien se trata de una hipótesis que no puede confirmarse.

La distribución del Sb en la aleación en forma homogénea, ofrece alguna dificultad.

Se emplea sea para piezas fundidas en arena que en coquilla, con destino a naves como ser hublotos ,etc.

Las correspondientes características mecánicas y físicas están indicadas en la tabla I.

**Anticorodal 198.** — Esta aleación denominada también Peraluman tiene una composición análoga a la anterior, excepto por lo que atañe al antimonio que no figura (Mg 2 %, Mn = 1.4 %, Fe — Ti = 0,3, Si = 0.4).

Se emplea para piezas fundidas en arena y laminadas. Poco apta para fusiones en coquilla por su elevada contracción, lo que puede subsanarse en parte utilizando formas muy calientes (300°). Sus características mecánicas son:

Fundida en arena:	R = 13 - 16 kg/mm <sup>2</sup> .	E = 6 - 8	A % = 5 - 6
Fundida en coquilla:	14 - 19	7 - 8	5 - 10

A los fines de indicar el comportamiento relativo a corrosión de varias aleaciones se indica a continuación la pérdida en peso de las mismas, en gramos por decímetro cuadrado por día, cuyas probetas han sido sometidas al ataque de una solución de cloruro de sodio (30 gr. por litro con perhidrol.

Aluminio puro (99.98 %)	en chapa . . . . .	0.01 — 0.03
Aleación Y (4 % Cu — 15 Mg — 2 Ni)	. . . . .	0.6 — 0.8
Duraluminio en chapa (Cu = 4 %, MgO.5 — MnO.5)	. . . . .	0.35 — 0.50
Aleación 12 % Zn — 3 Cu	. . . . .	1.5 — 2.5
Hydronaliums (14 % Mg)	. . . . .	0.05 — 0.20
Silumin (13 % Si)	. . . . .	0.20 — 0.35
Anticorodal fundida	. . . . .	0.05 — 0.20
Anticorodal 198	. . . . .	0.05 — 0.15
K. S. Seewasser	. . . . .	0.10 — 0.20

B I B L I O G R A F I A

- 1 — The aluminium industry. EDWARDS, FRARY y JEFFRIES. — New York. Vol. I y II. 1930.
- 2 — Métaux et Alliages. GEN. C. GRARD y J. COURNOT. — París. Vols. I, II y III. 1930.
- 3 — Les métaux légers et leurs alliages. LEON GUILLET. — París, 1936.
- 4 — La fondería d'alluminio. Metallografía e tecnología delle leghe leggere da fondería. CARLOS PANSERI. — Milán, 1934.
- 5 — Trempe Recuit Revenu. LEON GUILLET. — París, 1928.
- 6 — Les méthodes d'étude des alliages métalliques. LEON GUILLET. — París, 1933.
- 7 — La corrosión en métallurgie. GEN C. GRARD. — París, 1936.
- 8 — Metals. H. CARPENTES y J. M. ROBERTSON. Vol. II. — Londres, 1939.
- 9 — Revue de l'aluminium. — París, varias.
- 10 — Revue de métallurgie. — París, varias.
- 11 — Service characteristic of the light metals and their alloys. American Society for Testing Materials. — Philadelphia, 1934.
- 12 — Aeronautical Materials Specifications, Society of Automotive Engineers. — New York, 1941.
- 13 — Aluminium in aircraft. Aluminium Company of América (ALCOA). — Pittsburg, 1930.
- 14 — Aluminium and its Alloy. ALCOA. — Pittsburgh, 1941.
- 15 — Modern Aluminium Alloys. J. R. HANDFORTH, en *Aircraf Engineers*. Marzo 1939.
- 16 — *Aircraf Materials and Processes*. J. F. TITTERTON. — New York, 1941.

(Continuará)