



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**EFFECTO DEL TRATAMIENTO TERMICO SOBRE LA
RESISTENCIA A LA CORROSION DE LA
ALEACION 6261**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

P R E S E N T A :

RAUL OLMOS SANCHEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA

1983





Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

EFECTO DEL TRATAMIENTO TERMICO SOBRE LA
RESISTENCIA A LA CORROSION DE LA ALEACION 6261

Con profundo cariño y respeto

a mis padres:

GABINA Y ADELAIDO

Con cariño a mis hermanos:

Leonardo, Sergio, Luis,
Rebeca, Norma y Lilitiana.

A la memoria de mi tía;

ROSARIO

A mis profesores.

A mis amigos: Ing. Luis Batres O,
Carlos de la Vega, Santiago Diego,
Juan Quirino, Jesús Sánchez, Ale-
jandro Ortiz y Consuelo Ramírez.

A todos mis familiares.

I N D I C E

	Pág.
INTRODUCCION.	1
I.- EL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES.	3
I.1. Aspectos Históricos.	3
I.2. Situación Actual del Uso del Aluminio y sus Aleaciones en México y el Mundo.	4
I.3. Propiedades del Aluminio.	5
I.4. Producción del Aluminio.	8
I.4.1. Producción del Aluminio por Método - Electrolítico.	8
I.5. Aleaciones del Aluminio.	10
I.5.1. Sistema de Designación de las Alea-- ciones.	19
I.5.2. Forma de Expresar el Contenido de Ca da Elemento.	20
I.5.3. Forma de Ordenar los Elementos Quími cos.	21
I.5.4. Composición Química.	21
II.- SOLIDIFICACION Y TRATAMIENTO TERMICO DE ALEACIO- NES DE ALUMINIO.	25
II.1. El Papel de la Fluidéz.	25
II.2. Factores Principales.	26
II.3. Efecto de las Dendritas.	27
II.4. Tratamientos Térmicos.	29
II.5. Aleaciones Aluminio-Cobre (Al-Cu).	30
II.5.1. ¿Qué Cantidad de Eutéctico?.	32
II.5.2. Evitar la Fusión del Eutéctico.	33

II.5.3. Datos de la Curva de Enfriamiento.	33
II.5.4. Representación de los Datos.	35
II.6. Aleaciones Aluminio-Magnesio (Al-Mg).	36
II.7. Aleaciones Aluminio-Zinc-Magnesio (Al-Zn-Mg)	38
II.8. Aleaciones Aluminio-Silicio (Al-Si).	40
II.9. Características de Solidificación.	42
II.10. Afino de Grano.	44
II.11. Velocidad de Solidificación.	46
II.12. Sistema de Clasificación y Designaciones - de los Temples y Tratamientos Térmicos pa- ra el Aluminio y sus Aleaciones.	46
II.12.1. Objetivo y Campo de Aplicación.	47
II.12.2. Definiciones.	47
II.12.3. Clasificación y Designación.	50
II.13. Panorama de Algunas Aplicaciones Modernas- de las Aleaciones de Aluminio.	53
 III.- CORROSION DEL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES.	 57
III.1. Efectos de la Composición y el Tratamien <u>to</u> Térmico.	59
III.2. Formas de Ataque.	64
III.2.1. Ataque General Uniforme de la - Superficie.	64
III.2.2. Picadura.	66
III.2.3. Corrosión Inter cristalina.	66
III.2.4. Corrosión Bajo Tensiones y Fati <u>ga</u> con Corrosión.	67
III.2.5. Corrosión en capas o estratos..	68
III.2.6. Corrosión Bimetálica, Galvánica o por Contacto.	68
III.3. Métodos de Protección.	68
III.4. Acción de los Acidos Inorgánicos y de -- las Bases.	71
III.5. Acción de las Sales.	78

III.6. Acción de las Aguas.	79
III.7. Acción de los Gases.	80
III.8. Acción de los Elementos.	82
III.9. Acción de las Combinaciones Orgánicas. .	82
IV.- EXPERIMENTACION Y EQUIPO.	87
IV. 1. Equipo Utilizado.	90
V.- RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSION...	91
VI.- CONCLUSIONES.	103
VII.- BIBLIOGRAFIA.	104

I N T R O D U C C I O N

El presente trabajo es un intento de superación en el área de Metalurgia, y esperando que sirva como base para superar los problemas que continuamente se presentan en la selección de materiales ya que actualmente el país demanda que el Ingeniero esté suficientemente preparado y capacitado para resolver los problemas de la elección de los mejores materiales y a la producción de otros que cumplan mejor las funciones para los que son diseñados.

Es importante que el Ingeniero en cualquier tipo de área tenga un buen conocimiento de los materiales, puesto que éstos son la base directa para el desarrollo de cualquier país, y por lo cual se deben hacer estudios posteriores a otros tipos de materiales que puedan impulsar a la Ingeniería Mecánica.

El trabajo consta de dos partes; la primera que es la parte teórica y que explica en un groso modo el comportamiento de las aleaciones de aluminio debido a un tratamiento térmico aplicado dependiendo de cada clase de aleación y a la vez la resistencia a la corrosión de estas mismas aleaciones dependiendo de los medios en que son usados.

La segunda parte es la práctica en la que se incluyen los trabajos de investigación desarrollados en el área de metalurgia de la Facultad de Ingeniería y que se refiere a tratamientos térmicos aplicados a la aleación 6261 y su resistencia a la corrosión en diferentes medios como NaCl, HNO₃, HCl, etc., en base a lo cual es realizada esta parte práctica.

A continuación se dan los resultados obtenidos en base a este trabajo los cuales se pueden verificar notablemente en las gráficas tiempo-pérdidas de peso, y a la vez la discusión de éstos, y por lo tanto nos lleva a una serie de conclusiones las cuales se expresan al final.

Por último, expreso mi más sincero agradecimiento, -- primeramente a mi director de seminario, el Ing. Arturo Barba P. por haber propuesto y aceptado dirigir este trabajo y por haber depositado su confianza en mí, y en quien siempre encontré a un amigo que me ayudó en todo momento. También agradezco a la Facultad de Ingeniería, especialmente área Mecánica - las facilidades que se me dieron para poder llevar a cabo las pruebas realizadas, y en general a todas aquellas personas -- que de una u otra forma colaboraron conmigo para hacer posible la elaboración de este trabajo, a quienes les expreso mi gratitud.

Raúl Olmos Sánchez.

C A P I T U L O I

EL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

I. EL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

El aluminio es un metal que como metal puro, pero sobre todo empleado como aleación, ha alcanzado un lugar muy importante en el campo de los materiales.

I.1. ASPECTOS HISTÓRICOS.

Se han encontrado testimonios acerca del empleo de alúmina (óxido de aluminio) en el norte de Irak alrededor de 5000 años A.C. hace más o menos 4000 años, los egipcios y babilonios, utilizaron compuestos de aluminio en medicinas.

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

Acerca de la existencia de un metal que formaba parte de la composición de la arcilla, conjeturó en 1808 el científico inglés Davy. El fue quien le dió el nombre de aluminio.

En 1825 el danés Oersted obtuvo por primera vez partículas de aluminio. Los autores del procedimiento que se emplea actualmente para fabricar el aluminio (electrólisis de sales fundidas) fueron el norteamericano Charles Hall y el francés Paul Héroult. Ambos, independientemente el uno del otro, cuando cada uno tenía 23 años de edad, patentaron el procedimiento de obtención industrial del aluminio.

Hasta 1890 sólo se habían producido en el mundo 200 toneladas de aluminio. Pero en la década siguiente se produjeron 28000 toneladas y en 1930, en un solo año, 27,000 toneladas. El volumen actual de la producción mundial de alumi-

nio (sin contar el obtenido en la U.R.S.S.) es de alrededor de 10 millones de toneladas al año.

Hasta 1906 el aluminio se utilizaba puro, pero dicho año A. Wilm descubrió casi inesperadamente el procedimiento de endurecer la aleación Al-Cu por medio del temple y envejecimiento y la aleación propuesta por él (4% de Cu, 0.5% de Mg, 0.5% de Mn) es hasta ahora la más difundida de todas las aleaciones del aluminio (duraluminio).

I.2. SITUACION ACTUAL DEL USO DEL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES EN MEXICO Y EN EL MUNDO.

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 la del acero.

Después del año 2000 con la población cercana a 6×10^9 , el consumo promedio de aluminio por persona se estima será igual a 15 Kg/persona, lo que corresponde a un nivel en la producción anual del aluminio de alrededor de 90 millones de toneladas.

La mena básica para la producción de aluminio en la Industria es bauxita, (90% de aluminio producido se obtiene a partir de la bauxita), los depósitos de la cual se estiman 28,000 millones de toneladas y estas reservas deben satisfacer las necesidades hasta la mitad del siglo XXI.

Las reservas de materias primas no bauxíticas en la corteza terrestre son inmensas. El aluminio constituye el 7.5% de la capa superficial (la capa superficial está formada de silicio-aluminio). Cada doceavo de un trozo de tierra es aluminio.

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 constan-- tes innovaciones en las aplicaciones de este metal, el consu-- mo aumenta a un ritmo anual superior al 22%; así, en 1978, el consumo total fué de 121,000 toneladas, en 1979 de 148,000 to-- neladas; y en 1980 fue superior a las 165,000 toneladas. De-- estas cifras 44,000 toneladas fueron transformadas en México-- y el resto fue importación en diversas formas.

El problema que encaramos, no es el de literalmente - quedarnos sin aluminio, sin conseguirlo bajo condiciones que-- puedan sernos aceptables, ya que hay un límite a qué tanto di-- nero y energía podemos gastar.

I.3. PROPIEDADES DEL ALUMINIO.

De entre los metales, se consideran ligeros aquellas-- cuya densidad es menor de 3 gr/cm^3 , y excluyendo a los alcali-- no-terreos, a esta categoría pertenecen el aluminio, magnesio, y el berilio. Las principales características de estos meta-- les se dan en la Tabla 1.

Las propiedades más características del aluminio puro son su pequeña densidad ($\gamma = 2.7$) y su baja temperatura de fu-- sión ($t_f = 660^\circ\text{C}$). Comparando con el hierro, que tiene $\gamma = 7.8$ y $t_f = 1535^\circ\text{C}$, el aluminio es casi tres veces menos denso, -- por lo que él y sus aleaciones se utilizan en los casos en -- que la poca densidad y la gran resistencia específica (σ_B/σ)-- tienen mucha importancia. Debido a que la temperatura de fu-- sión del aluminio es más baja que la del hierro, la tecnolo-- gía de maquinado de aquél y sus aleaciones difiere mucho de-- la del acero.

CARACTERISTICAS	Al	Mg	Be
Número atómico	13	12	4
Masa (peso) atómico	27	24.3	9.0
Densidad (peso específico) a 20°C, g/cm ³	2.7	1.7	1.8
Temperatura de fusión, °C	660	651	1284
Temperatura de ebullición, °C	2327	1107	2450
Diámetro atómico, Å	3.2	2.8	2.3
Calor latente de fusión, cal/grad	94	46.5	275
Conductividad calorífica a 20°C cal/cm. s. grad	0.54	0.38	0.45
Coefficiente de dilatación lineal a 25°C	24.3×10^{-6}	26.0×10^{-6}	11×10^{-6}
Resistividad eléctrica a 20°C Ω.cm.	2.7×10^{-6}	4.5×10^{-6}	3.6×10^{-6}
Módulo de elasticidad normal E, Kgf/mm ²	7,100	4,570	30,000

TABLA 1. Características físicas principales de los metales ligeros.

Son también propiedades características del aluminio su alta plasticidad y su poca resistencia mecánica. El aluminio laminado y recocido de alta pureza tiene $\sigma_B = 6 \text{ Kgf/mm}^2$; $\sigma_{0,2} = 2 \text{ Kgf/mm}^2$; dureza HB = 25; $\psi = 85\%$ y $\delta = 40\%$.

El aluminio cristaliza en la red cúbica centrada en las caras. El parámetro de esta red a 20°C es igual a 4.04 \AA y el radio atómico 1.43 \AA . El aluminio no tiene modificaciones alotrópicas, su conductibilidad térmica y eléctrica son grandes y su calor latente de fusión muy elevado.

A pesar de su gran afinidad por el oxígeno, el alumi-

El aluminio se oxida muy poco en el aire y en ciertos medios, debido a que en su superficie se forma una película compacta de Al_2O_3 que protege el metal contra la corrosión. Cuando más puro sea el aluminio, tanto mayor será su resistencia a la corrosión.

El aluminio más puro (aluminio de pureza especial), contiene el 99.999% de Al y la suma de todas sus impurezas no supera el 0.001%. Se emplea principalmente para ensayos de laboratorio. En la Industria, de acuerdo con las condiciones que se imponen, se emplea el aluminio de alta pureza (99.995-99.15% de Al) y el de pureza técnica (99.85-99.0% de Al).

El empleo del aluminio como material de construcción no es conveniente, debido a su poca resistencia, sin embargo, algunas veces sus propiedades (alta plasticidad, resistencia a la corrosión y conductibilidad eléctrica) permiten utilizarlo muy eficazmente, (sobre todo si se tiene en cuenta su bajo costo referido a la unidad de masa). Existen tres tendencias en el empleo del aluminio técnico:

a). Su alta plasticidad permite conformarlo por embutición profunda y laminarlo hasta espesores muy pequeños (por ejemplo, para hacer papel de aluminio para envolver chocolates, etc.).

b). Su elevada conductividad eléctrica (65% de la del cobre) hace posible utilizar el aluminio para fines electro-técnicos (metal conductor). Para la misma conductibilidad eléctrica, los alambres de aluminio pesan menos que los de cobre.

c). Su gran resistencia a la corrosión hace que el aluminio tenga muchas aplicaciones.

El aluminio es un metal químicamente activo, pero la oxidación inicial forma una película de óxido (de 100 Å de espesor aproximado) que aísla el metal del medio circundante. - Esta circunstancia permite considerar el aluminio como metal-resistente a la corrosión. El aluminio es prácticamente muy-estable en los ácidos orgánicos (por esto se utiliza mucho para transportar y guardar productos alimenticios). En los ácidos inorgánicos sólo es estable si están poco concentrados.

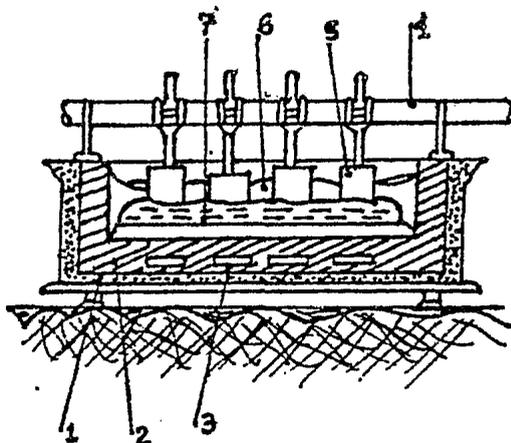
I.4. PRODUCCION DE ALUMINIO.

Como materia prima para producir el aluminio se em-plean las bauxitas, que son minerales con 40-60% de hidróxido de aluminio $\text{Al}(\text{OH})_3$ y una serie de impurezas: Fe_2O_3 ; SiO_2 ; CaO ; TiO_2 , etc. La producción de aluminio consta de dos fases: -- 1) la obtención del óxido de aluminio (alúmina) de la bauxita; 2) la electrólisis de la alúmina.

1.4.1. Producción del Aluminio por Método Electrolítico.

La producción del aluminio a partir de la alúmina consiste en la descomposición (electrólisis) del óxido de aluminio en sus componentes en un baño de criolita fundida $\text{AlF}_3\cdot 3\text{NaF}$. La criolita, que actúa como disolvente de la alúmina, rebaja-al mismo tiempo su temperatura de fusión, que es igual, aproximadamente a 2000°C. En la fig. 1 se muestra el esquema de - una celda electrolítica. Esta se compone de una caja de hierro con un revestimiento termoaislante (1). Las paredes del-fondo están revestidas con carbón comprimido (2). Las barras colectoras catódicas (3) puestas en el fondo se conectan con-el polo negativo de la fuente de corriente, y a las barras colectoras anódicas (4) se unen los electrodos de carbón (5) sumergidas en la celda. Antes de comenzar la electrólisis se -

Fig. 1. Celda para la
electrolisis de alúmi
na.



echa sobre el fondo de la celda una capa fina de coque desmenuzado, se bajan los electrodos hasta que toquen el coque y se conecta la corriente. Cuando el carbón comprimido se calienta al rojo, se introduce la criolita y después de su fusión se carga la alúmina (6), no más del 15% de la cantidad de la criolita cargada. Una vez conseguida esta proporción se fija la temperatura del electrolítico en los límites de 950-1000°C. A medida que se descompone la alúmina, el aluminio reducido (7) se acumula en el fondo de la celda y se carga nueva alúmina conforme ésta se va descomponiendo.

Las celdas se acoplan en serie (80-100 celdas en cada serie). La tensión eléctrica en los bornes de la celda es cerca de 5-10 volts, siendo la intensidad de la corriente cerca de 30,000 ampers. La descarga del aluminio se realiza después de cada 50-100 horas. Para obtener 1 tonelada de aluminio se gasta cerca de 2 toneladas de alúmina, 0.6 toneladas de electrodos de carbón (ánodo), 0.1 toneladas de criolita y de 16,000 hasta 19,000 KW-hr de energía eléctrica. El aluminio obtenido se afina para quitarle las partículas de criolita y los gases disueltos. El aluminio afinado contiene del 0.3 al 1% de impurezas.

1.5. ALEACIONES DE ALUMINIO.

El aluminio puede alearse con un cierto número de elementos para dar una serie de materiales útiles en la Industria. Las aleaciones de aluminio pueden subdividirse en aquellas a las que se les puede dar un tratamiento térmico y a las que no se les puede dar tratamiento. Las que no reciben tratamiento térmico pueden ser endurecidas por operaciones de conformado en frío; el único tratamiento que se les puede dar es el de recocido para ablandar el endurecimiento producto de su conformación. Las aleaciones que no pueden ser tratadas son las de -- los sistemas Al-Mn, Al-Mg, y Al-Si.

Las aleaciones tratables térmicamente (principales) -- son las que contienen cobre, cobre-níquel, cobre-zinc, y magnesio-silicio. Estos tipos de aleación responden a los tratamientos de endurecimiento por envejecimiento o precipitación; -- Este tipo de endurecimiento es posible en aleaciones que muestran solubilidad parcial en estado sólido, con una gran diferencia entre límites de solubilidad a las temperaturas inferiores y superiores.

Las aleaciones de aluminio son junto a las aleaciones de Mg, las más ligeras y son usadas comercialmente en cantidades importantes para el uso de aeromáquinas, aviones, automóviles y muchas otras aplicaciones. Las "aleaciones especiales" -- son las de alta resistencia bien a temperatura ambiente como -- o/a temperaturas elevadas.

Elevadas temperaturas se refiere a temperaturas superiores a alrededor de 300°C. Como en el caso de algunos otros sistemas de aleación la elevada resistencia a moderada temperatura se consigue mediante procesos de endurecimiento por precipitación, y éstos implican la solución y el posterior tratamiento de envejecimiento. Ciertas aleaciones de aluminio enve-

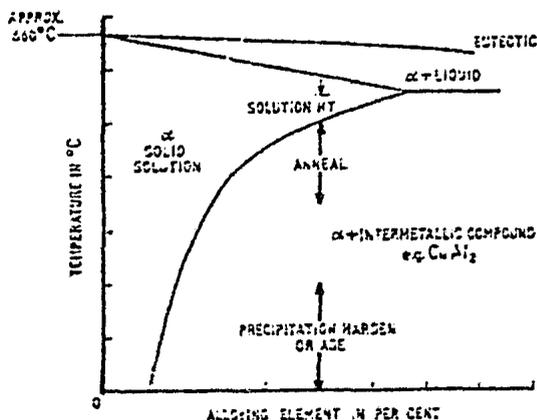
jecen naturalmente a temperatura ambiente, pero en general el envejecimiento implica temperaturas un poco arriba del rango - de 125/225°C.

Las aleaciones convenientes para aplicaciones a altas- temperaturas son principalmente aquellas que tienen una fuerte resistencia al sobre-envejecimiento, es decir, el mecanismo de sobre-envejecimiento es lento a elevadas temperaturas. Una -- excepción es la aleación conocida como S.A.P., aleación que -- consiste casi enteramente de aluminio y óxido de aluminio.

La resistencia ofrecida por un material como tal a la- deformación y fractura a elevadas temperaturas es enteramente- debida al hecho, de que los granos de aluminio están rodeados por películas de alúmina la cual evita el crecimiento de grano y también retrasa los proceso de termofluencia y fátiga a tra- vés de la sección. Sin embargo, un material endurecido por - dispersión como éste es tratable térmicamente.

Las aleaciones de aluminio pueden contener uno o más - de los siguientes elementos: cobre, magnesio, níquel, silicio, cobalto, titanio, hierro y antimonio. Estos pueden actuar pu- ros en procesos de endurecimiento por solución-sólida, pero -- elementos tales como cobre, magnesio y silicio, pueden combi-- narse para crear precipitación de intermetálico de complejidad variable tales como CuAl_2 , Mg_2Si , NiAl_3 , Al_2CuMg , etc. El tra- tamiento térmico depende de la diferencia en solubilidad, de- las fases endurecibles por precipitación a la temperatura de - solución y de envejecimiento. El diagrama mostrado en la fig. 2 es característica de materiales endurecidos por procesos de- precipitación y de aleaciones de aluminio en particular.

Fig. 2. Diagrama típico para aleaciones de aluminio tratables térmicamente.



La máxima dureza y resistencia son teóricamente conseguidos por:

1). Tratamiento de "solución" a una temperatura comprendida en el campo de la solución-sólida "α" la más cercana posible a la línea de sólidos durante un tiempo suficiente para que todas las fases precipitadas entren en solución, y completamente recocida la matriz.

2). El temple desde la temperatura de solución a la mayor velocidad posible a fin de retener todos los precipitados-intermetálicos en la solución sólida sobresaturada.

3). Envejecimiento a alguna temperatura, usualmente -- arriba de la temperatura ambiente pero abajo del límite de solución sólida "α". La dureza máxima alcanzable está asociada con bajas temperaturas de envejecimiento y largos tiempos.

En práctica, es imprudente para efectuar el tratamiento de solución a temperaturas demasiado cercanas a sólidos, -- puesto que las condiciones de equilibrio son la excepción más que la regla, y bajos puntos de fusión del eutéctico son frecuentemente presentados en la estructura. Existe por lo tanto,

un serio peligro de sobre-calentado o quemado si la temperatura de solución está demasiado cerca del punto de fusión del eutéctico. Esto requiere de controles pirométricos exactos y un buen diseño del horno.

Velocidades muy altas de enfriamiento luego del tratamiento de solución (e.g. temple en agua a 20°C) pueden causar alguna dificultad desde el punto de vista de distorsión y la introducción de tensiones internas. Esto es particularmente cierto cuando los componentes son complicados en su forma y tienen una sección transversal variable. A fin de reducir distorsión y el nivel de tensiones internas, varias ideas se han postulado.

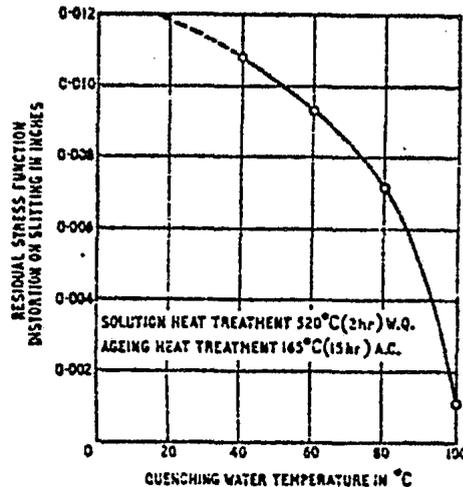
La operación de endurecimiento por precipitación involucra tanto al tiempo como a la temperatura. Bajas temperaturas y largos tiempos dan una dureza óptima. Como quiera, es usual restringir los tiempos de envejecimiento no más de 24 hrs. pues tiempos más largos llegan a ser imprácticos. La temperatura de envejecimiento está a menudo relacionada con la temperatura a la cual el componente puede operar en servicio, de modo que se reduzca la tendencia de distorsión a cambio de volumen asociado con la inestabilidad estructural. Así, si la temperatura normal de endurecimiento por precipitación para producir óptima dureza y resistencia es de 165°C. Si los componentes van a operar a 200°C entonces puede ser mejor aplicar un tratamiento a 200°C.

En la práctica es sumamente importante evitar muy lentas velocidades de enfriamiento asociada con aire y adoptar agua caliente o en ebullición. Las ventajas del agua en ebullición son bastante buenas y conocidas desde hace muchos años.

La fig. 3 ilustra los efectos de temple en agua a di-

ferentes temperaturas sobre el grado de tensiones internas en pistones de material L42.

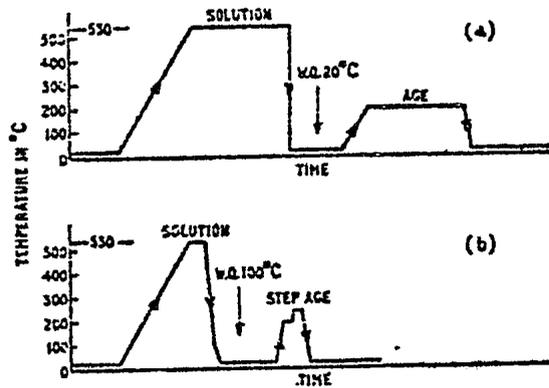
Fig. 3. Temperatura de temple en agua y esfuerzos residuales (en pistones de la aleación de aluminio L42).



Una variación más reciente de tratamiento térmico diseñado para reducir tensiones residuales en componentes complejos, es seguir templando desde la temperatura de solución por un proceso llamado de envejecimiento en pasos. Este método, fué aplicado al material RR58, el primer envejecimiento es llevado a cabo en un baño de sales por 1-1½ hrs. a una temperatura normal de 200°C, seguido por una transferencia a otro baño de sales a una temp. de 250°C, a un tiempo de 1-1½ hrs. El tiempo total de envejecimiento no es solo marcadamente reducido (desde 20 a 3 hrs.) sino que el componente tiene un orden muy bajo de tensiones.

La pequeña caída en resistencia desde 29 ton/pulg² a 26 ton/pulg² producido por este tratamiento está más que compensado por una reducción en el nivel de tensiones residuales, y por supuesto, el componente ahora posee un alto grado de estabilidad metalúrgica dimensional. La fig. 4 muestra la secuencia de operación, y la tabla 2 da las típicas propiedades obtenidas por tratamientos modificados y estandars.

Fig. 4. Tratamiento térmico de aleaciones típicas de aluminio de alta resistencia. La fig. a) ilustra el proceso normal para máxima resistencia, y la fig. b) muestra un tratamiento acortado con máximo relevado de esfuerzos.



Solution	Ageing H.T.	L.P. in tons/sq.in.	Proof stress in tons/sq.in.		U.T.S. in tons/sq.in.	Elong. in per cent	E × 10 ⁻⁶ in lb/sq.in.	S.H.N. (1,000/10)
			0.1%	0.2%				
525°C for 24 hr W.Q. 100°C	200°C for 20 hr A.C.	11.2	24.5	25.4	29.0	10.5	10.5	127
	200°C for 1½ hr Transfer to 250°C for 1½ hr A.C.	12.1	20.3	21.1	25.8	14.0	10.5	120

* treatments in salt baths

Tabla 2. Propiedades de tracción a 20°C de aleación RR58 y después de dos diferentes tratamientos de envejecimiento.

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.

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

MANGANESO: Incrementa la resistencia a los esfuerzos y 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 térmicamente, 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.

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

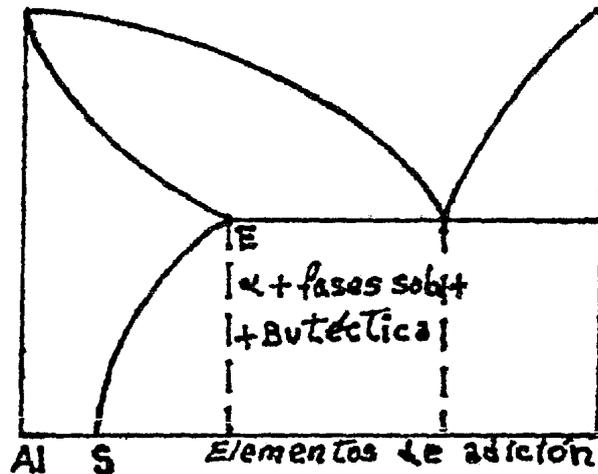
Ejemplos representativos incluyen:

- a) El bismuto, plomo y el estaño, imparten una mejor maquinabilidad.
- b) El berilio mejora las características de soldadura y vaciado.
- c) El boro ayuda a incrementar la conductividad eléctrica.
- 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.

Así pues, una serie de elementos que constituyen aleaciones de aluminio forman con él soluciones sólidas de solubilidad limitada y con concentración variable.

En la fig. 5, se presenta el diagrama de equilibrio de las aleaciones a base de aluminio. Las aleaciones, en las que la cantidad de elementos que se añaden es menor que la concentración del punto S, son monofásicas en estado sólido y representan una solución sólida. Estas aleaciones son deformables fácilmente y maquinables en frío y en caliente. Su endurecimiento se hace posible solamente por deformación en frío.

Fig. 5. Esquema del diagrama de equilibrio de las aleaciones a base de aluminio.



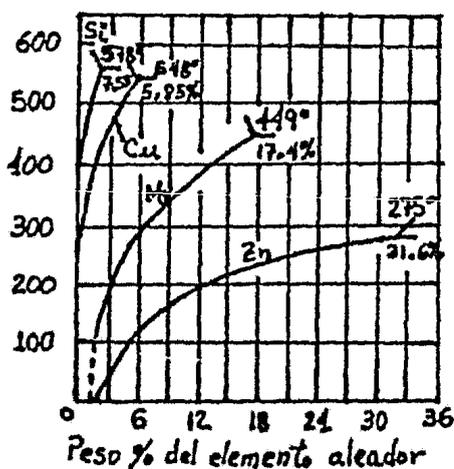
En las aleaciones, que tienen una cantidad de elementos de concentración mayor que en el punto S, precipitan de la solución sólida durante el enfriamiento las fases sobrantes: por ejemplo; en las aleaciones de Al-Si precipitan el silicio sobrante, en las aleaciones de Al-Cu, el cobre sobrante, el cual produce CuAl_2 en las aleaciones de Al-Mg se forma el Al_3Mg_2 . Al calentar tales aleaciones por encima de la línea ES, la fase sobrante se disuelve y las aleaciones se hacen monofásicas y soportan bien el prensado. Las aleaciones que se

encuentran, según su composición, entre S y E se pueden endurecer por medio del tratamiento térmico; en efecto, el temple a temperatura superior a ES fija la solución del elemento en aluminio, y el envejecimiento posterior contribuye a la precipitación dispersa a partir de la solución sólida de la fase sobrante.

En las aleaciones que se hallan a la derecha del punto E se forma al solidificar, la eutéctica. Estas aleaciones, en particular las próximas a la eutéctica, poseen buenas condiciones de moldeo. Las aleaciones de aluminio se pueden dividir en dos grupos: Aleaciones para el moldeo (a la derecha del punto E en el diagrama de la fig. 5) aleaciones para la deformación plástica (a la izquierda del punto E en el diagrama). A su vez las aleaciones para la deformación plástica se pueden dividir en dos subgrupos: Las que no se endurecen por tratamiento térmico (las aleaciones que se encuentran a la izquierda del punto S en el diagrama de la fig. 5) y las que se endurecen por tratamiento térmico (las aleaciones que se hallan, según su concentración, entre S y E en el diagrama).

En la fig. 6 se indican las zonas iniciales en los diagramas de equilibrio para aleaciones de los sistemas Al-Si; Al-Cu; Al-Mg; Al-Zn, las cuales muestran la solubilidad de estos elementos en el aluminio.

Fig. 6. Zonas iniciales del diagrama de equilibrio de las aleaciones de aluminio con los elementos Si, Cu, Mg y Zn.



Para que sea más conveniente estudiar la gran variedad de las aleaciones de aluminio hay que clasificarlas en aleaciones de composición binaria y complicada. Las aleaciones de composición binaria comprenden las aleaciones de los sistemas: Al-Si; Al-Cu; Al-Mg; Al-Zn. Las aleaciones de composición compleja se producen por adición de un tercer o cuarto elemento a las aleaciones de composición binaria.

I.5.1. Sistema de Designación de las Aleaciones.

La designación del aluminio y de sus aleaciones en estado de forja fue normalizada por The Aluminum Association en 1954. Esta designación se realiza mediante cuatro números dígitos, de los cuales el primero indica el tipo de aleación -- (tabla 3) y el segundo la modificación de la aleación original o los límites de impurezas; el cero designa la aleación original y los números dígitos del 1 al 9 expresan distintas modificaciones de la aleación. En el grupo 1XXX, correspondiente a los tipos de aluminio con un grado de pureza mínima del 99.00%, las dos últimas cifras expresan la diferencia entre la pureza del aluminio considerado y la mínima en centésimas. Así, con la designación 1060 se indica un material, en el cual la pureza del aluminio es 99.60% y en el cual no se ejerce un control especial sobre las impurezas consideradas individualmente. En los grupos de aleaciones 2XXX al 8XXX las dos últimas cifras sirven únicamente para identificar las diferentes aleaciones de aluminio del grupo.

PRINCIPAL ELEMENTO DE ALEACION	ALUMINUM ASSOCIATION No.
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
series no utilizadas	9XXX

Tabla 3. Designación de los grupos de aleación.

1.5.2. Forma de Expresar el Contenido de Cada Elemento.

Las cifras límite, enteras y decimales usadas están expresadas en la tabla 4. Para expresar el contenido de cada elemento a partir de los resultados de laboratorio debe usarse el mismo sistema de la Tabla 4.

CONTENIDO DE LOS ELEMENTOS EXPRESADOS EN PORCIENTO DE MASA	FORMA DE EXPRESAR SU CONTENIDO
a) Concentraciones menores de 1/1000	0.000X
b) Concentraciones entre 1/1000 y 1/100	0.00X
c) Concentraciones entre 1/100 y 1/10	0.0X
d) Concentraciones entre 1/10 y 1/2	0.XX
e) Concentraciones mayores de 1/2	0X, X.X, XX.X

Tabla 4. Forma de expresar el contenido de los elementos.

I.5.3. Forma de Ordenar los Elementos Químicos.

Los elementos aleantes e impurezas deben aparecer -- siempre en el orden siguiente: Si, Fe, Cu, Mn, Mg, Cr, Ni, -- Zn, otros elementos, Ti, Zr. Elementos no enumerados (contenido individual y contenido total), y finalmente el aluminio. - El contenido del aluminio se expresa siempre como porcentaje-mínimo.

1.5.4. Composición Química.

De acuerdo con la clasificación del aluminio de primera fusión y aleado para procesamiento mecánico, se establece su composición química en las talbas 5 y 6.

TAULA 5.- COMPOSICION QUIMICA DEL ALUMINIO DE PRIMERA FUSION PURO Y ALEADO PARA PROCESAMIENTO MECANICO
(ALEACIONES ESTANDAR CLASE I)

		Elementos en %											
ALEACION		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Pb	Ti	V	TOTAL c/u	TOTAL OTROS	Al
1050	Mínimo												99.50
	Máximo	0.25	0.40	0.05	0.05	0.05	-	0.05	0.03	0.05	0.03	-	
1070	Mínimo												99.70
	Máximo	0.20	0.25	0.04	0.03	0.03	-	0.04	0.03	0.05	0.03	-	
1100	Mínimo			0.05									99.00
	Máximo	1.0 Si + Fe	-	0.20	0.05	-	-	0.10	-	-	0.05	0.15	
1145	Mínimo												99.45
	Máximo	0.55 Si+ Fe	-	0.05	0.05	0.05	-	0.05	0.03	0.05	0.03	-	
1170	Mínimo												99.70
	Máximo	0.30 Si+ Fe	-	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04	0.03	0.05	0.03	-	
1235	Mínimo												99.35
	Máximo	0.65 Si+ Fe	-	0.05	0.05	0.05	-	0.10	0.03	0.05	0.03	-	
1350	Mínimo												99.50
(FC)	Máximo	0.10	0.40	0.05	0.01	-	0.01	0.05	b(*)	B 0.05	0.03	0.10	-
2024	Mínimo			3.8	0.30	1.2			c(**)				
	Máximo	0.50	0.50	4.9	0.9	1.8	0.10	0.25	0.15	-	0.05	0.15	-
3003	Mínimo			0.05	1.0								
	Máximo	0.6	0.7	0.20	1.5	-	-	0.10	-	-	0.05	0.15	-
3004	Mínimo				1.0	0.8							
	Máximo	0.30	0.7	0.25	1.5	1.3	-	0.25	-	-	0.05	0.15	-
3005	Mínimo				1.0	0.20							
	Máximo	0.6	0.7	0.30	1.5	0.6	0.10	0.25	0.10	-	0.05	0.15	-
4043	Mínimo	0.5											
	Máximo	0.0	0.8	0.30	0.05	0.05	-	0.10	0.20	-	0.05	0.15	-
5005	Mínimo					0.50							
	Máximo	0.30	0.7	0.20	0.20	1.1	0.10	0.25	-	-	0.05	0.15	-
5050	Mínimo					1.1							
	Máximo	0.1	0.7	0.20	0.10	1.8	0.10	0.25	-	-	0.05	0.15	-

(Continuación de la Tabla 3)

Elementos en %

ALFACION	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	V	TOTAL c/AI	TOTAL OTROS	Al
5052	Mínimo				2.2	0.15						
	Máximo	0.25	0.40	0.10	0.10	2.8	0.35	0.10	-	-	0.05	0.15
5454	Mínimo			0.50	2.4	0.05						
	Máximo	0.25	0.40	0.10	1.0	3.0	0.20	0.25	0.20	-	0.05	0.15
6061	Mínimo	0.40		0.15	0.8	0.04						
	Máximo	0.8	0.7	0.40	0.15	1.2	0.35	0.25	0.15	-	0.05	0.15
6063	Mínimo	0.20			0.45							
	Máximo	0.6	0.35	0.10	0.10	0.9	0.10	0.10	0.10	-	0.05	0.15
6101	Mínimo	0.30			0.35							
	Máximo	0.7	0.50	0.10	0.03	0.8	0.03	0.10	-	B=0.06	0.03	0.10
6463	Mínimo	0.20			0.45							
	Máximo	0.6	0.15	0.20	0.05	0.9	-	-	-	-	0.05	0.15
7072	Mínimo						0.8					
	Máximo	0.7 Si + Fe	-	0.10	0.10	0.10	-	1.3	-	-	0.05	0.15

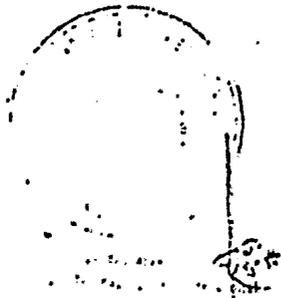


TABLA 6.- COMPOSICION QUIMICA DEL ALUMINIO DE PRIMERA FUSION PURO Y ALEADO PARA PROCESAMIENTO MECANICO
(ALEACIONES ESPECIALES II)

Elementos: en %											
ALEACION	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	TOTAL c/u	OTROS TOTAL	Al
C-989	Mínimo	0.35			0.45						
	Máximo	0.50	0.25	0.10	0.10	0.7	0.10	0.10	0.05	0.15	-
CD-27	Mínimo	0.25			0.45						
	Máximo	0.40	0.25	0.10	0.10	0.7	0.10	0.10	0.05	0.15	-
CE-42	Mínimo	0.10	0.45								99.20
	Máximo	0.20	0.65	0.05	0.05	0.01	-	-	0.03	0.10	99.20
CE-75	Mínimo		0.35				0.80				
	Máximo	0.12	0.50	0.03	0.05	0.02	1.20	-	0.05	0.15	-
CH-36	Mínimo	0.20			0.45						
	Máximo	0.6	0.35	0.10	0.10	0.9	0.10	0.10	0.05	0.15	-
CJ-83	Mínimo	0.06	0.15					0.005			
	Máximo	0.15	0.27	0.02			0.03	0.02	0.02	0.10	-

C A P I T U L O I I

SOLIDIFICACION Y TRATAMIENTO TERMICO DE
ALEACIONES DE ALUMINIO

II. SOLIDIFICACION Y TRATAMIENTO TERMICO EN ALEACIONES DE ALUMINIO.

De una valoración apropiada del diagrama de equili---
brio se puede obtener una importante información sobre cómo -
será el comportamiento de diversas aleaciones al colarlas en-
un molde. Por valoración apropiada se entiende el hecho de -
que las condiciones de equilibrio descritas por el diagrama -
de fases no representan las condiciones de no equilibrio que-
predominarán durante la solidificación de una pieza.

Salvando esta diferencia se puede obtener una estima-
ción razonable de las propiedades de colada sólo con examinar
el diagrama de equilibrio. Si la formación del diagrama de -
equilibrio se suplementa con los datos de la curva de enfria-
miento para aleaciones específicas, se pueden obtener estima-
ciones aún más precisas del efecto de la composición de la -
aleación sobre las características de moldeo, especialmente -
con aleaciones de más de un elemento aleante.

II.1. EL PAPEL DE LA FLUIDEZ.

Las características de moldeo que se discutirán son:-
capacidad de alimentación, resistencia al agrietamiento en ca-
liente y fluidez. Posiblemente, la menos importante para la
mayoría de las aplicaciones es la fluidez o capacidad de lle-
nado del molde, ya que las deficiencias en esta característi-
ca se pueden paliar, en gran medida, incrementando la tempera-
tura de llenado y mediante una disposición de bebederos ade--
cuada. Sin embargo, la fluidez puede ser un factor muy impor-
tante en la colada de piezas fundidas de pared delgada, espe-
cialmente si la velocidad de solidificación es elevada.

Las comparaciones de la fluidez se hacen a menudo so-

bre la base de una misma temperatura de colada para diferentes aleaciones. Estas aleaciones tendrán temperaturas distintas de líquidus, y, por consiguiente, variará el número de grados de sobrecalentamientos o diferencia entre la temperatura de líquidus y la colada. Ya que el sobrecalentamiento está en relación directa con la fluidez, ésta variará de unas aleaciones a otras con los diversos valores de aquél.

Sin embargo, la cantidad de autéctico o de fases de bajo punto de fusión formadas durante la solidificación también afectan a la fluidez, y las aleaciones coladas con el mismo sobrecalentamiento tendrán distinta fluidez a causa de las diferentes cantidades de eutéctico o fases semejantes formadas. Un tipo de fases análogo serán los dos constituyentes que solidifican simultáneamente en un intervalo de temperatura en aleaciones ternarias, justo antes de la separación del eutéctico ternario.

Se cree que esos materiales solidifican de modo no dendrítico, como un autéctico. Así, con el mismo sobrecalentamiento, cuanto más eutéctico o material similar de bajo punto de fusión se forme durante la solidificación, más elevada será la fluidez de la aleación.

II.2. FACTORES PRINCIPALES.

El intervalo de solidificación y la cantidad de eutéctico o fases análogas de bajo punto de fusión formadas durante la solidificación son los factores principales que afectan a las características intrínsecas de moldeo de una aleación. Las características de solidificación de una aleación de aluminio con buena capacidad de llenado son básicamente un intervalo relativamente pequeño de solidificación, con un 40 al 80% en volumen de eutéctico o material similar formado en las

últimas etapas de solidificación.

En las aleaciones de aluminio que forman progresivamente menos del 40% de eutéctico o material análogo durante la solidificación hay una pérdida pequeña, pero progresiva, de la capacidad de llenado; ésta se hace muy escasa al alcanzarse la composición de la aleación en la que no se forma eutéctico, y en la que el intervalo de solidificación es el mayor para el sistema. Sin embargo, todas las aleaciones de tipo solución sólida que no forman eutéctico durante la solidificación tienen características de llenado relativamente pobres, aunque el valor del intervalo de solidificación sea mucho menor del máximo posible para el sistema.

II.3. EFECTO DE LAS DENDRITAS.

Si la solidificación consiste en la formación y crecimiento de brazos dendríticos, como en el caso de una aleación de solución sólida, el metal líquido penetra con dificultad en los estrechos canales que quedan entre las dendritas durante la última etapa de la solidificación. Esto es cierto en gran parte, aunque en una pieza que solidifica el intervalo de solidificación y la extensión de la zona interdendrítica son apreciablemente inferiores al máximo posible para ese sistema.

La resistencia al agrietamiento en caliente se comporta de modo parecido a la tendencia a la contracción interdendrítica, y no parecen ser de utilidad pequeñas cantidades de eutéctico. A medida que se produce la solidificación, las dendritas se entrecruzan de modo coherente antes de que aquella finalice. Si hay una caída relativamente grande de temperatura desde que la aleación se hace coherente hasta el final de la solidificación, se ejercerá una tensión considerable en

las dendritas coherentes a causa de la contracción que acompaña a esta reducción de temperatura. La resistencia a esta -- contracción producirá agrietamiento, especialmente en puntos-calientes locales, donde la solidificación no ha aumentado o progresado como en los alrededores.

A medida que aumenta la cantidad de eutéctico que solidifica en una aleación a temperatura constante, disminuye la caída de temperatura y las tensiones resultantes desde que la aleación se hace coherente hasta que termina la solidificación. También, al aumentar la cantidad de este tipo de material en la aleación, ésta tiende a hacerse coherente en una etapa cada vez más retrasada de la solidificación, a causa de la naturaleza no dendrítica de la solidificación eutéctica, y las grietas se pueden llenar con material eutéctico. Así, la resistencia al agrietamiento en caliente aumenta a medida que aumenta la cantidad de eutéctico o material análogo.

Existen dos factores que probablemente influyen sobre la resistencia al agrietamiento en caliente, como el tipo de crecimiento del grano, y las propiedades mecánicas, en particular la ductilidad de las dendritas entrecruzadas cuando se han hecho coherentes. No se sabe mucho más sobre estos factores, pero se cree que contribuyen a las diferencias en la resistencia al agrietamiento en caliente de aleaciones de distintos sistemas, que no se puede explicar totalmente basándose en las propiedades de solidificación. Las proporciones relativas de las diversas fases formadas y el intervalo de solidificación se pueden valorar mediante un estudio de los diagramas de equilibrio.

II.4. TRATAMIENTOS TERMICOS.

Los diagramas de equilibrio proporcionan también información sobre la susceptibilidad de diversas aleaciones a los tratamientos térmicos y sobre las temperaturas de solubilización adecuadas para aleaciones binarias. Las propiedades mecánicas de muchas aleaciones de aluminio se pueden mejorar solubilizando a una temperatura de 8°C a 11°C por debajo de la temperatura de solidus, y templando para retener en solución sólida los elementos disueltos. La designación de este estado de tratamiento es T_4 . El tiempo de solubilización suele ser de 8 horas para piezas coladas en coquilla, y de 12 horas para piezas coladas en arena. Se suele emplear, en general, un temple en agua caliente.

Después de un tratamiento T_4 , la aleación permanece en una condición inestable, y algunos de los elementos de aleación precipitan lentamente a temperatura ambiente a partir de la solución sólida sobresaturada. Esta precipitación se acelera notablemente a temperaturas de 150°C o superiores. Cuanto mayor sea esta temperatura más rápidamente tiene lugar la precipitación, mayor es el tamaño del precipitado que se origina y menor la combinación de propiedades que se puede obtener.

El envejecimiento hace aumentar inicialmente la dureza y la resistencia de una aleación y disminuir el alargamiento siempre que la temperatura de tratamiento no sea excesivamente alta. La designación T_6 indica que una aleación se ha solubilizado y tratado a una temperatura comprendida entre 150 y 177°C , de 3 a 5 hrs., para conferirle una combinación apropiada de resistencia relativamente alta con un alargamiento adecuado. Si este tratamiento de envejecimiento se prolonga para obtener una resistencia o dureza más elevadas, se emplean las designaciones T_{61} ó T_{62} .

Las tensiones internas y el crecimiento potencial en piezas coladas disminuyen al aumentar la temperatura de envejecimiento. En los casos en que la estabilidad dimensional de una pieza colada es importante, en especial para servicio a temperatura elevada, se suele usar un tratamiento de envejecimiento a mayor temperatura, generalmente entre 205 y 260°C. Si este tratamiento de envejecimiento se lleva a cabo en una pieza en estado de colada (o estado F) la designación del estado es T₅. Si este tratamiento se realiza después de solubilización, el estado se designa T₇. La expresión crecimiento-potencial se refiere al ligero aumento en las medidas de una pieza que tiene lugar en algunas aleaciones al precipitar algunos elementos aleantes a partir de la solución sólida.

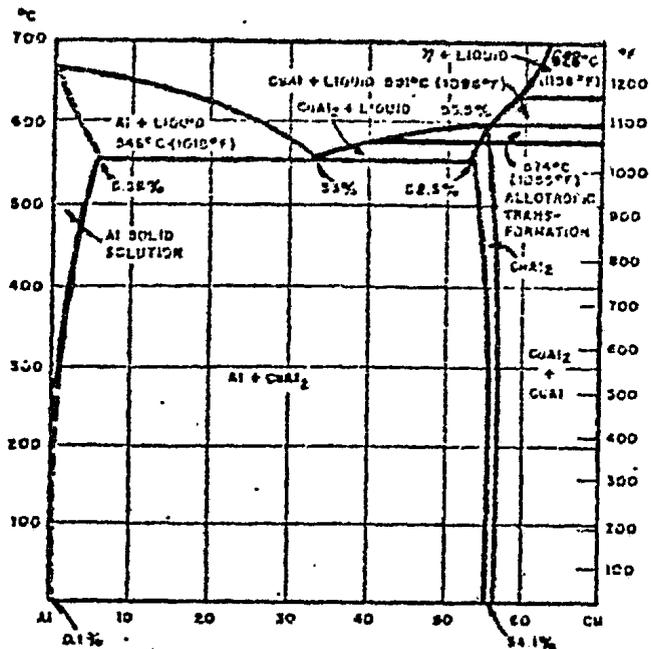
II.5. ALEACIONES ALUMINIO-COBRE (Al-Cu).

La fig. 7 muestra el extremo rico de aluminio del diagrama de equilibrio Al-Cu. Las aleaciones de aluminio de este sistema fueron las primeras en emplearse tratadas térmicamente. La mayor parte de los sistemas binarios de base aluminio o magnesio, de las que se derivan aleaciones tratables térmicamente de importancia comercial son de este tipo; es decir, el elemento aleante es completamente soluble en estado líquido y parcialmente soluble en estado sólido.

Generalmente, la solubilidad del elemento aleante es notablemente mayor a la temperatura eutéctica que a temperatura ambiente. En la mayor parte de los sistemas se forma un eutéctico entre la solución sólida de aluminio y una fase intermetálica. En el sistema Al-Cu, el eutéctico consiste en una mezcla de un 40% aproximadamente de solución sólida y un 60% de una fase intermedia de Al-Cu, que corresponde aproximadamente a la composición Al₂Cu. Estas proporciones se establecen por la regla de la palanca.

¿Qué características de este sistema pueden ser beneficiosas desde un punto de vista, o perjudiciales desde otro? El hecho de que aproximadamente 5.65%Cu sea soluble en aluminio a la temperatura eutéctica y sólo lo sea 0.1% a la temperatura ambiente indica que las aleaciones Al-Cu deben responder bien tanto a los tratamientos de solubilización como a los de precipitación.

Fig. 7. Extremo rico en aluminio del diagrama aluminio-cobre.



Las aleaciones con contenidos intermedios de cobre, especialmente en las proximidades del 5.65%Cu, deben tener intervalos de solidificación relativamente importantes, teniendo en cuenta la diferencia entre las temperaturas de líquidus y sólidus que se pueden ver en el diagrama. Debido a que la curva de sólidus se desvia a la izquierda en condiciones de colada en no equilibrio, las aleaciones con menos del 5.65%Cu presentan intervalos de solidificación notablemente mayores que los que se deducirían del diagrama de equilibrio.

II.5.1. ¿Qué Cantidad de Eutéctico?

Teniendo en cuenta que el compuesto intermetálico Al_2Cu , que constituye la parte más importante del eutéctico, es duro y frágil, es preciso irse a contenidos de cobre menores del 5.65%Cu si se quieren tener alargamientos relativamente altos en aleaciones tratadas térmicamente. En la práctica no se debe pasar del 4.5 ó 5%Cu para llevar a cabo una solidificación que no requiera tiempos muy largos. Por otra parte, debido a la naturaleza frágil del eutéctico, no es aconsejable tener contenidos elevados de cobre en estas aleaciones de aluminio, ya que se forman gran proporción de eutéctico y al mismo tiempo se reducen notablemente los intervalos de solidificación. Por tanto, la obtención de este tipo de solidificación, que aseguraría buenas propiedades de colada para las aleaciones Al-Cu, está limitada por la naturaleza del diagrama de equilibrio que determina la composición y propiedades del eutéctico.

Las aleaciones binarias Al-Cu para moldeo son menos importantes hoy que antiguamente, aunque el cobre es un elemento aleante importante en aleaciones ternarias e incluso más complejas, así como en aleaciones para forja. La aleación 195 contiene 4.5%Cu nominal. Según el diagrama de equilibrio debería solidificar completamente como una solución sólida primaria de aluminio. Sin embargo, en condiciones de colada de no equilibrio, la línea de sólidos se desplaza considerablemente hacia la izquierda, y se forma algo de eutéctico.

Al formarse eutéctico en esta aleación, la temperatura de solubilización tiene que ser inferior a la temperatura eutéctica (548°C). En realidad, la aleación 195 contiene pequeñas cantidades de hierro y silicio y la temperatura de sólidos es notablemente menor de 548°C. La máxima temperatura-

de solubilización segura para aleaciones ternarias y más complejas que contengan cobre se puede determinar mediante las curvas de calentamiento, que son la inversa de las curvas de enfriamiento, o por datos obtenidos calentando probetas a diversas temperaturas para conocer la temperatura mínima de fusión del eutéctico. Una temperatura de solubilización segura suele ser de 8 a 11 grados por debajo de ésta.

II.5.2. Evitar la Fusión del Eutéctico.

Se debe evitar la fusión del eutéctico principalmente porque la expansión de este material al pasar del estado sólido al líquido distorsiona el metal sólido de alrededor, y cuando el eutéctico solidifica posteriormente se forman pequeños huecos. Esto produce un efecto negativo sobre las propiedades de tracción.

Las aleaciones con más del 5.65%Cu se usan poco, en casos en los que tener un alargamiento elevado es menos importante que tener dureza elevada o que la mejora de propiedades a temperatura elevada que le confiere el Al-Cu sin disolver.- Las aleaciones 112, 113, 212 y 122, con un 7 al 10%Cu, están en esta categoría.

II.5.3. Datos de la Curva de Enfriamiento.

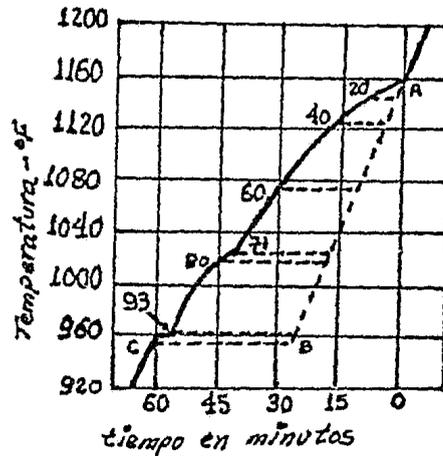
Las curvas de enfriamiento proporcionan información más precisa acerca de las fases que se forman y su proporción relativa. La línea gruesa de la fig. 8 es una curva de enfriamiento de la aleación 108, que contiene 4%Cu y 3%Si. La aleación comienza a solidificar en un punto A y termina en el punto C. Una mezcla de solución sólida de aluminio y silicio similar al eutéctico en una aleación Al-Si empieza a solidifi

car simultáneamente en el punto marcado con el número 71 y - termina en el número 93, donde el eutéctico ternario empieza a solidificar. Esta mezcla de solución sólida de aluminio y silicio, que en una aleación ternaria o más compleja se forma en un intervalo de temperatura antes del eutéctico, ya hemos dicho que es muy similar a un eutéctico en cuanto a tipo de - solidificación y en efecto positivo que produce sobre las propiedades de moldeo.

La curva rayada AB es una curva suave dibujada de modo que la pendiente de la parte superior es la de la curva de la aleación 108 por encima de la temperatura de líquidus A, y la pendiente de la parte inferior es la misma que la aleación 108 por debajo de la curva de sólidus C. Por lo tanto, AB es una curva de enfriamiento hipotética que representa las condiciones que predominarían si no se libera calor de fusión durante la solidificación. Si se supone que el calor de fusión de porciones de la aleación que solidifican sucesivamente es el mismo, entonces el porcentaje del desplazamiento total de la lí-AB en cualquier punto de la curva de enfriamiento representaría el porcentaje de la aleación que ha solidificado en ese punto.

Por ejemplo, la línea horizontal que une el punto 20- con AB es justo el 20% de la longitud de la línea BC. Así, - el 20% de la aleación debería haber solidificado en ese punto. Los otros puntos de la curva de enfriamiento se determinaron del mismo modo, y esos puntos seleccionados se usaron para -- trazar la llamada curva de solidificación en la que se representa la porción de aleación que ha solidificado frente a la temperatura. Realmente hay una variación en los calores de - fusión de las porciones de aleación que solidifican sucesivamente, pero la variación no es suficientemente grande para alterar seriamente el valor de las curvas de solidificación.

Fig. 8. Curva de enfriamiento de la aleación 108. Las líneas de puntos se emplearon para hallar las proporciones que solidifican a cada temperatura.



II.5.4. Representación de los Datos.

La fig. 9 muestra la curva de solidificación de la aleación 108 trazadas con esos datos. Tales curvas permiten una interpretación más sencilla del modo en que una aleación solidifica que las curvas de enfriamiento originales.

La fig. 10 muestra las curvas de solidificación de aleaciones en las que el cobre es el principal elemento aleante. La curva de arriba es la de la aleación 195, que tiene el menor contenido de cobre y el mayor intervalo de solidificación. A causa de la anchura del intervalo de solidificación y de la pequeña cantidad de eutéctico formado, la aleación tiene mediocres propiedades de llenado. La caída relativamente grande de temperatura en las últimas etapas de solidificación, junto con la pequeña cantidad de eutéctico formado, explican la escasa resistencia al agrietamiento en caliente de esta aleación.

Las otras curvas de solidificación mostradas son para aleaciones del 7 al 10%Cu con temperaturas de líquidus e in--

tervalos de solidificación cada vez menores. Las otras características de estas curvas, tales como cantidad de eutéctico y fases binarias formadas son también algo mejores que las de la 195, y su capacidad de llenado y resistencia al agrietamiento en caliente son sólo ligeramente superiores a las de la 195.

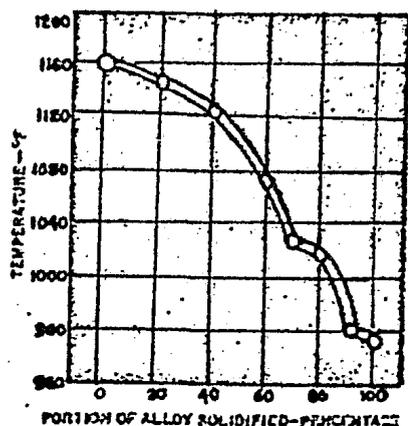


Fig. 9. Curva de solidificación de la aleación 108, representada con los datos de la curva de enfriamiento de la fig. 8.

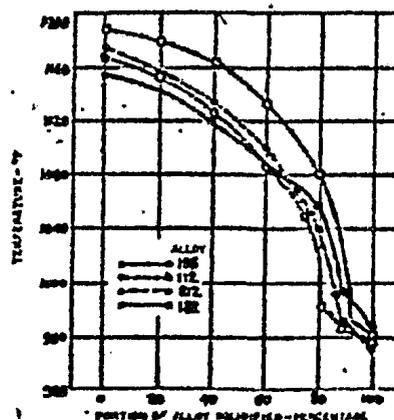


Fig. 10. Las curvas muestran las proporciones relativas de aleación que solidifican a las distintas temperaturas.

II.6. ALEACIONES ALUMINIO-MAGNESIO (Al-Mg).

En la fig. 11 se muestra el diagrama de equilibrio de las aleaciones Al-Mg. El magnesio posee elevada solubilidad en aluminio a temperatura eutéctica, y solubilidad razonablemente alta a temperaturas mucho más bajas. Incluso a temperatura ambiente la solubilidad es superior al 1%. Esto permite a aleaciones con hasta el 7%Mg. retener a la mayor parte de este elemento en solución sólida para las velocidades de enfriamiento que se tienen en la producción de piezas coladas.-

Por lo tanto, aleaciones como la 214 con 3.8%Mg y Almag 35 -- con 7% Mg no necesitan tratamiento de solubilización.

Para contenidos más elevados de magnesio, tales como el 10% en la aleación 220, es necesario tratamiento de solubilización. La curva de sólidos del diagrama se desplaza bastante hacia la izquierda durante la solidificación en condiciones de no equilibrio, por lo que se forma algo de eutéctico. Ha de solubilizarse el magnesio en este eutéctico junto con otro magnesio que precipita enfriando a temperatura ambiente. Al ser la aleación 220 una aleación binaria de pureza relativamente elevada, el eutéctico que figura en este diagrama es la fase de más bajo punto de fusión, y es suficiente -- una temperatura de solubilización justo por debajo de 450°C, -- que es la temperatura eutéctica.

Con el desvío de la curva de sólidos que tiene lugar bajo condiciones de moldeo reales, las aleaciones 220 y Almag 35 deberían tener intervalos muy grandes de solidificación y escasa capacidad de llenado.

Las aleaciones con mucho más del 10% no se usan a causa de la fragilidad del compuesto intermedio Al-Mg que se forma (correspondiente, aproximadamente, a la composición Mg_5Al_8). El eutéctico contiene el 90% de este constituyente frágil, en combinación con sólo un 10% de solución sólida de aluminio. -- Contenidos más elevados de magnesio causan también más envejecimiento a temperatura ambiente, después del tratamiento de solubilización, lo que reduce el alargamiento. De hecho, no es deseable tener un gran endurecimiento por precipitación en -- aleaciones de elevado contenido de magnesio, en contra de lo habitual. Aparentemente, la distribución presente del precipitado frágil a lo largo de las fronteras de grano reduce la -- ductilidad.

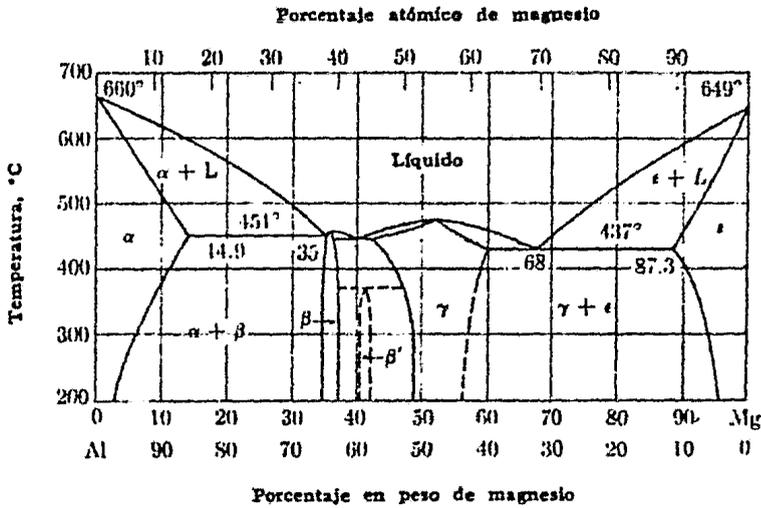
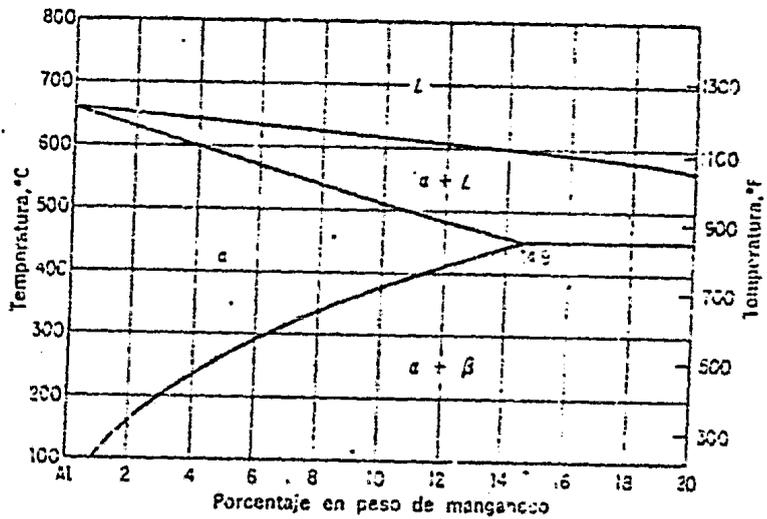


Figura 11. Diagrama de equilibrio del sistema Al-Mg. Las semejanzas de los extremos indican propiedades de solidificación y de colada semejantes.

Fig. 11.a. Diagrama de equilibrio aluminio-magnesio. Región rica en aluminio.



II.7. ALEACIONES ALUMINIO-ZINC-MAGNESIO (Al-Zn-Mg).

La fig. 12 muestra el diagrama de equilibrio Al-Zn. Ya no se emplean comercialmente las aleaciones Al-Zn, aunque si las Al-Zn-Mg, y este diagrama ayuda a explicar sus propie-

dades. Aleaciones de este tipo son las A612, C612, 40E, y -- las conocidas como ternalloys. El zinc tiene una extraordinaria solubilidad en el aluminio sólido, con un eutéctico para el 96%Zn. Pequeñas aleaciones de magnesio no modifican sustancialmente las características de solidificación que se pueden deducir del diagrama. Las aleaciones con elevados contenidos de zinc solidifican casi por completo mediante la formación de cristales de solución sólida primaria sin formación de eutéctico. Así, pues, las aleaciones Al-Zn-Mg tienen malas propiedades de llenado y son susceptibles de presentar microporosidad semejante a la que se encuentra en aleaciones Al-Mg.

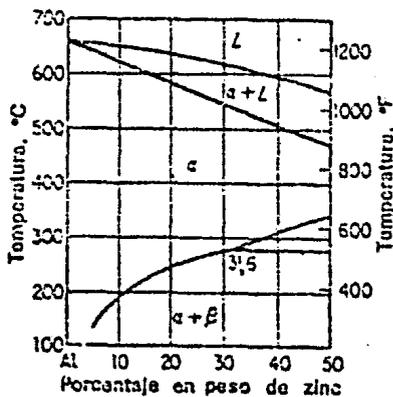


Fig. 12. Diagrama de -- equilibrio del sistema -- Al-Zn, permite explicar -- propiedades de las aleaciones Al-Zn-Mg.

Estas aleaciones, por otra parte, tienen sólo una ligera resistencia al alargamiento en caliente. La solubilidad elevada del zinc en aluminio hasta temperaturas relativamente bajas, tal como ocurre con el magnesio, es una prueba que en una pieza colada se pueden retener proporciones notables de elementos de aleación en solución sólida, lo que hace innecesario en muchos casos el tratamiento térmico. No obstante, al aumentar los contenidos de zinc y de magnesio es preciso tratarlos térmicamente. Estas aleaciones envejecen rápidamente a temperatura ambiente, y en algunos casos se emplean tratamientos de envejecimiento artificial para estabilizar las propiedades mecánicas.

II.8. ALEACIONES ALUMINIO-SILICIO (Al-Si).

La fig. 13 muestra el diagrama de equilibrio parcial-Al-Si. El silicio es el elemento de adición más importante en aleaciones de aluminio, por lo que respecta a condiciones de colada. En otros sistemas harían falta cantidades relativamente altas de elementos aleantes para obtener una porción apreciable de eutéctico, que consistiría en una proporción mayor de fase intermetálica frágil que de solución sólida de aluminio. Este no es el caso en el sistema Al-Si.

Aunque aquí solo se describe parte del diagrama, no se forman fases intermetálicas, y el eutéctico tiene aproximadamente un 10%Si distribuido en una matriz consistente en una solución sólida dúctil que supone prácticamente el 90% del material. Por lo contrario, recordemos que el eutéctico en el sistema Al-Mg consiste casi en un 90% de compuesto intermetálico frágil, y el eutéctico en el sistema Al-Cu tiene aproximadamente, un 60% de compuesto intermetálico frágil. No deberá sorprender, por tanto, que el eutéctico Al-Si sean tan poco perjudicial para la ductilidad.

La solubilidad sólida del silicio en aluminio es relativamente baja, y las aleaciones binarias Al-Si no se tratan térmicamente. El tratamiento de solubilización mejora algo las propiedades, pero una mejora auténtica solo se obtiene mediante la adición de terceros elementos. Además, las aleaciones binarias no son susceptibles de sufrir un tratamiento de envejecimiento. Si no se necesitan propiedades de tracción elevadas, se emplean la aleación 43 con 5%Si para muchas piezas, debido a su elevada colabilidad y compacidad.

La otra composición binaria que se emplea es la aleación 13 con 12%Si, que se utiliza en piezas fundidas a precisión.

Tanto el magnesio como el cobre se emplean con el silicio para obtener aleaciones bonificables; ningún elemento -

perjudica las propiedades beneficiosas de colada conferidas - por el silicio.

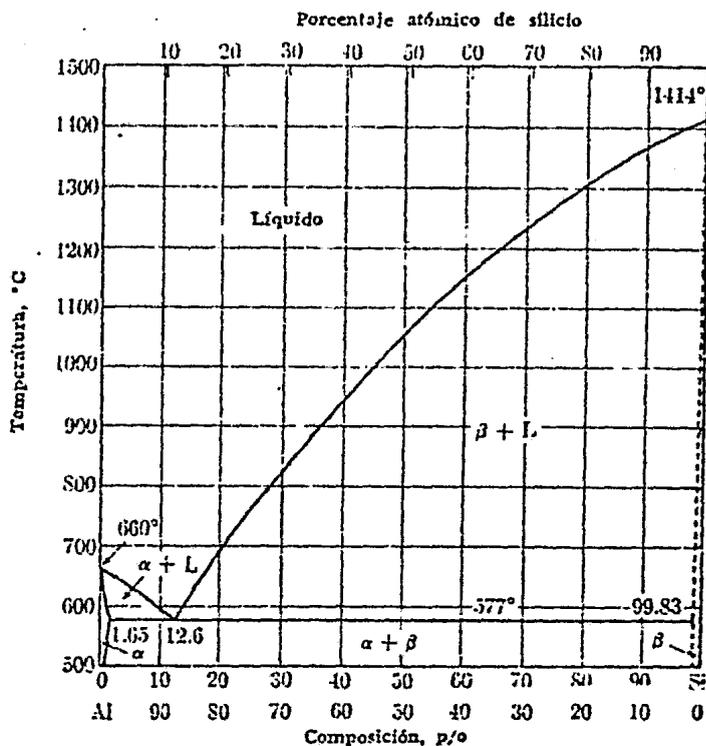


Fig. 13. Sistema Al-Si, extremo rico en aluminio - del diagrama de equilibrio. No se forman intermetálicos.

Antes de tener en cuenta algunas curvas de solidificación convendría examinar el diagrama parcial Al-Mg-Si en la - fig. 14. El Mg_2Si , forma un sistema cuasi-binario con el aluminio y explica el considerable efecto endurecedor cuando se combinan el magnesio y el silicio. En el aluminio es soluble un máximo del 1.85% Mg_2Si , que puede ser solubilizado y precipitar endureciendo la aleación. Dado que no es fácil disolver más de un 1% Mg_2Si a las temperaturas de solubilización - que se puede usar, la cantidad de magnesio empleado en las -- aleaciones Al-Si suele ser pequeña.

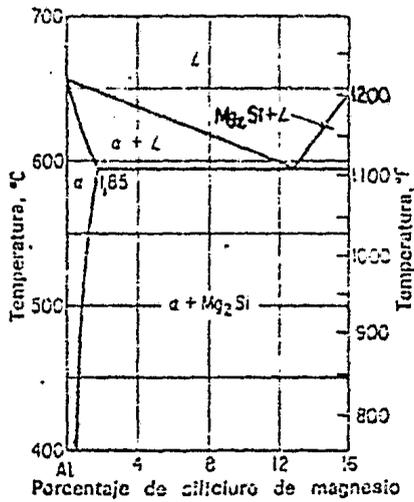


Fig. 14. Diagrama de equilibrio aluminio-siliciuro de magnesio. Región rica en aluminio.

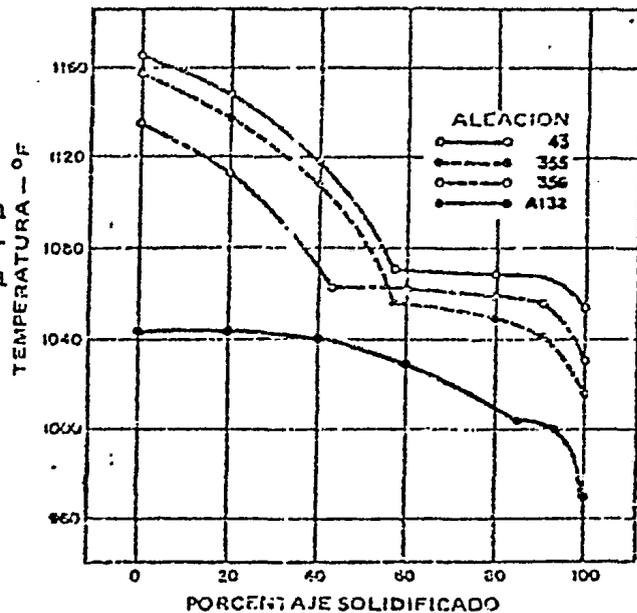
II.9. CARACTERÍSTICAS DE SOLIDIFICACION.

La fig. 15 muestra las propiedades de solidificación de aleaciones con distintos contenidos de silicio y otros elementos. La curva superior es para la aleación 43 con 5%Si. - Esta curva exhibe las características que contribuyen a una buena colabilidad. El intervalo de solidificación no es excesivamente largo, y más de un 40% de eutéctico se forma a temperatura casi constante.

La aleación 355 contiene un 5%Si, 1.25%Cu, y 0.5%Mg.- Las características de solidificación son semejantes a las de la aleación 43, excepto en que el material de tipo eutéctico se separa a una temperatura inferior y a lo largo de un intervalo de temperaturas mayor. La aleación 356 contiene 7%Si, y 0.3%Mg. El mayor contenido de silicio reduce la temperatura de líquidus y ocasiona la formación de una mayor cantidad de material eutéctico.

La aleación Al32 tiene esencialmente composición eutéctica por lo que respecta al silicio, y pequeñas cantidades

de cobre, magnesio, y níquel. En esta aleación la solidificación tiene lugar en un intervalo de temperatura tan estrecho que el tipo de rechupe tubular descrito anteriormente se produce en cuanto no se tenga una distribución generosa de bebederos y gradientes de solidificación elevados. La aleación - Al32 es la aleación originalmente denominada Lo-Ex y debe recordarse que el silicio tiene el efecto beneficioso de reducir el coeficiente de expansión de las aleaciones de aluminio y, por tanto, el cambio de volumen al pasar del estado líquido al sólido.



La fig. 16 muestra las curvas de solidificación de -- aleaciones con un 3 al 4%Cu además de silicio. La aleación - Al08 contiene un 5.5%Si y 4.5%Cu y la 319 tiene un poco más - de silicio y un poco menos de cobre. Así, comparándola con - la Al08, una mayor porción de la 319 solidifica como solución sólida de aluminio y el silicio, que solidifican simultánea-- mente a lo largo de un intervalo de temperatura anterior al - eutectico, se depositan de modo no dendrítico parecido al eu-- tectico y, por tanto, favorecen el llenado.

Las aleaciones 333 y D132 tienen composición parecida, ambas con 9%Si y 3.5%Cu, más pequeñas cantidades de otros elementos. Ambas tienen características de solidificación similares. Estas aleaciones con elevado contenido de silicio se usan principalmente para piezas fundidas con coquilla, en las que una diferencia en el llenado dará como resultado un rechupe concentrado en el centro, en lugar de la contracción más generalizada que se obtendría con aleaciones de menor contenido de silicio. Se reconoce generalmente que se controla menos la temperatura y gradiente de solidificación en coquillas que en arena y es más difícil eliminar por completo la contracción de ciertas áreas de la pieza fundida.

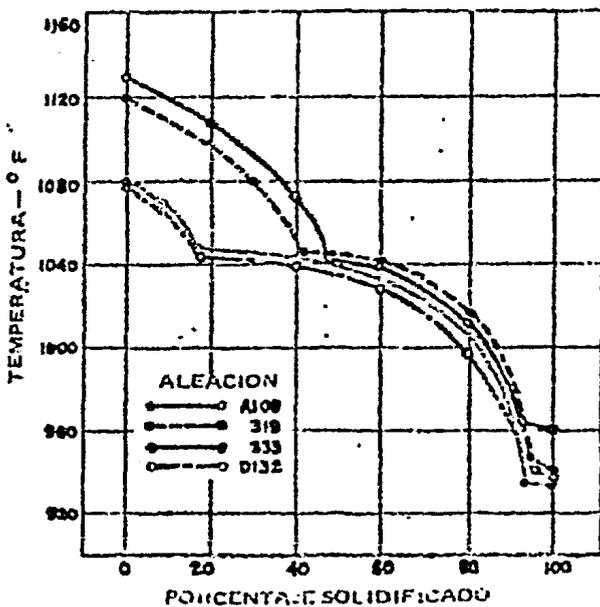


Fig. 16. Las curvas muestran las proporciones relativas de aleación que solidifican a distintas temperaturas.

II.10. AFINO DE GRANO.

Generalmente se suele usar titanio o titanio más boro para afinar el grano de las aleaciones de aluminio. Las aleaciones de tipo solución sólida de los sistemas Al-Cu, Al-Mg, y Al-Zn-Mg son relativamente sencillas de afinar, mientras que las aleaciones con cantidades sustanciales de silicio son

más difíciles. Aparentemente, los brazos de la dendrita primaria crecen más rápidamente en el líquido de alrededor a medida que aumenta el grado de enriquecimiento en elementos -- aleantes, tales como silicio. Por lo tanto, en aleaciones -- con contenidos más elevados de silicio, las primeras dendri-- tas que se nuclean en cualquier región de la pieza fundida -- tienden a formar grandes entramados bastante rápidamente, y -- así prevenir la nucleación de otros granos cerca de los origi-- nales.

El afino de grano afecta poco a las propiedades mecánicas de las aleaciones aluminio. Como pasaba con las alea-- ciones Al-Si modificadas con sodio, el principal beneficio -- del afino de grano es la mejora de las características de lle-- nado de todas las aleaciones de aluminio. La mecánica de es-- ta mejora no se comprende claramente, aunque a veces se aso-- cia con la mayor facilidad con que las pequeñas dendritas se-- pueden mover en una aleación solidificada parcialmente. Este movimiento masivo de las dendritas reduciría la necesidad de-- incrementar la alimentación de metal líquido.

Tal como ocurre en la modificación, el afino del gra-- no puede mejorar indirectamente las propiedades de tracción -- como resultado de la mejora en el llenado y del cambio de la-- forma y distribución de la porosidad. Los huecos individua-- les son pequeños y aislados en piezas fundidas de grano fino, pero son mayores y situados a lo largo de las fronteras de -- grano en piezas fundidas de grano grueso, especialmente en -- aleaciones de tipo solución sólida. El afino de grano tam-- bién mejora la resistencia al agrietamiento en caliente.

Otro efecto del afino de grano, ya sea corregido por-- agentes nucleantes o mediante solidificación rápida, es redu-- cir el tiempo necesario para disolver todos los elementos --

aleantes durante el tratamiento de solubilización. Este efecto se asocia con la distancia más corta a través de la cual tiene lugar la difusión y con el menor tamaño de los constituyentes solubles en el eutéctico.

II.11. VELOCIDAD DE SOLIDIFICACION.

La velocidad de solidificación de la mayoría de las aleaciones de aluminio afecta a las propiedades de tracción de las piezas coladas. Con buena capacidad de llenado, cuanto mayor es la velocidad de solidificación, mejores son las propiedades de la pieza fundida. Esto se asocia con tamaño más fino del constituyente insoluble, tamaño de grano más fino y menor porosidad, así como con huecos más pequeños y más aislados, con velocidades de solidificación más altas.

Como ya hemos dicho, es más difícil asegurar gradientes favorables de solidificación en coquilla que en arena, -- donde se puede usar material aislante o enfriadores en los puntos en que se necesita para suministrar los gradientes deseados. Así, las propiedades mecánicas de aleaciones de solución sólida que tienen malas características inherentes de llenado se pueden mejorar menos al cambiar de moldeo en arena a coquilla, que en el caso de aleaciones con buenas características de llenado.

II.12. SISTEMA DE CLASIFICACION Y DESIGNACIONES DE LOS TEMPLES Y TRATAMIENTOS TERMICOS PARA EL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES.

Los términos usados en la clasificación y designación de los temple y tratamiento térmicos son referencias de otras asociaciones, las cuales se adaptan en su totalidad a las --

prácticas de uso más común en la Industria Mexicana del Aluminio.

II.12.1. Objetivo y Campo de Aplicación.

II.12.1.1. Esta norma establece la clasificación y -- designación de los temple y tratamientos térmicos, que constituyen las formas de entrega de los productos fabricados por los procesos de: Laminación, extrucción en caliente y trefilado a partir de lingotes de forma y tamaño conveniente del aluminio y sus aleaciones.

II.12.1.2. Esta norma es aplicable en la industria de la fabricación de productos: laminados, extruidos en caliente y trefilados en las industrias y organizaciones comerciales -- que usan tales productos, en las transacciones comerciales -- que se efectúan con esos productos y en la educación en general, particularmente en la enseñanza técnica.

II.12.2. Definiciones.

II.12.2.1. Temple.

Es el proceso metalúrgico al cual se someten los productos de aluminio y sus aleaciones para impartirles propiedades físicas y mecánicas específicas por la acción de deformaciones plásticas en frío, en caliente, o por combinación de -- ambas, así como por acción de temperaturas controladas que -- confieren a la pieza microestructuras características.

II.12.2.2. Aleaciones de aluminio no tratables térmicamente.

Son las aleaciones de aluminio en las cuales el aumento de la resistencia mecánica se consigue solamente por trabajo mecánico.

II.12.2.3. Aleaciones de aluminio tratables térmicamente.

Son las aleaciones de aluminio en las cuales el aumento de la resistencia mecánica se consigue por medio de un tratamiento térmico o combinación de tratamiento térmico o trabajo mecánico.

II.12.2.4. Recocido.

Es el proceso metalúrgico por tratamiento mecánico - que se aplica a productos de aluminio y sus aleaciones para - modificar las características mecánicas del metal por recristalización o coalescencia de los constituyentes precipitados de la solución sólida de la aleación.

II.12.2.5. Solubilización.

Es el proceso metalúrgico por tratamiento térmico que se aplica a productos de aluminio y sus aleaciones, a una temperatura y tiempo prescrito para hacer entrar en solución sólida uno o varios de los componentes de la aleación, seguido de un enfriamiento a velocidad controlada para mantener en solución sólida dichos constituyentes.

II.12.2.6. Envejecimiento artificial.

Es el proceso metalúrgico por tratamiento térmico que se aplica a productos de aluminio y sus aleaciones, para efectuar una variación de las propiedades mecánicas de las aleaciones debido a la precipitación incompleta de los constituyentes previamente solubilizados.

II.12.2.7. Envejecimiento natural.

Es el proceso metalúrgico que efectúa el cambio de -- las propiedades mecánicas de los productos de aluminio y sus-

aleaciones, y que se producen por la precipitación espontánea a la temperatura ambiente de los constituyentes previamente solubilizados.

II.12.8. Estabilizado.

Es el proceso metalúrgico por tratamiento térmico que se aplica a los productos de aluminio y sus aleaciones para producir en un tiempo prescrito y temperatura menor o, igual a 200°C uno o varios de los efectos siguientes:

- a). Mantener constantes en el tiempo las propiedades mecánicas de las aleaciones Al-Mg.
- b). Modificar parcialmente el alargamiento a la fractura manteniendo constantes las restantes propiedades mecánicas en el aluminio y sus aleaciones.
- c). Eliminar las tensiones residuales en el aluminio y sus aleaciones.

II.12.2.9. Recocido Parcial.

Es el proceso metalúrgico por tratamiento térmico que se aplica a los productos de aluminio y sus aleaciones a una temperatura de recristalización, con el objeto de conseguir una recristalización parcial para alcanzar un nivel previamente establecido de las propiedades mecánicas en un producto -- que ha sido deformado en frío.

II.12.2.10 Trabajo Mecánico en Frío.

Es el proceso mecánico de la formación plástica que se efectúa a una temperatura, y velocidad tales que produce un aumento de las propiedades mecánicas en productos de aluminio y sus aleaciones.

II.12.2.11. Trabajo Mecánico en Caliente.

Es el proceso mecánico de deformación plástica efectuada a una temperatura superior al punto de recristalización sin producir aumento de las propiedades mecánicas del aluminio y sus aleaciones.

II.12.2.12. Homogeneización.

Es el proceso metalúrgico por tratamiento térmico a una temperatura constante menor que la temperatura de eutécticos, durante el tiempo prescrito, con el objeto de eliminar por difusión, las segregaciones producidas por los procesos de vaciado en productos de aluminio y sus aleaciones.

II.12.3. Clasificación y Designación.

II.12.3.1. Criterios de Clasificación.

Los temple de clasificación de acuerdo a los procesos a que se ha sometido el material y se designa como se indica a continuación:

F: De fabricación.

Se aplica a los productos obtenidos por extrusión o laminación en caliente, cuyas propiedades mecánicas no requieren ser controladas.

O: Recocido.

Se aplica a los productos semielaborados por extrusión o laminación, en el estado en que presentan el menor valor de las propiedades mecánicas prescritas.

H: Deformado en frío.

Se aplica a los productos en los cuales se ha aumentado la resistencia mecánica por deformación en frío, con o sin

tratamiento térmico complementario para producir ablandamiento parcial, se aplica solamente a las aleaciones no tratables -- térmicamente. La letra H debe ser seguida siempre de dos o más dígitos.

T: Tratamiento térmico.

Se aplica a las aleaciones endurecidas por precipitación con o sin trabajo mecánico complementario, que produce modificación de las propiedades físicas y mecánicas.

La letra T debe ser siempre seguida por uno o más dígitos, que indican la secuencia de tratamientos básicos de índole térmica o mecánica a los cuales debe ser sometido el producto.

W: Solubilizado térmicamente.

Se usa únicamente en aleaciones que envejecen espontáneamente a la temperatura ambiente, después que se les ha dado el tratamiento térmico de solubilización. Para que esté bien especificado este temple, deberá indicarse el tiempo en que ha ocurrido el envejecimiento natural; por ejemplo: W $\frac{1}{2}$ hr.

II.12.3.2. Designación de Temples H y T.

a) Temple H.

Debe ser designado de la siguiente forma:

Primer dígito: Indica la combinación de los procesos a que ha sido sometido el material:

H-1 Solo en deformado en frío.

H-2 Deformado en frío y parcialmente recocido.

H-3 Deformado en frío y estabilizado.

Segundo dígito: Indica el grado de deformación en frío, de acuerdo con la siguiente codificación:

GRADO	TERMINO COMUNMENTE USADO
No. 2	1/4 duro
No. 4	1/2 duro
No. 6	3/4 duro
No. 8	duro

b) Temples T.

Se designan de la siguiente forma:

T-1 Parcialmente solubilizado y envejecido naturalmente:

Se aplica a los productos extru^ídos o colados. Enfria^ído desde una temperatura elevada derivado desde un proceso de conformado, y envejecido naturalmente a una condición substancialmente estable.

T-2 Recocido.

Se aplica exclusivamente a las piezas fabricadas porcolada, con el objeto de aumentar su ductilidad e incrementar la estabilidad dimensional.

T-3 Solubilizado y luego deformado en frío.

T-4 Solubilizado y envejecido naturalmente.

T-5 Parcialmente solubilizado y envejecido artificialmente.

Se aplican a los productos extru^ídos o colados. Enfria^ídos desde una temperatura elevada de un proceso de conformado y envejecido artificialmente a una condición substancialmente estable.

T-6 Solubilizado y luego envejecido artificialmente.

T-7 Solubilizado y luego estabilizado.

T-8 Solubilizado, trabajo en frío y luego envejecido

artificialmente.

T-9 Parcialmente solubilizado, envejecido artificialmente y luego trabajado en frío.

Se aplican a los productos extruñdos o colados. Enfriados desde una temperatura elevada derivada de un proceso de conformado, y envejecido artificialmente a una condición substancialmente estable y luego son trabajados en frío.

T-10 Parcialmente solubilizado, trabajados en frío y luego envejecidos artificialmente.

Se aplica a los productos extruñdos o laminados, que enfriados desde su alta temperatura de conformado, se someten a un trabajo en frío por estirado que altera notablemente sus propiedades mecánicas finales, y por último se les envejece artificialmente.

Nota: Se suelen usar cifras adicionales, seleccionadas de entre los dígitos (con excepción del cero) para designar variaciones en los procesos de transformación que modifican sensiblemente las características de los productos finales.

II.13. PANORAMA DE ALGUNAS APLICACIONES MODERNAS DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO.

El aluminio se utiliza en diferentes campos como la industria de la construcción, el transporte, transporte de electricidad, distribución y empaque de comida.

Debido a las propiedades del aluminio como son su poco peso, resistencia, resistencia a la corrosión, aptitud para la deformación plástica, este metal juega un papel muy importante en el diseño y construcción de cualquier cosa que se

pueda mover, volar, flotar, y manejar. En particular me refiero a la industria de automotores.

En promedio se supone que un kilo de aluminio en un auto puede reemplazar a tres kilos de fundición o de acero. El aluminio utilizado en un auto es más económico porque gracias a su poco peso ahorra material de las partes de soporte (disminuye el peso y las dimensiones). Estadísticamente en el año 1974 cada auto en E.U.A. contenía 36.31 Kg de aluminio y en 1978, 51 Kg, mientras que para 1979, 60 Kg, de aluminio.

Se espera que en E.U.A., se usarán para cada automóvil alrededor de 190 Kg. de aluminio lo que causará la disminución del peso de un auto en un 30% y disminuirá el consumo de combustible de 18.1 a 11.8 litros por 100 Km.

En el transporte de ferrocarril están siendo construidos los vagones de pasajeros con una construcción autosustentada de la caja hecha de guías soldadas y placas de aleaciones de aluminio (Al-Zn5Mg1).

También los carros de equipaje autocargables, transportadores de carbón, tanques, carros refrigeradores están siendo modernizados de una forma similar. El peso del transportador, en promedio, puede ser del orden del 40% el peso de aquél acero.

En Japón los carros del metro hechos de acero pesan 9.4 toneladas. Sin embargo, el mismo hecho de aleaciones de metales ligeros pesa 4 toneladas, lo que da un gran ahorro de energía. A partir de esto podemos deducir que sobre las vías de ferrocarril corren diariamente millones de millones de toneladas de las construcciones de acero inútiles, con el consiguiente desperdicio de energía.

En el transporte marítimo, el aluminio se utiliza para construir los cascos de barcos pequeños, yates y otros particularmente para navegación fluvial y vehículos navales muy rápidos.

Ultimamente el aluminio se utiliza en la construcción de tanques para gases licuados. El gas condensado se transporta en tanques esféricos hechos de aluminio de 30 m de diámetro; 6 de tales esferas se juntan para formar un sistema de transporte.

El uso apropiado del aluminio aporta mejor aislamiento de calor, acondicionamiento de aire más eficiente y una -- más fácil conservación. Una construcción de aluminio correctamente aislada muestra pérdidas de calor 25% más pequeñas -- que una construcción similar hecha de ladrillos. Un factor -- aparte son los costos menores de transporte de las partes de construcción hechas de aluminio.

En lo que se refiere a la calefacción se espera gran desarrollo en las baterías solares instaladas sobre el techo de las casas. Para calentar la casa tipo, es necesaria una batería solar con una superficie de 46 m^2 y para construir esa batería necesitamos 340 Kg de aluminio. Se calcula que el -- consumo de aluminio en 1985 para la construcción de baterías solares será igual a 450,000 toneladas de aluminio.

Se ha calculado que si el 1% de las casas se calientan mediante energía solar se ahorraría 700,000 toneladas de petróleo por año en E.U.A. La energía solar crea una gran -- oportunidad para que el aluminio ahorre los combustibles naturales.

De acuerdo con cálculos japoneses las pérdidas caloríf

ficas con una ventana de marco de aluminio es 2 veces más pequeña que con marcos de acero o madera. Entonces las ventanas de aluminio permiten ahorrar una gran cantidad de energía.

En el transporte de energía eléctrica el aluminio es el material básico. Más y más energía eléctrica se produce en el mundo que se distribuye mediante cables de aluminio -- (con una pequeña cantidad de hierro). El 90% de las líneas eléctricas en E.U.A. se hacen de estas aleaciones.

De acuerdo a la opinión de la FAO (U.N. Food and Agriculture Organization), alrededor de un cuarto de los productos agrícolas se desperdicia durante el camino desde el campo a la mesa. Esto se debe a que los ratones, insectos, y bacterias causan deterioro a la comida. Esto es mayormente causado por el empaque incorrecto. Esta situación no debe tolerarse cuando millones de personas sufren hambre.

La aplicación del aluminio para el empaque evita la pérdida de comida y ahorra mucha energía cuando ésta es transportada.

En general, debido al almacenamiento de cereales en graneros se pierden millones de toneladas de grano por año.

Estas pérdidas pueden evitarse almacenando el grano y secándolo en tolvas de aluminio.

C A P I T U L O I I I

CORROSION DEL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

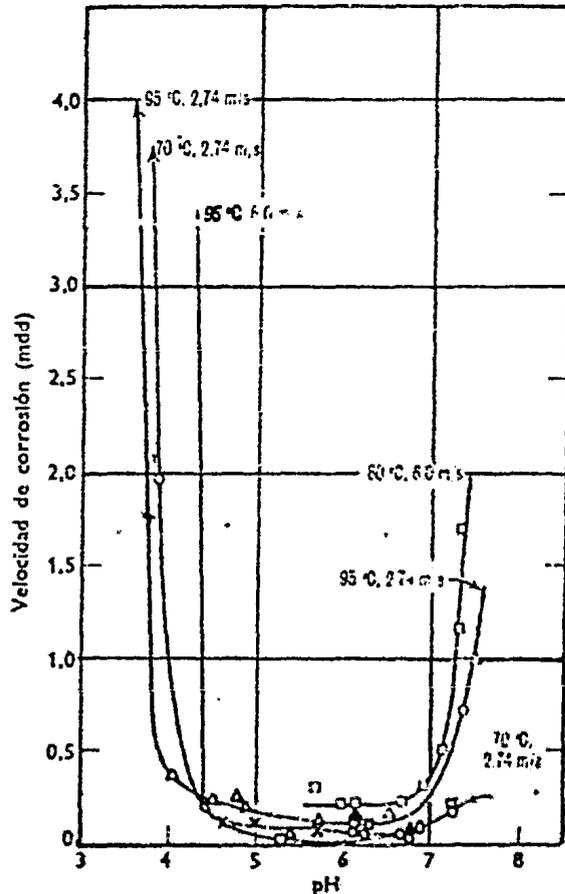
III. CORROSION DEL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES.

El aluminio es un metal ligero que posee buena resistencia a la corrosión en la atmósfera y en muchos medios acuos, combinada con buena conductividad térmica y eléctrica. - Es muy activo en la serie electroquímica, pero se hace pasivo con la exposición al agua. Aunque el O_2 disuelto en el agua - mejora la resistencia a la corrosión del Aluminio, su presencia no es necesaria para pasivarse. Es usual suponer que la película pasiva está compuesta por óxido de aluminio, que en el caso de Al expuesto al aire se estima de un espesor aproximado entre 20 y 100 Å. El comportamiento observado de la corrosión del Al es sensible a pequeñas cantidades de impurezas en el metal, todas las cuales, a excepción del Mg, tienden a ser catódicas con relación al Al. En general, el metal de alta pureza es mucho más resistente a la corrosión que el metal puro comercial que, a su vez, es más resistente que las aleaciones de aluminio. Las aleaciones de aluminio tienen como principal objeto aumentar su resistencia mecánica, ya que el aluminio puro es blando y débil.

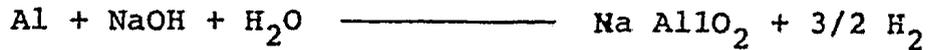
El aluminio tiende a picarse en aguas que concienen Cl^- , en particular en ranuras y en áreas de estancamiento, en las que se rompe la pasividad por la acción de pilas de aireación diferencial. Las trazas de Cu^{++} ó de Fe^{+3} en el agua también son eficaces para romper la pasividad. Se forman pilas galvánicas entre el Al y el Cu ó Fe depositados (por reacción de sustitución) que estimulan la disolución del aluminio en áreas locales. Por esta razón el aluminio no es un material-satisfactorio para cañerías de aguas potables o industriales, todas las cuales contienen trazas de iones de metales pesados. Por el contrario, el Al es satisfactorio para el agua destilada o agua blanda exenta de iones de metales pesados.

El aluminio se corroe con mayor rapidez tanto en ácidos como en álcalis que en el agua destilada, dependiendo la velocidad de corrosión en ácidos, de la naturaleza del anión. La fig. 17 proporciona datos a 95°C, que muestran que la velocidad de corrosión mínima cuando se emplea H_2SO_4 para ajustar el pH en la zona ácida, tiene lugar entre pH 4.5 a 7. A temperatura ambiente, la velocidad de corrosión mínima tiene lugar en una zona un poco menos ácida y más alcalina comprendida entre los valores aproximados de pH 5.5 a 8.5. Las velocidades de corrosión en la zona alcalina aumentan mucho con la elevación del pH, o sea, al contrario de lo que ocurre con el hierro y el acero que se mantienen resistentes a la corrosión. La razón de esta diferencia es que los iones Al^{+3} se complejan rápidamente por acción de los grupos OH^- para formar AlO_2^-

Fig. 17. Efecto del pH sobre la corrosión de aluminio puro comercial (número 1100) en soluciones aireadas. (El pH, medido a temperatura ambiente, se ajustó con H_2SO_4 o $NaOH$. - La mayor parte de las soluciones contenían H_2O_2 - de $1-10 \times 10^{-5}$ N, 68 ppm de $CaSO_4$, 30 ppm de $MgSO_4$ y 1-2 ppm de $NaCl$).



de acuerdo con:



Esta reacción es rápida a temperatura ambiente, mientras que en el caso del Fe la reacción similar que forma NaFeO_2 y Na_2FeO_2 requiere álcali concentrado y temperaturas elevadas.

III.1. EFECTOS DE LA COMPOSICION Y EL TRATAMIENTO TERMICO.

De los factores relativos al material, uno de los que más influyen en la resistencia a la corrosión es la pureza. Para describir ésta se distingue entre aluminio purísimo, con 99.99% ó más de aluminio, y los aluminios puros con 99.8, 99.7, 99.5, 99.33 y 99.0% de Al. Cuanto más puro, tanto más resistente es el aluminio, salvo en casos especiales en que ciertas impurezas aumentan la resistencia, como ocurre frente a las soluciones alcalinas o de sal común con la adición del magnesio como aleante. Además del magnesio, también el manganeso comunica una mayor resistencia al ataque por los iones cloro, en tanto que mantiene al hierro en solución sólida en el compuesto Al_6Mn formado, con lo que disminuye su efecto -- acelerador de la corrosión.

Las aleaciones de aluminio contienen adiciones de cobre, silicio, magnesio y manganeso, que la mayoría de las veces se añaden al aluminio puro en cantidades calculadas. Es fácil comprender que con estas adiciones las aleaciones serán

generalmente inferiores al material no aleado por lo que respecta al comportamiento en la corrosión. Mediante ellas, y según las composiciones y los estados logrados por tratamientos térmicos, se consiguen nuevas propiedades, con variaciones de la resistencia mecánica, el alargamiento, el coeficiente de dilatación por el calor, mejor conductibilidad, etc., con lo que el campo de las aplicaciones del aluminio se extiende considerablemente.

Por lo que a la corrosión se refiere son los estados heterogéneos del aluminio y sus aleaciones más peligrosas que los homogéneos, pues en los primeros los elementos metálicos acompañantes se encuentran sin disolver (como tales elementos o como fases intermetálicas) en la matriz del metal base y pueden dar lugar al funcionamiento de pilas locales. Un adecuado tratamiento térmico de homogeneización puede llevar a solución a los elementos aleados, disminuyendo su efecto peligroso o anulándolo. Por ejemplo, el silicio disuelto no afecta en general a la resistencia, mientras que precipitado la perjudica con frecuencia considerablemente.

Sobre los diferentes efectos de los metales extraños en el comportamiento del aluminio y sus aleaciones se han realizado numerosos trabajos, de los cuales hablamos a continuación.

La resistencia a la corrosión del aluminio es particularmente disminuída por la impurificación, muy frecuente, por hierro y cobre. Ya que el hierro está contenido en el aluminio en proporciones mayores que el cobre, resulta la impureza más peligrosa. Por la pequeña solubilidad del hierro en el aluminio (sólo aproximadamente un 0.005% a 500°C), se le encuentra normalmente en forma heterogénea, como compuesto intermetálico Al_3Fe más noble que el aluminio; este estado de cosas no es modificado por los tratamientos de homogeneización. Aunque el resultado depende también del medio agresivo, bastan, sin embargo, la mayoría de las veces contenidos pequeños de hierro para disminuir considerablemente la resistencia del aluminio de alta pureza (frente al agua tratada con permu-tita y las soluciones oxidantes de sal común sólo se tolera un 0.07% de hierro y frente al carbonato sódico nada más que 0.014%). En el mismo sentido actúan generalmente los contenidos crecientes de hierro en las aleaciones de aluminio. Una excepción son las aleaciones de aluminio con 3% de magnesio (aleación Mg_3Al), en las cuales no tienen importancia contenidos de hierro de entre 0.01 y 0.4%. Según investigaciones, en cambio, más allá de esos límites falla en estas aleaciones la capacidad del manganeso para hacer inofensivo al hierro respecto a la resistencia a la corrosión del aluminio; muchas veces se comportan estas aleaciones lo mismo con manganeso que sin él.

El cobre disuelto, pero más en estado heterogéneo (Al_2Cu) por la considerable diferencia de potencial, disminuye considerablemente la resistencia del aluminio y sus aleaciones contra diferentes medios agresivos. El ataque originado por la presencia de este elemento es frecuentemente localizado, y en los materiales que han sufrido tratamiento térmico la corrosión es muchas veces intercrystalina. Sólo 0.005% de cobre en aluminio de 99.99% parece ser causa de ataques loca-

lizados producidos por las aguas de permutita y las soluciones oxidantes de cloruro sódico. Contenidos de 0.02% de cobre tienen ya una intervención clara en el fenómeno. Comparativamente, la resistencia del aluminio de 99.99% es varias veces más afectada por un pequeño contenido de cobre que por el mismo de hierro (0.1% de hierro aumenta la velocidad de disolución en ácido clorhídrico 2N unas 160 veces y 0.1% de cobre la aumentan unas 1600 veces); el efecto del hierro, sin embargo, aumenta más al ser mayor el contenido. Ensayos en ácido clorhídrico 2N han mostrado que el efecto del cobre en el aluminio purísimo disminuye por la presencia simultánea de cadmio o silicio. También el cromo disminuye la corrosibilidad de las aleaciones aluminio-magnesio-silicio, que contienen también cobre para mejorar la resistencia mecánica.

El silicio contenido en el aluminio y sus aleaciones no disminuye prácticamente la resistencia química si se encuentra disuelto (por tratamiento de disolución y temple se puede mantener más de 0.5% de Si en solución sólida); en presencia de magnesio tampoco influye cuando se encuentra como Mg_2Si . Estas afirmaciones son consecuencia de resultados de ensayos realizados con muestras de aluminio sin silicio, y otras con 0.5% homogeneizadas a 500°C, en ácidos sulfúrico y nítrico diluidos. El silicio no disuelto se precipita del aluminio como elemento y fomenta la corrosión por su potencial considerablemente más noble que el del aluminio. Se ha discutido muchas veces la cuestión del efecto de una determinada relación de los contenidos de hierro y silicio, pero parece que tal relación no tiene la importancia supuesta en lo que respecta a la corrosión. Es más importante en todos los casos la suma de los contenidos de hierro y silicio, cuyo límite superior está prescrito en las tipificaciones, de acuerdo con la pureza del aluminio.

El zinc se manifiesta en general como prácticamente -- no perjudicial cuando su contenido queda dentro de los lími-- tes permisibles como impureza. Por el contrario no son satis-- factoriamente resistentes las aleaciones aluminio-zinc-magne-- sio; en ellas se encuentra el zinc en forma de la fase Zn_2Mg , que es considerablemente menos noble que el aluminio. Se con-- sigue un mejor comportamiento por adición de ciertos metales, por ejemplo, de cromo, vanadio o manganeso, especialmente -- cuando hay cobre presente.

El magnesio mejora fundamentalmente la resistencia a-- la corrosión en soluciones alcalinas y de sal común, mientras que por lo demás modifica poco el comportamiento del aluminio. Sólo con contenidos elevados disminuye la resistencia del alu-- minio frente a las soluciones ácidas.

El comportamiento del titanio es diverso; en parte me-- jora la resistencia (como adición al aluminio comercial en el ataque por ácidos nítrico y clorhídrico con peróxido de hidró-- geno), y en parte produce una cierta pérdida (por ejemplo, en el aluminio purísimo que contiene titanio frente a las solu-- ciones de carbonato sódico).

Respecto a los también interesantes metales pesados -- plomo, níquel y cobalto, se sabe que el plomo, en contenidos-- de 0.5% y aún de 1.4%, no es peligroso, mientras que níquel y cobalto perjudican a la resistencia tanto como el cobre.

La idea de que el contenido de calcio ejerce un efec-- to perjudicial sobre la resistencia a la corrosión no está de acuerdo con los resultados más recientes, según los cuales la velocidad de disolución del aluminio de alta pureza en hidróxi-- do de sodio o agua de barita no se eleva o se eleva inaprecia-- blemente por contenidos de 0.5 a 1% de calcio; se ha incluso--

prescrito una aleación de aluminio con calcio y magnesio como material de plaqueado resistente al agua del mar.

El sodio es peligroso, aunque los contenidos usuales son sólo pequeños.

De una serie de otros trabajos se deduce una mayor o menor disminución de la resistencia del aluminio por la existencia de cerio, platino, plata, torio y vanadio, mientras -- que los resultados relativos al cromo, estaño, cadmio y molibdeno, los presentan como en parte satisfactorios y en parte -- desfavorables, según sea el contenido y la naturaleza del medio agresivo. El bismuto produce a veces elevación de la resistencia, y también, como el boro, suele ser inactivo; el antimonio en cambio deja reconocer una disminución de la corrosión.

También los elementos no metálicos afectan la resistencia a la corrosión. Hay datos relativos al efecto del hidrógeno, nitrógeno, cloro y fósforo. El hidrógeno es peligroso porque a su presencia va ligada una porosidad del material. Al elegir un tratamiento con gas para el aluminio fundido, entre el cloro y el nitrógeno, debe preferirse el último gas -- nombrado, por lo que a resistencia a la corrosión se refiere. Los ensayos realizados con materiales fosforosos han indicado un empeoramiento de la resistencia cuando los contenidos son superiores al 0.002%.

III.2. FORMAS DE ATAQUE.

III.2.1. Ataque General Uniforme de la Superficie.

Es el que se observa de preferencia frente a ácidos e hidróxidos y, se puede considerar como ataque de este tipo -- aquel en que la profundidad es sólo unas 0.2 veces una de sus

dimensiones paralelas a la superficie. Sólo en el caso de esta forma de ataque se puede representar correctamente el efecto corrosivo de un medio por la pérdida de peso del material, mientras que en general la intensidad de un ataque sólo puede estimarse por la variación de propiedades mecánicas, tales como resistencia y alargamiento. Las pérdidas de peso se expresan en g/m^2 por día, y de estas cifras se puede pasar al desgaste en mm/año teniendo en cuenta el peso específico.

La tabla 4 sirve para valorar el ataque representado por una cifra dada:

Valoración	Pérdida de peso en g/m^2 por día	Disminución de espesor en mm/año	Pérdida de Resistencia en Kg/mm^2 por año.	Pérdida de alargamiento en porcentaje por año
Muy resistente	0-0.5	0-0.05	0	0- 5
Resistente	0.5-1.0	0.05-0.1	<5	5-10
Suficientemente resistente	1.0-5.0	0.1-0.5	5-10	10-20
Poco resistente	5.0-10.0	0.5-1.0	10-20	20-50
No resistente	>10	>1.0	>20	>50

Tabla 4. Esquema de valoraciones

A partir de las pérdidas de peso se puede calcular la duración del aluminio frente a un medio dado, con tanta más precisión cuanto más uniforme se mantenga el ataque durante espacios largos de tiempo (por ejemplo, comportamiento del ácido nítrico frente al aluminio). Las condiciones más satisfactorias se dan cuando la corrosión tiene lugar con precipitación sobre la superficie de los productos formados (acción-

del amoníaco) o por acciones oxidantes (por ejemplo, carbonato y cromato sódico), de tal forma que la velocidad de ataque disminuye con el tiempo.

II.2.2. Picadura.

Las irregularidades de la película de óxido, la existencia sobre la superficie del aluminio de partículas de metales con distinto potencial, la aireación diferencial o una distribución heterogénea del oxígeno sobre la superficie, etc., conducen a la formación de picaduras localizadas, que se presentan aisladas o más o menos uniformemente distribuidas sobre toda la superficie. Las picaduras se abren a la superficie o minan bajo ella. El progreso del ataque puede acarrear la perforación del material. Según la definición de P. Brenner es picadura el ataque en que la profundidad es mayor que 0.2 veces una de sus dimensiones superficiales. Las picaduras se forman tanto en el aluminio como en sus aleaciones, especialmente en estados homogéneos o muy heterogéneos.

II.2.3. Corrosión Intergranular.

En la corrosión intergranular el ataque se produce a lo largo de los límites intergranulares y, o progresa uniformemente en profundidad hacia el interior del metal por estas vías, o se limita su acción a algunos lugares. En esta última forma es mayor el peligro porque se provocan efectos de entalla. Como causa de este tipo de ataque se admite en general la presencia de precipitados a lo largo de los límites de grano, producidos en cristales de aluminio sobresaturados; estas segregaciones se disuelven preferentemente por tener mayor afinidad con el medio agresivo o porque su potencial es menos noble que el de la masa de los granos con respecto a dicho medio, con lo que, en resumen, se produce un en

sanchamiento de los espacios intergranulares. En las aleaciones aluminio-cobre el precipitado es más noble que los granos mismos, por lo que la corrosión intercrystalina se explica -- por una disolución de las zonas próximas al límite intergranular de la solución sólida que se han empobrecido en cobre.

Las aleaciones de aluminio sobresaturadas no son sensibles en todos los casos a este tipo de corrosión, sino que se necesitan otras condiciones previas referentes a la composición (por ejemplo, las aleaciones aluminio-manganeso no -- son sensibles), al tratamiento térmico, a la deformación en frío sufrida por el material o al medio corrosivo. La corrosión intercrystalina se presenta cuando el precipitado se encuentra finamente disperso y en una disposición continua. Por la homogeneización del material o por un tratamiento térmico que haga coalescer el precipitado y se pierda la continuidad de la disposición se evita o aminora tal tipo de corrosión.

En el aluminio puro y en las aleaciones de aluminio -- no saturadas no se ha observado hasta ahora este tipo de corrosión, salvo a veces en aluminio purísimo, de más de 99.95%, -- por acción del ácido clorhídrico.

III.2.4. Corrosión Bajo Tensiones y Fatiga con Corrosión.

Existe el fenómeno de la corrosión bajo tensiones que es la acción corrosiva sobre un material simultáneamente sometido a una carga mecánica, y el de la fatiga con corrosión, -- que son fenómenos de fatiga bajo cargas alternadas cuando hay simultáneamente acción de un medio corrosivo, ambos de gran -- importancia.

III.2.5. Corrosión en Capas o Estratos.

En este tipo de ataque el metal se desprende en capas paralelas a la superficie, formándose un hojaladre. Este fenómeno se presenta en trozos de material laminado o extrusado - de aleaciones de aluminio-cobre-magnesio, aluminio-magnesio - de alto contenido de magnesio y aleaciones aluminio-magnesio-zinc, cuando por causa del proceso de laminación se llega a una ordenación en capas de combinaciones intermetálicas, o -- cuando las capas de diferente concentración ya existentes en el lingote bruto de colada se disponen y extienden en capas - paralelamente a la dirección de la deformación.

III.2.6. Corrosión Bimetálica, Galvánica o por Contacto.

Se produce cuando el aluminio y otro metal más noble-introducidos en un electrólito se ponen eléctricamente en contacto. Para un mismo electrólito la intensidad del ataque aumenta con la diferencia de potencial existente entre los metales.

III.3. METODOS DE PROTECCION

Para evitar o al menos disminuir el ataque producido-sobre el aluminio y sus aleaciones en unas condiciones deter-minadas se puede recurrir a diferentes medios de protección:

a) Adición de inhibidores al medio agresivo.

Son condiciones previas para que sea posible el empleo de inhibidores el que se pueda permitir la impurificación del medio agresivo por la adición de los mismos y el que actúen - aunque sólo se encuentren en cantidad limitada. Dado el material, la actividad de los inhibidores depende de la naturale-za del medio así como de su concentración, pureza, temperatu-

ra, etc. La forma de actuar los inhibidores es diversa; los coloides orgánicos o inorgánicos, reconocidos como muy activos, tales como el vidrio soluble, el almidón, la cola, etc., parecen ligarse a la superficie por adsorción en capas delgadas, a causa de fuerzas de naturaleza eléctrica, y de esta forma limitan el ataque del medio. Las combinaciones nitrogenadas, como los alcaloides, las aminas orgánicas, etc., reaccionan en gran parte como los coloides, pero por otro lado sirven como estabilizadores de los hidroácidos de los halógenos formados como por ejemplo, cuando se emplean en adiciones a los derivados clorados de los hidrocarburos o para atajar el efecto del bromo sobre el aluminio.

Las materias conocidas como oxidantes, tales como -- cromatos, permanganato potásico, peróxido de hidrógeno, etc., dan lugar a la formación de una película de óxido reforzada sobre la superficie del metal o actúan oxidando sobre el propio medio o sobre los productos de reacción formados.

Los cromatos disminuyen el ataque por el ácido nítrico, que en la práctica sólo ataca al aluminio en concentraciones medias (tabla 5); se añaden 0.1% de cromato para ácidos del 2 al 10% y 0.5% para ácido del 20%. También son empleables para el ácido fosfórico (0.5% de cromatos para ácidos de menos que el 20%). En cambio son pocos activos para el ácido clorhídrico e incluso son casi perjudiciales para el ácido sulfúrico, sobre todo cuando contiene cloruros. La fuerte agresividad de los hidróxidos alcalinos sólo se puede refrenar en cierto grado por empleo de inhibidores, mientras que en cambio son ampliamente eficaces contra el ataque de los carbonatos y fosfatos, tanto los citados como los silicatos como el vidrio soluble y los cromatos.

b) Tratamiento superficial del metal por:

oxidación química,
oxidación anódica,
recubrimientos metálicos,
combinación adecuada de distintos recubrimientos,
barnices y pinturas,
esmaltables.

De entre los varios métodos químicos de oxidación el más conocido es el acreditado proceso MBV (Modifiziertes - -- Bauer-Vogel) y también el EW, en el que el aluminio particularmente como tratamiento posterior de una capa MBV, adquiere una elevada resistencia contra diversas aguas, soluciones de sales metálicas y corrosión atmosférica. Existe también un método denominado Alodine, en el que el aluminio se sumerge en una solución de ácidos fosfórico y crómico y fluoruros; la capa obtenida es una buena base para la pintura o barnizado.

De entre los métodos de oxidación electrolítica, el más conocido en Alemania es el Eloxal, que trabaja con ácido-sulfúrico u oxálico y proporciona una capa con muy buena resistencia a la corrosión y buena adherencia para barnices y pintura.

También los recubrimientos metálicos son importantes, especialmente para aleaciones de aluminio que contienen metales pesados. El valor protector del recubrimiento no depende sólo de la posición del metal que lo forma en la serie de potenciales, y, por tanto, de su diferencia de potencial con el aluminio, sino también de que se pueda formar un recubrimiento adherente, insoluble y compacto y de como sea la porosidad. Para iguales porosidades el metal de mejor acción protectora es el que da lugar a una capa más resistente.

Los progresos recientes se refieren también al mejor-
 empleo de las pinturas para aumentar la resistencia a la co-
 rrosión. Las pinturas se pueden emplear después de un trata-
 miento previo químico o electrolítico de la superficie, desti-
 nado a proporcionar una base de mejor adherencia. También prome-
 ten mucho los trabajos sobre aplicación de recubrimientos de es-
 maltes, especialmente vítreos, protectores contra la corrosión
 y exentos de plomo.

c) Protección Catódica.

Para la Protección catódica, cuando no se aplica una co-
 rriente eléctrica auxiliar, se provoca la formación de una pi-
 la en cortocircuito por contacto con un metal menos noble que
 el protegido, para que éste funcione como cátodo. Para prote-
 ger al aluminio se emplea como ánodo el magnesio y en determi-
 nados electrólitos, la mayoría de las veces para proteger alea-
 ciones que contengan cobre, se utiliza también el zinc.

III.4. ACCION DE LOS ACIDOS INORGANICOS Y DE LAS BASES.

La acción de las diversas materias sobre al aluminio-
 depende de su naturaleza. Los medios fuertemente ácidos o -
 fuertemente alcalinos atacan a la película de óxido, no resis-
 tente contra ellos, y, después de eliminarla, disuelven al -
 metal con desprendimiento de hidrógeno. Sin embargo, hay ca-
 sos en que el aluminio puede resistir a los ácidos fuertes. -
 Ello ocurre cuando estos ácidos actúan como oxidantes enérgi-
 cos, porque provocan una pasivación de la superficie, o cuan-
 do existe un efecto retardante (sobretensión) que dificulta -
 la descarga y desprendimiento de hidrógeno. El primer caso -
 ocurre con el ácido nítrico de elevada concentración y el se-
 gundo en el efecto del ácido clorhídrico sobre el aluminio pu-
 rísimo. Sin embargo, en este último caso, de polarización --
 por el hidrógeno, la resistencia desaparece si es posible el-
 acceso de oxígeno, que actúa como despolarizante, en tanto --

que este oxígeno no llegue a producir de por sí una oxidación protectora de la superficie.

La capacidad de reacción de los ácidos sobre el aluminio no depende sólo de su grado de disociación, que determina su fuerza, sino que también está condicionada por la naturaleza y concentración de sus aniones. De entre los ácidos inorgánicos los que actúan más enérgicamente sobre el aluminio --son los hidrácidos de los halógenos; su agresividad disminuye--al aumentar el peso atómico del halógeno, mientras que el grado de disociación aumenta según la serie fluorhídrico, clorhídrico, bromhídrico, y yodhídrico. La intensidad del ataque --de un ácido depende de su concentración, de la temperatura,--y de la pureza del mismo. La mayoría de las veces hay una región de concentraciones medias o no demasiado altas para la --cual es máximo el ataque; así ocurre para el ácido nítrico en concentraciones del 20 al 50% y para el sulfúrico de aproximadamente el 80%. La disminución del ataque que se produce después de tal máximo es debida a la disminución de la actividad de los iones hidrógenos en los ácidos concentrados, a la mayor protección superficial producida por los productos de reacción, que se disuelven menos, y a un mayor efecto oxidante--del oxígeno de los ácidos que se descomponen. Al elevarse la temperatura aumenta el ataque por los ácidos, salvo en casos--de que por tal elevación se intensifique la formación de capas protectoras (ácido fosfórico) o aumente el efecto oxidante (ácido sulfúrico).

La resistencia del aluminio frente a los ácidos aumenta con la pureza del metal. Es conocida la particularmente --distinta sensibilidad al ataque por el ácido clorhídrico del--aluminio puro y del purísimo. Como ya hemos indicado, los metales que acompañan al aluminio provocan generalmente una intensificación del ataque, que en cada caso depende de la natu

raleza del ácido y de las condiciones particulares. En consecuencia, las aleaciones, excepto las aluminio-manganeso, resisten menos a los ácidos que el aluminio puro.

La tabla 5 reproduce resultados de ensayos relativos a la resistencia frente al ácido clorhídrico de muestras de aluminio de distintas purezas, y después de diferentes tratamientos. Se desprende de ella que el material recocido a 360°C se ataca más intensamente que el que se ha homogeneizado por tratamiento a 575°C y luego se ha templado en agua o se ha dejado enfriar en el horno. Los que mejor se comportaron fueron los últimos. Es interesante el hecho de que las mayores diferencias de comportamiento frente al ácido clorhídrico del 20% se encontraron entre las probetas recocidas a 360°C y las homogeneizadas y enfriadas en el horno del aluminio puro de 99.97%. En los metales más puros (99.99 y 99.998% de Al) y en los menos puros (99.98, 99.57 y 99.2% de Al) las diferencias entre las pérdidas de peso son menores.

Estas observaciones se explican por los límites de solubilidad de las impurezas, especialmente la poca solubilidad del hierro, porque en el aluminio muy puro existen pequeños precipitados de hierro después de recocer a 360°C , los cuales se disuelven completamente en el tratamiento de homogeneización, mientras que en los metales menos puros la cantidad de hierro es mucho mayor que la que puede disolverse aun a los 575°C , por lo que tanto después de recocer a 360 como a 575°C existe siempre un precipitado relativamente abundante de hierro.

Del hecho de que las probetas homogeneizadas y enfriadas en el horno presenten ataques menores que las homogeneizadas y enfriadas en agua parece desprenderse, sorprendentemente, que es mayor la homogeneidad de las primeras. Lo que parece más claro es que en ninguno de los dos casos se ha podi-

do evitar totalmente la precipitación de una segunda fase, y ésta se encontrará más finamente dispersa en las probetas templadas que en las enfriadas en horno, en las cuales ha habido tiempo para que se produzca una coalescencia.

De entre los ácidos inorgánicos más conocidos, y aparte de los más agresivos hidrácidos de los halógenos*, actúan también enérgicamente el hidrofluosilícico, el perclórico y el fosfórico**. Es desgaste producido por el ácido sulfúrico de concentraciones pequeñas y medias es de pequeño a moderado***. El ácido crómico se comporta parecidamente al sulfúrico****. El ácido nítrico, con la excepción de las con

* Desgaste del aluminio de 95.5%, semiendurecido, durante 8 días, a temperaturas de, respectivamente, 20, 50, y 98°C, en ácido clorhídrico: en ácido del 1%, 2.3 g/m² por día, 42 g/m² por día, disolución total; ácido del 5%, 57.1, 124, dis. total; ácido del 10%, dis. total, dis. total, dis. total; ácido del 15%, dis. total, dis. total, dis. total.

** a) En ácido fosfórico, aluminio de 99.45, duro, 24 hrs. a 20°C: ácido del 1%, 5.6g/m² por día; ácido del 5%, 11.8; ácido del 10%, 17.9; ácido del 20%, 30.2%; ácido del 88%, 189.6g/m² por día.

b) Acido fosfórico, aluminio de 99.5%, semiduro, durante 8 días, a, 20, 50 y 98°C, respectivamente: ácido del 1%, 3.3 g/m² por día, 13.4 g/m² por día, 2.2 g/m² por día; ácido del 10%, 15.3, 123.2, dis. total.

*** Acido sulfúrico sobre aluminio de 99.5%, semiduro, durante 8 días a 20, 50 y 98°C, respectivamente; ácido del 1%, 1.07 g/m² por día, 11.9 g/m² por día y 27.1 g/m² por día; ácido del 10%, 1.56, 24.3, 131; ácido del 25%, 2.0, 44.5, dis. total; ácido del 62.5, 25.0, dis. total; ácido del 78%, 86.7, dis. total, dis. total; ácido del 96%, 27.1, 7.4 y 12.9 g/m² por día.

**** Acido crómico sobre aluminio de 99.5%, semiduro, durante 8 días, a 20, 50 y 98°C, respectivamente: ácido del 10%, 1.2 g/m² por día, 10.7 g/m² por día, y 95.8 g/m² por día; ácido del 25%, 6.8, 21.9, dis. total.

centraciones muy agresivas de 20 a 50%, produce ataques moderadamente intensos, y en las concentraciones muy altas el desgaste es muy pequeño (tabla 6). Los resultados en ácidos carbónico son diferentes según que se encuentre en agua destilada o de la cañería y según sean las restantes condiciones. - Los ácidos débiles bórico y cianhídrico producen, naturalmente, efectos más pequeños. En el ácido hipocloroso, que de -- por sí es débil, tiene importancia la formación de clorhídrico por descomposición con desprendimiento de oxígeno.

Efecto del tratamiento térmico sobre la velocidad de corrosión del aluminio en lejía de sosa y en ácido clorhídrico. (Duración del ensayo: hasta 160 h)

Pureza del Al, %	Tratamiento térmico ¹	Velocidad de disolución (en g./m ² por día)		Relación de G, GW o de G/GO
		NaOH 0,3 n a 23° C	HCl al 20 % a 25° C	
99,998	G	187,2	6,1	—
	GW		5,3	1,2
	GO		4,6	1,3
99,99	G	696	112,2	—
	GW		4,8	21,6
	GO		4,4	26,5
99,97	G	884,4	6 540 ±	—
	GW		1 221	5,1
	GO		225,6	29,2
99,88	G	884,4	36 180 ±	—
	GW		11 760 ±	3,0
	GO		6 960 ±	5,7
99,57	G	1 300,2	72 600 ±	—
	GW		41 700 ±	1,7
	GO		30 600 ±	2,4
99,2	G	1 614,6	187 200 ±	—
	GW		123 600 ±	1,5
	GO		121 200 ±	1,5

¹ G = Recocido a 360° C.

GW = Recocido a 360° C, tratamiento a 575° C y temple en agua.

GO = Recocido a 360° C, tratamiento a 575° C y enfriamiento en lebría.

² Las probetas (diámetro de 5,1 cm de aluminio y 1 a 2 mm de espesor y área de 40,5 cm²) se disolvieron a temperatura ambiente en 24 horas.

Tabla 5.

Acción del ácido nítrico de diferentes concentraciones sobre aluminio de 99,5 %, durante 60 días a 26° C ³⁴

% de HNO ₃	Pérdida de peso en g/cm ² por día	Desgaste en mil año
1	1,5	0,20
5	5	0,67
10	8,8	1,17
15	11,9	1,58
20	13,3	1,77
25	14,5	1,93
30	15,2	2,02
40	16,0	2,13
50	11,8	1,57
65	6,4	0,85
80	3,3	0,44
90	1,2	0,16
96	0,7	0,09
99,6	0,1	0,01

Tabla 6.

Los hidróxidos de sodio, potasio, calcio, bario, y el amoníaco atacan fuertemente al aluminio. La intensidad del -- ataque por las bases es varias veces mayor que la de los ácidos de igual grado de disociación. La reacción en el hidróxi do de sodio, ha permitido reconocer tres periodos diferentes, pero los periodos de incubacion e inducción en los medios alcalinos son considerablemente más breves que los ácidos.

Cuando la concentración del hidróxido es baja o por-- que hay poco líquido, no se tiene un ataque como el observado ordinariamente en el que el curso de la reacción es uniforme, sino que se produce una disminución del ataque o éste es, intermitente. Esto puede explicarse mediante el mecanismo de -- la reacción. El ataque del aluminio por las bases transcurre con formación de hidróxido de aluminio y desprendimiento de -- hidrógeno; el hidróxido de aluminio, por su carácter anfótero, se disuelve en el exceso de álcalis formándose aluminato. Como reacción secundaria se puede producir la descomposición hi

drolítica del aluminato, precipitándose hidróxido de aluminio y liberándose el álcali. Pero a veces, por la reacción de hidrólisis del aluminato previamente formado se libera álcali y el ataque se reaviva. Al aumentar la concentración del hidróxido aumenta la agresividad.

El aluminio purísimo, a la diferencia de la resistencia que presenta en los ácidos, es considerablemente atacado por el hidróxido de sodio, aun cuando todavía se nota claramente la influencia de la pureza sobre la intensidad del ataque en los aluminios puros. En los materiales más impuros -- apenas se presentan diferencias de comportamiento (tabla 5).

Del hecho de que el metal ligero con contenidos de aluminio variables entre 99.95 a 99.0% se disuelve con casi igual rapidez en hidróxido de sodio (lo mismo ocurre en amoníaco) se dedujo que la disolución del aluminio en bases no era una reacción electroquímica, sino simplemente química. Se ha comprobado que los metales nobles, con poca sobretensión, como el platino, cobre y hierro, elevan regularmente la velocidad de disolución en función de su concentración. Actúan como cátodos locales. Los metales con sobretensión elevada se comportan variadamente: zinc, cadmio, y plomo aumentan un poco la velocidad de disolución, el bismuto no la modifica y el estaño y el antimonio la disminuyen. Puesto que los metales con sobretensión alta sólo permiten pequeñas y aun muy pequeñas intensidades de corriente en las pilas locales, no deben afectar o deben modificar poco las velocidades de disolución, por lo que no puede reconocerse una dependencia con la pureza. Esta deducción se basa en la teoría electroquímica de la disolución del aluminio en bases. Las diferencias de tratamiento térmico de las muestras de aluminio (recocido de aluminio de diversa pureza a 360°C, homogenización de parte de las probetas a 475°C y enfriamiento de estas en agua o en el horno) no afecta tampoco a la disolución en hi--

dróxido de sodio (0.30 a 1N), al contrario de lo que ocurre -- en el ácido clorhídrico (tabla 5).

III.5. ACCION DE LAS SALES.

En el comportamiento del aluminio y sus aleaciones -- frente a las soluciones influyen la alcalinidad, la naturaleza de los aniones y la naturaleza de los cationes. Las sales de reacción neutra atacan menos que las que la tienen ácida o básica, ya sea por incompleta saturación de anión o catión o por diferente fuerza de ácido y base (sulfato de aluminio, -- bisulfato de potasio y carbonato sódico, por ejemplo).

Respecto a los aniones la intensidad de ataque disminuye en la serie cloruro, nitrato y sulfato. La gran capacidad de reacción de los iones cloro reside en el pequeño tamaño de los mismos que les permite penetrar fácilmente en la capa de óxido, con preferencia en aquellos lugares en que el recubrimiento es delgado o está deteriorado. Los sulfatos de -- reacción neutra, por el contrario, atacan poco o no atacan -- prácticamente.

Los cationes potasio, sodio, amonio, calcio, y magnesio no dan lugar a diferencias de ataque muy marcadas; la -- agresividad disminuye según el orden en que se han citado. En cambio, son peligrosos para el aluminio los cationes de los -- metales pesados. El intercambio de electrones entre el aluminio y los cationes pesados puede descargar a éstos, originando una deposición metálica que trae como consecuencia la formación de pilas locales; cuando los cationes pueden presentar diferentes valencias puede también ocurrir una reducción del catión de valencia más alta a la valencia inferior, con oxidación simultánea del aluminio. Por el acceso de oxígeno se -- puede producir una reoxidación de los iones del metal pesado-

y en total una renovación de la reacción con consumo de aluminio.

El aluminio presenta una notable resistencia frente a numerosas sales. Cuando, sin embargo, hay agresividad se la puede combatir ventajosamente mediante la formación de capas protectoras por vía química o electroquímica o por adición de inhibidores, con lo que se amplía considerablemente el campo de empleo del aluminio frente a este tipo de compuestos.

III.6. ACCION DE LAS AGUAS.

El aluminio resiste el agua destilada aun a temperatura de ebullición. Ciertamente que el agua puede actuar inicialmente sobre la superficie del metal si se ha eliminado la película de óxido (frotando con lija bajo agua), pero el ataque disminuye rápidamente por formarse una nueva película que, a diferencia de las usuales amorfas, tiene estructura cristalina. A temperatura de ebullición o más generalmente en agua a más de 70°C, se forma el monohidrato y el cual presenta un efecto protector especialmente bueno, como se ha comprobado por ensayos comparativos con probetas oxidadas al aire en el ataque por ácidos. Por esta razón se ha consolidado la opinión de que la elevación de la resistencia a la corrosión que se produce en el aluminio oxidado anódicamente al hervirlo -- con agua se debe atribuir a la formación del monohidrato, y no, como hasta ahora se había supuesto, a que se cierran los poros por hincharse la capa.

En el aluminio muy puro con un contenido bajo de silicio no se produce una disminución del desprendimiento de hidrógeno durante la acción del agua. Sin embargo, se puede evitar este comportamiento aumentando el contenido de silicio, bien como adición en el metal o bien añadiendo ácido silícico

en pequeña cantidad al agua.

La acción de las diversas clases de aguas, tales como las de condensación, lluvia, mar, cañerfa, etc., depende de la naturaleza y cantidad de las materias que contengan. Por la multiplicidad de factores que pueden influir es frecuente que se encuentren resultados muy diferentes.

III.7. ACCION DE LOS GASES.

Los gases, según sus constantes críticas, se manejan en la práctica comprimidos o licuados y en otros casos disueltos en una materia apropiada. El oxígeno comprimido, el cloro, el anhídrido sulfuroso, el anhídrido sulfúrico, el fosgeno, el amoníaco, y otros gases licuados, y también el acetileno disuelto en acetona, en estado puro no son corrosivos frente a las aleaciones de aluminio en las condiciones de ensayo (de -20a + 30°C). Teniendo en cuenta las propiedades mecánicas necesarias se realizaron los ensayos con aleaciones de aluminio (aluminio-cobre y también aluminio-magnesio-silicio sin cobre) de resistencia mecánica media y alta. La buena resistencia de los materiales a base de aluminio no excluye una reacción inicial entre gas y metal, pero los productos formados se depositan sobre el metal formando una capa protectora, aun en el caso de gases licuados de constante dieléctrica relativamente alta (amoníaco, anhídrido sulfuroso), en los que habría que contar con mayor poder de disolución para los productos de corrosión.

Las impurezas de los gases provocan fácilmente el ataque, por lo que es condición previa que los mismos tengan un cierto grado de pureza. Existe un peligro especial en la presencia de humedad, o, en el empleo práctico, del agua residual del lavado de las botellas, sobre todo cuando hay agua sufi--

ciente para que forme una fase separada y por el contacto con los gases pueda adquirir reacción más o menos fuertemente ácida o alcalina.

Puede suponerse que de entre los gases permanentes, - ni los nobles, ni el hidrógeno y nitrógeno prácticamente exentos de oxígeno, atacarán al aluminio y sus aleaciones en presencia de humedad, aunque hasta hoy no existe base experimental para afirmarlo. Por el contrario, el oxígeno y el aire comprimido producen un ataque que aumenta con la presión cuando hay agua que contiene electrólitos. El fluoruro de boro parece peligroso por causa del ácido fluorhídrico que se produce al descomponerse en presencia de agua.

Los gases licuados como el ácido clorhídrico o el anhídrido sulfuroso atacan fuertemente la superficie del metal en presencia de soluciones acuosas, y lo mismo los derivados halogenados de alto punto de ebullición, como el trichloroetileno, el tetracloruro de carbono, los hidrocarburos fluorados y clorados, etc., porque en presencia de humedad se forman -- los hidrácidos.

El anhídrido carbónico húmedo no ataca al aluminio y sus aleaciones mientras el contenido de humedad no sobrepase los límites de saturación; cuando se separa una fase acuosa - se produce, sin embargo, un ataque, que es mayor para el anhídrido carbónico líquido que para el gaseoso comprimido.

Hay que contar con ataques más intensos en el caso de gases que dan reacción alcalina en solución acuosa (amoníaco), mientras que los neutros (hidrocarburos, sulfuro de carbono) - sólo atacan en presencia de oxígeno o de impurezas de naturaleza electrolítica.

El aluminio y sus aleaciones dan buenos resultados -- frente al acetileno disuelto en acetona. Por ejemplo, las -- pérdidas de peso de la chapa de aluminio puro (99.5%), semien durecido, en acetileno húmedo, después de 300 días, son: 0.83 g/m² por día; en agua de lavado 0.85 g/m² por día, después de 134 días.

III.8. ACCION DE LOS ELEMENTOS.

El comportamiento de los elementos metálicos en con-- tacto con el aluminio depende de la posición relativa a éste-- en la serie de potenciales electroquímicos. Cuanto más noble sea el metal más probable es la disolución anódica del alumi-- nio. Esta corrosión por contacto se debe tener particularmen-- te en cuenta en las construcciones metálicas compuestas, de-- biéndose tomar las medidas protectoras pertinentes como un -- aislamiento suficiente, o recubrimientos metálicos de zinc o cadmio. Los metales alcalinos innobles pueden atacar en pre-- sencia de humedad porque se forman hidróxidos. El magnesio -- sirve como ánodo protector del aluminio.

Los elementos gaseosos no metálicos no atacan, según-- lo que hemos indicado, en ausencia de agua o electrólitos y a temperaturas no excesivamente altas. Los restantes elementos sólidos (excepto el bromo) no metálicos se comportan en lí-- neas generales de acuerdo con sus propiedades, análogamente a los gases o análogamente a los metales cuando son buenos con-- ductores eléctricos como el telurio.

III.9. ACCION DE LAS COMBINACIONES ORGANICAS.

Es decisivo para el comportamiento del aluminio fren-- te a los compuestos orgánicos, aparte de la basicidad o aci--

dez, la capacidad de reacción de algunos de los sustituyentes.

Los hidrocarburos saturados de cadena abierta como parafina y metano, o cerrada como el benceno, y las combinaciones análogas no saturadas como el acetileno, son químicamente neutras y no actúan sobre el aluminio, supuesto que estén suficientemente puras.

Los alcoholes monovalentes alifáticos adquieren un carácter, cada vez más parecido al de las parafinas, y, por tanto, indiferente, al aumentar su peso molecular. El alcohol, metílico, como primer término de la serie homóloga, es un -- agresivo relativamente fuerte, aunque, sin embargo, su ataque no se distingue por lo considerable. El extenso empleo práctico del aluminio para la obtención y almacenamiento del alcohol etílico es consecuencia de la resistencia frente a este medio. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el aluminio -- es especialmente sensible al alcohol muy deshidratado y sobre todo a la temperatura de ebullición.

Tampoco los alcoholes con dos o más hidroxilos (glicerina) atacan prácticamente al aluminio. Los fenoles (fenol, cresol) son oxicombinaciones cíclicas comparables a un alcohol terciario que, a diferencia de los hasta ahora mencionados, -- tienen propiedades débilmente ácidas, pero sólo el fenol y el cresol actúan sobre el aluminio a temperaturas altas y sobre todo cuando están completamente anhidros. El aluminio puede emplearse con fenol que contenga más de 0.3% de agua a temperaturas de hasta 180°C; el fenol seco no debe calentarse en -- vasijas de aluminio a más de 120°C.

Los éteres y las cetonas prácticamente no atacan; los aldehidos, a lo más, sólo poco. Sin embargo, con los aldehidos existe siempre el peligro de una intensificación del ata-

que por los correspondientes ácidos carboxílicos formados por oxidación.

La intensidad del ataque de los ácidos carboxílicos - sobre el aluminio y sus aleaciones depende esencialmente de - la concentración de iones hidrógeno. En la mayoría de los ca - sos son ácidos débiles que no poseen una agresividad propia - de importancia. Al aumentar el peso molecular de los ácidos alifáticos monocarboxílicos (ácidos grasos) disminuye el gra - do de disociación. Se encuentra un ataque relativamente fuer - te en los ácidos diluídos, el cual disminuye al aumentar la - concentración y es prácticamente nulo en los muy pobres en -- agua. En estado totalmente ahídrico y a temperatura elevada -- vuelve a aumentar notablemente la intensidad del ataque.

El ácido fórmico es el que más ataca de entre los gra - sos. A la temperatura ordinaria el ataque es pequeño, pero - aumenta con la temperatura, de tal forma que en la práctica - no se puede mantener mucho tiempo el contacto del aluminio -- con ácido fórmico caliente. En cambio se le puede emplear -- con ácido acético de hasta el 80% aun a temperaturas de 50°C. El ácido muy concentrado casi no ataca al aluminio ni a la -- temperatura de ebullición.

Como ejemplo podemos ver el ataque del ácido acético- (1-100%) sobre el aluminio de 99.3%: a 20°C menos de 0.1 g/m² por día; a 50°C 0.8; ácido del 1% a ebullición 60 g/m² por -- día; ácido concentrado a ebullición 1 g/m² por día. En ácido de menos de 1% las pérdidas son más elevadas.

Los ácidos monocarboxílicos no saturados (ácido crotó - nico) se comportan de forma parecida a los saturados, su lige - ramente mayor disociación no afecta al ataque. Los ácidos - dicarboxílicos atacan más que los monocarboxílicos con igual - número de átomos de carbono.

En resumen, el aluminio comercial (tipo 1100) es resistente a:

- NH_4OH , caliente o frío.
- Acido acético, caliente o frío, y muchos otros ácidos orgánicos. Las mayores velocidades de ataque se producen con ácido de 1 a 2% en ebullición. El ácido de 99% no es corrosivo apenas, pero la eliminación del último 0.5% H_2O incrementa el ataque. El aluminio es resistente a los ácidos cítrico, tartárico y málico.
- Acidos grasos. En la destilación de ácidos grasos se emplea equipo de aluminio.
- Acido nítrico, arriba del 80% hasta alrededor de 50°C . Ver fig. 18.
- Agua destilada.
- Exposición atmosférica. Resistencia excelente a las atmósferas rural, urbana e industrial; tiene menor resistencia a las atmósferas marinas.
- Azufre, atmósferas sulfurosas, SH_2 . El aluminio se emplea en la minería del S.
- Gases refrigerantes fluorados, por ejemplo, Freon. Pero no al bromuro o cloruro de metilo.

El aluminio no es resistente a:

- Acidos fuertes, tales como ClH y BrH (diluidos o concentrados), SO_4H_2 (es satisfactorio para aplicaciones especiales a temperatura ambiente por debajo del 10%); FH , ClO_4H , PO_4H_3 y ácidos fórmico, oxálico y tricloroacético.
- Alcalis. La cal y el hormigón fresco son corrosivos, así como los álcalis fuertes, por ejemplo NaOH y las aminas orgánicas muy alcalinas. La corrosión debida a soluciones de jabón se inhibe mediante la adición de unas pocas centésimas por cien de silicato sódico (esto no es efectivo para los álcalis fuertes).

- H₂O y sus sales.
- Agua de mar. Se forman picaduras en las ranuras, en los depósitos y en presencia de iones de metales pesados.
- Agua que contienen iones de metales pesados, por ejemplo, aguas que hayan pasado antes por tuberías de Cu, latón ó de hierro, ó aguas de mina.
- Solventes clorados.
- Alcoholes etílico, propílico o butílico anhidros y a temperaturas elevadas. El agua en cantidad del orden de trazas actúa como inhibidor.

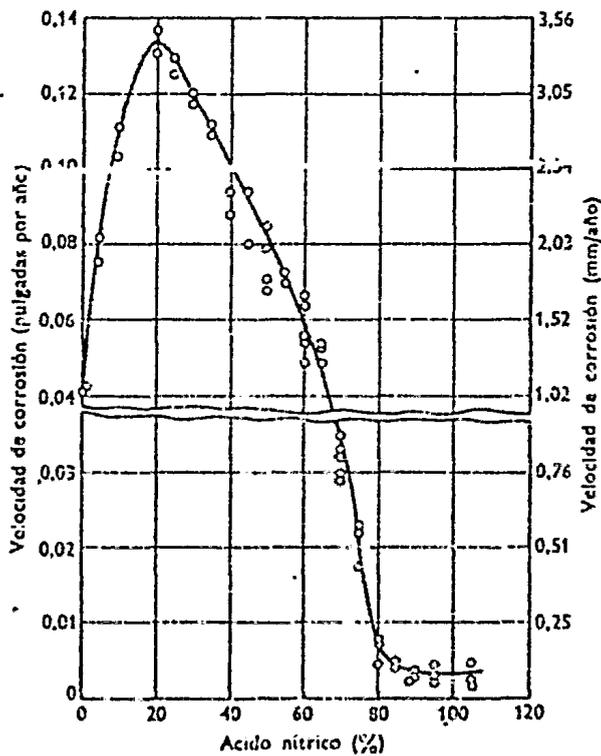


Fig. 18. Velocidades de corrosión de aluminio puro comercial (1100) en ácido nítrico, temperatura ambiente.

C A P I T U L O I V .
EXPERIMENTACION Y EQUIPO

IV. EXPERIMENTACION.

Se empleó la aleación de aluminio 6261, correspondiente a la siguiente composición química típica:

Mg -----	0.7	-	1.0
Si -----	0.4	-	0.7
Cu -----	0.15	-	0.4
Mn -----	0.2	-	0.35
Fe -----	0.4		
Zn -----	0.2		
Ti -----	0.1		

Otros: 0.05 c/u Total: 0.15

Al ----- Resto

y que tiene las siguientes propiedades físicas:

DENSIDAD -----	2.71 gr/cm ³
MODULO DE ELASTICIDAD -----	63000 - 70000 N/mm ²
MODULO DE RIGIDEZ -----	24000 - 26000 N/mm ²
PUNTO DE FUSION -----	570 - 655 ° C
CALOR ESPECIFICO -----	entre 20 - 100 ° C (293 - 373 ° K) C= 0.92 J/gr K
COEFICIENTE LINEAL DE EXPANSION -----	entre 20 - 100 ° C (293 - 373 ° K) $\alpha = 23 \times 10^{-6}/K$
CONDUCTIVIDAD TERMICA -----	a 25 ° C (298 ° K) condición T4 y T6 K= 1.85 w/cm K
RESISTENCIA ESPECIFICA ELECTRICA ---	a 23 ° C (293 ° K) condición T5 R= 0.037 Ω mm ² /m

y las siguientes características:

- 1) Formado posible sin grano grande.
- 2) Buena extrudabilidad (facilidad para la extrusión)

- 3) Buena resistencia a la corrosión.
- 4) Resistencia media mecánica.
- 5) Poca sensibilidad a la presencia de ranuras.
- 6) responde al enfriamiento suave.
- 7) Menos problemas de distorsión.
- 8) Resistencia al anodizado.
- 9) Resistencia a la soldabilidad.
- 10) Resistencia a la formabilidad.

Se usa para la construcción y el transporte y se recibió en donación de Alcan Aluminio, S.A., en forma de barra - de sección circular de 19.05 mm (3/4").

Se cortaron y carearon muestras en un torno mecánico. Posteriormente y tomando como base pruebas anteriores, se escogieron los tratamientos térmicos a realizar, los cuales fueron los siguientes:

- a) Calentamiento a 150 °C
Tiempo de permanencia 24 hrs.
Enfriamiento en medio ambiente.
- b) Calentamiento a 325 °C
Tiempo de permanencia 24 hrs.
Enfriamiento en medio ambiente.

En estos dos tratamientos, las probetas fueron sometidas primeramente a un tratamiento térmico, a una temperatura de 535 °C durante un tiempo de permanencia de 2 hrs., y un enfriamiento en H₂O a 60 °C.

- c) Calentamiento a 600 °C
Tiempo de permanencia 1.5 hrs.
Enfriamiento en H₂O con hielo.
- d) Calentamiento a 535 °C
Tiempo de permanencia 1.5 hrs.
Enfriamiento en H₂O con hielo.

A continuación se procedió a preparar las siguientes soluciones:

ACIDO SULFURICO	(H_2SO_4)	concentración 10% en vol.
ACIDO NITRICO	(HNO_3)	concentración 10% en vol.
ACIDO CLORHIDRICO	(HCl)	concentración 10% en vol.
HIDROXIDO DE AMONIO	(NH_4OH)	concentración 10% en peso.
CLORURO DE SODIO	($NaCl$)	concentración 10% en peso.
CLORURO DE POTASIO	(KCl)	concentración 10% en peso.

Posteriormente se realizó la preparación de muestras para el estudio metalográfico, y la técnica utilizada fué - la comunmente usada. Desbaste grueso con una lija del No.- 120; desbasta fino con lijas de los números 400, 500 y 600; y el púliído final se hizo en una pulidora mecánica utilizada con franela, empleando alúmina de 0.3 y μ . A continua-- ción se realizó el ataque químico utilizando como reactivo-- Hidróxido de Sodio ($NaOH$) al 10% para revelar la microes--- tructura ocasionada por el tratamiento. Se concluyó toman-- do las fotografías correspondientes, las cuales se presen-- tan en el capítulo de resultados.

A continuación, teniendo listas las soluciones y las muestras después del tratamiento térmico, se determino el - peso de cada una de ellas, para después colocarlas dentro de un frasco con la solución correspondiente, colgando con un hilo cañamo para que la pieza flotara en un punto medio del frasco y para que estuviera en contacto total con la so lución. Posteriormente se estuvo determinando el peso dia-- riamente para comprobar la pérdida de peso de cada una con-- respecto al tiempo.

Quiero hacer notar que, se hizo la prueba correspon-- diente con Hidróxido de Sodio y las muestras fueron ataca-- das intensamente, al grado de que a las 48 hrs. fueron con-- sumidas totalmente.

IV.1. EQUIPO UTILIZADO.

- 1) Horno eléctrico.
- 2) Balanza en mg.
- 3) Frasco para soluciones de 250 ml.
- 4) Hilo cáñamo.
- 5) Lijas de diferentes números.
- 6) Pulidora mecánica.
- 7) Microscopio metalográfico con cámara integrada.

C A P I T U L O V

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSION

V. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSION.

Al analizar los datos mostrados en las tablas 7, 8, 9 y 10, y en las gráficas 1, 2, y 3. del efecto del tratamiento térmico sobre la velocidad de corrosión, se puede deducir lo siguiente :

1) De los tratamientos térmicos sin recalentamiento.

En HNO_3 , cualquier tratamiento térmico que se le aplique a la aleación disminuye la resistencia a la corrosión.

En H_2SO_4 , el comportamiento general es aproximadamente el mismo que sin ningún tratamiento, aunque se puede observar una ligera mejoría en el caso del tratamiento a 600°C seguido de un enfriamiento en H_2O con hielo. Se piensa que esto - puede estar asociado a una mejor disolución de los componentes de la aleación durante el tratamiento de solución, aunque sería recomendable hacer más estudios para poder concluir algo al respecto. Aún en el caso del tratamiento a 535°C seguido de un enfriamiento en H_2O con hielo se puede hablar de una ligera mejoría.

Se puede mencionar además que tanto en H_2SO_4 como en HNO_3 es mejor el comportamiento del tratamiento a 600°C que el de 535°C como se nota en las tablas 8 y 9, lo mismo que - en las gráficas 1 y 2.

En HCl , estos tratamientos son nocivos pues la corrosión aumenta de 3 a 4 veces más respecto a las muestras sin -- tratamiento, lo que se puede ver muy claramente en la tabla 7 y gráfica 3.

Por último, de lo relacionado con tratamientos sin recalentamientos, podemos decir que en los demás medios usados- (NH_2OH , NaCl , KCl) se comportan de forma semejante a las --- muestras sin tratamiento, ya que no existe ataque alguno, por

lo que para este tipo de medios no es necesario aplicar tratamiento térmico, lo que puede verse en la tabla 10.

2) De los tratamientos térmicos con recalentamiento.

Podemos decir que en HNO_3 , disminuyó la resistencia a la corrosión de 2 a 3 veces, lo cual puede estar, probablemente relacionado con que no existe una total disolución de componentes.

En H_2SO_4 , no se tiene un efecto marcado con el tratamiento térmico.

En HCl , se observa una importante disminución de la corrosión por un factor de 10, como se puede observar en la tabla 7 y en la gráfica 3.

Aparentemente, la presencia de Mg_2Si y de $\text{Fe}_3\text{SiAl}_{12}$ distribuidos aumenta la resistencia a la corrosión en ácidos que no sean oxidantes. Sin embargo, en estos tipos de ácidos (oxidantes) no se obtiene mejoras importantes.

3) En las pruebas de metalografía se puede observar lo anteriormente dicho, en la fotografía #1 se puede ver que no existen partículas de $\text{Fe}_3\text{SiAl}_{12}$, pero sí existen muy pocas partículas de Mg_2Si . En la fotografía #2 se ve más claramente la distribución de Mg_2Si y $\text{Fe}_3\text{SiAl}_{12}$ lo cual puede ayudar a aumentar la resistencia a la corrosión. En la fotografía #3 se puede ver que no existe una total disolución de estos elementos ya que se presentan en mayor cantidad. En la fotografía #4 también no existe una total disolución de elementos. Por último en la fotografía #5, se puede ver que la aleación tratada a 600°C en un tiempo de 1.5 hrs. y enfriada en H_2O con hielo posee una muy buena disolución de los elementos, lo cual puede ser la causa de una mejoría en la resistencia a la corrosión.

TRATAMIENTO TERMICO

PERDIDA DE PESO
(MICRAS/AÑO)

Tratadas a 535 ° C durante 2 hrs. y temple en H ₂ O a 60 ° C, poste- riormente tratadas a 150 °C duran- te 24 hrs. y templadas en medio - ambiente.	118.83
Tratadas a 535 °C durante 2 hrs.- y temple en H ₂ O a 60 °C. poste- riormente tratadas a 325 °C duran- te 24 hrs. y templadas en medio - ambiente.	130.22
Tratadas a 600 °C durante- 1.5 hrs. y templadas en H ₂ O con - hielo.	5665.22
Tratadas a 535 °C durante 1.5 hrs. y templadas en H ₂ O con hielo.	4430.85
Muestras sin tratamiento.	161.65

Tabla 7. Efecto del tratamiento térmico sobre la velo-
cidad de corrosión de la aleación 6261 en --
ácido clorhídrico (HCl) al 10% de concentra-
ción.

TRATAMIENTO TERMICO

PERDIDA DE PESO
(MICRAS/AÑO)

Tratadas a 535 °C durante 2 hrs. y temple en H ₂ O a 60 °C, poste-- riormente tratadas a 150 °C du-- rante 24 hrs. y templadas en me- dio ambiente.	621.35
Tratadas a 535 °C durante 2 hrs. y temple en H ₂ O a 60 °C, poste-- riormente tratadas a 325 °C du-- rante 24 hrs. y templadas en me- dio ambiente.	702.11
Tratadas a 600 °C durante 1.5 hrs. y templadas en H ₂ O con hielo.	401.23
Tratadas a 535 °C durante 1.5 hrs. y templadas en H ₂ O con hielo.	779.33
Muestras sin tratamiento.	286.91

Tabla 8. Efecto del tratamiento térmico sobre la velo-
cidad de corrosión de la aleación 6261 en --
ácido nítrico (HNO₃) al 10% de concentración.

TRATAMIENTO TERMICO

PERDIDA DE PESO
(MICRAS/AÑO)

Tratadas a 535 °C durante 2 hrs. y temple en H ₂ O a 60 °C poste--- riormente tratadas a 150 °C du-- rante 24 hrs. y templadas en me- dio ambiente.	282.72
Tratadas a 535 °C durante 2 hrs. y temple en H ₂ O a 60 °C, poste-- riormente tratadas a 325 °C du-- rante 24 hrs. v templadas en me- dio ambiente.	337.44
Tratadas a 600 °C durante 1.5 hrs. y templadas en H ₂ O con hielo.	250.14
Tratadas a 535 °C durante 1.5 hrs. y templadas en H ₂ O con hielo.	268.45
Muestras sin tratamiento.	282.34

Tabla 9. Efecto del tratamiento térmico sobre la velo-
cidad de corrosión de la aleación 6261 en --
ácido Sulfúrico (H₂SO₄) al 10% de concentra-
ción.

TRATAMIENTO TERMICO

PERDIDA DE PESO
(MICRAS/AÑO)

Tratamiento a 535 °C durante 2 hrs.
y temple en H₂O a 60 °C, posterior-
mente tratadas a 150 °C durante 24-
hrs. y templadas en medio ambiente.

Tratadas a 535 °C durante 2 hrs.
y temple en H₂O a 60 °C, poste--
riormente tratadas a 325 °C du--
rante 24 hrs. y templadas en me-
dio ambiente.

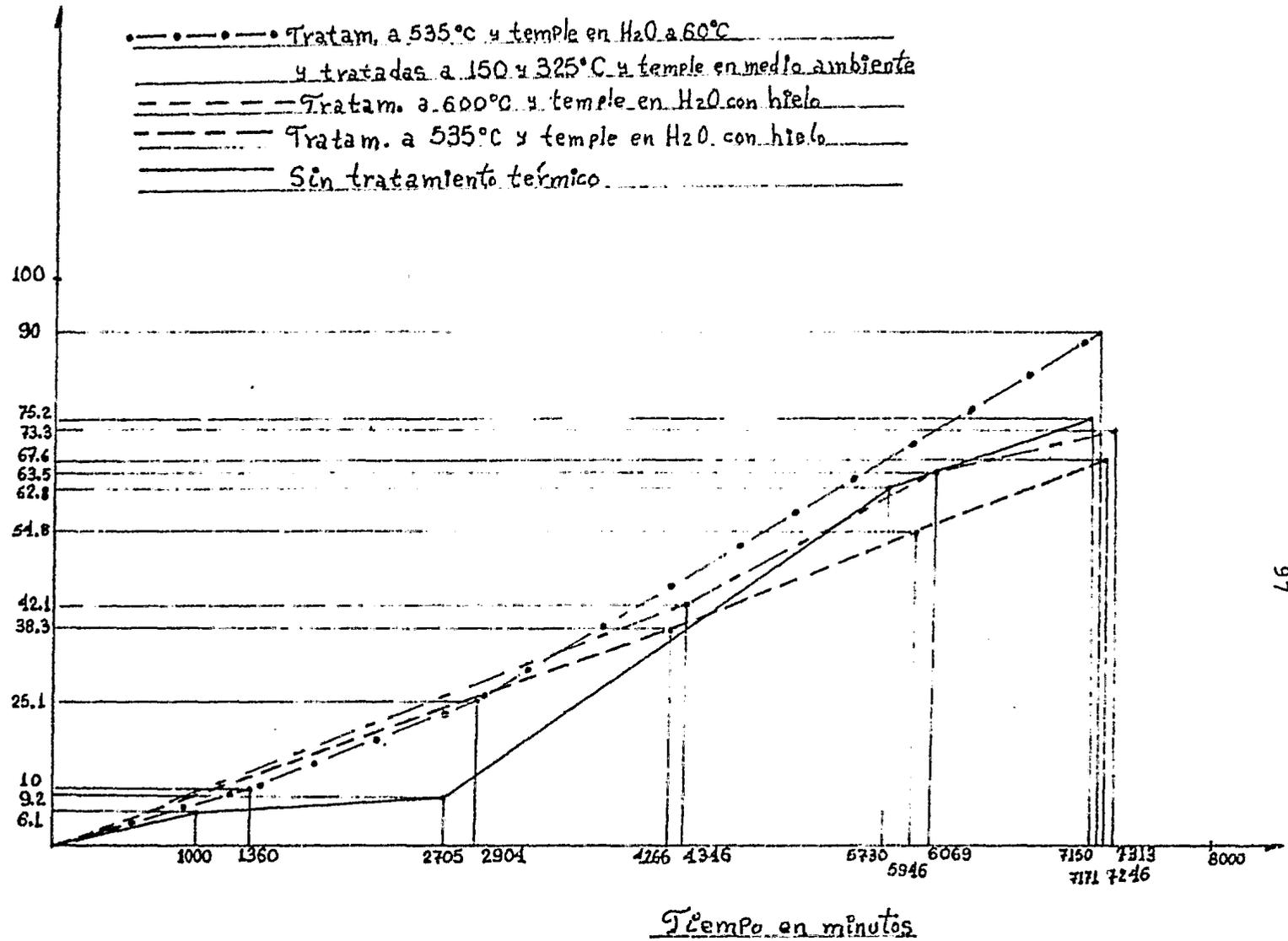
Tratadas a 600 °C durante 1.5 hrs.
y temple en H₂O con hielo.

Tratadas a 535 °C durante 1.5 hrs.
y temple en H₂O con hielo.

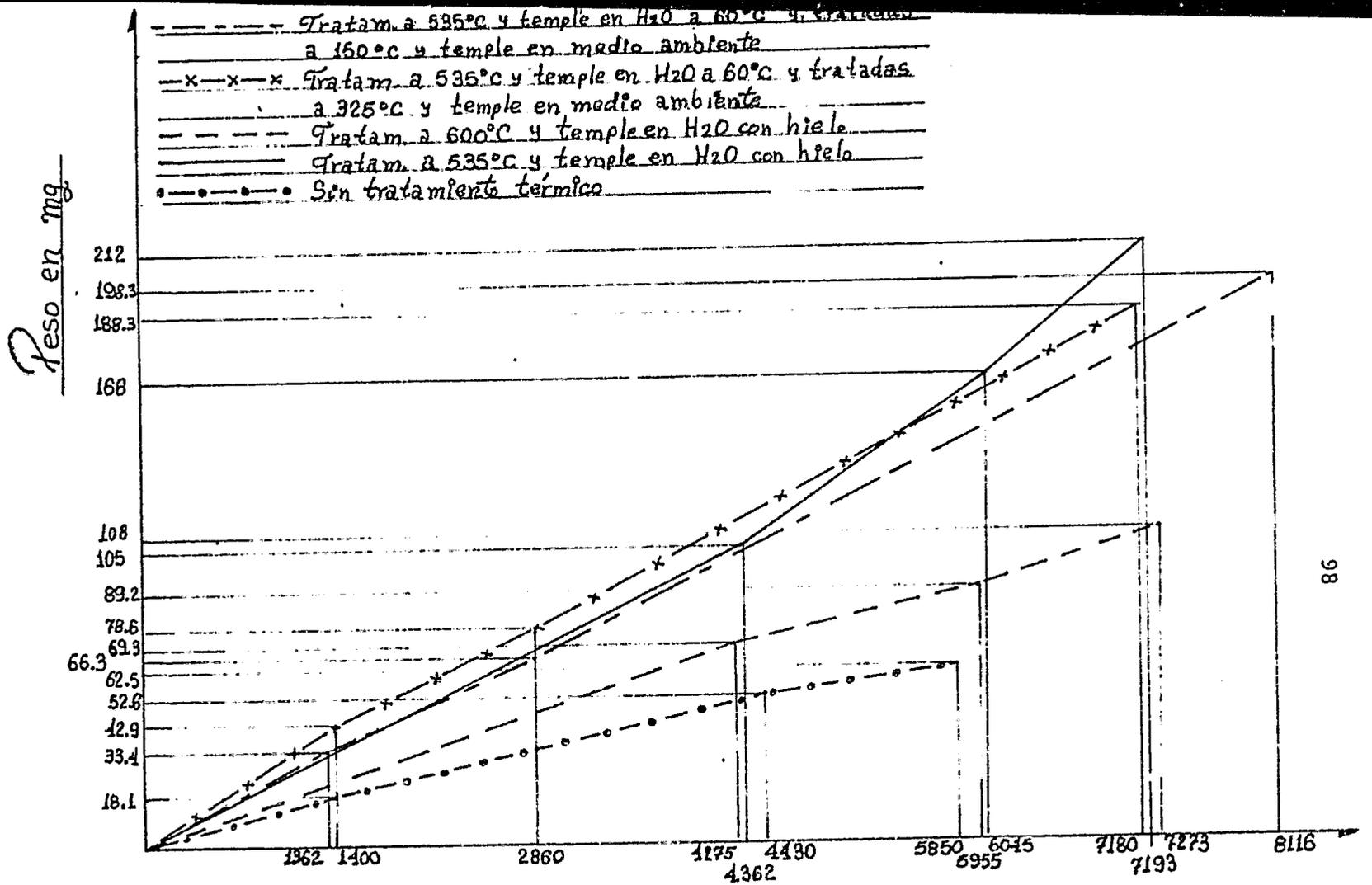
Muestras sin tratamiento.

Tabla 10. El efecto del tratamiento térmico sobre la ve-
locidad de corrosión de la aleación 6261 en -
en hidróxido de amonio (NH₄OH), cloruro de so-
dio (NaCl), y cloruro de potasio (KCl), en la
cual no hubo ninguna intensidad de ataque.

Perdida de Peso en mg



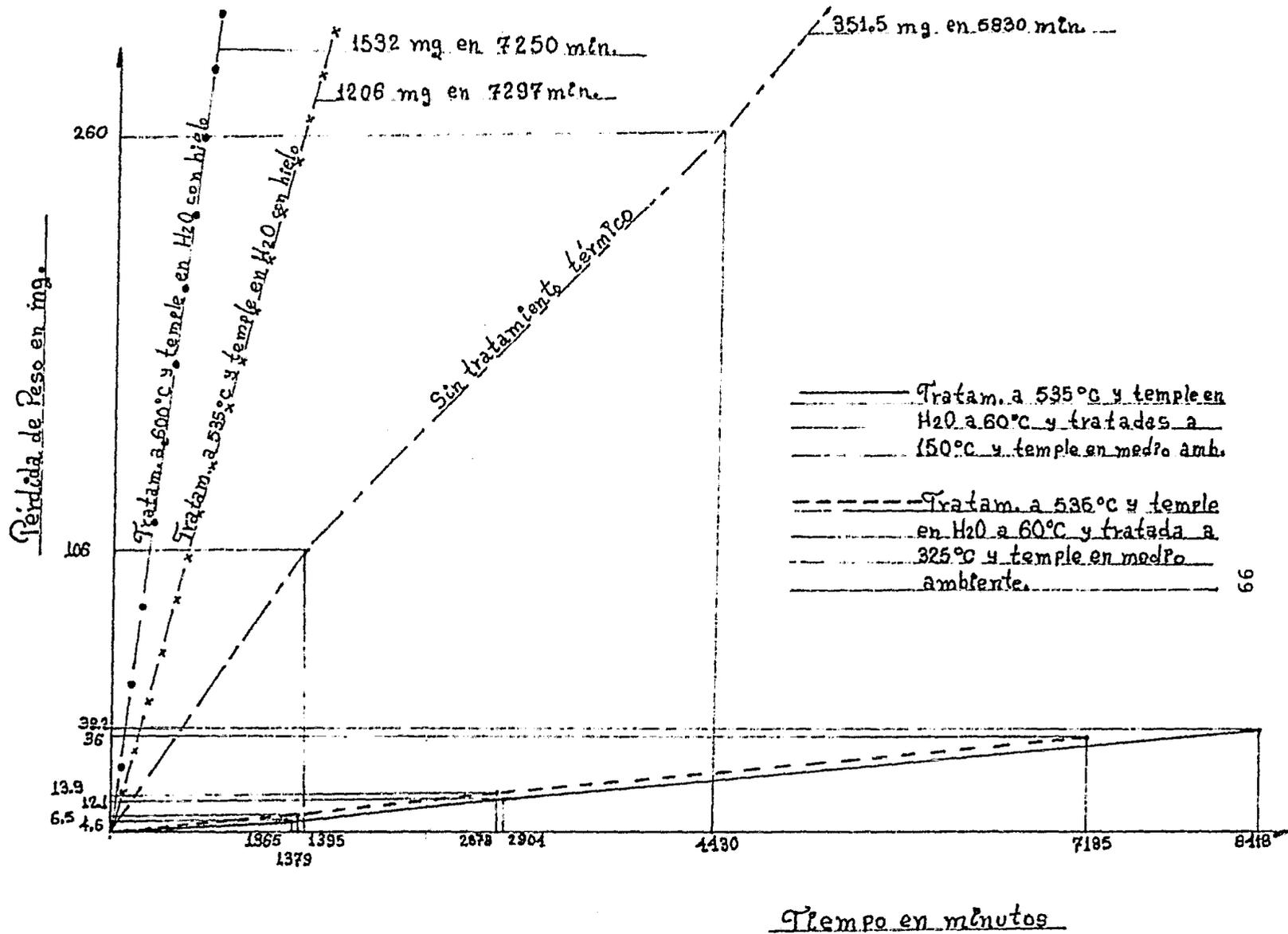
Grafica. 1. Velocidades de corrosión de la aleación 6261 en ácido Sulfúrico (H₂SO₄) al 10%, tratada térmicamente.



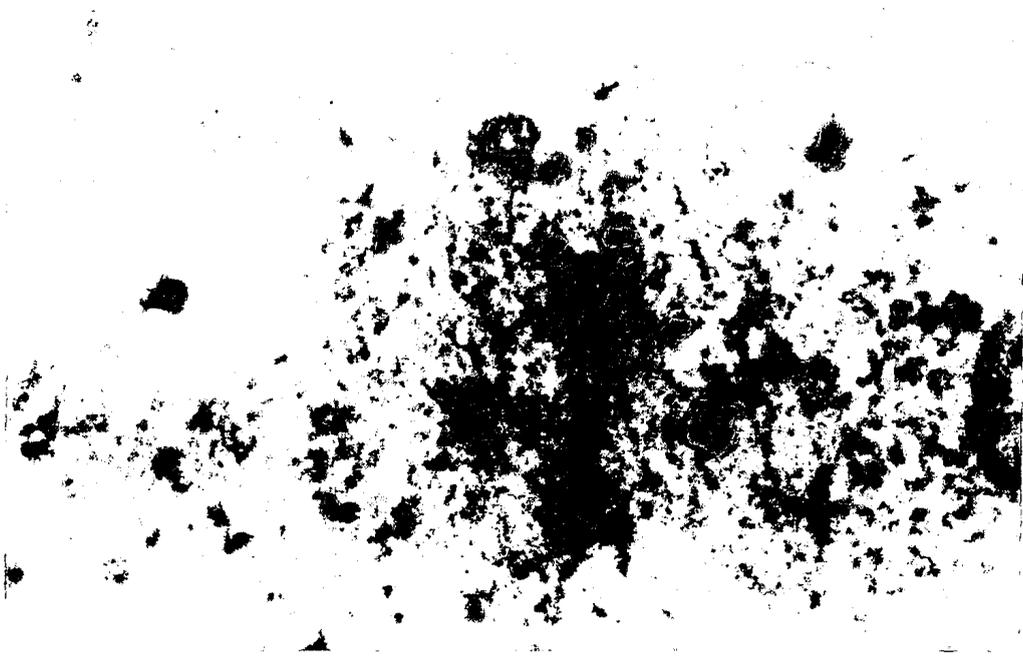
86

Time in minutes

Grafica. 2. Velocidades de corrosión de la aleación 6261 en ácido nítrico (HN⁰3) al 10%, tratada térmicamente.



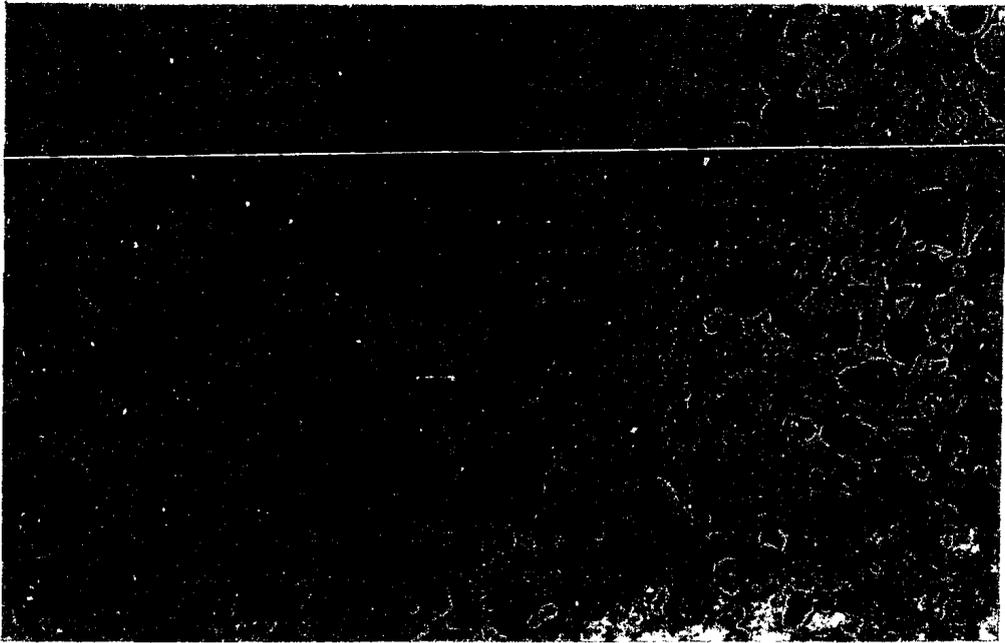
Grafica. 3. Velocidades de corrosión de la aleación 6261 en ácido clorhídrico (HCl) al 10%, tratada térmicamente.



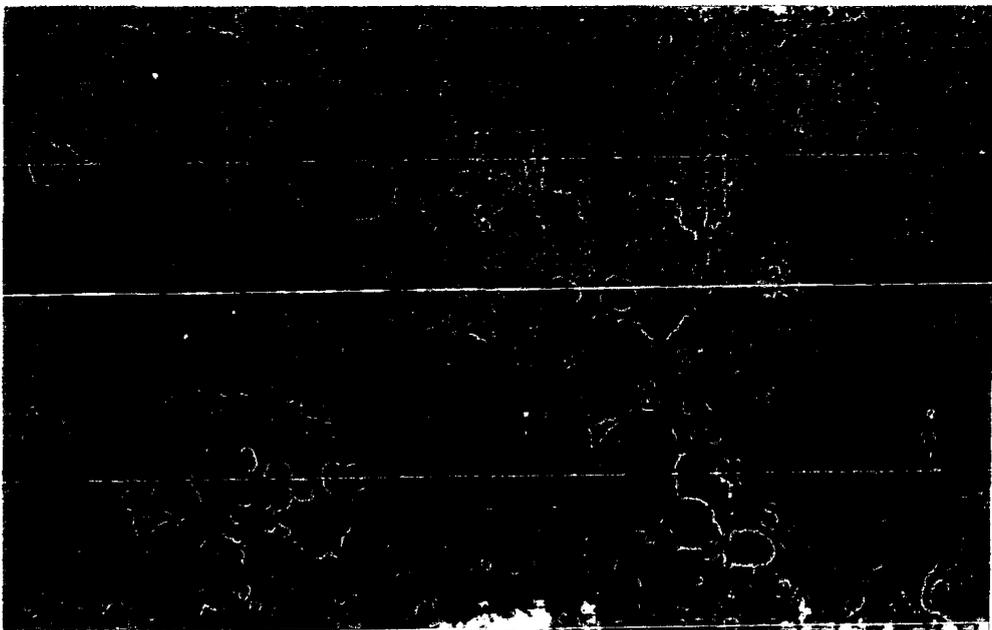
FOTOG. 1. Aleación 6261, se puede observar la estructura de la aleación sin tratamiento térmico (800 aumentos).



FOTOG. 2. Aleación 6261, tratada a 535°C durante 2 hrs. y templada en H₂O a 60°C, y posteriormente, tratada a -150°C durante 24 hrs. y templada en medio ambiente, donde se puede ver una pequeña disolución de los elementos Fe₂SiAl₁₂ y Mg₂Si. (800 aumentos).



FOTOG. 3. Aleación 6261, tratada a 535 °C durante 2 hrs. y templada en H₂O a 60 °C, y posteriormente, tratada a 325 °C durante 24 hrs y templada en medio ambiente. Se puede observar que no existe una buena disolución de los elementos como en la foto 2- (800 aumentos).



FOTOG. 4. Aleación 6261, tratada a 535 °C durante 1.5 hrs. y templada en H₂O con hielo, donde se puede observar que no existe una disolución completa de los elementos (800 aumentos).



FOTOG. 5. Aleación 6261, tratada a 600°C durante 1.5 hrs. y templada en H₂O con hielo. Se puede observar que existe una muy buena disolución de los elementos. en comparación con los otros tratamientos es donde mejor se puede ver la disolución de los elementos, y lo cual puede ayudar a la resistencia a la corrosión - (800 aumentos).

C A P I T U L O V I

CONCLUSIONES

VI. CONCLUSIONES.

En resumen se puede concluir lo siguiente:

1) El resultado más interesante del trabajo realizado está relacionado con el importante aumento que se obtiene en la resistencia a la corrosión de esta aleación luego del tratamiento que consiste en, un calentamiento a 535 °C durante 2 hrs. y temple en H₂O a 60 °C y seguido de otro calentamiento a 150 °C durante 24 hrs., cuando se somete a la acción de HCl (concentración 10%), lo cual parece asociado a la presencia de partículas de Fe₃SiAl₁₂ y Mg₂Si - adecuadamente distribuidos.

2) En general en las bases y sales probadas, no se justificaría realizar los procesos de tratamientos térmicos, si se busca mejorar la resistencia a la corrosión.

3) Por lo que se refiere a los ácidos oxidantes, - aunque se detectó poco efecto del tratamiento térmico, conviene investigar en otros estudios posteriores el uso de algún tratamiento y temple en lo que se refiere al H₂SO₄. - Se puede en principio no aconsejar esta clase de tratamientos si la aleación se va a emplear en HNO₃.

4) Por último se sugiere profundizar los estudios - empleando otras concentraciones del medio corrosivo para el mismo tratamiento. en particular en lo que se refiere - al HCl.

C A P I T U L O V I I

BIBLIOGRAFIA

VII. BIBLIOGRAFIA.

1. Introducción a la Metalurgia Física.
Sidney H. Avner.
ed. Mc. Graw-Hill (1966)
Pag. 380-390.
2. Materiales para Ingeniería.
L.H. Van Vlack
ed. C.E.C.S.A. (1981)
Pag. 359-364.
3. Solidificación y tratamiento térmico
en aleaciones de aluminio.
E.E. Stonebrook
Revista colocada. Vol. 12. núm. 6,7,8. (1979)
Pag. 140-144 y 173-176.
4. Heat treatment of metals.
Dovey Gadd and Mitchell Owen.
ed. Addison-Wesley P.C.T. (1963)
Pag. 77-82
5. Corrosión y control de corrosión.
Herbert H. Uhlig.
ed. U.R.M.O.S.A. (1979)
Pag. 317-328
6. Corrosión y protección.
Fritz Tödt.
ed. Aguilar (1959)
Pag. 390-419.
7. Corrosión Engineering, 2a. ed.
M.G. Fontana and Norber D. Greene.
ed. Mc. Graw-Hill.
Pag. 151-155.

8. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial.

- a) Norma Oficial Mexicana NOM-W-54-1980
 - b) Norma Oficial Mexicana NOM-W-57-1977
 - c) Norma Oficial Mexicana DGN-W-39-1977
- México, 1977.