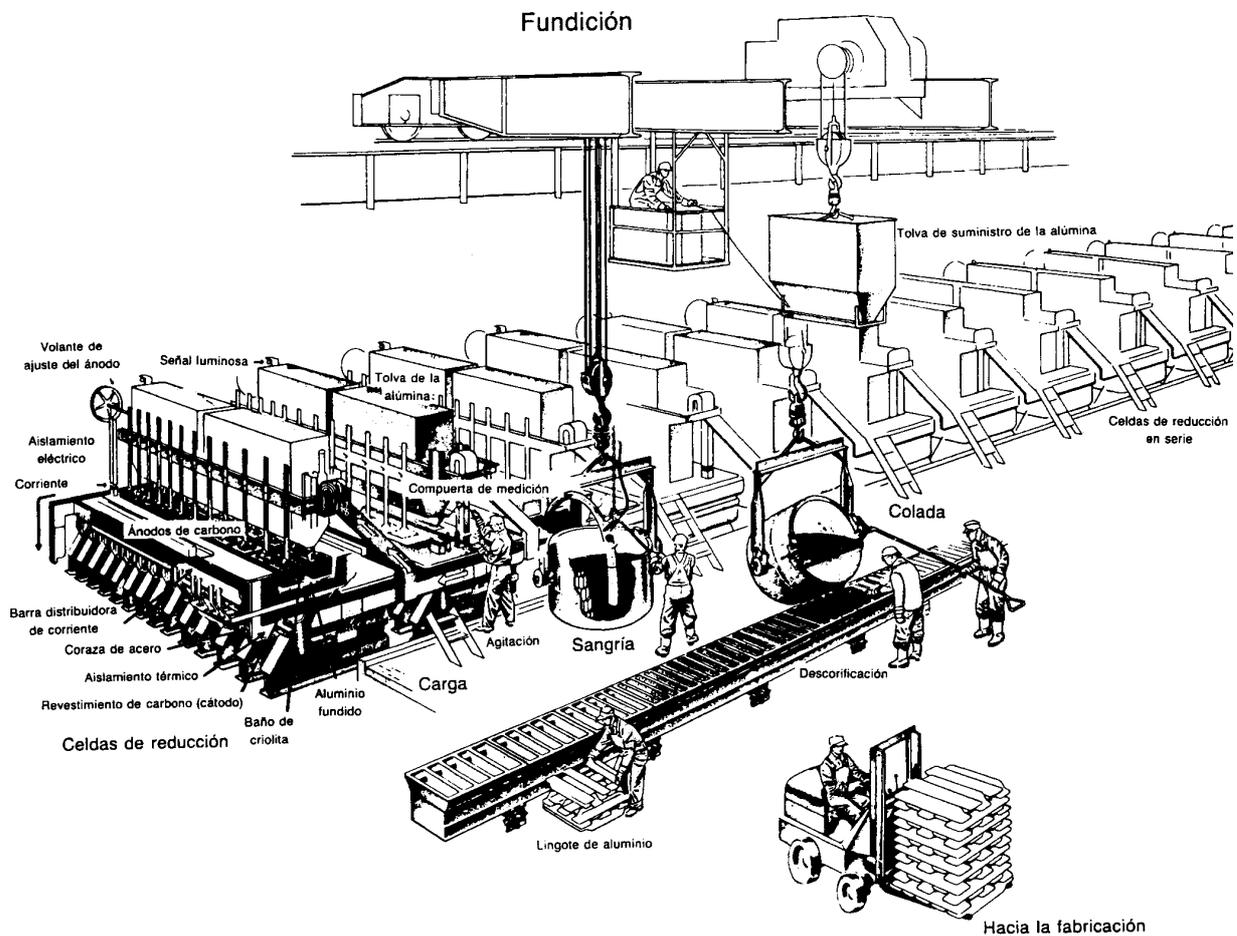


# EL ALUMINIO ASPECTOS GENERALES



## El Aluminio y su desarrollo actual

Aluminio, es el elemento metálico más abundante en la corteza terrestre. Es un metal muy electropositivo y muy reactivo. Al contacto con el aire se cubre rápidamente con una capa dura y transparente de óxido de aluminio que resiste la posterior acción corrosiva. Por esta razón, los materiales hechos de aluminio no se oxidan.

El aluminio posee muy baja densidad ( $2,72 \text{ gr/cm}^3$ ), baja temperatura de fusión ( $658^\circ \text{C}$ ) y alta conductibilidad eléctrica y térmica. La conductibilidad eléctrica del aluminio puro es de  $34 \sim 10^4 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$

El aluminio tiene una red cristalina cúbica de caras centradas (fcc) con un parámetro de red  $a = 4,0413 \text{ \AA}$ . El aluminio deformado y recocido tiene una alta plasticidad ( $\delta = 35\text{-}40\%$ ), baja resistencia mecánica [ $\sigma = 8\text{-}10 \text{ kgf/mm}^2$ ] y una dureza de 25 HB.

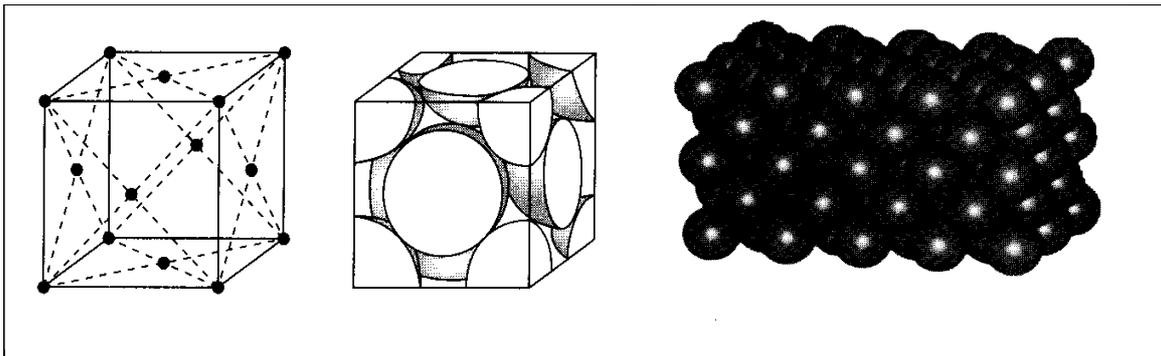


Figura 1.- Esquema representativo de una celda unitaria cúbica centrada en la caras (fcc), donde se muestra el lugar esperado para la ubicación de los átomos y como al repetirse esta estructura cristalina se consolida un ordenamiento altamente compacto. Este ordenamiento favorece la plasticidad de los materiales.

Las impurezas fundamentales en el aluminio son el hierro y el silicio. Estos aumentan la dureza del aluminio, pero disminuyen a la vez la plasticidad y resistencia a la corrosión. El aluminio puro se lamina fácilmente hasta hojas muy delgadas, se puede estampar y prensar. La resistencia y dureza del aluminio se puede elevar por deformación en frío.

El aluminio puro es resistente a la corrosión, lo que se explica por la formación en su superficie de una película compacta y pasivante de óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Cuanto más puro es el aluminio, tanto más alta es su resistencia a la corrosión y mayor la conductividad eléctrica

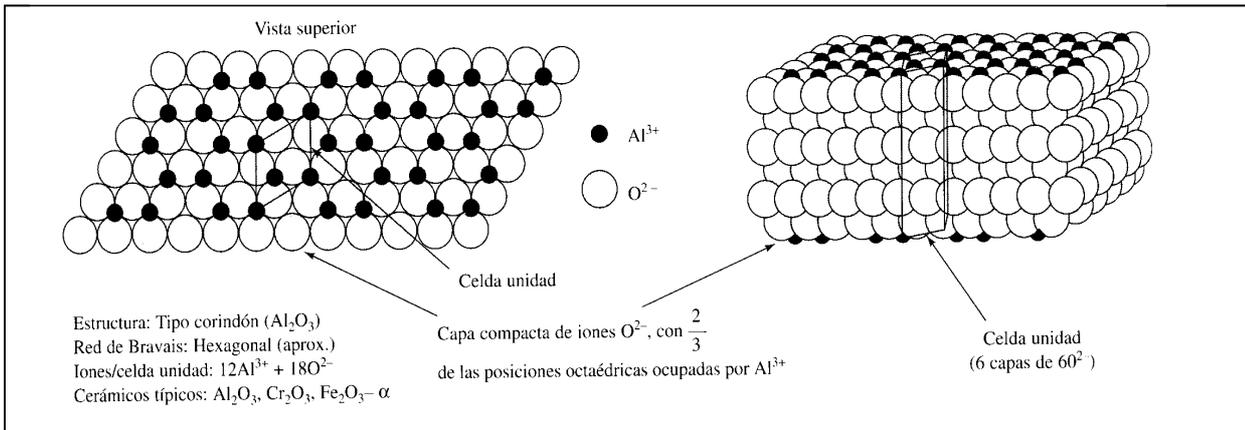


Figura 2. Celda unitaria del corindón ( $Al_2O_3$ ). Se muestra el apilamiento de capas compactas donde los iones  $Al^{+3}$ , rellenan las 2/3 partes de los intersticios (huecos) octaédricos existentes entre capas adyacentes, formadas por los apilamientos de iones  $O^{-2}$ . El resultado de este ordenamiento es un material de muy alta dureza, gran estabilidad química y muy baja permeabilidad

Las aleaciones de aluminio son igualmente bien conocidas por su baja densidad y resistencia a la corrosión. También su conductividad eléctrica, facilidad de fabricación y apariencia son características atractivas. Debido a esto la producción mundial de aluminio prácticamente se dobló entre 1960 y 1970. Durante la década de 1980 y la de 1990 la demanda de aluminio y otros metales ha disminuido debido a la creciente

## Fabricación de Aluminio

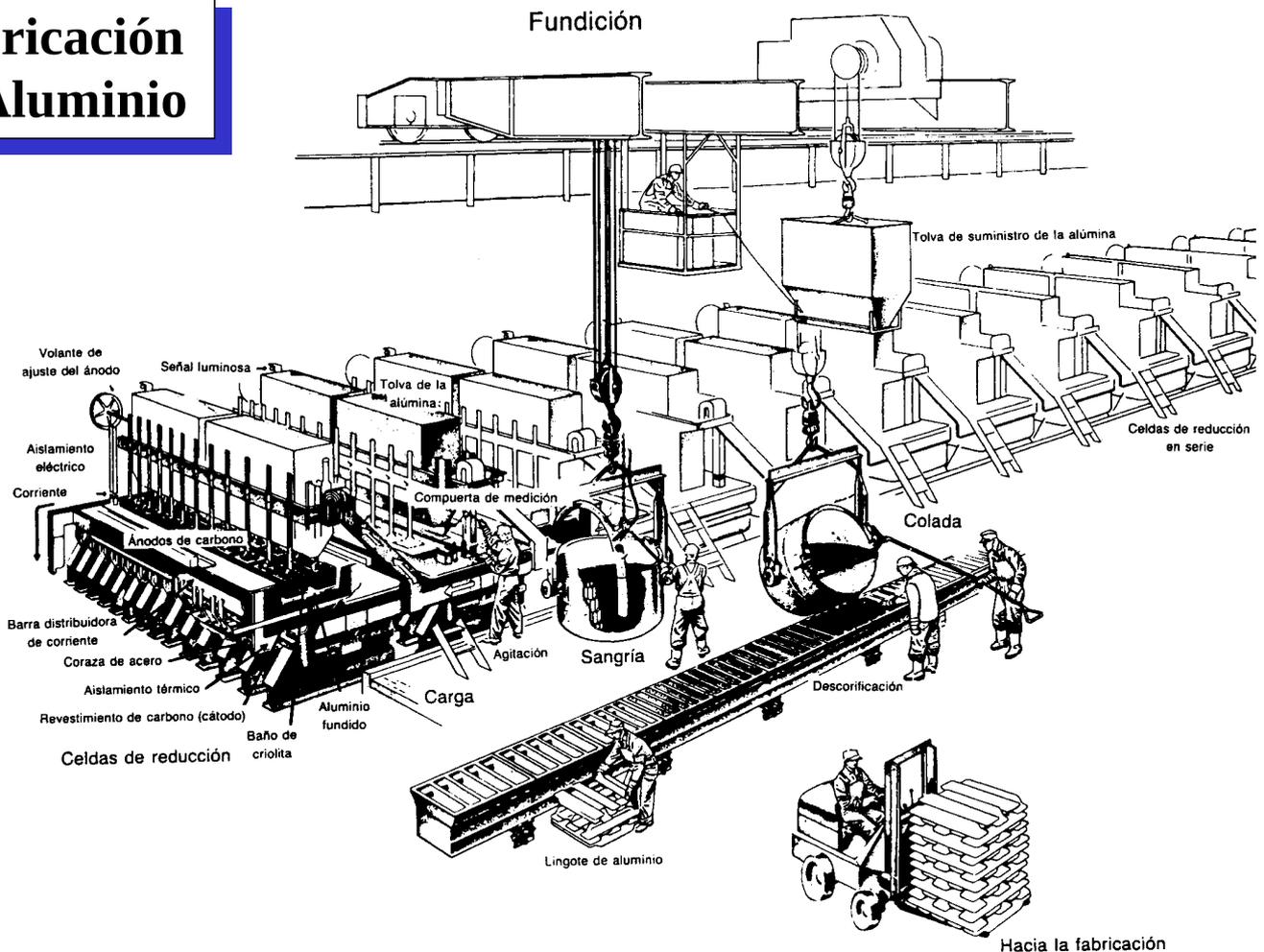


Figura 3. Esquema de una planta procesadora de Aluminio

### **HISTORIA DEL DESARROLLO TECNOLÓGICO**

**En 1825:** El químico danés Hans Christian Oersted aisló el aluminio por primera vez, por medio de un proceso químico que utilizaba una amalgama de potasio y cloruro de aluminio.

**Entre 1827 y 1845:** El químico alemán Friedrich Wöhler mejoró el proceso de Oersted utilizando potasio metálico y cloruro de aluminio. Wöhler fue el primero en medir la densidad del aluminio y demostrar su ligereza. En 1854, Henri Sainte-Claire Deville obtuvo el metal en Francia reduciendo cloruro de aluminio con sodio. Con el apoyo financiero de Napoleón III, Deville estableció una planta experimental a gran escala, y en la exposición de París de 1855 exhibió el aluminio puro.

**En 1886**, Charles Martin Hall en Estados Unidos y Paul L. T. Héroult en Francia descubrieron por separado y casi simultáneamente que el óxido de aluminio o alúmina se disuelve en criolita fundida ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ), pudiendo ser descompuesta electrolíticamente para obtener el metal fundido en bruto. El proceso Hall-Héroult sigue siendo el método principal para la producción comercial de aluminio, aunque se están estudiando nuevos métodos. La pureza del producto se ha incrementado hasta un 99,5% de aluminio puro en un lingote comercialmente puro; más tarde puede ser refinado hasta un 99,99 por ciento.

## **BREVE RESUMEN DEL PROCESO DE OBTENCION DEL ALUMINIO**

El mineral del cual se puede obtener aluminio comercial se llama BAUXITA, la cual regularmente puede ser encontrada en minas de depósito abierto. La Bauxita se tritura y con agua a presión se lava para eliminar otros materiales y sustancias orgánicas. Posteriormente mediante el PROCESO BAYER, el material se refina para obtener a la alúmina, la cual mediante un proceso electrolítico en celdas HALL- HEROULT es descompuesta para obtener aluminio fundido. Dos de tres toneladas de bauxita son requeridas para producir una tonelada de alúmina.

### **Proceso Bayer**

La bauxita después de haber sido pulverizada y obtenida de los procesos de espumado se carga a un digestor el que contienen una solución de sosa cáustica bajo presión y a alta temperatura. Producto del digestor se forma aluminato de sodio que es soluble en el licor generado. Los sólidos insolubles como hierro, silicio, titanio y otras impurezas son filtrados y el licor con la alúmina se bombea a depósitos llamados precipitadores .

En los precipitadores se agregan uno cristales finos de hidróxido de aluminio, estos cristales se hacen circular por entre el licor concentrado para que sirvan de simientes, van creciendo en dimensiones a medida que el hidróxido de aluminio se separa del licor. El hidróxido de aluminio que se adhirió a los cristales se calcina en hornos que operan por arriba de los  $900^{\circ}\text{C}$ . Esto convierte a la alúmina en un producto de alta calidad para la fusión y obtención de aluminio de buena calidad.

La alúmina producto de los hornos de calcinado es procesada en celdas electrolíticas llamadas celdas reductoras. En estas celdas se obtiene el aluminio metálico. El aluminio obtenido de las celdas reductoras es moldeado y procesado en hornos de concentración para la obtención de aluminio de alta calidad.

Para la producción de cada kilogramo de aluminio se requiere 2 kg de alúmina, los que son producto de 4 kg de bauxita y 8 kwh de electricidad. . En el siguiente esquema (figura 4) se visualiza el proceso y sus etapas

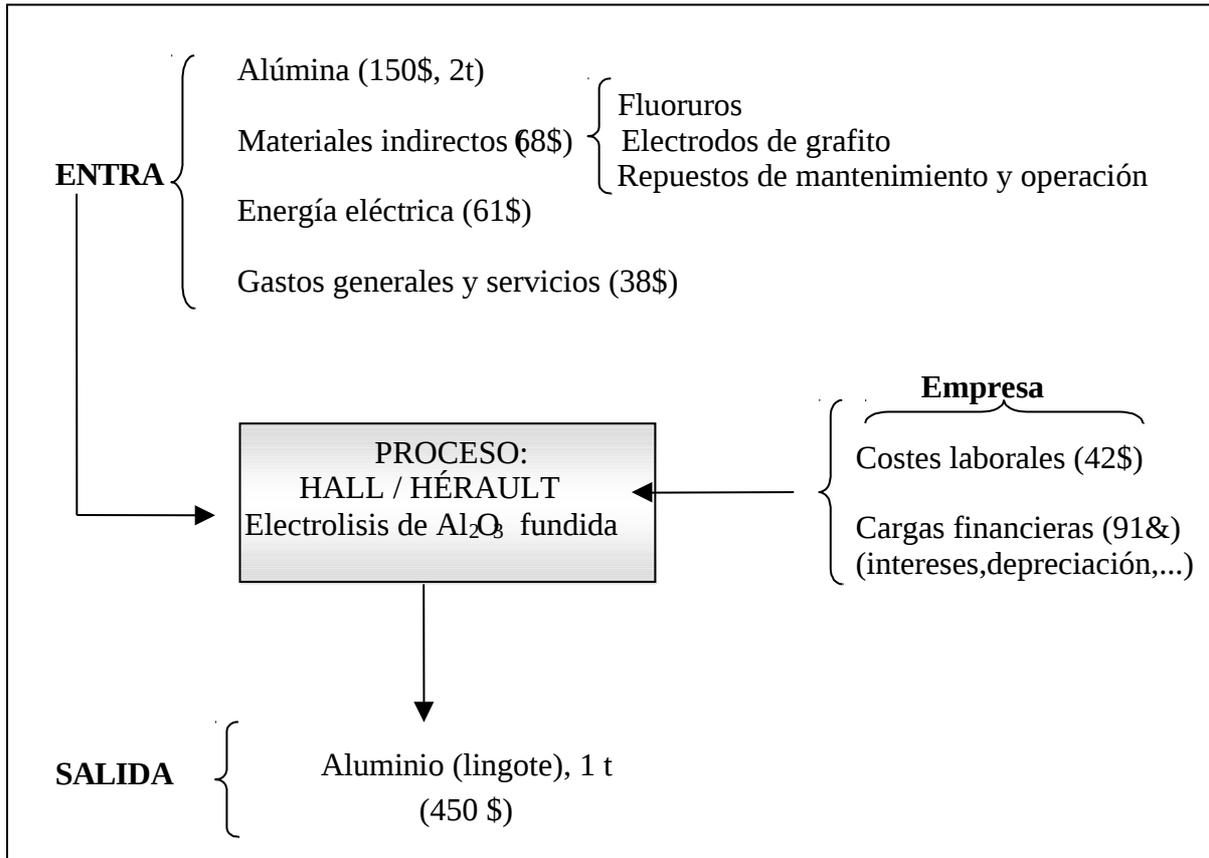


Figura 4: Esquema de producción y costos

**Aluminio.**

La base de todas las plantas fundidoras de aluminio primario es el proceso Hall-Héroult, inventado en 1886. La alúmina se disuelve mediante un baño electrolítico de criolita fundida (fluoruro aluminico sódico) en un recipiente de hierro revestido de carbón o grafito conocido como "celda". Una corriente eléctrica se pasa por el electrolito a un bajo voltaje pero con una corriente muy alta generalmente 150,000 amps. La corriente eléctrica fluye entre el ánodo (positivo) de carbono hecho del coque de petróleo y brea, y un cátodo (negativo) formado por un recubrimiento de carbón grueso o grafito del crisol.

El aluminio fundido es depositado en el fondo de la celda , de donde es trasegado hasta hornos de retención donde se produce una aleación especificada. La mayoría de los hornos produce aluminio del 99.7% de pureza que es aceptable para la mayoría de las aplicaciones. Sin embargo, el aluminio muy puro de 99.99% es utilizado para aplicaciones especiales, generalmente aquellas dónde la alta ductilidad y conductividad es requerida. El margen de diferencia en pureza del aluminio da cambios significantes en las propiedades del metal.

Para modificar las propiedades del aluminio en función de las necesidades industriales y de servicio, se añaden elementos aleantes y se conforman así las aleaciones de aluminio. El grado de modificación del aluminio dependerá del elemento aleante y del porcentaje en peso que de estos elementos de adición, se incorporen. Si los % atómicos son bajos inicialmente tiende a formarse “soluciones sólidas” que dependiendo del radio atómico de los elementos aleantes, con el del aluminio y de otros factores químico podrán ser sustitucionales o intersticiales. Las Soluciones sólidas tienen propiedades físicas, mecánicas y metalúrgicas parecidas a las del Aluminio, sin embargo tienden a ser mas duras y menos conductoras. Metalográficamente seguirán siendo aleaciones monofásicas

Al superarse el límite de solubilidad de los elementos aleantes (solutos) en el aluminio (solvente), se formaran una o más fases (aleaciones bifásicas o multifásicas) y las propiedades físicas, mecánicas y metalúrgicas tienden a modificarse en mucho mayor medida (ver figuras 5 y 6)

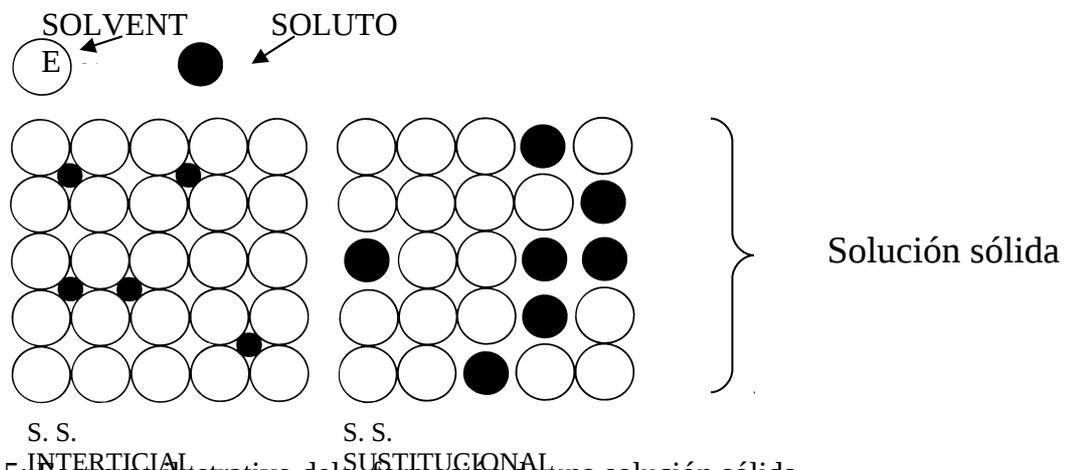
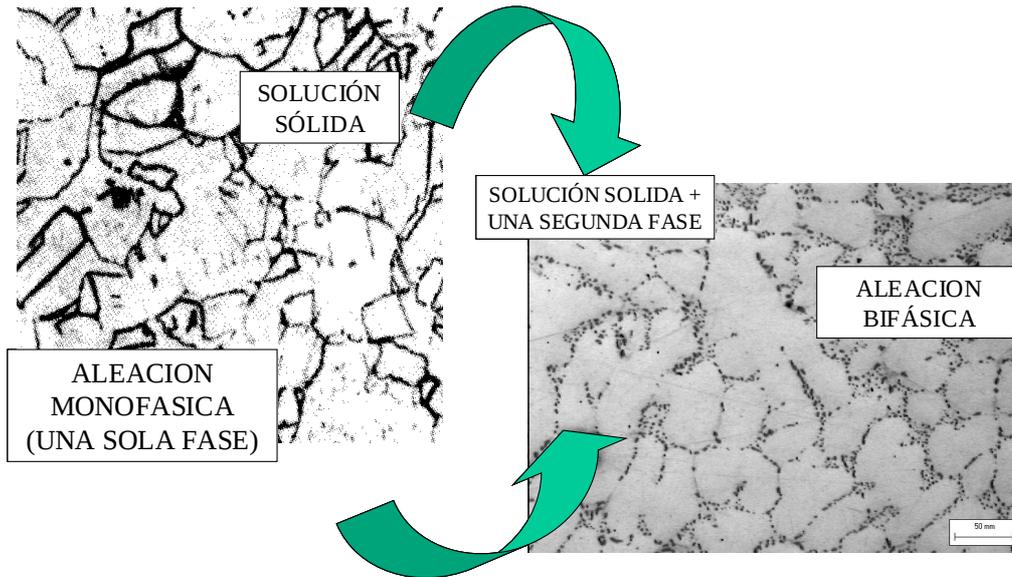


Figura 5: Esquema ilustrativo de la formación de una solución sólida



Las propiedades de la aleación tienden a cambiar drásticamente con la aparición de segundas fases. Estas pueden estar aisladas de la fase inicial o formando un constituyente donde ambas fases guardan cierto orden

Figura 6: Variación morfológica de una aleación monofásica a bifásica

Dependiendo de los niveles de aleación y de la muy factible incorporación de impurezas al aluminio, que provienen del proceso de fabricación (Exógenas) o que se forman en la aleación por reacciones químicas o fisicoquímicas (Endógenas) se pueden encontrar en las aleaciones de aluminio múltiples fases que favorecen o desfavorecen su uso final. A continuación mostramos una tabla con algunas de las impurezas que se presentan en las aleaciones del aluminio, las cuales están asociadas al proceso de fabricación:

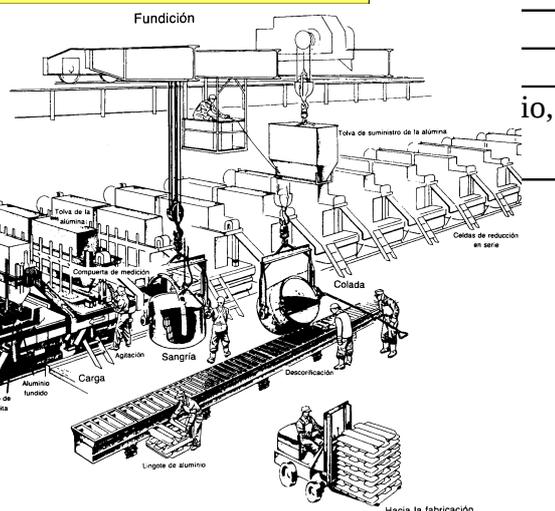
Tipo de Inclusión	Ejemplos
Óxidos	$\gamma$ - $Al_2O_3$ , $\alpha$ - $Al_2O_3$ , $MgO$ , $MgAl_2O_4$ , $CaO$ $SiO_2$
Carburos	<b>PRINCIPALES FUENTES DE IMPUREZAS EN EL ALUMINIO</b>
Cloruros	
Boruros	
Otros	

Originadas o provenientes de la celda

Originadas o provenientes del trasegado

Originadas o provenientes de la fundición

Originadas o provenientes de la colada



Originadas de los procesos de solidificación, refusión y/o tratamiento térmico o termomecánico

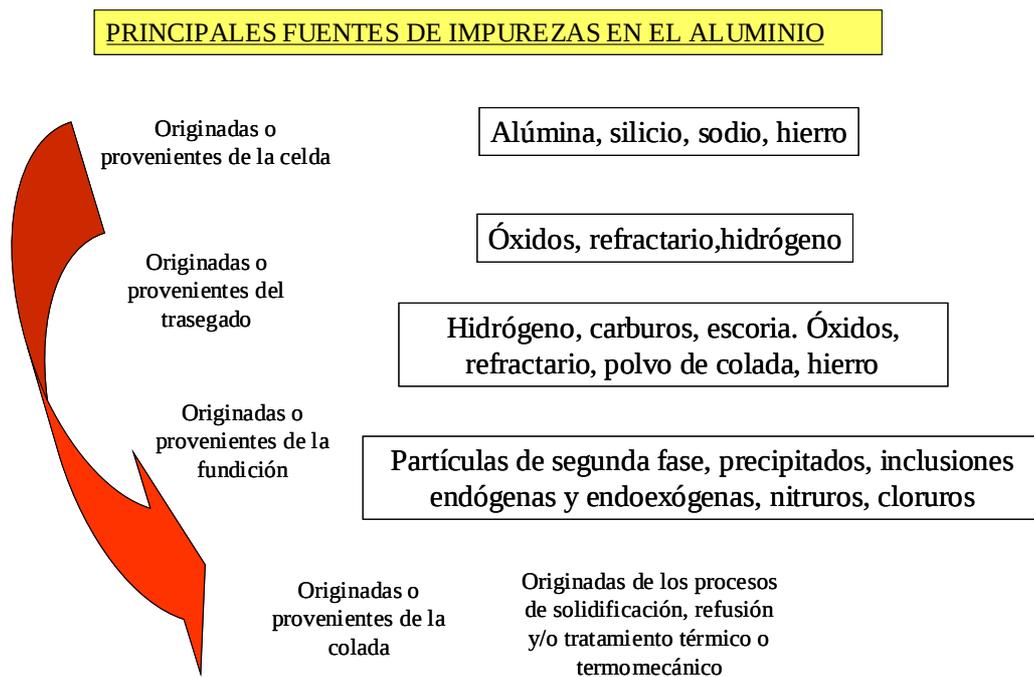


Figura 7.: Impurezas en el aluminio y sus aleaciones.

En la figura 8 se representa en unos histogramas las variaciones obtenidas al analizar en una aleación de aluminio, el nivel de inclusiones.

Se puede apreciar como existe una relación directa entre el nivel y el tipo de inclusiones con el proceso de fabricación. Igualmente nos reflejan estos resultados la importancia de los procesos de desgasificación y de filtrado que forman normalmente parte de los procesos tecnológicos de la fabricación del aluminio, ya que estas etapas del proceso favorecen la disminución drástica de las impurezas en el aluminio y sus aleaciones

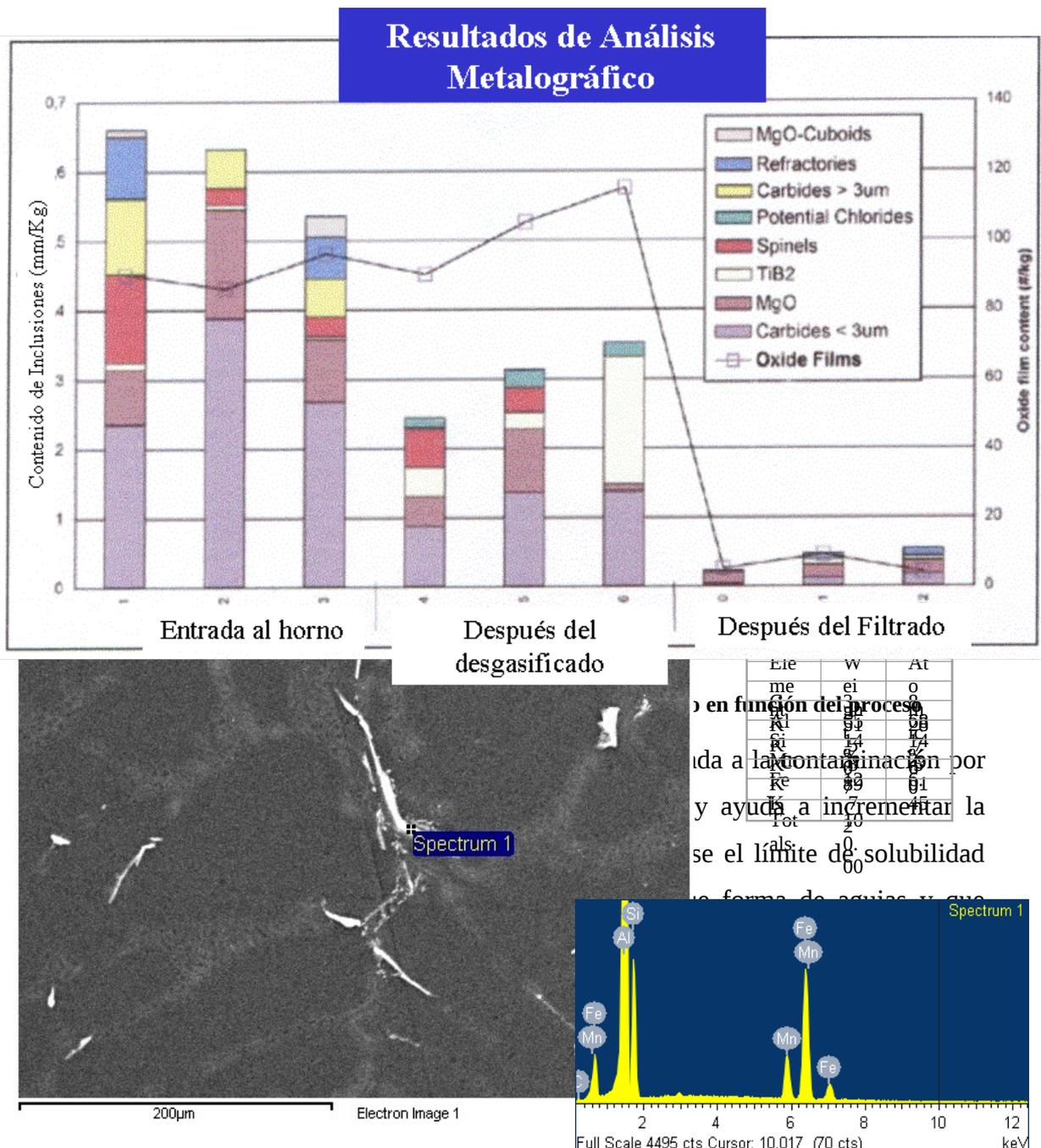


Figura 9: Se muestra una fotomicrografía tomada con un Microscopio electrónico de Barrido, donde se visualiza en una matriz de una solución de Aluminio, agujas de un compuesto de hierro. Con EDX se realizaron análisis químico del compuesto. En el material se observa una inclusión gaseosa

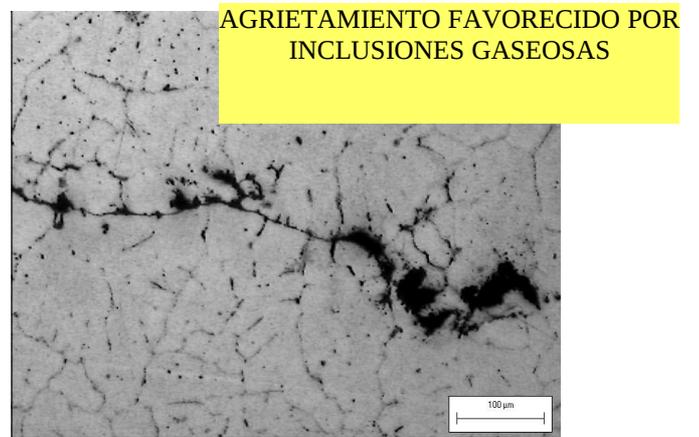
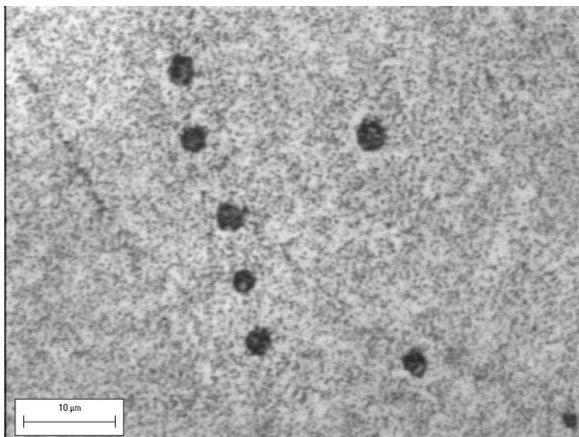


Figura 10: muestra una aleación 1350 que presenta un alto nivel de poros de hidrógeno, y como estos favorecen el agrietamiento del material. Fotomicrografías a 1000X (izq) y a 100 X (der) tomadas con un microscopio óptico.

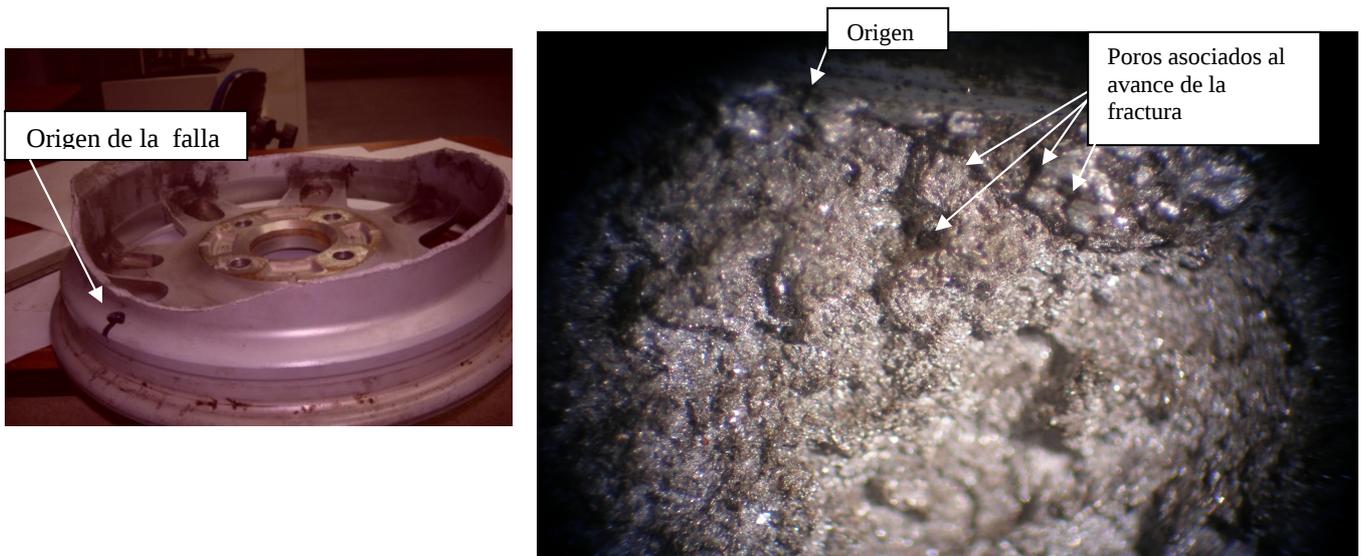
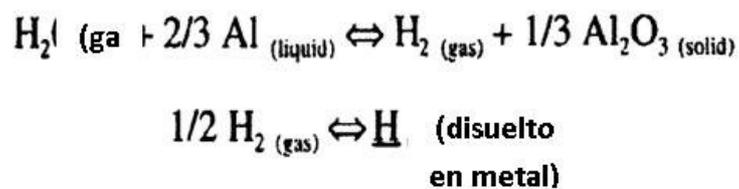


Figura 10: Se muestra como la presencia de defectos puede provocar su fractura y falla. En la figura de la izquierda se muestra la pieza fallada y en la derecha una foto tomada con lupa estereoscópica en el sitio donde se origina la fractura

Para disminuir el nivel de hidrógeno en el baño se hace necesario controlar la atmósfera del horno de fusión y de homogenización, así como la carga del horno y los procesos de combustión para disminuir la presencia de gases que como el vapor de agua favorecen aportes de hidrógeno al aluminio fundido.



El control de las temperaturas es fundamental en el proceso ya que a mayor temperatura se favorece la solubilidad del hidrógeno en el aluminio. Tecnológicamente a nivel industrial se utilizan sistemas que favorecen el desgasificado del aluminio fundido (proceso MINT, Proceso ACD. Estos equipos propician el arrastre en el metal fundido de las burbujas de gas atrapadas, para ello insuflan gases, tales como Nitrógeno y Argón que combinados con porcentajes de cloro (gas) disminuyen drásticamente el nivel de inclusiones gaseosas. Igualmente se utilizan sistemas de filtrado que permiten separar de las aleaciones de aluminio inclusiones sólidas

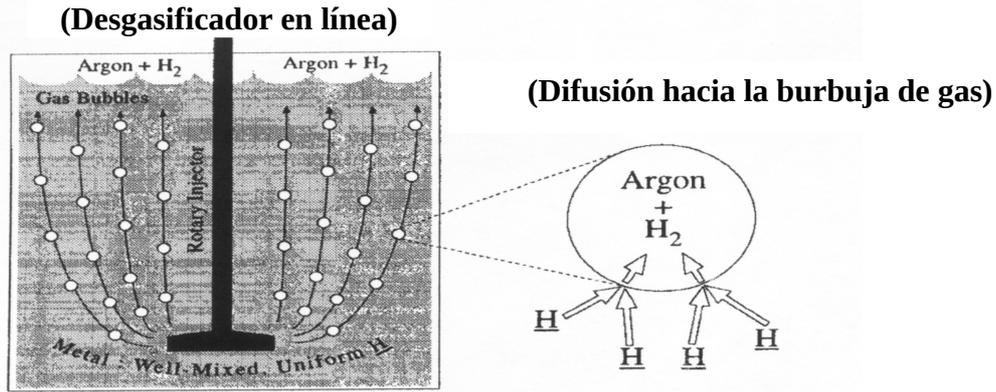


Figura 11: Esquema que muestra como se produce la desgasificación del H

**PRODUCCION:**

La producción mundial de aluminio ha experimentado un rápido crecimiento, aunque se estabilizó a partir de 1980. En 1900 esta producción era de 7.300 toneladas, en 1938 de 598.000 toneladas y en 1994 la producción de aluminio primario fue de unos 19 millones de toneladas. Los principales países productores son Estados Unidos, Rusia, Canadá, China y Australia.. La más reciente investigación de mercado concluye que para el año 2015 la demanda mundial del aluminio primario crecerá en 2,6 % anual estimándose el incremento de la producción de aluminio primario en 9,8 millones de toneladas (ver figura 12)

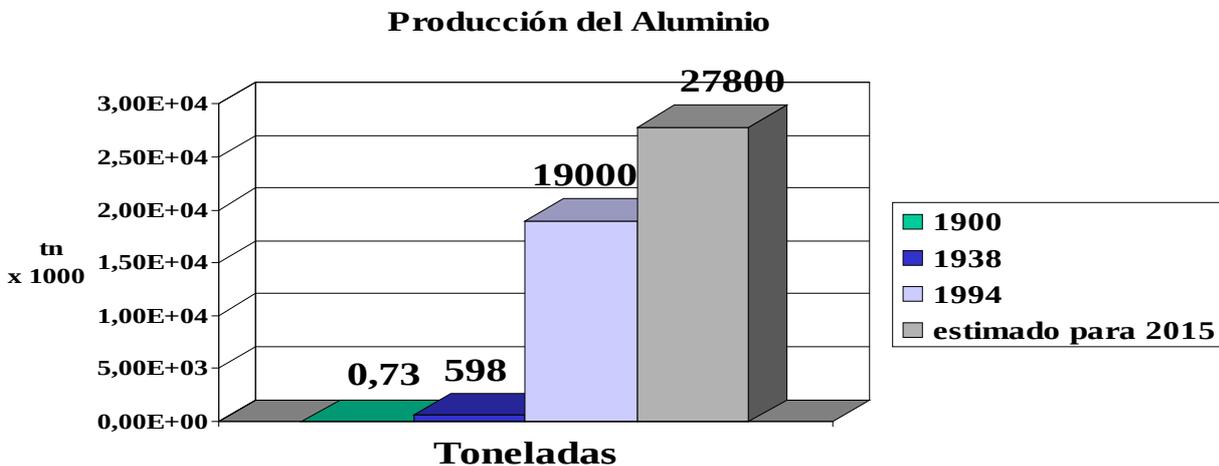


Figura 12.- Histograma donde se presenta el incremento en producción de Aluminio a nivel mundial

Venezuela para el año 2006 ocupaba el puesto No. 11 entre los países productores de Aluminio primario, tal como se muestra en la siguiente tabla

*Lista de países ordenados según la producción del aluminio reportada en el I 2006, basado en informe de Altech emitido en Septiembre 2007.*

Ranking según producción de Al (año 2006)	País/región estado soberano	Producción del aluminio (toneladas)
1	República Popular de China	58960
2	Rusia	41020
3	Estados Unidos	34930
4	Canadá	31170
5	Australia	19450
6	El Brasil	16740
7	Noruega	13840
8	La India	11830
9	Bahrein	872
10	Emiratos árabes unidos	861
11	Suráfrica	855
12	Islandia	721
13	Alemania	679
14	Venezuela	640

Frente a las tendencias del mercado mundial, las ventajas comparativas de Venezuela (año de referencia 2001) incentivan la inversión y el desarrollo de celdas de reducción de alto amperaje (V-350) para incrementar la producción de aluminio primario a 2.millones de toneladas año que generarían ganancias netas estimadas en 1105 millones de Dólares.

#### **PROPIEDADES TECNOLOGICAS Y PRINCIPALES APLICACIONES:**

Debido a su elevada proporción resistencia-peso es muy útil para construir aviones, vagones ferroviarios y automóviles, y para otras aplicaciones en las que es importante la movilidad y la conservación de energía.

De manera comercial desde 1994 se utiliza el aluminio en autos como el NSX HONDA y el híbrido INSIGHT para la elaboración de l Chasis adicionalmente a la carrocería. El año 2001, el Automóvil “AUDI”, lanzado en Europa es considerado el auto más eficiente del mundo en cuanto a consumo de combustible. El Chasis pesa 900

Kg. y es fabricado completamente de aluminio. La estructura de la carrocería usa diferentes técnicas de fabricación entre ellas extrusión con la que fabrica una pieza única para la estructura lateral. Los rieles son hidromodelados y las piezas fundidas a falta presión forman las uniones del chasis.

Por su elevada conductividad térmica, el aluminio se emplea en utensilios de cocina y en pistones de motores de combustión interna. Solamente presenta un 63% de la conductividad eléctrica del cobre para alambres de un tamaño dado, pero pesa menos de la mitad.

El metal es cada vez más importante en arquitectura, tanto con propósitos estructurales como ornamentales. Las tablas, las contraventanas y las láminas de aluminio constituyen excelentes aislantes.

Se utiliza también en reactores nucleares a baja temperatura porque absorbe relativamente pocos neutrones. Con el frío, el aluminio se hace más resistente, por lo que se usa a temperaturas criogénicas.

### **CLASIFICACION DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO**

La clasificación del aluminio y sus aleaciones se divide en dos grandes grupos bien diferenciados, estos dos grupos son: **forja y fundición**. Esta división se debe a los diferentes procesos de conformado que puede sufrir el aluminio y sus aleaciones.

Dentro del grupo de aleaciones de aluminio forjado encontramos otra división clara, que es la del grupo de las **tratables térmicamente y las no tratables térmicamente**. Las no tratables térmicamente solo pueden ser trabajadas en frío con el fin de aumentar su resistencia.

En las páginas siguientes aparecen dos cuadros con los grupos básicos para las aleaciones de forja y fundición, además hay unas designaciones para especificar el grado de endurecimiento que no serán comentadas por ser demasiado específicas y no venir al caso en el tema de este trabajo.

Conviene señalar que, dentro de las aleaciones para forja, los grupos principales de las no tratables térmicamente son : 1xxx, 3xxx y 5xxx. Dentro de las tratables térmicamente los grupos principales son : 2xxx, 6xxx y 7xxx.

En esta ultima división, se encuentran las aleaciones de aluminio con mayores resistencias mecánicas, los grupos 2xxx y 7xxx, por lo que son las aleaciones más indicadas para este trabajo. Al final de este, se hará una mención especial a estos dos grupos y sus características mecánicas.

En el anexo se muestran tablas con las composiciones químicas y propiedades mecánicas más típicas.

**PRINCIPALES ALEACIONES DE AL Y SUS DESIGNACIONES:**

El sistema para la designación de las aleaciones de aluminio de forja se resume en las siguientes tablas:

Aleaciones de Al para Forja

DESIGNACIÓN	ALEANTE
1XXX	Ninguno ( $\geq 99,00\%$ Al)
2XXX	Cu
3XXX	Mn
4XXX	Si
5XXX	Mg
6XXX	Mg y Si
7XXX	Zn
8XXX	Otros elementos

FUENTE: Datos de *Metals Handbook*, 9th Ed., Vol. 2, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1979.

Aleaciones de Al para Fundición

ALEANTE	DESIGNACIÓN
Aluminio, 99,00 por 100 mínimo y mayor	1xx.x
Aleaciones de aluminio agrupadas por elementos aleantes principales:	
Cobre	2xx.x
Silicio, con adición de cobre y/o magnesio	3xx.x
Silicio	4xx.x
Magnesio	5xx.x
Cinc	7xx.x
Estaño	8xx.x
Otros elementos	9xx.x
Series sin emplear	6xx.x

En algunos sistemas de aleación se hace corresponder determinados códigos numéricos a algunos de los tratamientos normalizados, convirtiéndose en parte integrante de las designaciones de las aleaciones.

En las siguientes tablas se muestran algunos de los códigos utilizados así como un ejemplo de las propiedades de algunas aleaciones de Aluminio.

<b>Estado de tratamiento</b>	<b>Definición</b>
F	Según fabricación
O	Recocido
H1	Endurecimiento por acritud solamente
H2	Endurecimiento por acritud y recocido parcial
H3	Endurecimiento por acritud y estabilización (propiedades mecánicas estabilizadas mediante tratamiento térmico a baja temperatura)
T1	Enfriamiento desde proceso de conformado a temperatura elevada y maduración natural hasta una condición básicamente estable
T2	Enfriamiento desde un proceso de conformado a alta temperatura, acritud y maduración natural hasta una condición básicamente estable
T3	Tratamiento térmico de solución, acritud, y maduración natural hasta una condición básicamente estable
T4	Tratamiento térmico de solución y maduración natural hasta una situación básicamente estable
T5	Enfriamiento desde un proceso de conformado a alta temperatura y maduración artificial
T6	Tratamiento térmico de solución y maduración artificial
T7	Tratamiento térmico de solución y estabilización
T8	Tratamiento térmico de solución, acritud y maduración artificial
T9	Tratamiento térmico de solución, maduración artificial y acritud
T10	Enfriamiento desde un proceso de conformado a alta temperatura, acritud y maduración artificial

Número AISI-SAE de aleación*	Composición química, % peso†	Tratamiento‡	Resistencia a la tensión		Esfuerzo de fluencia		Elonga- ción, (%)	Aplicaciones típicas
			ksi	MPa	ksi	MPa		
<b>Aleaciones para forja</b>								
1100	99,0 min Al, 0,12 Cu	Recocido (-O)	13	89 (av)	3,5	24 (av)	25	Trabajo de laminación del metal
		Semi-endurecido (-H14)	18	124 (av)	14	97 (av)	4	
3003	1,2 Mn	Recocido (-O)	17	117 (av)	5	34 (av)	23	Recipientes a presión, equipamiento químico, trabajo de laminación del metal
		Semi-endurecido (-H14)	23	159 (av)	23	159 (av)	17	
5052	2,5 Mg, 0,25 Cr	Recocido (-O)	28	193 (av)	9,5	65 (av)	18	Camiones, autobuses, usos en marina, tubos hidráulicos
		Semi-endurecido (-H34)	38	262 (av)	26	179 (av)	4	
2024	4,4 Cu, 1,5 Mg, 0,6 Mn	Recocido (-O)	32	220 (máx)	14	97 (máx)	12	Estructuras de aviones
		Tratamiento térmico (-T6)	64	442 (mín)	50	345 (mín)	5	
6061	1,0 Mg, 0,6 Si, 0,27 Cu, 0,2 Cr	Recocido (-O)	22	152 (máx)	12	82 (máx)	16	Camiones y estructuras marinas, tuberías, carriles
		Tratamiento térmico (-T6)	42	290 (mín)	35	241 (mín)	10	
7075	5,6 Zn, 2,5 Mg, 1,6 Cu, 0,23 Cr	Recocido (-O)	40	276 (máx)	21	145 (máx)	10	Aviones y otras estructuras
		Tratamiento térmico (-T6)	73	504 (mín)	62	428 (mín)	8	
<b>Aleaciones para fundición</b>								
355,0	5 Si, 1,2 Cu,	Fundición en área (-T6)	32	220 (mín)	20	138 (mín)	2,0	Bombas domésticas, accesorios de aviones, cárter de aviones
		Molde permanente (-T6)	37	285 (mín)	...	...	1,5	
356,0	7 Si, 0,3 Mg	Fundición en área (-T6)	30	207 (mín)	20	138 (mín)	3	Fundiciones de gran complejidad, ejes portadores de las motoras, ruedas de camiones
		Molde permanente (-T6)	33	229 (mín)	22	152 (mín)	3	
332,0	9,5 Si, 3 Cu, 1,0 Mg	Molde permanente (-T5)	31	214 (mín)				Pistones de automóviles
413,0	12 Si, 2 Fe	Fundición en coquilla	43	297	21	145 (mín)	2,5	Fundiciones complicadas

\* Número de asociación de aluminio. † Balance de aluminio. ‡ O = recocido y recristalizado; H14 = endurecido por deformación únicamente; H34 = endurecido por deformación y estabilizado; T5 = enfriado desde temperatura elevada, proceso de conformado, luego envejecimiento artificial; T6 = tratamiento térmico de solución, luego envejecido artificialmente.

## **RESUMEN DE PROPIEDADES DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO:**

Las propiedades del aluminio dependen de un conjunto de factores, de estos, el más importante es la existencia de aleantes. Con la excepción del aluminio purísimo ( 99,99 % de pureza ), técnicamente se utilizan sólo materiales de aluminio que contienen otros elementos. Aún en el aluminio purísimo, las impurezas ( Fe y Si ) determinan, en gran medida, sus propiedades mecánicas.

Los elementos aleantes principales del aluminio son: cobre (Cu), silicio (Si), magnesio (Mg), zinc (Zn) y manganeso (Mn):

En menores cantidades existen, frecuentemente, como impurezas o aditivos: hierro (Fe), cromo (Cr) y titanio (Ti). Para aleaciones especiales se adiciona: níquel (Ni), cobalto (Co), plata (Ag), litio (Li), vanadio (V), circonio (Zr), estaño (Sn), plomo (Pb), cadmio (Cd) y bismuto (Bi).

## **PROPIEDADES MECÁNICAS DE ALEACIONES DE ALUMINIO:**

Las propiedades mecánicas o propiedades de resistencia mecánica sirven en la mayoría de los casos como base para dictaminar sobre un material metálico, con vistas a un fin de aplicación concreto. A continuación se da un resumen de las propiedades mecánicas más importantes del aluminio no sólo sometido a esfuerzo continuo sino también, oscilante y por golpe. En el anexo se muestran cuadros resumen de las propiedades de las aleaciones de aluminio y se compara con las de otros materiales.

- **Dureza:** la mayoría de las veces se da en los materiales de aluminio la dureza Brinell, a causa de la sencillez de su determinación. los valores de la dureza Brinell se extienden desde HB=15 para aluminio purísimo blando hasta casi HB=110 para AlZnMgCu 1,5 endurecido térmicamente, es decir, aleación 7075. Los valores de la dureza determinados por otros métodos, como el Vickers o el de Knoop, apenas tienen significado práctico en este metal. De vez en cuando se utiliza la microdureza, una variante del método Vickers, para determinar la dureza de capas anodizadas.
- **Resistencia en el ensayo de tracción:** los importantísimos valores característicos que se obtienen en el ensayo de tracción para juzgar las propiedades resistentes de los materiales metálicos en general, son aplicables a los materiales de aluminio. Generalmente estos valores son el límite elástico

0,2%, la resistencia máxima a la tracción, el alargamiento a la rotura, así como la estricción de ruptura.

En general, la resistencia aumenta con el aumento en elementos de aleación. Los dominios de la resistencia en cada aleación surgen, ante todo, como consecuencia de los aumentos de resistencia que se consiguen por deformación en frío o endurecimiento por tratamiento térmico. Los distintos elementos de aleación actúan de modo muy diferente en cuanto al aumento de resistencia.

Al aumentar la resistencia, aumenta el límite 0,2% más deprisa que la resistencia a la tracción, independientemente del mecanismo que motive el aumento de la resistencia. Este aumento se nota especialmente cuando el aumento de resistencia tiene lugar por deformación en frío. En general no se desean altas relaciones entre los límites elásticos ( límite 0,2% y resistencia máxima) ya que expresan un comportamiento relativamente quebradizo del material, razón fundamental por la que no se puede aumentar de forma arbitraria la resistencia de un material metálico.

- **Resistencia a la compresión, a la flexión, al corte y a la torsión:** en los materiales aluminicos se puede admitir que el valor del límite de aplastamiento 0,2% ( parámetro de la resistencia a la compresión ) es igual al valor del límite elástico 0,2% de tracción. La resistencia a la compresión o el límite de aplastamiento 0,2% tienen importancia principalmente en las piezas sometidas a compresión tales como cojinetes de fricción.

La resistencia a la flexión en las aleaciones de aluminio se tiene en cuenta para las de fundición, en aquellos casos en que, al realizar el ensayo de tracción no es posible determinar el límite elástico con suficiente exactitud a causa de su pequeño valor.

La resistencia al cizallamiento es importante para el cálculo de la fuerza necesaria para el corte y para determinadas construcciones. No existen valores normalizados. Generalmente está entre el 55 y 80 % de la resistencia a la tracción.

---

Casi nunca se determina la resistencia a la torsión, si se considera una distribución lineal de tensiones, puede considerársela igual a la resistencia al cizallamiento.

- **Propiedades resistentes a temperaturas elevadas:** Al aumentar la temperatura, disminuyen la resistencia a la tracción, el límite elástico y la dureza, en tanto que, en general, aumenta el alargamiento de rotura y la estricción de rotura. El factor tiempo juega un papel esencial en la determinación de valores de resistencia para altas temperaturas. Esta influencia se exterioriza de dos maneras:

**Cambios de estado.** Bajo la influencia de temperaturas elevadas se pueden producir modificaciones permanentes en la estructura de los materiales que han experimentado endurecimiento por deformación en frío, estas traen consigo una disminución de la resistencia mecánica.

**Procesos de fluencia.** A temperaturas elevadas el material puede experimentar deformaciones lentas bajo la acción de cargas en reposo, aumentando la velocidad en el cambio de forma con el incremento de la temperatura y de la tensión. Al mismo tiempo pueden surgir tensiones por debajo de la resistencia a la tracción o del límite elástico 0,2%.

- **Resistencia a la fatiga:** En las aleaciones de aluminio para laminación y forja existe una clara diferencia entre las no endurecibles y las endurecibles.
- **Resistencia al desgaste:** la resistencia a la abrasión o al desgaste de los materiales de aluminio es particularmente baja en el rozamiento en seco. No existe relación entre dureza y resistencia mecánica por un lado y resistencia a la abrasión por el otro.

Los materiales de aluminio sometidos a rozamiento, en determinadas circunstancias de funcionamiento, muestran un comportamiento aceptable como prueban las numerosas aplicaciones que tienen en cojinetes de fricción y émbolos. Debe mencionarse también que el desgaste se puede reducir drásticamente por un tratamiento superficial apropiado.

---

## **ALEACIONES DE ALUMINIO ENDURECIDAS POR DEFORMACION, QUE NO SE ENDURECEN POR TRATAMIENTO TÉRMICO**

Las aleaciones de aluminio deformables que no se endurecen por tratamiento térmico son aquellas que sus características mecánicas dependen de las distintas formas de laminación o conformado y de recocidos intermedios o finales si es necesario. Su dureza está caracterizada por el estado H y corresponden a las familias, 1000 (Aluminio puro), 3000 (Aluminio Manganeso) y 5000 (Aluminio Magnesio).

La acritud es el endurecimiento obtenido por deformación plástica en frío que produce un aumento de las características mecánicas y de la dureza del material. Se produce simultáneamente una disminución de su capacidad de deformación y una pérdida de maleabilidad. Este efecto es mucho más marcado cuanto mayor es la deformación sufrida o cuando más elevada es la tasa de acritud. También depende de la composición del metal. Los aleantes que principalmente están presentes en estas aleaciones de aluminio son el Magnesio y el Manganeso.

Ejemplo de estas aleaciones son:

- Las aleaciones de la serie 1000, las cuales son principalmente de aluminio, deforman en gran magnitud debido a la estructura cúbica centrada en la caras de este elemento. Ellas sufren de endurecimiento por deformación en frío. Este endurecimiento puede incrementarse al aumentar los elementos en solución. Así la aleación 1350 utilizada para alambres y cables conductores tendrá las propiedades de alta conductividad eléctrica del aluminio pero unos valores mayores de resistencia mecánica.
- La aleación 5083 (Magnealok 45) que contiene entre el 4 y el 4,9% de Magnesio, tiene unas características mecánicas más elevadas pero una aptitud a la deformación más limitada que la aleación 5754 (Magnealok 30) que contiene entre el 2,6 y el 3,6% de Magnesio.
- Las aleaciones al Mn (3003) en estado recocido tienen valores de  $\sigma_r$  alrededor de 13 kgf/mm<sup>2</sup> y alargamiento en el orden de  $\delta = 23\%$ . Después de la deformación el límite de rotura crece hasta 18 kgf/mm<sup>2</sup> y el alargamiento relativo disminuye hasta un 6%. La Aleación, que contiene 1,2% de Mn, representa una solución

sólida de manganeso en el aluminio, en la cual hay distribuida una pequeña cantidad de partículas del compuesto  $MnAl_6$ .

Adiciones de Magnesio adicional al manganeso conservan una alta plasticidad y son normalmente monofásicas, sin embargo incrementan su resistencia mecánica

ALEACIÓN	PROPIEDAD
2,0-2,8% de Mg y 0,15-0,4% de Mn	Recocido $\sigma_r = 19-26 \text{ kgf/mm}^2$ $\delta = 22-23\%$ Deformada en frío $\sigma_r = 30 \text{ kgf/mm}^2$

Las aleaciones de este grupo poseen una resistencia mecánica y dureza, relativamente pequeña, pero éstas tienen una alta plasticidad, en buena forma se sueldan (sobre todo las aleaciones Al-Mn) y son resistentes a la corrosión. Por eso éstas se emplean para las piezas sometidas a pequeños esfuerzos, fabricadas por estampado en frío de embutición profunda, para las piezas que se sueldan, como también para los artículos que experimentan la acción de los medios ambientes corrosivos (conductos, vidrieras de colores, puertas, marcos de ventanas, cuerpos de relojes, tanques, superestructuras de cubierta de los barcos, etc.).

#### **Acritud o endurecimiento de las aleaciones de Aluminio**

El endurecimiento por acritud es un fenómeno que se produce en cualquiera de los modos de deformación utilizados: Laminado, estirado, plegado, martilleado, cintrado, embutido, entallado, etc.

Después del endurecimiento por acritud es posible recuperar o restaurar la aptitud a la deformación de un metal agrio por un tratamiento de «recocido». Este tratamiento se efectúa a una temperatura superior a  $300^\circ\text{C}$ . La dureza y las características mecánicas de este metal comienzan a disminuir lentamente, esto es la «restauración» del material para finalmente obtener un valor mínimo correspondiente a las características mecánicas del metal en estado natural.

En el recocido se produce de una modificación de la textura y del tamaño de grano del

metal que es posible observar por microscopio óptico de 50 aumentos. La textura evoluciona de una estructura laminar a otra completamente cristalizada.

Durante la fase de recristalización y en el momento del recocido, el tamaño de grano es susceptible de crecer. Este efecto se pone de manifiesto durante un conformado, por ejemplo, un plegado, por el aspecto de piel de naranja que presenta la superficie del metal.

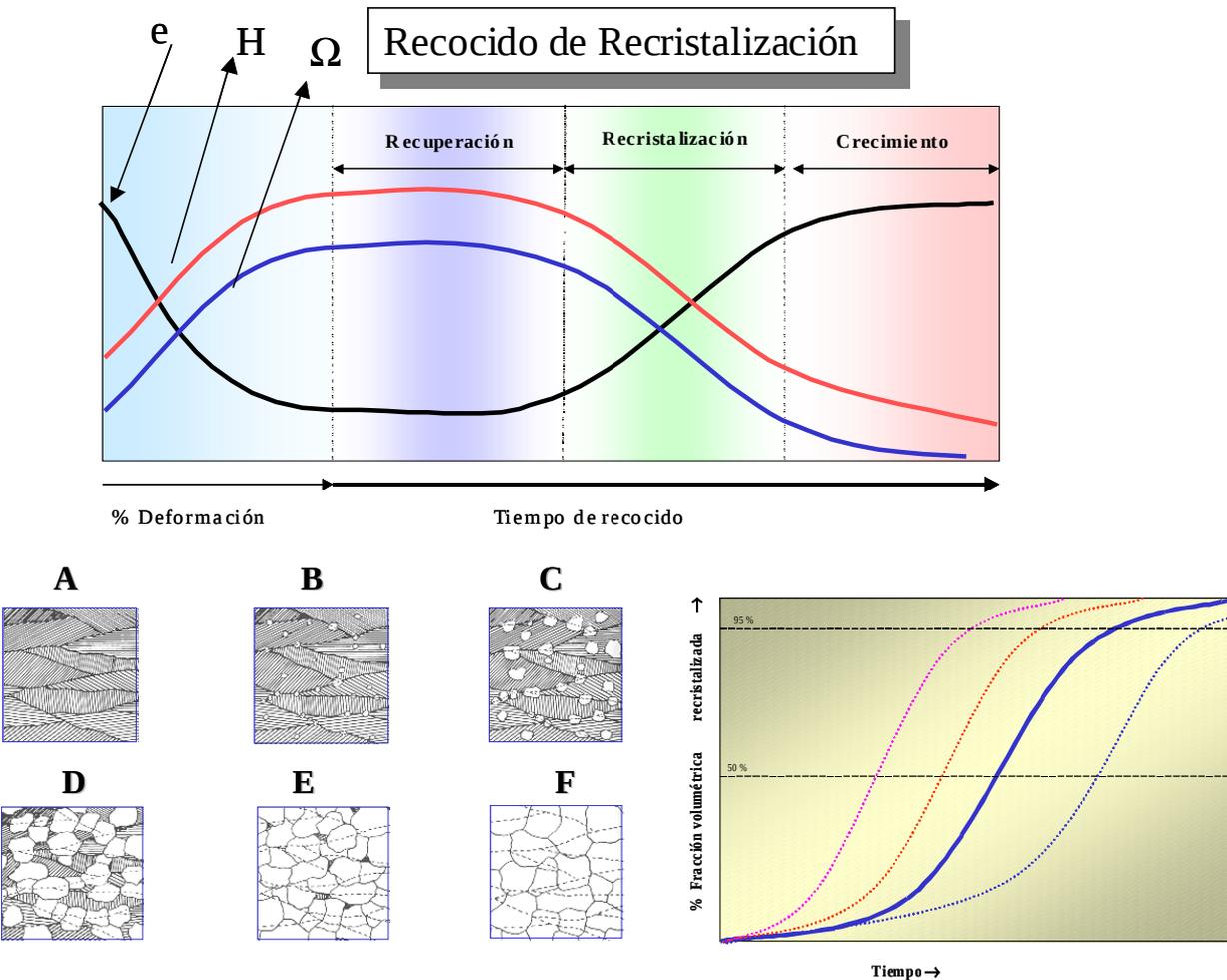


Figura 13.-: Esquema representativo del recocido de recristalización . Se esquematiza como mediante un tratamiento térmico es factible recuperar las microestructuras y el nivel de defectos que se originan por la deformación en frío. La deformación en frío incrementa la resistencia mecánica (dureza,H) disminuye la plasticidad (e), y disminuye la conductividad. Al aplicar el recocido de recristalización, como consecuencia de la regeneración de la estructura granular, se incrementa la plasticidad y la conductividad y disminuye la dureza.

El aumento del tamaño del grano, por encima de un valor alrededor de 100 micras, reduce la capacidad de deformación de las aleaciones de aluminio.

Para evitar el crecimiento del grano y conservar una estructura de grano fino del metal recocido, hay que respetar las siguientes condiciones :

- 1° - Asegurarse que el metal ha sufrido un índice de deformación suficiente, correspondiente a una disminución relativa de la sección de al menos un 15%. Es la acritud crítica, si no se cumple esta condición, hay que limitarse a un tratamiento de recocido sin permitir la recristalización.
- 2° - Adoptar una velocidad rápida de aumento de la temperatura: de 20° a 60°C por hora.
- 3° - Limitar el nivel de temperatura al intervalo de 350° a 380°C.
- 4° - Limitar a dos horas máximo la duración de mantenimiento a temperatura.

Para las aleaciones de la familia 5000 (Aluminio-Magnesio) 5005, 5050, 5251, 5052, 5754, 5454, 5086, 5083 y 5056, los recocidos se hacen habitualmente en un intervalo entre 345° y 380°C, con una duración de 30 a 120 minutos.

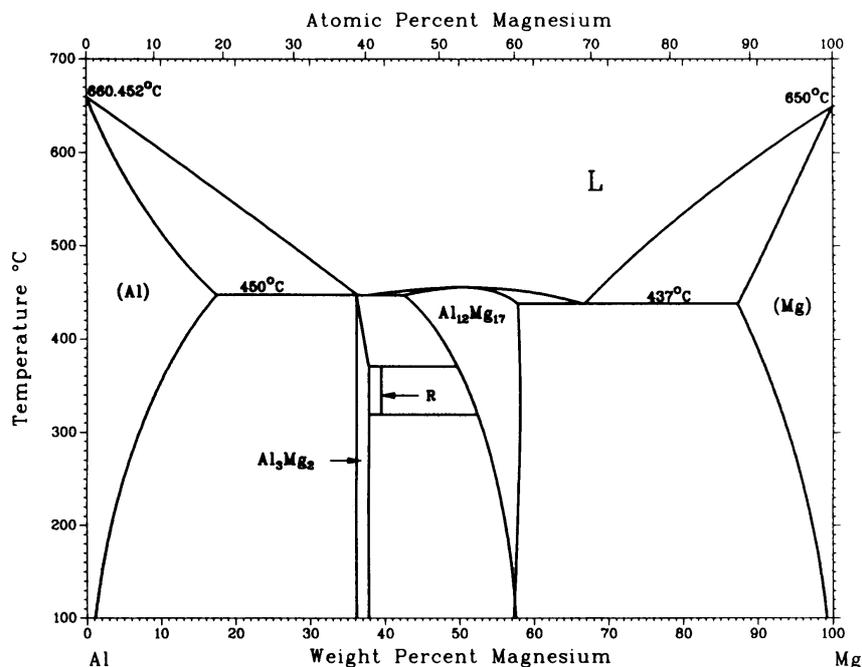


Figura 14. Diagrama de equilibrio Aluminio - Magnesio

## ALEACIONES DE ALUMINIO DEFORMABLES QUE SE ENDURECEN POR TRATAMIENTO TÉRMICO

Las aleaciones deformables, que se endurecen con el tratamiento térmico, son bifásicas (solución sólida a base de aluminio y fase sólida en exceso). Como resultado del tratamiento térmico éstas obtienen altas propiedades mecánicas. El tratamiento térmico consta de un temple y envejecimiento, por el cual se entiende el mantenimiento de la aleación a la temperatura ambiente durante unos cuantos días (envejecimiento natural) o unas cuantas horas a temperaturas elevadas (envejecimiento artificial).

El endurecimiento estructural de estas aleaciones y sus características mecánicas dependerán de los ciclos de tratamientos térmicos: solubilización, temple y envejecimiento (natural o artificial). A este grupo pertenecen las familias 2000 (Aluminio-Cobre), 6.000 (Aluminio-Magnesio-Silicio) y 7000 (Aluminio-Zinc). Estas aleaciones con endurecimiento estructural se obtienen según la secuencia de los tratamientos térmicos siguientes:

- Puesta en solución.
- Temple.
- Maduración (natural o artificial).

En ciertos casos pueden ser completados con estirado en frío en determinada fase del tratamiento.

### REPRESENTACION DEL TRATAMIENTO DE ENDURECIMIENTO ESTRUCTURAL

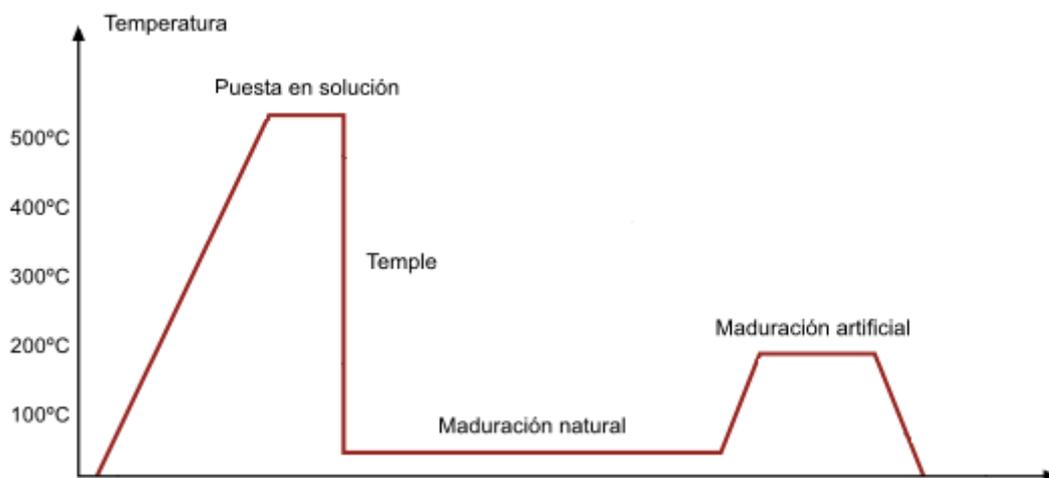


Figura 15.- Ciclo Térmico de envejecimiento o maduración

El tratamiento comporta las secuencias siguientes:

- Puesta en solución
- Temple
- Envejecimiento (Maduración) natural (a temperatura ambiente)
- Envejecimiento o maduración artificial

#### PUESTA EN SOLUBILIZACIÓN- APLICACIONES EN LAS ALEACIONES DE LA SERIE 6000.

El tratamiento de puesta en solución sólida consiste en disolver en el metal base, por un mantenimiento a temperatura elevada, los elementos de la aleación que se encuentran en fases separadas. Por enfriamiento brutal de la solución sólida así obtenida, se obtiene un estado templado. La temperatura de puesta en solución óptima depende de la composición química de la aleación. La temperatura debe ser respetada en alrededor de  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ , la duración del tratamiento depende de la composición química, tipo de producto, de las tasas de acritud antes del temple, etc.

Para las aleaciones de la familia 6000, la solubilización se hace a temperatura elevada del orden de  $530^{\circ}\text{C}$ . Esta temperatura es más elevada cuando la aleación está cargada de los elementos aleantes; magnesio y silicio. La duración de mantenimiento a temperatura depende del espesor de los productos.

Durante el mantenimiento prolongado a temperaturas elevadas, los compuestos intermetálicos del tipo  $\text{Mg}_2\text{Si}$  para las aleaciones de la serie 6000, de tipo  $\text{Al}_2\text{Cu}$  para los de la familia 2000, se redisuelven y la aleación forma entonces una solución sólida homogénea.

La temperatura de puesta en solución de las aleaciones de aluminio de endurecimiento estructural deben ser reguladas con precisión para no alcanzar la de las eutécticas. Para las temperaturas eutécticas se produce una fusión local de los compuestos intermetálicos y de los eutécticos (aleaciones con punto de fusión bajo). El metal es entonces

inutilizable. Según su composición, esta temperatura se sitúa entre 555° y 620°C para las aleaciones de la familia 6000.

### TEMPLE

Se trata de un enfriamiento muy rápido del metal que se hace normalmente por inmersión o ducha en agua fría a la salida del horno en la laminación o en la prensa de extrusión, cuando el temple se hace a la salida de la hilera. El enfriamiento brutal del metal tiene por efecto impedir la precipitación de los compuestos intermetálicos.

Es inmediatamente después del temple cuando las aleaciones de endurecimiento estructural (AlCu-AlMgSi-AlZn) son fácilmente deformables. La velocidad de temple es un parámetro muy importante del que dependen ciertas propiedades, como son las características mecánicas de tracción, la tenacidad, el comportamiento a la corrosión....., existe para cada aleación una velocidad crítica de temple bajo cuyo umbral no se debe bajar.

Para obtener la tenacidad máxima la velocidad de temple debe ser tres veces más rápida que la velocidad crítica de temple. Observación: el temple es susceptible de producir tensiones internas sobre todo en las piezas de formas complejas o de grandes secciones.

Se puede disminuir las tensiones con una deformación plástica controlada, por ejemplo, una tracción con el 2% de alargamiento después del temple y antes de la maduración bien natural (T451) o artificial (T651).

### ENVEJECIMIENTO

Después del temple la solución sólida sobresaturada está en un estado metaestable. La vuelta al equilibrio, es decir la precipitación de los compuestos intermetálicos que provocan el endurecimiento estructural, se puede hacer de dos maneras:

- Por envejecimiento a temperatura ambiente (maduración natural). Después de un reposo de varias horas, que depende de las aleaciones, la dureza y las características mecánicas no aumentan. La precipitación y el endurecimiento estructural han terminado. Es el estado T4.

- Por un Tratamiento térmico de envejecimiento, es decir un calentamiento de varias horas entre 160 y 180° para la serie 6000. El revenido (maduración artificial) acelera la precipitación. Se realiza inmediatamente después del temple. Las condiciones del envejecimiento artificial dependen de las aleaciones.

#### TEMPLE TERMOMECANICO DE LAS ALEACIONES DE LA SERIE 6000:

Las aleaciones de la familia 6000, tales como la 6005 A, 6060, 6061, 6063, 6082, 6101, 6351, pueden ser templadas inmediatamente a la salida de la laminación en caliente por enfriamiento al aire soplado o por una ducha de agua. A la salida del laminador (alrededor de 530°C aprox.) los perfiles están a una temperatura superior a la de la precipitación. Los productos así templados pueden ser utilizados en el estado designado como T1 o sufrir un tratamiento de envejecimiento después de la deformación en caliente.

Esta forma de proceder presenta diversas ventajas:

- suprime el calentamiento para la puesta en solución.
- conserva una textura no recristalizable, por lo tanto se consiguen mejores características mecánicas.
- evita las deformaciones geométricas.

Las condiciones de temple luego de la laminación en caliente, deben ser adaptadas a las temperaturas críticas de temple de las aleaciones, al espesor y a la geometría del producto. El espesor límite depende de la aleación.

Las condiciones de temple en la prensa deben ser adaptadas a las temperaturas críticas de temple de las aleaciones, al espesor y a la geometría del producto. El espesor límite depende de la aleación.

**ALEACIONES DE ALUMINIO DE ALTA RESISTENCIA OBTENIDAS POR ENVEJECIMIENTO - ALEACIONES Al-Cu .**

Examinemos el proceso de tratamiento térmico de las aleaciones en el ejemplo de las aleaciones binarias Al-Cu.

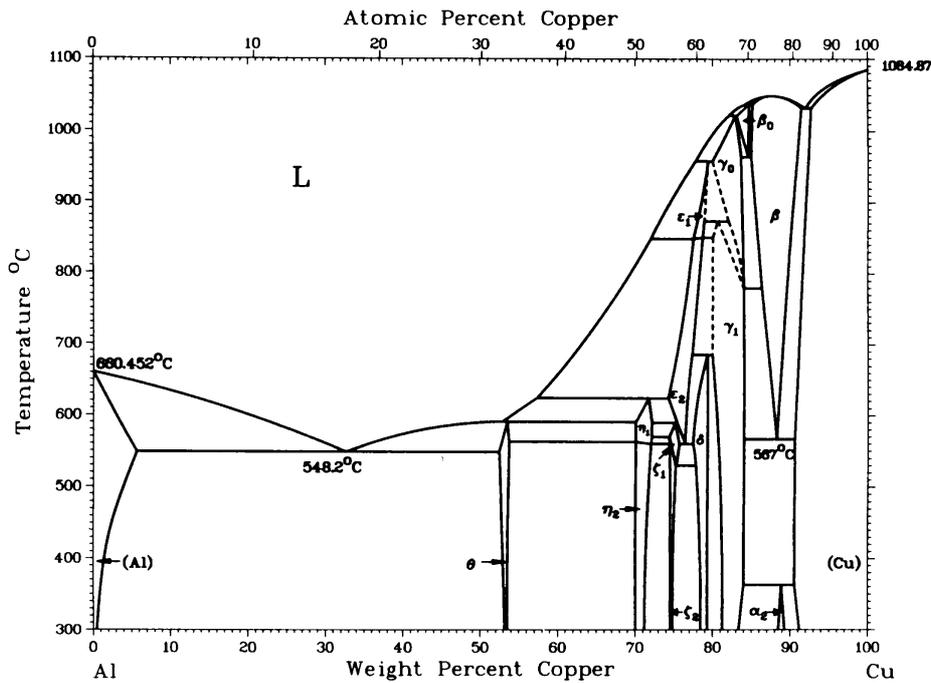


Figura 16. : Diagrama Al-Cu

El diagrama de estado del sistema Al-Cu indicado muestra que el aluminio forma con el cobre una solución sólida que varía su solubilidad de gran manera con la temperatura : La solubilidad máxima del cobre en el aluminio a la temperatura eutéctica (548° C) alcanza un 5,7%, con la disminución de la temperatura la solubilidad del cobre en el aluminio se reduce bruscamente y alcanza un 0,5% a 20° C. De esta manera las aleaciones que contienen menos de un 0,5 % de Cu, tienen una estructura monofásica: solución sólida de cobre en el aluminio. Con un contenido mayor de cobre las aleaciones tienen una estructura bifásica  $\alpha + \text{CuAl}_2$ , ya que al superarse la solubilidad se forma  $\text{CuAl}_2$ , el cual es un compuesto químico. A un 54% de Cu se tendría 100 % del compuesto químico  $\text{CuAl}_2$  (fase  $\theta$ ).

Si cualquier aleación que contiene cobre en los límites de 0,5-5,7% se calienta hasta 50.0-540° C, las partículas de  $\text{CuAl}_2$  se disuelven en el aluminio y la aleación obtiene

una estructura monofásica de solución sólida  $\alpha$ . Un enfriamiento rápido después de este calentamiento . previene precipitaciones de  $\text{CuAl}_2$  de la solución sólida  $\alpha$  y la aleación a la temperatura ambiente ( $20^\circ \text{C}$ ) conserva la estructura monofásica. La solución sólida semejante está sobresaturada y, por lo tanto, es inestable.

Así a partir de la solución sólida sobresaturada precipitará la fase  $\theta$  , siendo este proceso función de la temperatura y el tiempo. Este proceso de precipitación se conoce como : **Envejecimiento**. Este puede ser natural cuando se produce a temperatura ambiente . En este caso no se observa la desintegración de la solución sólida y precipitaciones de la fase en exceso. A la temperatura ambiente tiene lugar sólo la aglomeración de átomos de cobre en los distintos planos de la red cristalina de la solución sólida. Las zonas con una elevada concentración de elementos disueltos tienen la forma de discos muy delgados con un espesor de algunas capas atómicas y se denominan **zonas de Guine - Preston**. Estas zonas se localizan mediante el análisis por rayos X.

Durante el **envejecimiento natural** de muchas aleaciones se observa un fuerte aumento de la dureza (resistencia a deformación), lo que se puede explicar por la gran dificultad al movimiento de dislocación que propician los grupos de átomos ajenos (zonas de Guine - Preston). Durante el envejecimiento natural debido a la presencia de la solución sólida, la aleación posee aún una buena plasticidad y resistencia a la corrosión.

El envejecimiento se denomina **artificial** cuando se calienta la aleación entre los  $150$ - $180^\circ \text{C}$  o más. Al principio se forman también las zonas de Guine - Preston, pero de una magnitud mayor. El mantenimiento durante unas cuantas horas a altas temperaturas conduce a la formación, en los límites de las zonas de Guine- Preston, de las partículas dispersas de fase intermedia que produce endurecimiento.

Durante el calentamiento hasta  $200$ - $250^\circ \text{C}$ , de las partículas de fase intermedia , que ha alcanzado determinadas dimensiones, se forman inclusiones aisladas de fase estable de  $\text{CuAl}_2$  (fase  $\theta$ ) que se pueden observar en el microscopio. La formación de la fase estable  $\text{CuAl}_2$  va acompañada de una pérdida parcial de endurecimiento de la aleación. A las aleaciones de aluminio que se endurecen por temple y el envejecimiento posterior, pertenecen el **duraluminio**, el **avial** y otras aleaciones . Se denomina Duraluminio la aleación  $\text{Al-Cu-Mg-Mn}$ .

En la siguiente tabla se indican la composición y las propiedades mecánicas del duraluminio. La aleación D16 posee propiedades de solidez más altas que la aleación D1, pero su plasticidad tecnológica es más baja, lo que dificulta la deformación en frío y en caliente. La alta solidez de la aleación D16 se ha logrado con el aumento del contenido de magnesio.

Tabla 11

**Composición química, %, y propiedades mecánicas de algunas aleaciones de aluminio deformables**

Aleación	Cu	Mg	Mn	Si	$\sigma_{0.2}$ MN/m <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_r$ MN/m <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )	$\delta$ %
<i>Duraluminio</i>							
D1	3,8–4,8	0,4–0,8	0,4–0,8	—	240 (24)	410 (41)	15
D16	3,8–4,9	1,2–1,8	0,3–0,9	—	380 (38)	520 (52)	11
<i>Aleación avial</i>							
AV	0,2–0,6	0,45–0,9	0,15–0,35 (o Cr)	0,5–1,2	280 (28)	330 (33)	16
<i>Aleación de aluminio de alta solidez</i>							
V95 *1	1,4–2,0	1,8–2,8	0,2–0,6	—	540 (54)	580 (58)	8
<i>Aleaciones de aluminio para forjado y estampado</i>							
AK6	1,8–2,6	0,4–0,8	0,4–0,8	0,7–1,2	300 (30)	420 (42)	13
AK8	3,9–4,8	0,4–0,8	0,4–1,0	0,6–1,2	380 (38)	480 (48)	10
<i>Aleaciones de aluminio piroresistentes</i>							
AK4-1 *2	1,9–2,5	1,4–1,8	—	—	280 (28)	420 (42)	13
D20	6–7	—	0,4–0,8	—	250 (25)	400 (40)	12

\*1 Además de los elementos indicados, la aleación contiene un 5–7% de Zn; 0,1–0,25% de Cr.  
\*2 La aleación contiene un 1,0–1,5% de Fe, 1,0–1,5% de Ni; 0,02–0,1% de Ti.

El duraluminio se somete a envejecimiento natural por el hecho de que éste permite obtener una dureza más elevada y una mejor resistencia a la corrosión.

La fase endurecedora del avial es la combinación Mg<sub>2</sub>Si. El avial se temple a 515-525° C en agua, posteriormente se somete a envejecimiento natural o artificial a 150° C. El envejecimiento es necesario realizarlo inmediatamente después del temple, en caso contrario el efecto de endurecimiento disminuye

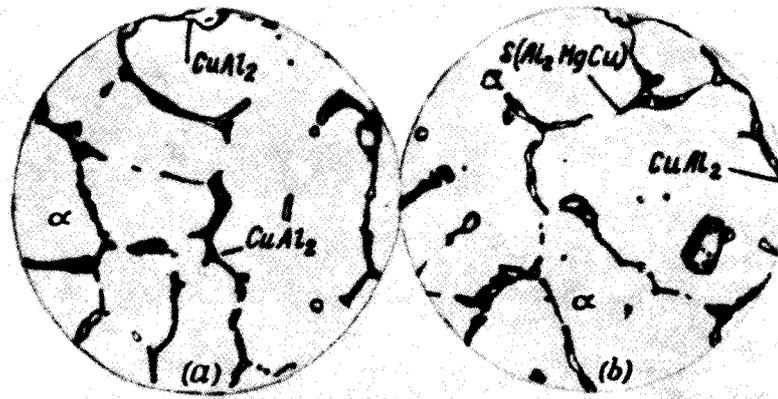


Figura 17 : Microestructura de aleaciones Al-Cu, en la cual se aprecia la formación de la segunda fase (intermetálico de cobre) en borde de grano, la cual provoca el endurecimiento de la aleación

De la aleación AV se fabrican diferentes semiproductos: chapas, tubos y otros, que se emplean como elementos de construcción que están sometidos a cargas moderadas, cuya fabricación exige una alta plasticidad de la aleación

**Aleaciones de aluminio de alta dureza.** La resistencia de estas aleaciones alcanza 50-52 kgf/mm<sup>2</sup>, pero tienen menor plasticidad que el duraluminio. Las aleaciones de aluminio de alta solidez, excepto el cobre y magnesio, contienen zinc.

Un representante de las aleaciones de aluminio de alta solidez es la aleación V95 . Las fases endurecedoras de la aleación son  $\text{MgZn}_2$ , las fases  $\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$  y  $\text{Al}_2\text{CuE}_8$ . Con el aumento del contenido de zinc y magnesio la solidez de las aleaciones aumenta, pero la plasticidad y resistencia a la corrosión disminuyen. Los aditivos de manganeso y cromo mejoran la resistencia a la corrosión y la solidez. La aleación V95 se temple en agua a 495-475° C y se somete a envejecimiento artificial a 135-145° C durante 16 horas.

Un defecto de la aleación es una sensibilidad elevada a corrosión de las piezas que se encuentran bajo esfuerzos. La aleación se emplea para construcciones sometidas a esfuerzos (revestimiento, cuadernas, largueros de aviones, carcazas de esfuerzo de construcciones estructurales remachadas, etc.).

**Aleaciones de aluminio para forjado y estampado.** Las aleaciones de esta destinación se diferencian por su alta plasticidad a la temperatura de forjado y estampado (380-450° C) y por las excelentes propiedades de fundición que permiten obtener lingotes de

calidad. Las fases endurecedoras, al emplear el envejecimiento, son: el compuesto  $Mg_2Si$  y la fase  $Al_2CuMgSi$ . Estas aleaciones se emplean para las piezas estampadas y forjadas de configuración compleja.

La aleación AK6 se emplea para las piezas sometidas a esfuerzos pequeños de configuración compleja, cuya fabricación exige una alta plasticidad en estado caliente. La aleación AK8 se recomienda para las piezas estampadas sometidas a altos esfuerzos. El forjado y estampado de las aleaciones se realiza a 450-475° C. Las aleaciones se someten a temple a 500-515° C (aleaciones AK6) ó a 490-505° C (AK8) con enfriamiento en agua y envejecimiento a 150-165° C durante 5-15 horas.

### **ALEACIONES PIORRESISTENTES.**

Estas aleaciones se emplean para las piezas que trabajan a temperaturas de hasta 300° C (émbolos, cabezas de cilindros, ruedas de paletas, álabes y discos de compresores axiales de los motores turborreactores, etc.).

Las aleaciones de este grupo tienen una composición química más compleja que las aleaciones de aluminio examinadas. Estas aleaciones se ligan complementariamente con níquel y titanio.

Las fases endurecedoras de estas aleaciones de alta resistencia al calor son  $CuAl_2$ ,  $Mg_2Si$  y  $Al_2CuMgSi$ , así como  $FeNiAl$  y  $AlCuMn$ .

Durante la desintegración parcial de la solución sólida aquéllas se precipitan en forma de partículas dispersas estables contra la coagulación, lo que garantiza una elevada piroresistencia.

La aleación D20 posee una mayor resistencia al calor y se emplea para las piezas que trabajan durante largo tiempo a 250-350° C, y en forma de chapas para las piezas que trabajan durante corto tiempo a 300° C. El manganeso y el titanio presentes en la aleación frenan los procesos de difusión. Además, el titanio detiene el proceso de recristalización.

Las aleaciones resistentes al calor AK4 se templean en agua a 510-515° C (pero la aleación D20, a 535° C) y se someten a envejecimiento a 160-175° C.

### ALEACIONES DE ALUMINIO DE FUNDICIÓN:

Estas aleaciones están destinadas para el moldeo de las piezas perfiladas. Las aleaciones más conocidas son Al-Si que han obtenido el nombre de siluminios. El siluminio típico es una aleación eutéctica que contiene un 10-13%. La aleación tiene excelentes propiedades de fundición: baja temperatura de fusión, alta fluencia líquida, pequeña contracción, etc.

Las aleaciones hipoeutécticas están compuestas por estructura de cristales primarios de fase y agujas gruesas (silicio). El eutéctico fragiliza estas aleaciones, por lo que es necesario modificarlas lo cual puede lograrse con adiciones de sodio o de estroncio. Después de la modificación la eutéctica tiene una estructura de grano final como se aprecia en la siguiente figura

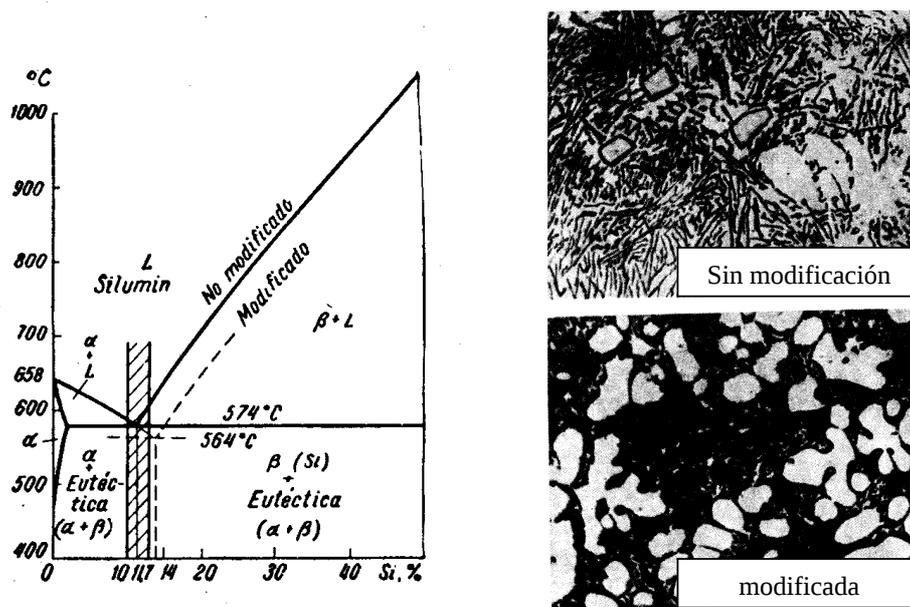


Figura 18.: Diagrama Al. Si

Las aleaciones Al-Si resisten bien la corrosión en una atmósfera húmeda y en agua de mar, se elaboran fácilmente por corte, se sueldan y tienen una excelente colabilidad. Un defecto de los siluminios consiste en la tendencia a la formación de porosidades por gases.

Para las piezas fundidas que durante largo tiempo trabajan a 275-320° C (émbolos, piezas de los motores a reacción, etc.) se emplean las aleaciones que tienen en calidad de fases endurecedoras  $Al_3Cu_5Ni$ ,  $Al_{13}(CuNi)_2$  y otras.

Estas fases tienden poco a la coagulación y forman precipitaciones dispersas ramificadas que bloquean los granos de la solución sólida. Así, por ejemplo, en calidad de aleación resistente al calor se emplea ampliamente la aleación AL1 (3,75-4,5% de Cu, 1,25-1,75% de Mg, 1,75-2,25% de Ni).

### **AJEACIONES DE ALUMINIO SINTERIZADAS**

Las aleaciones de aluminio sinterizadas (AAS) se obtienen por briqueteado, por sinterización y por deformación de los polvos de aluminio y de elementos ligados o de los polvos de aleaciones de aluminio normalizadas.

Las aleaciones de aluminio sinterizadas tienen, a la temperatura normal, propiedades mecánicas típicas de estas aleaciones en estado fundido o deformado. Las aleaciones de aluminio sinterizadas se emplean a menudo en los casos cuando no es posible obtener la aleación por fundición o tratamiento a presión. Por lo tanto, las aleaciones de aluminio sinterizadas se preparan de propiedades físicas especiales; contienen una gran cantidad de elementos de ligación.

Para las piezas que trabajan a altas temperaturas, se emplean los polvos de aluminio sinterizados (PAS) que son aleaciones de aluminio con su óxido  $Al_2O_3$ . Estas aleaciones se obtienen por sinterización y deformación del polvo de aluminio en dispersión.

Los PAS se recomiendan para los trabajos de corta duración a temperaturas de 1000° C y para los trabajos prolongados a 300-550° C.

## **EXTRUCION DE ALEACIONES DE ALUMINIO**

La extrusión en prensa es un procedimiento de conformación por deformación plástica, que consiste en moldear un metal, en caliente o frío, por compresión en un recipiente obturado en un extremo con una matriz o hilera que presenta un orificio con las dimensiones aproximadas del producto que se desea obtener y por el otro extremo un disco macizo, llamado disco de presión.

Si el esfuerzo de compresión se transmite al metal por medio del disco de presión o de la matriz, al proceso de extrusión se le denomina extrusión directa o extrusión inversa.

## **EXTRUSIONABILIDAD DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO**

La facilidad o dificultad de extrusión de un perfil, que al final determina su precio, se basa en los estudios que han permitido crear esta tabla:

ALEACION	EXTRUSIONABILIDAD EN %
1080	160
1050	135
1200	135
3003	120
6060-6063	100
6082	60
2011	35
5086	25
2014	20
5083	20
2024	15
7075	10

Las aleaciones 6060/6063 tienen el mejor índice de extrusionabilidad y se les ha aplicado el 100%, o sea, la base para el cálculo.

De esta información se deduce, entre otras, la facilidad o dificultad para obtener perfiles de secciones complejas.

Por una parte las aleaciones con alto índice de extrusionabilidad, por ser muy blandas y no poderse endurecer por tratamiento térmico, harían que los perfiles que se pudiesen obtener se deformaran en su manipulación, además de no poder mantener las formas del diseño.

En las aleaciones duras, su baja extrusionabilidad hace que el aluminio no fluya bien y por lo tanto no se puedan realizar perfiles de secciones complejas. Además de su baja productividad, este tipo de aleaciones requiere tratamientos térmicos de temple y maduración con un control muy estricto que hace también que en los perfiles de secciones sencillas el precio sea mayor.

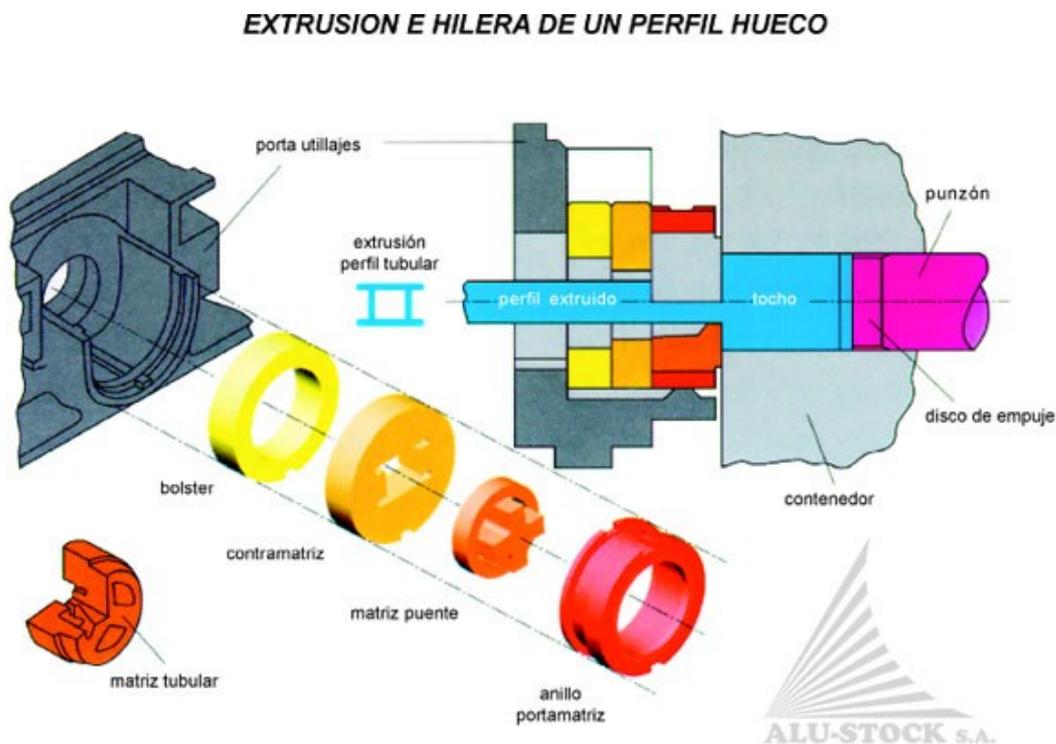


Figura 19.: Esquema de proceso de extrucción. El material es conformado con un perfil hueco

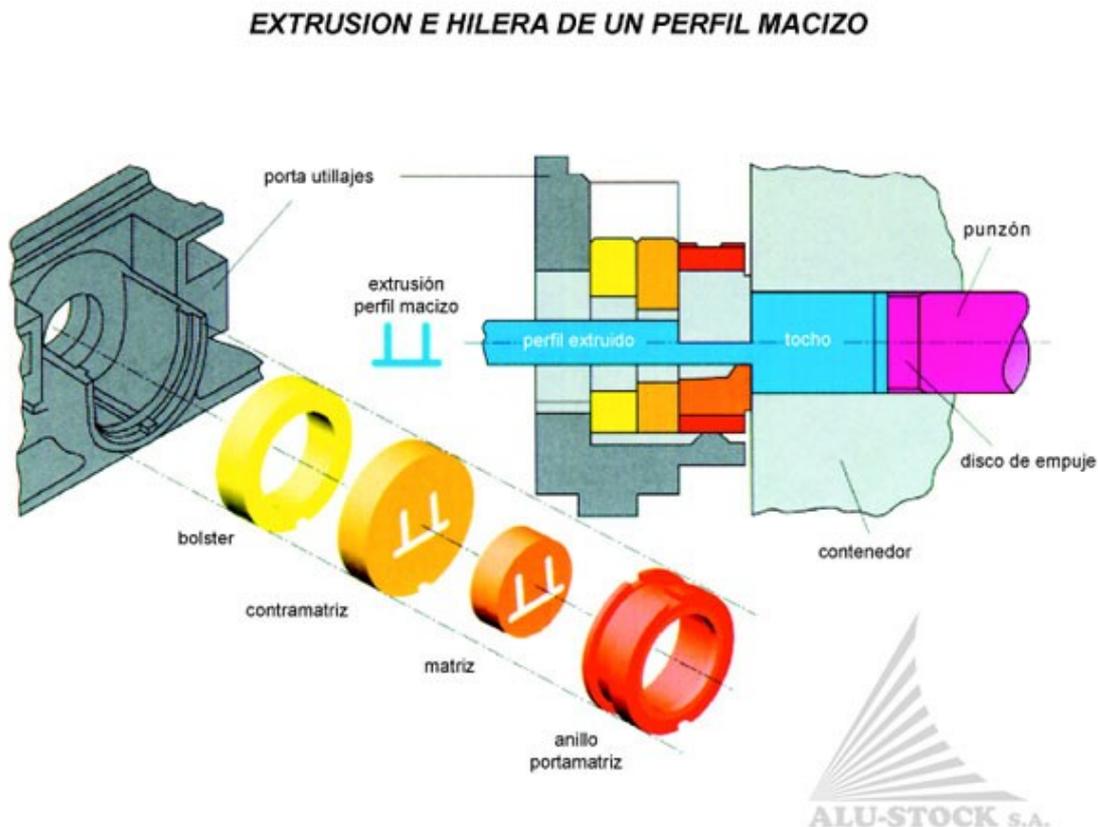


Figura 20.: Esquema de proceso de extrucción. El material es conformado con un perfil macizo.

## ALEACIONES DE ALUMINIO DE EXTRUSION

Todas las aleaciones de aluminio de deformación plástica son susceptibles de aceptar el proceso de extrusión y su empleo permite cubrir numerosos sectores y resolver problemas tan diferentes como los que se presentan en decoración, construcción mecánica, resistencia a la corrosión y a los agentes químicos, etc.

Desde el punto de vista de extrusión se distinguen tres clases de aleaciones:

### 1-. ALEACIONES BLANDAS, poco cargadas con elementos de adición.

- **No tratables térmicamente:**
  - o Aluminio puro: 1050, 1060, 1080, 1100, 1200, 1260, 1350
  - o Aluminio-Manganeso: 3003, 3004, 3005, 3103, 3105

- **Tratables térmicamente:**

- o Aluminio-Magnesio-Silicio: 6005, 6060, 6061, 6063, 6101, 6106, 6082

## 2-. ALEACIONES SEMIDURAS

- **No tratables térmicamente:**

- o Aluminio-Magnesio (+/- 3 %): 5005, 5050, 5251, 5052, 5754

- **Tratables térmicamente:**

- o Aluminio-Zinc: 7003, 7020

## 3-. ALEACIONES DURAS

- **No tratables térmicamente:**

- o A base de magnesio (+/- 3,5%): 5086, 5083, 5056

- **Tratables térmicamente:**

- o Basándose en cobre y magnesio:
- o 2014, 2017, 2024
- o Basándose en zinc, magnesio y cobre:
- o 7049, 7075

## POSIBILIDAD DE EXTRUSION DE PERFILES

- **Límites actuales**

Los límites están evidentemente en función de las prensas de que se dispone. En EEUU, Rusia y la CEI, Alemania, Francia, Corea, China, Japón, Gran Bretaña, etc., existen prensas de 5.000 a 15.000 Tn. En España la medida de las prensas de extrusión oscila entre las 1.600 y las 3.000 Tn.

Sólo a partir de 5.000 Tn. se pueden fabricar perfiles de dimensiones superiores a una sección de 350 mm. Nuestra especialidad nos permite atender el mercado de perfiles a partir de esta dimensión.

- **Longitud de los perfiles**

Los límites prácticos de la longitud de los perfiles dependen en primer lugar del transporte ya que, aunque técnicamente se pueden hacer de mayor longitud, al final la pregunta es: ¿Ahora cómo lo transportamos?

En general, la longitud dependerá del tamaño del horno de tratamiento de maduración artificial.

La longitud normal para las barras para mecanizar está establecida en 3.000/4.000 mm. y 6.050 mm. para los perfiles. Debido a su costo los perfiles se pueden suministrar a las dimensiones optimizadas por el cliente pero con ciertos límites. En el sector del transporte, FFCC y construcción naval, se suministran perfiles de hasta 28 m de longitud.

Actualmente para los sectores del ferrocarril y la construcción naval se suministran perfiles de anchuras entre 400 y 600 mm soldados a lo ancho en toda su longitud, lo que permite suministrar plataformas completas hasta de 2.800 x 24.000 mm.

- **Espesores mínimos**

Según la sección del diámetro del círculo circunscrito del perfil, de su sencillez (aleaciones blandas o duras), de su forma semitubular y de su dificultad de enderezado (aleaciones blandas o duras) y perfiles tubulares (aleaciones blandas 1050, 5050, 6000), los espesores pueden variar entre 0,8 y 50 mm.

- **Ángulos vivos y radios**

El ángulo vivo absoluto no existe en la extrusión. Lo que se designa frecuentemente bajo el nombre de "ángulo vivo" es en realidad un radio del orden de 0,3 mm. No es posible descender por debajo de este valor a causa de la fragilidad de las herramientas.

Cuanto más dura es la aleación a extruir, mayor es el riesgo de que se parta la herramienta y, en consecuencia, no se recomienda el radio mínimo de 0,3 mm. para las aleaciones: 5083, 5056, 2017, 2024, 7075, 7049, etc.

## **TOLERANCIAS DIMENSIONALES**

Diremos, a título de ejemplo, que las tolerancias dimensionales de los anchos y de los espesores varían:

de +/- 0,2 mm. para una medida nominal de 3 mm.

a +/- 1,45 mm. para una medida nominal de 180 a 250 mm.

- **TOLERANCIA EN LOS RADIOS**

La tolerancia en los radios varía:

de +/- 0,4 mm. para un radio mínimo de 3 mm.

a +/- 7,0 % para radios de 6 a 10 mm.

- **TOLERANCIA DE ÁNGULO**

La tolerancia de ángulo varía de 1o a 2o.

- **TOLERANCIA DE RUGOSIDAD**

La rugosidad de la superficie (rayas de extrusión) admisible varía:

de +/- 0,06 mm. para espesores inferiores a 1,6 mm.

a +/- 0,20 mm. para espesores superiores a 16 mm.

- **TOLERANCIAS DE ACABADO**

La flecha máxima en el enderezamiento es de 8 mm. sobre 2 m.

La torsión angular admisible varía de 1o/m para perfiles inscritos en un círculo de mas de 75 mm., a 3o/m para perfiles con círculo circunscrito de diámetro menor que 50 mm.

La tolerancia del corte prevé un desescuadre de 1° a 3° y en la longitud de 2 a 6 mm. para longitudes hasta 1 m y 10 a 15 mm. para longitudes de 9 m

## **ALAMBRONES DE ALUMINIO PARA CONDUCTORES ELECTRICOS**

### **Procesos Básicos de Producción de Conductores de Aluminio**

El alambón de aleación de aluminio normalmente se elabora a partir de lingotes de aluminio y de madrelega de Mg, Si y Fe. Es así como las aleaciones principalmente utilizadas son la 1350 (aleación endurecida por deformación en frío) y 6201 (aleación envejecible).

Para la fabricación de conductores se cumplen los siguientes pasos de producción:

**FUNDICION, COLADA Y LAMINACION EN CALIENTE:**

---

Esta es la etapa inicial mediante la cual se obtienen barras de aluminio que posteriormente se laminaran hasta alcanzar los diámetros de trabajo.

#### TREFILADO

Es el proceso de estiramiento en frío del alambón hasta alcanzar los diámetros

#### CABLEADO

Consiste en el trenzado de un número determinado de hilos de aluminio, conformando cuerdas de 7, 19, 37 y 61 hilos. Este conjunto de alambres es lo que denominamos un cable flexible. Los conductores eléctricos normalmente están conformados por alambres de aluminio 1350, alambres de aleación de aluminio 6201 y alambres de acero de alta resistencia. La combinación de distintos tipos de alambres y calibres, determina el tipo de producto fabricado.

#### EXTRUSIÓN

Es el proceso de aislamiento del conductor el cual se realiza mediante la aplicación técnica del compuesto de PVC o polietileno.

#### FRACCIONADO

Es el proceso final donde los cables son empacados en longitudes requeridas, o establecidas por las normas, como producto terminado su presentación es en rollos debidamente identificados en sus generalidades.

#### TRATAMIENTO TERMICO

Se realiza solo a los conductores de aleación de aluminio 6201 con contenido de sílice y magnesio (cables AAAC y ACAR). Los carretes se introducen al Horno de Tratamiento Térmico donde se procede a dar cocimiento a una temperatura de 160° C por ocho Horas con la finalidad de incrementar la resistencia mecánica y la conductividad eléctrica del producto terminado.

# ANEXOS

**Aleaciones de la serie 6000.**

Los diagramas de equilibrio de la superficie líquida del sistema ternario aluminio-magnesio-silicio se muestran en la figura (1), la curva solidus en la figura (2) y los límites de solubilidad en la figura (3). Para King Frank (1992) el aluminio y el constituyente binario  $Mg_2Si$  forman un sistema cuasi binario que divide al sistema ternario en dos partes. En el sistema cuasi binario, los dos componentes forman un eutéctico a  $595^\circ C$  que contiene 8,15% de Si y existe una solubilidad del sólido considerable en el extremo del aluminio que alcanza un 0,85% de Mg, 1,10% de Si a la temperatura eutéctica; ambos sistemas ternarios parciales son eutectíferos. El aluminio, silicio y  $Mg_2Si$  forman un eutéctico ternario que contiene 4,97% de magnesio, 12,95% de silicio que se solidifica a  $555^\circ C$  mientras que el aluminio,  $Mg_2Si$  y  $Mg_2Al_3$  forman otro a 33,2% de magnesio, 0,37% de silicio, que solidifica a  $451^\circ C$ . El campo primario del  $Mg_2Si$  tiene forma de cuña.

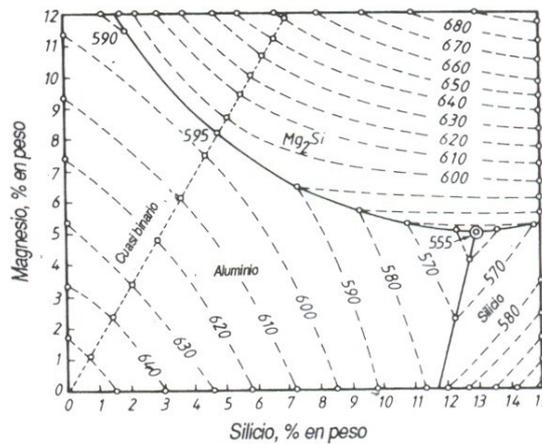


Fig. 1 Aluminio-magnesio-silicio: liquidus

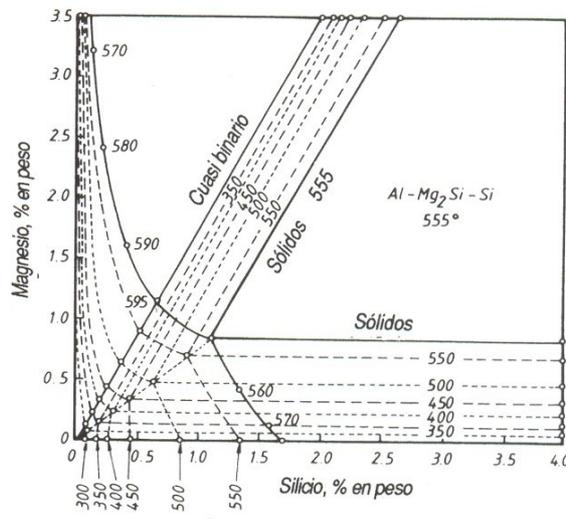


Fig. 2 Aluminio-magnesio-silicio: solidus

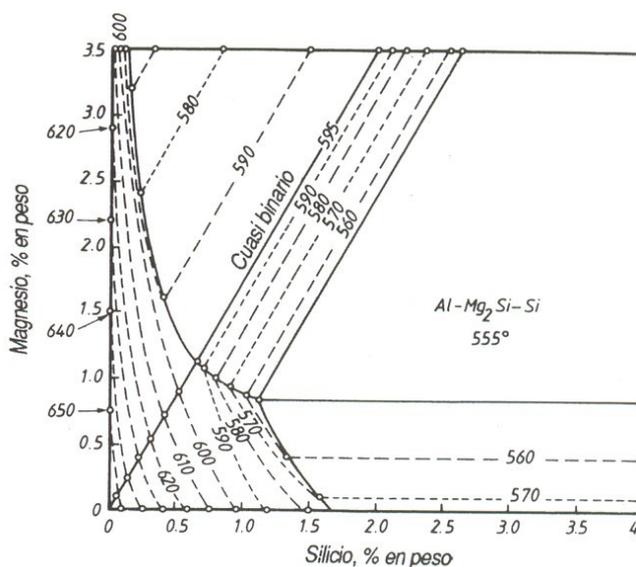


Fig. 3 Aluminio-magnesio-silicio: límites de solubilidad.

El campo de una sola fase, sobre el cual el aluminio es el único constituyente que se solidifica, termina a 15,3% de magnesio y 0,1% de silicio a 415%. En la tabla (3) se dan las coordenadas completas de los puntos invariantes.

Tabla 3. Coordenadas de puntos invariantes en estas aleaciones

Descripción	Fases sólidas presentes	Temp. °C	Composición del participante			
			líquido		sólido rico en aluminio	
			Mg%	Si%	Mg%	Si%
Eutéctico cuasi binario	Al, Mg <sub>2</sub> Si	595	8.15	4.75	1.13	0.67
Eutéctico ternario	Al, Mg <sub>2</sub> Si, Si	555	4.97	12.95	0.85	1.10
Eutéctico ternario	Al, Mg <sub>2</sub> Si, Mg <sub>2</sub> Al <sub>3</sub>	451	33.2	0.37	15.3	0.1

### **Límites de solubilidad del sólido**

El conocimiento de los límites de solubilidad del sólido en este sistema aleado tiene una importancia muy grande debido al amplio intervalo de solubilidad a lo largo de la línea cuasi binaria y una notable disminución en la solubilidad del sólido con la temperatura hace que estas aleaciones sean susceptibles al tratamiento térmico para mejorar las

propiedades mecánicas. Por consiguiente, es esencial conocer el modo en que un exceso de magnesio o silicio, sobre el que se necesita para formar  $Mg_2Si$ , afecta las relaciones.

En la figura ( 3) se han insertado isoterma a intervalos de  $10^{\circ}C$ . En el lado del silicio de la línea cuasi binaria, el vértice del triangulo de tres fases ( $Al + Mg_2Si + Si$ ) se mueve hacia la esquina del aluminio cuando desciende la temperatura, de manera que el intervalo de composiciones, sobre las cuales se depositan ambos constituyentes desde la solución sólida, se amplía a medida que se reduce la temperatura y a  $300^{\circ}C$  se extiende hasta llegar casi a la línea cuasi binaria; las isoterma se acercan mas una a otras y se acercan a la cara aluminio-magnesio del modelo. La solubilidad del  $Mg_2Si$  decrece muy rápido en presencia de magnesio, cuando hay más del magnesio requerido para formar  $Mg_2Si$ .

La reacción entre el magnesio y el silicio esta balanceada y se necesita un exceso ya sea de magnesio o silicio para que complete. Por tanto, es posible que el silicio libre aparezca como microconstituyente en aleaciones cuya composición se extiende a lo largo de la línea cuasi binaria, o que contengan un pequeño exceso de magnesio. La divergencia máxima a partir del equilibrio cuasi binario tiene lugar cerca del 1-2% de silicio, en donde se necesita un exceso de casi 2% de magnesio para eliminar por completo al silicio.

### **La fase $Mg_2Si$**

A condiciones de equilibrio, en aleaciones que contengan un exceso de silicio, el  $Mg_2Si$  aparece como un componente del eutéctico hasta que no se alcance un contenido de magnesio de alrededor del 0,86%, pero la fase rica en aluminio es incapaz de llegar a la saturación durante las condiciones comerciales del vaciado, con el resultado de que el  $Mg_2Si$  aparece con un valor tan pequeño como 0,2% de magnesio. El  $Mg_2Si$  cristaliza en un sistema “antifluorita” ( Fig. 4); las partículas de magnesio ocupan los sitios del flúor, con lo que se obtiene una distribución cúbica simple, mientras que los centros del cubo están alternadamente vacíos (agujeros) y tienen una partícula o un átomo de silicio.

Los “agujeros” en el  $Mg_2Si$  difieren de los vacíos en que pueden existir en la celda unitaria y de los presentes en el aluminio  $\alpha$  después de calentar y templar. Por lo tanto, se espera que se formen zonas y precipitados o compuestos Guinier-Preston cerca de cualquier dislocación presente o formada por la agrupación de vacíos. El análisis

termodinámico de los sistemas binarios de aluminio-magnesio y aluminio-silicio muestran una repulsión del aluminio-magnesio y una atracción del aluminio-silicio. Los precipitados a las zonas pueden así ser coherentes con la matriz y producir endurecimiento en esta última mediante un esfuerzo por coherencia parcial y por dispersión.

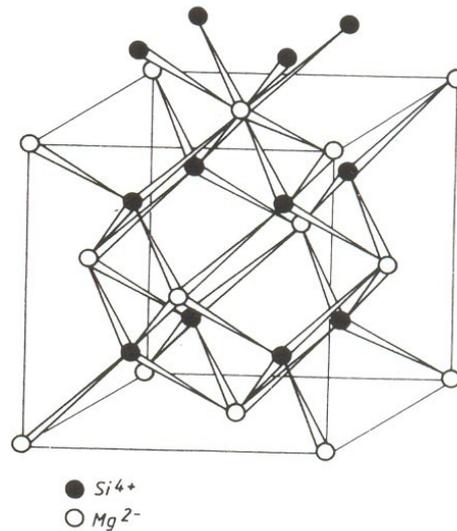


Fig. 4 Estructura “antifluorítica” del Mg<sub>2</sub>Si.

El templado de las aleaciones comerciales de aluminio-magnesio-silicio a partir de temperaturas elevadas, produce una solución sobresaturada de magnesio y silicio en el aluminio  $\alpha$ , pero las agrupaciones sobreviven puesto que la atracción entre el silicio y el magnesio es muy fuerte. Al revenir a alrededor de 175°C los vacíos y los átomos del soluto emigran hacia los lazos de dislocación (o espirales) para formar agrupaciones, zonas y precipitados de Mg<sub>2</sub>Si. El endurecimiento obtenido después del templado y revenido se debe a la dispersión del Mg<sub>2</sub>Si en  $\alpha$ , mientras que el propio  $\alpha$  se endurece por el exceso de silicio o de magnesio comparado con la relación estequiométrica del Mg<sub>2</sub>Si.

En la solución el aluminio, el magnesio y silicio tienden a agruparse para formar juntos moléculas de Mg<sub>2</sub>Si. La solubilidad en sólido del Mg<sub>2</sub>Si en el aluminio se reduce ligeramente por la presencia del silicio en exceso por encima de la relación en radio del Mg:Si = 1.73, pero un exceso de magnesio reduce bruscamente la solubilidad.

El compuesto Mg<sub>2</sub>Si (63.2 % Mg, 36.8 %Si) es cúbico; 12 átomos en la celda unitaria; con el parámetro de celda  $a = 6.35\text{-}6.40 \times 10^{-10}$  m. Este forma isomorfismo con

el  $Mg_2Ge$ ,  $Mg_2Pb$ ,  $Mg_2Sn$ , pero tiene un rango muy estrecho de existencia. Su punto de fusión es de 1360 °K; su dureza Vickers es 4500 Nm/m<sup>2</sup>; su densidad es 1880 kg/m<sup>3</sup>. Sus propiedades eléctricas son las de un semiconductor y la conductividad térmica es 0.234 W/m/°K.

En condiciones de no equilibrio, tales como las producidas por enfriamiento rápido, hay una tendencia a segregación local, mediante la cual las cristales de silicio pueden aparecer en aleaciones donde todo el silicio debería estar en la forma de  $Mg_2Si$ .

La tensión superficial de las aleaciones ternarias disminuye con las adiciones de magnesio y silicio. El magnesio expande la del aluminio y el silicio la contrae; el parámetro de red actual del aluminio con magnesio y silicio en solución es más pequeño que el calculado a partir de la adición de los efectos del magnesio y el silicio.

La resistividad eléctrica muestra una anomalía en la relación Mg: Si = 1.73; a los 750 °K las aleaciones que contienen 1% de Mg + Si tienen resistividades del orden de  $8.6 - 8.8 \times 10^{-8}$  ohm.m, pero la resistividad declina por debajo de los  $8.5 \times 10^{-10}$  ohm.m en la relación Mg:Si = 1.73. La resistividad a temperatura ambiente es relativamente baja; valores del orden de  $3-3.2 \times 10^{-8}$  ohm.m son dados para aleaciones con 1-1.5%  $Mg_2Si$ , en la condición de envejecido completo, y tan bajo como  $2.8-2.9 \times 10^{-8}$  ohm.m para material templado. Los excesos de silicio incrementan la resistividad y los excesos de magnesio la disminuyen; sus efectos no son más que el 5%. El coeficiente de temperatura de resistividad es aproximadamente  $3.6-3.8 \times 10^{-12}$  ohm.m/°K. Las aleaciones son superconductoras por encima de 1.3 °K.

El módulo de elasticidad de aluminio no es cambiado mensurablemente por la adición de  $Mg_2Si$ ; aleaciones con exceso de silicio muestran módulos más altos, aleaciones con exceso de magnesio ligeramente más bajos.

Las velocidades de difusión del magnesio o del silicio de aleaciones que contienen  $Mg_2Si$ , con o sin exceso de silicio, se disminuyen mediante la presencia simultánea de los dos elementos, pero la velocidad permanece proporcional al gradiente de concentración.

En la solidificación unidireccional del eutéctico cuasibinario la relación de orientación es:

$$(100)_{\text{Mg}_2\text{Si}} \parallel (100)_{\text{Al}}; [011]_{\text{Mg}_2\text{Si}} \parallel [001]_{\text{Al}}$$

La cual es la misma como en la precipitación del  $\text{Mg}_2\text{Si}$  a partir de solución sólida.

En endurecimiento por envejecimiento la precipitación comienza con la formación de zonas GP esféricas. Muy temprano estas zonas se alargan en la dirección [100] de la matriz y asumen una forma de aguja. Un  $\beta''$  monoclinico, con  $a = b = 6.16 \times 10^{-10}$  m,  $c = 7.1 \times 10^{-10}$  m,  $\alpha = \beta = 90^\circ$ ,  $\gamma = 82^\circ$ , con relación de orientación:

$$(111)_{\beta''} \parallel (100)_{\text{Al}}; [110]_{\beta''} \parallel [001]_{\text{Al}}$$

Esta estructura contiene un gran número de vacancias. El tamaño estimado de las partículas precipitadas en esta fase varía apreciablemente: de 160 a  $2000 \times 10^{-10}$  m de longitud y de 15 a  $60 \times 10^{-10}$  m en diámetro, con su número que va de  $2 \times 10^{12} / \text{mm}^3$  a  $3 \times 10^{15} / \text{mm}^3$ . Estas partículas ejercen una fuerza compresiva en la matriz, la cual puede alcanzar el punto de cedencia.

Las agujas crecen para convertirse en barras y eventualmente en placas de  $\text{Mg}_2\text{Si}$ . La dureza máxima es alcanzada justo antes de que las placas se formen. El tamaño máximo de las partículas antes del ablandamiento ha sido estimado en los  $0.03 \mu\text{m}$ , el cual es 10 veces más pequeño que en otras aleaciones endurecibles por envejecimiento. Existe una fase intermedia  $\beta'$ , semicoherente con la matriz. Una red cúbica con  $a = 6.42 \times 10^{-10}$  m, o una hexagonal, con parámetros  $a = 7.05 \times 10^{-10}$  m,  $c = 4.05 \times 10^{-10}$  m y una relación de orientación

$$(001)_{\beta'} \parallel (100)_{\text{Al}}; [100]_{\beta'} \parallel [001]_{\text{Al}} \text{ o } [001]_{\text{Al}}$$

pero ni la estructura es consistente con los cambios de volumen hallados. La fase final  $\text{Mg}_2\text{Si}$  se forma con una relación de orientación:

$$(100)_{\text{Mg}_2\text{Si}} \parallel (100)_{\text{Al}}; [110]_{\text{Mg}_2\text{Si}} \parallel [001]_{\text{Al}}$$

Es nucleada en la interfase matriz –  $\beta$  y crece a expensas de  $\beta'$ . La energía de activación para la zona de formación está dada como 0.37 eV, para precipitación como 0.9 V. Las energías de activación en el paso de envejecimiento son similares.

La temperatura crítica por encima de la cual las zonas no se forman está por el orden de los 500 °K, pero los temple lentos la bajan apreciablemente, como lo hace el hierro.

Solo parte del endurecimiento se debe a la resistencia al movimiento de las dislocaciones a través de las zonas. Algunos autores reportan dos máximos de dureza, pero hay fuertes indicios que los dos máximos son para ser hallados solamente en aleaciones con exceso de silicio y que uno de ellos es debido a la precipitación del silicio en lugar de  $Mg_2Si$ . El silicio en exceso también aumenta la densidad de las zonas durante el envejecimiento, aumentando la supersaturación de la matriz, y así aumenta el efecto del endurecimiento.

### **Aleaciones Aluminio-Magnesio-Silicio**

Los componentes principales de las aleaciones son el magnesio y el silicio para formar  $Mg_2Si$ . Hay a menudo un corrector férrico como el manganeso o el cromo, y ocasionalmente pequeñas cantidades de cobre o zinc para aumentar la fuerza sin pérdida substancial de la resistencia a la corrosión; el boro en conductores para remover el titanio y el vanadio; el zirconio o titanio para controlar el tamaño de grano. El plomo y el bismuto se añaden algunas veces para aumentar la maquinabilidad, pero son menos efectivos en las aleaciones sin magnesio.

El rango de la composición de las aleaciones ahora en uso es:

Tabla 4. Rango de composición química de las aleaciones

Mg 0.2-1.5	Cu 0-2.0
Si 0.2-2	Zn 0-2.5
Mn 0-1.5	B, Ti, Zr 0-0.3
Cr 0-0.5	Pb, Bi, 0-1

La proporción apropiada para  $Mg_2Si$  es  $Mg/Si = 1.73$  pero esto es imposible para lograr con tolerancias ordinarias de operación; así que la mayoría de las aleaciones tienen un exceso de magnesio o de silicio. El exceso de magnesio conduce a mejorar la resistencia a la corrosión, pero fuerza y formabilidad más bajas; el silicio en exceso

produce elevadas fuerzas sin pérdida de formabilidad y soldabilidad, pero alguna tendencia a la corrosión intergranular.

La estructura de las aleaciones es relativamente simple: el principal constituyente es el  $Mg_2Si$ , el cual en la condición de térmicamente tratada está en solución y al que se debe el endurecimiento por envejecimiento luego del envejecimiento artificial. Si suficiente cobre y silicio están presentes, puede ser reemplazado al menos parcialmente por  $Cu_2Mg_8Si_6Al_5$  el cual producirá algún endurecimiento también con envejecimiento natural. El hierro se puede presentar como  $FeAl_3$ ,  $FeAl_6$ ,  $Fe_2SiAl_8$  o  $FeMg_3Si_6Al_8$  en aleaciones sin manganeso y cromo; en aleaciones que llevan manganeso y cromo se combina con ellos. El zinc está en solución sólida; el boro, el titanio y el zirconio son raramente añadidos en suficientes cantidades para producir compuestos visibles.

El parámetro reticular de las aleaciones comerciales se controla mediante los contenidos de magnesio y silicio. El cobre, el manganeso, cromo y zinc están presentes usualmente en cantidades muy pequeñas para tener un efecto medible; el hierro, titanio, boro, etc., no tienen un efecto sustancial. En la mayoría de las aleaciones la cantidad de elementos a parte del magnesio y el silicio están por debajo del 1%; así muchas propiedades no difieren sustancialmente de aquéllas en las aleaciones ternarias o incluso del aluminio puro. La tensión superficial, la densidad, la expansión térmica, cambios de longitud en el envejecimiento, calor específico, la contracción en congelamiento y temperatura supraconductiva son errores dentro de la determinación de los valores correspondientes para las aleaciones de alta pureza o aluminio puro. Las conductividades térmicas unas 10-20% más bajas que para el aluminio puro y por lo tanto del orden de  $20 \times 10^{-2} \text{ W/m}^\circ\text{K}$ , están dadas para el rango 350-750 °K.

La resistividad eléctrica es ligeramente más alta que en las aleaciones ternarias de aluminio – magnesio – silicio y por el orden de  $3.0 \times 10^{-8} \text{ ohm.m}$  (50-55% IACS) para aleaciones con 0.4-0.5% Mg y un ligero exceso de silicio, en la condición de envejecido artificialmente. Cantidades mayores de magnesio, manganeso y cobre reducen esta conductividad, la cual es algo más baja en el temple envejecido artificialmente, pero puede alcanzar valores de 55-60% IACS en el material templado. Las aleaciones con bajo contenidos de magnesio y silicio tienen mejor conductividad

pero más bajas resistencias. Una alta conductividad (63% IACS) se puede obtener también con un exceso pronunciado de magnesio y tratamientos de temple para precipitar todo el  $Mg_2Si$ , pero las propiedades mecánicas son pobres. Incrementando el hierro o el silicio de 0.2 a 2% disminuye la conductividad por un 10%. El cromo, manganeso y especialmente el titanio, vanadio y el zirconio reducen marcadamente la conductividad eléctrica, adiciones de boro, las cuales precipitan estos elementos como boruros, son usadas para removerlos en el material conductor. El litio y el calcio para enlazar el exceso de silicio y así mejorar la conductividad fueron tratados, pero no tan exitosamente.. El coeficiente de temperatura de resistividad es el mismo que en las aleaciones ternarias, y por el orden de  $3.7 \times 10^{-10}$  ohm.m/°K. Las aleaciones aluminio-magnesio-silicio son las aleaciones más resistentes a chispas; las adiciones de berilio aumentan la resistencia. Las aleaciones preparadas con 99.99% Al, luego de la electrodeposición y el anodinado, tienen reflectividades ligeras por el orden del 85%.

Las aleaciones comerciales, especialmente si contienen manganeso o cromo pueden presentar resistencias 10% algo más altas. Las proporciones de tensión altas llevan a propiedades mejores. Las aleaciones completamente endurecidas presentan cierta tendencia a fracturas intergranulares en pruebas de tensión, pero aleaciones de manganeso reducen esta tendencia. Los precipitados de silicio, como placas, pueden ser los responsables para este carácter quebradizo. La resistencia a la compresión es prácticamente la misma que a la tensión incluso a temperaturas elevadas. La resistencia al cizallamiento está por el orden de los 70% de la tensión y no es afectada sustancialmente por las temperaturas subcero o radiación nuclear. La resistencia al impacto por Charpy está alrededor de  $10-20 \times 10^4$  N/m para fundiciones y alrededor de  $30-40 \times 10^4$  N/m para productos forjados. El módulo de elasticidad está en el orden de  $65 \text{ GN/m}^2$ . La sensibilidad de la muesca es muy baja.

A bajas temperaturas la resistencia se incrementa, para alcanzar valores de 70°K superiores al 80% de la temperatura ambiente, sin pérdida apreciable en la ductilidad o la dureza de fractura. Temperaturas más elevadas disminuyen la resistencia y aumentan la ductilidad; el descenso es menos rápido que en la mayoría de las aleaciones y las aproximaciones del aluminio puro. El calentamiento más rápido que el que puede dilatar al metal reduce las propiedades.

Una característica importante de las aleaciones, la cual es muy valiosa en sus usos como cables eléctricos, es que las aleaciones pueden ser sobre envejecidas sin pérdida de la resistencia a la corrosión y así son bastante insensibles a largas exposiciones a temperaturas ligeramente por encima de la normal o a cortas exposiciones a temperaturas en el rango de 350-600°K. Así, los cables eléctricos pueden ser sobrecargados y los cables congelados pueden ser descongelados por una sobretensión de corriente para calentarlos, sin riesgo de pérdida permanente en la resistencia. Sin embargo exposiciones a altas temperaturas intermitentes son acumulativas y eventualmente conducen al ablandamiento.

El principal factor controlante de las propiedades mecánicas es el contenido de  $Mg_2Si$ , pero todas las otras adiciones afectan las propiedades. Un exceso de magnesio aumenta la resistencia, especialmente en el temple severo pero disminuye el ablandamiento en el temple y la formabilidad. El silicio en exceso, por otro lado, aumenta ambas resistencias y la ductilidad. El hierro tiene un efecto moderado fortaleciendo por encima de 0.8-0.9%, pero con una pérdida severa de ductilidad, especialmente en fundiciones; cuando es corregido con manganeso, algún incremento en la dureza puede resultar. El manganeso, el cromo, el titanio y el zirconio endurecen ligeramente a las aleaciones. El cobre aumenta apreciablemente la resistencia. El níquel no mejora las propiedades mecánicas.

La homogenización de los lingotes mejora la laborabilidad en caliente, especialmente si es seguida por un enfriamiento lento para precipitar y esferoidizar el  $Mg_2Si$ . El material con partículas gruesas de precipitado de  $Mg_2Si$  tiene mejor deformabilidad en caliente que un material en el cual haya una fina distribución de precipitados que dificulta el movimiento de las dislocaciones. La homogeneización del paso dos con el segundo paso tan alto como 850 K produce la homogeneidad máxima. El refinamiento de grano conduce a la superficie mejorada de extrusiones, pero más baja deformabilidad, un pequeño espacio interdendrítico mejora la deformabilidad.

**. Influencia de los aleantes y refinadores de grano en las aleaciones de la serie 6000.**

Boro (B): Combinado con otros metales forma boruro, tal como  $Al_2$  y  $TiB_2$ . El boruro de titanio forma sitios de nucleación estable para que interactúe con el refinador de grano, así como el  $TiAl_3$  en aluminio fundido. Los boruros metálicos reducen la vida de las piezas en las operaciones de mecanizado. El aumento en cantidad de estos compuestos forma inclusiones que disminuyen notablemente las propiedades mecánicas y la ductilidad. Sin embargo el tratamiento del Boro contenido en aluminio forma elementos peritéticos que en práctica mejoran la pureza y por lo tanto la conductividad eléctrica.

Cromo (Cr): Es adicionado normalmente en baja concentraciones para favorecer un envejecimiento a temperatura ambiente, ya que a altas temperaturas éste es inestable, por lo que ocurre la germinación y el crecimiento de grano. El cromo forma el compuesto  $CrAl_7$ , el cual expone al límite extremo la solubilidad del estado sólido es por lo tanto muy usado para evitar la tendencia del crecimiento de grano.

Silicio (Si): Un exceso de silicio propicia la formación de  $Mg_2Si$ , la que contribuye al endurecimiento de la aleación, trayendo como consecuencia un aumento en la resistencia a la tensión. Se aumenta la velocidad de extrusión a medida que aumenta la proporción de silicio. El exceso de silicio debe ser moderado (20%) para no perjudicar la plasticidad.

Magnesio (Mg): Es el elemento fundamental empleado para otorgar resistencia y dureza en el tratamiento térmico de las aleaciones de Al-Si. Las aleaciones binarias de Al-Mg son ampliamente usadas en aplicaciones que requieren un acabado superficial brillante y resistencia a la corrosión, así como una atractiva combinación de resistencia y ductilidad. En esta aleación el agente endurecedor es el siliciuro de magnesio ( $Mg_2Si$ ), por esto es deseable que el magnesio no sobrepase el 1% en peso y no exceda nunca de la relación  $Mg/Si = 1,73$ ; ya que un pequeño exceso de magnesio reduce fuertemente la solubilidad del  $Mg_2Si$ . El magnesio dificulta el vaciado del metal debido a su tendencia a formar escoria. Las aleaciones de aluminio al magnesio son las más livianas del grupo del aluminio, tienen buena ductilidad, son fáciles de maquinar y poseen una alta resistencia a la corrosión.

Manganeso (Mn): este elemento mejora la resistencia a la corrosión y la ductibilidad en pequeñas proporciones. Pero en mayores cantidades proporciona la formación de partículas grandes, lo que ocasiona la disminución de la resistencia.

Hierro (Fe): El hierro es una impureza del aluminio, pero su tenor relativamente alto ocasiona que se considerado como un elemento de aleación. El aumento del contenido de hierro implica la disminución substancial de la ductilidad. El hierro reacciona para formar una fase de compuestos insolubles en las aleaciones de aluminio fundidas; las más comunes son  $\text{FeAl}_3$ ,  $\text{FeMnAl}_6$  y  $\alpha\text{AlFeSi}$ ; estas fases insolubles son las responsables de mejorar la resistencia, especialmente a elevadas temperaturas. Además, participa en la formación de fases con manganeso, cromo y otros elementos. Se utiliza un 0,1% para mejorar la maquinabilidad de las aleaciones. Su influencia en las propiedades del aluminio se alista a continuación:

- a) El hierro aumenta la resistencia a la tracción y la dureza en pequeñas cantidades, así como también la fluencia y el alargamiento.
- b) La baja solubilidad del hierro en el aluminio provoca la formación de partículas incoherentes en forma de  $\text{AlFe-Si}$  que, dependiendo de su tamaño, actuarán como iniciadores de poros o dispersores de la deformación plástica.
- c) En las aleaciones de la serie 6000 es el exceso de silicio quién más perjudica la conductividad y el hierro es usado como corrector de esta propiedad.
- d) La resistencia a la corrosión se ve seriamente disminuida por la presencia de hierro.
- e) Como el hierro es prácticamente insoluble en el aluminio forma cristales duros y frágiles que ocasiona la fragilización del material.

Titanio (Ti): Usado ampliamente como refinador de grano en las aleaciones de aluminio coladas, usualmente en compañía de cantidades pequeñas de boro. Este disminuye la conductividad térmica, mejora la resistencia a la tensión y la ductibilidad.

Cobre (Cu): A temperatura ambiente la solubilidad del cobre en el aluminio es de 0,1%, mientras que a la temperatura eutéctica  $527^\circ\text{C}$  la solubilidad es de 5,7%, esta variación de la solubilidad con la temperatura permite que la aleación Aluminio-Cobre sea susceptible al tratamiento térmico. El cobre aumenta la corrosión con concentraciones que van de 0,3 a 1,0%, pero a mayores cantidades disminuye la resistencia a la corrosión, esto se debe a la formación de pares galvánicos que se

encuentran alrededor de las partículas de cobre constituyente y la matriz de aluminio, en presencia de humedad.

La adición hace aumentar progresivamente la resistencia y la dureza de la aleación hasta un 12% de cobre, por encima de este porcentaje la aleación se hace quebradiza.

### **Proceso de desgasificado.**

Durante el proceso de desgasificado, el gas es inyectado hacia el interior del metal líquido a un flujo constante, el gas forma dentro burbujas, que ascienden a la superficie y escapan a la atmósfera. La presión parcial del Hidrógeno en la burbuja como este está formado con el metal, es cero, pero cuando pasa a través del baño hacia la superficie, el Hidrógeno disuelto en el metal difunde hacia el interior de la burbuja hasta que la presión parcial de la misma y el metal estén en equilibrio o hasta que la burbuja flote hasta la superficie.

El desgasificado permite que el nivel de hidrógeno disuelto en el metal sea reducido, el nivel de limpieza del metal sea incrementado por la reducción del número de inclusiones y los niveles de metales alcalinos se reduzcan en la aleación final <sup>(7)</sup>. El contacto entre las burbujas de gas y el metal líquido causa una reacción físico-química que se traduce en una reducción del hidrógeno disuelto (difusión) y la captura de las inclusiones sólidas (flotación)

Si la temperatura es bastante elevada, sobre los 700°C, el Nitrógeno se comporta inerte reaccionando con el aluminio; de lo contrario por debajo de 970°C, si la aleación contiene magnesio, podría formarse nitruro de magnesio permaneciendo en suspensión por ser insoluble.

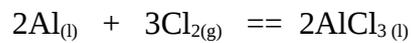
### **Desgasificado con nitrógeno.**

Una de las formas de reducir la cantidad de cloro utilizada es diluyendo con gas inerte como el hidrógeno, helio, argón, etc. El nitrógeno es sumamente barato para ser considerado en las operaciones de desgasificado.

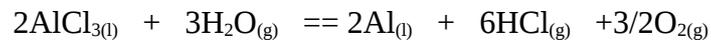
Se ha demostrado que la mezcla Cloro-Nitrógeno puede ser empleada con una concentración de cloro tan baja como de 5 a 10% de cloro.

### **Desgasificado con cloro.**

El desgasificado con este gas es y ha sido el tratamiento estándar para el control de calidad del metal. El cloro reacciona con el aluminio para formar cloruro de aluminio, según la siguiente reacción:



El cloruro de aluminio no se observa en las operaciones de desgasificado, pero si se observa fácilmente los productos que se forman en la reacción de este con el agua de la atmósfera caliente, como en la siguiente reacción:



### **Filtración.**

La filtración consiste en hacer pasar un fluido a través de un material filtrante con el fin de retener las impurezas sólidas que se encuentran en suspensiones. La filtración es un ejemplo típico de operación de contacto fluido-partícula. Hay dos tipos de mecanismos de filtración, dependiendo del tamaño de la partícula o inclusión a remover y del tamaño de las aberturas del material filtrante: filtración superficial (filtración tipo torta) y filtración interna (filtración de capa profunda).

Los regímenes deseables de concentración en volumen, tanto para el sistema de filtración de capa profunda como para la filtración de tipo torta en los sistemas acuosos son:

- Fracción de inclusiones  $> 2000$  ppm tipo torta.
- Fracción de inclusiones  $< 500$  ppm capa profunda.

Se cree que estos regímenes son aproximadamente correctos para la clarificación del aluminio fundido, dependiendo del tamaño de la inclusión y su morfología.

La filtración de capa profunda es particularmente útil en capturar inclusiones pequeñas ( $< 20$  micrómetros) debido a que su efectividad esta basada en los efectos superficiales mejorados por la elevada área superficial media del filtro de capa.

Desde el punto de vista de la naturaleza estructural de los filtros, los materiales más conocidos empleados en la filtración interna o de capa profunda son: partículas cerámicas sin enlazamiento, partículas de cerámica enlazadas o aglutinadas, las cerámicas monolíticas, espumas de cerámica. La efectividad de estos materiales como filtro dependen de muchos factores tales como: limpieza del metal, rango del tamaño de inclusiones, velocidad superficial del metal líquido, morfología de las inclusiones y la estructura del filtro en general.

### **Filtración mediante espuma de cerámica**

Las espumas de cerámica son filtros del tipo cartucho (uno por colada) en contraste con los otros y tienen la ventaja de que pueden ser reemplazados cuando se consumen sin mucha pérdida de tiempo.

Las espumas cerámicas pueden ser divididas en dos categorías: La espuma de liga o aglomerada, esta normalmente asociada con las coladas de aluminio primario. La espuma fundida, es calentada a más alta temperatura, así que la estructura cuenta con un enlace fusionado más que una simple ligadura o aglomeración. Aquí la temperatura de operación límite del filtro depende de la espuma del material cerámico.

La espuma de cerámica presenta una distribución de bloques porosos homogéneos, creando una serie de pasajes tortuosos, los cuales son las claves para una alta eficiencia de profundidad de filtrado. Ellos mejoran la separación de las partículas y películas de óxidos ya que crean los medios por los cuales las inclusiones son extraídas del líquido que entra sobre la superficie del filtro y además producen puntos de fuertes remolinos en los cuales los no metálicos son concentrados. La estructura porosa es una réplica de cerámica de una espuma de poliuretano de poros abiertos. Esta estructura exhibe una fracción alta de volumen vacío, que van desde 85 a 90% dependiendo del tamaño de los poros y distribución de poros. Cada pulgada cúbica de la espuma de cerámica presenta un área superficial de filtrado de 10000 pulgadas cuadradas.

Las inclusiones son atrapadas por todo el filtro; sin embargo, como podría esperarse para un filtrado de capa profunda, ellas se concentran más en el tope que en tope o centro o fondo. Esto trae dos características importantes al filtro de espuma cerámica: primero, el tamaño de partículas de los no metálicos que atrapa el filtro es más pequeño en comparación a los poros o tamaño de celda de los espacios cerámicos y segundo, no todas las partículas atrapadas están fuertemente adheridas a las paredes del filtro.

### **Filtración superficial**

La filtración del tipo torta o filtración superficial es un proceso dinámico provocado por un incremento del espesor de la torta mientras la filtración progresa.

Este método resulta del desarrollo de una capa superficial de inclusiones separadas sobre el material de base o substrato (ver figura 11). La torta formada es responsable y además una consecuencia de la captura de partículas. En este tipo de

filtración, a diferencia de la filtración de capa profunda o filtración interna, no se presenta la intrusión o penetración de partículas dentro del material filtrante.

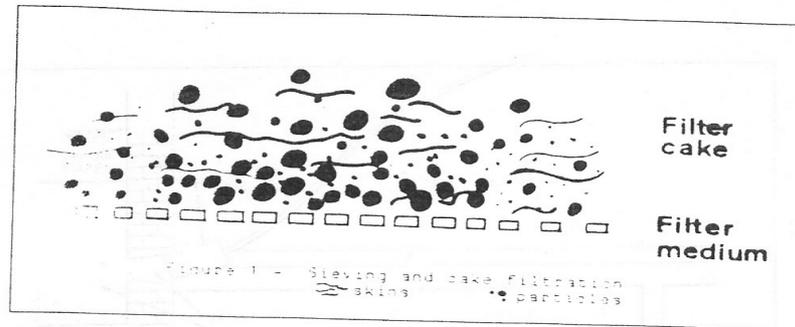


Fig.-8.-Filtración por tamizado y tipo torta.  
Figura 11. Filtrado por tamizado y tipo torta.

Este método es útil cuando: la concentración de inclusiones es alta, el espacio del piso de la planta de colada esta limitado, puede tolerarse características de rendimiento transitoria y de no requerirse la captura de inclusiones extremadamente pequeñas.

La concentración de inclusiones en el fundido es una consideración particularmente importante, ya que permite el desarrollo de la torta y mejora la filtración.

El mecanismo de filtración por tamizado, el cual usa filtro tejido de fibra cerámica o malla de fibra de vidrio, es un ejemplo típico de la filtración superficial que forman torta. Este tipo de filtro ha estado tradicionalmente asociado con la industria del aluminio, donde la fibra de vidrio es usada como un filtro grueso y estabilizador de flujo. En años recientes la tecnología de fibras de cerámica ha progresado marcadamente y ahora se cuentan con fibras de alta temperatura. Las fibras son hechas de aluminio – boro – silica. Cuando son tejidas en mallas estas pueden ser usadas como filtro en un amplio rango de aplicaciones.

Una condición para que se realice la filtración tipo torta es que la razón del diámetro de la inclusión,  $d_i$ , al diámetro de la abertura,  $d_o$ , debe ser mayor que 1,  $d_i/d_o > 1$ . En este sentido, la captura de partículas puede ser considerada local y es casi

exclusivamente determinada por la naturaleza de la torta formada. Un entendimiento de esta torta, entonces, es esencial para la operación y diseño de filtros apropiados.

A medida que los sólidos separados se van depositando en la interfase de la malla que sirve de substrato, el diámetro de abertura efectiva es progresivamente disminuido. Las inclusiones de diámetros más pequeñas pueden ser ahora capturadas en las capas subsiguientes del sólido separado, formando así la denominada torta. El diámetro de abertura efectiva de la torta y la fracción de vacío disminuyen, mientras la tortuosidad de la torta se incrementa, mejorando por lo tanto la captura de partículas, este proceso se muestra en la figura 11.

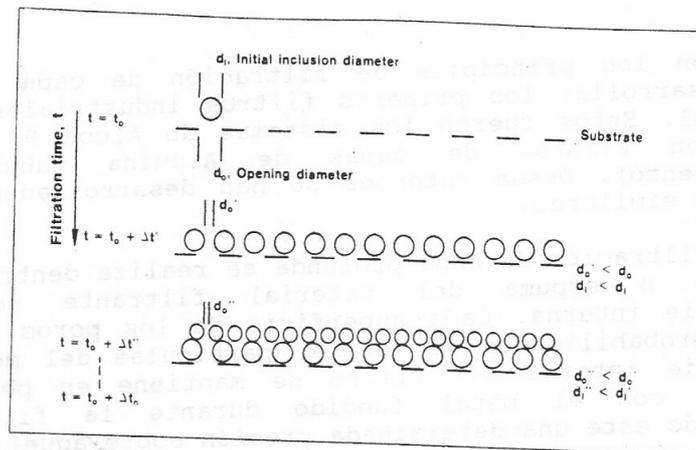


Figura 12. Desarrollo progresivo del sistema de filtración tipo torta.

Los filtros de tortas pueden ser ampliamente clasificados en dos tipos: no comprimible y comprimibles.

Cualitativamente, una torta incompresible es aquella en la cual la fracción de vacío de la torta es esencialmente invariable en el tiempo dentro de los límites de la presión de filtración. Los cambios en la resistencia al flujo de metal impartido por la torta incompresible son causados principalmente por el incremento en el espesor de la torta.

Las tortas comprimibles se desarrollan cuando los sólidos separados son altamente deformables y representan una distribución amplia de tamaño. Los espesores

de torta podrían además exhibir comprimibilidad sobre un amplio rango de presiones de operación.

### **Filtración interna**

La filtración de capa profunda del aluminio líquido o filtración interna, tiene una eficiencia de filtrado mucho mayor que la del tipo superficial o torta. La filtración de capa profunda se realiza dentro de los gránulos o espuma de material filtrante sobre su superficie interna. Cada superficie de los poros internos tienen probabilidades de retener partículas del metal. La superficie interna del filtro se mantiene en permanente contacto con el metal fundido durante la filtración, ejerciendo este una determinada presión sobre aquel.

La filtración de capa profunda o filtración profunda del aluminio líquido, opera más eficientemente cuando el diámetro efectivo de las inclusiones es pequeño, y la concentración de las inclusiones están realmente diluidas.

El tamaño de la inclusiones es un parámetro extremadamente importante para correcta operación del filtro, ya que debe ocurrir la intrusión de la inclusión en las capas del filtro para una correcta eficiencia. Aquí la formación de torta es indeseable debido a que provoca el incremento exponencial de la altura de metal y se necesita reemplazar prematuramente el filtro de capa.

En general, el transporte de la partículas puede ocurrir por choque, intercepción, sedimentación, difusión y efectos hidrodinámicos.

Mientras que las partículas que quedan adheridas al material filtrante pueden ser debido a las fuerzas desarrolladas a través de la presión, adhesión química o efecto de Van der Waals.

La predominancia relativa de cada uno de los mecanismos es función del tipo de partícula y tamaño, y de la velocidad de entrada del líquido, así como también de la temperatura y características del agente filtrante. Se cree que el choque es un mecanismo de transporte dominante en la filtración del aluminio, y la presión/fuerza de

---

Van der Waals son los responsables de la adherencia o fijación de las partículas en el material filtrante.

Para los filtros de capas profundas, del tipo granular y celular ( no de espuma de cerámica), las inclusiones se depositan encima de los granos del material filtrante debido a la difusión, intercepción directa, gravedad y /o fuerzas superficiales. El atrapamiento mecánico es el responsable fundamental de la filtración de inclusiones mayores de 30 micrómetros. Mientras que las fuerzas superficiales, se cree que son las responsables de la retención de las inclusiones menores de 30 micrómetros. El modo fundamental de transporte de inclusiones menor de 30 micrones a la superficie granular del medio filtrante, es debido a la dinámica de fluido; mientras que las fuerzas superficiales son responsables de la retención de las inclusiones.

En un filtro de capa profunda las inclusiones son dispersadas a través de parte o todo su volumen (profundidad). De esta manera se tiene la ventaja de tener una gran área superficial para el atrapamiento y se pueden retener partículas mucho más pequeñas que los mismos poros de las capas del filtro. Industrialmente, por lo tanto, un filtro de capa profunda (de partícula sin enlazamiento), tiene una vida más larga y es idealmente usado para operaciones de colada continua.

En el caso de la filtración con espuma de cerámica, las fuerzas más importantes de transporte de inclusiones son la intercepción directa, inercial y las fuerzas hidrodinámicas. Mientras que su adherencia en los sitios de capturas se debe a las fuerzas de Van der Waals.

Las partículas o agregados de partículas se podrían desprender de la superficie del filtro si se incrementan los esfuerzos de cizallamiento. Estos son causados por un incremento repentino de la velocidad del flujo, por contracorriente o por el modo de bombeo del flujo, así como también por el movimiento repentino del propio medio filtrante.

Un mayor mezclado y dispersión dentro del filtro es generalmente interpretado como una mejor probabilidad de transporte de inclusiones a la superficie interna del filtro. Sin embargo, un gran mezclado no debe considerarse como una elevación de la eficiencia del filtrado, debido a que la dispersión es solamente responsable por el

transporte de las inclusiones a la superficie del filtro, mientras que la topografía y la química del filtro son los factores que controlan la retención de inclusiones en la superficie del filtro. Consecuentemente, el mezclado contribuye al primer paso en esta serie de fenómenos de adhesión de inclusiones.

## DENOMINACIONES DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO SEGÚN SU PROCESO

### DENOMINACIÓN DE LOS ESTADOS BÁSICOS DEL PROCESO

#### **F: Bruto de fabricación**

Aplicado al proceso de fabricación de los semi-productos en el que no existen controles especiales sobre las condiciones térmicas o deformación en frío empleados. No hay valores establecidos para las características mecánicas.

#### **O: Recocido**

Aplicado a los semi-productos para obtener el estado más bajo de resistencia.

#### **H: Acritud (Generalmente estirado).**

Aplicado a semi-productos cuya resistencia ha aumentado mediante deformación en frío, con o sin tratamiento térmico complementario para conseguir alguna reducción de las características mecánicas.

#### **W: Tratamiento térmico de solución y temple**

Es un estado aplicado únicamente a las aleaciones que maduran espontáneamente a temperatura ambiente después del tratamiento a solución y temple. Este estado solo utilizará cuando se indica el tiempo del madurado natural. Por ejemplo W 1/2 hora.

#### **T: Tratamiento térmico de endurecimiento estructural para producir estados distintos F, O y H**

A semi-productos en los que se aumenta su resistencia mecánica mediante tratamiento térmico con o sin acritud suplementaria, para obtener estados estables. La letra "T" va siempre seguida de uno o más dígitos.

- **SUBDIVISIONES DE LOS ESTADOS BÁSICOS DE TRATAMIENTO DEL ALUMINIO**

#### **1. SUBDIVISIÓN DEL ESTADO H: ACRITUD**

##### **1.1. La primera cifra que sigue a la H indica la variación específica de las operaciones básicas del proceso según:**

#### **H: Acritud solamente**

Aplicado a los semi-productos los cuales son endurecidos por deformación plástica en frío solamente hasta obtener la resistencia mecánica deseada, sin tratamiento térmico complementario.

#### **H2: Acritud y recocido parcial**

Aplicado a los semi-productos que son endurecidos por deformación plástica en frío hasta obtener una resistencia mecánica superior a la deseada, la cual se obtiene posteriormente mediante un tratamiento térmico de recocido parcial. En este estado, para un mismo nivel de resistencia mecánica que el H, presenta un mayor alargamiento.

### **H3: Acritud y estabilizado**

Aplicado a los semi-productos que son endurecidos por deformación plástica en frío y cuyas características mecánicas han sido estabilizadas posteriormente por un tratamiento térmico a baja temperatura. La estabilización generalmente disminuye la resistencia mecánica y aumenta la ductilidad. Esta denominación es únicamente aplicable a aquellas aleaciones que si no son estabilizadas sufren un ablandamiento a temperatura ambiente, como las de AlMg.

### **1.2 El dígito que sigue a las designaciones H1, H2 y H3 indicará el grado final de acritud recibido:**

**HX2:** Estado 1/4 duro. Su resistencia a la tracción se encuentra aproximadamente a la mitad entre la del estado recocido y la del semiduro.

**HX4:** Estado semiduro. Su resistencia a la tracción se encuentra aproximadamente a la mitad entre la del estado recocido y la del duro.

**HX6:** Estado 3/4 duro. Su resistencia a la tracción se encuentra aproximadamente a la mitad entre la del estado semiduro y la del duro.

**HX8:** Estado duro. Tiene el máximo grado de acritud generalmente utilizado.

**HX9:** Estado extraduro. Su resistencia a la tracción excede a la del estado duro. Los dígitos impares indicarán estados cuya resistencia a la tracción es la media de las correspondientes a los estados de dígitos pares adyacentes.

### **1.3 Tercera cifra (x) en la subdivisión del estado H**

Las siguientes tres cifras a la letra H sirven para todas las aleaciones forjables:

**H (x)11:** Aplicado a los semi-productos que después de un recocido final mantienen un endurecimiento por deformación en frío que impide calificarlo como un estado recocido (0), pero no lo suficiente como para calificarlo como H(x)1. Ejemplo: El endurecimiento alcanzado por un enderezado por tracción controlada se denomina H111. (Alargamiento de un 1% aproximadamente.)

**H 112:** Aplicado a los semi-productos que pueden adquirir algún endurecimiento por deformación a elevada temperatura y por el cual hay unos límites de características mecánicas.

**H 113:** Aplicado a las chapas, que después de un recocido final mantienen un endurecimiento por deformación en frío que impide calificarlo como un estado recocido (0), pero no lo suficiente para calificarlo como H(x). (El alargamiento es de un 3% aproximadamente.)

## **2. SUBDIVISIÓN DE LOS ESTADOS T: TRATAMIENTO TÉRMICO**

Las cifras del 1 al 10 que siguen a la letra "T" indican las secuencias específicas de los tratamientos básicos como se verá a continuación.

**T1 :** Tratamiento de temple desde la temperatura de extrusión y maduración natural. Aplicado a los semi-productos, que desde la temperatura de extrusión reciben un enfriamiento a velocidad suficiente (temple), de manera que con una maduración natural posterior, se incrementan sus propiedades mecánicas. Se incluyen en este estado los productos que después del

enfriamiento son sometidos a un aplanado o enderezado por tracción sin efectos sensibles sobre las propiedades mecánicas.

**T2** : Tratamiento de temple desde la temperatura de extrusión, acritud y maduración natural Aplicado a los semi-productos que después de un enfriamiento a velocidad suficiente (temple) desde la temperatura de extrusión (o laminación) reciben una acritud determinada seguida de un madurado natural con objeto de mejorar su resistencia mecánica. Se incluyen en este estado los productos que después del temple son sometidos a un aplanado o enderezado por tracción con efectos sobre las propiedades mecánicas.

**T3** : Tratamiento térmico de solución (1), temple (1), acritud y madurado natural Aplicado a los semi-productos que después de un tratamiento de solución o temple, reciben una acritud determinada seguida de una maduración natural con objeto de mejorar su resistencia mecánica. Se incluyen en este estado los productos que después del temple son sometidos a un aplanado o enderezado por tracción con efecto sobre sus propiedades mecánicas.

**T4** : Tratamiento térmico de solución (1), temple (1), y maduración natural Aplicado a los semi-productos que después de un tratamiento de solución, temple y maduración natural mejoran sus propiedades mecánicas. Se incluyen en este estado los productos que después del temple son sometidos a un aplanado o enderezado por tracción sin efecto sobre las propiedades mecánicas.

**T5** : Tratamiento térmico de temple desde la temperatura de extrusión y maduración artificial Aplicado a los semi-productos que desde la temperatura de extrusión reciben un enfriamiento con aire forzado a velocidad suficiente (temple), de manera que con una maduración artificial posterior se incrementan sus propiedades mecánicas. Se incluyen en este estado los productos que después del enfriamiento son sometidos a un aplanado o enderezado por tracción, sin efectos sensibles sobre las propiedades mecánicas.

**T6** : Tratamiento térmico de solución (1), temple (1) y maduración artificial Aplicado a los semi-productos que después de un tratamiento de solución temple y maduración artificial mejoran sus propiedades mecánicas. Se incluyen en este estado los productos que después del temple son sometidos a un aplanado o enderezado por tracción sin efecto sobre las propiedades mecánicas.

**T7** : Tratamiento térmico de solución (1), temple (1) y sobre-maduración / estabilizado Aplicado a los semi-productos que son madurados artificialmente después del tratamiento de solución y temple, más allá del límite correspondiente a la máxima resistencia con el fin de controlar alguna característica significativa.

**T8** : Tratamiento térmico de solución (1), temple (1), acritud y maduración artificial Aplicado a los semi-productos que reciben una acritud determinada entre el temple y la maduración artificial para mejorar su resistencia. Se incluyen en este estado los productos que después del temple son sometidos a un aplanado o enderezado por tracción con efecto sobre las propiedades mecánicas.

**T9** : Tratamiento térmico de solución (1), temple (1), maduración artificial y acritud Aplicado a los semi-productos que son deformados en frío después del tratamiento de solución, temple y maduración artificial, para mejorar su resistencia mecánica.

**T10** : Tratamiento térmico de temple desde temperatura de extrusión, acritud y maduración artificial

Aplicado a los semi-productos que después del enfriamiento (temple) y antes de la maduración artificial reciben una acritud determinada.

## **2.1 Segunda cifra en la subdivisión del estado T**

Una segunda cifra añadida (no debe ser 0), indica variaciones en el tratamiento que alteran de forma significativa las propiedades de los semi-productos. Hay tratamientos desarrollados y registrados en A.A. y E.A.A. entre ellos y como más significativos se relacionan los siguientes:

**T31:** Tratamiento térmico de solución, temple, y acritud del 1%.

**T41:** Tratamiento térmico de solución y temple con refrigerante a temperatura.

**T35:** Tratamiento térmico de solución, temple y tracción controlada del 1,5% al 3%.

**T36:** Tratamiento térmico de solución, temple y acritud del 7%.

**T42:** Tratamiento térmico de solución a partir de 0 ó F, temple y maduración natural.

**T62:** Tratamiento de solución a partir de 0 ó F, temple y maduración artificial.

**T51, T52, T53, T54:** Enfriamiento (temple) desde la temperatura de extrusión con diferentes grados de enfriamiento, de manera que con una misma maduración artificial se consiguen características mecánicas finales diferentes.

**T53:** Enfriamiento, (temple), desde la temperatura de extrusión y doble maduración artificial.

**T61:** Tratamiento térmico de solución, temple y maduración artificial en condiciones diferentes a la T6.

**T72:** Tratamiento de estabilizado a partir de T42.

**T73:** Tratamiento térmico de solución, temple, y maduración con doble tratamiento (estabilización para mejorar la resistencia a la corrosión bajo tensiones y maduración).

**T74:** Tratamiento térmico de solución, temple en agua a temperatura superior a 50°C y maduración con doble tratamiento (Estabilizado + Maduración).

**T76:** Tratamiento térmico de solución, temple, y maduración con doble tratamiento (Estabilización para mejorar la resistencia a la corrosión exfoliante + Maduración).

**T81:** Tratamiento térmico de solución, temple, endurecimiento por deformación y maduración artificial. El endurecimiento por tracción del 1,5% al 3%.

**T83:** Similar al T8 para aleación 6063. (SIMAGALTOK 63).

**T86:** Tratamiento térmico de solución, temple, acritud y maduración artificial. La acritud proviene

generalmente de un enderezado por tracción del 6%.

**T87:** Tratamiento térmico de solución, temple, endurecimiento por deformación y maduración artificial. La acritud proviene generalmente de un enderezado por tracción del 7%.

**T89:** Tratamiento térmico de solución, temple y endurecimiento suficiente para lograr las características mecánicas y maduración artificial.

**T93, T94:** Tratamiento térmico de solución, temple y endurecimiento suficiente para lograr las características mecánicas.

## 2.2 Tercera cifra (x) en la subdivisión del estado T

La tercera cifra añadida indica eliminación de tensiones mediante enderezado por tensión controlada, así:

**T(x)51:** Aplicado a los semi-productos que después del tratamiento térmico de solución y templado, indica la acritud que reciben de un último enderezado por tracción controlada del 1 al 3%. Estas barras no serán sometidas a posteriores enderezados.

**T(x)50:** Igual que el anterior pero aplicado a barras, perfiles, tubos extruidos y estirados: Porcentaje acritud enderezado por tracción controlada del 3%, menos el tubo de 0,5 al 3%.

**T(x)511:** Igual que el anterior pero se admite un estirado menor después de la tracción controlada.

COMPOSICIONES CARACTERISTICAS DE ALEACIONES ALUMINIO

Normas ENAW	Denominaciones ALLU-STOCK	% Si	% Fe	% Cu	% Mn	% Mg	% Zn	% Ti	% Pb	% Cr	%	% Otros	% Al
1050 A	Puraltok 99,50	0,25	0,40	0,05	0,05	0,05	0,07	0,05				0,03	99,50
1060	Puraltok 99,60	0,25	0,35	0,05	0,03	0,03	0,05	0,03				0,03	99,60
1080	Puraltok 99,80	0,15	0,15	0,03	0,02	0,02	0,06	0,03		Ga 0,03	V 0,05	0,02	99,80
1100	Puraltok 99,10	0,95 Si+Fe		0,05-0,20	0,05		0,10					0,05	99,00
1200	Puraltok 99,00	1,0 Si+Fe		0,05	0,05		0,10	0,05				0,15	99,00
1350	Elect-pural 99,5	0,10	0,40	0,05	0,01		0,05				0,05 B, 0,02 V+Ti	0,03	99,50
2007	Cobreatok 07	0,80	0,80	3,30-4,60	0,50-1,00	0,40-1,80	0,80	0,20	0,80-1,50		Bi 0,20	0,30	Resto
2011	Cobreatok 11	0,40	0,70	5,00-6,00			0,30		0,20-0,60	0,01	Bi 0,20-0,60	0,15	*
2014	Cobreatok 14	0,50-1,20	0,70	3,90-5,00	0,40-1,20	0,20-0,80	0,25	0,15		0,10		0,15	*
2018	Cobreatok 19	0,50-0,90	0,50	3,90-5,00	0,40-1,20	0,40-0,80	0,25	0,15		Bi 0,2-0,6	0,20 Zr + Ti	0,15	*
2017 A	Cobreatok 17	0,20-0,80	0,70	3,50-4,50	0,40-1,00	0,40-1,00	0,25	0,15		0,10	0,25 Zr + Ti	0,15	*
2024	Cobreatok 24	0,50	0,50	3,80-4,90	0,30-0,90	1,20-1,80	0,25	0,15		0,10	0,25 Zr + Ti	0,15	*
2618 A	Cobreatok 18	0,15-0,25	0,90-1,40	1,80-2,70	0,25	0,40-0,80	0,15	0,20	Ni (0,8-1,4)	0,10	0,25 Zr + Ti	0,15	*
2030	Cobreatok 30	0,80	0,70	3,30-4,50	0,20-1,00	0,50-1,30	0,50	0,20	0,80-1,50	0,10	Bi 0,20	0,15	*
3003	Almantok 3003	0,60	0,70	0,05-0,20	1,00-1,50		0,10	+Zr 0,20		0,10		0,15	*
3004	Almantok 3004	0,30	0,70	0,25	1,00-1,50	0,80-1,30	0,25					0,15	*
3104	Almantok 3104	0,60	0,80	0,05-0,25	0,8-1,4	0,80-1,30	0,25	0,10			0,05	0,15	*
3005	Almantok 3005	0,60	0,70	0,30	1,0-1,5	0,2-0,6	0,25	0,10		0,10	0,05 V	0,15	*
3105	Almantok 3105	0,60	0,70	0,30	0,30-0,80	0,20-0,80	0,40	0,10		0,20		0,15	*
5005	Magnealok 10	0,30	0,45	0,05	0,15	0,70-1,10	0,20			0,10		0,15	*
5050	Magnealok 15	0,40	0,70	0,20	0,10	1,10-1,80	0,25	0,15		0,10		0,15	*
5052	Magnealok 25	0,25	0,40	0,10	0,10	2,20-2,80	0,10	0,20		0,15-0,35		0,15	*
5056	Magnealok 50	0,30	0,40	0,10	0,05-0,20	4,50-5,60	0,20			0,05-0,20		0,15	*
5083	Magnealok 45	0,40	0,40	0,10	0,40-1,00	4,00-4,90	0,25	+Zr 0,20		0,05-0,25		0,15	*
5086	Magnealok 40	0,40	0,50	0,10	0,20-0,70	3,50-4,50	0,25	+Zr 0,20		0,05-0,25		0,15	*
5154 A	Magnealok 35	0,50	0,50	0,10	0,50	3,10-3,90	0,20	+Zr 0,20		0,15-0,35		0,15	*
5251	Magnealok 20	0,40	0,50	0,15	0,10-0,50	1,70-2,40	0,15	0,15		0,15		0,15	*
5454	Magnealok 31	0,25	0,40	0,10	0,50-1,00	2,40-3,60	0,25	0,20		0,05-0,20		0,15	*
5754	Magnealok 30	0,40	0,40	0,10	0,50	2,60-3,60	0,15	0,15		0,30	0,1-0,6Mn+Cr	0,15	*
6005 A	Simagalok 05	0,50-0,90	0,35	0,10	0,30	0,40-0,70	0,20	0,10		0,30	0,12-0,5 Mn+Cr	0,15	Resto
6012	Simagalok 12	0,60-1,40	0,50	0,10	0,40-1,00	0,60-1,20	0,30	0,30	0,40-2,0	0,30	Bi 0,7	0,15	*
6060	Simagalok 60	0,30-0,60	0,10-0,030	0,10	0,10	0,35-0,60	0,15	0,10		0,05		0,15	*
6061	Simagalok 61	0,40-0,80	0,70	0,15-0,40	0,15	0,80-1,20	0,25	0,15		0,04-0,35		0,15	*
6063	Simagalok 63	0,20-0,60	0,35	0,10	0,10	0,45-0,90	0,10	0,10		0,10		0,15	*
6082	Simagalok 82	0,70-1,30	0,50	0,10	0,40-1,00	0,60-1,20	0,20	0,10		0,25		0,10	*
6101	Simagalok 01	0,30-0,70	0,50	0,10	0,03	0,35-0,80	0,10	-				0,15	*
6106	Simagalok 06	0,30-0,60	0,35	0,25	0,05-0,20	0,40-0,8	0,20	0,10		0,20		0,15	*
6181	Simagalok 81	0,80-1,20	0,45	0,10	0,15	0,60-1,00	0,20			0,10		0,15	*
6262	Simagalok 62	0,40-0,80	0,70	0,15-0,40	0,15	0,80-1,20	0,25		0,40-0,70	0,04-0,14	Bi 0,4-0,7	0,15	*
6351	Simagalok 51	0,70-1,30	0,50	0,10	0,40-0,80	0,40-0,80	0,20	0,20				0,15	*
7003	Alzintok 03	0,30	0,35	0,20	0,30	0,50-1,00	5,00-6,50	+Zr 0,20		0,10-0,35		0,15	*
7020	Alzintok 20	0,35	0,40	0,20	0,05-0,50	1,00-1,40	4,00-5,00	-Zr0,09-0,25		0,10-0,30	Ga 0,08-0,2	0,15	*
7022	Alzintok 22	0,50	0,50	0,50-1,00	0,10-0,40	2,60-3,70	4,30-5,20	+Zr 0,20				0,15	*
7049 A	Alzintok 49	0,40	0,50	1,20-1,90	0,50	2,10-3,10	7,20-8,40	+Zr 0,25		0,05-0,25		0,15	*
7050	Alzintok 50	0,12	0,15	1,90-2,50	0,10	2,00-2,70	5,90-6,90	0,06		0,04		0,15	*
7075	Alzintok 75	0,40	0,50	1,20-2,00	0,30	2,10-2,90	5,10-6,10	+Zr 0,20				0,15	*
7175	Alzintok 175	0,15	0,20	1,20-2,00	0,10	2,10-2,90	5,1-6,1	+Zr 0,20		0,18-0,28		0,15	*
-	Moldeal-tok	0,12	0,15	1,50-2,60	0,10	1,80-2,60	5,70-6,70	0,06		0,05	Zr 0,08-0,15	0,15	*

PROPIEDADES CARACTERISTICAS DE ALEACIONES DE ALUMINIO

Serie 1000

1050 A	Puraltok 99,5	0	80	35	42	50	21
1050 A	Puraltok 99,5	H2	100	85	12	-	30
1050 A	Puraltok 99,5	H4	115	105	10	70	35
1050 A	Puraltok 99,5	H6	130	120	7	-	39
1050 A	Puraltok 99,5	H8	150	140	6	100	43
1050 A	Puraltok 99,5	H9	180	170	-	-	48
1200	Puraltok 99,0	0	90	40	40	70	23
1200	Puraltok 99,0	H2	110	90	11	-	32
1200	Puraltok 99,0	H4	125	115	9	100	37
1200	Puraltok 99,0	H6	140	130	7	-	41
1200	Puraltok 99,0	H8	160	150	6	130	45
1200	Puraltok 99,0	H9	190	180	-	-	50

Serie 2000

2007	Cobrealtok 07	T3	460	360	11	-	115
2007	Cobrealtok 07	T4	445	295	14	-	110
2011	Cobrealtok 11	T3	365	290	15	250	95
2011	Cobrealtok 11	T4	350	270	18	250	90
2011	Cobrealtok 11	T6	395	300	12	250	110
2011	Cobrealtok 11	T8	420	315	13	250	115
2014	Cobrealtok 14	0	190	85	20	180	55
2014	Cobrealtok 14	T4	430	275	18	280	110
2014	Cobrealtok 14	T6	485	425	12	290	140
2014 A	Cobrealtok 14	0	190	85	20	180	55
2014 A	Cobrealtok 14	T4 / T451	430	275	18	280	110
2014 A	Cobrealtok 14	T6	485	425	12	290	140
2017 A	Cobrealtok 17	0	180	70	20	180	45
2017 A	Cobrealtok 17	T4	425	275	21	260	105
2024	Cobrealtok 24	0	185	75	20	180	55
2024	Cobrealtok 24	T3	475	340	18	280	120
2024	Cobrealtok 24	T4	460	330	20	280	120
2024	Cobrealtok 24	T8	485	450	-	250	130
2030	Cobrealtok 30	T3	460	360	11	270	115
2030	Cobrealtok 30	T4	445	295	14	260	110

Serie 3000

3003	Almantok 03	0	110	50	29	100	29
3003	Almantok 03	H2	140	120	11	110	40
3003	Almantok 03	H4	160	145	9	130	45
3003	Almantok 03	H6	180	165	8	140	50
3003	Almantok 03	H8	205	185	6	150	55
3003	Almantok 03	H9	245	215	4	-	65
3103	Almantok 103	0	105	45	29	100	29
3103	Almantok 103	H2	135	115	11	-	40
3103	Almantok 103	H4	155	140	9	130	45
3103	Almantok 103	H6	185	160	8	-	50
3103	Almantok 103	H8	200	180	6	150	55
3103	Almantok 103	H9	240	210	4	-	65

**COMPARACIONES DE PROPIEDADES DE ALEACIONES DE ALUMINIO  
CON OTROS MATERIALES**

MATERIAL Y ALEACIONES	PROPIEDADES MECÁNICAS					PROPIEDADES FÍSICAS				
	Características a la tracción			Resist. a la cizalladura	Módulo elástico	Peso específico	Coefic. de dilat. a 100°C	Conductividad		
	Rm	Rp 0,2	A 5,56					Térmica	Eléctrica	
	N / mm <sup>2</sup>	N / mm <sup>2</sup>	%	N / mm <sup>2</sup>	N / mm <sup>2</sup>	g / cm <sup>3</sup>	10 <sup>6</sup> /K	W / m °C	% IACS	

**ALUMINIO Y ALEACIONES**

1050 - H24	Semiduro	120	100	11	75	69.000	2,70	23,6	231	61,6
1200 - 0	Recocido	90	-	40	65	69.000	2,71	24,3	222	59,5
3003 - 0	Recocido	115	-	40	75	69.000	2,73	23,9	180	50
3003 - H18	Duro	220	190	7	110	69.000	2,73	23,9	154	40
5754 - H38	Recocido	220	190	23	130	71.000	2,66	23,8	125	35,3
5754 - H38	Semiduro	310	270	5	165	71.000	2,66	23,8	125	31
5083 - 0	Recocido	300	140	18	180	71.000	2,67	24,5	120	28,3
5083 - H34		375	285	9	-	71.000	2,67	24,5	120	28,3
6061 - 0		120	60	28	80	69.000	2,70	23,2	156	-
6061 - T6		310	270	13	200	69.000	2,70	23,2	156	43,1
2017 - T4		390	245	14	260	74.000	2,73	23,0	134	-
2024 - T4		460	320	18	290	73.000	2,77	23,6	121	30
7020 - T6		350	290	10	250	71.500	2,78	23,0	140	37,5
7075 - T6		540	480	11	330	72.000	2,80	23,5	130	34

**ACERO INOXIDABLE**

AISI 304	***	185	45	470	203.000	7,9	17,3	17	2,4
AISI 305	***	175	45	470	203.000	7,9	17,3	17	2,4
AISI 316	***	205	40	470	203.000	7,9	17,3	17	2,4

**BRONCE**

Recocido		150	60	-	112.000	8,8	17,2	79	18
Duro		525	10	-	112.000	8,8	17,2	79	18

**COBRE**

Recocido		70	45	160	119.000	8,9	16,4	388	100
Duro		315	6	195	119.000	8,9	16,4	-	-

**HIERRO**

De fundición gris		175	0,5	305	98.000	7,1	10,1	50	2
Acero laminado		265	30	315	196.000	7,8	11,7	58	12
Acero duro		875	15	470	203.000	7,8	17,3	17	2,1

**MONEL**

Recocido		560	245	40	320	162.000	8,8	14	3,6
Duro		770	700	8	610	162.000	8,8	14	3,6

RESISTENCIA DE ALEACIONES DE ALUMINIO A SUSTANCIAS  
ORGANICAS

Aceites esenciales	■	Alcanfor	■
Aceites de girasol	■	Alcohol etílico , al 98 % (frío)	■
Aceites de oliva	■	Alcohol metílico (98%, frío)	■
Aceites vegetales	■	Aldehido benzoico	■
Acetaldehido (mojado)	■	Aminas aromáticas	■
Acetanilina	■	Anhídrido acético	■
Acetato de butilo	■	Anilina (líquida), fría	■
Acetato de celulosa	■	Antraceno	■
Acetileno	■	Antraquinona	■
Acetona	■	Arcilla	■
Acido acético (diluido)	■	Asfalto	■
Acido antranílico	■	Benceno	■
Acido benzoico	■	Benzaldehido	■
Acido butírico	■	Betún	■
Acido cítrico (frío)	■	Bromoformo	■
Acido esteárico	■	Bromuro de metilo	■
Acido fórmico	■	Carbón (mojado)	■
Acido ftálico (puro)	■	Carbón (seco)	■
Acido gálico	■	Celulosa (seca)	■
Acido glicólico	■	Ceras	■
Acido hidrocianídrico	■	Cetonas aromáticas	■
Acido láctico (caliente)	■	Cianuro de potasio	■
Acido málico (<10 %, frío)	■	Cloroformo (hirviendo), puro	■
Acido Margárico	■	Cloroformo (mojado), a 20°C	■
Acido oleico	■	Cloruro de benceno (seco)	■
Acido oxálico	■	Cloruro de etanol (Anhídrido), frío	■
Acido palmítico	■	Cloruro de metilo	■
Acido pícrico, puro	■	Colas (neutras)	■
Acido salicílico	■	Corcho (humedo)	■
Acido succínico	■	Corcho (seco)	■
Acido tánico	■	Cresol (a menos de 80°C)	■
Acido tartárico (10 %, frío)	■	Crotonaldehido	■
Acido valérico	■	Dibromuro de etileno	■
Acidos grasos	■	Dicloetano (Anhídrido)	■
Agua de colonia	■	Dicloetileno (Anhídrido)	■

■	Ataque practicamente inexistente.
■	Mantenimiento en buen estado.
■	Mantenimiento satisfactorio, sólo bajo determinadas condiciones.
■	Utilización no satisfactoria.

## RESISTENCIA DE ALEACIONES DE ALUMINIO A SUSTANCIAS INORGANICAS

Acetatos alcalinos	■	Carbonato de amonio	■
Acido arsénico	■	Carbonato de potasio	■
Acido bórico	■	Carbonato sódico	■
Acido carbónico	■	Carburo de calcio (Anhídrido)	■
Acido crómico	■	Cemento	■
Acido hidrobromídrico	■	Cemento (humedo)	■
Acido hidroclohydrico	■	Cemento aluminoso	■
Acido hidrofleurhydrico	■	Clorato potásico	■
Acido nítrico ( C>80% a 20°C)	■	Clorato sódico	■
Acido nítrico (diluido)	■	Cloruro (Anhídrido)	■
Acido nitroso	■	Cloruro de aluminio	■
Acido ortofosfórico	■	Cloruro de amonio	■
Acido perclorhydrico	■	Cloruro de bario	■
Acido sulfúrico	■	Cloruro de calcio	■
Acido sulfúrico (en solución diluida)	■	Cloruro de estaño	■
Acido sulfuroso (en solución diluida)	■	Cloruro de magnesio	■
Agua clorada	■	Cloruro de mercurio	■
Agua de lluvia	■	Cloruro de Zinc	■
Agua de mar	■	Cloruro férrico	■
Agua destilada	■	Cloruro potásico	■
Amonio (gas)	■	Cloruro sódico	■
Azufre	■	Cromato potásico	■
Bicarbonato sódico	■	Dicromato potásico	■
Bisulfito sódico	■	Dióxido de azufre	■
Borato sódico (solución fría)	■	Disulfuro de carbono	■
Bromuro de amonio	■	Ferrocianuro potásico	■
Bromuro de potasio	■	Fluorsilicato sódico (<1%)	■
Bromuro sódico	■	Formato de amonio	■
Carbonato cálcico	■	Fosfato de amonio (dibásico)	■
Carbonato cálcico (cal)	■	Fosfato sódico tribásico	■

■	Ataque practicamente inexistente.
■	Mantenimiento en buen estado.
■	Mantenimiento satisfactorio, sólo bajo determinadas condiciones.
■	Utilización no satisfactoria.