

1. INTRODUCCIÓN

Los productos siderúrgicos derivados del acero y del hierro son, con mucha diferencia, los más utilizados de los metales conocidos, siendo su producción mundial superior en veinte veces a la de los demás metales.

PRODUCCIÓN MUNDIAL DE LOS PRINCIPALES METALES EN MILES DE TONELADAS (AÑO 1951)

Fundición de hierro	160.000
Cobre	2.865
Aluminio	1.790
Plomo	1.760
Cinc	2.223
Níquel	110
Estaño	175

Podemos destacar, que esta supremacía se debe, además de a su precio de coste relativamente económico, a sus excelentes propiedades mecánicas que, sobre todo las de los aceros, pueden variarse para amoldarlas a la conveniencia del usuario para trabajarlos más cómodamente, dándose después el punto deseado de dureza, resistencia y tenacidad. Tienen, sin embargo, los productos siderúrgicos el grave defecto de que son muy sensibles a la oxidación y a la corrosión atmosférica, ya que el hierro es el metal industrial que más fácilmente se deteriora en el aire. Aunque también es cierto, que se fabrican los aceros denominados inoxidable, en los que se han corregido estos defectos, aunque tienen estos aceros su inconveniente en su elevado precio.

Los metales industriales no féreos y sus aleaciones son, en general, resistentes a la oxidación y corrosión atmosférica. Pero no es esta la única buena cualidad, que los hace recomendables para muchas aplicaciones, sino también, la facilidad con la que se moldean y mecanizan; la elevada resistencia mecánica en relación a su peso de algunas

aleaciones; la gran conductividad térmica y eléctrica del cobre, y también su bello acabado desde el punto de vista decorativo.

LAS ALEACIONES LIGERAS.

Se denominan aleaciones ligeras a aquellas aleaciones que tienen como elemento base o principal el aluminio.

Respecto a los metales de adición, los más empleados son el cobre, silicio, cinc, níquel, hierro, titanio, cromo y cobalto. Estos materiales pueden figurar en las aleaciones juntos o aislados. En general, la proporción total en que forman parte de las aleaciones ligeras, no pasa del 15%.

La característica principal de las aleaciones ligeras, es su bajo peso específico, que en algunas de ellas llega a ser hasta de 1/3 del peso específico del acero. Y aún resulta más interesante la relación de resistencia mecánica a peso específico, que algunos tipos de aleaciones ligeras es la más alta entre todos los metales y aleaciones conocidos. Esto las hace indispensables para determinadas aplicaciones, como, por ejemplo, para las construcciones aeronáuticas en las que interesan materiales muy ligeros con una resistencia mecánica mínima.

2. EL ALUMINIO.

El aluminio es uno de los principales componentes de la corteza terrestre conocida, de la que forma parte en una proporción del 8,13%, superior a la del hierro, que se supone es de un 5%, y solamente superada entre los metales por el silicio (26,5%).

El aluminio no se encuentra puro en la naturaleza, sino formando parte de los minerales, de los cuales los más importantes son las bauxitas, que están formadas por un 62-65% de alúmina (Al_2O_3), hasta un 28% de óxido de hierro (Fe_2O_3), 12-30% de agua de hidratación (H_2O) y hasta un 8% de sílice (SiO_2).

3.1. Obtención del aluminio

La obtención del aluminio se realiza en dos fases:

1. Separación de la alúmina (Al_2O_3) de las bauxitas por el procedimiento Mayer, que comprende las siguientes operaciones: Se calientan las bauxitas para deshidratarlas, una vez molidas; se atacan a continuación con lejía de sosa en caliente y a presión para formar aluminato sódico ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), que se separa del resto de los componentes de la bauxita; después, bajo la influencia de una pequeña cantidad de alúmina que inicia la reacción, se hidroliza el aluminato de sodio, quedando alúmina hidratada e hidróxido de sodio; y por fin, se calcina la alúmina hidratada a 1.200°C , con lo que queda preparada para la fase siguiente.
2. Reducción de la alúmina disuelta en un baño de criolita (FNa , F_3Al), y con cierta cantidad de fundente, por electrolisis con electrodos de carbón.

Para obtener una tonelada de aluminio son necesarias 4 Tm. de bauxita, 80 kgs. de criolita, 600 kgs. de electrodos de carbón y 22.000kw-hora. La metalurgia de aluminio es, por tanto, esencialmente electrolítica.

3.2. Propiedades físicas del aluminio.

El aluminio es un metal blanco brillante, que pulido semeja a la plata. Cristaliza en red cúbica centrada en las caras (FCC). Su peso específico es igual a 2,699, es decir, casi 1/3 del hierro (7,87). El único metal industrial más ligero que el aluminio es el magnesio, de peso específico 1,74. Su conductividad eléctrica es un 60% de la del cobre y 3,5 veces mayor que la del hierro. Su punto de fusión es 660°C y el de ebullición 2.450°C . Este punto de fusión relativamente bajo, unido a su punto de ebullición bastante alto facilita su fusión y moldeo.

3.3. Propiedades del aluminio.

La propiedad química más destacada del aluminio es su gran afinidad con el oxígeno, por lo que se emplea entre otras cosas, para la desoxidación de los baños de acero, para la soldadura alumino-térmica ($\text{Al} + \text{Fe}_2\text{O}_3$), para la fabricación de explosivos, etc...

A pesar de esto, y aunque parezca un contrasentido, el aluminio es completamente inalterable en el aire, pues se recubre de una delgada capa de óxido, de algunas centésimas de micra, que protege el resto de la masa de la oxidación.

Debido a esta película protectora, resiste también a la acción del vapor de agua, el ataque nítrico concentrado y muchos otros compuestos químicos. En cambio, es atacado por el ácido sulfúrico, el clorhídrico, el nítrico diluido y las soluciones salinas

3.4. Propiedades mecánicas del aluminio.

Las propiedades mecánicas del aluminio son más interesantes son su débil resistencia mecánica, y su gran ductilidad y maleabilidad, que permite forjarlo, trefilarlo en hilos delgadísimo y laminarlo en láminas o panes tan finos como los del oro, hasta de un espesor de 0,0004 mm (0,4 micras). A la temperatura de 500°C se vuelve frágil y se puede pulverizar fácilmente.

3.5. Calidades del aluminio.

El Instituto Nacional de Racionalización del Trabajo ha normalizado las calidades del aluminio, según el porcentaje de impurezas admisibles que contiene en las nueve clases que se detallan posteriormente:

CALIDADES DE ALUMINIO DE PRIMERA FUSIÓN (UNE 38 111)

DESIGNACIÓN	<i>Símbolo</i>	Impurezas admisibles %			
		Si + Fe	Ti	Cu + Zn	Totales
Aluminio L-111 (99,7) UNE 38-111	L-111 (99,7)	<0,3	<0,03	<0,03	0,3 máx.
Aluminio L-111 (99,5) UNE 38-111	L-111 (99,5)	<0,5	<0,03	<0,05	0,5 máx.
Aluminio L-111 (99) UNE 38-111	L-111 (99)	<1,0	<0,03	<0,1	1,0 máx.
Aluminio L-111 (98) UNE 38-111	L-111 (98)	<2,0	<0,05	<0,2	2,0 máx.
Aluminio L-111 (99,5E) UNE 38-111	L-111 (99,5E)	<0,5	Ti + Cr + V <0,03	<0,05	0,5 máx.
Aluminio L-111 (93) UNE 38-111	L-111 (93)	<7,0	-	-	0,7 máx.

3.6.Aplicaciones del aluminio.

El aluminio tiene multitud de aplicaciones: su bajo peso específico lo hace útil para la fabricación de aleaciones ligeras, extensamente empleadas en construcciones aeronáuticas y en general, cada vez más en los vehículos de transporte (automotores, TALGO, automóviles, etc,...). Su elevada conductividad eléctrica lo hace útil para la fabricación de conductores eléctricos de aluminio técnicamente puro o en forma de cables armados con acero galvanizado.

Su elevada conductividad calorífica e inalterabilidad lo hacen útil para la fabricación de utensilios de cocina y, en general, para aparatos de intercambio de calor. Su maleabilidad lo hace útil para la fabricación de papel de aluminio, en lo que se emplea actualmente un 10% de su producción total.

Su resistencia a la corrosión lo hace útil para fabricación de depósitos para ácido acético, cerveza, etc,... También se emplea en forma de chapas para cubiertas de edificios. Y reducido a polvo para la fabricación de purpurinas y pinturas resistentes a la corrosión atmosférica.

Sus propiedades reductoras lo hacen útil para la desoxidación del hierro y de otros metales, y para las soldaduras aluminio-térmicas.

CONSTANTES DEL ALUMINIO

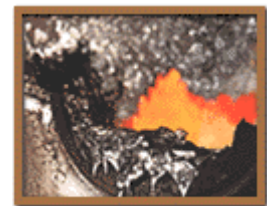
Símbolo	Al
Número atómico	13
Peso atómico	26,98
Cristalización en la red cúbica centrada en las caras	Lado $a = 4,04^{\circ} \text{ cm}$
Peso específico	2,699
Conductividad eléctrica a 20 °C	34,6 m/Ohm.mm ²
Resistividad eléctrica a 20°C	2,655 microhms.cm ² /cm
Conductividad calorífica a 0°C	0,53 cal/cm X S.°C
Coefficiente de dilatación lineal de 20°C a 100°C	23,6 X 10 ⁻⁶ X °C
Punto de fusión	660°C
Calor latente de fusión	94,5 calorías/gr
Calor específico medio	0,215 cal/g. °C
Punto de ebullición	2.450°C
Calor de combustión	380,8 K. Cal/mol
Equivalente electroquímico	0,3354 gr/amp.hora
Módulo de elasticidad	7.200 kg/mm ²
Resistencia a la tracción fundido	9-12 kg/mm ²
Resistencia a la tracción laminado (duro)	18-28 kg/mm ²
Resistencia a la tracción recocido (blando)	7-11 kg/mm ²
Dureza fundido	24-32 HB
Dureza laminado duro	45-60 HB
Dureza recocido	15-25 HB
Alargamiento fundido	18-25%
Alargamiento laminado duro	3-5%
Recocido	30-45%
Contracción al solidificarse fundido en arena	1,600%
Contracción al solidificarse en coquilla	1,825%



Ejemplo de utilización de aluminio para la formación de chapas para cubiertas de edificios.



Chapas e bobinas com acabamentos antiderrapante, pintado, brilhante e comum.



Metal Primário



Obtención de barras de aluminio.



Perfiles de aluminio



Ruedas de aluminio hechas según las normas internacionales que suelen ser utilizadas para discos de frenos de automóviles.

4. ALEACIONES DE ALUMINIO.

Los principales metales empleados para su aleación con aluminio son los siguientes:

Cobre (Cu), silicio (Si), cinc (Zn), magnesio (Mg), y manganeso (Mn).

Y los que pudiéramos considerar como secundarios, son los siguientes:

Níquel (Ni), titanio (Ti), hierro (Fe), cromo (Cr) y cobalto (Co).

Sólo en casos especiales se adicionan:

Plomo (Pb), cadmio (Cd), antimonio (Sb) y bismuto (Bi).

4.1. Aleaciones de aluminio puro.

También conocido como ALPUR. Aluminio Puro. Presenta una elevada resistencia a los agentes atmosféricos, una gran conductividad térmica y eléctrica y una excelente actitud a las deformaciones. Sus características mecánicas son relativamente bajas. Su utilización está muy extendida: industria eléctrica, química, petroquímica, edificación, decoración, menaje, etc...

ALEACIONES DE ALUMINIO DE FORJA

Normas A.A. (U.S.A)	Normas D.C.A.	Normas EN AW	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Pb	Cr	Otros	Al
1050 A	ALPUR 50	EN AW -1050 A	0.25	0.40	0.05	0.05	0.05	0.07	0.05			0.03	99.50
1070 A	ALPUR 70	EN AW -1070 A	0.20	0.25	0.03	0.03		0.07	0.03			0.03	99.70
1080 A	ALPUR 80	EN AW -1080 A	0.15	0.15	0.03	0.02	0.02	0.06	0.02	Ga=0.03	V=0.05	0.02	99.80
1200	ALPUR 200	EN AW -1200	Si+Fe=1	0.80	0.10	0.10		0.10	0.05			0.05 0.15	99.00

4.2. Aleaciones de aluminio- cobre.

En la figura anterior se muestra el diagrama de fases Al-Cu hasta un 50% de Cu, que es muy superior al porcentaje máximo empleado en estas aleaciones, que en general no superan al 15%, pues a partir de esta concentración se forman compuestos intermetálicos que hacen frágil la aleación.

En este diagrama están presentes la fase α que es una solución sólida de cobre en aluminio que cristaliza en la red cúbica centrada en las caras. La eutéctica está formada por cristales duros de aluminuro de cobre (Al_2Cu) incrustados en la matriz de cristales. La temperatura eutéctica es $547^{\circ}C$, que corresponde a una concentración del 33% de Cu.

La solubilidad del cobre en el aluminio varía del 0,45% a $300^{\circ}C$, hasta 5,7% a $547^{\circ}C$, lo que se utiliza para el temple de precipitación a que puede ser sometidas estas aleaciones. El cobre endurece mucho el aluminio, por lo que estas aleaciones poseen propiedades mecánicas excepcionales, pero mantienen la buena maquinabilidad y ligereza que posee el aluminio. En general, estas aleaciones, se caracterizan por una buena resistencia al calor y una menor resistencia a los agentes atmosféricos que las aleaciones sin cobre. Estas aleaciones no pueden ser soldadas más que por técnicas particulares como por ejemplo la soldadura por haz de electrones. Comúnmente son denominadas Cobral.

ALEACIONES DE ALUMINIO DE FORJA

Normas A.A. (U.S.A)	Normas D.C.A.	Normas EN AW	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Pb	Cr	Otros	Al
2011	COBRAL 11	EN AW-2011	0.40	0.70	5.0-6.0			0.30		0.2-0.6	(Bi 0.2-0.6)	0.05 0.15	Resto
2014	COBRAL 14	EN AW-2014	0.5-1.2	0.70	3.9-5.0	0.4-1.2	0.2-0.8	0.25	0.15		0.10	0.05 0.15	"
2017 A	COBRAL 17	EN AW-	0.2-0.8	0.70	3.5-4.5	0.4-1	0.4-1.0	0.25		Zr+Ti=0.25	0.10	0.05 0.15	"

		2017 A											
2024	COBRAL 24	EN AW-2024	0.50	0.50	3.8-4.9	0.3-0.9	1.2-1.8	0.25	0.15	Zr+Ti=<0.20	0.10	0.05 0.15	"
2030	COBRAL 30	EN AW-2030	0.80	0.70	3.3-4.5	0.2-1	0.5-1.3	0.50	0.20	Pb=0.8-1.5 Bi =0.20	0.10	0.10 0.30	"
2618 A	COBRAL 18	EN AW-2618 A	0.15-0.25	0.9-1.4	1.8-2.7	0.25	1.2-1.8	0.5	0.20	(Ni 0.8-1.4)	Zr+Ti=<0.25	0.05 0.15	"

4.3. Aleaciones de aluminio-silicio.

Estas aleaciones siguen en importancia a las del aluminio-cobre. El porcentaje de silicio suele variar del 5 al 20%.

En la figura anterior se ha representado el diagrama de fases Al-Si, que es muy sencillo, pues no forma más que una solución sólida □ de silicio en aluminio y una solución sólida de aluminio en silicio, aunque algunos autores consideran la fase □ como silicio elemental. Y en este caso la eutéctica estaría formada por □ + Si.

No hay más que un punto eutéctico que corresponde a la proporción de 11,6% de Si y cuya temperatura es 577°C.

El silicio endurece al aluminio y, sobre todo, aumenta su fluidez en la colada y su resistencia a la corrosión. Las aleaciones Al-Si son muy dúctiles y resistentes al choque; tienen un bajo coeficiente de dilatación y una elevada conductividad calorífica y eléctrica, pero son difíciles de mecanizar por la naturaleza abrasiva del silicio. Su peso específico es alrededor del 2,7.

Las propiedades mecánicas de aleaciones aluminio-silicio pueden mejorarse añadiendo a la cuchara de colada de estas aleaciones cloruro sódico o una mezcla de fluoruro y cloruro sódico. Esta operación incorpora una pequeña cantidad de sodio, inferior al 0,01% a la aleación pero suficiente para variar la concentración eutéctica del 11,6% al 13% y bajar la temperatura eutéctica de 577°C a 570°C.

Pero sobre todo las aleaciones Al-Si modificadas con esta adición resultan con un grano extremadamente fino en lugar de las agujas o láminas en que cristaliza el silicio en las aleaciones sin modificar.

Esta mejora en la estructura micrográfica se traduce en una notable mejora de las propiedades mecánicas de aleaciones modificadas, y concretamente, de su ductilidad, resistencia al choque, resistencia mecánica e incluso de su resistencia a la corrosión.

La principal aplicación de las aleaciones aluminio-silicio son la fundición de piezas difíciles, pero buenas cualidades de moldeo, y la fabricación de piezas para la marina, por su resistencia a la corrosión. Pero no se emplean para piezas ornamentales porque ennegrecen con el tiempo.

4.4. Aleaciones de aluminio-cinc.

En estas aleaciones figura el cinc con un porcentaje máximo del 20%. En la figura posterior queda representado el diagrama Al-Zn, en el que están presentes la solución sólida □ de cinc en aluminio, la solución sólida □ de aluminio en cinc, que algunos autores identifican con cinc elemental, y la solución sólida intermedia.

Como no se forman compuestos químicos no puede aplicarse a estas aleaciones el temple de precipitación. Las aleaciones de cinc son más baratas que las de cobre a igualdad de propiedades mecánicas, pero menos resistentes a la corrosión y más pesadas. Comúnmente son denominadas Zincal.

ALEACIONES DE ALUMINIO DE FORJA

Normas A.A. (U.S.A)	Normas D.C.A.	Normas EN AW	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Pb	Cr	Otros	Al
7015	ZINCAL 15	EN 7015 AW-7015	0.20	0.30	0.06- 0.15	0.1	1.3- 2.1	4.6- 5.2	0.10	Zr 0.10-0.20	0.15	0.05 0.15	"
7020	ZINCAL 20	EN 7020 AW-7020	0.35	0.50	0.20	0.05- 0.50	1.0- 1.4	4.0- 5.0		Zr=0.00- 0.20	0.10- 0.35	0.05 0.15	"

										Zr+Ti=0.08-0.25			
7049 A	ZINCAL 49	EN AW-7049 A	0.40	0.50	1.2-1.9	0.50	2.1-3.1	7.2-8.4		Zr+Ti=<0.25	0.05-0.25	0.05-0.15	"
7075	ZINCAL 75	EN AW-7075	0.40	0.50	1.2-2	0.30	2.1-2.9	5.1-6.1	0.20	Zr+Ti=<0.25	0.18-0.28	0.05-0.15	"

4.5. Aleaciones de aluminio-magnesio.

Estas aleaciones contienen magnesio en proporciones inferiores al 10% de Mg. En general, el magnesio va asociado a otros elementos como el cobre, silicio, cinc, etc,..., es decir, formando aleaciones ternarias, en las que el magnesio figura con proporciones del 0,1 al 1%.

- Pongamos por ejemplo, la aleación conocida como Simagal. Aluminio-Magnesio-Silicio. Los elementos de adicción de esta familia son el Magnesio y el Silicio. Estas aleaciones presentan características mecánicas medias. Ofrecen una buena aptitud a la deformación en frío en estado reconocido, así como su buen comportamiento ante los agentes atmosféricos y su buena aptitud a la soldadura.

Esta familia está formada por dos grupos de aleaciones. El primero constituido por las aleaciones más cargadas en Mg y Si con adicciones de Mn, Cr, Zn, presenta las características más elevadas, destinadas a aplicaciones estructurales (armazones, pilares, puentes, flechas de grúa, etc ...).

El segundo grupo constituido por aleaciones menos cargadas en Mg y Si, ofrece una gran velocidad de estruxión asociada a características menos elevadas. Están especialmente destinadas a la decoración, amueblamiento y la edificación (puertas, ventanas, etc ...).

ALEACIONES DE ALUMINIO DE FORJA

Normas A.A. (U.S.A)	Normas D.C.A.	Normas EN AW	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Pb	Cr	Otros	Al
6005	SIMAGAL 05	EN AW-6005	0.6- 0.9	0.35	0.10	0.10	0.4- 0.6	0.10	0.10		0.10	0.05 0.15	"
6063 A	SIMAGAL 63	EN AW-6063 A	0.3- 0.6	0.15- 0.35	0.10	0.15	0.6- 0.9	0.15	0.10		0.05	0.05 0.15	"
6061	SIMAGAL 61	EN AW-6061	0.4- 0.8	0.70	0.1- 0.4	0.15	0.8- 1.2	0.25	0.15		0.04- 0.35	0.05 0.15	"
6082	SIMAGAL 82	EN AW-6082	0.7- 1.3	0.50	0.10	0.40- 1.0	0.6- 1.2	0.20	0.10		0.25	0.05 0.15	"
6261	SIMAGAL 65	EN AW-6261	0.4- 0.7	0.40	0.15- 0.40	0.20- 0.35	0.7- 1.0	0.20	0.10		0.10	0.05 0.15	"
6262	SIMAGAL 62	EN AW-6262	0.4- 0.8	0.70	0.15- 0.40	0.15	0.8- 1.2	0.25	0.15	Pb 0.4- 0.7: Bi 0.4- 0.7	0.04- 0.14	0.05 0.15	"
6351	SIMAGAL 51	EN AW-6351	0.7- 1.3	0.50	0.10	0.4- 0.8	0.4- 0.8	0.20	0.20			0.05 0.15	"

En la figura anterior se ha representado el diagrama aluminio-magnesio en que están presentes las fases \square que es una solución sólida de magnesio en aluminio, y la fase \square , que es aluminuro de magnesio (Al_3Mg_2 , o según otros autores, Al_8Mg_5).

La proporción eutéctica es de 34,5% de Mg y la temperatura eutéctica 450°C.

La solubilidad sólida del magnesio en aluminio varía del 4,4% a 250°C hasta 14,9% a 450°C. Por esto, las aleaciones Al-Mg admiten el temple de precipitación.

Las aleaciones Al-Mg son más ligeras que el propio aluminio, pues su peso específico es alrededor de 2,6. Poseen buenas propiedades mecánicas, se mecanizan con facilidad y tienen una buena resistencia a la corrosión.

4.6. Aleaciones de aluminio-manganeso.

El manganeso se encuentra en la mayor parte de las aleaciones de aluminio ternarias y cuaternarias. Su solubilidad en el aluminio pasa del 0,35% a 500°C a la temperatura eutéctica, que es 658,5°C, como podemos observar en el diagrama de fases de Al-Mn de la figura siguiente.

La concentración eutéctica es de 1,95% de Mn. A la temperatura ambiente, y hasta un 25% de Mn la aleación está formada por Al + Al₆ Mn. El manganeso aumenta la dureza, la resistencia mecánica y la resistencia a la corrosión de las aleaciones de aluminio.

4.7. Otros elementos de adición con el aluminio.

Además de los elementos citados, que son los principales, de aleación con el aluminio, se encuentran formando parte de las aleaciones ternarias y cuaternarias el hierro, el níquel, el titanio, el cromo, y el cobalto.

Todos estos elementos se encuentran en las aleaciones generalmente en forma de aluminuros, Al₃Fe₂, Al₃Ni, Al₇Cr, Al₃Co, que son insolubles o casi insolubles en la matriz de la aleación.

El hierro, aunque sea en pequeñas proporciones, forma parte de todas las aleaciones incorporado con el aluminio técnico, del que forma parte siempre como parte de impureza.

El titanio se adiciona para refinar el grano en la aleaciones con la mejora consiguiente de las propiedades mecánicas.

El cobalto endurece las aleaciones.

Y el níquel y cromo, además de endurecerlas, mejora su resistencia a la corrosión.

Los puntos eutécticos de las aleaciones de aluminio con todos estos elementos están por debajo de la proporción del 1%. Además, en general, pasado el punto eutéctico, la temperatura de iniciación de la solidificación asciende rápidamente.

Por todo esto, ninguno de los elementos citados forma parte de las aleaciones en proporciones superiores al 1%.

3. ALEACIONES DE ALUMINIO NORMALIZADAS.

El Instituto Nacional de Racionalización del Trabajo ha normalizado las aleaciones de aluminio, cuyas composiciones y características son las aceptadas generalmente por los fabricantes y transformadores del aluminio españoles. En estas normas se clasifican las aleaciones en aleaciones ligeras de aluminio para moldeo, que contienen elementos como el silicio que facilita su fusibilidad, y aleaciones ligeras de aluminio para forja, que contienen menores porcentajes de aleación que las de moldeo. Algunas ya han sido expuestas en tablas anteriores.

Entre las aleaciones normalizadas figuran algunas muy conocidas por su nombre comercial, como la L-311, comercialmente denominada duro-aluminio, de 95% de Al, 4 % de Cu, 0,5% de Mg, y 0,5% de Mn, que puede ser templada y adquiere extraordinaria dureza y resistencia mecánica por maduración natural. Precisamente fue este endurecimiento natural del duro-aluminio después de haberlo moldeado, el que condujo al descubrimiento del temple de precipitación y maduración natural y artificial.

También figuran entre otras aleaciones normalizadas el anticorodal (L-257), el siluminio o alpax (L-252), la aleación "Y" (L-315), etc,...

En los cuadros 4.1 y 4.2 se dan las composiciones y características mecánicas máximas que pueden obtenerse de las aleaciones de aluminio normalizadas.

4. TRATAMIENTOS ANTICORROSIVOS, MECÁNICOS Y TÉRMICOS DEL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES.

El aluminio y sus aleaciones pueden someterse a los siguientes tratamientos:

- **Tratamientos anticorrosivos.** Se realizan para dar mayor resistencia a la corrosión del aluminio. El más empleado es la oxidación anódica, que consiste esencialmente en aumentar el espesor de la película superficial de óxido que se produce naturalmente en el aluminio, mejorando a veces su aspecto dándole un acabado brillante o tiñéndola en diversos colores.
- **Tratamientos mecánicos.** Los trabajos de forja, laminación, trefilado, etc, realizados en frío aumentan la resistividad mecánica y dureza del aluminio y de las aleaciones forjables, como podemos observar en la figura posterior, a consecuencia del aumento de acritud adquirido por el material en su deformación. Esto se aprovecha ampliamente en las aleaciones ligeras para mejorar sus características mecánicas.
- **Tratamientos térmicos.** Los tratamientos térmicos que pueden aplicarse al aluminio y sus aleaciones son: El recocido de estabilización, el recocido contra acritud, el recocido de homogeneización, el temple de precipitación y la maduración artificial.

No todos los tratamientos citados pueden aplicarse y se aplican al aluminio y sus aleaciones, pues hay algunas de éstas que no endurecen con el temple, como se indican en los cuadros 4.1 y 4.2 de las aleaciones normalizadas.

5. RECOCIDO DEL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES.

Los recocidos, son operaciones de calentamiento y enfriamiento lento para conseguir la constitución y estructura más estable a temperatura ambiente y destruir, por tanto, cualquier anormalidad en que se encuentre el material producida por tratamientos mecánicos o térmicos. La intensidad de los recocidos depende, sobre todo, de la temperatura máxima a que se llega en el calentamiento. Según sea ésta y clasificados

con arreglo a la temperatura y de menor a mayor, se practican con el aluminio los siguientes recocidos:

- **Recocido de estabilización.** Tiene por objeto eliminar tensiones residuales que pueden producirse en el mecanizado o en la conformación en frío o en caliente. La operación se realiza calentando el material a temperaturas inferiores a la de recrystalización para que no se modifique su estructura micrográfica. Estas temperaturas varían según las aleaciones. Por ejemplo, las del aluminio de 99,97 oscilan entre 180°C y 210°C. El tiempo de permanencia a estas temperaturas es de unas 4 horas, exceptuando el tiempo de elevación de la temperatura y el de enfriamiento, que debe ser, sobre todo éste, muy lento para evitar la aparición de nuevas tensiones.
- **Recocido contra acritud.** Tiene por objeto eliminar la acritud adquirida por el material al deformarse en frío o a temperaturas inferiores a la recrystalización. Con este tratamiento no sólo recobran los granos deformados su forma poliédrica, sino que también, si la deformación ha sido muy intensa, se rompen los granos y constituyéndose los fragmentos en núcleos de recrystalización, se produce una nueva estructura granular más fina. A este fenómeno se le conoce con el nombre de germinación. Si la deformación sólo ha sido moderada, no se produce germinación y el material queda con el grano poliédrico, pero grueso.

Las temperaturas de recocido contra acritud dependen de la aleación, oscilando en general entre 300°C y 400°C, ya que la temperatura de recrystalización a la que debe superarse oscila entre 200°C y 300°C. Es conveniente pasar con rapidez esa zona de temperaturas de recrystalización, sobre todo, si las piezas no han sido muy deformadas, para evitar un excesivo crecimiento del grano. De todas maneras, si las piezas no han sido muy deformadas, no deben someterse al recocido contra acritud, porque aumentaría siempre el tamaño del grano.

El tiempo de permanencia a la temperatura máxima debe ser lo más breve posible y oscilará entre 2 y 8 horas, según la aleación, no debiendo sobrepasarse el tiempo máximo señalado de permanencia a la temperatura de recocido, para evitar también el crecimiento del grano. Por esto mismo se aconseja introducir las piezas en el horno, una vez que esté a la temperatura del recocido, para abreviar la duración de la elevación de la temperatura de la pieza.

- **Recocido de homogeneización y regeneración.** Tiene por objeto uniformar la composición química y el grano de las aleaciones de aluminio que son propensas a heterogeneidad química y estructural; el recocido se realiza a temperaturas comprendidas entre 450°C y 550°C durante un tiempo comprendido entre 15 y 60 minutos. A estas temperaturas se facilita la difusión de los elementos y la solución de otros como el silicio.

Con este tratamiento se consigue también la regeneración de las aleaciones endurecidas por el temple, anulando los efectos de éste y volviéndolas a su estado natural.

El enfriamiento debe ser lo más lento posible para evitar una constitución anormal por un enfriamiento demasiado rápido que dé lugar luego, por maduración natural, a un endurecimiento indeseable de la aleación, como ocurre con el duro-aluminio.

6. TEMPLE DE PRECIPITACIÓN DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO.

Definimos el temple en general, como un calentamiento hasta una temperatura adecuada, seguido de un enfriamiento muy rápido para impedir la transformación normal del constituyente obtenido en el calentamiento.

En el temple del acero, el constituyente formado en el calentamiento era la austenita, que se transformaba, en enfriamiento normal, en ferrita, y perlita (aceros hipoeutectoides), o perlita y cementita (aceros hipereutectoides). Pero si enfriamos

bruscamente el acero en estado austenítico, en lugar de formarse los constituyentes normales citados, se forma martensita, que ya vimos que es hierro α sobresaturado de carbono, lo que distorsiona sus cristales y los pone en tensión y el material queda endurecido. Este proceso es lo que constituye el temple martensítico.

Pues bien, si en una aleación de aluminio de solubilidad sólida variable y que forme compuesto químico como, por ejemplo, el duro-aluminio (Al y 4% de Cu), puesta a temperatura del recocido de homogeneización, para que toda aleación esté constituida por solución α de Cu en Al, se enfría lentamente línea N de la siguiente figura 7.1. Al atravesar la línea AB del límite de solubilidad sólida total del cobre en el aluminio, empieza a disminuir el porcentaje de cobre disuelto, que al "sedimentarse" reacciona con el aluminio formando el compuesto químico Al_2Cu , cada vez en mayor proporción hasta un cierto límite.

Pero si en lugar de enfriar lentamente desde la temperatura de recocido esta aleación de aluminio, la enfriamos bruscamente, línea R de la gráfica 7.1, no se precipita el compuesto químico y queda formada la aleación a la temperatura ambiente casi exclusivamente por solución sólida α del elemento aleado, en este caso, Cu en aluminio. Este enfriamiento rápido constituye el temple denominado de precipitación. Pero así como el acero adquiriría una gran dureza con el temple, las aleaciones de aluminio, en cambio, una vez templadas, tienen casi las mismas características mecánicas que antes. El endurecimiento se produce después progresiva y más o menos lentamente, pues como la solución sólida obtenida en el enfriamiento brusco es metaestable, a medida que pasa el tiempo se van precipitando diminutas partículas del compuesto químico, que dificulta el deslizamiento de los planos cristalinos de la solución sólida, lo que trae como consecuencia el endurecimiento progresivo de la aleación (figura 7.3).

Este fenómeno de precipitación se conoce con el nombre de maduración o envejecimiento y dura un tiempo variable, según la aleación. En el duro-aluminio (Al, con 4% de Cu) el endurecimiento es rapidísimo, pero en otras aleaciones llega a durar incluso hasta 3 meses. En todos los casos el endurecimiento es más rápido que al principio, para hacerse cada vez más lento a medida que pasa el tiempo.

7. MADURACIÓN ARTIFICIAL DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO.

Si la viscosidad atómica es elevada, no se produce la precipitación del compuesto o se produce muy lentamente a la temperatura ambiente. Entonces, se puede acelerar la precipitación con un tratamiento que se conoce con el nombre de maduración artificial o también revenido de endurecimiento, que consiste en calentar la aleación a una temperatura inferior a la del temple, con objeto de dilatar las redes cristalinas y facilitar la difusión y precipitación del compuesto químico y abreviar, por tanto, la duración del período de endurecimiento (figura 7.2).

Este tratamiento, por tanto, tiene efectos contrarios al revenido de los aceros con temple martensítico, que, como se recordará, disminuye la dureza y resistencia de los metales templados, en lugar de aumentarla como ocurre con la maduración artificial.

8. PRÁCTICA DEL TEMPLE DE MADURACIÓN DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO.

La temperatura de temple es muy similar a la de recocido de homogeneización y oscila alrededor de los 500°C. Para cada aleación existe una temperatura exacta del temple, que no debe variarse, de más o menos del 5%, pues como puede apreciarse en la figura siguiente, es muy pequeño el intervalo de temperaturas entre la temperatura que debe superarse para conseguir la solución total del elemento en el aluminio y la temperatura que no debe rebasarse para que no se produzca una fusión parcial de la aleación.

La duración de la permanencia a la temperatura de temple varía entre 15 minutos y 4 horas, dependiendo en todo caso del grueso de la pieza y estructura. Así, por ejemplo, la permanencia debe ser mayor para las piezas en bruto de moldeo que para las piezas forjadas.

El enfriamiento del temple se realiza generalmente en agua, y solamente si las piezas son muy delgadas, en aceite, o por pulverización de agua, o en el aire. Cuanto más suave sea el medio de enfriamiento, menos peligro habrá de tener tensiones residuales, deformaciones y grietas.

La maduración artificial se realiza a temperaturas comprendidas entre 130°C a 165°C, con permanencias de 8 a 24 horas a la temperatura máxima. El método de enfriamiento no tiene importancia y generalmente se realiza al aire, aunque puede enfriarse en agua. Las aleaciones se consideran de maduración natural, cuando tardan en adquirir la dureza máxima menos de 8 horas.

La resistencia mecánica obtenida después del temple y maduración es aproximadamente de dos a tres veces la que tenía antes del tratamiento.

La maduración produce un aumento de volumen que puede ser bastante importante, lo que debe ser tenido en cuenta, sobre todo, si las piezas son de maduración natural y, por tanto, el aumento de volumen se produce espontánea y a veces inesperadamente.

La conformación de las piezas templadas, si son de maduración natural, debe realizarse dentro de las 2 horas siguientes al temple, y si la conformación ha de ser complicada, se recomienda que se haga antes de los 30 minutos.

De todas maneras, puede detenerse a voluntad la maduración natural conservando las piezas templadas a temperaturas inferiores a 0°C.

Los remaches de duraluminio templado se conservan sin endurecimiento apreciable hasta 4 días en nieve carbónica a temperaturas comprendidas entre -6° a -10°C.

La conformación de las aleaciones de maduración artificial se realiza también después del temple, dando el tratamiento de maduración una vez adquirida su forma definitiva.

9. APLICACIONES DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO.

Las aleaciones de aluminio tienen cada día una mayor aplicación, utilizándose extensamente para la fabricación de piezas que deben ser resistentes y al mismo tiempo ligeras para las construcciones aeronáuticas, vagones de ferrocarriles de trenes articulados modernos, etc,... También se emplean para la fabricación de culatas, cárters, y émbolos de motores de explosión.

En la edificación se emplean las aleaciones de aluminio para la construcción de puertas y ventanas, molduras, etc,...

En las construcciones navales se emplean ampliamente determinadas aleaciones de aluminio por su resistencia a la corrosión marina.

En los cuadros 4.1, y 4.2 figuran las aplicaciones generales de cada tipo de aleación.