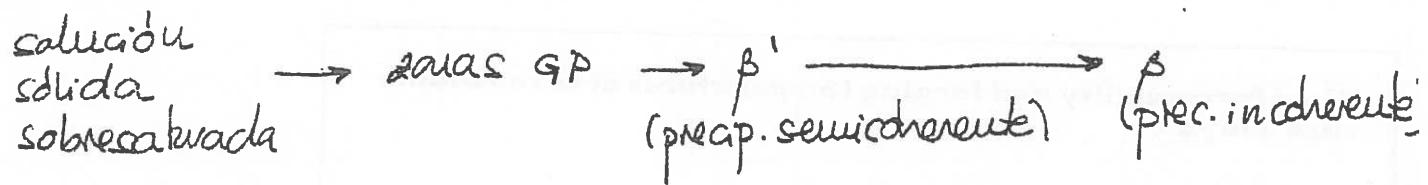


EACIONES ENDURECIDAS POR PRECIPITACIÓN

Aluminio Al-Mg-Si

Este tipo de aleaciones si responden al tratamiento térmico, luego pueden endurecerse por precipitación. Los elementos líticos fundamentales, el magnesio y el silicio, tienen una alta tendencia a reaccionar entre sí formando el SiMg_2 , un compuesto con una gran variedad de solubilidad en el aluminio: se comporta en sí como un aleante aunque su solubilidad sea un compuesto → diagrama pseudobinario: Al- SiMg_2

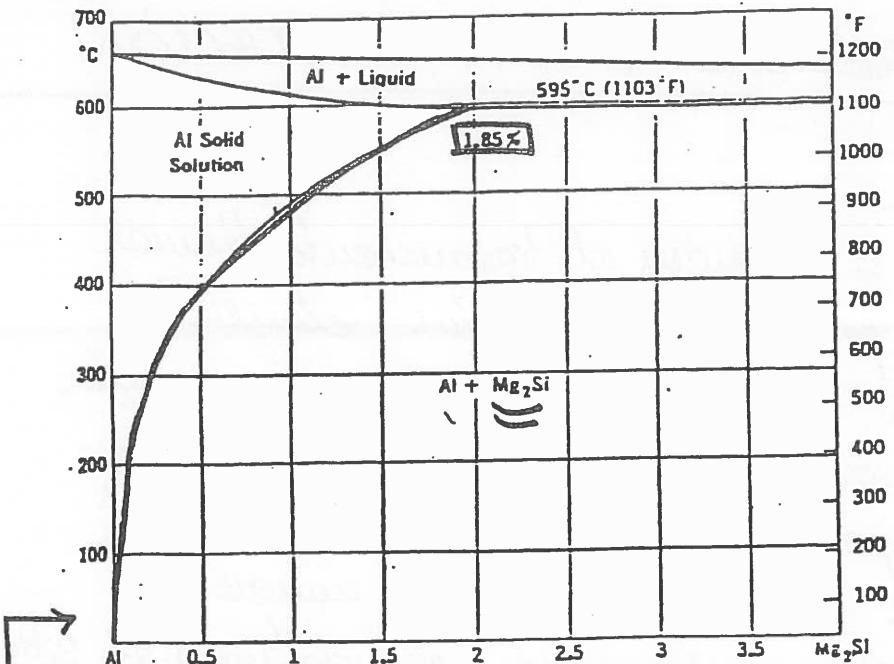
El SiMg_2 se disuelve a alta temperatura en la red del aluminio, donde queda atrapado durante el enfriamiento. Esta red sobresaturada de Mg_2Si se descompone según la secuencia que hemos estudiado:



La limitación es la máxima solubilidad del SiMg_2 (un 18%). La cantidad total de precipitados que se puede obtener es pequeña, luego se endurecerá "lo que pueda"

Características fundamentales de estas aleaciones son:

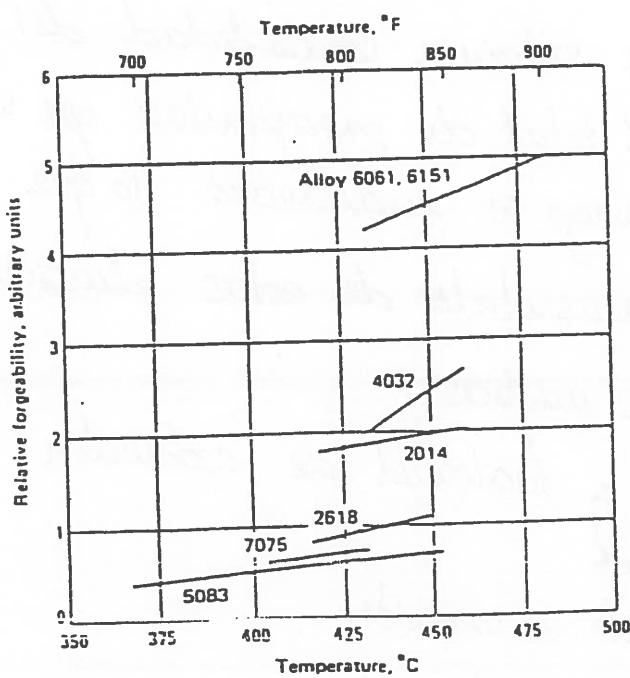
- Propiedades mecánicas medias
- Buena forjabilidad y facilidad de extrusión
- Buena soldabilidad
- Buena resistencia a corrosión
- Facilidad de anodizado.



System Al-Mg-Si, quasi-binary section Al-Mg₂Si, showing the solid solubility of Mg₂Si in aluminum.

Grau variacion de solubilidad

Fig. 6 Forgeability and forging temperatures of seven aluminum alloys



Forgeability increases as the arbitrary unit increases.

- Acción de los aliatantes sobre el comportamiento mecánico

Las proporciones del compuesto SiMg_2 son $\frac{\% \text{Mg}}{\% \text{Si}} = 1.73$ y, mayor SiMg_2 , mayor resistencia y límite elástico. Si el Mg y el Si no se añaden en proporción:

- Un exceso de Mg respecto a la relación ideal mejora poco las características mecánicas e incluso puede ser negativo, ya que puede reducir la solubilidad del SiMg_2 . Entorpece la precipitación del SiMg_2 luego no se emplearán relaciones tales que $\frac{\% \text{Mg}}{\% \text{Si}} > 1.73$.

- Un exceso de Si eleva la resistencia y el límite elástico pues colabora en la precipitación, pero empeora ligeramente el comportamiento a corrosión y disminuye la tenacidad.

La adicción de Cu eleva la resistencia mecánica pues ayuda en la precipitación. Retrasa la cinética de maduración natural, lo que puede ser negativo antes de la artificial.

- Cantidades de cobre superiores al 0.5% empeoran el comportamiento a corrosión, pero

- cantidades muy pequeñas, menores de 0.1% pueden disminuir la tendencia a fumar picaduras, pues es captado por el Fe para formar una fase intermetallica menos corrosiva.

los elementos formadores de dispersoides (Mn, Cr, Zr) tienen efecto antinecristalizante y mejoran la tenacidad de las aluminios. En la siguiente tabla se ve la importancia de la presencia de estos elementos:

→ aumento contenido de formador de dispersoides: Mn

- ↳ mejora A(%)
- ↳ $\text{R}_0.2$ no vale excesivamente
- ↳ mejora notablemente la tenacidad (resiliencia)
- ↳ mejora muchísimo el comportamiento frente a la rotura intercristalina: con un 0% Mn no se produce!

Tableau III - Alliage Al-Si-Mg. Influence de la précipitation intragranulaire sur la ténacité.

PRECIPITES INTRAGRANULAIRES	0% Mn	0,2% Mn		0,5% Mn		0,8% Mn	
		grossiers	fins	grossiers	fins	grossiers	fins
CARACTERISTIQUES DE TRACTION	$R_{0,2}$ (MPa)	280	285	280	275	270	265
	R_t (MPa)	300	310	305	305	295	290
	A (%)	10	14	18	17	19	19
	Z (%)	14	33	50	45	56	53
RESILIENCE (Charpy V) Joules		8	10	20	19	25	25
% rupture intergranulaire	100	90	20	50	10	20	0

→ % formador dispersoide.

La inmensa mayoría de la fabricación de estas aluminios no es para aplicación aeronáutica, pero se emplean muchísimo en las ventanas, pues como la

tenacidad no es muy importante en esta aplicación no hace falta añadir dispersantes, que encajan el material y estropean la capacidad de deformación en caliente (y las ventanas se fabrican por extrusión!)

Los dispersantes se emplean para aplicaciones aeronáuticas pero no en las domésticas.

- Tratamiento térmico de las aleaciones Al-Mg-Si:

Para la fabricación de una ventana, p.e., que se realiza por extrusión, se calienta el material, se extruye y se enfria, pero luego tenemos de volver a calentar para dar el tratamiento de solución y volver a enfriar! Este procedimiento es caro, pues tenemos de calentar dos veces luego lo que haremos será un tratamiento T5 y aprovechar el calentamiento que tenemos de dar para extruir para la solución sólida, buscando alguna forma de que a la salida de la extrusora la pieza se enfrie con la velocidad necesaria. Esta otra forma no será tan efectiva como la anterior, aunque para aplicaciones como la de las ventanas no me importa demasiado.

- Aleaciones Al-Mg-Si más utilizadas.

Podemos considerarlas agrupadas en tres grupos:

- Menor resistencia y fácil extrusión
- Resistencia media
- Alta resistencia.

- Aluminios de menor resistencia: 6060, 6063, 6106 que son los que se emplean, p.e. en las ventanas — no tienen elementos formadores de dispersoides y las cantidades de Si y Mg son moderadas.
- Aluminios de resistencia media, donde se distinguen las que no llevan dispersoides y las que si llevan, como la 6061 y sus variantes que se emplean mucho en aeronáutica (la 6061 lleva también Cu)
- Aluminios de resistencia elevada, como la 6013 que llevan una mayor cantidad de aleantes y tienen aplicación aeronáutica, pues ahorra peso y da mejores propiedades mecánicas que la 6061.

Estas aluminios, aunque no se empleen en estructuras de aviones grandes, si se usa mucho para arietas pequeñas, ultraligeras,... pues no exige un mantenimiento exhaustivo del problema de la corrosión (un particular con una arieta no le va a realizar las defecaciones y revisiones que hace una compañía aérea, luego estas aluminios que se comportan muy bien a corrosión son muy apropiadas).

ALEACIONES Al-Hg-Si

Fabricación por extrusión de un marco de neutana.

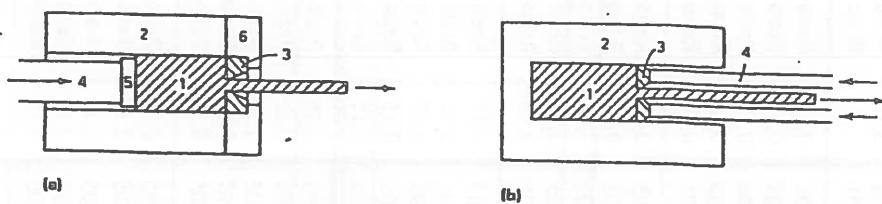


Fig. 2 Basic methods of extrusion. (a) Forward (direct). (b) Backward (indirect). 1, billet; 2, container; 3, die; 4, stem; 5, dummy block; 6, die backer

- > Comparación entre dos formas de dar tratamiento térmico:
- 1 Caliente para la extrusión, enfriar y volver a calentar para el tratamiento de solución enfriado a la velocidad

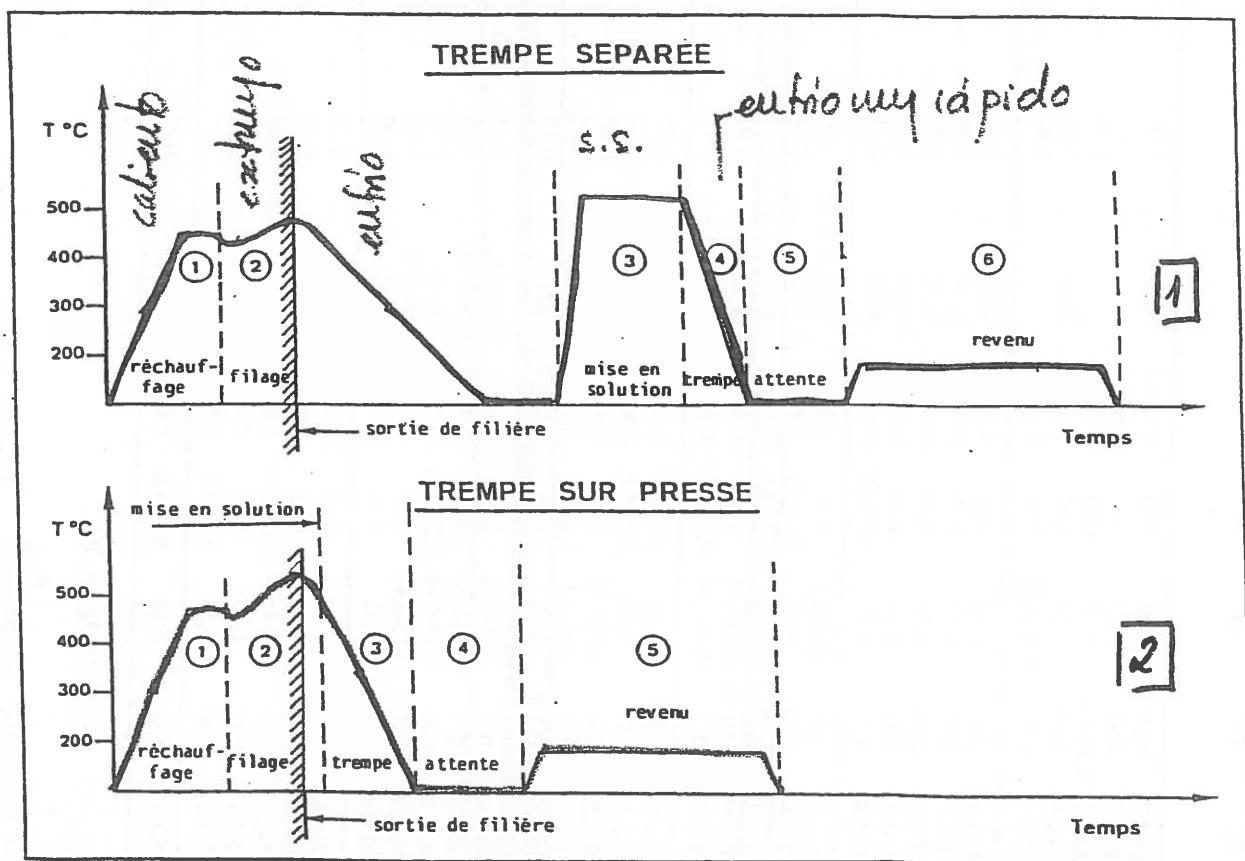


Fig. 1 - Schéma des opérations de trempe séparée et de trempe sur presse.

- 2 Caliente, extrusión e intento enfriar suficientemente rápido para conseguir la s.s. sobrestable. Ver que la velocidad de enfriamiento es mayor en el caso 1. (pt. mayor en ④ de 1 que en ③ de 2!)

Altares de aluminio. serie UUUU. Al 14% Si]

Numérica	Designación de la aleación	Símbólica	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	Notas	Ti	Cada mm ⁰	Otro ^{1,0} mm ⁰	Total ^{1,0}	Aluminio mín.
EN AW-6101	EN AW-EAI MgSi		0,30-0,7	0,50	0,10	0,03	0,35-0,8	0,03	0,10	...	0,10	...	0,06 B	...	0,03	0,10	Resto	
EN AW-6101A	EN AW-EAI MgSi(A)		0,30-0,7	0,40	0,05	...	0,40-0,9	...	0,10	...	0,10	0,03	0,10	Resto	
EN AW-6101B	EN AW-EAI MgSi(B)		0,30-0,6	0,10-0,30	0,05	0,05	0,35-0,6	...	0,10	...	0,10	...	0,06 B	...	0,03	0,10	Resto	
EN AW-6102	EN AW-EAI Mg0,7Si		0,50-0,9	0,50	0,10	0,03	0,6-0,9	0,03	0,10	...	0,10	...	0,06 B	...	0,01	0,01	...	
EN AW-6401	EN AW-AI 99,9MgSi		0,35-0,7	0,04	0,05-0,20	0,03	0,35-0,7	...	0,04	...	0,04	...	0,06 B	...	0,01	0,01	...	
EN AW-6003	EN AW-AI Mg1Si0,8		0,35-1,0	0,6	0,10	0,8	0,8-1,5	0,35	0,20	...	0,20	...	0,06 B	...	0,10	0,05	0,15	
EN AW-6005	EN AW-AI SiMg		0,6-0,9	0,35	0,10	0,10	0,40-0,6	0,10	0,10	...	0,10	...	0,06 B	...	0,10	0,05	0,15	
EN AW-6005A	EN AW-AI SiMg(A)		0,50-0,9	0,35	0,30	0,50	0,40-0,7	0,30	0,20	...	0,20	...	0,12-0,50 Mn+Cr	...	0,10	0,05	0,15	
EN AW-6005B	EN AW-AI SiMg(B)		0,45-0,8	0,30	0,10	0,10	0,40-0,8	0,10	0,10	...	0,10	...	0,12-0,50 Mn+Cr	...	0,10	0,05	0,15	
EN AW-6106	EN AW-AI MgSiMn		0,30-0,6	0,35	0,25	0,05-0,20	0,40-0,8	0,20	0,10	...	0,10	...	0,06 B	...	0,05	0,10	Resto	
EN AW-6011	EN AW-AI Mg0,9Si0,9Cu		0,6-1,2	1,0	0,40-0,9	0,8	0,6-1,2	0,30	0,20	1,5	0,7 Bi; 0,40-2,0Pb	...	0,20	0,05	0,15	
EN AW-6012	EN AW-AI MgSiPb		0,6-1,4	0,50	0,10	0,40-1,0	0,6-1,2	0,30	0,30	...	0,30	...	0,12-0,50 Mn+Cr	...	0,10	0,05	0,15	
EN AW-6013	EN AW-AI Mg1Si0,8CuMn		0,6-1,0	0,50	0,6-1,1	0,20-0,8	0,8-1,2	0,10	0,10	0,25	0,12-0,50 Mn+Cr	...	0,10	0,05	0,15	
EN AW-6015	EN AW-AI Mg1Si0,10,3Cu		0,20-0,40	0,10-0,30	0,10-0,25	0,10	0,8-1,1	0,10	0,10	0,10	0,10	...	0,12-0,50 Mn+Cr	...	0,10	0,05	0,15	
EN AW-6018	EN AW-AI Mg1SiPbMn		0,50-1,2	0,7	0,15-0,40	0,30-0,8	0,6-1,2	0,10	0,10	0,30	0,30	...	0,12-0,50 Mn+Cr	...	0,10	0,05	0,15	
EN AW-6351	EN AW-AI Si11Mg0,5Mn		0,7-1,3	0,50	0,10	0,40-0,8	0,40-0,8	...	0,20	...	0,20	...	0,12-0,50 Mn+Cr	...	0,20	0,05	0,15	
EN AW-631A	EN AW-AI Si11Mg0,5Mn(A)		0,7-1,3	0,50	0,10	0,40-0,8	0,40-0,8	...	0,20	...	0,20	...	0,12-0,50 Mn+Cr	...	0,20	0,05	0,15	
EN AW-6931	EN AW-AI MgSi0,3Cu		0,20-0,50	0,8	0,15-0,40	0,10	0,40-0,8	...	0,20	...	0,20	...	0,12-0,50 Mn+Cr	...	0,10	0,05	0,15	
EN AW-6036	EN AW-AI Si11Mg8CuMn		0,7-1,3	0,50	0,50-1,1	0,40-1,0	0,6-1,2	0,25	0,10	0,10	0,10	0,15	0,12-0,50 Mn+Cr	...	0,10	0,05	0,15	
EN AW-6060	EN AW-AI MgSi		0,30-0,6	0,10-0,30	0,10	0,10	0,35-0,6	0,05	0,10	0,10	0,10	0,15	0,12-0,50 Mn+Cr	...	0,10	0,05	0,15	
EN AW-6061	EN AW-AI Mg1SiCu		0,40-0,8	0,7	0,15-0,40	0,15	0,8-1,2	0,04-0,35	0,25	0,25	0,25	0,25	0,12-0,50 Mn+Cr	...	0,15	0,05	0,15	
EN AW-6061A	EN AW-AI Mg1SiCu(A)		0,40-0,8	0,7	0,15-0,40	0,15	0,8-1,2	0,04-0,35	0,25	0,25	0,25	0,25	0,12-0,50 Mn+Cr	...	0,10	0,05	0,15	
EN AW-6261	EN AW-AI Mg1SiCuMn		0,40-0,7	0,40	0,15-0,40	0,20-0,35	0,7-1,0	0,10	0,20	...	0,20	...	0,12-0,50 Mn+Cr	...	0,15	0,05	0,15	
EN AW-6262	EN AW-AI Mg1SiPb		0,40-0,8	0,7	0,15-0,40	0,15	0,8-1,2	0,04-0,14	0,25	0,25	0,25	0,25	0,12-0,50 Mn+Cr	...	0,10	0,05	0,15	
EN AW-6053	EN AW-AI Mg0,7Si		0,20-0,6	0,35	0,10	0,10	0,45-0,9	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,12-0,50 Mn+Cr	...	0,10	0,05	0,15	
EN AW-603A	EN AW-AI Mg0,7Si(A)		0,30-0,6	0,15-0,35	0,10	0,15	0,6-0,9	0,05	0,15	0,15	0,15	0,15	0,12-0,50 Mn+Cr	...	0,10	0,05	0,15	
EN AW-6463	EN AW-AI Mg0,7Si(B)		0,20-0,6	0,15	0,20	0,05	0,45-0,9	...	0,05	0,05	0,05	0,05	0,12-0,50 Mn+Cr	...	0,10	0,05	0,15	
EN AW-6081	EN AW-AI Si0,9MgMn		0,7-1,1	0,50	0,10	0,10-0,45	0,6-1,0	0,10	0,20	...	0,20	...	0,12-0,50 Mn+Cr	...	0,10	0,05	0,15	
EN AW-6181	EN AW-AI Si11Mg0,8		0,8-1,2	0,45	0,10	0,15	0,6-1,0	0,10	0,20	...	0,20	...	0,12-0,50 Mn+Cr	...	0,10	0,05	0,15	
EN AW-6082	EN AW-AI Si11MgMn		0,7-1,3	0,50	0,10	0,40-1,0	0,6-1,2	0,25	0,20	0,20	0,20	0,20	0,12-0,50 Mn+Cr	...	0,10	0,05	0,15	
EN AW-6082A	EN AW-AI Si11MgMn(A)		0,7-1,3	0,50	0,10	0,40-1,0	0,6-1,2	0,25	0,20	0,20	0,20	0,20	0,12-0,50 Mn+Cr	...	0,10	0,05	0,15	

Altares de menor resistencia media.

— Altares de resistencia elevada

— Altares de resistencia elevada

Aluminio Al-Cu

Como vemos en el diagrama Al-Cu (Fig 2.17) el cobre se disuelve un 5% más o menos a temperatura elevada en la red del aluminio. Se forma αAl_2 , y a temperatura elevada presenta una eutéctica.

A temperatura ambiente es insoluble, y emplearemos la variación de solubilidad con la temperatura para dar tratamientos térmicos a estas aleaciones, pues responden mucho mejor que las anteriores (se disuelve una mayor cantidad). ¿Cuánto cobre le ponemos? Aunque echemos un 10%, sólo se disolverá del orden de un 5%, y el resto lo único que hará será empeorar el comportamiento a corrosión por picaduras, luego no echaremos más de un 5%. Dentro de ese límite, cuanta más cantidad añadamos, más se refundirá en la red, más precipitados se producirán y mejores propiedades mecánicas obtendremos. En la fig 2.18, vemos que los máximos de resistencia y límite elástico se alcanzan para cantidades en peso de cobre del 4-5%.

Otros elementos aliados son:

. Mg, que colabora en el proceso de precipitación ($\uparrow\%$ Mg \Rightarrow obtengo mejores propiedades). Acelera el proceso de descomposición de la solución sólida pues la hace más instable, con lo que mejora y favorece mucho la maduración natural. Por contra, deteriora la forjabilidad.

y soldabilidad, aunque casi todas las aleaciones de esta familia llevan Mg

Si, juega un doble papel, uno positivo y uno negativo: en cantidad suficiente puede participar en la formación de precipitados, contribuyendo al endurecimiento, pero también favorece la formación de fases intermetálicas, deteriorando la tenacidad

Mn, es un formador de dispersoides, antimarcasitizante, luego controla el tamaño de grano y mejora la tenacidad. Aumenta la resistencia (máximo 15%) al "incordiar" a las dislocaciones.

Ni, tras la maduración, la aleación no está completamente en equilibrio, y si en servicio trabaja a temperatura elevada, el proceso de descomposición continúa modificando las propiedades mecánicas. Para poder emplear estas aleaciones en zonas de altas temperaturas, se añade Ni, pues retrasa la evolución de la microestructura, manteniéndola incluso a temperatura elevada. Este alaute no se echa si la pieza no va a trabajar a alta temperatura.

Bi, Pb, no es usual encontrarlos como aleantes, pero se añade una pequeña cantidad para facilitar la mecanización, fraccionando la viruta (no hacen nada, no hacían, aparte de eso)

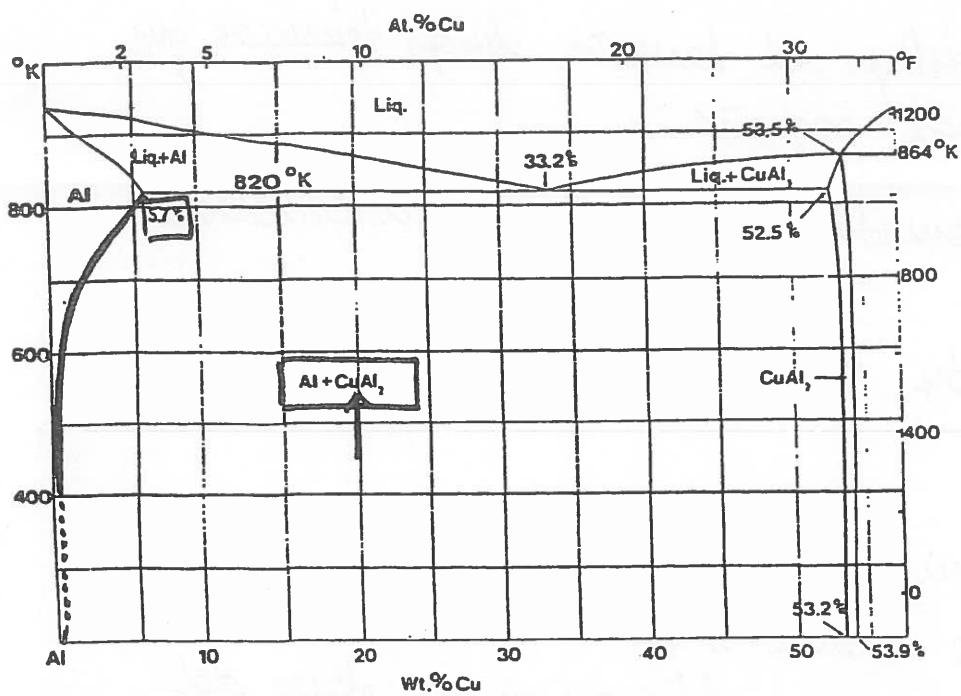
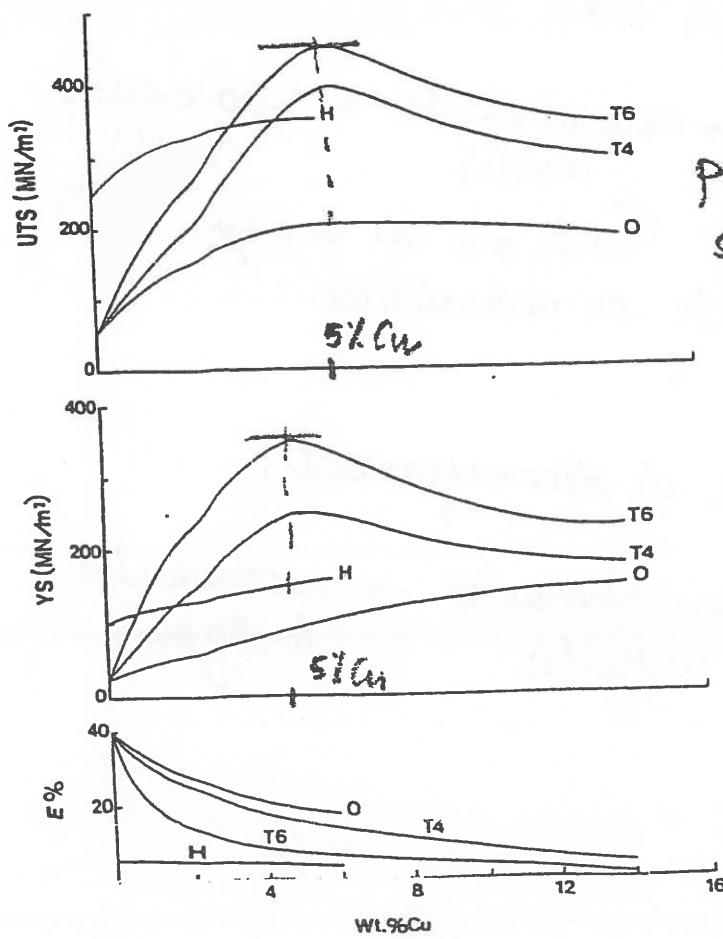


Figure 2.17. The aluminum end of the aluminum-copper equilibrium diagram

Se disuelven del orden de 5% a Tlevada.



Los mejoramos en las propiedades mecánicas se obtienen para % Cu \approx 4 - 5%.

Figure 2.18. Mechanical properties of aluminum-copper alloys as function of copper content.
H = work hardened; O = annealed; T₄ = quenched and naturally aged; T₆ = quenched and artificially aged

• Ti, V, se añaden en pequeña cantidad pues actúan como afinantes de grano durante la solidificación: los dispersoides sólo evitan que se modifique el tamaño, luego tenemos que hacer que inicialmente sea pequeño.

• Fe, forma fases intermetálicas, deteriorando la tenacidad.

Procesos de precipitación de los aleados Al-Cu

• Sistema Al-Cu

Es una excepción en el diagrama binario, pues se forman dos zonas GP, ambas coherentes que se diferencian en tamaño y tamaño. Las primeras, GPI, se forman en un plazo del cristal, y las segundas, GP2, "engordan", ocupando varias capas: discos

→ zonas GPI → zonas GP2 → semi-coherentes → incoherentes
 $(CuAl_2)$ $(CuAl_2)$

↑ cada uno con su propia red

Si añado Mg, muy caliente en aleación.

• Sistema Al-Cu-Mg

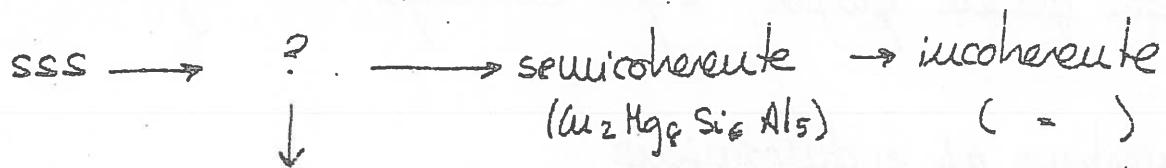
se modifica la secuencia de descomposición:

ccc → zonas GPB → semi-coherentes → incoherentes
nueve de uno de los $(CuMgAl_2)$ $(CuMgAl_2)$

investigadores

Si añadimos Si:

Sistema Al-Cu-Mg-Si



No se sabe muy bien si el silicio pasa a formar parte de las zonas GP, aunque si entra en los precipitados

> no son fases excluyentes, pueden intervenir las unas en las otras según la composición de la aleación.

- Comportamiento a corrosión

Son aleaciones muy problemáticas, pues el Cu presenta en general una mala resistencia a corrosión por la gran diferencia de potencial que tiene con el aluminio.

Son aleaciones muy susceptibles de sufrir corrosión por picaduras, pues se forman pilas locales

Tienen también un mal comportamiento a corrosión por exfoliación, aunque varía mucho según el tratamiento térmico pues es corrosión intercristalina: en general se comportan peor las aleaciones con maduración natural T3 y T4 que con maduración artificial T6 y T8.

Son también susceptibles de sufrir corrosión bajo tensiones compendiándose peor con T3 y T4 que con T6 y T8, aunque no hay gran diferencia en velocidad de crecimiento.

- Aplicaciones aeráuticas de esta familia.

Distinguimos dos grandes grupos según contenga o no Magnesio como aleante.

El Magnesio : contribuye al endurecimiento

acelera el proceso de descomposición de la ss, luego produce mayor precipitación en maduración natural "incordia" a las dislocaciones pues es un óxido más "gordo" que el aluminio a temperaturas elevadas de forma, incordia el movimiento de las dislocaciones, reduciendo la fuerza al acelerar el proceso de descomposición, hace que el sistema tenga una evolución más rápida hacia el equilibrio, luego antes se llega a la estructura de precipitados incoherentes!

→ las aleaciones sin Mg, que tendrán una cinética más lenta, soportarán durante más tiempo temperaturas más altas que las aleaciones que si lo contienen → mayor forjabilidad y soldabilidad.

Aleaciones sin magnesio (Al-Cu)

- la primera aleación de este grupo desarrollada es la 2025 que se empleaba en hélices de avión y otras estructuras forjadas; ya no se usa.

- Posteriormente aparece la 2219, con una mayor cantidad de Cu (pero no lleva otra cosa!) → mayor resistencia, mejor comportamiento a corrosión bajo tensiones y mejores propiedades a temperatura elevada. Lleva fármadas de dispersoides (Mn) para soportar temperaturas elevadas, pues sus fases muy estables que no se modifican a T alta. Además tiene una excelente soldabilidad y muy buenas propiedades a temperaturas muy bajas (no se entragiliza como otras aleaciones!). Tiene muchas aplicaciones, p.e. para zonas de temperaturas elevadas (dado que incluye las Al-Cu-Mg) y para aplicaciones a T bajas, como tanques para gases licuados y construcción de lanzaderas espaciales.
- La aleación 2011 es una variante de la 2219 a la que se añade Bi y Pb para facilitar la mecanización. No se usa.
- La aleación 2021 es una variante de la 2219 con otros aleantes como Cd y Sn.

Aleaciones con magnesio (Al-Cu-Mg)

- Estas aleaciones tuvieron una importante aplicación en dirigibles y aviones con el descubrimiento de Mn (1906) [duraluminio].
- Aleación 2017: contiene Mn como fármada de dispersoides, se varían sus proporciones hasta obtener las propiedades óptimas

des de sus variantes, la 2117 y 2017 A tiene una enorme utilización, pues se emplean en la fabricación de remaches. La 2117 está menos aliada que la 2017, lleva menos cobre y se usa en estado T4, que aunque tenga menor dureza y resistencia tiene más plasticidad. Aunque madure no queda muy duro, y se pueden colocar los remaches tal cual, antes habrá que cogerlos para evitar que madurasen y se mantuvieran blandos para poder ponerlos!

La aleación 2024 supone el Si como aleante y aumenta mucho el contenido en Mg, obteniendo muy buen comportamiento en estado T4. Se emplea en muchas piezas de avión, y fue el material del que se construyó el primer avión todo metálico. (Mad. natural)

Las aleaciones 2124, 2324 restringen aún más el contenido en Si y Fe, mejorando la tenacidad, que desde el punto de vista de la seguridad de la aeronave es esencial. Por su alto contenido en Mg son difíciles de deformar al calientar.

La aleación 2014 disminuye bastante el contenido en Mg e introduce el Si como aleante, de forma que se obtiene una menor respuesta en maduración natural (no se usará en T3 o T4) pero buena en artificial → se utiliza preferentemente en T6 para piezas forjadas (p.e. en las llantas de los coches).

Aleaciones Al-Cu

Aleación	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Otros
2025	0'5-1'2	1'0	3'9-5'0	0'4-1'2	0'05	
2219	0'20	0'30	5'8-6'8	0'20-0'40	0'02	V:0'05-0'15 Ti:0'02-0'10 Zr:0'10-0'25
2011	0'4	0'7	5'0-6'0	0'05	0'05	Bi:0'2-0'6 Pb:0'2-0'6
2011A	0'4	0'5	4'5-6'0	0'05	0'05	Bi:0'2-0'6 Pb:0'2-0'6
2021	0'2	0'3	5'8-6'8	0'2-0'4	0'02	V:0'05-0'15 Zr:0'10-0'25 Ti:0'02-0'10 Cd:0'05-0'20 Sn:0'03-0'08

Aleaciones sin Magnesio

Aleaciones Al-Cu-Mg

Aleación	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Otros
2017	0'2-0'8	0'7	3'5-4'5	0'4-1'0	0'4-0'8	
2117	0'8	0'7	2'2-3'0	0'20	0'20-0'5	
2017A	0'2-0'8	0'7	3'5-4'5	0'4-1'0	0'4-1'0	Zr+Ti:0'25
2024	0'5	0'5	3'8-4'9	0'3-0'9	1'2-1'8	
2124	0'20	0'30	3'8-4'9	0'3-0'9	1'2-1'8	
2324	0'10	0'12	3'8-4'4	0'3-0'9	1'2-1'8	
2048	0'15	0'20	2'8-3'8	0'2-0'6	1'2-1'8	
2014	0'5-1'2	0'7	3'9-5'0	0'4-1'2	0'2-0'8	
2214	0'5-1'2	0'3	3'9-5'0	0'4-1'2	0'2-0'8	
2014A	0'5-0'9	0'5	3'9-5'0	0'4-1'2	0'2-0'8	Zr+Ti:0'20
2618	0'10-0'25	0'9-1'3	1'9-2'7	0'05	1'3-1'8	Ni:0'9-1'2
2618A	0'15-0'25	0'9-1'4	1'8-2'7	0'25	1'2-1'8	Ni:0'8-1'4 Zr+Ti:0'25
2036	0'5	0'5	2'2-3'0	0'1-0'4	0'3-0'6	

Aleaciones con Magnesio como aleante

No es exactamente de este grupo. contiene Ni (es la aleación para el Concorde)

En esta tabla se refleja el buen comportamiento de las aleaciones 2024 en estado de maduración natural, T3 ó T4.

Aluminio EN AW-2024 [Al Cu4Mg1]

Estado de tratamiento	Espesor nominal mm		R_m MPa		$R_{p0,2}$ MPa		Alargamiento min. %		Radio de doblado		Dureza HBS
	Mayor que	hasta	mín.	máx.	mín.	máx.	A_{50mm}	A	180°	90°	
O	≥0,4	1,5		220		140	12		0,5 t	0 t	55
	1,5	3,0		220		140	13		2,0 t	1,0 t	55
	3,0	6,0		220		140	13		3,0 t	1,5 t	55
	6,0	9,0		220		140	13			2,5 t	55
	9,0	12,5		220		140	13			4,0 t	55
	12,5	25,0		220				11			55
T4	≥0,4	1,5	425		275		12		4,0 t		120
	1,5	6,0	425		275		14		5,0 t		120
T3 T351 ²⁾	≥0,4	1,5	435		290		12		4,0 t	4,0 t	123
	1,5	3,0	435		290		14		4,0 t	4,0 t	123
	3,0	6,0	440		290		14		5,0 t	5,0 t	124
	6,0	12,5	440		290		13			8,0 t	124
T351	12,5	40,0	430		290			11			122
	40,0	80,0	420		290			8			120
	80,0	100,0	400		285			7			115
	100,0	120,0	380		270			5			110
	120	150,0	360		250			5			104
T42	≥0,4	6,0	425		260		15				119
	6,0	12,5	425		260		12				119
	12,5	25,0	420		260			8			118
T8 T851	≥0,4	1,5	460		400		5				138
	1,5	6,0	460		400		6				138
	6,0	12,5	460		400		5				138
T851	12,5	25,0	455		400			4			137
	25,0	40,0	455		395			4			136
T62	≥0,4	12,5	440		345		5				129
	12,5	25,0	435		345			4			128

Para nuevas aplicaciones de esta aleación, que impliquen ciertas propiedades tales como la resistencia a la corrosión, tenacidad, resistencia a la fatiga, se recomienda encarecidamente al comprador que consulte al suministrador con objeto de realizar una selección más rigurosa del material.

1) Para información solamente.

2) Se pueden obtener radios de doblado bastante inferiores inmediatamente después del temple.

Aluminio EN AW-2014 [Al Cu4SiMg]

Estado de tratamiento	Espesor nominal mm		R _m MPa		R _{p0,2} MPa		Alargamiento min. %		Radio de doblado		Dureza HBS n)
	Mayor que	hasta	mín.	máx.	mín.	máx.	A _{50mm}	A	180°	90°	
O	≥0,4	1,5		220		140	12		0,5 t	0 t	55
	1,5	3,0		220		140	13		1,0 t	1,0 t	55
	3,0	6,0		220		140	16			1,5 t	55
	6,0	9,0		220		140	16			2,5 t	55
	9,0	12,5		220		140	16	10		4,0 t	55
	12,5	25,0		220							55
T3	≥0,4	1,5	395		245		14				111
	1,5	6,0	400		245		14				112
T4	≥0,4	1,5	395		240		14		3,0 t	3,0 t	110
T451	1,5	6,0	395		240		14		5,0 t	5,0 t	110
²⁾	6,0	12,5	400		250		14			8,0 t	112
T451	12,5	40,0	400		250			10			112
	40,0	100,0	395		250			7			111
T42	≥0,4	6,0	395		230		14				110
	6,0	12,5	400		235		14				111
	12,5	25,0	400		235			12			111
T6	≥0,4	1,5	440		390		6			5,0 t	133
T651	1,5	6,0	440		390		7			7,0 t	133
²⁾	6,0	12,5	450		395		7			10 t	135
T651	12,5	40,0	460		400			6			138
	40,0	60,0	450		390			5			135
	60,0	80,0	435		380			4			131
	80,0	100,0	420		360			4			126
	100,0	120,0	410		350			4			123
T62	≥0,4	12,5	440		390		7				133
	12,5	25,0	450		395			6			135

Para nuevas aplicaciones de esta aleación, que impliquen ciertas propiedades tales como la resistencia a la corrosión, tenacidad, resistencia a la fatiga, se recomienda encarecidamente al comprador que consulte al suministrador con objeto de realizar una selección más rigurosa del material.

1) Para información solamente.

2) Se pueden obtener radios de doblado bastante inferiores inmediatamente después del temple.

Si comparamos esta tabla (2014) con la anterior (2024) vemos que su comportamiento es contrario. Esta se emplea en estado T6, maduración artificial.

COMPORTAMIENTO A CORROSIÓN BAJO TENSIONES

(Tabla Resumen)

Table 6 Relative stress-corrosion (cracking) ratings for wrought products of high-strength aluminum alloys(a)

Alloy and temper(b)	Test direction(c)	Rolled plate	Rod and bar(d)	Extruded shapes	Forgings
2011-T3, -T4	L.....	(e)	B	(e)	(e)
	LT.....	(e)	D	(e)	(e)
	ST.....	(e)	D	(e)	(e)
2011-T8	L.....	(e)	A	(e)	(e)
	LT.....	(e)	A	(e)	(e)
	ST.....	(e)	A	(e)	(e)
2014-T6	L.....	A	A	A	B
	LT.....	B(f)	D	B(f)	B(f)
	ST.....	D	D	D	D
2024-T3, -T4	L.....	A	A	A	(e)
	LT.....	B(f)	D	B(f)	(e)
	ST.....	D	D	D	(e)
2024-T6 LNB se usa!	L.....	(e)	A	(e)	A
	LT.....	(e)	B	(e)	A(f)
	ST.....	(e)	B	(e)	D
2024-T8	L.....	A	A	A	A
	LT.....	A	A	A	A
	ST.....	B	A	B	C
2048-T851	L.....	A	(e)	(e)	(e)
	LT.....	A	(e)	(e)	(e)
	ST.....	B	(e)	(e)	(e)
2124-T851	L.....	A	(e)	(e)	(e)
	LT.....	A	(e)	(e)	(e)
	ST.....	B	(e)	(e)	(e)
2219-T3, -T37	L.....	A	(e)	A	(e)
	LT.....	B	(e)	B	(e)
	ST.....	D	(e)	D	(e)
2219-T6, -T8	L.....	A	A	A	A
	LT.....	A	A	A	A
	ST.....	A	A	A	A
6061-T6	L.....	A	A	A	A
	LT.....	A	A	A	A
	ST.....	A	A	A	A

A : bueno
 B : regular
 C : malo
 D : "horrible"

(a) Resistance ratings are as follows: A—very high; B—high; C—intermediate; D—low. See text for more detailed explanation of these ratings. (b) Ratings apply to standard mill products in the types of tempers indicated and also in T₅₅x and T₅₅xx (stress-relieved) tempers, and may be invalidated in some instances by use of non-standard thermal treatments, or mechanical deformation at room temperature, by the user. (c) Test direction refers to orientation of direction in which stress is applied relative to the directional grain structure typical of wrought alloys, which for extrusions and forgings may not be predictable on the basis of the cross-sectional shape of the product: L—longitudinal; LT—long transverse; ST—short transverse. (d) Sections with width-to-thickness ratios equal to or less than two, for which there is no distinction between LT and ST properties. (e) Rating not established because product not offered commercially. (f) Rating is one class lower for thicker sections: extrusions, 25 mm (1 in.) and thicker; plate and forgings, 40 mm (1.5 in.) and thicker.

L - dirección longitudinal
 LT - transversal larga
 ST - transversal corta (espesar)

(VER M/235?)

2024 → T3 peor que T6

2219 → T3 no se usa

2219 → T6 ✓

6061 T6 → ✓✓ menores prop. mecánicas pero considerar ok!

• Aliaciones Al-Mn-Mg

Elementos aleantes e impurezas:

Zn, es el elemento aleante principal, y su misión es formar precipitados durante el tratamiento. Si sólo echamos Zn (en ausencia de Mg) es poco eficaz como endurecedor.

Mg, forma con el Zn los precipitados endurecedores. A mayor $(Zn+Mg)$ mayores características mecánicas pero mayor sensibilidad a la velocidad de enfriamiento: hace la solución sólida más inestable, luego se requieren mayores velocidades de enfriamiento para retener los aleantes \rightarrow se reduce el espesor de los productos para tener una velocidad de enfriamiento adecuada en todos los puntos de la pieza.

Cu, tiene un efecto sobre las propiedades mecánicas similar a un incremento equivalente de Zn. Tiende a empeorar el comportamiento a corrosión pero mejora la corrosión bajo tensiones. Si Cu < 0.3% mejora el comportamiento a corrosión y en soldadura.

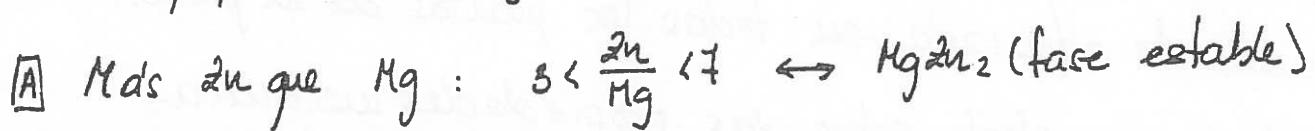
Cr es un formador de dispersoides, antimacristalizante, que evita el crecimiento del grano. Mejora el comportamiento a corrosión y corrosión bajo tensiones, pero facilita la descomposición de la solución sólida \rightarrow obliga a velocidades de enfriamiento grandes y espesores máximos de producto menores.

- Ag, con acierto similar a la del cobre
- Fe, forma compuestos intermetálicos deteriorando la cerámica cuanto menos haya, mejor.
- Si, igual que el Fe

Todos los elementos formadores de dispersoides actúan negativamente sobre la sensibilidad a la velocidad de eutriángulos de la solución.

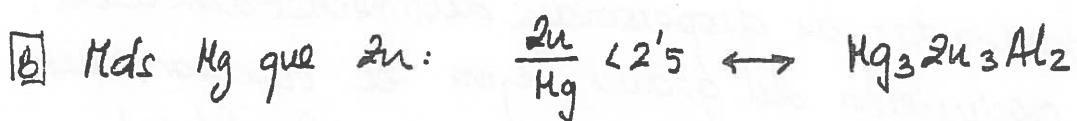
- Sistemas de precipitación en las aleaciones Al-Zn-Mg

El sistema tiene dos secuencias de descomposición según sea la proporción Zn/Mg:



SSS \rightarrow GP \rightarrow semicoherente \rightarrow incoherente
 esféricas (Mg_{2Zn_2}) (Mg_{2Zn_2})
 (menor energía libre)

Es la más normal



SSS \rightarrow G.P \rightarrow semicoherente \rightarrow incoherente
 $(Mg_3Zn_3Al_2)$ $(Mg_3Zn_3Al_2)$

* Si $1,5 < \frac{Zn}{Mg} < 3$ presenta una secuencia intermedia.

Comportamiento a corrosión

La resistencia a corrosión general es buena si no hay cobre, la deteriora notablemente (aun así, casi todas llevan Cu). Existe riesgo de corrosión por exfoliación, mayor en T6 que en T7, aunque no tanto como en las aleaciones Al-Cu. La presencia de Cu aumenta el riesgo de aparición de picaduras.

El principal problema de esta aleación, que es la más utilizada en aviación, es su importante tendencia a corrosión bajo tensiones. Esta tendencia depende de:

- La cantidad de aleante Zn + Mg presente; cuantos más aleantes tenga, mayor riesgo
- La relación Zn/Mg, que influye en la secuencia de precipitación: peor comportamiento si $Zn/Mg < 2.5$
- La presencia de Cu, que mejora el comportamiento de la aleación
- El tratamiento térmico aplicado: comportamiento nefasto en T4 (nunca se usará un T4), malo en T6 y bueno en T7

En general, a mayor sobreedadurabilidad en el tratamiento térmico, mejor comportamiento frente a la corrosión por exfoliación y bajo tensiones, aunque sabemos que también perdemos más propiedades mecánicas.

- Aplicaciones de las aleaciones Al-Zn-Mg

Distinguimos en estas aleaciones dos grandes grupos:

Aleaciones soldables y de resistencia media (Al-Zn-Mg)

Estas aleaciones no contienen Cu (o muy poco) y tienen menor contenido en (Zn+Mg) que las del siguiente grupo [en lo que tendrán mejores propiedades mecánicas por mejor comportamiento a corrosión]

Se emplean en estado T6 y son muy buenas para soldar.

- No se usan mucho en aplicaciones aeronáuticas
- Escaso riesgo de corrosión bajo tensión
- Baja sensibilidad a la velocidad de enfriamiento en la solución que permite enfriamientos más lentos
- Responden bien a la maduración natural.

Aleaciones de alta resistencia (Al-Zn-Mg-Cu)

Todas llevan Cu como elemento aleante y una mayor cantidad de (Zn+Mg) que las anteriores. Como formador de dispersoides llevan Cr.

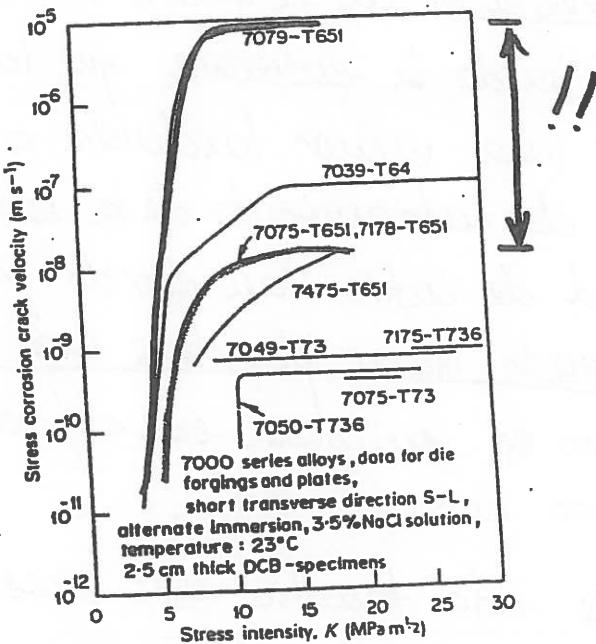
La aleación más importante (en aeronáutica) de esta familia es la 7075 (causa relación Zn/Mg ~ 2'5-3).

Descomponer según la primera familia que viimos

- Aleación 7178, con una gran cantidad de aleantes que le confieren muy buenas propiedades mecánicas.

Aluminio 7001, es la alianza de resistencia más elevada, es de muy baja tenacidad, luego no se emplea en aviación.

Un intento de aumentar el espesor del producto, para lo que habla que reducir la velocidad de enfriamiento, fue la alianza 7079, en la que se disminuye la relación Cu/Mg para que la solución sólida se descompone según la segunda forma de precipitación. El importante problema de esta alianza es que tiene un comportamiento "desastroso" a corrosión bajo tensión, el peor de todos, pues tiene una velocidad de crecimiento de grieta 1000 veces superior a la de aleaciones como la 7075:



Visto el desastoso resultado de este intento, se vuelve a la 7075 y se intenta mejorar probando con tratamientos T₇, menos peligrosos que el T6, y con aleaciones más

puras, con mucho menor contenido en Fe, Si que forman fases intermetálicas, aumentando así la tenacidad. Veamos que la 7075 y la 7475, p.e. tienen una composición similar excepto el contenido en Si y Fe, que en la 7475 es mucho menor

↳ 7175... 7475.

Otro intento de aumentar el espesor fue cambiar el fundido de dispersoide: las aleaciones 7010 y 7050 emplean Zr en lugar de Cr. Contienen más y un poco más de Cu para bajar el riesgo de corrosión pues lo tenemos aumentado; llevan poco Fe y Si y Zr en lugar de Cr. El Cr forma dispersoides incoherentes, mientras que el Zr forma dispersoides coherentes con la matriz: como es coherente, no queda bien definida la entrecara que lo separa de la matriz, luego tiene una menor tendencia a atrar vacantes y aleantes durante el enfriamiento de la solución sólida → → no hay necesidad de enfriar tan rápido para obtener lo que quiero, luego puedo hacer plazas más gordas!

Estas aleaciones no se emplean en estado T6 (de hecho no te lo venden así); se usa el T7.

Las aleaciones de esta familia más recientes, la 7055, contiene más aleantes y una relación $\frac{Zn}{Mg}$ mayor que la 7050; lleva también bastante Cu y poquísima cantidad de Fe, Si y Mg → mayor tenacidad. En estas aleaciones se compensa el hecho de tener más aleantes con dar el trámite T7 (no pierde tantas propiedades)

ALEACIONES DE RESISTENCIA MEDIA SOLDABLES

	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Mn	Cr	Zr
1	5'0-6'5	0'5-1'0	0'20	0'35	0'30	0'30	0'20	0'05-0'25
	4'0-5'0	1'0-1'8	0'10	0'40	0'35	0'2-0'7	0'06-0'2	0'08-0'20
	4'5-5'5	0'7-1'4	0'05	0'10	0'10	0'05	---	0'12-0'25
	4'6-5'2	1'3-2'1	0'06-0'15	0'30	0'20	0'10	0'15	0'10-0'20
	4'0-5'0	1'0-1'4	0'20	0'40	0'35	0'05-0'5	0'10-0'35	0'08-0'20
	3'5-4'5	2'3-3'3	0'10	0'40	0'30	0'10-0'40	0'15-0'25	---

ALEACIONES DE ALTA RESISTENCIA

íón	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Mn	Cr	Zr
1	6'8-8'0	2'6-3'4	1'6-2'6	0'40	0'35	0'20	0'18-0'35	---
0	5'7-6'7	2'1-2'6	1'5-2'0	0'15	0'12	0'10	0'05	0'10-0'16
10	5'7-6'7	1'7-2'4	1'5-2'3	0'13	0'10	0'04	0'04	0'05-0'12
19	7'2-8'2	2'0-2'9	1'2-1'9	0'35	0'25	0'20	0'10-0'22	---
50	5'7-6'7	1'9-2'6	2'0-2'6	0'15	0'12	0'10	0'04	0'08-0'15
50	5'9-6'9	2'0-2'7	1'9-2'5	0'15	0'12	0'10	0'04	0'08-0'15
155	7'6-8'4	1'8-2'3	2'0-2'6	0'15	0'10	0'05	0'04	0'08-0'15
175	5'1-6'1	2'1-2'9	1'2-2'0	0'50	0'40	0'30	0'18-0'28	---
175	5'1-6'1	2'1-2'9	1'2-2'0	0'20	0'15	0'10	0'18-0'28	---
175	5'2-6'2	1'9-2'6	1'2-1'9	0'12	0'10	0'06	0'18-0'25	---
178	6'3-7'3	2'4-3'1	1'6-2'4	0'50	0'40	0'30	0'18-0'28	---
079	3'8-4'8	2'9-3'7	0'4-0'8	0'40	0'30	0'10-0'30	0'10-0'25	---

mejoradas - pues he puesto más aleantes - y mejoramos el comportamiento a corrosión.

El 75% de las estructuras aeronáuticas hechas con aleaciones de aluminio, son de esta familia, como veremos en el siguiente tema.

Vemos, en la tabla 6 de la siguiente página, que la corrosión bajo tensiones depende mucho de la dirección de aplicación de la carga y como varía el comportamiento según el tratamiento. Ver, p.e. cómo cambia la alianación 7075 en estado T6 y T73!

Table 6 Relative stress-corrosion (cracking) ratings for wrought products of high-strength aluminum alloys(a)

Alloy and temper(b)	Test direction(c)	Rolled plate	Rod and bar(d)	Extruded shapes	Forgings
7005-T53, -T63	L	(e)	(e)	A	A
	LT	(e)	(e)	A(f)	A(f)
	ST	(e)	(e)	D	D
7039-T63, -T64	L	A	(e)	A	(e)
	LT	A(f)	(e)	A(f)	(e)
	ST	D	(e)	D	(e)
7049-T73	L	A	(e)	A	A
	LT	A	(e)	A	A
	ST	A	(e)	B	
7049-T76	L	(e)	(e)	A	(e)
	LT	(e)	(e)	A	(e)
	ST	(e)	(e)	C	(e)
7149-T73	L	(e)	(e)	A	A
	LT	(e)	(e)	A	A
	ST	(e)	(e)	B	A
7050-T736	L	A	(e)	A	A
	LT	A	(e)	A	A
	ST	B	(e)	B	B
7050-T76	L	A		A	(e)
	LT	A	B	A	(e)
	ST	C	B	C	(e)
7075-T6	L	A		A	A
	LT	B(f)	D	B(f)	B(f)
	ST	D	D	D	D
7075-T73	L	A		A	A
	LT	A	A	A	A
	ST	A	A	A	A
7075-T736	L	(e)	(e)	(e)	A
	LT	(e)	(e)	(e)	A
	ST	(e)	(e)	(e)	B
7075-T76	L	A	(e)	A	(e)
	LT	A	(e)	A	(e)
	ST	C	(e)	C	(e)
7175-T736	L	(e)	(e)	(e)	A
	LT	(e)	(e)	(e)	A
	ST	(e)	(e)	(e)	B
7475-T6	L	A	(e)	(e)	(e)
	LT	B(f)	(e)	(e)	(e)
	ST	D	(e)	(e)	(e)
7475-T73	L	A	(e)	(e)	(e)
	LT	A	(e)	(e)	(e)
	ST	A	(e)	(e)	(e)
7475-T76	L	A	(e)	(e)	(e)
	LT	A	(e)	(e)	(e)
	ST	C	(e)	(e)	(e)
7178-T6	L	A	(e)	A	(e)
	LT	B(f)	(e)	B(f)	(e)
	ST	D	(e)	D	(e)
7178-T76	L	A	(e)	A	(e)
	LT	A	(e)	A	(e)
	ST	C	(e)	C	(e)
7079-T6	L	A	(e)	A	A
	LT	B(f)	(e)	B(f)	B(f)
	ST	D	(e)	D	D

(a) Resistance ratings are as follows: A—very high; B—high; C—intermediate; D—low. See text for more detailed explanation of these ratings. (b) Ratings apply to standard mill products in the types of tempers indicated and also in T₅xx and T₆xx (stress-relieved) tempers, and may be invalidated in some instances by use of nonstandard thermal treatments, or mechanical deformation at room temperature, by the user. (c) Test direction refers to orientation of direction in which stress is applied relative to the directional grain structure typical of wrought alloys, which for extrusions and forgings may not be predictable on the basis of the cross-sectional shape of the product: L—longitudinal; LT—long transverse; ST—short transverse. (d) Sections with width-to-thickness ratios equal to or less than two, for which there is no distinction between LT and ST properties. (e) Rating not established because product not offered commercially. (f) Rating is one class lower for thicker sections: extrusions, 25 mm (1 in.) and thicker; plate and forgings, 40 mm (1.5 in.) and thicker.

