

# LOS METALES LIGEROS: Al, Mg, Ti y Be

## ● Propiedades y parámetros de diversos elementos

Básicamente hay cuatro metales utilizables estructuralmente de baja densidad: Al, Mg, Ti y Be. Magnesio y Berilio son los de menor densidad, le sigue el Aluminio y finalmente el Titanio, que aun no siendo tan ligero como los anteriores lo es bastante más que el Hierro.

Vamos a ir analizando las características de cada uno de estos cuatro metales para resolver cuál utilizar según la aplicación buscada.

### - Red cristalina

Por lo que hemos estudiado hasta ahora, sabemos que esta característica es fundamental en el comportamiento del metal. La red más interesante desde nuestro punto de vista es la cúbica centrada en las caras, fcc, pues tiene las mejores condiciones de plasticidad y tenacidad por tratarse de una estructura compacta con direcciones compactas. También sabemos que la hexagonal compacta "no nos gusta" pues tiene pocos sistemas de deslizamiento y sólo en condiciones concretas.

Aluminio	Magnesio	Titanio	Berilio	Hierro.
fcc	hc	$\begin{matrix} \uparrow \text{bcc} \\ 882^\circ\text{C} \\ \downarrow \text{hc} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \uparrow \text{bcc} \\ 1260^\circ\text{C} \\ \downarrow \text{hc} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \uparrow \text{bcc} \\ 1392^\circ\text{C} \\ \downarrow \text{fcc} \\ 911^\circ\text{C} \\ \downarrow \text{bcc} \end{matrix}$

vamos a comparar siempre con el Fe, que es lo que ya hemos analizado

- Hg: tiene una estructura hexagonal compacta normal, luego no me va a interesar por su baja tenacidad
- Ti: también es hc pero con un comportamiento diferente como ya vimos, su red es heterodóxa, lo que favorece el movimiento de las dislocaciones — es tenaz, aunque le corresponde ser frágil. A  $882^\circ\text{C}$  cambia su red a bcc, lo que nos permite laminarlo, forjarlo, darle tratamientos térmicos,...
- Be: a  $1260^\circ\text{C}$  sufre un cambio de red pasando a bcc, aunque no nos sirve de mucho, pues ocurre un poco antes de que funda. Además, es un metal muy raro (es muy escaso) y venenoso.
- Al: ✓

El Al y el Hg, al no sufrir cambios de red, solo podrían tener tratamientos con transformación parcial por cambio de solubilidad.

## - Densidad

Es muy importante cuando el criterio de elección es el peso por ejemplo, a la hora de diseñar piezas de un avión.

En el sector aeroespacial, el criterio usual son valores específicos: valor de una propiedad / densidad para propiedades mecánicas o físicas (eléctricas p.e.)

Aluminio	Magnesio	Titanio	Berilio	Hierro	
2700	1700	4500	1850	7800	(kg/m <sup>3</sup> )

## - Temperatura de fusión

Es un parámetro fundamental para materiales que han de soportar temperaturas elevadas debido a la fluencia, que comienza a  $T > 0.4T_f$ .

En este aspecto, Al y Mg son bastante malos; pues presentarían fluencia a bajas temperaturas, mientras el Ti soporta sin problemas temperaturas de trabajo del orden de 500-600°C. Así, aunque en un avión se empleen generalmente aleaciones de aluminio, determinadas zonas habrán de ser reforzadas con aleaciones de titanio.

Aluminio	Magnesio	Titanio	Berilio	Hierro	
960	950	1660	1278	1535	(°C)

## - Temperatura de ebullición

Si es próxima a la de fusión, como ocurre en el Mg, se produce evaporación, con riesgo de explosión.

## - Calor específico

Es una propiedad muy interesante para zonas donde se vaya a generar mucho calor; interesa que sea un valor alto, pues entonces aunque se genere mucho calor la temperatura del material subirá poco.

El mejor en este aspecto es el Be, aunque por lo que hemos visto sabemos que no es muy recomendable!

Aluminio	Magnesio	Titanio	Beilio	Hierro	
900	1025	520	1880	460	J/kgK

## - Coeficiente de dilatación

Indica los cambios de tamaño con los cambios de temperatura en procesos o en servicio. Influye además en las tensiones originadas en cambios de temperatura (como un temple, p.e.) → me interesa que sea lo más bajo posible: el Al no es muy bueno, del Mg olvídate: el mejor el Ti.

Aluminio	Magnesio	Titanio	Beilio	Hierro	
23'5	26	8'9	12	12	$\cdot 10^{-6}/K$

## - Conductividad térmica

Indica la posibilidad de utilizarlo en sistemas de transmisión de calor (p.e. en el control térmico de vehículos espaciales). Si es baja pueden producirse acusados calentamientos o enfriamientos locales y altos gradientes térmicos.

### - Conductividad y resistividad eléctrica

Indica la posibilidad de utilizarlo como conductor eléctrico; representa las pérdidas originadas en conductores

### - Potencial electroquímico

Representa la reactividad con el oxígeno, de forma que es un indicativo del comportamiento a corrosión y oxidación. Cuanto más negativo sea, más probabilidad tiene de corroerse en un contacto con otro metal. Tenemos que todos son bastante malos desde el punto de vista de corrosión galvánica, luego habrá que protegerlos.

Aluminio	Magnesio	Titonio	Berilio	Hierro	
-1'7	-2'3	-1'6	-1'7	-0'4	(V)

### - Relación volumen óxido / volumen metal

Representa, como vimos al estudiar la corrosión, la permeabilidad de la capa de óxido formada y la posibilidad de que prosiga la oxidación o se pase.

$R_i < 1$  - permeable: en el caso del Hg  $\rightarrow$  explosión

$R_i > 1$  - impermeable y protege (Al, Ti, Be). Se desprotege si se quita la capa

$R_i \gg 1$  - puede resquebrajarse y desprenderse (Fe)

Aluminio	Magnesio	Titonio	Berilio	Hierro
1'3	0'8	1'75	1'7	2'2

↳ Resistencia a la corrosión: deducida de las dos propiedades anteriores

Aluminio	Magnesio	Titanio	Berilio	Hierro
bueno	mal	excelente	bueno	regular

## - Módulo de elasticidad

Da una idea de la rigidez: cuanto mayor sea menos se deforma plásticamente, luego nos interesan valores altos:

Aluminio	Magnesio	Titanio	Berilio	Hierro	
70	45	120	300	200	(GPa)

como hemos dicho antes, interesa comparar la rigidez específica:  $\frac{E}{\rho}$  o  $\sqrt{\frac{E}{\rho}}$  según criterio deseado (tracción, flexión,...)

Es de resaltar el bajo peso del Be, para la misma rigidez, o su gran rigidez para el mismo peso.

## - Resistencia a la tracción

Pueden utilizarse los valores de límite elástico  $R_p$  (cuando no se permiten deformaciones plásticas), o la resistencia a la rotura,  $R_m$ .

Aluminio	Magnesio	Titanio	Berilio	Hierro	
700	400	1400	850	1200	(MPa)

Normalmente, el criterio es aplicar valores específicos

## - Contenido en ~~corteza~~ terrestre

Todos son bastante abundantes, excepto el Be que es escasísimo, aunque el Ti tardó en descubrirse por confundirlo con el Si.

El problema de su obtención es la estabilidad de sus óxidos y compuestos.

## - Producción y precio

La producción depende de la demanda y del precio. El precio depende del proceso de obtención, su consumo energético y el coste de su manipulación: forja, tratamientos térmicos,...

Los altos precios (del Ti, p.e.) hacen que su uso se reserve al sector aeroespacial, donde el precio es un factor secundario.

## - Conclusión

El problema de elección de una aleación es complejo por la diversidad de factores a tener en cuenta, algunos contradictorios, que obligan a soluciones de compromiso.

A los factores ya citados hay que añadir la variación de propiedades con la temperatura y criterios de fluencia.

CANDIDATO NATURAL ——— Aluminio.



## LOS METALES LIGEROS: Al, Mg, Ti y Be

### Propiedades y parámetros de diversos elementos

(Recopiladas por J.A. G<sup>a</sup> Poggio y P. Tarín)

	Unidades	Aluminio	Magnesio	Titanio	Berilio	Hierro
Red Cristalina		CCC (cF4)	HC (hP2)	CC (cI2) ↑ 882 °C ↓ HC (hP2)	CC (cI2) ↑ 1.260 °C ↓ HC (hP2)	CC (cI2) ↑ 1.392 °C CCC (cF4) ↑ 911 °C CC (cI2)
Densidad	kg / m <sup>3</sup>	2.700	1.700	4.500	1.850	7.800
T de fusión	°C	660	650	1.660	1.278	1.535
T de ebullición	°C	2.467	1.090	3.287	2.970	2.750
Calor específico	J / kg . K	900	1025	520	1880	460
Coefficiente de dilatación	X 10 <sup>-6</sup> / K	23,5	26	8,9	12	12
Conductividad térmica	W / m . K	238	146	17	175	71
Conductividad eléctrica	% IACS	64	38	4	42,5	17,5
Resistividad eléctrica	μΩ . m	0.0265	0.0445	0.42	0.04	0.097
Potencial electroquímico	V	-1,7	-2,3	-1,6	-1,7	-0,4
Volumen.óxido / Volumen metal	-	1,3	0,8	1,75	1,7	2,2
Resistencia a la corrosión	M-R-B-E	Buena	Mala	Excelente	Buena	Regular
Módulo de elasticidad *	GPa	70	45	120	300	200
Resistencia a la tracción Rm *	MPa	700	400	1.400	850	1.600
Peso estructural para = rigidez *	Relativo	5	4	7	2	10
Rigidez de viga para = peso *	Relativo	8	20	3	110	1
Contenido en la corteza terrestre	%	8	2	0,8	-	5
Producción en 1988 *	x 10 <sup>6</sup> kg	17.000	300	85	-	800.000
Precio aproximado *	Euro / kg	6	12	60	600	1

\* Para aleaciones

Relación comparación

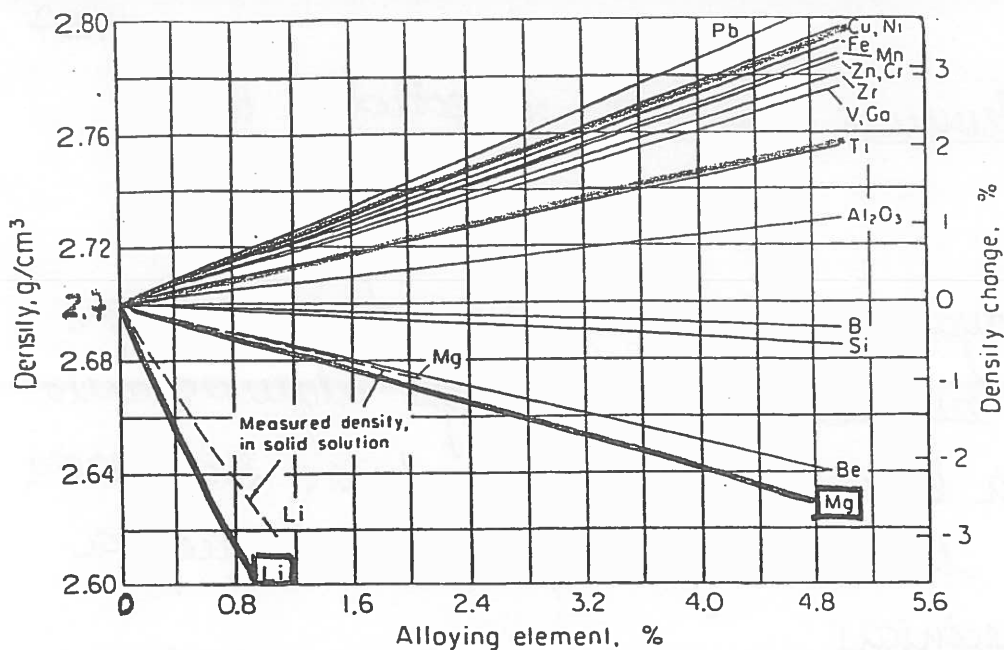


## Acción de otros elementos sobre las propiedades físicas del Aluminio.

- Densidad: la mayoría la elevan, luego tendremos que añadir la menor cantidad posible, aunque algunos, como el Be, Mg y Li la bajan. Por ejemplo, todas las aleaciones de aluminio llevan Magnesio, pues además mejora las propiedades mecánicas
- Coefficiente de dilatación: algunos aleantes lo elevan, como Mg y Zn y otros lo bajan, Si, Ni, Fe.
- Módulo elástico: en general lo elevan (aunque Mg lo baja)
- Conductividad eléctrica: todos los elementos la bajan en mayor o menor medida, pues la conductividad buena se tiene en redes perfectas; cualquier cosa rara, ya sea un aleante, un defecto, ... la disminuirá. Casi siempre el descenso es mayor si están los elementos en solución sólida que si están precipitados. Se tiene un efecto especialmente negativo con Cr, Mn, V, Ti, Zr y Li, aunque sólo me preocuparé en aplicaciones específicas como cables.

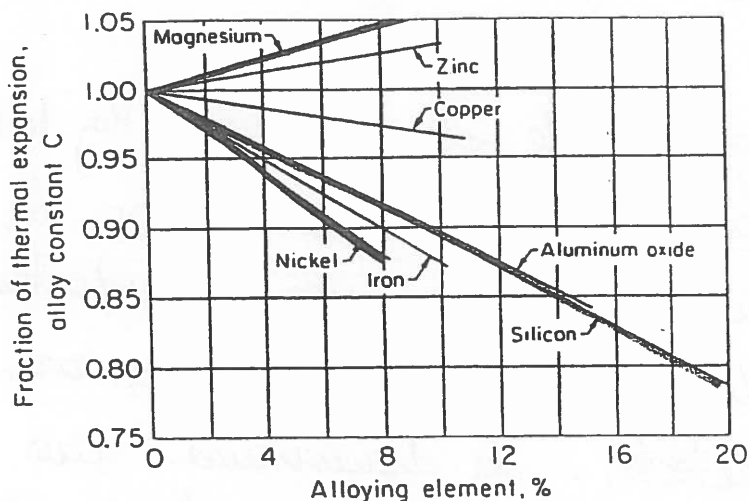
Para que el Aluminio mantenga una buen conductividad:

- Mínima cantidad de aleantes e impurezas (muy puro)
- Muy poca cantidad de Cr, Mn, Ti y V:  $Cr + Mn + Ti + V < 0.03\%$
- Adición de B para precipitar las impurezas, para que salgan de la red (menos dañino)



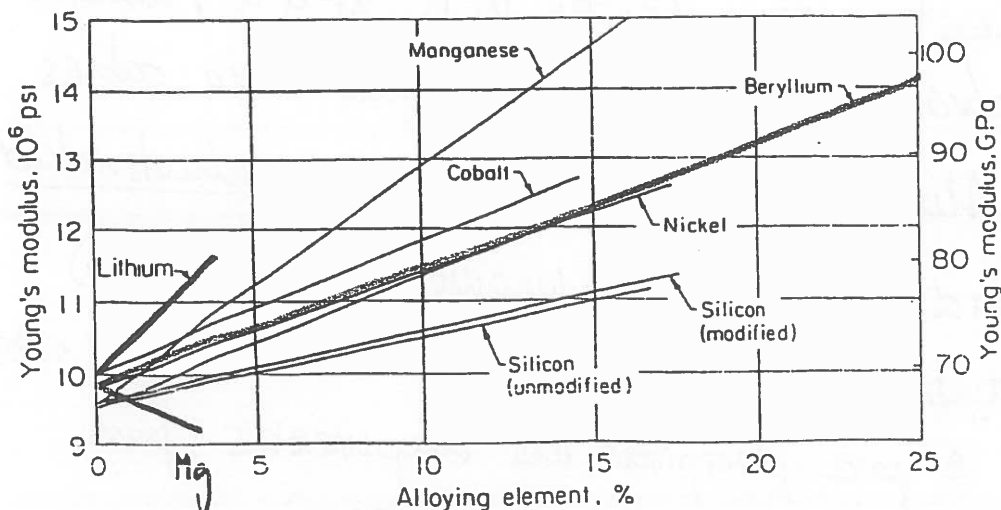
Densidad.

Fig. 2. Density of binary aluminum alloys (calculated). (Courtesy of D.E. Kunkle, Alcoa)



coeficiente de dilatación.  
(me interesa bajo!)

Fig. 3. Effects of alloying elements on the thermal expansion of aluminum. Fraction is based on a value of 1.00 for 99.996% aluminum. (Courtesy of L.A. Willey, Alcoa)



Módulo Elástico

Fig. 8. Influence of several additions to aluminum on Young's modulus. (N. Dudzinski, et al., J. Inst. Metals, Vol 74, 1947-1948, p 291-314)

TABLE 2-1  
Relative Conductivities of Pure Metals(1)

Metal	Conductivity Percent IACS Vol. Basis(2)	Specific Gravity(3)	Conductivity Percent IACS Wgt. Basis(4)
Silver	108.4	10.49	91.9
Copper	103.1	8.93	102.6
Aluminum	64.9	2.70	213.7
Titanian	4.1	4.51	8.1
Magnesium	38.7	1.74	197.7
Sodium	41.0	0.97	376.2

- (1) Conductivities and densities taken from the ASM Metals Handbook, Volume 2, Ninth Edition.  
 (2) Conductivity on a volume basis compares conductivities of metals for the same cross-sectional area and length.  
 (3) Specific gravity is density of a material compared to that of pure water which has a density of one gm/cm<sup>3</sup>.  
 (4) Conductivity on a weight basis compares the conductivities of metals for the same weight.

Todos la bajan →

conductividad eléctrica

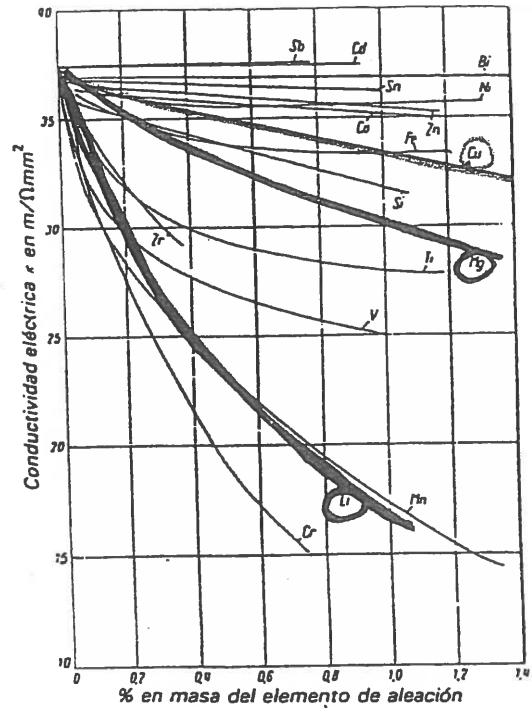


Fig. 2.116 Conductividad eléctrica de aleaciones binarias con aluminio purísimo como base, en función de la concentración del elemento de aleación, en estado fundido (según Nachtigall y Lang)

Table 2. Effect of Elements In and Out of Solid Solution on the Resistivity of Aluminum

Element	Maximum solubility in Al, %	Average Increase in resistivity per wt%, $\mu\Omega \cdot \text{cm}$	
		In solution	Out of solution(d)
Chromium	0.77	4.00	0.18
Copper	5.65	0.344	0.030
Iron	0.052	2.56	0.058
Lithium	4.0	3.31	0.68
Magnesium	14.9	0.54(b)	0.22(b)
Manganese	1.82	2.94	0.34
Nickel	0.05	0.81	0.061
Silicon	1.65	1.02	0.088
Titanium	1.0	2.88	0.12
Vanadium	0.5	3.58	0.28
Zinc	82.8	0.094(c)	0.023(c)
Zirconium	0.28	1.74	0.044

Note: Add above increase to the base resistivity for high-purity aluminum,  $2.65 \mu\Omega \cdot \text{cm}$  at  $20^\circ\text{C}$  ( $68^\circ\text{F}$ ) or  $2.71 \mu\Omega \cdot \text{cm}$  at  $25^\circ\text{C}$  ( $77^\circ\text{F}$ ).

(a) Limited to about twice the concentration given for the maximum solid solubility, except as noted.  
 (b) Limited to approximately 10%. (c) Limited to approximately 20%.

Source: L.A. Willey, Alcoa Research Laboratories.

por la gran diferencia de estar en solución o precipitado.

# Ordnance Cracks.

Benice  
Soiber?  
Brammigan  
Fry

Soyber  
Brammigan  
Hartman  
Blender

Elm  
Dr. Fra