

# Evolución de los materiales aeronáuticos

PEDRO L. MUÑOZ-ESQUER, Ingeniero Aeronáutico

**E**n el diseño de un elemento o conjunto, ya sea de avión o industrial, una de las etapas más importantes para el ingeniero es la selección y elección de los materiales para la realización del diseño.

En la enciclopedia ilustrada de la aviación puede leerse que los ingenieros aeronáuticos son "aquellos hombres que deben construir con el peso de un kilo lo que cualquier otro podría hacer con dos kilos de peso". Como se ve, la diferencia fundamental entre la ciencia aeronáutica y las otras modalidades de la ingeniería es el realizar lo ingeniado con el mínimo peso posible.

Los materiales utilizados en la construcción de los primeros aviones fueron, fundamentalmente, caña de bambú, maderas de abeto y fresno, chapa de latón, etc... que, posteriormente, fueron suplantadas por materiales metálicos, siendo los ingenieros y constructores alemanes los grandes pioneros en la introducción de los materiales metálicos en la construcción de aviones (Dornier, Junkers, etc...). A partir de aquí se produce un gran desarrollo metalúrgico de las aleaciones de aluminio y de los materiales ligeros, dando la posibilidad de diseñar estructuras con menos peso y mejores características mecánicas.

A finales de la década de los sesenta y principio de los setenta, se produce el problema a escala mundial del precio de los combustibles, con lo que no queda más remedio que iniciar la búsqueda de nuevos materiales que den la posibilidad de fabricar estructuras menos pesadas y como mínimo con los mismos performances mecánicos. Esto trae la aparición de nuevas aleaciones, tales como las de aluminio-litio, pulvimetalurgia, etc... y la aplicación de materiales no metálicos, que si bien se venían utilizando desde 1943 en la fabricación de componentes secundarios (avión BT-15, resina de poliéster con fibra de vidrio), pasan a formar parte de estructura primaria con la aparición de fibras de carbono, kevlar y boro, con resinas epoxídicas, poliimidas, etc. (alas del Harrier, estabilizador horizontal y vertical del A-320, etc...). No acaba ni acabará la búsqueda y la utilización de nuevos materiales tanto metálicos como no metálicos, dando la sensación al hablar de ellos como leer una novela de Julio Verne o una fabulosa historia de Asimov, cada uno en su tiempo. Así no es extraño leer la utilización a nivel no sólo de prototipo, de estructuras de carbón-carbón, cerámica, matrices metálicas con refuerzos no metálicos, etc...

## CONDICIONANTES EN LA ELECCION DEL MATERIAL

**L**os aviones y vehículos espaciales soportan unas condiciones que se deben al medio ambiente en que se desenvuelven y a las características de utilización. Estas condiciones afectan a todos los materiales que los componen, tanto estructurales, como no estructurales y auxiliares.

En los materiales estructurales estas condiciones son: densidad, temperatura y condiciones donde se realiza el vuelo.

### a) Densidad:

El peso en un móvil que no se apoya en el suelo es fundamental para aumentar el rendimiento, admitiendo más carga útil, y disminuyendo la potencia necesaria. En la fig. 1 se indica la relación entre un ahorro potencial de peso en distintas áreas tecnológicas con el impacto que produce el costo operacional del ingenio.

La resistencia y módulo específico, resistencia y módulo dividido por el peso, es una constante a lo largo de la vida de la aviación, y por ello se han buscado siempre y se han desarrollado materiales que tengan el mayor valor resistencia peso o módulo/peso según las necesidades del diseño. Figuras 2 y 3.

### b) Temperatura:

Es otro factor, sea por valores altos o bajos. En un avión supersónico se producen zonas de elevada temperatura: revestimientos exteriores, por su fricción con el aire; zonas próximas a los reactores y sobre todo las turbinas donde inciden los gases quemados; zonas de frenos, etc... Estas temperaturas elevadas producen problemas de fluencia en los materiales y una mayor velocidad de oxidación e incluso de absorción o desorción de gases.

Los problemas de bajas temperaturas se agravan cuando los materiales han de constituir depósitos para almacenar propulsores criogénicos. El ARIANE, lanzador espacial Europeo, utiliza en una tercera fase hidrógeno y oxígeno líquido, y el SHUTTLE COLUMBIA carga en sus tres motores principales 100 tns. de hidrógeno líquido y oxígeno líquido. Las temperaturas de licuación de estos gases son  $-253^{\circ}$  y  $-183^{\circ}\text{C}$ , respectivamente, y por tanto los materiales que constituyen los depósitos deben soportar esas bajas temperaturas manteniendo condiciones de resistencia suficientes.

AREA TECNOLÓGICA	% POTENCIA	IMPACTO SOBRE COSTO OPERACIONAL %
PESO ESTRUCTURAL	- 20	- 9
PESO NO ESTRUCTURAL	- 10	- 2
PESO DE MOTORES	- 35	- 2
CONSUMO DE COMBUST.	- 20	- 6
RENDIMIENTO AEROD.	- 10	- 3

Figura 1

Estos problemas de altas y bajas temperaturas se presenta también en los ingenios espaciales. Cuando un satélite en órbita geoestacionaria cruza desde la penumbra terrestre a la luz solar total y viceversa, su temperatura superficial puede variar de  $-250^{\circ}\text{C}$  a  $+70^{\circ}\text{C}$  en un intervalo de segundos.

### c) Condiciones donde se realiza el vuelo:

Las condiciones ambientales, aunque en menor cuantía, afectan a oxidaciones, efecto de las radiaciones y variación de presión.

En el espacio exterior la falta de presión da origen a sublimación de sólidos, pérdida de gases ocultos y la presencia de radiaciones de todo tipo, produce incluso variación de propiedades, haciendo conductores a materiales aislantes. La presencia de meteoritos afecta a las superficies que se mueven en el espacio de dos formas: perforando o erosionando la superficie. Esto ha hecho que se desarrollen materiales que pueden llegar a cerrarse de forma automática si se produce el impacto y con una gran resistencia a la erosión. La entrada y salida de las aeronaves de la atmósfera, plantea problemas de calentamientos aerodinámicos y aceleraciones, creando la necesidad de desarrollar materiales con propiedades refractarias, ablativas, etc.

## MATERIALES METÁLICOS

Los metales, con sus propiedades mecánicas de resistencia, conformidad, rigidez, tenacidad y duración, son a priori los más apropiados para la fabricación de vehículos.

### Aleaciones de aluminio

El aluminio hace unos cien años era considerado como un metal semiprecioso de valor equiparable al de la plata, citándose en la vajilla real francesa utilizada en las grandes celebraciones. Hoy es utilizado para formar aleaciones baratas de uso industrial y más o menos sofisticadas de aplicación aeroespacial.

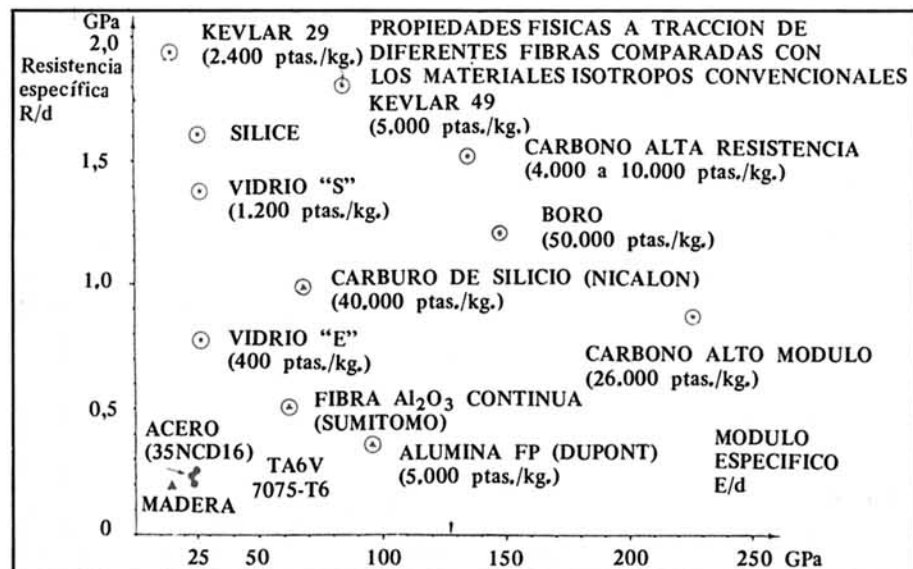


Figura 2

Su utilización a nivel industrial se inició con la extracción del aluminio por procedimientos electrolíticos y su aplicación en estructuras cuando se descubre el procedimiento de maduración (1910) que da resistencias de cinco veces a la del metal puro.

Su evolución ha influido en la industria aeronáutica, siendo durante la segunda guerra mundial cuando se desarrolló considerablemente la industria del aluminio. Prácticamente toda la producción

mundial de aquellos años se destinó para la construcción de aeronaves, bajando considerablemente su utilización al final de la misma, llegando en la actualidad a un 4 por 100 de la producción total mundial.

En realidad, durante los últimos treinta años se han realizado pocos progresos en la mejora de las aleaciones de aluminio, en cuanto a reducción de peso. Los avances en motores y aerodinámica conseguían la disminución de consumo de combustible en las aeronaves. Sin embargo, estas mejoras se hacen cada vez más difíciles de lograr y la escala de precios de los combustibles parece no tener fin. Si a esto añadimos las excelentes posibilidades que presentan los materiales compuestos, ha hecho que los fabricantes y gobiernos reconsideren su política de investigación en este campo, con el fin de mejorar y encontrar nuevas aleaciones. Figura 4.

Tres son las principales aleaciones de aluminio utilizadas inicialmente: **Siluminios**, pertenecientes al grupo Al-Si (L-2550, L-2530, etc.), utilizadas principalmente para piezas fundidas; **Pantal**, pertenecientes al grupo de aleaciones de Al-Mg (L33XX/5XXX, según norma UNE/Según norma americana A.A.), utilizadas principalmente para forjas y laminación, soldable y poco corroble; **Durales**, pertenecientes al grupo de aleaciones de Al-Cu (L31XX/2XXX), se caracterizan fundamentalmente por una elevada resistencia mecánica a temperatura ambiente, alcanzando valores de 450 MPa y 10 por 100 de alargamiento. En general, los durales (Al-Cu-Mg) presentan una mala resistencia a la corrosión y soldabilidad, regular conformado y anodizado y buen mecanizado.

Ya a finales de los años 40 aparecen las aleaciones de cinc (L37XX/7XXX) (contienen también Cu), que aumentan la resistencia hasta valores de 650 MPa con un 3 por 100 de alargamiento. Estas aleaciones tienen el inconveniente de ser poco resistentes a la fatiga, apareciendo en ellas fenómenos de tensocorrosión. Estos fenómenos se han reducido al limitar las impurezas, controlar los procedimientos de obtención y modificar los tratamientos térmicos.

Las aleaciones de aluminio son en estos momentos los materiales más importantes para la construcción de estructuras primarias en aviones comerciales, habiéndose producido en su uso una baja en la fabricación de aviones militares. Así, por ejemplo, el AV8-B "Harrier II" presenta el 47,7 por 100 de su peso estructural en aluminio y el 26,3 por 100 de material compuesto.

Actualmente hay una serie de temas de especial interés en la aplicación de las aleaciones de aluminio en estructuras de avión.

	Densidad	(1) Resist.	(1) Módulo	Alargam. rotura	Resist. espec.	Módulo espec.
	(g/cm <sup>3</sup> )	MPa	GPa	%		
KEVLAR-29	1,44	2.600	62,0	4,2	1.806	43,1
KEVLAR-49	1,45	2.700	130,0	2,0	1.812	89,7
Poliéster HiT	1,20	1.400	12	15	1.167	10,0
Nylon T728	1,14	1.000	5,6	18,5	877	4,9
Nomex	1,38	650	20,0	23,0	471	14,5
Acero	7,83	2.800	200,0	2,0	358	25,5
Boro	2,70	3.000	370,0	1,0	1.111	137
Vidrio-E	2,54	3.500	73,5	4,5	1.378	28,9
Vidrio-S o R	2,49	4.650	86,5	5,3	1.867	34,7
Vidrio-D	2,16	2.450	52,5	4,5	1.134	24,3
Vidrio-C	2,49	2.800	70,0	4,0	1.124	28,1
Vidrio-M	2,89	3.500	111,0	3,1	1.211	38,4
Carbono HS	1,80	2.700	270,0	0,8	1.500	150
Carbono HM	1,95	2.000	400,0	0,5	1.026	205

(1) Propiedades a 20°C.

Figura 3

Figura 4.

Figura 4.

Figura 4.

Figura 4.

Figura 4.

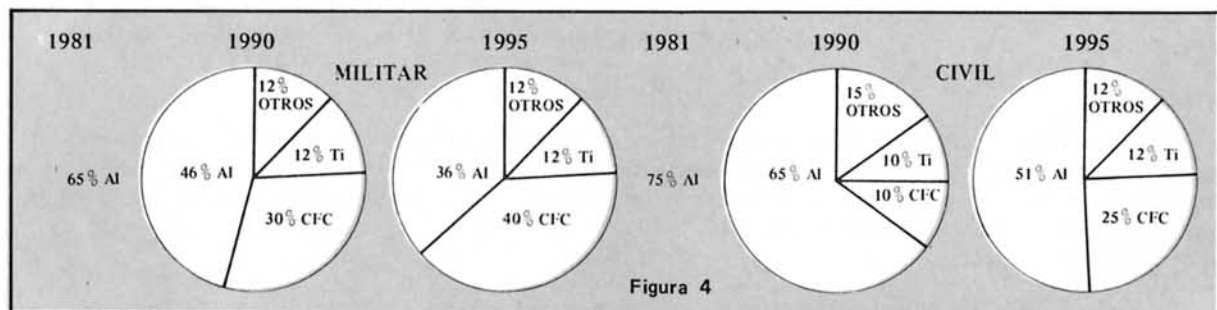


Figura 4

a) La llegada de aleaciones metalúrgicamente más limpias, como las 2124, 2048, sin designación en la normativa nacional, y 7475, denominada L-3768. Estas aleaciones poseen una mayor resistencia a la rotura que las de utilización actual L3140 (2024) y L-3710 (7075).

b) Aplicación potencial de las aleaciones de la serie L-37XX (7000), en especial la L-3768 (7475) en paneles sometidos a tensión, mejor que las aleaciones de la serie L-31XX (2000).

Otra serie de aleaciones interesantes dentro de este grupo son L-3751 (7049), L-3767 (7050) y L-3766 (7010), aleaciones de Al-Zn-Mg+Zr, que combinan alta resistencia a través de secciones gruesas con alta tenacidad a la fractura y buena resistencia a esfuerzos de corrosión y exfoliación.

c) Desarrollo de aleaciones que utilizan el Li como elemento de aleación, con el fin de reducir la densidad de la aleación resultante, conjuntamente con un incremento del módulo de elasticidad. El máximo contenido de litio de estas aleaciones no puede sobrepasar el 3 por 100, ya que las aleaciones producidas a partir de la metalografía de lingote, debido a limitaciones de solubilidad, no pueden sobrepasar este contenido, ya que la aleación resultante mostraría un comportamiento pobre a la ruptura.

Los trabajos que actualmente están realizando las sociedades "Societe Cegedur Pechiney", "Aluminum Co of America (ALCOA)" y "ALCAN", parece que nos llevan a aleaciones de Al-Li-Cu-Mg-Zr, que presentan características muy interesantes y aparentemente parece menos dificultosa su obtención que las de Al-Mg-Li. Figura 5.

Es interesante mencionar los productos anunciados por la Societe Cegedur Pechiney y Alcoa:

CP 271 (2,2Li-1,1Cu-0,7Mg-0,08Zr), con un límite de fluencia\* de 490 MPa y una elongación\* del 7 por 100.

CP 274 (1,7Li-1,8Cu-1,1Mg-0,04Zr), con un límite de fluencia de 475 MPa y una elongación del orden del 9 por 100.

CP 276 (1,9Li-2,5Cu-0,2Mg-0,04Zr), con 655 MPa y del orden del 5 por 100 de elongación.

ALCOA presenta su "Alithalite 2090", con el fin de reemplazar las aleaciones 7075. Presentan unos valores de resistencia a tracción que se encuentran entre 538-524 MPa y una elongación que varía entre un 8 a 10 por 100.

d) Desarrollo de nuevas aleaciones obtenidas de polvo metalúrgico, es decir, pulvimetalurgia (PM). Esta técnica permite agregar al aluminio un número mayor de componentes y procura grandes mejoramientos en la microestructura (granos más finos y mayor homogeneidad en la repartición de las partículas). Tanto Boeing como McDonnell Douglas han ensayado dos aleaciones, la 7090 y la 7091. La primera combina una alta resistencia con unas buenas propiedades contra la corrosión y la segunda una resistencia con una buena tenacidad a la fractura.

Las técnicas de producción más extendidas en la PM son:

- Compactación en frío y sinterizado en fase sólida.

- Sinterizado en fase líquida y conformado en caliente (forja o compactación isostática).

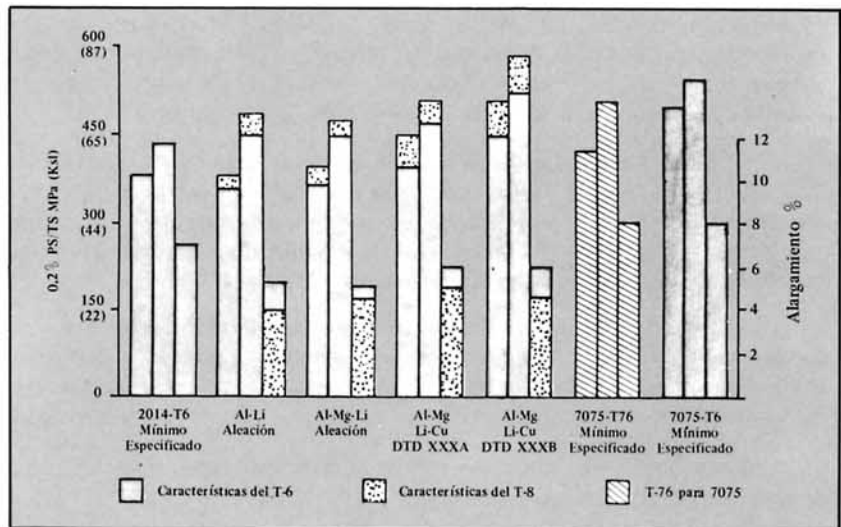


Figura 5. Resistencia a tracción de T6 y T8 en láminas para diversas aleaciones Al-Li comparadas con 2024-T6 y 7075-T6/T76

## Titanio

Es un metal estructural relativamente nuevo en la industria aeronáutica, ya que su fabricación a escala industrial comenzó hacia 1950. El interés de las aleaciones de titanio reside en la asociación de una densidad de 4,5 gr/cc, que la sitúa entre el hierro 7,9 y el aluminio 2,7, con una resistencia específica superior a la de los aceros clásicos y aleaciones ligeras y prácticamente igual a la de los aceros de alta resistencia.

\* **Fluencia** es la carga bajo la cual el material se vuelve fluente, es decir, empieza a tener una deformación desproporcionada.

\* **Elongación** es la deformación del material antes de romperse.



Las propiedades principales que justifican el empleo de estas aleaciones: a) resistencia a la corrosión en distintos medios; b) buen comportamiento a altas temperaturas sin presentar fenómenos de fluencia; c) resistencia específica. Sus inconvenientes: a) elevado precio; b) dificultad de aprovisionamiento; c) dificultad de fabricación, y d) dificultad de preparación superficial para encolado y pintura. Todo esto comparado con las aleaciones de aluminio.

La utilización de las aleaciones de titanio en la fabricación de aviones comerciales puede generalizarse indicando que en aviones subsónicos la media de aplicación es de un 3 por 100, mientras que en supersónicos, donde el criterio de masa es mucho más crítico, con una reducción sensible de las performances de las aleaciones ligeras por efectos térmicos, se prevé un 10 por 100 de la masa total estructural del avión. Así, por ejemplo: 4 por 100 para B-747; 2 por 100 para B-767, y un 5 por 100 para el Airbus.

Una de las primeras aleaciones de titanio en la fabricación fue la desarrollada por la compañía Titanium Metals Co con la colaboración de Lockheed, Ti-13V-11Cr-3Al(B-120), que llegó a alcanzar 1.400 MPa a tracción, empleándose conjuntamente con Ti-6Al-4V/(L-7301) en la fabricación del famoso avión de reconocimiento SR-71 "Pájaro Negro", que alcanzó una velocidad de 3,5 Mach.

Las aleaciones más aplicadas en la construcción de vehículos aéreos son la ya mencionada L-7301 para la aplicación en células y motores, L-7104 (6Al-5Zr-Mo-Si) para zonas de trabajo sometidas a altas temperaturas. Las características mecánicas de ambas aleaciones vienen indicadas en la figura 6.

Las novedades más prometedoras son las aleaciones Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn, que son aleaciones beta mejoradas, laminadas y conformadas en frío y endurecidas por envejecimiento. Presentan una resistencia que suele variar entre 800 a 1.400 MPa, según el recocido, y pueden ser sometidas a soldadura isotérmica con latón. Otra aleación interesante de mencionar es Ti-10V-2Fe-3Al, que presenta la posibilidad de ser utilizada para piezas de forja de precisión, poco costosas, debido a sus características excelentes de deformación a temperaturas de unos 800°C. Presentan una resistencia entre 1.050 a 1.250 MPa.

Es de mencionar la pulvimetalurgia del titanio, que al igual que la del aluminio ha dado lugar a mejores productos y más económicos. Las principales aleaciones del titanio P/M son: Ti-6Al-4V y Ti-6Al-6V-2,5Sn.

DENOMINACION	R	R02	A%
L-7301 (Ti-6Al-4V) (aleación titanio tipo $\alpha + \beta$ )	960 MPa	880 MPa	15
L-7104 (Ti-6Al-5Zr-Mo-Si) (aleaciones titanio tipo $\alpha$ y super $\alpha$ )	990 MPa	900 MPa	9

Figura 6

#### Aceros

A pesar de que su densidad es casi tres veces la del aluminio, se emplea en la construcción de aviones por su mayor resistencia mecánica. Los aceros de muy alta resistencia, tales como Cr-Ni-Mo de baja aleación, con 1,6 por 100 de silicio, con tratamientos térmicos adecuados, en baños de sales, llegando a alcanzar los 200 MPa con una gran tenacidad de fractura y con muy pequeñas deformaciones. Así, el acero tipo F-0133 (300M) es mayormente utilizado en América para trenes de aterrizaje. En Europa se utilizan primordialmente el tipo F-0135 (35NCD16) en los trenes de aterrizaje del Airbus y Concorde.

Los aceros de gran resistencia presentan dificultades debidas a la corrosión bajo carga estática. En un metal determinado puede mejorarse su resistencia a la corrosión mediante la utilización de elementos de aleación apropiados. Así, pequeñas cantidades de fósforo y cobre mejoran la resistencia a la corrosión atmosférica de los aceros estructurales; proporciones del 10 por 100 de Al suministran al hierro una gran resistencia a la oxidación a temperaturas elevadas aunque le hacen frágil, etc. Es el CR y Ni los que consiguen aceros que soportan la oxidación en casi todos los ambientes, aunque su resistencia mecánica no es muy elevada.

Los aceros utilizados en estructuras de aviones son los denominados "PH" y "Maraging", que son aceros inoxidables a los que se les ha añadido una serie de elementos aleables, tales como Ti, Be, Al, Nb y V, resultando los PH y Ti, Mo y Co los "Maraging".

#### Otros materiales metálicos

Otros materiales de utilización en la industria aeroespacial, aunque en porcentajes más pequeños son: magnesio, berilio y superaleaciones.

Las aleaciones de magnesio se empleaban mucho en piezas moldeadas, siendo su principal problema los micrereichupes. Este problema se solucionó fundamentalmente por la adición de Zr. Se han conseguido aleaciones de magnesio que soportan hasta temperaturas de 350°C.

El berilio se emplea fundamentalmente en la industria aeroespacial. Con el nombre genérico de superaleaciones se engloban una serie de aleaciones que soportan altas temperaturas con buenas características mecánicas. Son de composición muy variada y por lo general se funden en vacío. ■