

Materiales Compuestos Aeronáuticos

PEDRO L. MUÑOZ ESQUER, Ingeniero Aeronáutico

Durante los últimos veinte años de una manera más o menos progresiva se ha ido gestando una revolución silenciosa, la fabricación de piezas de avión en materiales compuestos. Pasando de la construcción de piezas de decoración, carenas, pisos, paneles laterales y de techo, etc., a piezas de estructura secundaria y de éstas a estructura primaria, figuras 1 y 2. Desarrollos estos últimos que se están llevando a cabo en la década de los ochenta para aviones comerciales, ya que tanto en la industria espacial como en la militar, se inició en la década anterior.

La fuerza que ha impulsado esa transformación en la industria aeronáutica, es la misma que se puso cuando la madera fue reemplazada por las aleaciones ligeras, la búsqueda de un mejor rendimiento.

El ingeniero, al diseñar un nuevo ingenio volador, toma como criterios básicos:

- Mejorar la velocidad.
- Reducir el consumo de combustible.
- Aumentar la carga de pago.
- Lograr un mantenimiento más económico.

La solución parece estar encontrada con la aplicación de los materiales compuestos avanzados. Es conveniente tener presente que no todo son ventajas con la utilización de estos materiales. Pues, si bien es cierto que los precios de las distintas fibras de refuerzo disminuyen constantemente, en especial fibras de carbono y Kevlar, sigue siendo un material caro. Por ello, resulta muy conveniente realizar los proyectos de

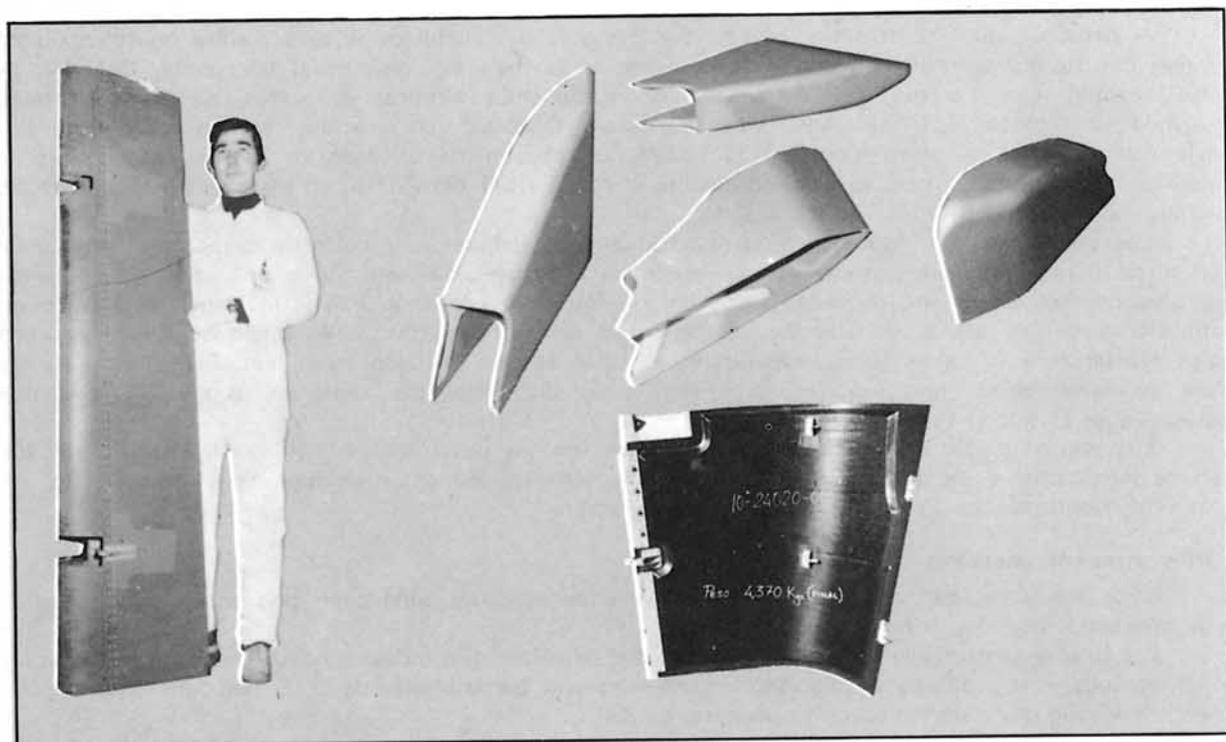


Figura 1. Carenas en fibra de vidrio/epoxi del CN-235. Alerón en fibra de carbono/epoxi del C-101. Capot de motor en fibra de carbono/epoxi, avión C-101

forma racional, que supongan una solución en el número de elementos y la eliminación de operaciones de mecanizado, recurriendo a la obtención de piezas terminadas directamente del molde.

La puesta en obra de los materiales compuestos es aún de tipo artesanal, no obstante se están haciendo grandes esfuerzos por automatizar y robotizar estos procedimientos.

Esta renovación no se logra de la noche a la mañana, sino que ha y está ocasionando un tremendo gasto monetario; puesto que ha creado la necesidad de formar ingenieros con mentalidad distinta a la convencional, para diseñar con estos materiales y no caer en el error de realizar diseños en "Aluminio Negro".

Con el fin de disponer los datos y conocimientos de estos materiales, para acometer un diseño y su posterior fabricación, se están realizando por parte de las compañías de fabricación y diseño aeroespacial toda una serie de ensayos, formas y procesos de fabricación.

¿QUE SON LOS MATERIALES COMPUESTOS?

Los materiales compuestos se han utilizado desde el inicio de la civilización, ya que en la práctica muy pocos son los materiales que se emplean en estado puro, pues como hemos visto en el artículo precedente, los materiales se emplean aleados. Es decir, los materiales tecnológicos están constituidos en varias fases.

Se define como material compuesto o "Composite" al resultante de la asociación entre un material reforzante, generalmente en forma de fibra y un material ligante o matriz, sin que se produzca ninguna reacción química entre ambos, figura 3.

En las figuras 4 y 5 se indican las fibras y matrices a emplear para formar un material compuesto. Las fibras proporcionan las propiedades mecánicas del "Composite", dependiendo de la orientación dada a las fibras y del volumen de ella incorporada. La matriz no se reduce únicamente a "rellenar" los espacios entre las fibras, sino que cabe destacar como funciones importantes: alinear las fibras en las direcciones de esfuerzos preferentes, separar entre sí a las fibras de modo que cada fibra actúe como un elemento independiente, proteger a las fibras de daños mecánicos y del medio ambiente, transmitir las cargas aplicadas sobre él.

Las principales ventajas de los materiales compuestos, se refieren a:

- Reducir el peso
- Mejorar resistencia a la fatiga y corrosión
- Presentar un buen comportamiento aeroelástico
- Mejorar las superficies aerodinámicas y posibilidad de construir formas más o menos complejas.
- Aportar unas excelentes propiedades mecánicas.
- Etc...

siendo sus problemas más relevantes: su precio, procesos lentos y artesanales de fabricación, resistencia al impacto, evaluación de ensayos no destructivos, poca experiencia anterior realmente útil, control de calidad aún no maduro, etc...

MATERIAS PRIMAS

a) Fibras:

Se consideran fibras los materiales cuya relación longitud/diámetro es mayor de 100. En la figura 3 del artículo anterior se indican

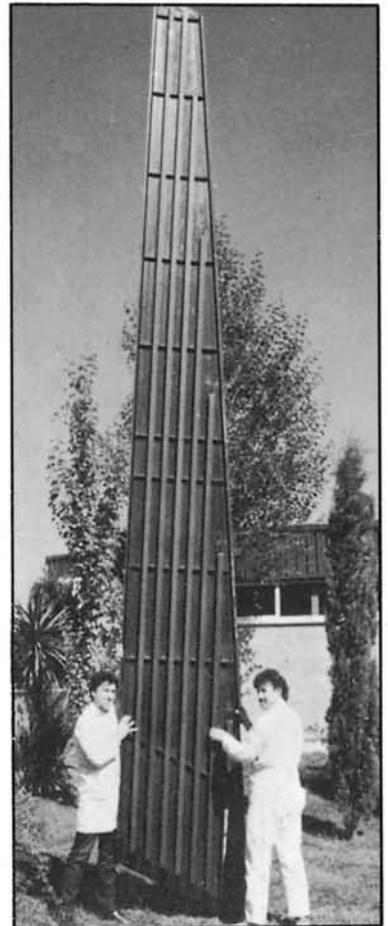


Figura 2. Revestimiento con larguerillos y costillas integradas en fibra de carbono/resina epoxi, realizado en un solo ciclo. (Pieza de desarrollo, realizada por CASA.)

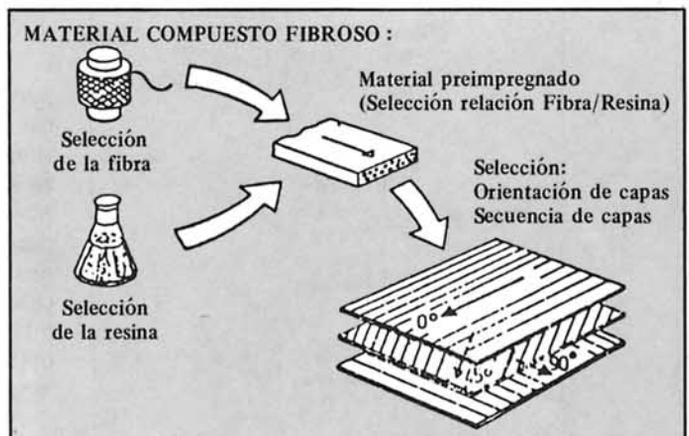
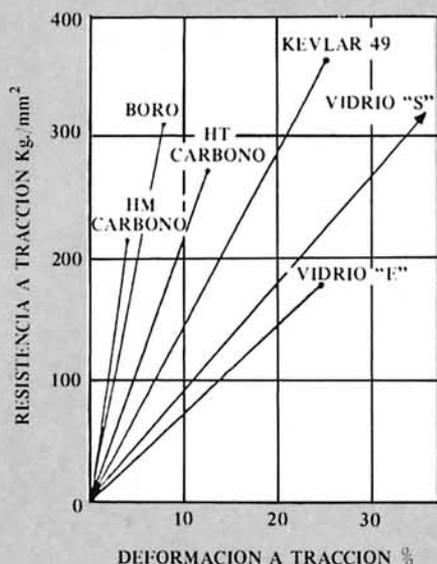


Figura 3



- FIBRAS DE VIDRIO — { VIDRIO "E"
VIDRIO "S"
- FIBRAS POLIMERICAS
- FIBRAS DE ARILAMIDAS — { NOMEX
KEVLAR
- FIBRAS DE CARBONO — { P. ORGANICAS
P. ALQUITRANOSO
P. CARBON
- FIBRAS DE BORO — { SOBRE WOLFRAMIO
SOBRE CARBONO
- FIBRAS DE DORSIC — { F. BORO CUBIERTA
DE SIC.
- FIBRAS DE CERAMICA — 3 M FIBRAS
- FIBRAS DE CARBURO DE SILICIO NYCALON
- FIBRAS DE CUARZO
- FIBRAS DE ALUMINA — { FP DUPONT
TYCO

Figura 4

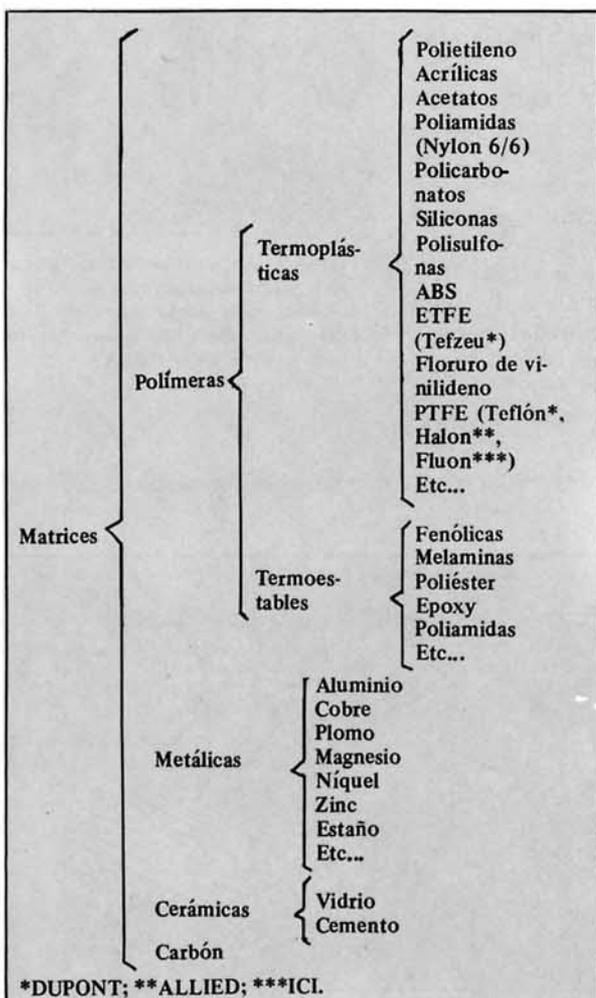


Figura 5

los datos de una serie de fibras cerámicas, orgánicas y metálicas.

Las fibras de vidrio "E", son las más utilizadas, presentando una buena relación performance/coste. Se han desarrollado otros tipos en los que cabe destacar las fibras de vidrio "S", de máxima resistencia (4650 MPa), siendo su limitación su bajo módulo elástico (86 GPa). En la figura 6 se muestra el consumo en Europa de las fibras de vidrio, que junto con la resina de poliéster, forma el material compuesto de mayor consumo.

Las fibras de Aramidas (Nomex, Kermel y Kevlar), son las fibras de Kevlar 29 y 49 las más utilizadas para la fabricación de compuestos de estructuras por su alta resistencia (2700 MPa) y módulo elástico (130 GPa). Su utilización presenta problemas por su baja adhesión con la matriz. Una de sus aplicaciones más sobresaliente es en la fabricación de estructuras secundarias sometidas a la acción de impactos y choques.

Las fibras de carbón o grafito, son obtenidas por degradación térmica controlada de fibras orgánicas. Inicialmente las primeras fibras de carbón, para lámparas incandescentes, se obtuvieron por carbonización parcial de hilos de seda. Luego a partir de fibras polímeras, inicialmente rayon, después poli-acrilonitrilo, y actualmente se trata de obtenerlas más económicamente, con la técnica del carbón licuado. Se obtienen tres variedades: alta resistencia, intermedia y alto módulo. Estas fibras son las más utilizadas en la industria aeroespacial por su alto módulo elástico (400 GPa), figura 7.

Su coeficiente de expansión térmico negativo, permite el diseño de elementos con coeficientes de expansión nulos, mediante un adecuado posicionado

de las fibras. Presentan el gran inconveniente de su mal comportamiento al impacto, solucionado mediante la formación de híbridos con Kevlar, sobre todo el Kevlar 29.

Las **fibras de Boro**, obtenidas por deposición a partir de una fase gaseosa "rica" en boro en un hilo de Wolframio o carbón. Su proceso de obtención es caro, lento y muy peligroso, teniendo un precio muy elevado. Estas fibras son particularmente interesantes para compuestos de matriz metálica. Presentan valores altos de resistencia a compresión, tracción y módulo elástico.

Las **fibras de carburo de silicio**, se obtienen por una técnica similar a las de boro, salvo que el vapor de deposición es a base de carbosilanos. El nombre comercial de esta fibra es "Nicalon" y está siendo introducida en el mercado por su facilidad de formar compuestos de matriz orgánica y metálica. Presentan características mecánicas elevadas a temperaturas altas (mantienen unos valores de resistencia a tracción de 1.000 MPa a 1.000°C). La máxima temperatura de servicio de estas fibras son los 1.250°C.

Las **fibras cerámicas**, son en el momento actual productos de poca difusión industrial. Compatibles con matrices metálicas constituirán el campo de composites "ALTAS TEMPERATURAS". Estas fibras son utilizadas para la construcción de blindajes de poco peso ("L.A.S." Lightweight Armour Systems).

Las **fibras metálicas**, tienen como mayor desventaja, frente a las orgánicas, su densidad, precio y características mecánicas específicas. Su uso o no está aún a nivel industrial.

Las fibras de vidrio, carbón, Kevlar y carburo de silicio son las más utilizadas en materiales compuestos con matrices orgánicas (resinas). Estas fibras se suministran en carretes de filamento continuo (roving), en formas tejidas con distintas texturas; como fieltros o fibras cortas sin orientación y como cintas o conjuntos de hilos paralelos no tejidos.

PAISES	VENTAS 1983 (TM)	%
ALEMANIA	75.300	35
FRANCIA	17.200	22
ITALIA	42.900	20
HOLANDA	17.500	8
BELGICA	11.800	6
ESPAÑA	11.500	5
SUIZA	7.700	3
AUSTRIA	2.300	1
TOTAL	216.200	100

MERCADO EUROPEO -CONCEPTOS-	1983	
	VENTAS (TM)	%
CONSTRUCCION	46.800	21
DEPORTES-SOCIO	12.000	6
MAT. INDUST/AGRIC.	40.500	18
TRANSPORTES	36.600	17
ELECTRIC/ELECTRON.	47.600	22
BIENES DE CONSUMO	9.200	4
DIVERSOS	25.500	12
TOTAL	218.200	100

Figura 6

GASTOS DE FIBRA DE CARBONO EN DISTINTAS AREAS DEL MUNDO EN TONELADAS/AÑO DESDE 1980 A 1985

	1980	1981	1982	1983	1984	1985
U.S.A.	500	790	840	1.260	2.000	3.000
EUROPA	100	140	250	350	480	640
JAPON	220	270	380	500	600	800
OTROS	20	50	150	200	240	310
TOTAL	840	1.250	1.620	2.310	3.320	4.750

GASTOS DE FIBRA DE CARBONO PARA DISTINTAS APLICACIONES (1981) EN TONELADAS/AÑO

	AERESPACIO	DEPORTES	OTROS	TOTAL
U.S.A.	400	160	230	790
EUROPA	70	30	40	140
JAPON	10	210	50	270
OTROS	-	50	-	50
TOTAL	480	450	320	1.250

Figura 7

PROPIEDADES MECANICAS TÍPICAS DE COMPOSITES CON MATRIZ EPOXIES

Propiedades	Grafito/Epoxies		Boro/Epoxi	Kevlar 49/Epoxi	"S" Vidrio/Epoxi
	Alta resisten.	Alto módulo			
(g/cc) Densidad	1,5	1,6	2,0	1,3	1,9
(MPa) Resist. Tracción	1.296	628	1.524	930	1.447
(GPa) Módulo	148	330	214	89	41

* Estos compuestos contienen un 50% de contenido en fibra y un 50% de epoxi, en volumen.

Figura 8

b) Matrices:

Las matrices alojan refuerzos, cargas, fibras o tejidos; son una fase sólida continua, resistente y dúctil. En la figura 11 se indican las matrices posibles a usar en la formación de materiales compuestos.

Actualmente, la casi totalidad de los materiales compuestos se realizan con resinas termoestables. Los fabricantes de matrices están desarrollando matrices termoplásticas, con el fin de crear materiales compuestos cuyos métodos de transformación sean competitivos con los utilizados en la industria del metal.

Las **matrices poliméricas termoestables**, a la temperatura de proceso, en la resina en estado líquido se produce una reacción química de entrecruzamiento, convirtiéndose en un sólido rígido, infusible e insoluble. Este proceso, llamado ciclo de curado, depende del sistema de resina utilizado. Las tres resinas de este grupo más empleadas son: Poliéster (UP), Fenólica (PF) y Epóxidos (EP).

Las **resinas de Poliéster**, son el tipo más común de matriz para los composites, asociada con fibras de vidrio, formando embarcaciones, carrocerías de vehículos y componentes de estructuras secundarias y aviones, como carenas y tabiques de separación. Son resinas baratas que tienen buenas propiedades eléctricas y dieléctricas, con el inconveniente de presentar contracciones en el curado (6 al 9%), provocando microgrietas.

Las **resinas fenólicas**, son las más antiguas dentro de este grupo. Su principal dificultad está en las condiciones de procesos, exigiendo altas presiones para evitar la formación de poros, debido a la cantidad de volátiles que se forman durante la polimerización. En la industria aeronáutica ha aumentado mucho su utilización, tanto para paneles electrónicos como para revestimientos interiores de avión, por su baja emisión de humos en caso de incendio. Pueden utilizarse hasta temperaturas de 300° C.

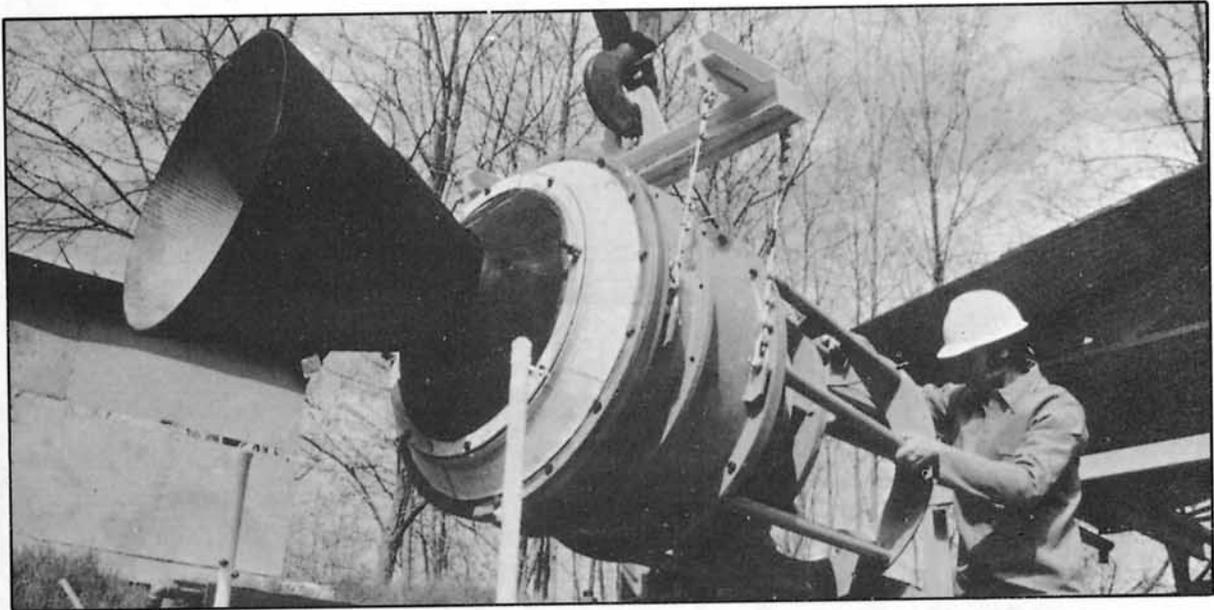


Figura 9

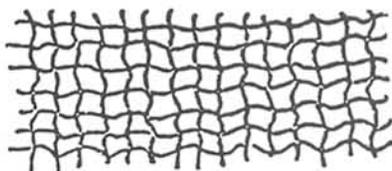
Las **resinas epoxies**, son las matrices que consiguen los materiales compuestos de mejores propiedades, por su alta adhesión a las fibras y baja contracción. Sus propiedades pueden variarse enormemente mediante modificaciones de la estructura química básica. Tienen gran estabilidad dimensional y contraen muy poco durante la polimerización. Su resistencia a solicitaciones estáticas y dinámicas, es elevada y también a los productos químicos. Existen resinas de uso de hasta 200° C, pero normalmente se emplean de 80° a 120° C de temperatura de servicio. Figura 8.

Las **matrices polímeras para altas temperaturas**, son denominadas en algunas ocasiones termoplásticos-termoestables, por su estructura química. Algunas de éstas alcanzan los 300°C de temperatura de servicio soportando estados transitorios de hasta 500°C. El sistema más desarrollado es el de las poliimidas, formando compuestos avanzados con fibras de carbono y cerámicas (Nextel), aplicadas para conjuntos que trabajan a temperaturas elevadas. Los procesos con estos sistemas de resinas son difíciles.

Las **matrices de carbón**, dan lugar a los compuestos denominados C/G (CARBON-CARBON). Se obtienen incluyendo las fibras en la matriz polimérica que se carboniza por calor, llegando a una estructura final grafitica, en atmósfera inerte durante varias horas a temperatura de unos 2800°C. Se emplea para la fabricación de conos de protección de vehículos espaciales, toberas de motores, plantas nucleares, frenos para ruedas de aviones, etc. Figura 9.



CINTAS: SERIE DE FIBRAS QUE CORREN PARALELAMENTE ENTRE SI.
ROVING O MECHA: CONJUNTO DE HILOS SIN TORSION DE BASE CONTINUA.



TEJIDOS: JUEGOS DE FIBRAS SITUADAS A 90° ENTRE SI.



S.M.C. "SHEET MOLDING COMPOUND": LAMINAS FORMADAS POR FIBRAS CORTADAS QUE VARIAN DESDE 6,35 A 50 mm. DE LONGITUD Y CARGAS IMPREGNADAS EN RESINA.

SMC-R

SMC-D

SMC-C



S.M.C. - R: DISTRIBUCION ISOTROPICA DE FIBRAS.
S.M.C. - D: DISTRIBUCION ORIENTADA DE FIBRAS.
S.M.C. - C: DISTRIBUCION ORIENTADA CON FIBRAS CONTINUAS.

Figura 10

Las matrices Cerámicas y Metálicas, aún no han alcanzado una etapa industrial, estando su dificultad en conseguir una buena adherencia matriz-fibra, sin deterioro de las propiedades mecánicas de ésta y una ausencia de porosidad. Los procesos de fabricación son: Proyección de plasma, electrodeposición y sinterizado.

Los sistemas que pueden formarse son clasificados en tres clases:

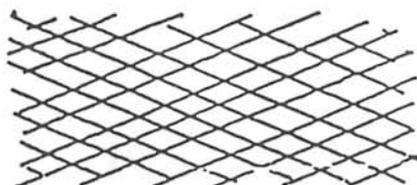
Clase I: Filamentos y matriz no reaccionan y son mutuamente insolubles (Aluminio-SiC, Cobre-Aluminio, Aluminio-Boro, Magnesio-Boro, etc...)

Clase II: Filamentos y matriz no reaccionan, pero presentan alguna solubilidad (Níquel-Carbono, Níquel-Wolframio, etc...)

Clase III: Filamento y matriz reaccionan (Titanio-Boro, Alúmina-Sílico, etc...).

Estos tipos de materiales compuestos, junto con los de **matriz de vidrio** (vidrio/carbón, vidrio/carburo de silicio), **matriz cerámica** (cerámica/carbón) y los de matrices polímeras para alta temperatura son las nuevas innovaciones tecnológicas para los años próximos.

Como se ha venido indicando, la unión del material de refuerzo con la matriz forma el compuesto, figura 3. Este puede formarse durante el proceso de fabricación, por lo que se recibirán de los proveedores ambas materias primas por separado, o ya unidas por el fabricante (impregnador). Es decir, las fibras continuas o discontinuas impregnadas de resina en cantidad adecuada, con su correspondiente inhibidor de la reacción. Estos materiales así formados se denominan preimpregnados o "Prepreg". En las figuras 10, 11, se indican las distintas formas de presentarse estos materiales. ■



X.M.C.: FAMILIA DE PRODUCTOS EN LA CUAL LAS FIBRAS CONTINUAS DE REFUERZO, SE ENCUENTRAN A UN CIERTO ANGULO.

H.M.C. "HIGH MOLDING COMPOUND": SON SMC EN LOS QUE LA PROPORCIÓN DE REFUERZO FIBROSO SE AUMENTA A BASE GENERALMENTE DE DISMINUIR LA CARGA.



D.M.C. O PREMIX: PASTA FORMADA POR UNA COMBINACIÓN DE RESINAS, REFUERZOS DE F. CORTADAS Y DETERMINADOS COMPUESTOS QUIMICOS AUXILIARES.

B.M.C. "BULK MOLDING COMPOUND": SON DMC EN LOS QUE SE HA ANADIDO A LA FORMULACION UN AGENTE ESPESANTE, OBTIENIENDO UNA MASA MUCHO MAS VISCOSA.

Figura 11