

Capítulo 8

Materialés Compuestos

1.8. Materialés compuestos reforzados con partículas, fibras y láminas

1.8.1. Clasificación de los materialés compuestos

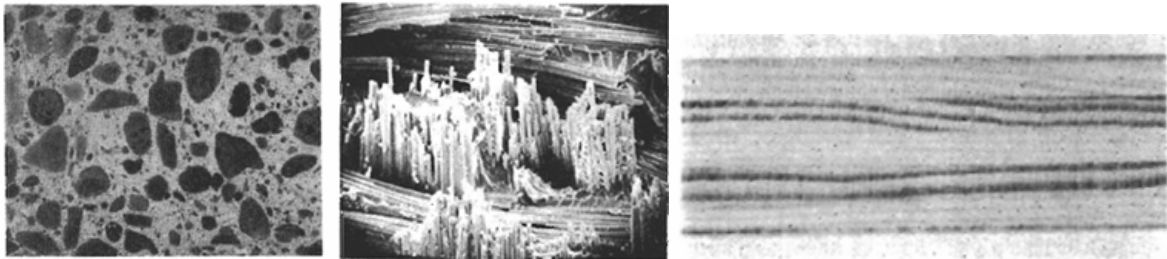
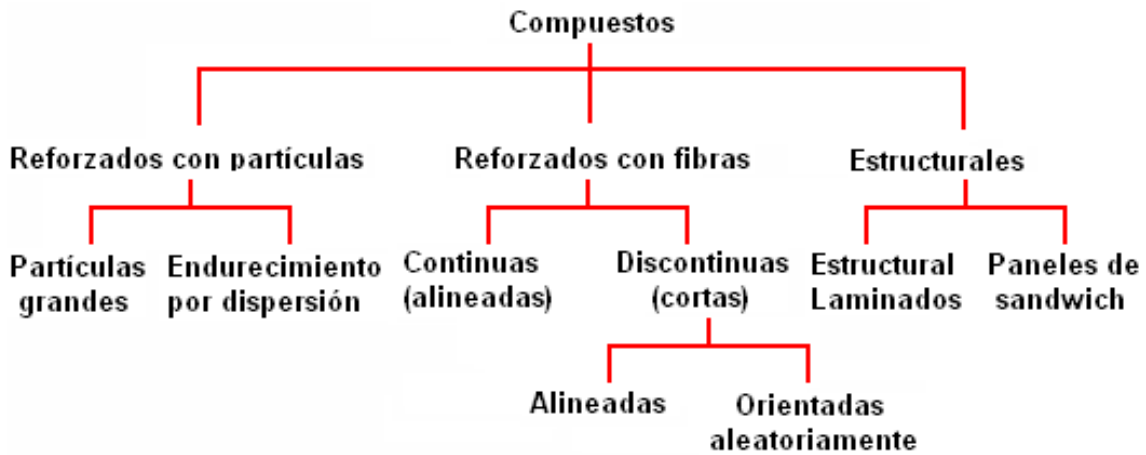
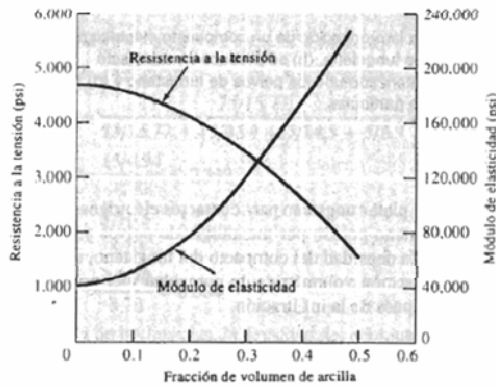


Figura 120 Izq. El concreto es un compuesto particulado que contiene arena gruesa o grava en una matriz de cemento. Centro: La fibra de vidrio es un compuesto reforzado con fibra, contiene largas fibras rígidas de vidrio en una matriz polimérica más blanda. Der. La madera contrachapada es un compuesto laminar de capas de madera.

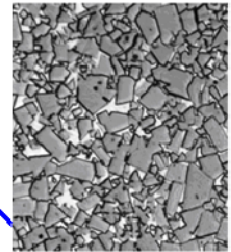
Regla de las mezclas

$$\rho_c = \sum f_i \rho_i = f_1 \rho_1 + f_2 \rho_2 + \dots + f_n \rho_n,$$

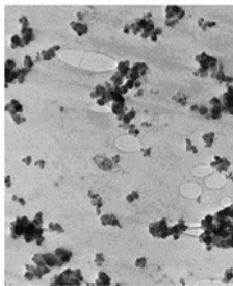
1.8.2. Compuestos reforzados por dispersión



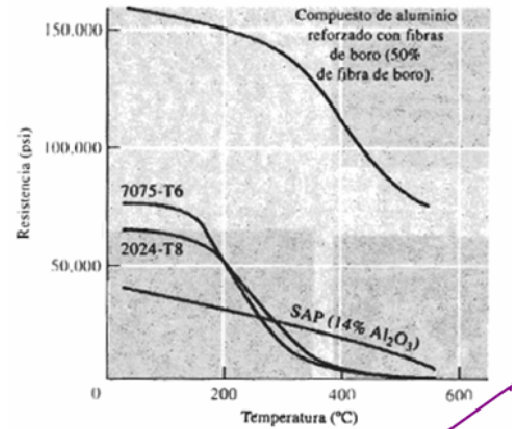
Carburo cementado (CW-Co) formado por partículas de Carburo de Tungsteno en una matriz de Cobalto



Compuesto Polietileno-Arcilla: Efecto de la arcilla sobre las propiedades del polietileno



Partículas de negro de carbón en una matriz de caucho sintético en un neumático



Comparación del esfuerzo de cedencia elástico del material compuesto de polvo de aluminio sinterizado (PAS) endurecido por dispersión, con el de dos aleaciones convencionales de aluminio bifásicas de alta resistencia. El compuesto es mejor por arriba de aproximadamente los 300°C. Para comparar se muestra un material compuesto de aluminio reforzado con fibras.

Figura 121 Algunos compuestos reforzados por partículas.

Tabla 21 Aplicación de compuestos reforzados por dispersión

Sistema	Aplicaciones
Ag-CdO	Materiales para contactos eléctricos
Al-Al ₂ O ₃	Uso posible en reactores nucleares
Be-BeO	Aerospacial y reactores nucleares
Co-ThO ₂ , Y ₂ O ₃	Posibles materiales magnéticos resistentes a la termofluencia
Ni-20% Cr-ThO ₂	Componentes de turborreactores
Pb-PbO	Rejillas para batería
Pt-ThO ₂	Filamentos, componentes eléctricos
W-ThO ₂ , ZrO ₂	Filamentos, calentadores



Figura 122 Compuestos reforzados por dispersión utilizados en barrenas de perforación. A medida que las partículas duras se desgastan, se rompen o salen de la matriz, y se exponen nuevas superficies de corte.

1.8.3. Materiales compuestos reforzados con fibras

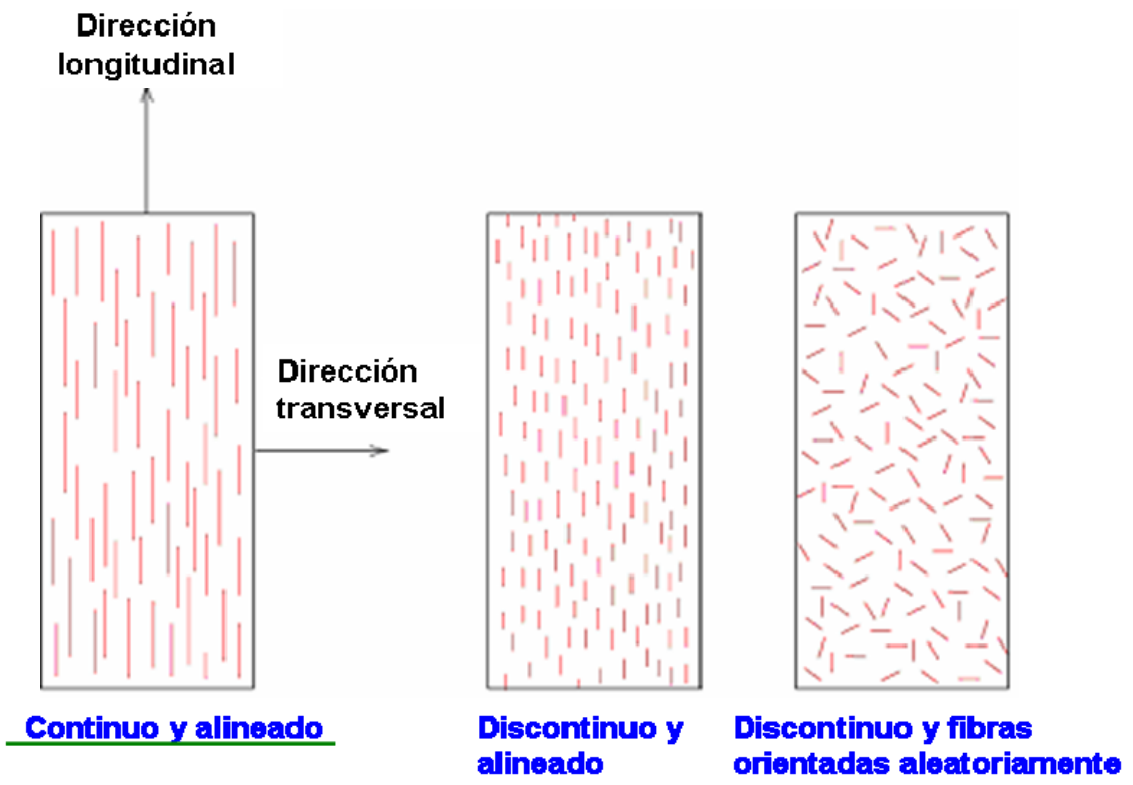


Figura 123 Orientación de las fibras en materiales compuestos.

La regla de las mezclas en los compuestos reforzados por fibra

$$K_c = f_m K_m + f_f K_f$$

$$\sigma_c = f_m \sigma_m + f_f \sigma_f,$$

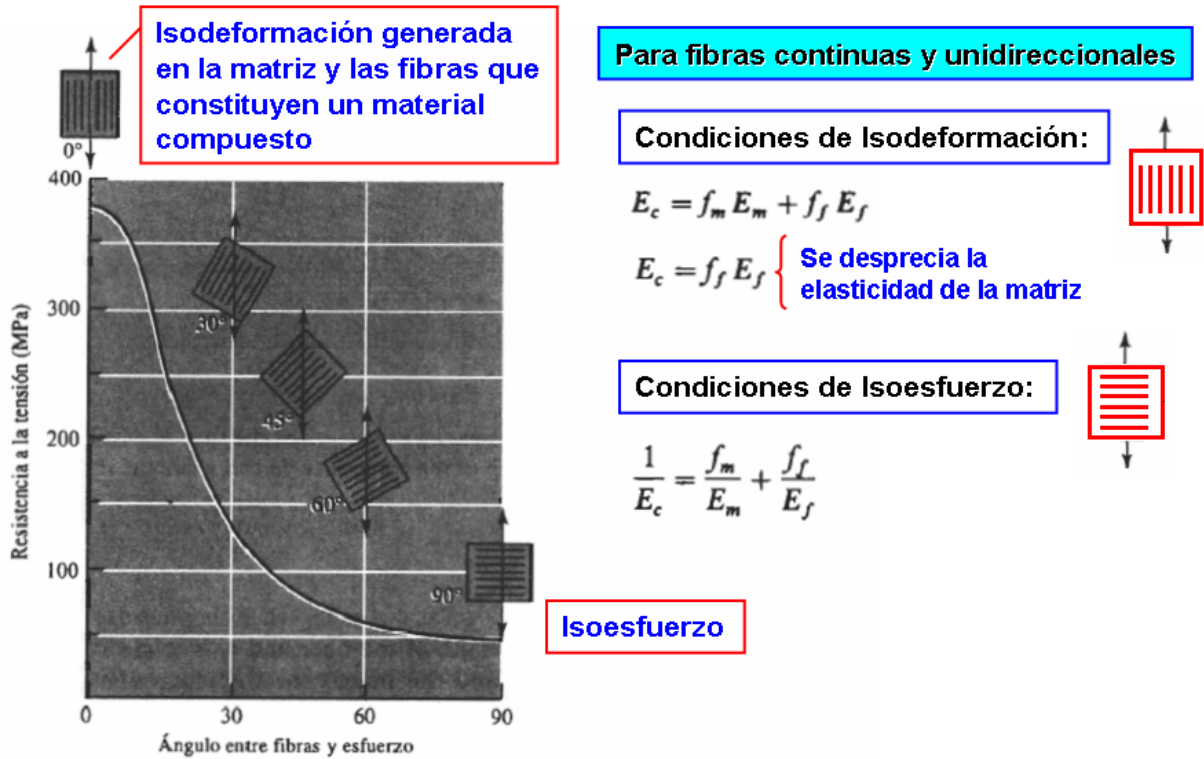


Figura 124 Efecto de la orientación de las fibras en la resistencia a la tensión de compuestos epóxicos reforzados con fibras de vidrio.

Tabla 22 Aplicación de compuestos reforzados con fibras

Material	Aplicaciones
Aluminio-boro	Aspas de ventilador en motores, otras aplicaciones en aeronaves y en la industria aerospacial
Epóxico-kevlar Poliéster-kevlar	Aeronaves, aplicaciones aerospaciales (incluyendo el transbordador espacial), cascos de barcos, artículos deportivos (incluyendo raquetas de tenis, palos de golf, cañas de pescar), chalecos antibalas
Polímero-grafito	Aplicaciones aerospaciales y automotrices, artículos deportivos
Polímero-vidrio	Aplicaciones automotrices ligeras, aplicaciones para agua dulce y agua de mar, aplicaciones resistentes a la corrosión, artículos deportivos, componentes de aeronaves y aerospaciales

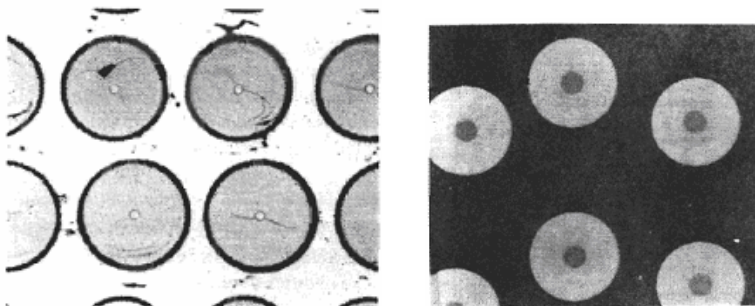


Figura 125 Izq. Aluminio reforzado con fibra de Borsic, donde las fibras están compuestas por una capa gruesa de boro depositada en un filamento de tungsteno de diámetro pequeño. Der. En esta microestructura de un compuesto de matriz cerámica reforzado con fibra cerámica, se utilizan fibras de carburo de silicio para reforzar una matriz de nitruro de silicio. La fibra de SiC se deposita como vapor en un pequeño filamento precursor de carbono.

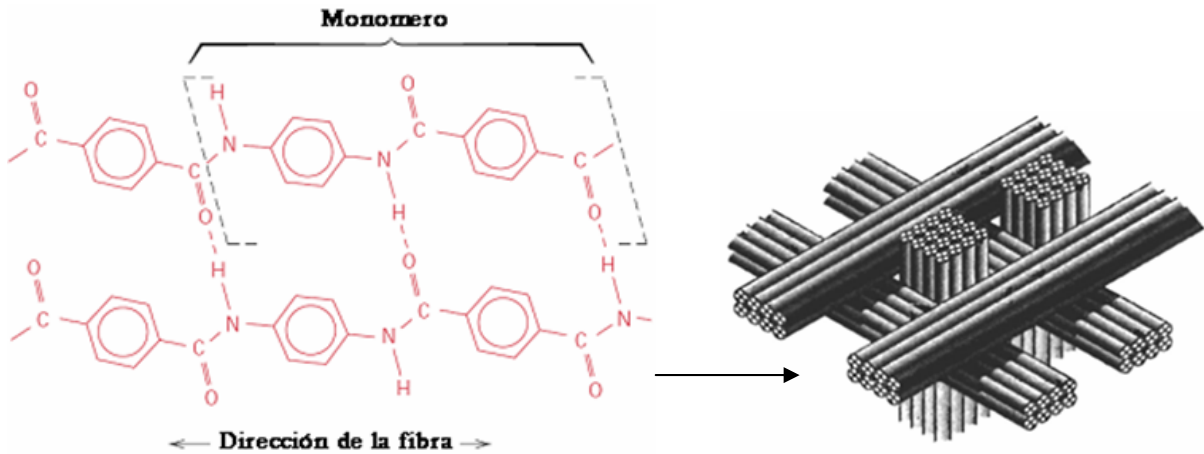


Figura 126 Las fibras de aramidas, cuyo ejemplo más conocido es el Kevlar, son poliamidas aromáticas que poseen una estructura de polímero líquido-cristalino en los cuales las cadenas poliméricas forman varillas muy rígidas y se pueden ordenar espacialmente formando una especie de tejido.

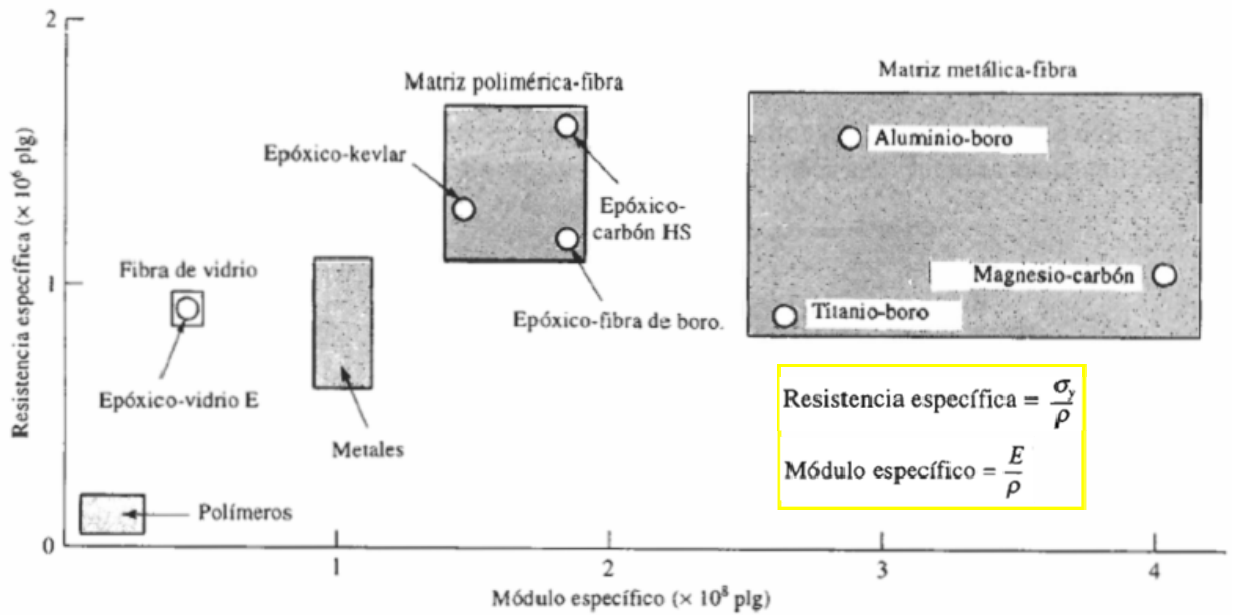


Figura 126 Comparación del módulo y resistencia específica de varios materiales compuestos con los metales y polímeros.

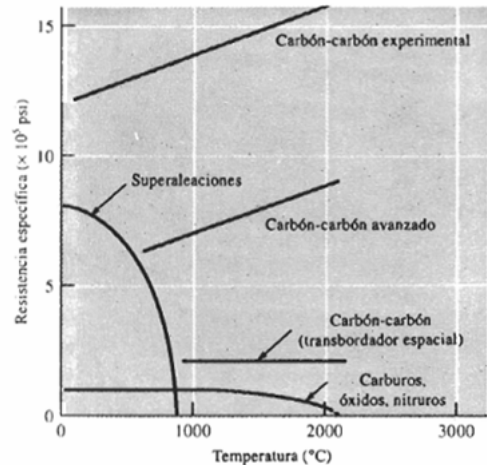
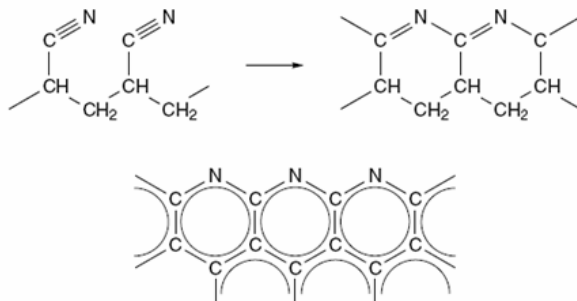


Figura 127 Izq. Pirólisis del poliacrilonitrilo para producir fibras de carbono. Der. Propiedades y aplicaciones de las fibras de carbono

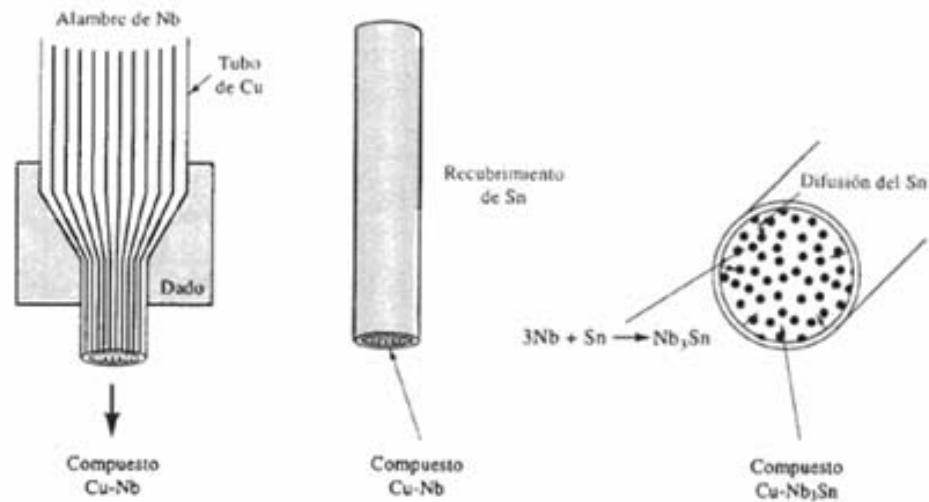


Figura 128 Manufactura de alambres superconductores compuestos: (a) durante el formado el alambre de niobio es rodeado de cobre. (b) El alambre de material compuesto Nb-Cu se recubre de estaño. (c) El estaño se difunde hacia el niobio, produciendo el compuesto Nb₃Sn - Cu.

Tabla 23 Propiedades de materiales de refuerzo en forma de fibras

Material	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a la tensión (ksi)	Módulo de elasticidad (×10 ⁶ psi)	Temperatura de fusión (°C)	Módulo específico (×10 ⁷ plg)	Resistencia específica (×10 ⁶ plg)
Polímeros:						
Kevlar	1.44	650	18.0	500	34.7	10.1
Nylon	1.14	120	0.4	249	1.0	2.9
Polietileno	0.97	480	25.0	147	7.1	13.7
Metales:						
Be	1.83	185	44.0	1277	77.5	2.8
Boro	2.36	500	55.0	2030	64.7	4.7
W	19.40	580	59.0	3410	8.5	0.8
Vidrio:						
Vidrio E	2.55	500	10.5	<1725	11.4	5.6
Vidrio S	2.50	650	12.6	<1725	14.0	7.2
Carbono:						
HS (alta resistencia)	1.75	820	40.0	3700	63.5	13.0
HM (alto módulo)	1.90	270	77.0	3700	112.0	3.9
Cerámicos:						
Al ₂ O ₃	3.95	300	55.0	2015	38.8	2.1
B ₄ C	2.36	330	70.0	2450	82.4	3.9
SiC	3.00	570	70.0	2700	47.3	5.3
ZrO ₂	4.84	300	50.0	2677	28.6	1.7
Whiskers:						
Al ₂ O ₃	3.96	3000	62.0	1982	43.4	21.0
Cr	7.20	1290	35.0	1890	13.4	4.9
Grafito	1.66	3000	102.0	3700	170.0	50.2
SiC	3.18	3000	70.0	2700	60.8	26.2
Si ₃ N ₄	3.18	2000	55.0		47.8	17.5

1.8.4. Materiales compuestos reforzados con láminas

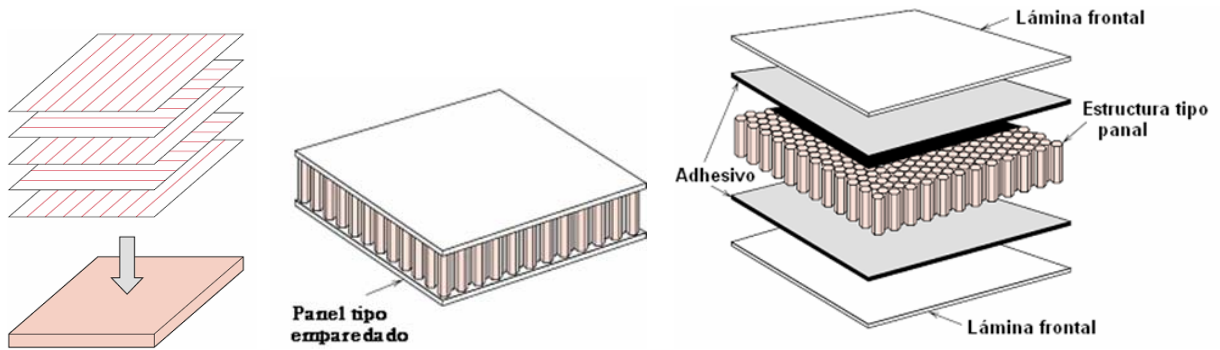
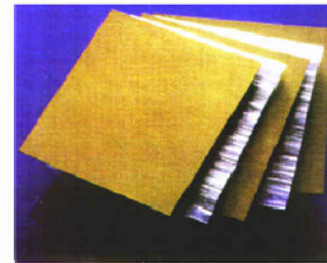
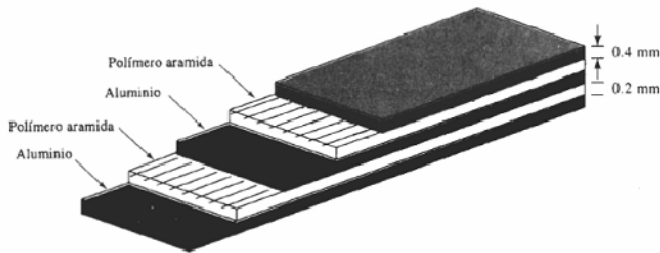


Figura 129 Izq. El apilamiento sucesivo de capas de fibras unidireccionales reforzadas forman un material compuesto laminar. Centro y Der. Estructuras tipo sandwich y tipo panel.



Arall: Laminado aramida-aluminio usado para aplicaciones espaciales. Posee alta resistencia, rigidez, resistencia a la corrosión y baja densidad

GLARE: "GLAss-REinforced" Laminado de fibras metálicas, está compuesto por capas delgadas de aluminio y de fibra de vidrio adheridas a través de una matriz epóxica

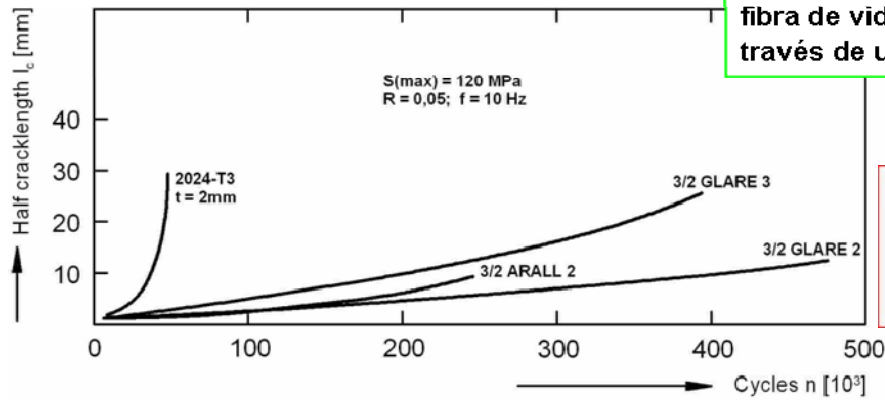


Figura 130 Materiales reforzados con láminas utilizados en aplicaciones aeronáuticas y aeroespaciales. El compuesto laminar GLARE es utilizado en el recientemente desarrollado avión A380.

Tabla 24 Polímeros usados típicamente como matrices en materiales compuestos poliméricos.

Matrix Material	Process Temperature (°C)	Upper Use Temperature (°C)
<i>Thermosetting</i>		
Polyester (phthalic/maleic type)	RT	70
Vinyl ester	RT	125
Epoxy	150	125
Epoxy	200	175
Phenolic	250	200
Cyanates (triazines)	250	200
Bismaleimides	250	225
Nadic end-capped polyimides (e.g., PMR-15)	316	316
<i>Thermoplastic</i>		
Polysulfone	325	180
Polyamide	250	100
Polycarbonate	280	100
Polyphenylene oxide (PPO)	280	100
Polysulfides (PPS)	300	150
Polyether ether ketone (PEEK)	370	175
Polyether sulfone (PES)	350	175
Polyamide-imides	325	200
Polyetherimide	400	275
Polyimide	370	316
Polyarylate	400	300
Polyester (liquid crystalline)	300	150

Tabla 25 Metales comunes usados en materiales compuestos de matriz metálica

Matrix Material	Fabrication Method	Typical Composite Density (g/cm ³)	Use Temperature (°C)
Aluminum	Diffusion bonding	2.62–3.45	350
	Hot molding		
	Powder metallurgy		
	Liquid processing		
Magnesium	Liquid processing	1.82–2.80	300
	Diffusion bonding		
Titanium	Diffusion bonding	3.76–4.00	650
Iron-, nickel-based alloys	Diffusion bonding	5.41–11.7	800–1150

Tabla 26 Cerámicas comunes usados en materiales compuestos de matriz cerámica

Matrix Material	Density (g/cm ³)	Use Temperature (°C)
Alumina, Al ₂ O ₃	4.0	~1000
Glass ceramics	2.7	900
Si ₃ N ₄	3.1	~1300
SiC	3.2	~1300

Capítulo 9

Corrosión

1.9. Corrosión química y electroquímica

1.9.1. Serie de potenciales de reducción estándar

	Reacciones del electrodo	Potencial de electrodo estándar V° (V)
<p style="text-align: center;">↑</p> <p>Más Inerte (Catódico)</p>	Au ³⁺ + 3e ⁻ → Au	+1,420
	O ₂ + 4H ⁺ + 4e ⁻ → 2H ₂ O	+1,229
	Pt ²⁺ + 2e ⁻ → Pt	~+1,2
	Ag ⁺ + e ⁻ → Ag	+0,800
	Fe ³⁺ + e ⁻ → Fe ²⁺	+0,771
	O ₂ + 2H ₂ O + 4e ⁻ → 4(OH ⁻)	+0,401
	Cu ²⁺ + 2e ⁻ → Cu	+0,340
	2H ⁺ + 2e ⁻ → H ₂	0
	Pb ²⁺ + 2e ⁻ → Pb	-0,126
	Sn ²⁺ + 2e ⁻ → Sn	-0,136
<p>Más Activo (Anódico)</p> <p style="text-align: center;">↓</p>	Ni ²⁺ + 2e ⁻ → Ni	-0,250
	Co ²⁺ + 2e ⁻ → Co	-0,277
	Cd ²⁺ + 2e ⁻ → Cd	-0,403
	Fe ²⁺ + 2e ⁻ → Fe	-0,440
	Cr ³⁺ + 3e ⁻ → Cr	-0,744
	Zn ²⁺ + 2e ⁻ → Zn	-0,763
	Al ³⁺ + 3e ⁻ → Al	-1,662
	Mg ²⁺ + 2e ⁻ → Mg	-2,363
	Na ⁺ + e ⁻ → Na	-2,714
	K ⁺ + e ⁻ → K	-2,294