

MATERIAIS COMPÓSITOS

2ª Parte

Prof. Cláudio Gouvêa dos Santos

Classificação das Fibras

- **Monofilamentos (*whiskers*):** são monocristais muito finos ($\sim 1 \mu\text{m}$). Apresentam uma relação comprimento-diâmetro muito grande e alto grau perfeição cristalina, sendo virtualmente isentos de defeitos. São extremamente caros. Exs.: SiC, SiN e Al_2O_3 .
- **Fibras:** são policristalinos ou amorfos e seus diâmetros são pequenos ($\sim 10 \mu\text{m}$). Consistem geralmente de polímeros ou cerâmicas. Exs.: aramidas, vidro, carbono, boro, SiC e Al_2O_3 .
- **Fios:** Têm diâmetros relativamente grandes. São usados como reforço radial em pneus de automóveis, carcaça de foguete bobinado, e mangueiras de alta pressão de fio bobinado. Exs.: aço, molibdênio, tungstênio.

A Fase de Fibra

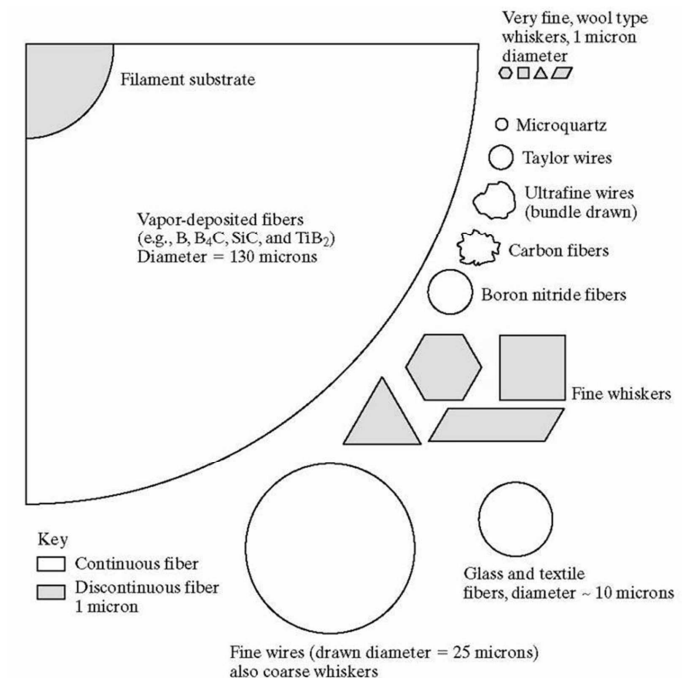
Principais propriedades mecânicas de materiais usados para componentes estruturais:

- Rigidez
- Resistência (ruptura, fadiga, etc.)
- Peso Específico

A resistência e rigidez de um material, quando em forma de fibra, são algumas ordens de grandeza maiores que os valores obtidos para o mesmo material em bloco.

A discrepância entre esses valores se explica pela presença (ou não) de imperfeições ou falhas no material.

Apesar das propriedades fantásticas que apresentam, as fibras geralmente não podem ser usadas sozinhas, pois um feixe de fibras apenas pode suportar forças de tração longitudinais.



Tipos e Propriedades de Fibras

Material	Gravidade Específica	Resistência a tração (GPa)	Resistência Específica (GPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Módulo Específico (GPa)
Whiskers					
Grafite	2,2	20	9,1	700	318
Nitreto de silício	3,2	5-7	1,56-2,2	350-380	109-118
Óxido de alumínio	4,0	10-20	2,5-5,0	700-1500	175-375
Carbeto de silício	3,2	20	6,25	480	150
Fibras					
Óxido de alumínio	3,95	1,38	0,35	379	96
Aramida (Kevlar 49)	1,44	3,6-4,1	2,5-2,85	131	91
Carbono	1,78-2,15	1,5-4,8	0,70-2,70	228-724	106-407
Vidro-E	2,58	3,45	1,34	72,5	28,1
Boro	2,57	3,6	1,40	400	156
Carbeto de silício	3,0	3,9	1,30	400	133
UHMWPE (Spectra 900)	0,97	2,6	2,68	117	121
Fios Metálicos					
Aço de alta resistência	7,9	2,39	0,30	210	26,6
Molibdênio	10,2	2,2	0,22	324	31,8
Tungstênio	19,3	2,89	0,15	407	21,1

Comparação entre as fibras mais comuns

Propriedade	Vidro	Carbono	Kevlar
Resistência	Pior	Intermediária	Melhor
Firmeza	Pior	Melhor	Intermediária
Custo	Melhor	Pior	Intermediário
Peso	Pior	Melhor	Intermediário

Table Mechanical Properties of Reinforcement Fibers

Fiber	Density lb/in ³	Tensile Strength psi x 10 ³	Tensile Modulus psi x 10 ⁶	Ultimate Elongation	Cost \$/lb
E-Glass	.094	500	10.5	4.8%	.80-1.20
S-Glass	.090	665	12.6	5.7%	4
Aramid-Kevlar [®] 49	.052	525	18.0	2.9%	16
Spectra [®] 900	.035	375	17.0	3.5%	22
Polyester-COMPET [®]	.049	150	1.4	22.0%	1.75
Carbon-PAN	.062-.065	350-700	33-57	0.38-2.0%	17-450

Fibras de Vidro

Surgiram pouco antes de 1930, mas só a partir da Segunda Guerra é que se deu o seu uso intensivo, em conjunção com resinas de poliéster.

“Motivação”: Os elementos de proteção do radar deveriam ser suficientemente fortes para resistir às cargas aerodinâmicas, às baixas temperaturas ambientes, às intempéries e, simultaneamente, deveriam ser transparentes às ondas de alta frequência do radar. Essa restrição excluía qualquer solução com materiais metálicos!

Principais Vantagens:

- baixo custo em relação às demais fibras
- alta relação resistência-densidade (resistência específica)

Principais Desvantagens:

- baixa relação módulo de elasticidade/densidade (rigidez específica)
- baixa resistência à abrasão, o que reduz a resistência à ruptura
- adesão pobre às resinas, especialmente em presença de umidade

Características dos Vidros mais Comuns

Tipo de Vidro	Composição (% em peso)					Características e Aplicações
	SiO ₂	Na ₂ O	CaO	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	
Sílica fundida	>99,5					Alta temperatura de fusão, baixo coeficiente de expansão (resistente a choque térmico)
Sílica 96% (Vycor)	96			4		Resistente a choque térmico e agentes químicos – material de laboratório.
Borossilicato (Pyrex)	81	3,5		2,5	13	Resistente a choque térmico e agentes químicos – utensílios para forno.
Recipiente (soda-cal)	74	16	5	1		4MgO Baixa temperatura de fusão, fácil manuseio e também durável.
Fibra	55		16	15	10	4MgO Facilmente estirado sob a forma de fibras – compósitos vidro-resina.
Pedra óptica	54	1				37PbO, 8K ₂ O Alta densidade e índice de refração – lentes ópticas
Vidro-cerâmica	43,5	14		30	5,5	6,5TiO ₂ , 0,5As ₂ O ₃ Fabricação fácil, forte, resistente a choque térmico – utensílios para forno.

Composição em peso de vidros do tipo E e S

Componente	Vidro E	Vidro S
Dióxido de silício	52–56%	64–66%
Óxido de cálcio	16–25%	0–0,3%
Óxido de alumínio	12–16%	24–26%
Óxido de boro	5–10%	—
Óxidos de sódio e potássio	0–2%	0–0,3%
Óxido de magnésio	0–5%	9–11%
Óxido de ferro	0,05–0,4%	0–0,3%
Óxido de titânio	0–0,8%	—
Fluoretos	0–1,0%	—

Formas Comercialmente Disponíveis de Fibras de Vidro

- Mechas (*roving*): geralmente produzidas com “rendimento” de 450 a 3600 m/kg. Usadas diretamente em bobinamento, preregs e extrusão.
- Mantas de fibras contínuas (*continuous strand mats*): não são tecidas e as fibras são depositadas de forma emaranhada). Geram lâminas aproximadamente homogêneas e isotrópicas.
- Mantas de fibras picadas (*chopped strand mats*): são mechas de 25 a 50 mm, uniformes e aleatoriamente distribuídas num plano e aderidas entre si por um adesivo.
- Tecidos (*woven roving*): são semelhantes aos tecidos têxteis. Por causa do custo e facilidade de manuseio, são bastantes usados na construção de grandes peças.
- Fibra moída (*milled fiber*): mechas de fibras contínuas podem ser moídas a comprimentos de 0,14 a 6,5 mm. São usadas como carga.

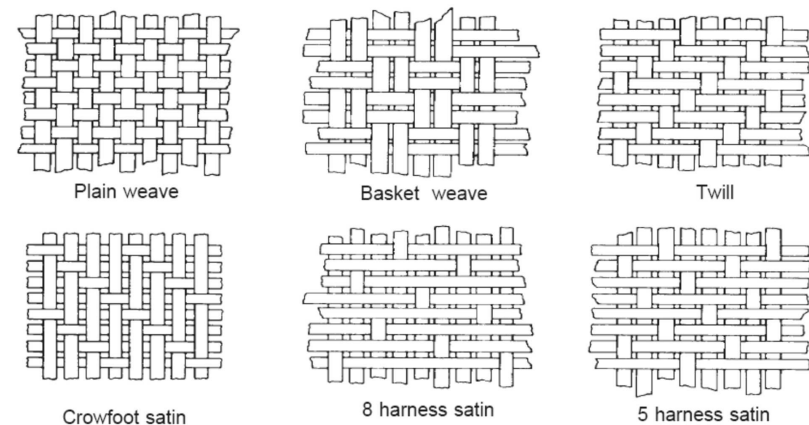


Figure Reinforcement Fabric Construction Variations [ASM Engineered Materials Handbook]



Vantagens dos Compósitos com Fibras de Vidro

- É facilmente estirado sob a forma de fibras de alta resistência mecânica a partir do estado fundido.
- É prontamente disponível e pode ser transformado em plástico reforçado por vidro de modo econômico usando uma larga variedade de técnicas de fabricação de compósito.
- Como fibra, é relativamente forte, e quando embutido numa matriz de plástico, ele produz um compósito tendo uma resistência mecânica específica muito alta.
- Quando combinado com os vários plásticos, ele possui uma inércia química que torna o compósito útil numa variedade de ambientes corrosivos.

Limitações dos Compósitos com Fibras de Vidro

- Não exibem a rigidez necessária para certas aplicações.
- Temperatura de serviço limitada a 200°C (podendo ser estendida).

Aplicações Atuais das Fibras de Vidro

- **Indústria naval:** cascos para barcos de lazer, navios, submarinos científicos e de prospecção. Reservatórios de água e combustível. Dutos de ventilação, bóias.
- **Indústria química:** bandejas farmacêuticas, tanques de armazenamento, tubulações e dutos, em virtude de sua resistência a ataques corrosivos.
- **Indústria militar e aeroespacial:** carcaças de foguetes, hélices de aviões e helicópteros, vasos de pressão, barcos de desembarque.
- **Indústria automobilística:** carroceria de automóveis, caminhões e ônibus. Pára-choques, painéis de instrumentos, revestimento interno
- **Construção civil:** perfis estruturais, pisos, painéis e divisórias, concreto armado por aço e fibras ou varetas. Pontes suspensas por feixes paralelos de fibras em substituição aos cabos de aço. Isolamento térmico e elétrico.
- **Material esportivo e de lazer:** raquetes, esquis, capacetes, piscinas, parques de diversão, parques aquáticos, arcos e flechas, bicicletas, varas de pescar.

Fibras de Carbono e Grafite

Distinção entre fibras de carbono e grafite

- carbono: 80 a 95% de carbono
- grafite: mais de 98,8% de carbono

Em relação às fibras de vidro, as fibras de grafite apresentam:

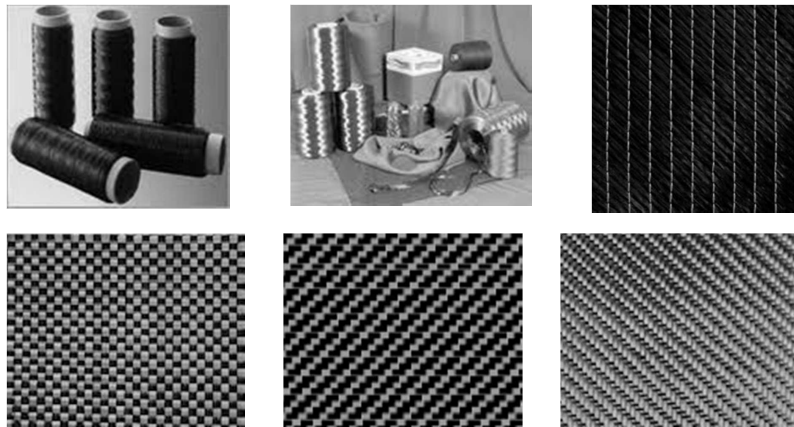
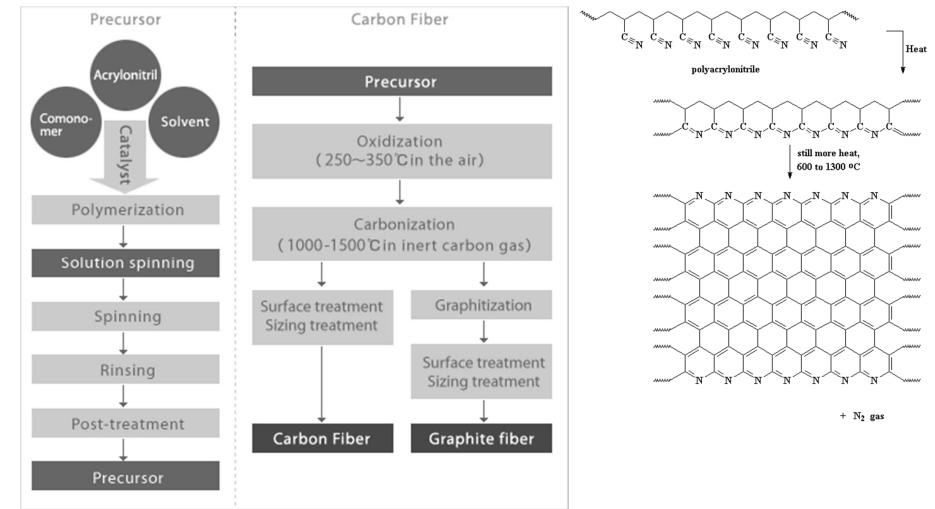
- maior rigidez
- maior resistência a altas temperaturas (quando o vidro tende a se fundir)
- Densidade inferior (cerca de 68% da do vidro)
- Custo maior

Formas disponíveis

- **Fio** (um conjunto de 400, 10K ou até 160K filamentos paralelos)
- **Linha:** é um fio torcido
- **Mecha:** conjunto de *strands* em paralelo
- **Fita:** fios ou linhas, colocados lado a lado temporariamente numa película ou costurados

Principais Precursores

- Rayon
- Piche
- Poliacrilonitrila



Compósitos Reforçados por Fibras de Carbono

Vantagens

- As fibras de carbono tem o módulo específico e a resistência mecânica específica mais alta de todos os materiais de reforço fibrosos.
- Elas mantêm seu alto módulo de tensão e alta resistência mecânica em elevadas temperaturas; entretanto, oxidação a alta temperatura pode ser um problema.
- À temperatura ambiente as fibras de carbono não são afetadas pela umidade ou por uma variedade de solventes, ácidos e bases.
- Essas fibras exibem uma diversidade de características físicas e mecânicas, permitindo que os compósitos que incorporam essas fibras tenham propriedades específicas projetadas.
- Processos de fabricação de fibras e compósitos têm sido desenvolvidos de tal forma que sejam relativamente baratos e efetivos em termos de custo.

Precursos de Fibras de Carbono

- Rayon
- Poliacrilonitrila
- Piche

Aplicações dos Compósitos com Fibras de Carbono

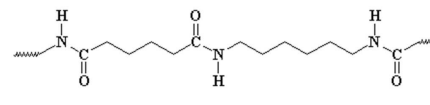
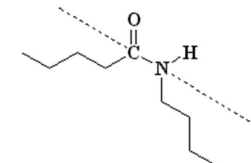
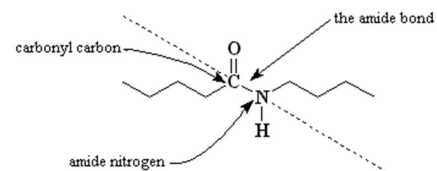
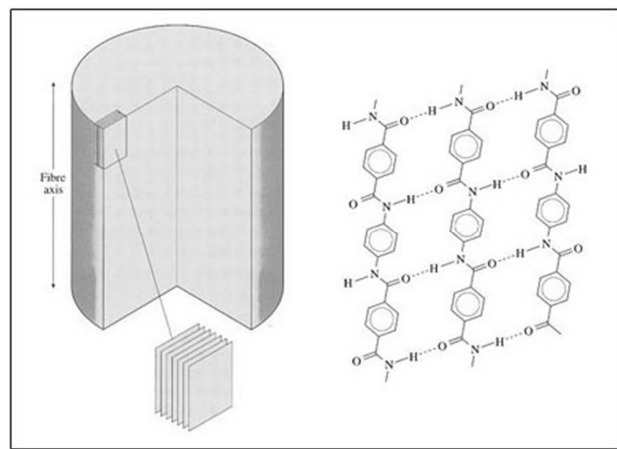
- Equipamentos esportivos (tacos de golfe, raquetes)
- Equipamentos de lazer (varas de pescar)
- Carcaças de motor de foguete
- Vasos de pressão
- Componentes estruturais de avião.

Compósitos Reforçados por Fibras de Aramida

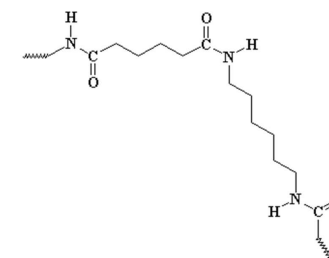
Características das Fibras de Aramida

- Resistência mecânica maior que a de outros polímeros usados como fibras.
- Relativamente fracas frente à compressão.
- São resistentes à combustão e estáveis a temperaturas relativamente altas.
- Ampla faixa de trabalho (-200 a + 200 °C)
- Suscetíveis à hidrólise, mas relativamente inertes a outros solventes e reagentes químicos.
- Podem ser processadas pela maioria das operações usadas para tecidos.

Estrutura típica das Aramidas

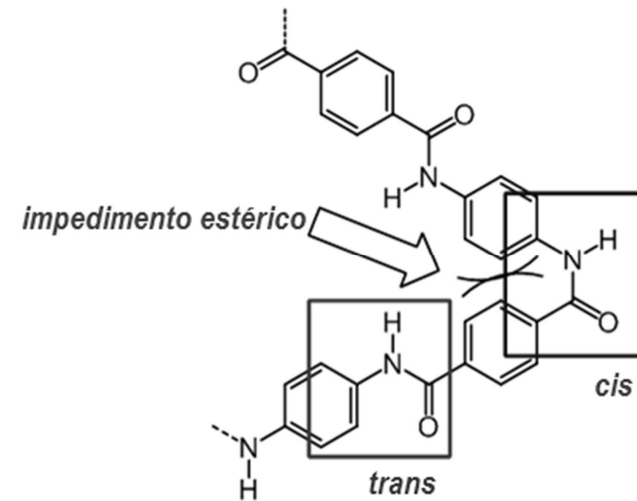
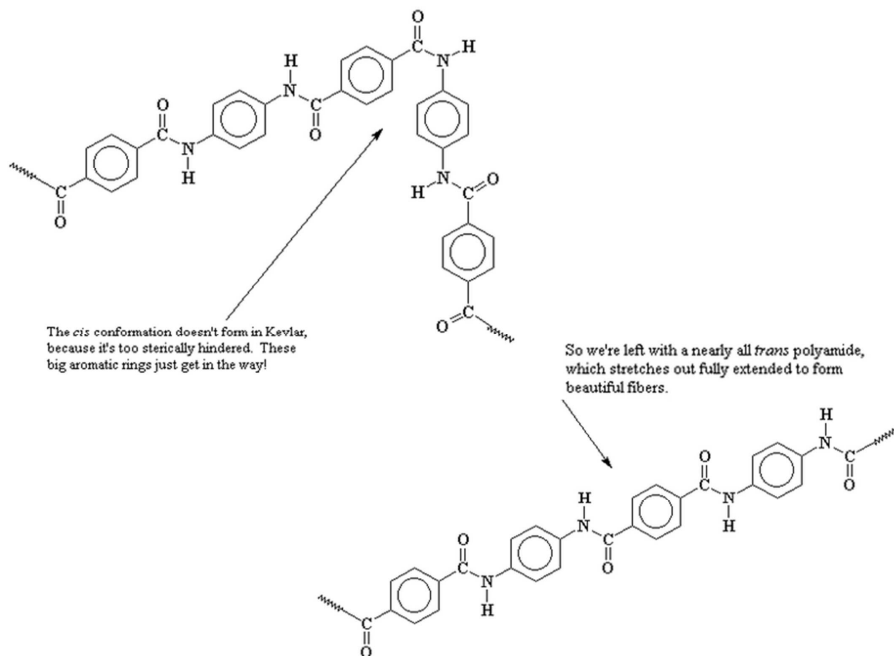


Nylon 6,6 can stretch into fibers easily when all the amide groups are in the *trans* conformation...



...but one *cis* linkage causes a kink which messes everything up!

Os exemplos comerciais mais comuns são Kevlar (29, 49 e 149) e Nomex.



Propriedades Típicas de Alguns Compósitos com Resina Epóxi, (65% Fibra + 35% Matriz)

Fibras	Propriedades				
	Densidade, ρ (g/cm ³)	Módulo de tração, E (GPa)	Resistência a tração, σ^* (MPa)	E/ρ $\times 10^3$	σ^*/ρ $\times 10^3$
Carbono (alto módulo)	1,7	222	1630	133	977
Carbono (alta resistência)	1,6	151	2080	93	1284
Kevlar 49	1,4	82	1820	65	1300
Vidro (Tipo E)	2,1	50	1086	24	515
Vidro (Tipo S)	2,1	57	1358	27	644
Boro	2,1	207	2210	97	1030
Polietileno	0,97	77	1700	79	1753
Alguns metais para comparação					
Aço comum	7,9	210	450	27	57
Liga de alumínio	2,8	70	450	25	161
Titânio	4,5	110	960	24	213

Aplicações dos Compósitos com Fibras de Aramida

- Produtos de balística (coletes à prova de bala)
- Equipamentos esportivos
- Pneus
- Cordas
- Carcaças de mísseis
- Vasos de pressão
- Forragem de freios automotivos e embreagens
- Gaxetas.

A Fase Matriz

A matriz de um compósito desempenha diversas funções:

- Mantém as fibras unidas (entre si) e constitui o meio de transmissão da tensão aplicada para elas.
- O material deve ser dúctil e apresentar módulo elástico muito menor que o da fibra.
- Protege as fibras individuais contra danos superficiais, resultantes de abrasão mecânica ou reações químicas com o ambiente.
- Separa as fibras e impede a propagação de trincas frágeis de uma fibra para outra.

Principais polímeros utilizados como matriz em compósito:

- Poliésteres insaturados (mais utilizadas)
- Resinas epóxi (mais caras)
- Poliimidas (para aplicações a alta temperatura)
- Resinas fenólicas
- Termoplásticos (PA, PEEK, PPS e PEI)

Diferentes tipos de Resinas usadas como Matriz em Compósitos

Termoplásticos	Termofixos
Polipropileno	Resinas fenólicas
Nylon (Poliamida)	Poliésteres
Poli(éter imida) (PEI)	Poliimidas
Poli(éter sulfona) (PES)	Resinas Epóxi
Poli(éter éter cetona) (PEEK)	Resinas de Bismaleimida (BMI)

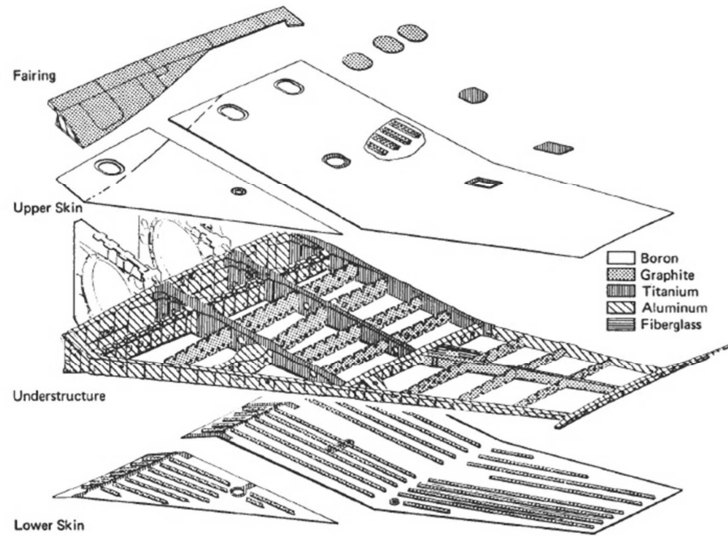
Principais Diferenças entre Termoplásticos e Termofixos

Termoplásticos	Termofixos
Custo da resina é relativamente alto.	Custo da resina é baixo.
Baixo grau de encolhimento.	Encolhimento moderado.
Tenacidade a fratura interlaminar é alta.	Tenacidade a fratura interlaminar é baixa.
Apresentam pouca resistência a fluidos e solventes.	Apresentam boa resistência a fluidos e solventes.
Propriedades mecânicas dos compósitos são boas.	Propriedades mecânicas dos compósitos são boas.
Características do <i>prepreg</i> são pobres.	Características do <i>prepreg</i> são excelentes.
Tempo de prateleira do <i>prepreg</i> excelente.	Tempo de prateleira do <i>prepreg</i> baixo.

Propriedades Típicas de Algumas Matrizes

Matriz	Densidade, ρ (g/cm ³)	Módulo de tração, E (GPa)	Resistência a tração, σ^* (MPa)
Resinas Epóxi	1,30	2,4	60
Resina Poliéster	1,28	3,0	55
PEEK	1,39	4,0	90

Aplicações de Compósitos na Indústria de Aviação



Tecnologia dos Materiais Poliméricos e Compósitos – RED104 – Prof. Cláudio Gouvêa dos Santos

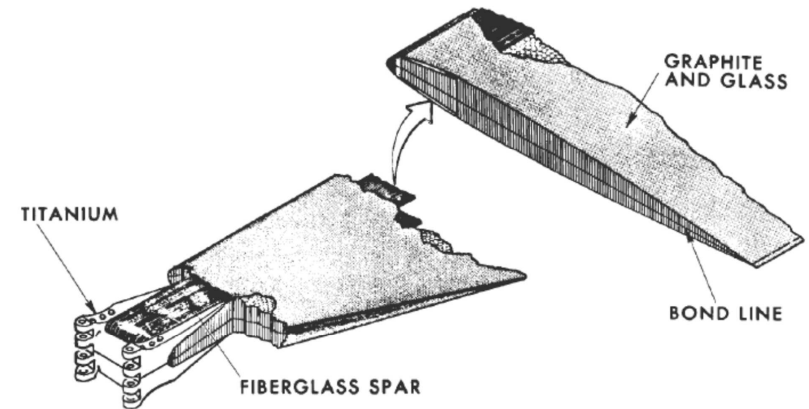
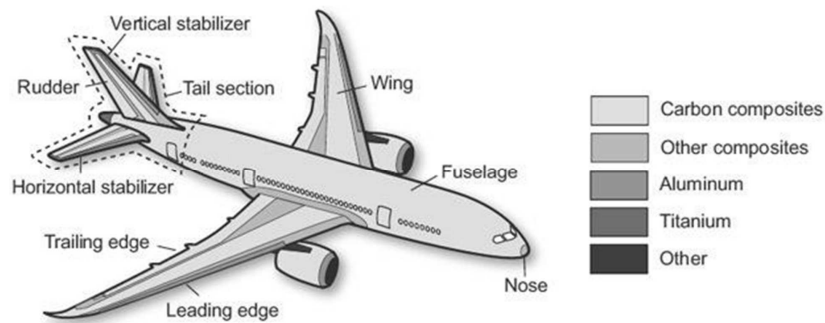
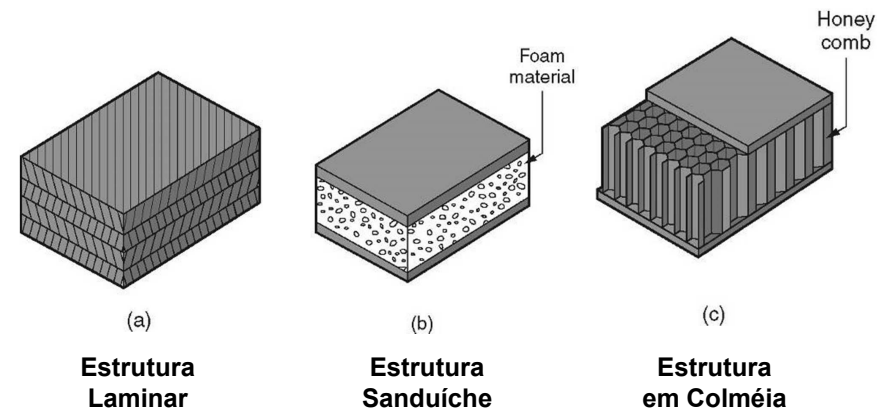


Figure 1 Twin Beam Composite Blade for XBR™ Helicopter Rotor System [Salkind, *New Composite Helicopter Rotor Concepts*]



Boeing 777	Boeing 787/ Dreamliner
11% de Compósitos	50% de Compósitos
70% de Alumínio	20% de Alumínio
7% de Titânio	15% de Titânio
11% de Ac	10% de Ac
1% de Outros Materiais	5% de Outros Materiais
Resultado: 20% mais econômico e 16 toneladas mais leve.	

COMPÓSITOS ESTRUTURAIS



(a)
Estrutura Laminar

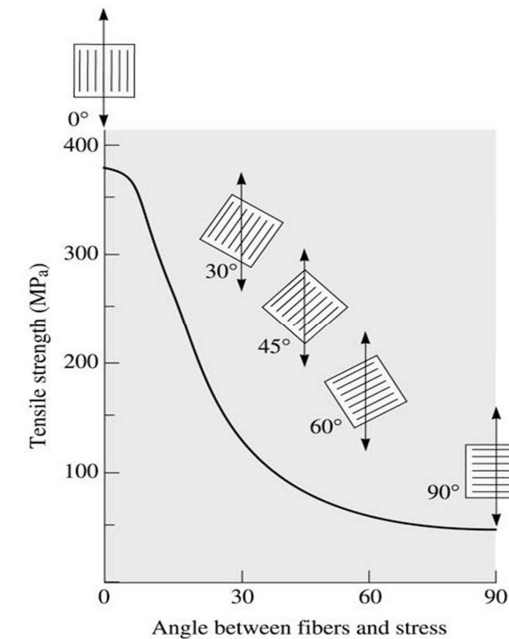
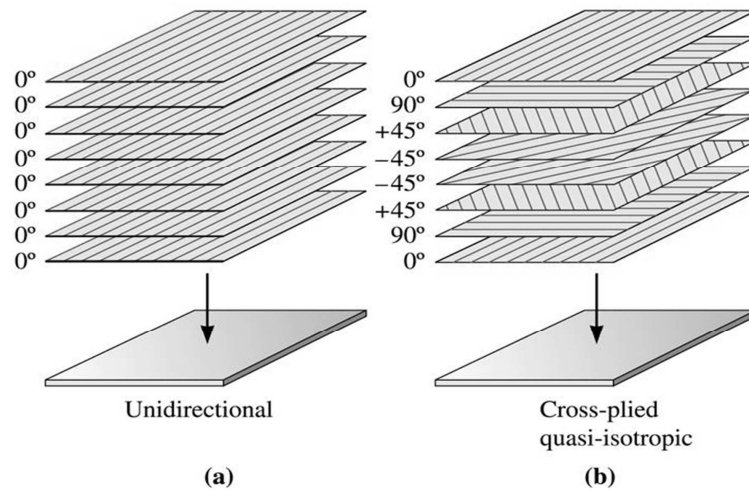
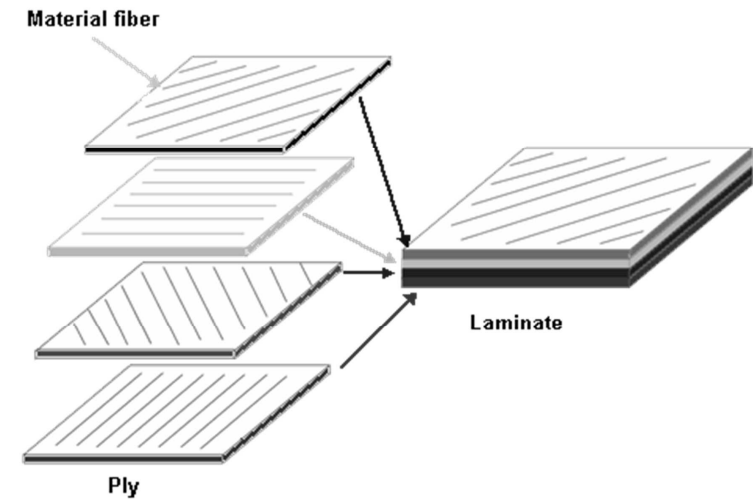
(b)
Estrutura Sanduíche

(c)
Estrutura em Colméia

Características dos Compósitos Estruturais

- Constituídos de folhas ou painéis (lâminas) que apresentam um resistência mecânica melhor em uma determinada direção.
- As camadas são empilhadas e subsequentemente coladas de modo que a orientação da direção de maior resistência mecânica varie a cada camada sucessiva.
- Pode ser montado utilizando também tecido (algodão, papel, laminados, etc).
- Em consequência de sua estrutura, apresenta uma resistência mecânica relativamente alta em várias direções do plano bidimensional.

Montagem de uma Estrutura Laminar



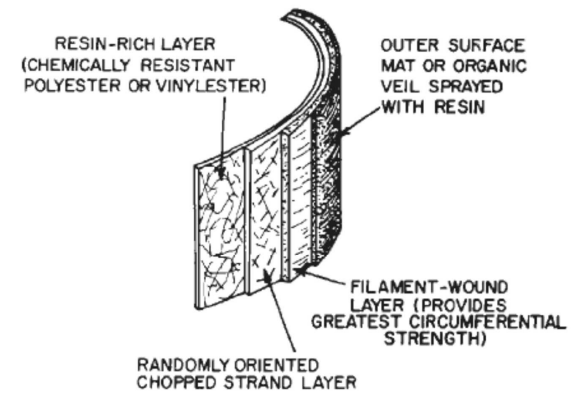
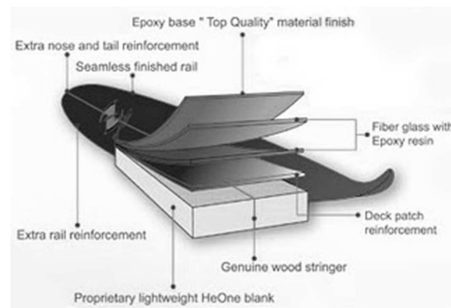


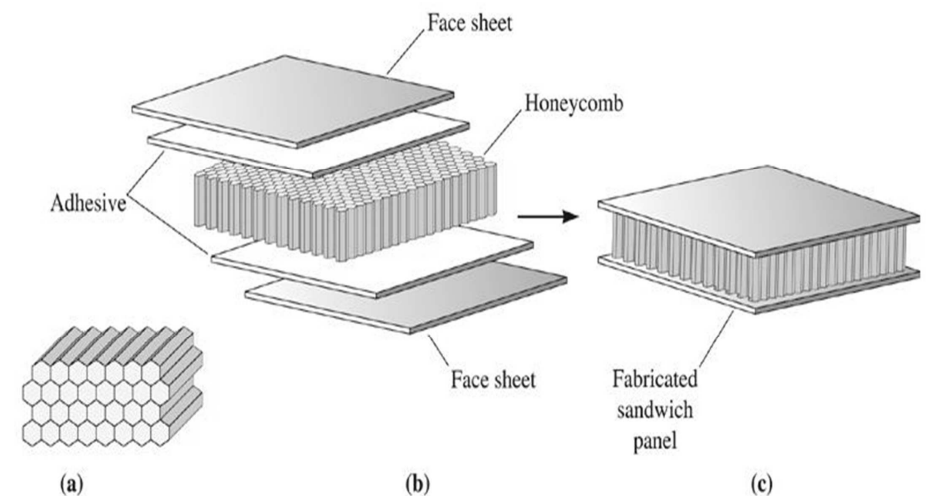
Figure Cross-Sectional View of Standard Vertical Tank Wall Laminate [Cheremisinoff, *Fiberglass-Reinforced Plastics Deskbook*]



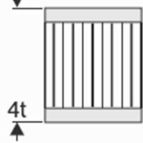
PAINÉIS SANDUÍCHE

Características

- Constituídos por duas fortes folhas externas (faces) separadas por uma camada de material menos denso (núcleo), de menor rigidez e menor resistência mecânica.
- As faces suportam a maior parte do carregamento no plano e também quaisquer tensões de flexão transversais.
- O núcleo separa as faces, resistindo às deformações perpendiculares ao plano da face, e também fornece um certo grau de rigidez cisalhante ao longo dos planos perpendiculares às faces.
- Materiais típicos utilizados como face: alumínio, plásticos reforçados, titânio, aço e madeira compensada.
- Materiais típicos utilizados como núcleo: espumas, borrachas sintéticas, cimentos inorgânicos, balsa e estruturas em colméia (*honeycomb*)

Montagem de uma Estrutura em Colméia



	Solid Material	Core Thickness t	Core Thickness $3t$
			
Stiffness	1.0	7.0	37.0
Flexural Strength	1.0	3.5	9.2
Weight	1.0	1.03	1.06

