

Materiais compósitos

Compósitos de base polimérica

Workshop SOCEM

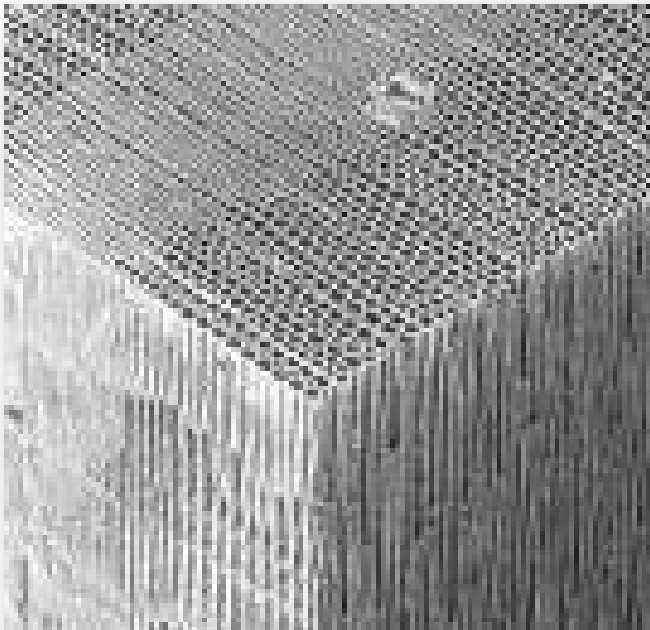
O que é um compósito?

- Um **compósito** é um material que abarca duas ou mais fases distintas e separadas, combinadas de modo a garantirem um bom desempenho mecânico de todo o conjunto;
- A optimização das suas propriedades resulta da combinação dum material de reforço, normalmente **fibras** com alinhamentos intencionais ou filamentos de orientação aleatória, cuja agregação está garantida por um outro material de suporte a que chamamos **matriz**.
- As propriedades mecânicas globais do compósito são ditadas, em regra, pela contribuição de cada um dos seus constituintes, atendendo às suas propriedades correspondentes e fracção volumétrica no conjunto.
- Os compósitos são materiais multifuncionais com propriedades mecânicas e físicas optimizadas e que podem ser adequadas aos requisitos específicos de uma dada aplicação (*tailor-made*)
- Possibilitam ao projectista soluções de projecto que não seriam possíveis de concretizar com o uso de materiais mais convencionais;

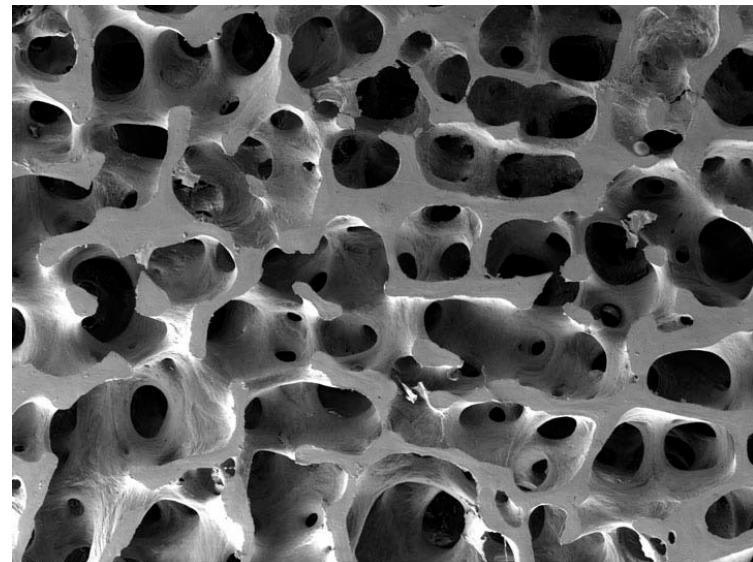
Compósitos: replicando a natureza

- Na natureza, existem alguns exemplos de estruturas biológicas com características de materiais compósitos:
 - **Madeira:** material compósito, heterogêneo e anisotrópico, com base em fibras naturais à base de celulose (40%-50%), e matriz composta por lignina (15%-30%) e hemicelulose (15%-25%)
 - **Ossos:** constituídos por uma fase dura e frágil (hidroxiapatite) e outra de características mais dúcteis (à base de colagénio);

Microestrutura da madeira:



Microestrutura de um osso humano:



SEM MAG: 60 x
HV: 10.0 kV
VAC: HiVac

DET: SE Detector
DATE: 01/21/04
Device: TS5130MM

2 mm

Vega ©Tescan
Digital Microscopy Imaging

Compósitos: comparação com outros materiais

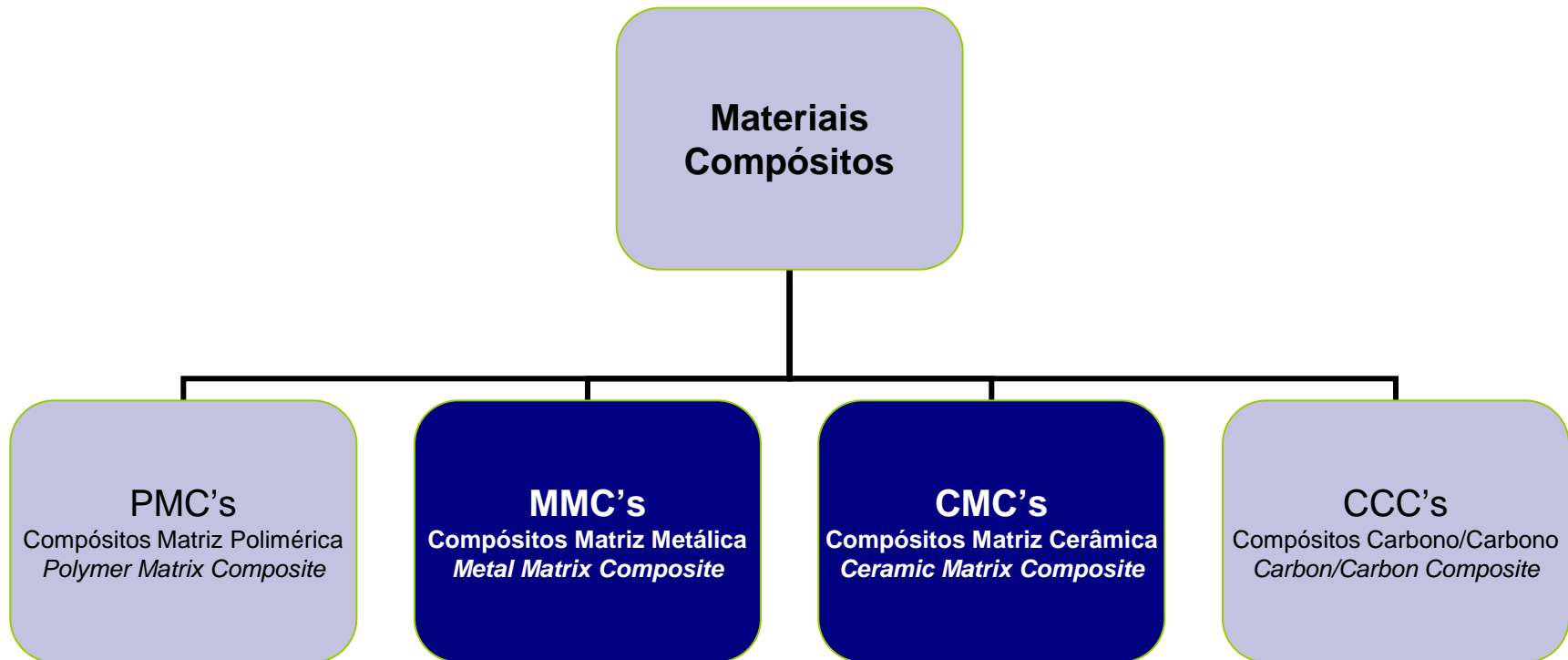
Valores de referência para vários materiais		Madeira pinho	Dura-alumínio	Titânio (TiAl ₁₆ Va ₄)	Aço	GFRP	CFRP
Densidade	g/cm ³	0.5	2.8	4.5	7.8	2.1	1.5 - 1.7
Resistência a tração	MPa	100	350	800	1100	720	900* 3400**
E-Modulus	MPa	12000	75000	110000	210000	30000	88000* 235000**
Resistência específica (à ruptura)	MPa	20	13	18	14	34	60* 200**
Módulo de elasticidade específico.	MPa	2400	2700	2400	2700	1400	5900* 13800**

* Laminado quasi-isotropico ⇒ mesma resistência em todas as direcções

** Laminado anisotropico (80 Vol-% fibras) ⇒ maior resistência na direcção das fibras

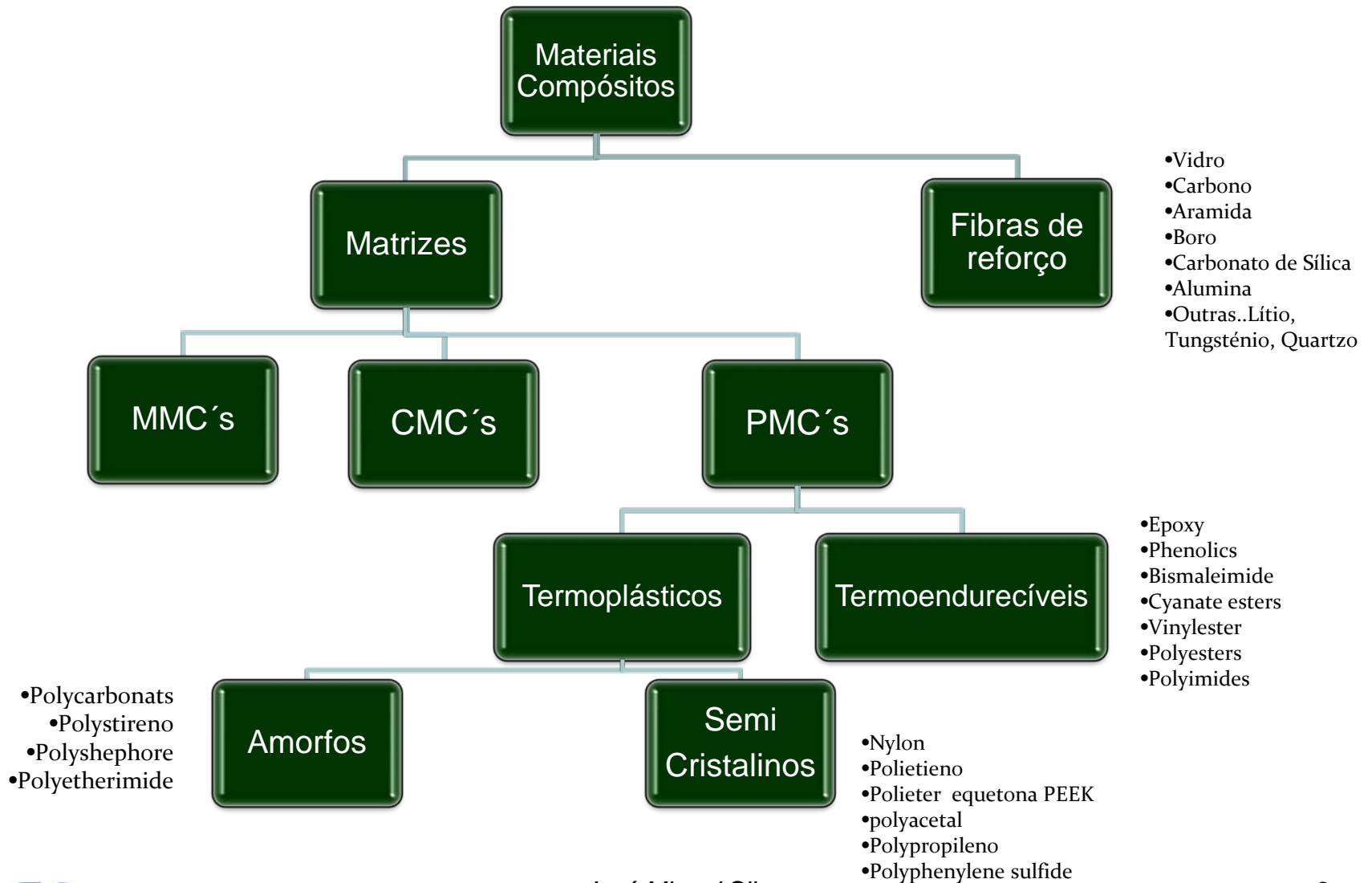
Tipos de compósitos

- Os compósitos são classificados, normalmente, atendendo ao tipo de material usado como matriz. Consideram-se, habitualmente, as seguintes quatro categorias:



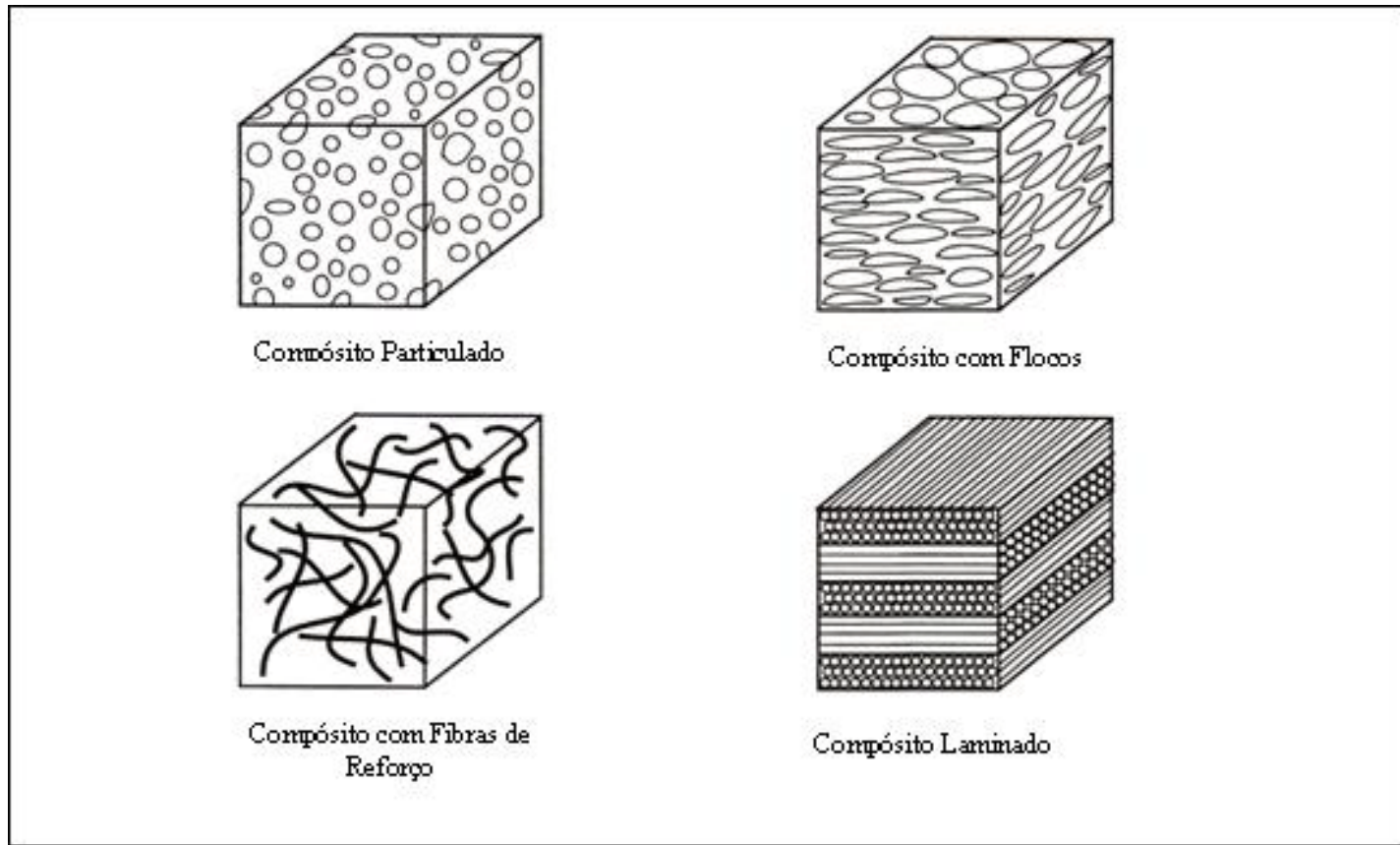
Atendendo à sua importância para as estruturas aeroespaciais, focaremos doravante a nossa atenção nos PMC's.

Tipos de compósitos

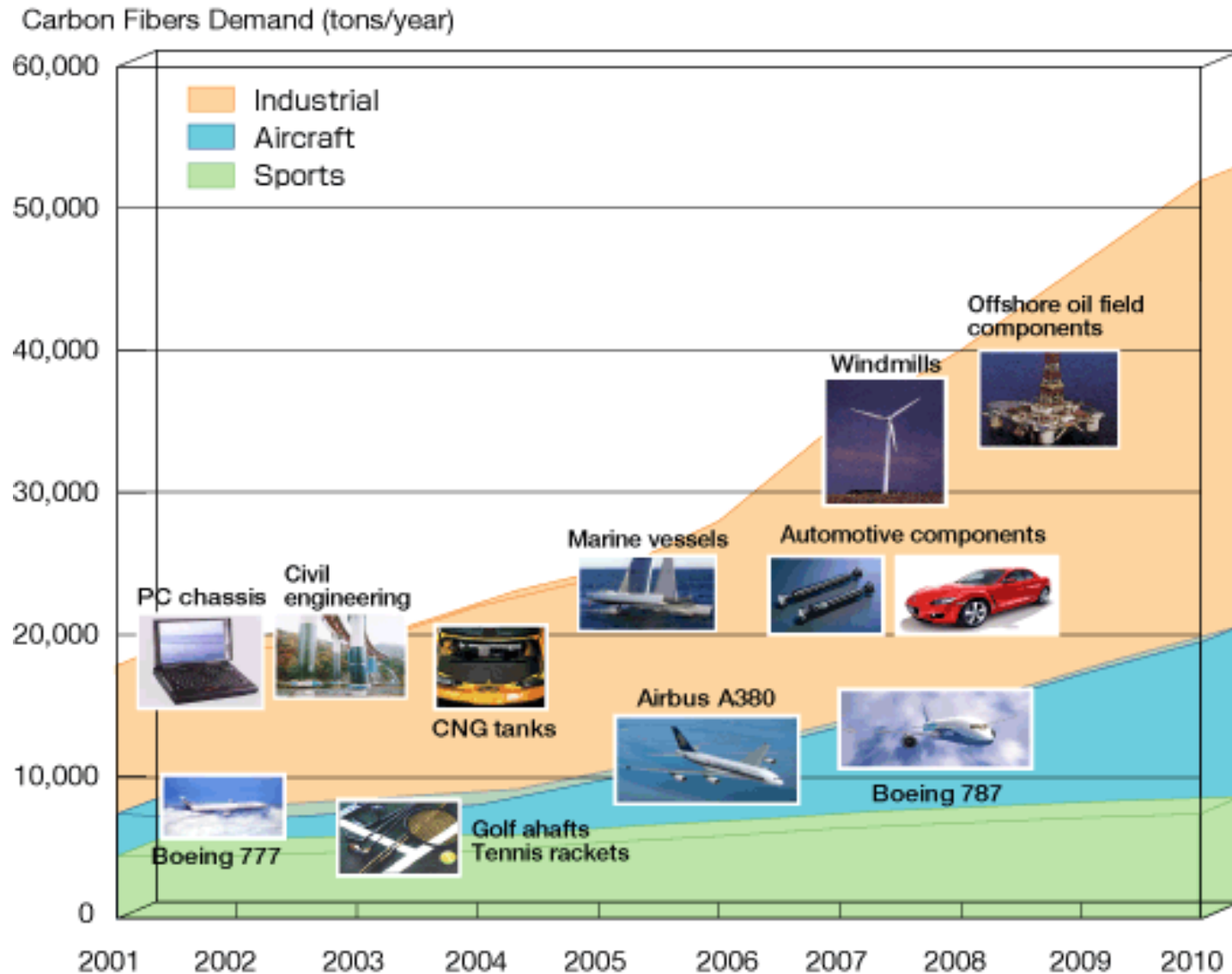


Tipos de compósitos

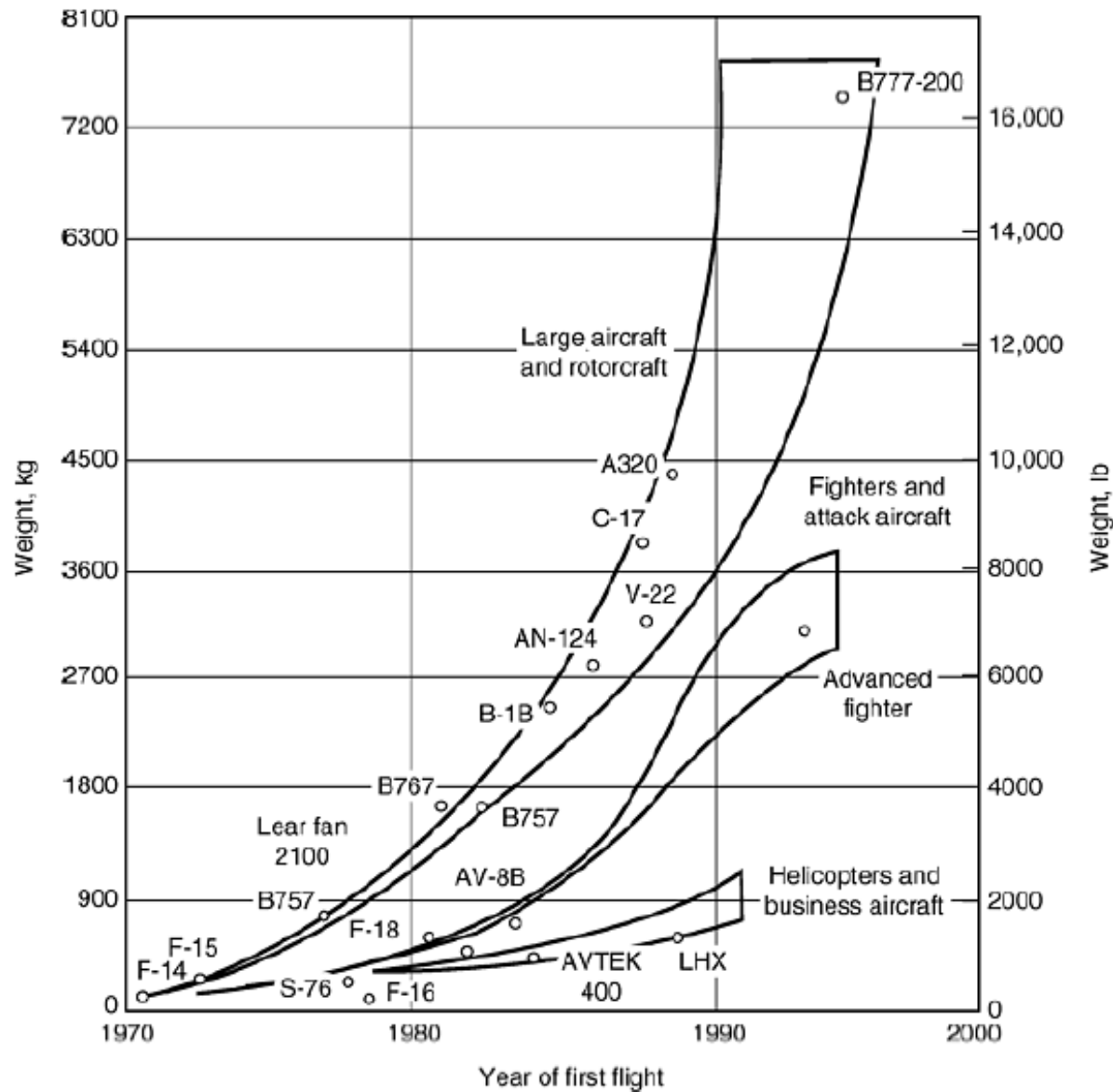
- A figura mostra alguns dos tipos mais comuns de compósitos com diferentes formas dos seus constituintes



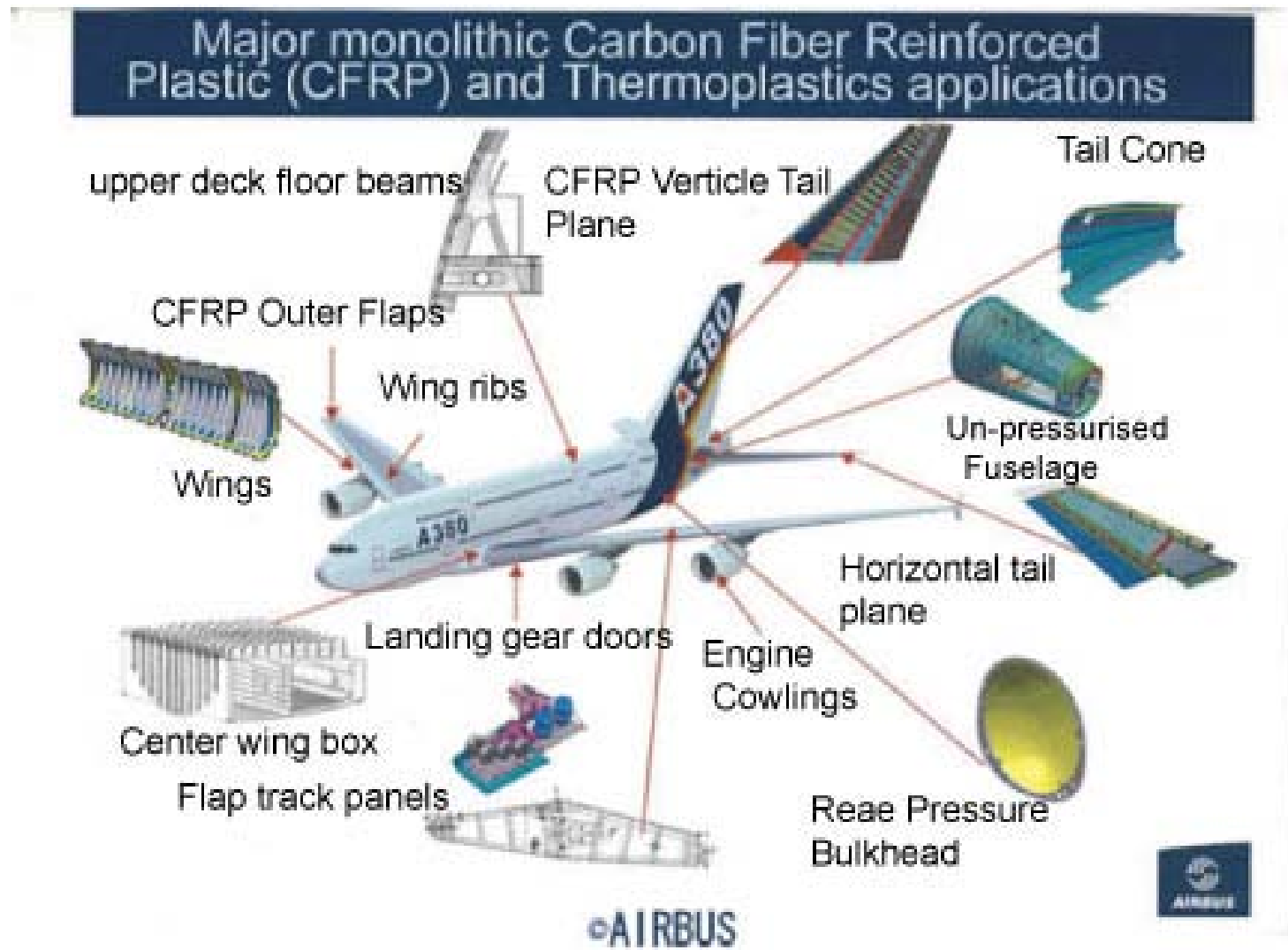
Evolução cronológica: utilização de fibras de carbono



Evolução cronológica: aplicação na indústria aeronáutica

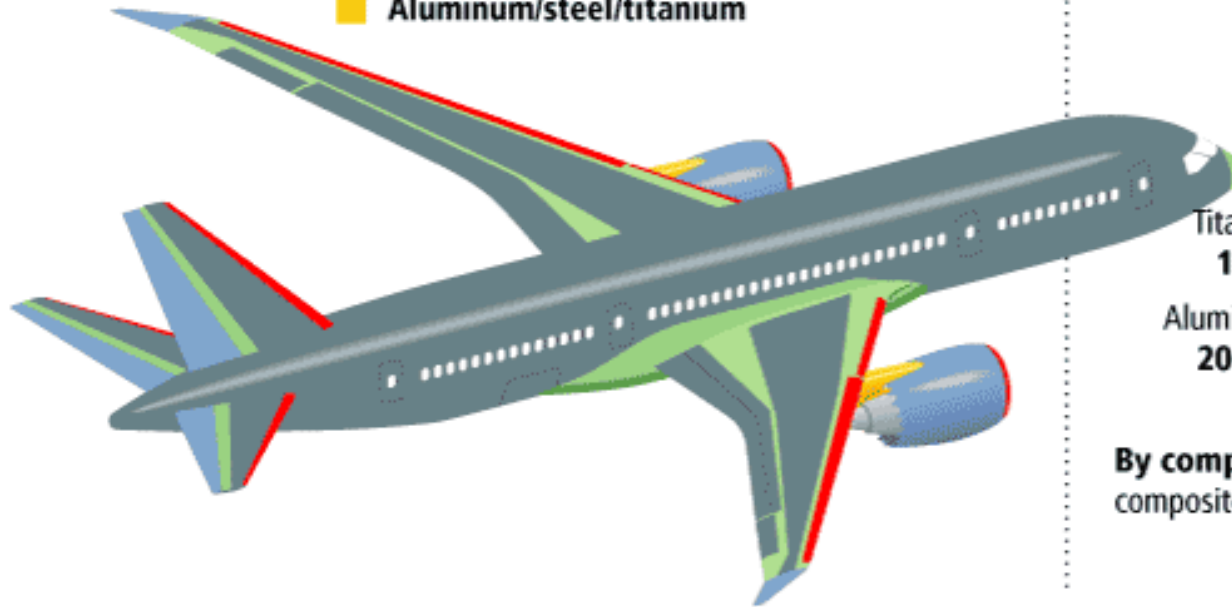


Exemplos de aplicação na indústria aeronáutica

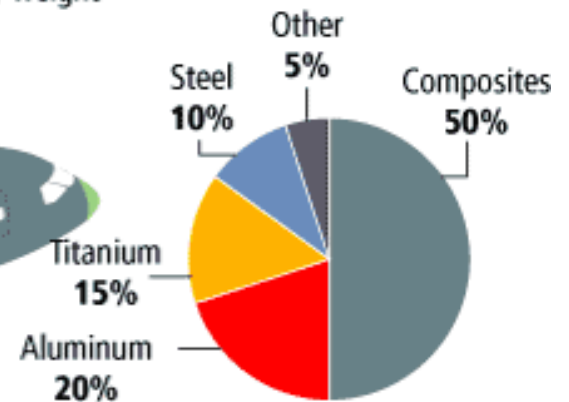


Exemplos de aplicação na indústria aeronáutica

Materials used in 787 body

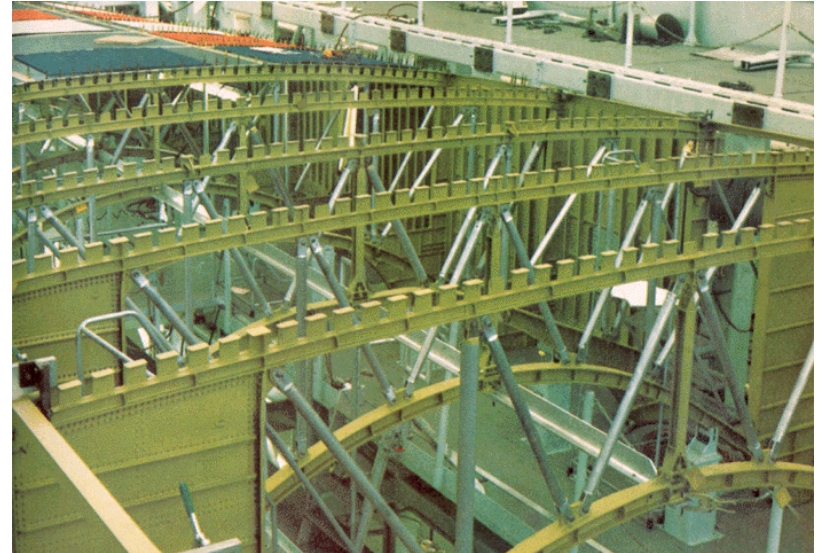


Total materials used By weight



By comparison, the 777 uses 12 percent composites and 50 percent aluminum.

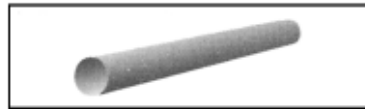
Exemplos de aplicação na indústria aeronáutica



- Estrutura da fuselagem do *Space Shuttle*:
 - Utilização de componentes tubulares, de alumínio reforçado com fibras de boro contínuas, na fuselagem e no trem de aterragem.
 - A utilização destes componentes permitiu reduzir 45% do peso no projecto feito com base em alumínio.

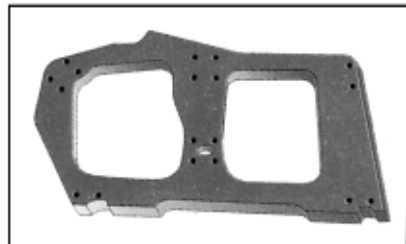
Exemplos de aplicação na indústria aeronáutica

Satellite Components



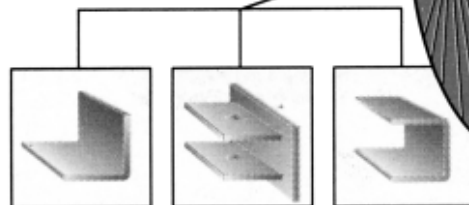
Carbon Fiber Tubing

- Carbon Fiber / Epoxy or Cyanate Ester
- High Tolerance ID and OD



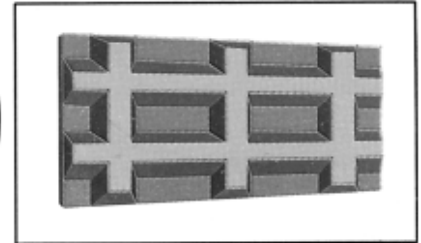
Shear Panels

- Carbon Fiber and Aluminum Skins
- Aluminum Honeycomb Core



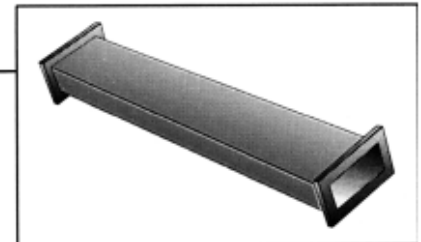
Brackets / Fittings

- Carbon Fiber / Epoxy or Cyanate Ester
- Kevlar / Epoxy



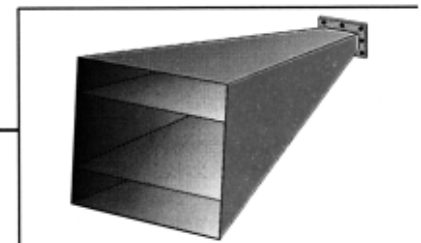
Integrally Stiffened Bus Panel

- Carbon Fiber / PEEK
- Coconsolidated using Caremold Washout Tooling



Wave Guide

- Carbon Fiber / PEI
- Silver Plated



Feed Horn Antenna

- Carbon Fiber / PEI
- Silver Plated

PMC's: vantagens e desvantagens

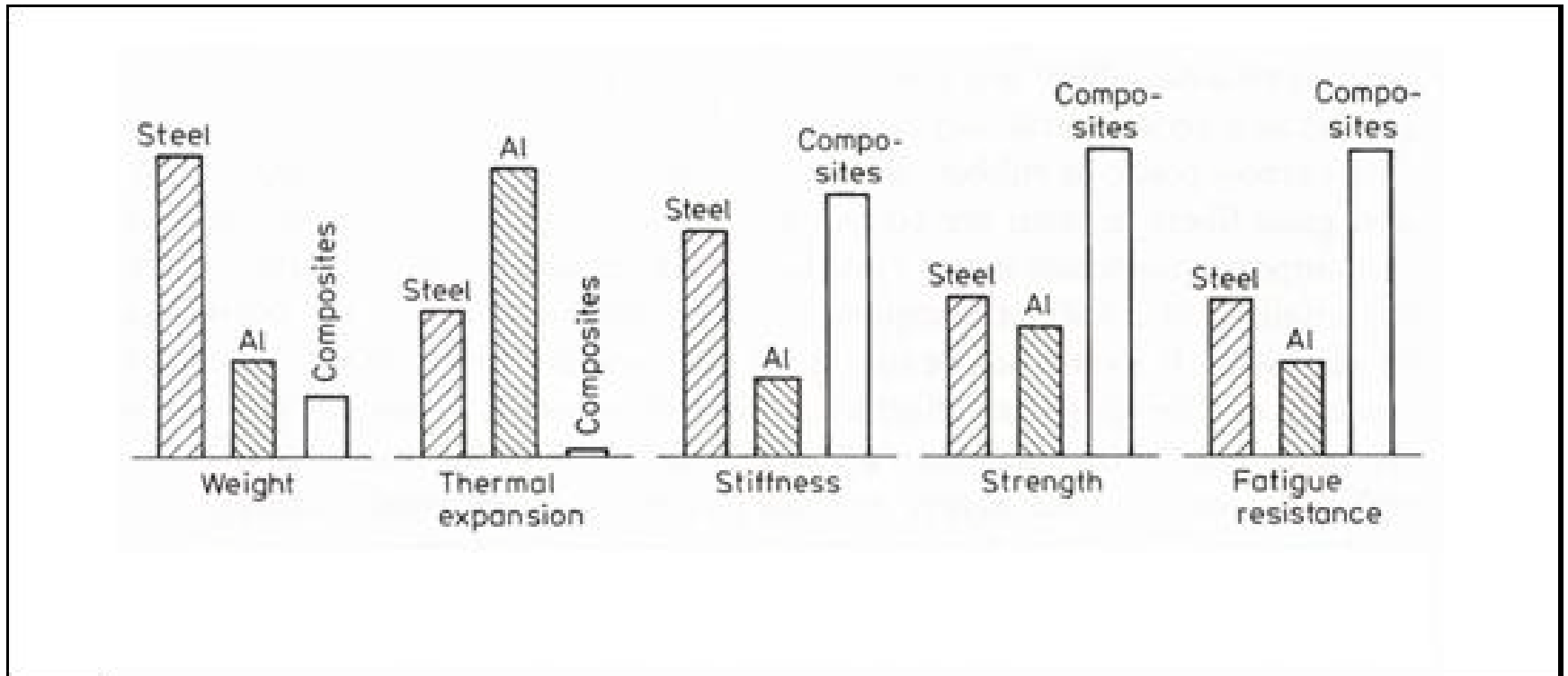
Vantagens

- Maior resistência específica em relação aos metais convencionais, incluindo o alumínio;
- Capacidade de definição de direcções trabalhantes preferenciais;
- Boa resistência à corrosão;
- Excelente resistência à fadiga;
- Boa estabilidade dimensional;
- Capacidade de produção de estruturas complexas;
- Boa resistência à fadiga;

Desvantagens

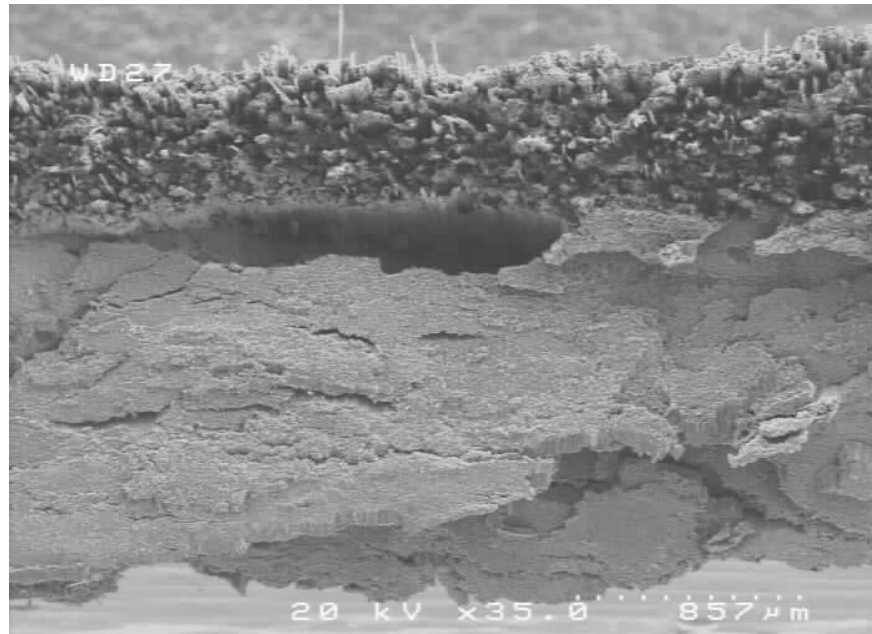
- Temperaturas de serviço limitadas;
- Alguma susceptibilidade à absorção de humidade nalguns ambientes;
- Menor produtividade dos processos de fabrico associados;
- Custo elevado;
- Resiliência limitada;
- Materiais complexos, com algum nível de heterogeneidade e anisotrópicos

PMC's: comparação com outros materiais

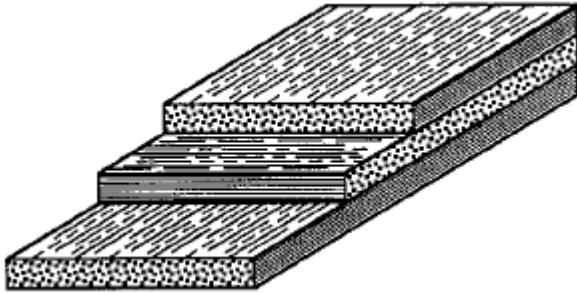


Fibras de reforço

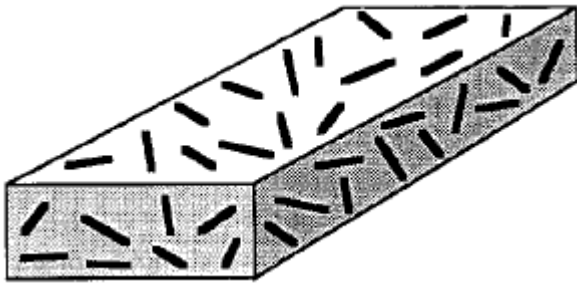
- Funções principais das **fibras** de reforço num compósito:
 - Suportar carregamentos (tipicamente entre 70% a 90%) impostos ao componente;
 - Garantir rigidez, resistência, estabilidade térmica e outras propriedades físicas (e.g., condutibilidade eléctrica)



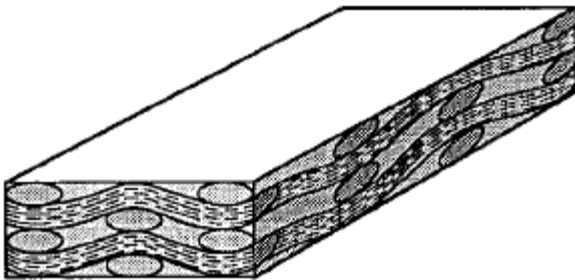
Fibras de reforço: tipos de arranjos



Fibras contínuas: tipicamente utilizadas em compósitos laminados, pultrudidos/extrudidos, bobinagem filamentar...

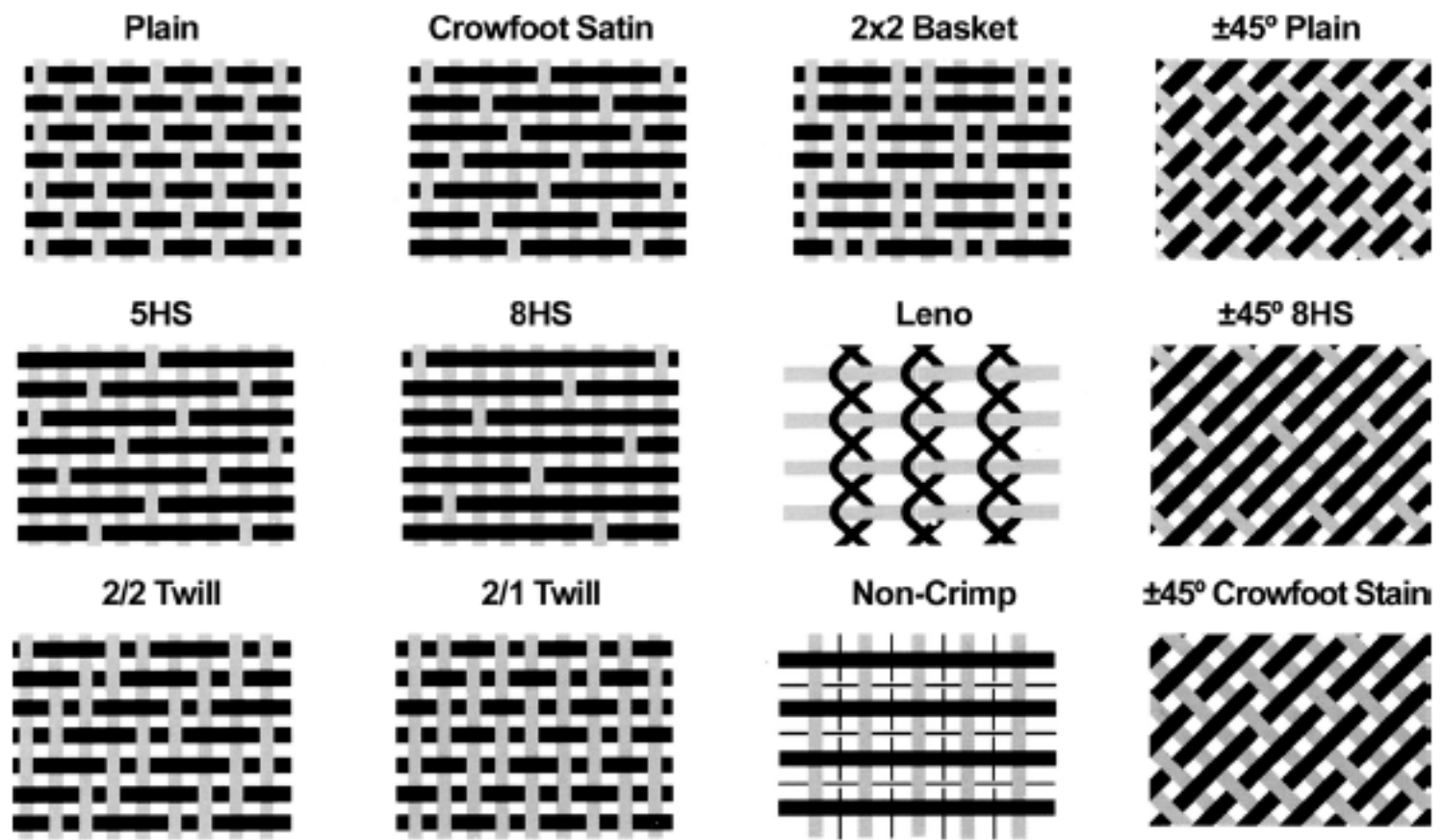


Fibras descontínuas: recorrem a fibras curtas, whiskers (ou até partículas) para reforço de matriz; as fibras estão orientadas aleatoriamente



Tecidos: as fibras são tecidas em diferentes arranjos espaciais (2D ou 3D); muito utilizado no processo de handlayup

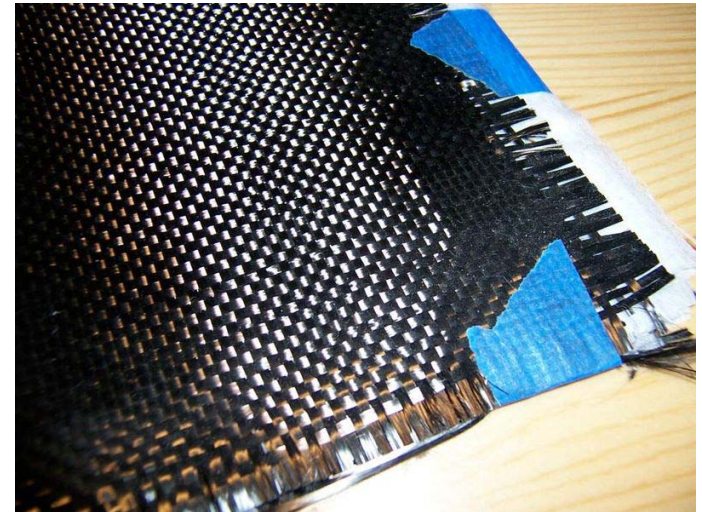
Fibras de reforço: tipos de tecidos



Tipos de fibras de reforço

- **Fibras de Carbono**

- Tipo de fibra mais utilizado nos materiais compósitos na indústria aeronáutica;
- Permite reforçar polímeros, metais, cerâmicas e também carbono.
- Permite obter uma elevada razão resistência-peso do material.
- Elevada resistência à tracção.
- Baixa densidade.
- Baixo coeficiente de expansão térmica.
- São vários os tipos de fibra de carbono.
- Podem ser obtidas por duas vias:
 - Poliacrilonitrilo: (PAN)
 - À base de *pitch*



Tipos de fibras de reforço

- **Fibras de Carbono**

- **PAN**

- (SM) – Standard Modulus
 - (UHS) – Ultrahigh Strength (*Resistência à Tracção $\approx 7 \text{ GPa}$*)
 - (UHM) – Ultrahigh Modulus (*Módulo Axial $\approx 590 \text{ GPa}$*)

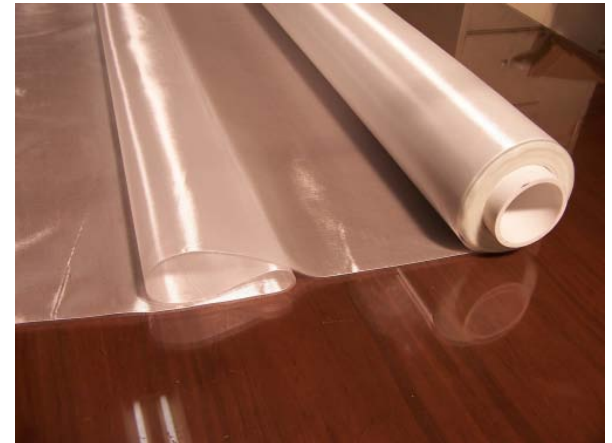
- **Pitch**

- obtêm-se módulos de Young axiais superiores aos das fibras sintetizadas a partir de PAN (*$> 895 \text{ GPa}$*)
 - (UHK) – Elevada Condutividade Térmica Axial (*$\approx 1100 \text{ W/m} \cdot \text{K}$*)
 - quando comparadas com as PAN, apresentam uma baixa resistência à tracção e corte, e muito baixa resistência à compressão

Tipos de fibras de reforço

- **Fibras de Vidro**

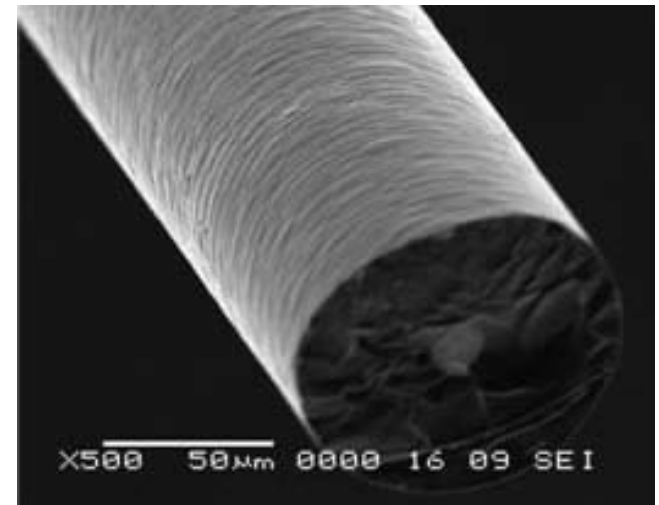
- Têm baixo módulo de elasticidade, comparativamente a outras fibras, o que propicia a ocorrência de fluência;
- São bons isolantes, pois apresentam baixa condutividade térmica e eléctrica
- Têm um baixo coeficiente de expansão térmica (CTE), comparativamente a metais
- Boa resistência e baixo custo
- Resistência à fadiga moderada
- Existem dois tipos principais:
 - E-Glass: mais barata; mais usada; menor resistência
 - HS-Glass: maior rigidez e resistência; mais cara



Tipos de fibras de reforço

- **Fibras de Boro**

- Produzidas em filamentos singulares (monofilamentos) por deposição de vapor químico de boro num “arame” de tungsténio ou num filamento de carbono;
- Utilizadas para reforçar polímeros e metais;
- Possuem diâmetros relativamente largos entre 100-140 μ m, comparando com a maioria dos outros reforços;
- As suas propriedades são afectadas pela razão entre o diâmetro total da fibra e o diâmetro do núcleo.
- Comparativamente às fibras de vidro, tem uma rigidez cerca de 5 a 6 vezes superior;
- Menor densidade que a fibra de carbono;
- Custo muito elevado;



Tipos de fibras de reforço

- **Fibras de aramida**

- A aramida é formada por uma longa cadeia de poliamida sintética onde 85% das ligações do grupo amida estão ligadas a dois anéis aromáticos;
- Relação peso/propriedades elevada
- Alta resistência ao calor
- Alta tenacidade
- Elevado módulo de Young
- Baixa fluência e alongamento à rotura
- Sensível à radiação ultravioleta e a ácidos
- Custo elevado
- Existem dois tipos principais:
 - Meta-aramida;
 - Para-aramida (mais cara)

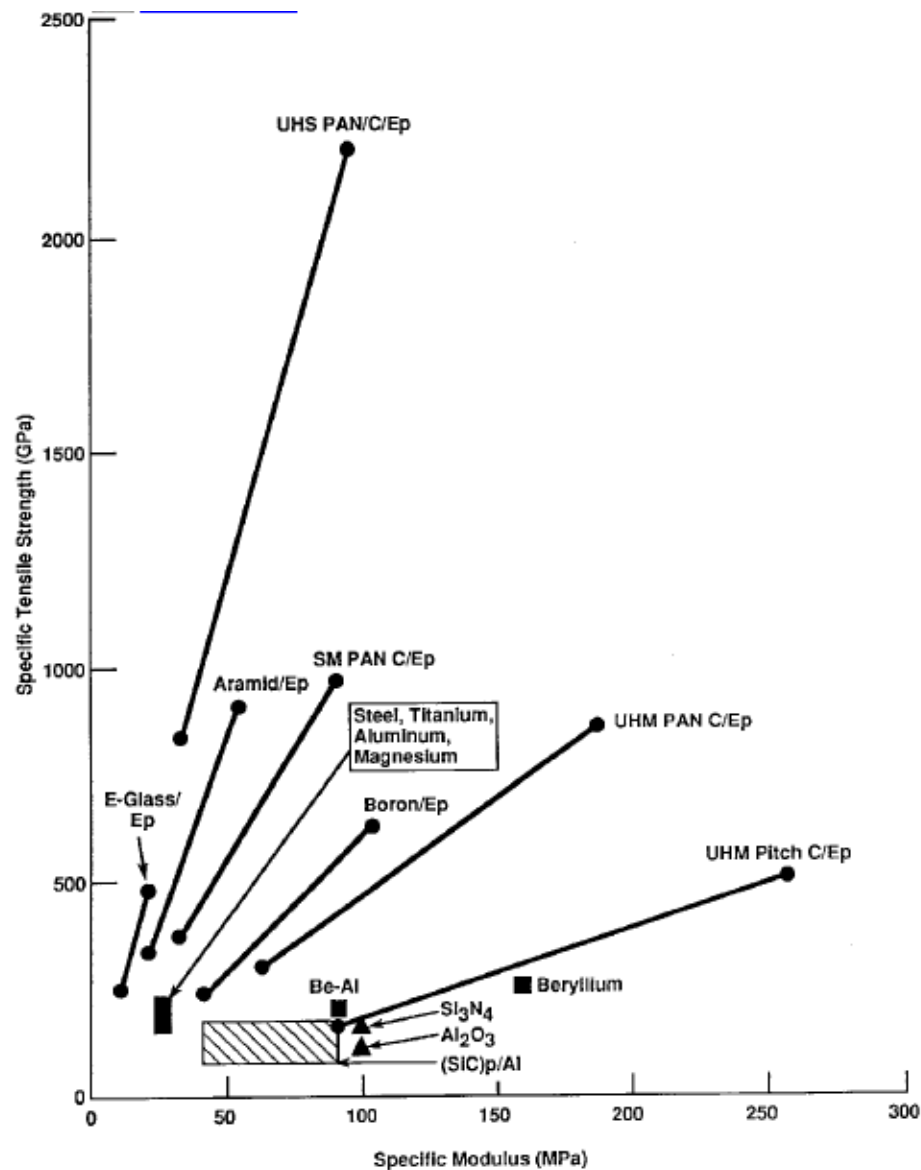


Tipos de fibras de reforço

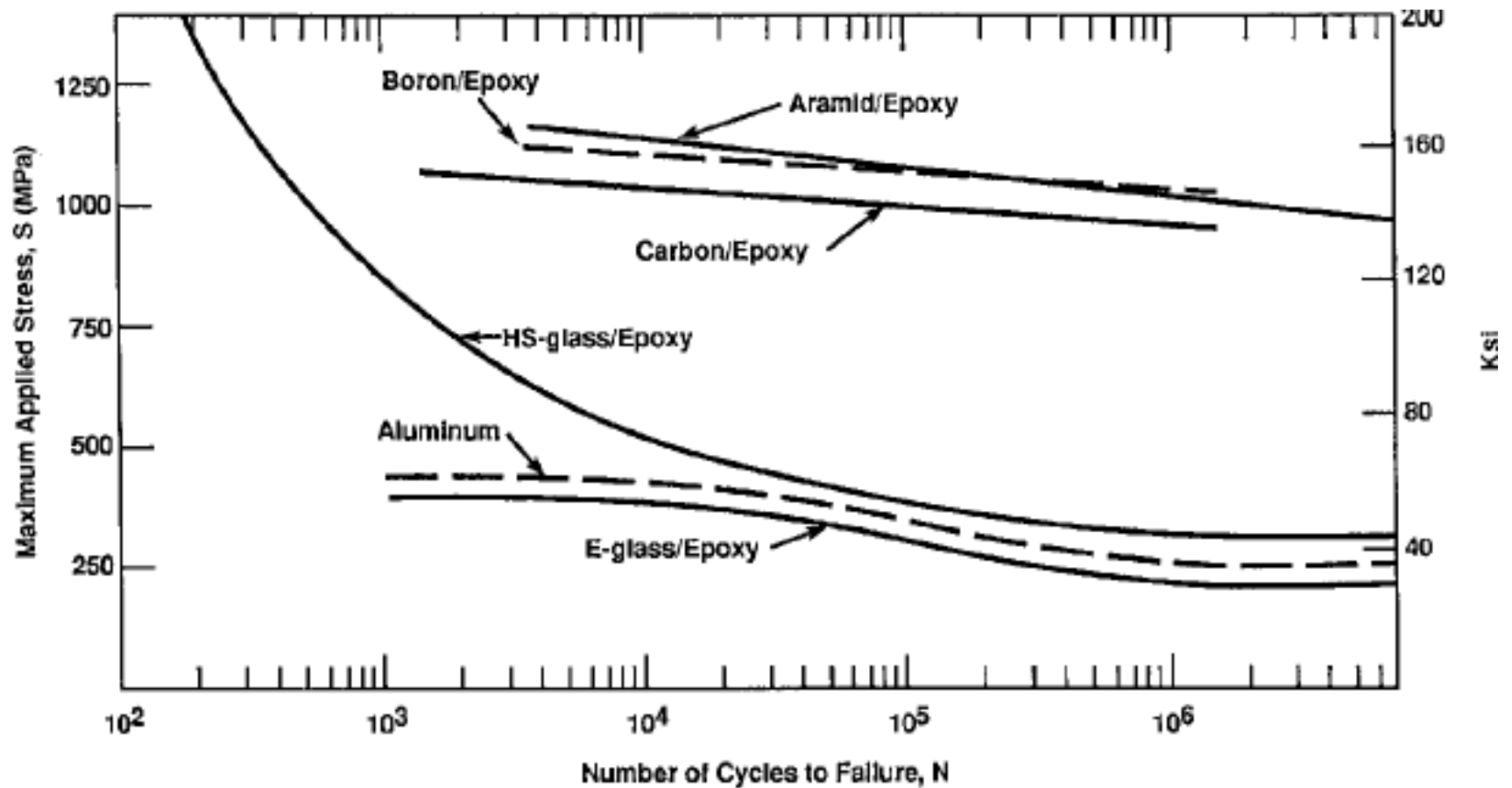
Comparação entre principais propriedades mecânicas

Fibra	Densidade [g/cm ³]	Modulo Axial [GPa]	Resistência à Tracção [MPa]	CTE [ppm/K]	Condutividade Térmica Axial [W/m. K]
E-Glass	2,6	70	2000	5	0,9
HS-Glass	2,5	83	4200	4,1	0,9
Aramida	1,4	124	3200	-5,2	0,04
Carbono UHM (PAN)	1,9	590	3800	-1	18
Carbono UHS (PAN)	1,8	290	7000	-1,5	160
Carbono UHM (pitch)	2,2	895	2200	-1,6	640
Carbono UHK (pitch)	2,2	830	2200	-1,6	1100
Aço	7,8	210	<2000	11-12	43

Tipos de fibras de reforço



Tipos de fibras de reforço



Matriz

- Funções principais da **matriz** de um compósito:
 - Garante a coesão e agregação de todas as fibras, transferindo o carregamento;
 - Providencia rigidez e forma dimensional;
 - Possibilita boas características de acabamento superficial;
 - actua como escudo protector das fibras face a alguns mecanismos de ruína (ex: ataque químico, desgaste, etc)
 - é responsável pelas características de resiliência do compósito

Matrizes poliméricas

- A função principal da **matriz** é assegurar a correcta agregação das fibras de reforço, garantir a transmissão de esforços entre as mesmas e protegê-las de danos impostos pelo ambiente
- Idealmente, a matriz deverá possuir, à partida, uma viscosidade adequada de modo a aderir convenientemente às fibras de reforço; posteriormente, e mediante um processo adequado, deverá passar a um estado sólido assumindo propriedades de elevada resistência mecânica (embora inferiores às das fibras de reforço).
- No contexto dos PMC's, existem dois grupos principais de matrizes:

– Termoendurecíveis:

- São longas cadeias poliméricas de baixa densidade, altamente reactivas, que após o processo de cura se tornam oligómeros rígidos;
- Este processo de cura é desencadeado por um catalisador ou agente de cura;
- Após curadas, estas resinas não podem ser de novo moldadas por aquecimento
- *poliesteres, poliimidas, bismaleimidas, resinas fenólicas e resinas epoxídicas.*

– Termoplásticas:

- São cadeias poliméricas amorfas ou semi-cristalinas, que podem ser moldadas por aplicação de temperatura;
- *poliamidas, polipropilenos, polietereterquetonas e polietersulfonas, ...*

Tipos de matrizes poliméricas: limites de temperatura

Materials	Maximum Continuous-Use Temperature (°C)
Thermosets	
Vinylester	60–150
Polyester	60–150
Phenolics	70–150
Epoxy	80–215
Cyanate esters	150–250
Bismaleimide	230–320
Thermoplastics	
Polyethylene	50–80
Polypropylene	50–75
Acetal	70–95
Nylon	75–100
Polyester	70–120
PPS	120–220
PEEK	120–250
Teflon	200–260

Matrizes poliméricas

Termoplásticos: propriedades

	Densidade (g/cm ³)	Temperatura de transição vítrea (° C)	Resistência à Tracção (MPa)	Alongamento à ruptura (%)	Modulo de flexão (GPa)
Polypropylene (PP)	0,9-0,91	176	30-40	100-600	1.2-1.7
Polystyrene (PS)	1,0-1,1	--	35-50	1-2	2.6-3.4
Acrylonitrile- butadiene- styrene (ABS)	1,0-1,1	--	15-55	30-100	0.9-3.0
Polyphenylene e Sulfide (PPS)	1.35	288	50-90	1-10	3.8-4.5
Polycarbonate (PC)	1,2	230	65-75	110-120	2.3-2.4
Polyetherether ketone (PEEK)	1,3	350	70-105	30-150	3.9
Polyacetal	1,4	180	70	25-75	2.6-3.4
Polycaprolact am (nylon 6)	1,1-1,2	220	40-170	30-300	1.0-2.8

Matrizes poliméricas

Termoendurecíveis: propriedades

	Densidade (g/cm ³)	Temperatura de transição vítrea (° C)	Resistência à Tracção (MPa)	Alongamento à ruptura (%)	Modulo de flexão (GPa)
Polyester (unsaturated)	1.3-2.3	--	200	20-70	<3
Epoxy	1.1-1.4	120	35-140	<4	14-30
Phenol Formaldehyde	1.7-2.0	260	50-125	<1	8-23

Compósitos híbridos

A definição habitual de compósito híbrido refere-se a um material com mais do que um tipo de fibras de reforço numa dada matriz (por exemplo fibras de carbono com fibras de vidro). No entanto, há outras formas de compósitos híbridos, como por exemplo: com camadas alternadas de diferentes materiais (compósitos ou não) ou com tipologias tipo sandwich (com revestimento e núcleo distintos). Em qualquer dos casos, pretende-se obter um material cujas propriedades globais sejam optimizadas através de sinergias dos diferentes constituintes.

Exemplos: GLARE (fibra de vidro + alumínio) ; ARALL (fibras de aramida + alumínio)



Vantagens: melhor resistência à fadiga (efeito bloqueante das fibras de reforço ao avanço da fenda) e melhor tolerância ao dano (por exemplo, impactos)

Desvantagens: menor rigidez, maior sensibilidade a entalhes, maior propensão para iniciação de fendas

Processos de fabrico de PMCs (1)

Etapas básicas de fabrico

Em termos gerais, o fabrico de materiais compósitos de matriz polimérica envolve 4 etapas principais:

- **impregnação com resina** → deve-se garantir que a resina flui adequadamente entre as fibras de reforço. A viscosidade, a tensão superficial e o efeito de capilaridade são os parâmetros principais a atender nesta fase;
- **processo de lay-up** → deposição das várias camadas de acordo com a orientação e espessura pretendidas;
- **consolidação** → deve promover-se um contacto adequado entre todas as camadas por forma a garantir uma correcta adesão entre as mesmas e evitar defeitos internos (porosidades, vazios,...)
- **solidificação** → depende do tipo de matriz (termoplástica ou termoendurecível). Nas resinas termoendurecíveis, a cura é obtida por adição de temperatura; nos termoplásticos, deve arrefecer-se o compósito para obter a consolidação da peça. O tempo desta fase é variável (desde minutos até horas). Pode ser aplicada pressão, vácuo ou ambas.

Processos de fabrico de PMCs (2)

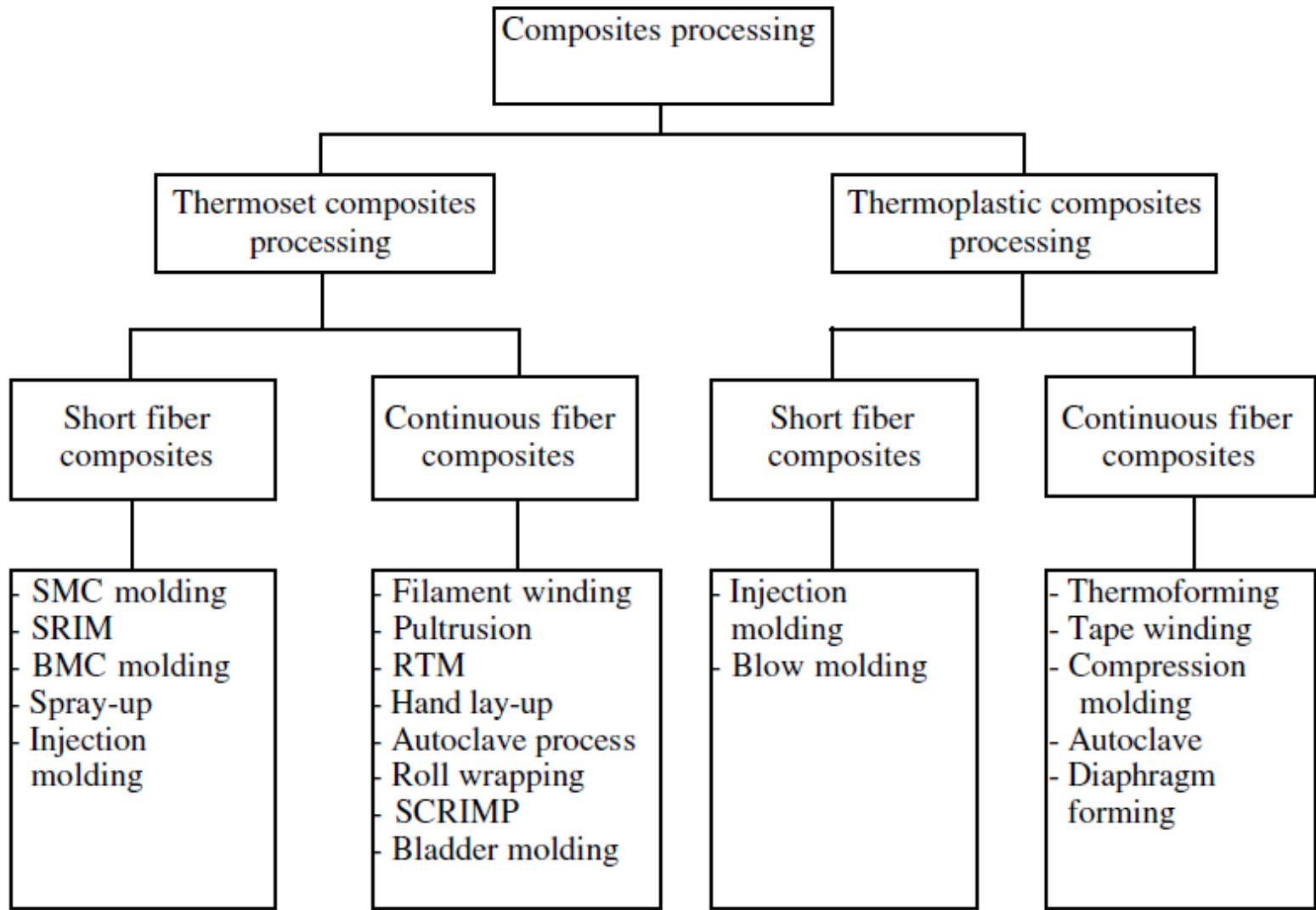
Resinas termoendurecíveis

Vantagens	Desvantagens
A resina é usada no estado líquido tornando o processo mais rápido	Tempos de cura relativamente elevados, com baixas cadências de produção
Viscosidades reduzidas, facilitando o processo de impregnação	O processo de cura é irreversível, o que impossibilita correcções dimensionais à posteriori
Menores necessidades energéticas em termos de pressão e temperatura (relativamente aos termoplásticos)	Grandes problemas ao nível da reciclagem

Resinas termoplásticas

Vantagens	Desvantagens
O tempo de solidificação é reduzido, permitindo elevadas cadências produtivas	Custos de equipamento elevados (sobretudo nos processos de injeção), devido a maquinaria complexa e robusta
A forma geométrica pode ser alterada à posteriori por adição de temperatura	
Boas capacidades ao nível da reciclagem	

Processos de fabrico de PMCs (3)



Processos de fabrico de PMCs (4)

Processamento por deposição de camadas (lay-up)

O processo de *lay-up* pode ser dividido em duas vertentes:

- 1) com uso de resina líquida (*wet hand lay-up*);
- 2) com uso de pré-impregnados (*prepreg lay-up*).

Esta técnica permite a obtenção de altos valores de fracção volúmica de fibras de reforço (sobretudo com recurso a autoclave), sendo por isso muito utilizada na indústria aeroespacial

Podem fabricar-se peças com geometrias complexas (por exemplo, dupla curvatura)

Trata-se de um processo em molde aberto com uma baixa cadência produtiva.

Processos de fabrico de PMCs (5)

Hand lay-up

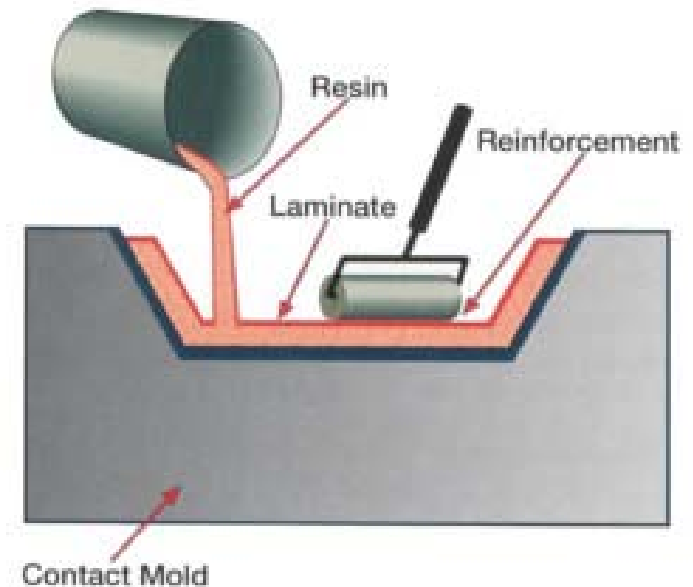
Técnica muito simples e versátil, não necessitando de ferramentas elaboradas.

A qualidade do produto final depende em grande medida da experiência do operador!

Sequência do processo:

- Molde (metálico, polimérico, compósito, madeira,...);
- Aplicação do desmoldante e eventual gel coat para melhorar acabamento final;
- Aplicação do tecido (só com fibras de reforço!);
- Aplicação da resina líquida (com catalisador);
- Distribuição da resina com pincel, rolo ou espátula.
- Facultativo: saco de vácuo e adição de calor;

Hand Lay-Up



Processos de fabrico de PMCs (6)

Prepreg lay-up

Usam-se tecidos previamente impregnados com resina, os quais são fornecidos com uma fracção volumétrica otimizada.

A deposição das várias camadas é feita em cima de um molde de acordo com a orientação e espessura pretendidas

Deve envolver-se o componente com um saco de vácuo e submetê-lo a pressão+temperatura (seguindo o ciclo de cura adequado a cada tipo de prepreg) com recurso a um autoclave

É uma técnica muito cara (custo de equipamento e matéria prima, necessidade de sala limpa, armazenamento refrigerado dos preregs, alto dispêndio energético) e com uma baixa cadência produtiva

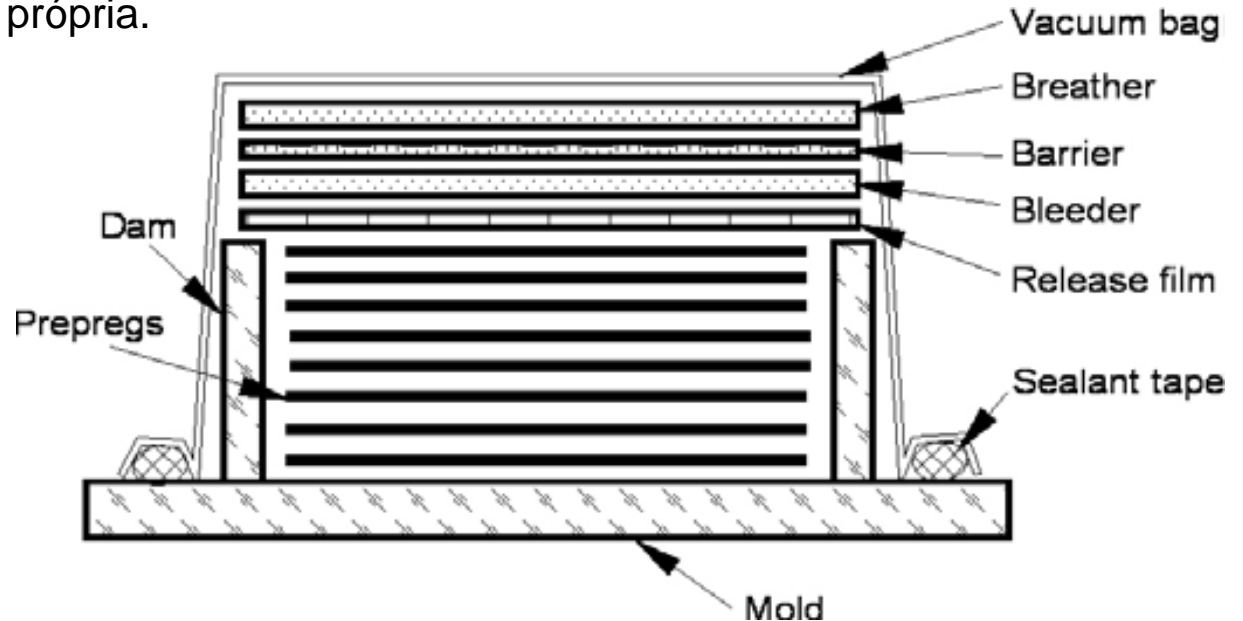


Processos de fabrico de PMCs (7)

Prepreg lay-up: construção do saco de vácuo

Sequência de componentes (a partir do topo do laminado):

1. filme desmoldante no topo do laminado (perfurado para degasificação); muitas vezes, é usada também uma camada de *peel-ply* destinada a melhorar o acabamento superficial (por exemplo, para operações de colagem à posterior);
2. manta de respiro (*bleeder*) para absorver excesso de resina e humidade;
3. filme barreira (semelhante ao desmoldante, embora não perfurado);
4. nova manta de respiro (*breather*)
5. saco de vácuo (normalmente, de poliamida); o saco é colado em toda a periferia com recurso a uma fita adesiva própria.



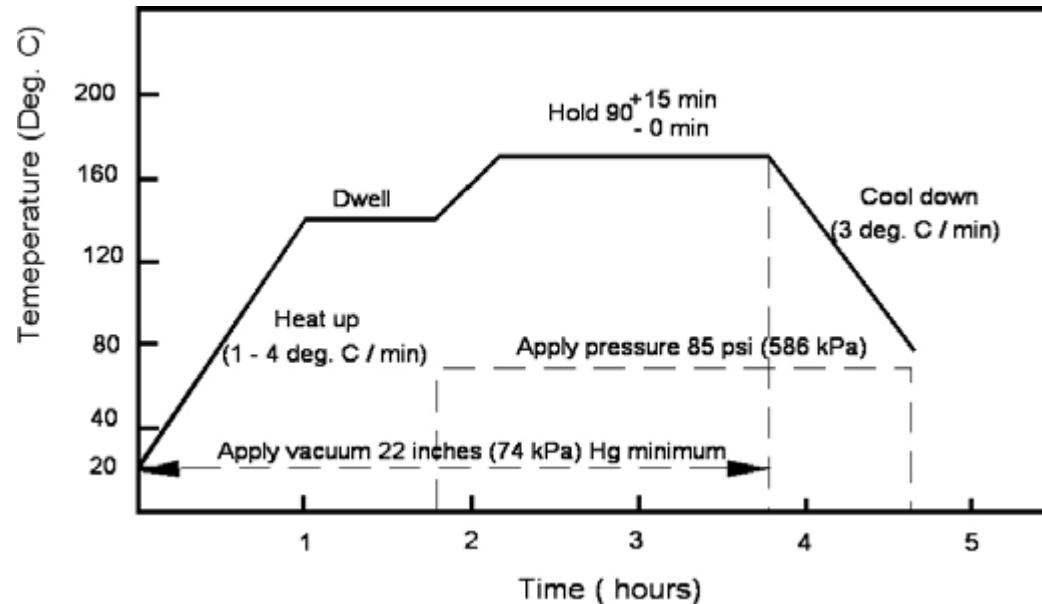
Processos de fabrico de PMCs (8)

Prepreg lay-up: cura em autoclave

A aplicação da pressão e temperatura a um laminado é feita habitualmente com recurso a um **autoclave**.

A pressão pode ser obtida com ar comprimido ou gás inerte (normalmente, azoto). Ao mesmo tempo, os laminados são colocados dentro de um saco de vácuo.

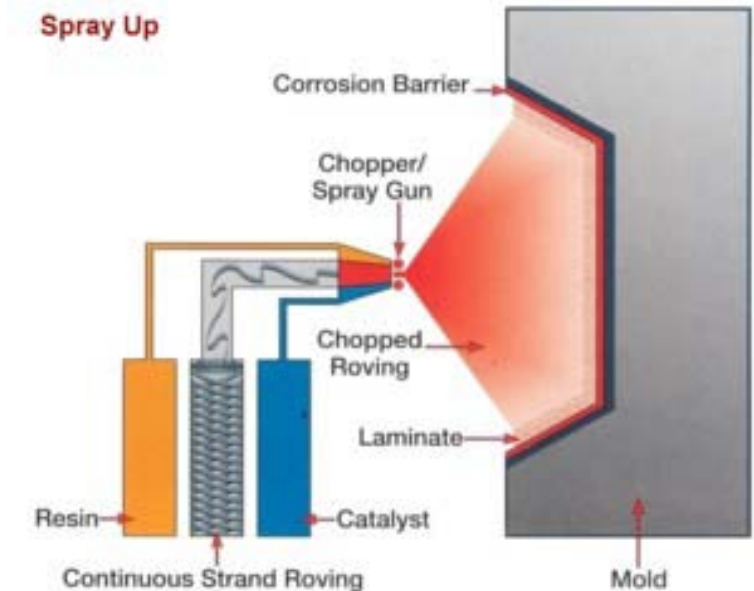
A variação da pressão e temperatura deve ser feita de acordo com as instruções de cada fabricante do prepreg.



Processos de fabrico de PMCs (9)

Pulverização

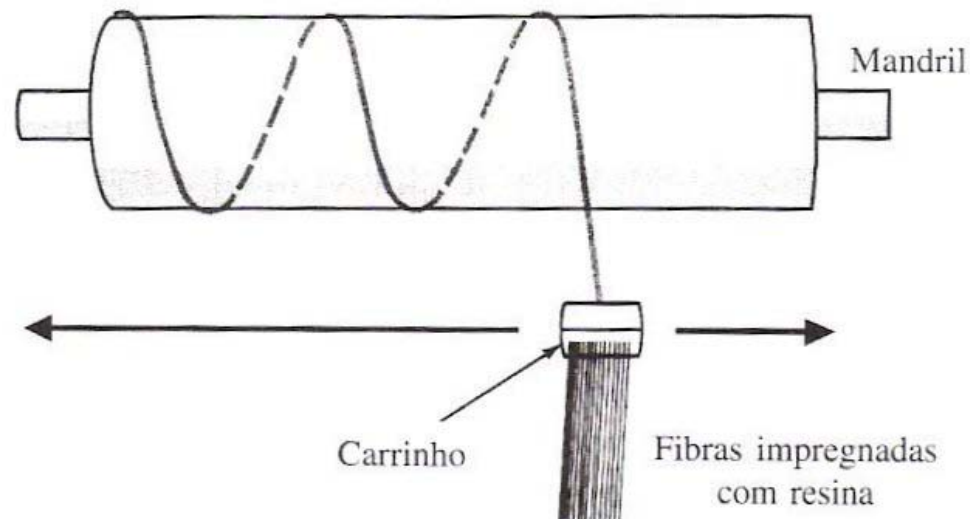
- A resina com catalisador e as fibras cortadas são simultaneamente pulverizadas sobre uma superfície;
- Recorre-se a uma pistola de corte e projecção;
- A camada depositada sobre o molde é densificada através da passagem de um rolo;
- A cura é normalmente realizada à temperatura ambiente, mas pode ser acelerada por aquecimento.



Processos de fabrico de PMCs (10)

Bobinagem filamentar (filament winding)

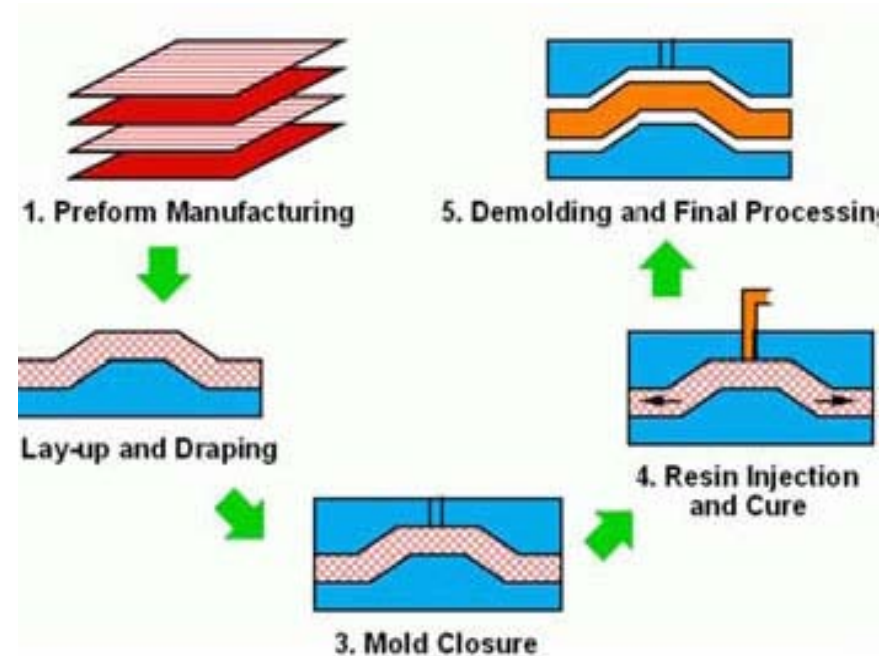
- feixe de fibras forçado a passar por um banho de resina;
- as fibras entram em movimento de vaivém em torno de um mandril;
- após se ter aplicado o número de camadas suficientes, o enrolamento realizado sobre o mandril é sujeito a um processo de cura;
- processo muito aplicado em estruturas tubulares e reservatórios
- permite automatização, sendo por isso um processo com elevada cadência produtiva;



Processos de fabrico de PMCs (11)

RTM \equiv Resin Transfer Molding

- colocação da pré-forma de fibras com o molde aberto;
- o molde é fechado;
- fase de injeção: sob alguma combinação de pressão e/ou vácuo a resina é misturada ao catalisador formando a mistura que será injectada no molde;
- inicio da fase de cura;
- por fim a peça pode ser retirada do molde;
- processo muito utilizado na indústria automóvel e com um ritmo crescente no sector aeronáutico;
- a resina é transferida para dentro do molde com uma baixa pressão (< 100 psi) \rightarrow processo relativamente barato!

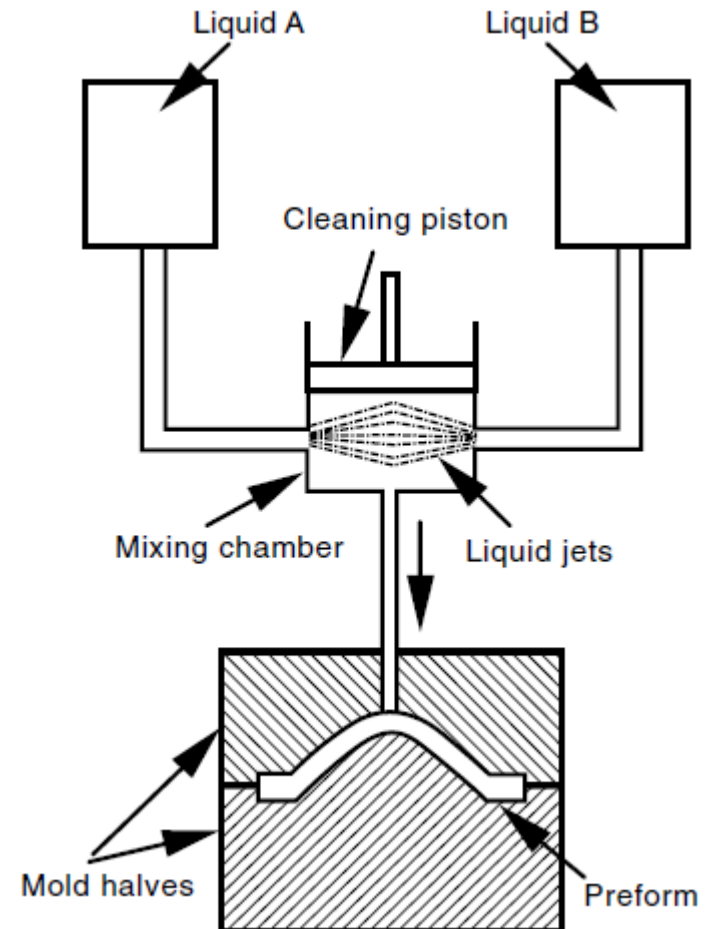


Processos derivados do RTM

- **VARTM** (Vacuum Assisted RTM): semelhante ao RTM, mas com recurso a um saco de vácuo. A resina é transferida para o molde (que pode ser apenas composto por uma parte) por acção do vácuo.

- **SRIM** (Structural Reaction Injection Molding): duas resinas distintas são previamente misturadas a alta velocidade numa pré-câmara antes de serem injectadas dentro do molde. A pressão de injeção é normalmente baixa. O tempo de cura é muito baixo, permitindo grandes cadências de produção.

- **RRIM** (Reinforced Resin Injection Molding): neste caso, a pressão de injeção da resina é elevada, mas normalmente as fibras (curtas) são previamente misturadas com a resina antes de entrarem no molde



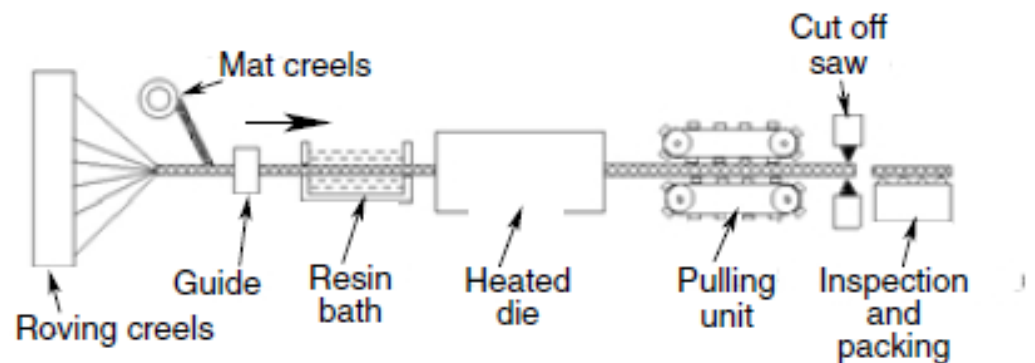
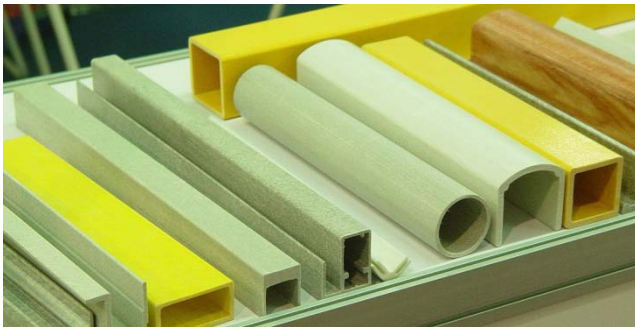
Processos de fabrico de PMCs (13)

Pultrusão

Após terem sido previamente impregnadas com resina, as fibras são puxadas contra uma fieira (ou molde) de modo a adquirirem a forma da secção do perfil desejado;

Processo ideal para o fabrico de componentes de secção constante e grande comprimento

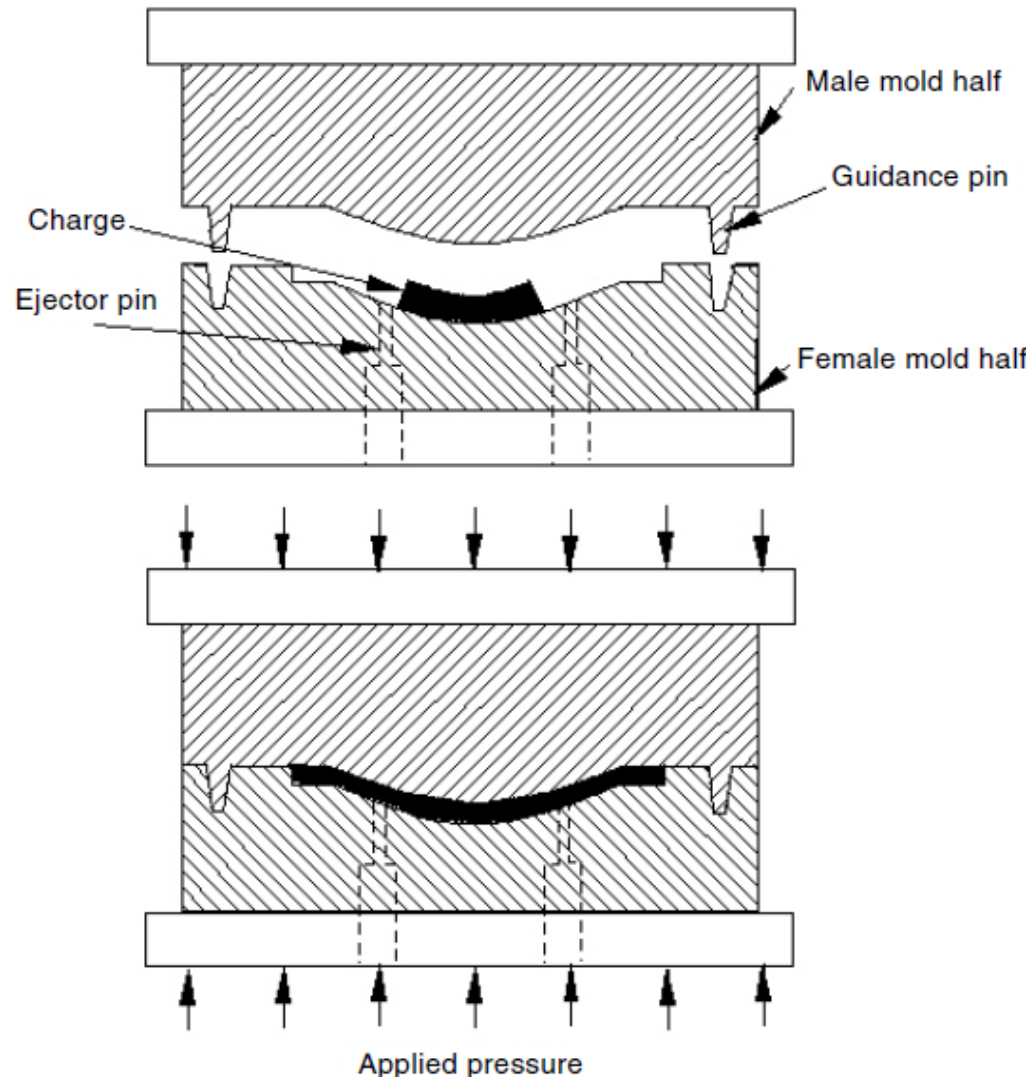
Não requer equipamentos complexos, sendo um processo relativamente barato e com grande cadência produtiva.



Processos de fabrico de PMCs (14)

Moldagem por compressão (compression molding)

- processo em molde fechado, onde existe uma compressão do material até à forma final numa única etapa;
- permite a obtenção de alterações geométricas na direcção fora do plano (por exemplo, elementos de reforço, flanges, furos, ...);
- o material de base é um compósito feito à base de fibras de reforço e resina (SMC≡ Sheet Molding Compounds), o qual tem uma validade limitada (max. 2 semanas)
- processo muito utilizado na indústria automóvel



Processos de ligação de PMCs

Juntas coladas

Vantagens	Inconvenientes
Baixos níveis de concentração de tensões	Espessuras de colagem limitadas para juntas simples
Ligação rígida	Inspeção de defeitos exigente
Excelentes propriedades à fadiga	Susceptível a degradação ambiental
Não há problemas de fretagem	Sensibilidade a tensões actantes perpendicularmente ao plano da cola
Evita problemas de corrosão	Não permite desmontagem do componente
Elevada tolerância ao dano	Exige equipamento caro
Permite acabamentos superficiais excelentes	Problemas ambientais (incluindo danos para a saúde)

Processos de ligação de PMCs

Juntas aparafusadas / rebitadas

Vantagens	Inconvenientes
Permitem a desmontagem do componente	Níveis de concentração de tensões elevados
Não há limitações à espessura da junta	Susceptibilidade à iniciação de fendas
Tipologias de ligação simples	A furação do compósito pode levar a danos
Processos de fabrico simples	Compósitos suportam baixas cargas resultantes de pressão de contacto/esmagamento
Procedimento de inspecção de qualidade simples	Susceptível a fretagem
Não causa problemas ambientais	Problemas de corrosão (nos metais)
Não há problemas de tensões residuais	Acabamento superficial pode ser desadequado para algumas aplicações

Análise de compósitos laminados: lei das misturas

Grande parte da utilização de PMCs em aplicações aeronáuticas faz-se sob a forma de laminados. Este tipo de configuração estrutural resulta da combinação de um conjunto de laminas constituídas por fibras de reforço embebidas numa matriz polimérica. A orientação das fibras pode ser ajustada ao longo da direcção de empilhamento, permitindo obter um componente com uma resistência específica optimizada em função do tipo de carregamento esperado para a estrutura ou componente.

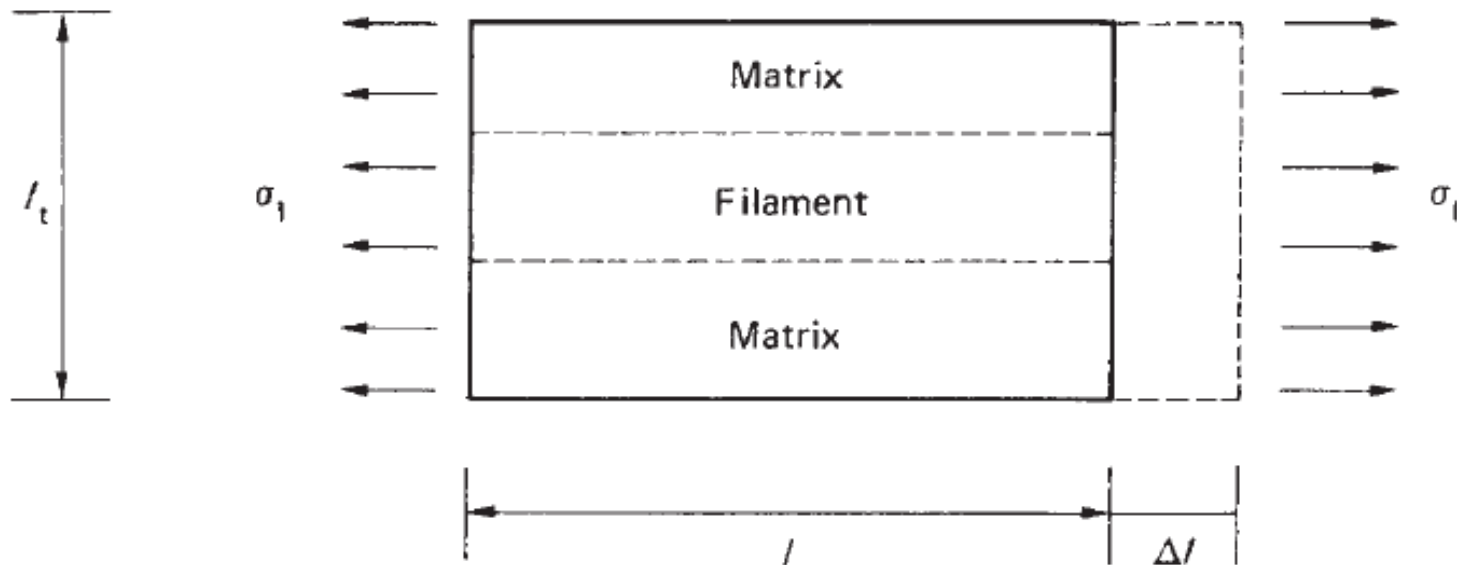
Numa perspectiva micromecânica, podemos considerar que existem duas direcções de referência relativas a uma única lâmina: 1) paralela às fibras de reforço; 2) perpendicular às fibras de reforço. No primeiro caso, assume-se que estamos perante uma direcção longitudinal (l), enquanto que no segundo se trata de uma direcção transversal (t).

Análise de compósitos laminados: lei das misturas

Considere-se a porção da lâmina indicada na figura, a qual está sujeita a uma tensão σ_l na direcção longitudinal. A extensão associada a este carregamento é Δl . Assumindo que a secção permanece plana após a deformação, então:

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l} \longrightarrow \sigma_l = E_l \varepsilon_l \quad (1)$$

$E_l \equiv$ módulo de elasticidade na direcção das fibras de reforço.



Análise de compósitos laminados: lei das misturas

Podemos, também, determinar as tensões actuantes nas fibras (f) e na matriz (m):

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_l \quad \sigma_m = E_m \varepsilon_l \quad (2)$$

Considerando que: $A \equiv$ área transversal da lâmina; $A_f \equiv$ área transversal do filamento; $A_m \equiv$ área transversal da matriz

$$\sigma_l A = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \quad (3)$$

Recorrendo às expressões das tensões expressas nas eqs. (1) e (2), obtém-se:

$$E_l \varepsilon_l A = E_f \varepsilon_f A_f + E_m \varepsilon_l A_m \quad \longrightarrow \quad E_l = E_f \frac{A_f}{A} + E_m \frac{A_m}{A} \quad (4)$$

Análise de compósitos laminados: lei das misturas

A utilização das fracções dos elementos de reforço (fibras) e matriz em relação à massa ou volume total do laminado é um dos parâmetros habituais de caracterização deste tipo de materiais. Assim, considerem-se as seguintes expressões para as fracções relativas às fibras e matriz:

$$v_f = \frac{A_f}{A}$$

$$v_m = \frac{A_m}{A}$$

Desta forma, a Eq. (4) fica como:

$$E_l = v_f E_f + v_m E_m$$

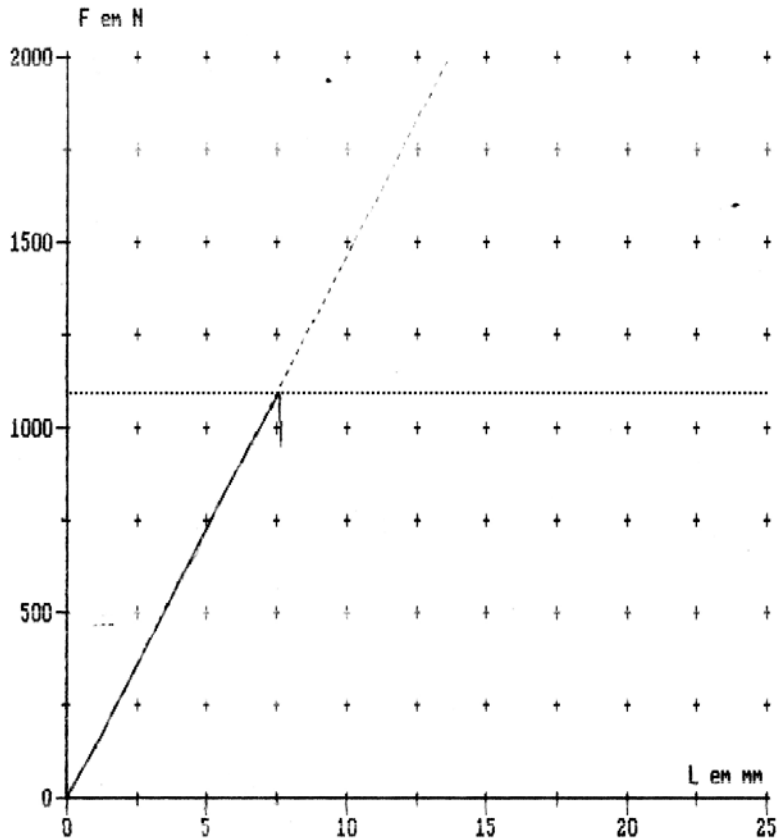
(5)

Lei das Misturas

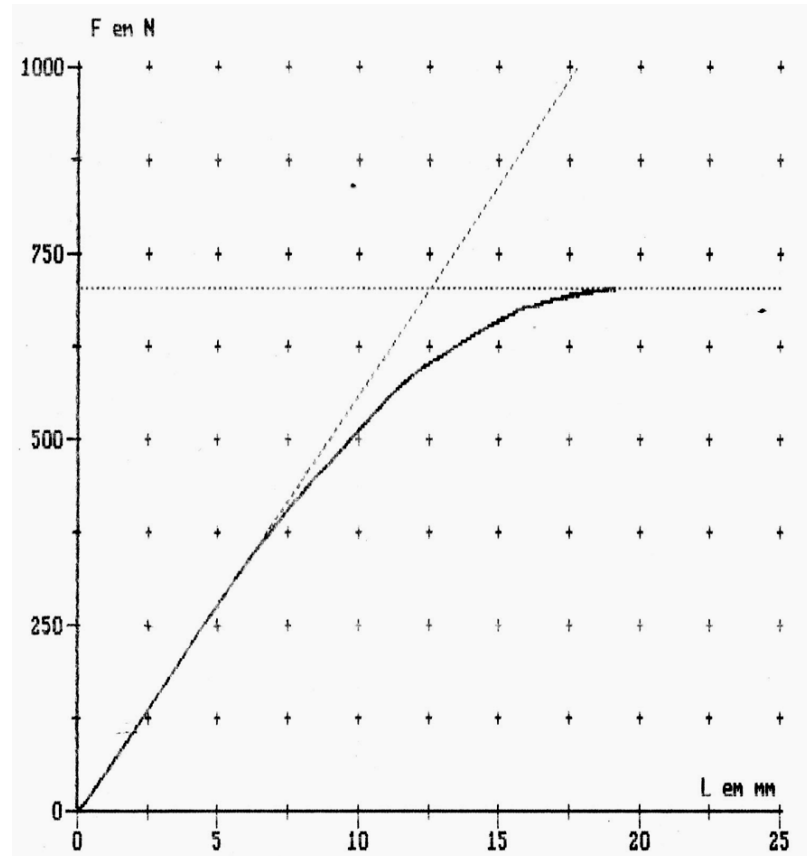
Nota: ver resto de dedução feita em sala de aula

Análise de compósitos laminados: efeito do empilhamento

Curvas carga – deformação para dois tipos de laminados:



Unidireccional



Cruzado $[0/90/0^\circ]_s$