



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Covilhã | Portugal

Fabricação - Compósitos

Fabricação e Manutenção de Aeronaves (10384)

2013

Pedro V. Gamboa

Departamento de Ciências Aeroespaciais

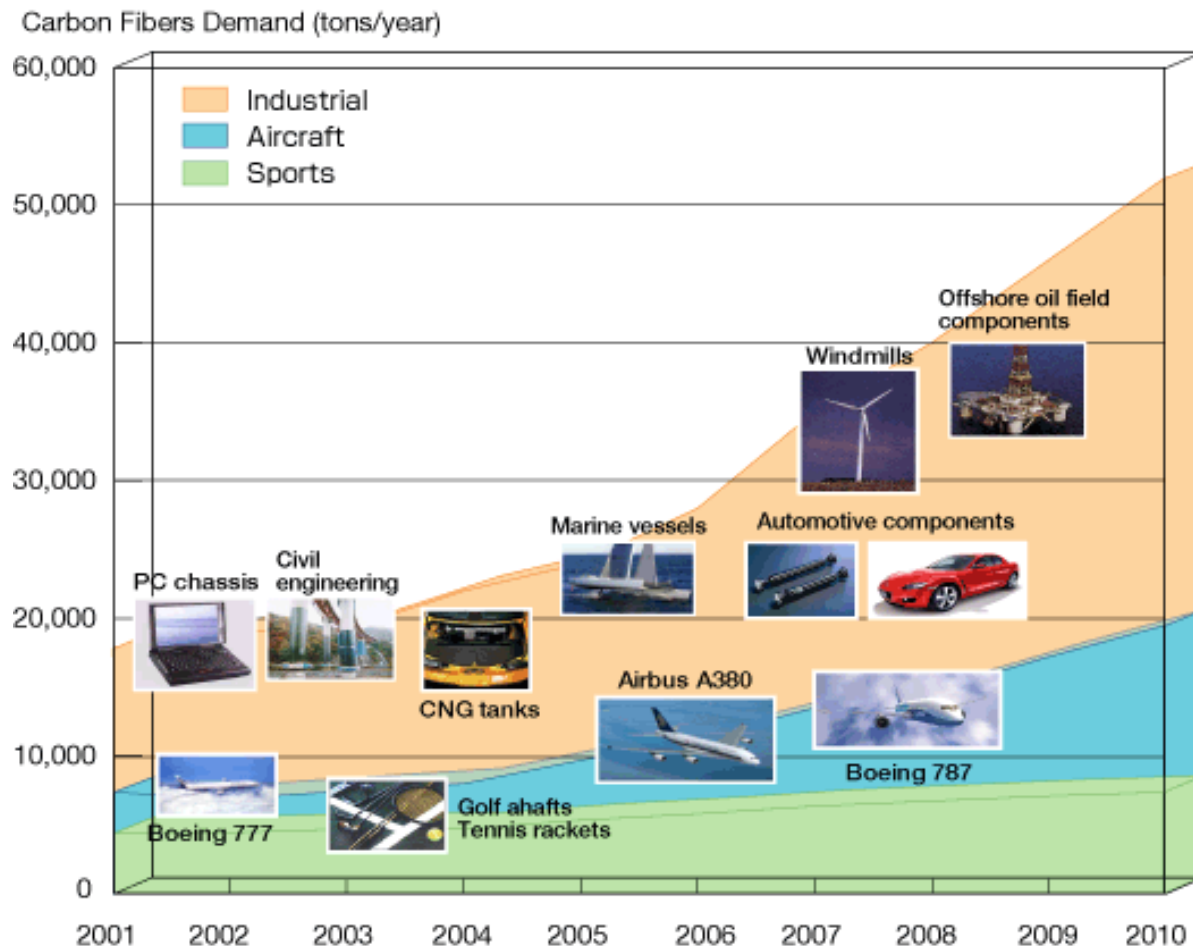
Objetivos

- Ter conhecimentos básicos sobre os processos de fabrico usados em compósitos:
 - Propriedades dos compósitos;
 - Processos de fabrico;
 - Fabrico de partes e de componentes;
 - Montagem.

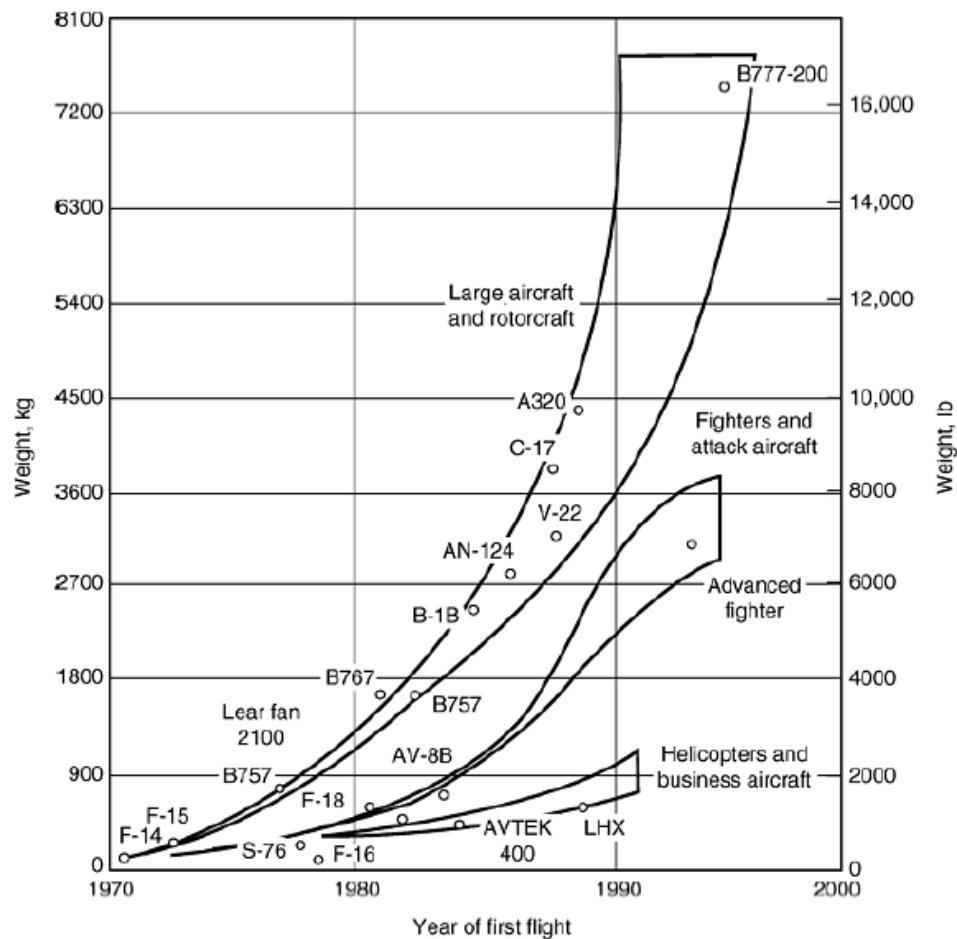
Objetives

- To have basic knowledge of the manufacturing processes used with composites parts and components:
 - Properties of composites;
 - Manufacturing processes;
 - Manufacturing of parts and components;
 - Assembly.

Composites in aircraft (1)



Composites in aircraft (2)



Composites in aircraft (3)

- Dyn'Aero MCR 01 Club



Composites in aircraft (4)

Material compósito no EMB170

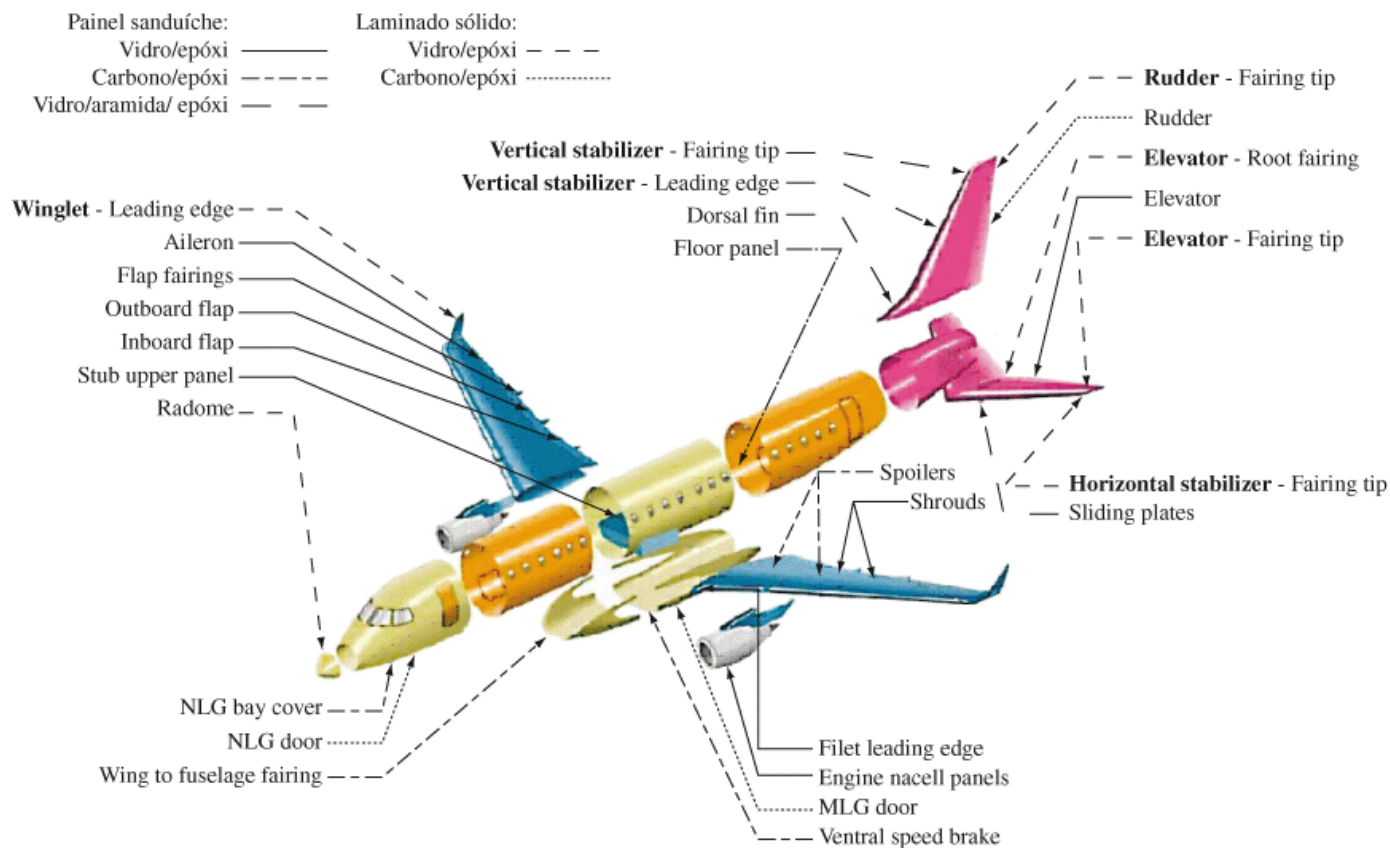
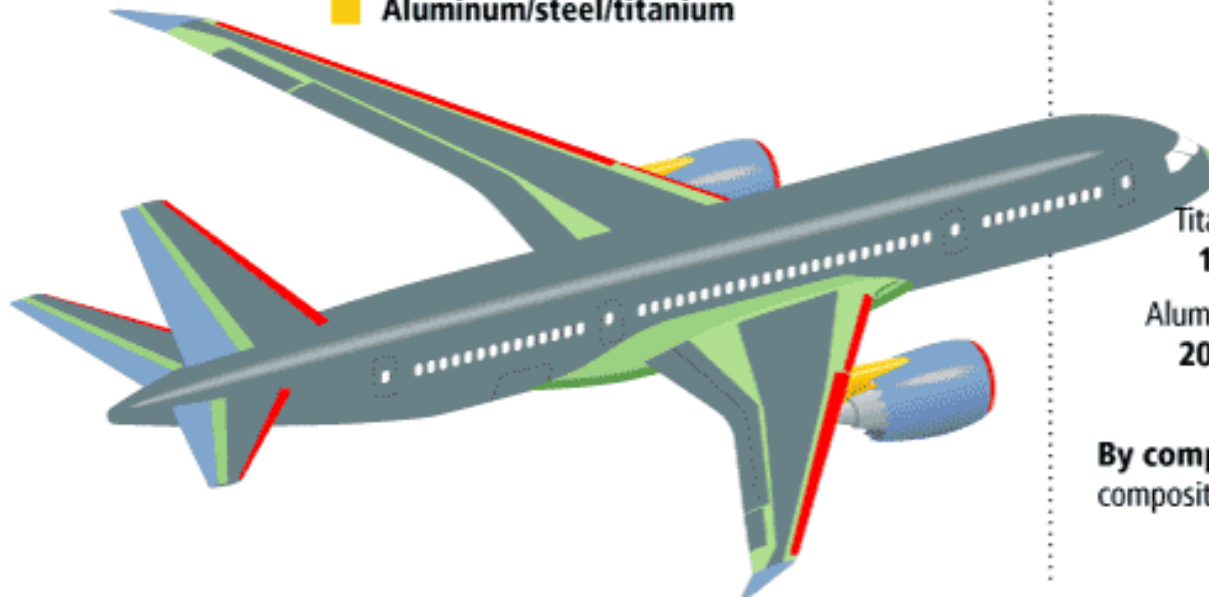


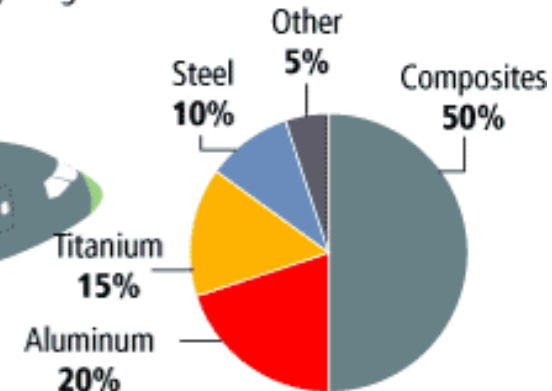
Figura 2. Vista explodida da aeronave EMB-170, mostrando os componentes fabricados em compósitos poliméricos avançados (cortesia da Embraer).

Composites in aircraft (5)

Materials used in 787 body



Total materials used By weight



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

Composites in aircraft (6)



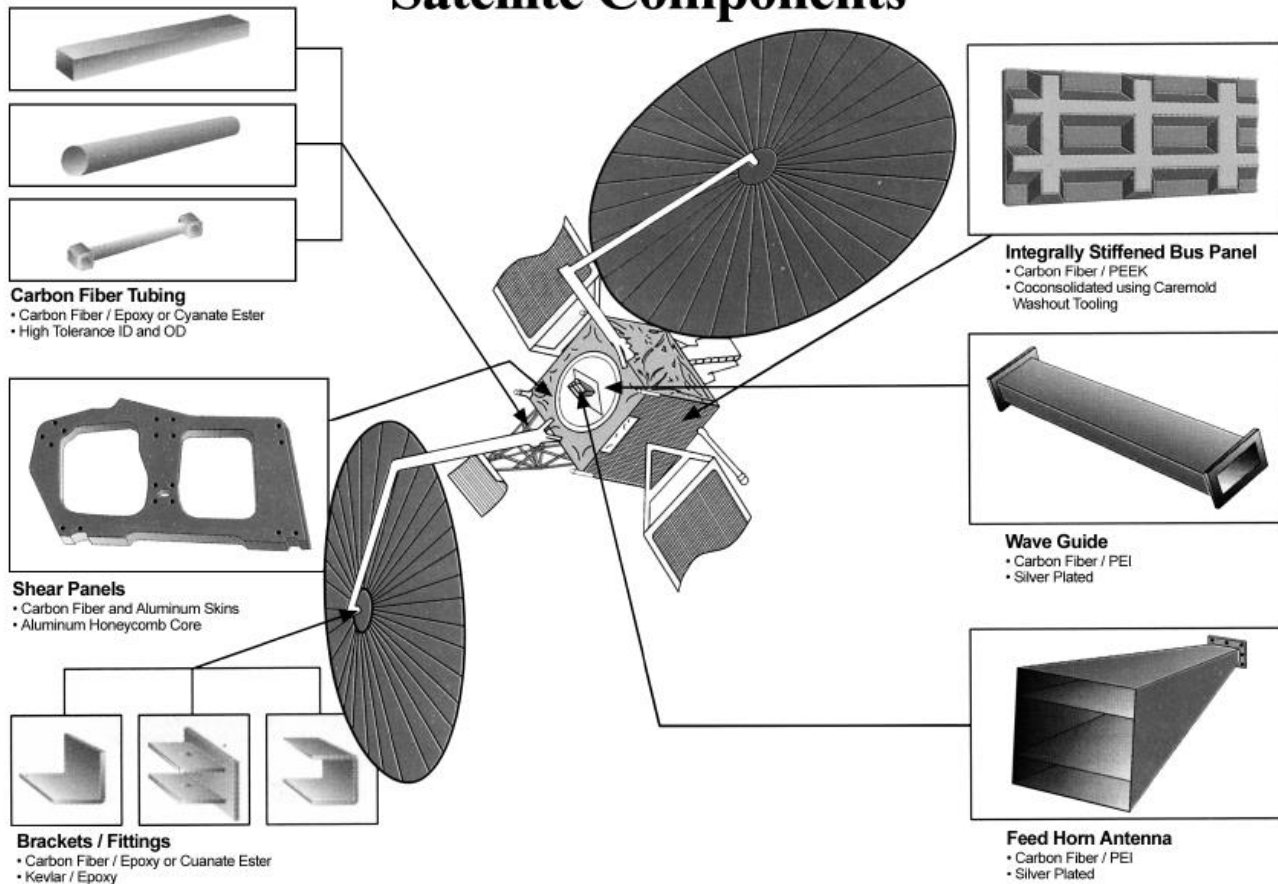
Composites in aircraft (7)

- 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.



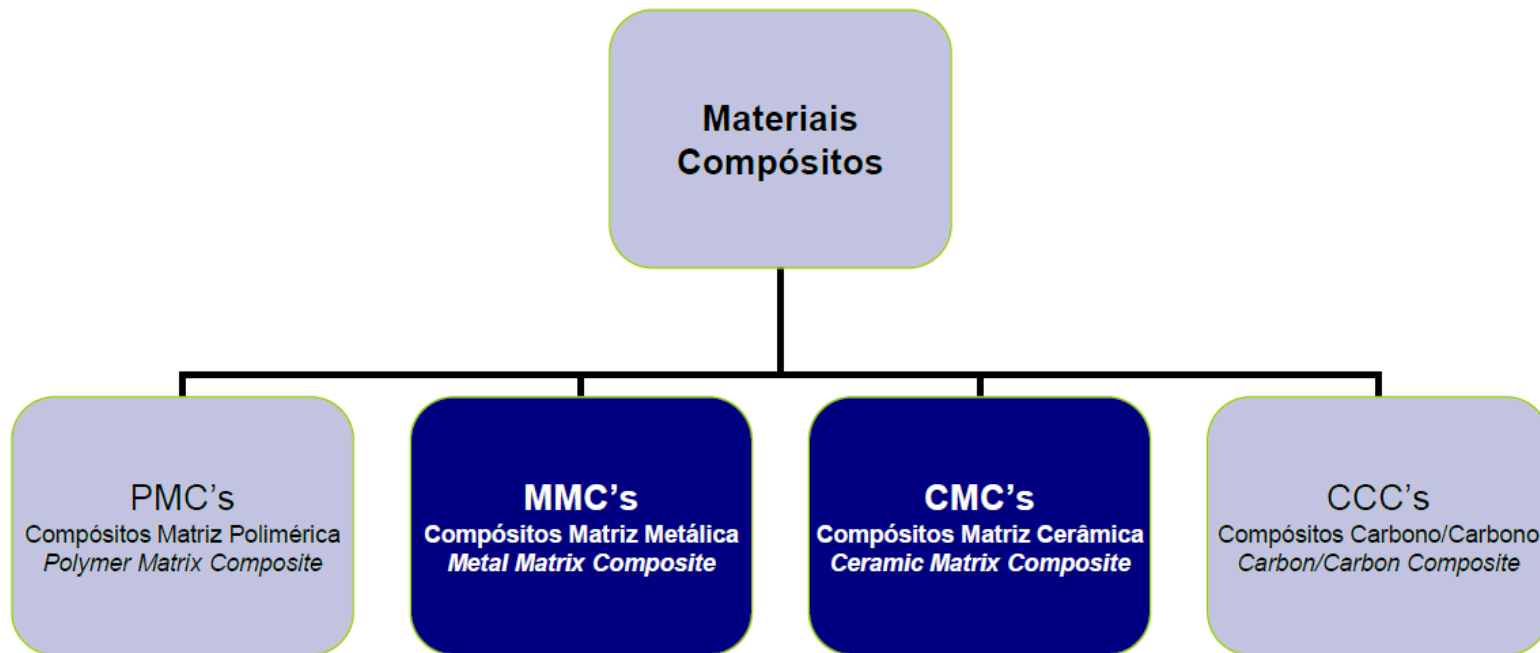
Composites in aircraft (8)

Satellite Components

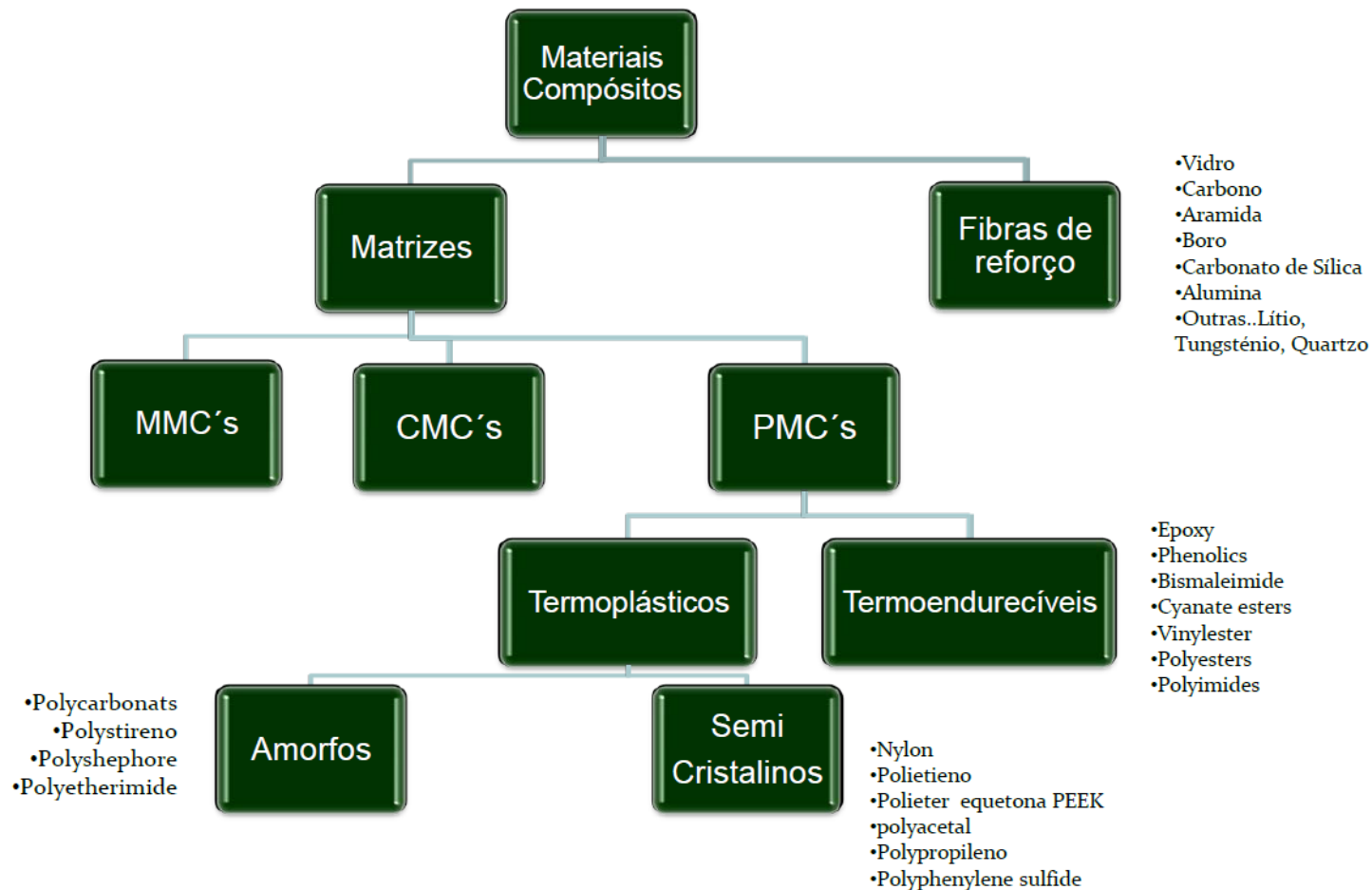


Tipos de compósitos (1)

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

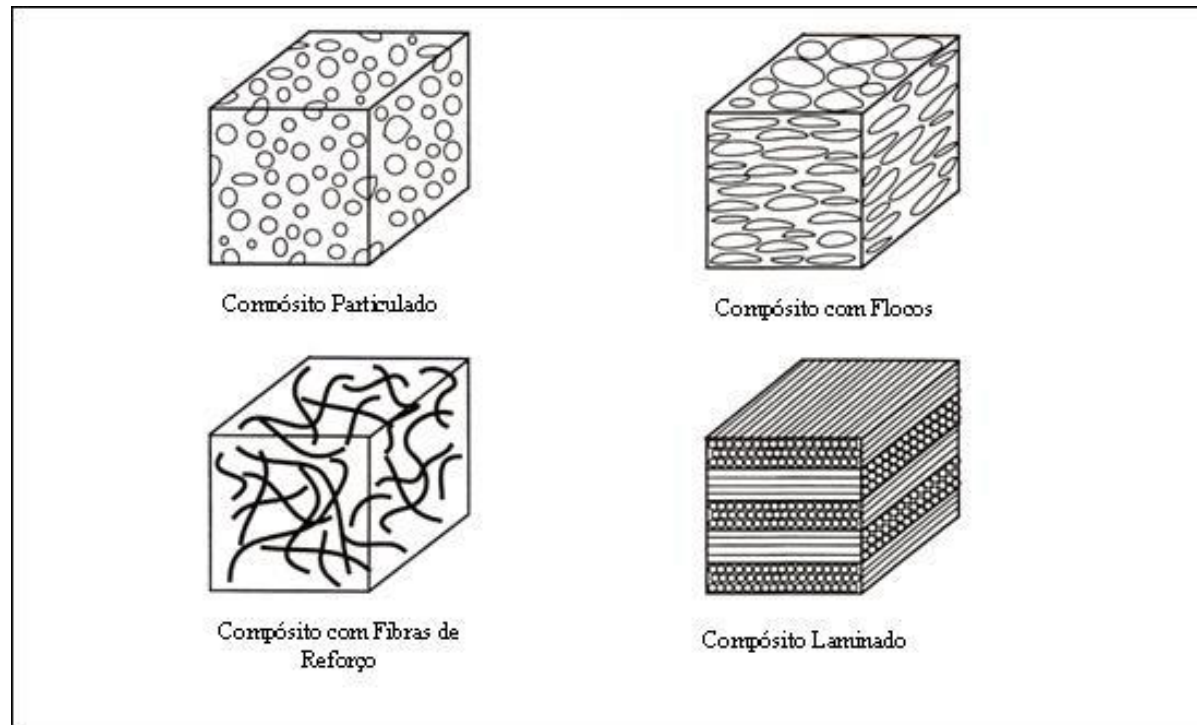


Tipos de compósitos (2)



Tipos de compósitos (3)

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

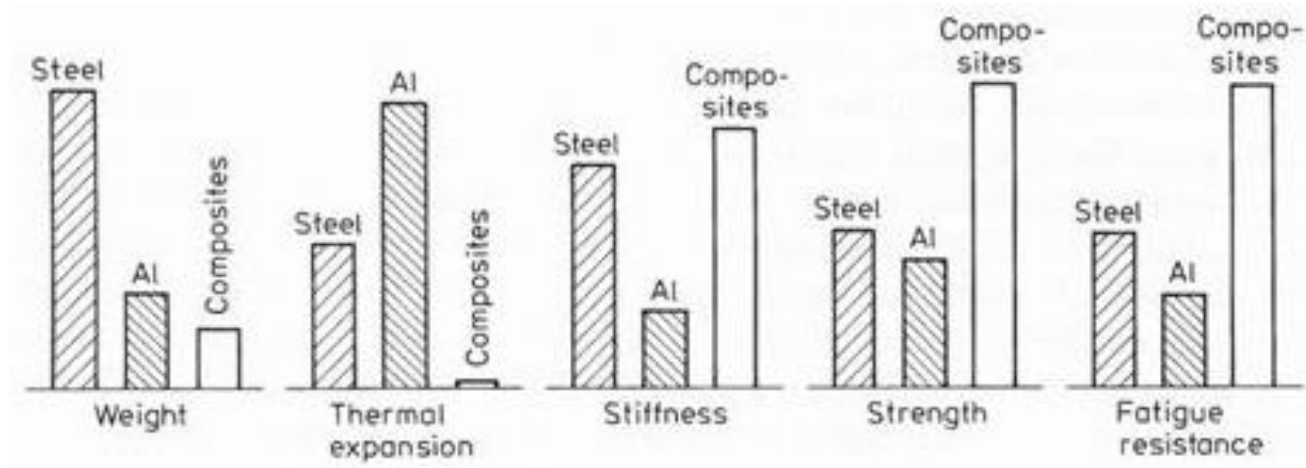


PMCs (1)

- 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

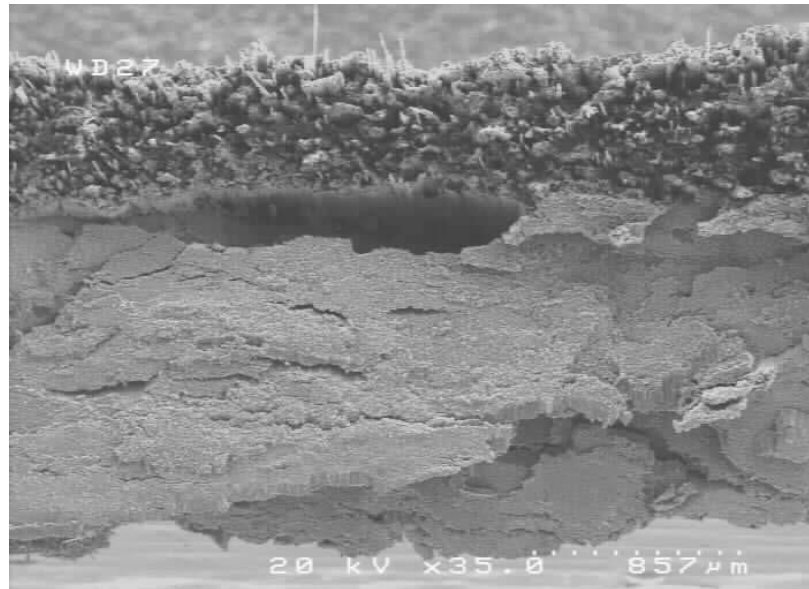
PMCs (2)

- Comparação com outros materiais



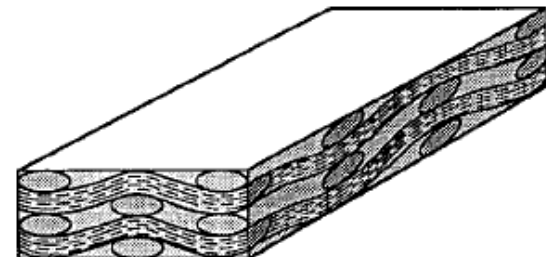
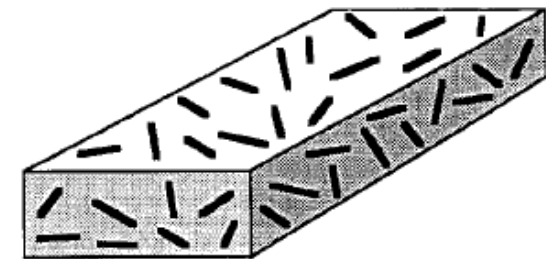
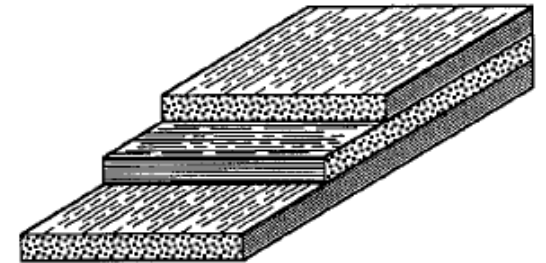
Fibras de reforço (1)

- 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 (2)

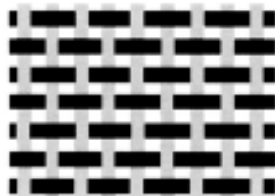
- **Fibras contínuas:** tipicamente utilizadas em compósitos laminados, pultrudidos/extrudidos, bobinagem filamentar...
- **Fibras descontínuas:** recorrem a fibras curtas, whiskers (ou até partículas) para reforço de matriz; as fibras estão orientadas aleatoriamente
- **Tecidos:** as fibras são tecidas em diferentes arranjos espaciais (2D ou 3D); muito utilizado no processo de handlayup



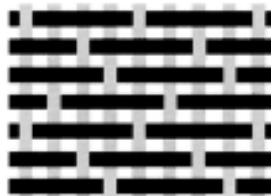
Fibras de reforço (3)

- Tipos de tecido

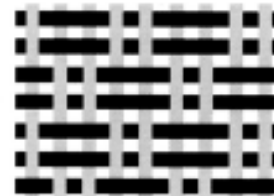
Plain



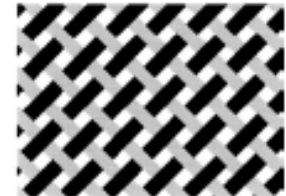
Crowfoot Satin



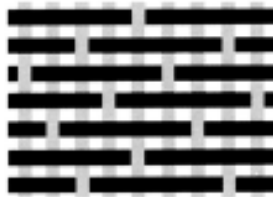
2x2 Basket



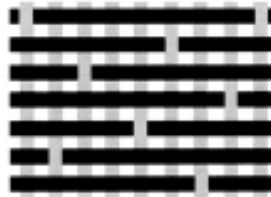
$\pm 45^\circ$ Plain



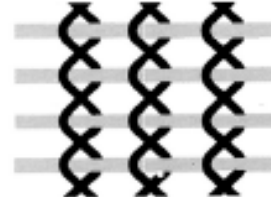
5HS



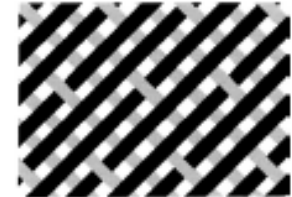
8HS



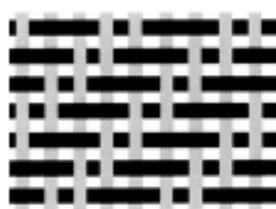
Leno



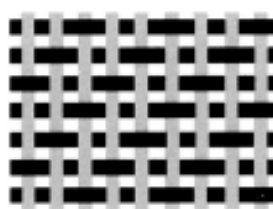
$\pm 45^\circ$ 8HS



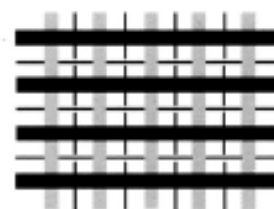
2/2 Twill



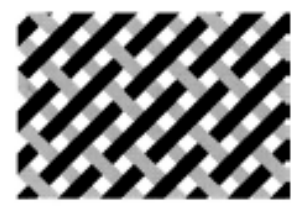
2/1 Twill



Non-Crimp

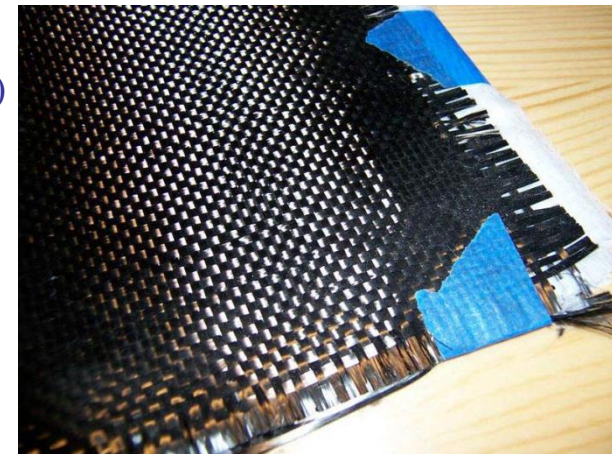


$\pm 45^\circ$ Crowfoot Stain



Fibras de reforço (4)

- 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*



Fibras de reforço (5)

- 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 tração e corte, e muito baixa resistência à compressão

Fibras de reforço (6)

- Fibras de vidro

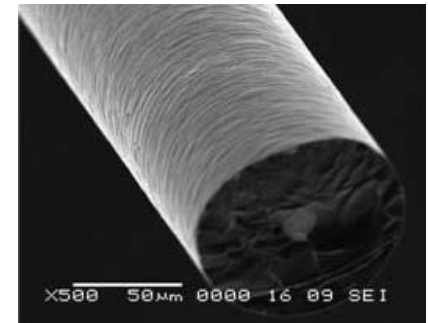
- Têm baixo módulo de elasticidade, comparativamente a outras fibras, o que propicia a ocorrência de fluência;
- São bons isolantes, pois apresentam baixa condutividade térmica e eléctrica
- Têm um baixo coeficiente de expansão térmica (CTE), comparativamente a metais
- Boa resistência e baixo custo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



Fibras de reforço (7)

- 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



Fibras de reforço (8)

- 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)



Fibras de reforço (9)

- 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

Matriz (1)

- 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

Matriz (2)

- 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).

Matriz (3)

- 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, ...*

Matriz (4)

- 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

Matriz (5)

- 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
Polyphenylen 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

Matriz (6)

- Termoendurecíveis - propriedades:

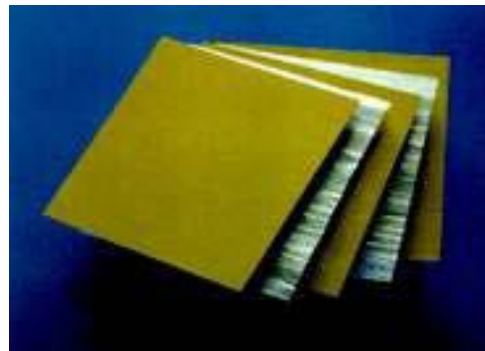
	Densidade (g/cm ³)	Temperatura de transição vítrea (° C)	Resistência à Tracção (MPa)	Alongamento à ruptura (%)	Modulo de flexão (GPa)
Polyester (unsaturated)	1.3-2.3	--	200	20-70	<3
Epoxy	1.1-1.4	120	35-140	<4	14-30
Phenol Formaldehyde	1.7-2.0	260	50-125	<1	8-23

Compósitos híbridos (1)

- 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.

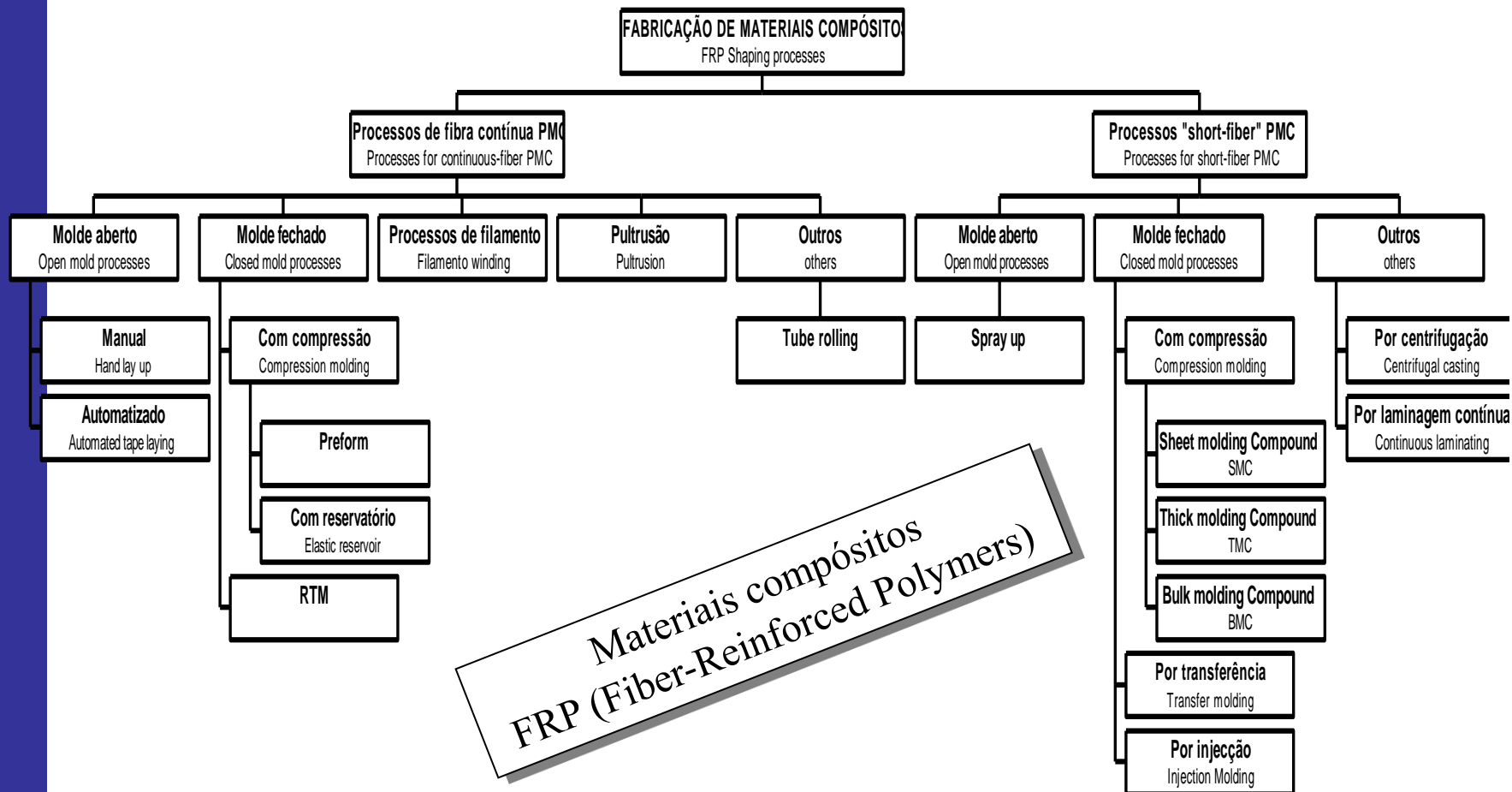
Compósitos híbridos (2)

- Exemplos:
- GLARE (fibra de vidro + 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



- ARALL (fibras de aramida + alumínio)

Tecnologias de fabrico



Processos de fabrico de PMCs (1)

- 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)

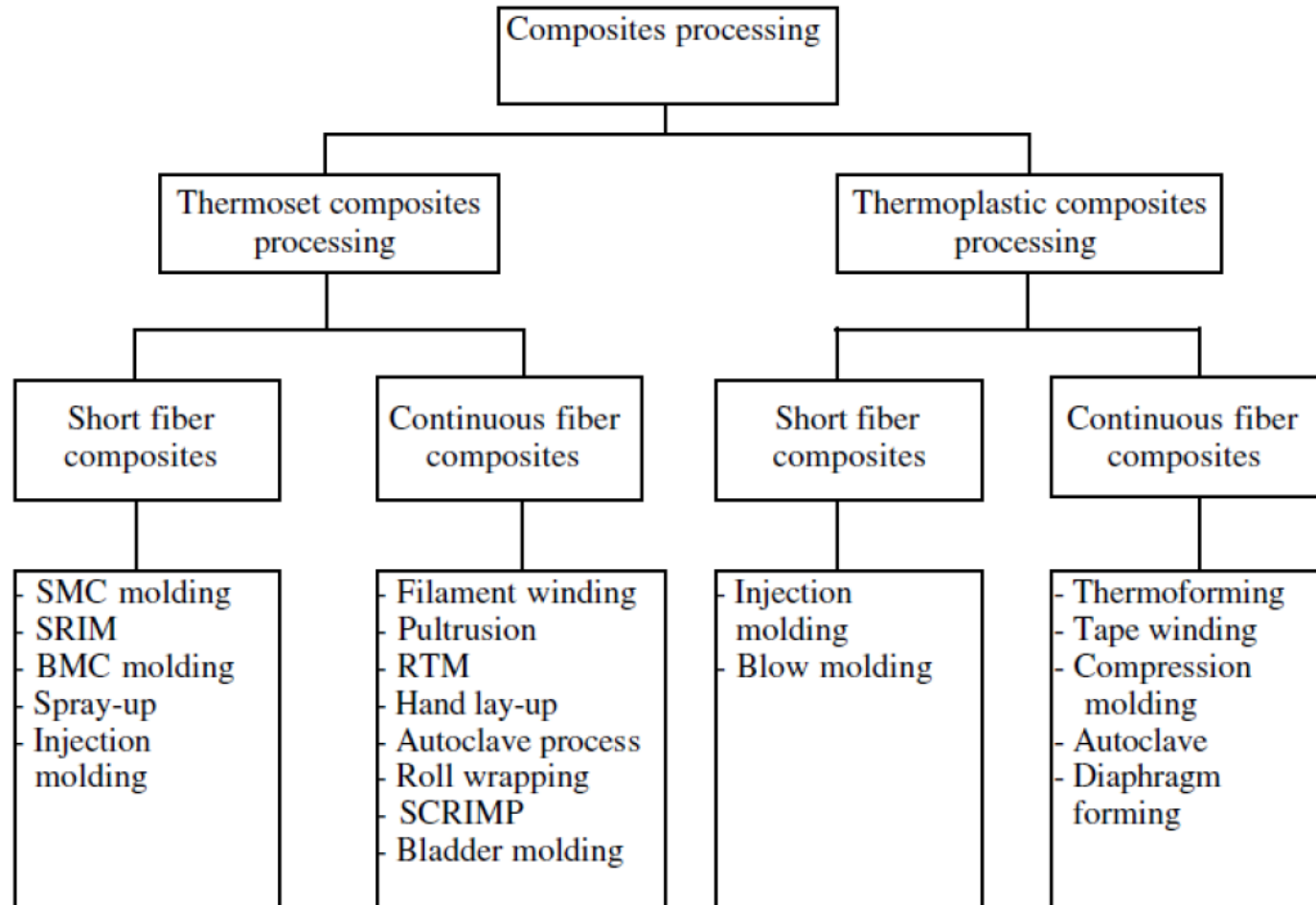
Resinas termoendurecíveis

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)

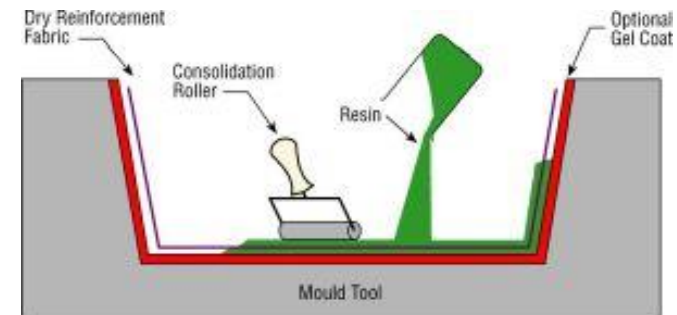


Processos de fabrico de PMCs (4)

- 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.

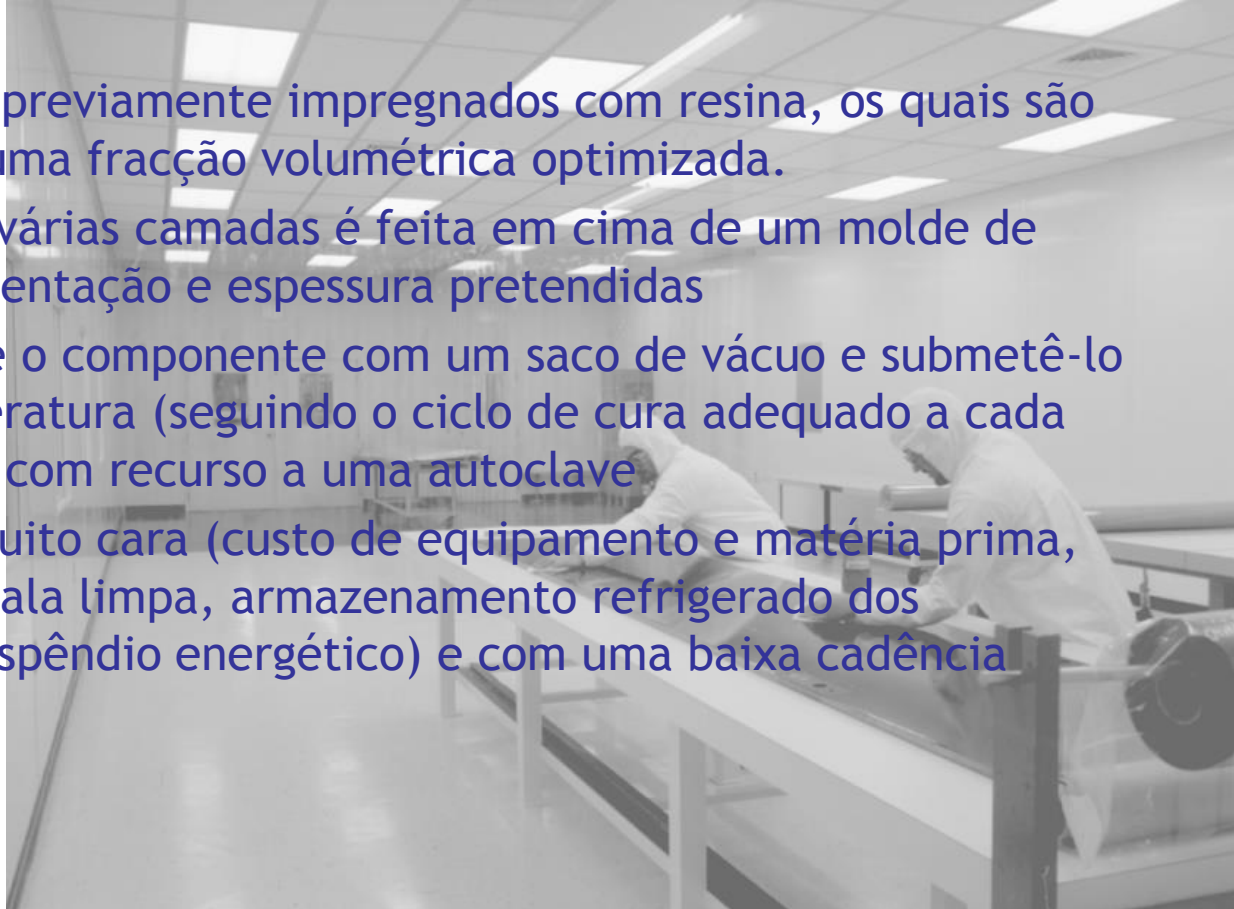
Processos de fabrico de PMCs (5)

- *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;



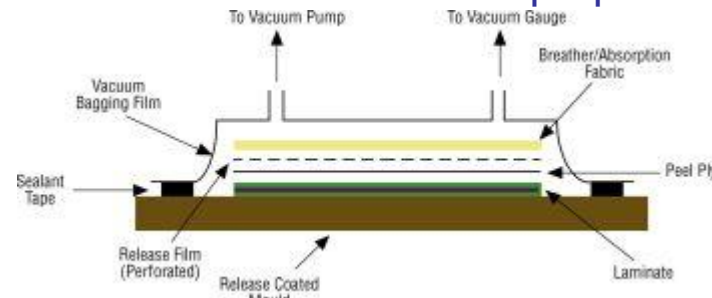
Processos de fabrico de PMCs (6)

- *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 uma 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



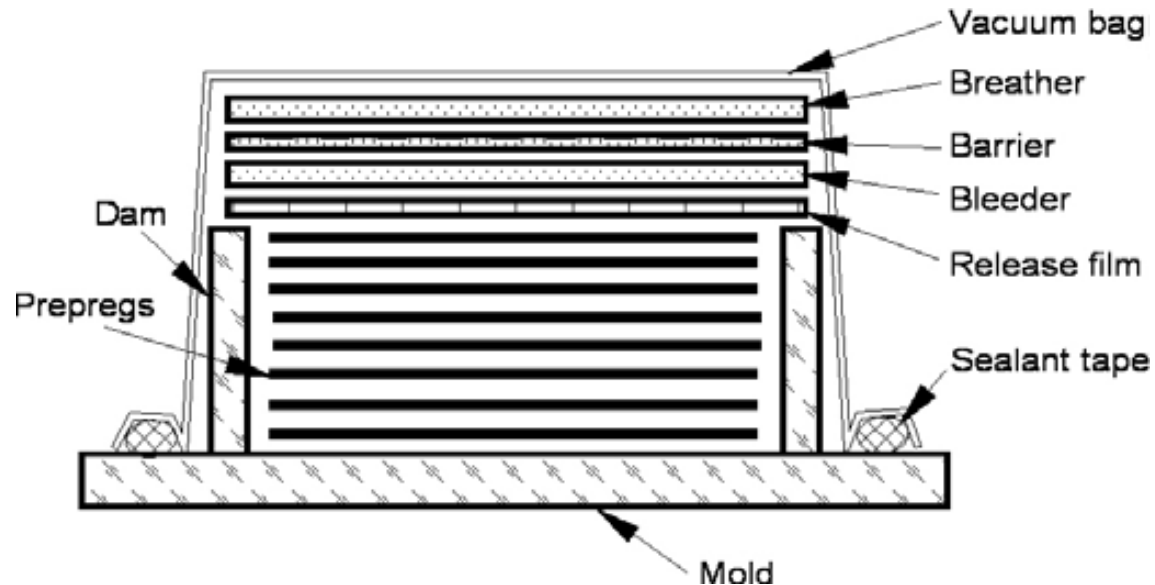
Processos de fabrico de PMCs (7)

- *Prepreg lay-up*: construção do saco de vácuo
- Sequência de componentes (a partir do topo do laminado):
 - 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 posterior);
 - manta de respiro (*bleeder*) para absorver excesso de resina e humidade;
 - filme barreira (semelhante ao desmoldante, embora não perfurado);
 - nova manta de respiro (breather)
 - saco de vácuo (normalmente, de poliamida); o saco é colado em toda a periferia com recurso a uma fita adesiva própria.



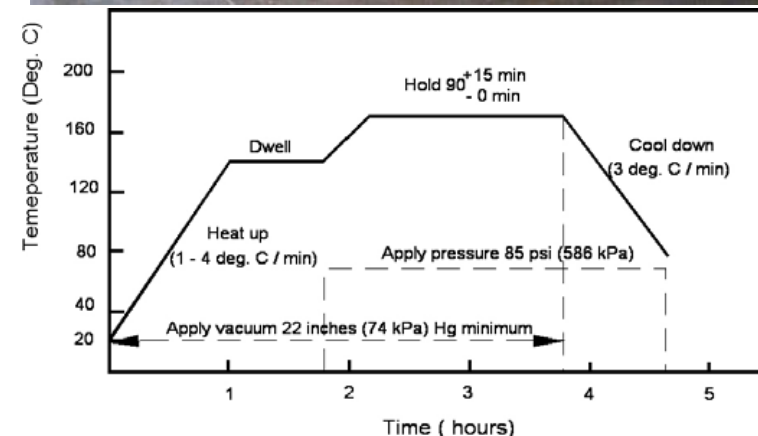
Processos de fabrico de PMCs (8)

- *Prepreg lay-up*: construção do saco de vácuo



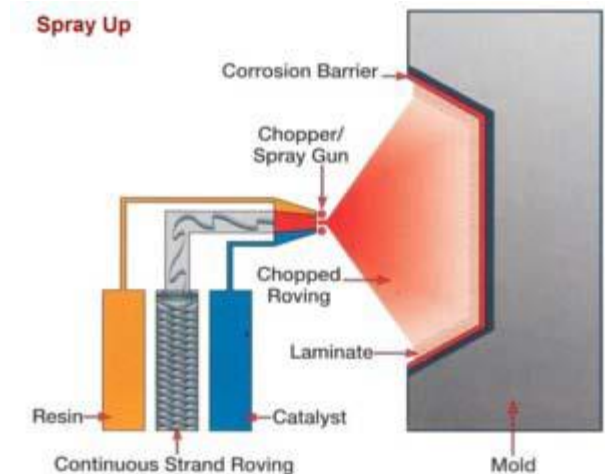
Processos de fabrico de PMCs (9)

- *Prepreg lay-up: cura em autoclave*
- A aplicação da pressão e temperatura a um laminado é feita habitualmente com recurso a uma 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.



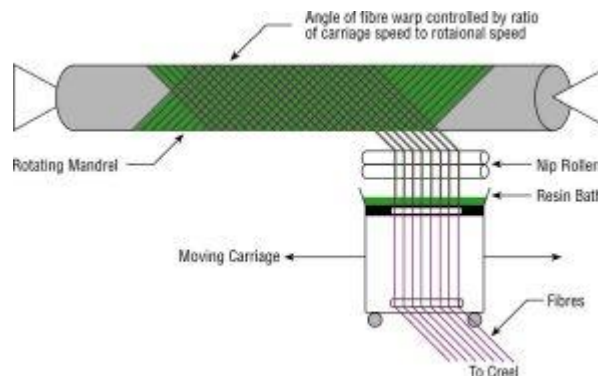
Processos de fabrico de PMCs (10)

- 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 (11)

- **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;

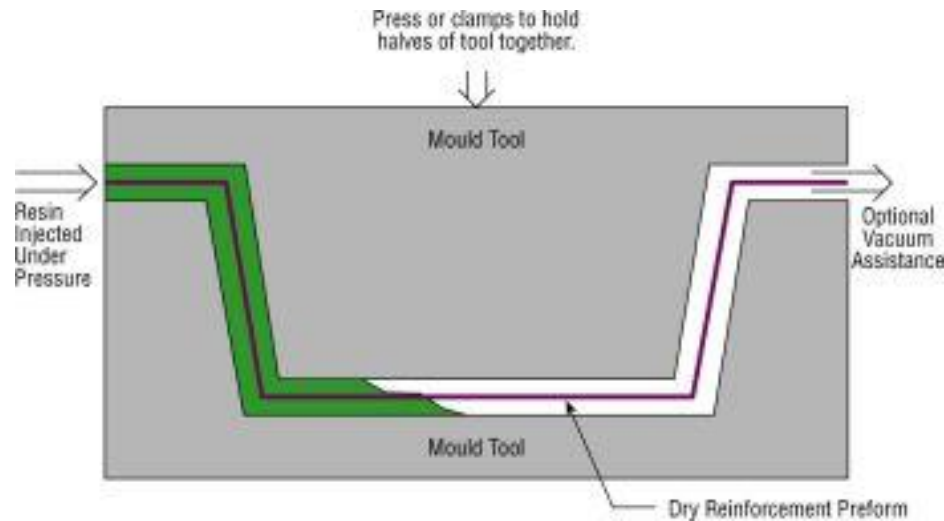


Processos de fabrico de PMCs (12)

- 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;
- início 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!

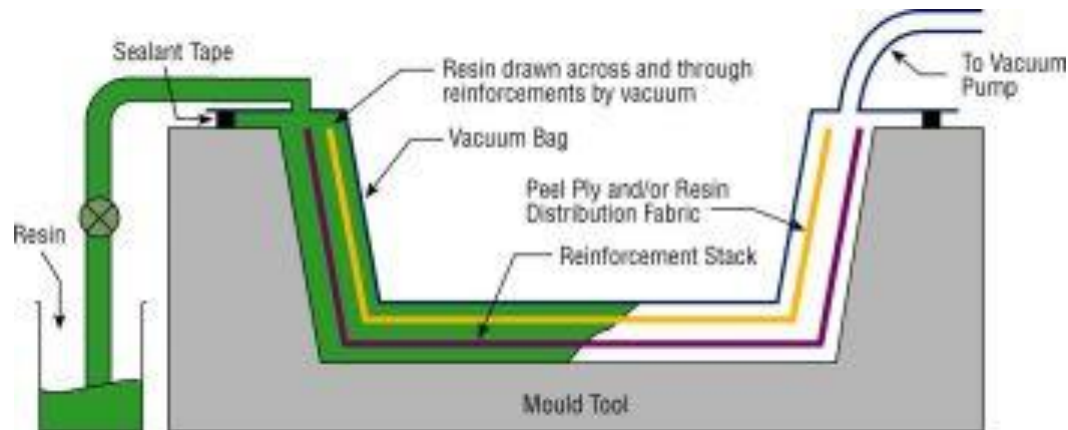
Processos de fabrico de PMCs (13)

- RTM \equiv Resin Transfer Molding



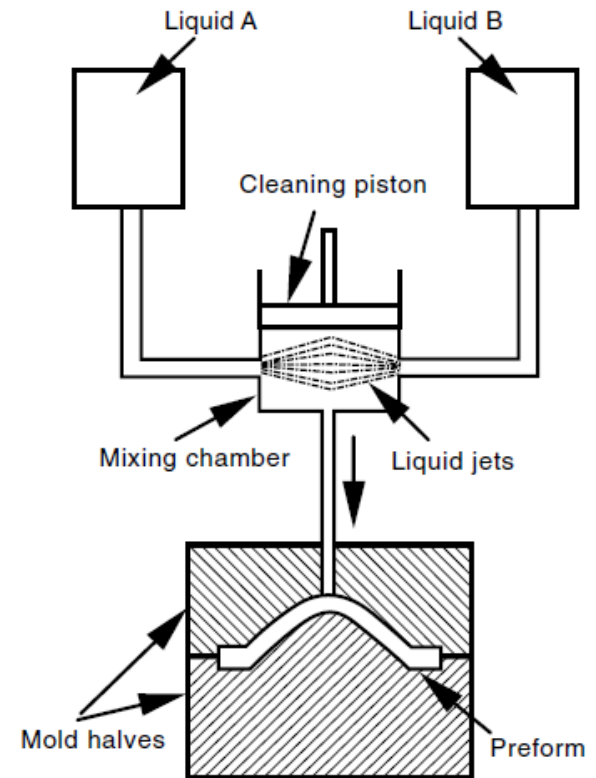
Processos de fabrico de PMCs (14)

- 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.
- Infusão:



Processos de fabrico de PMCs (15)

- Processos derivados do RTM
- **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.

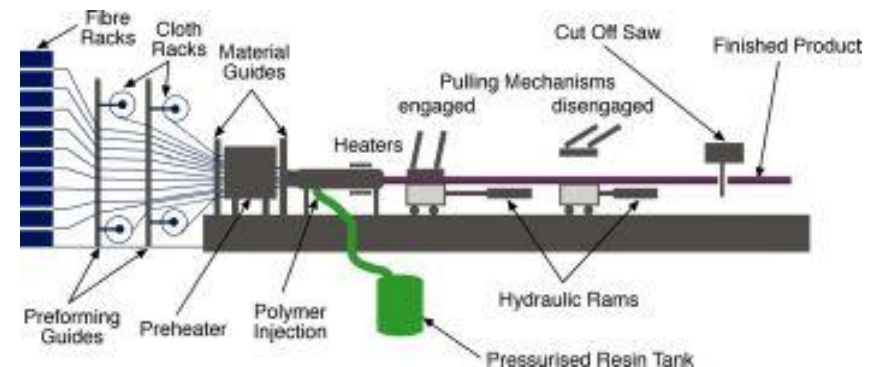


Processos de fabrico de PMCs (16)

- Processos derivados do RTM
- **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 (17)

- 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.

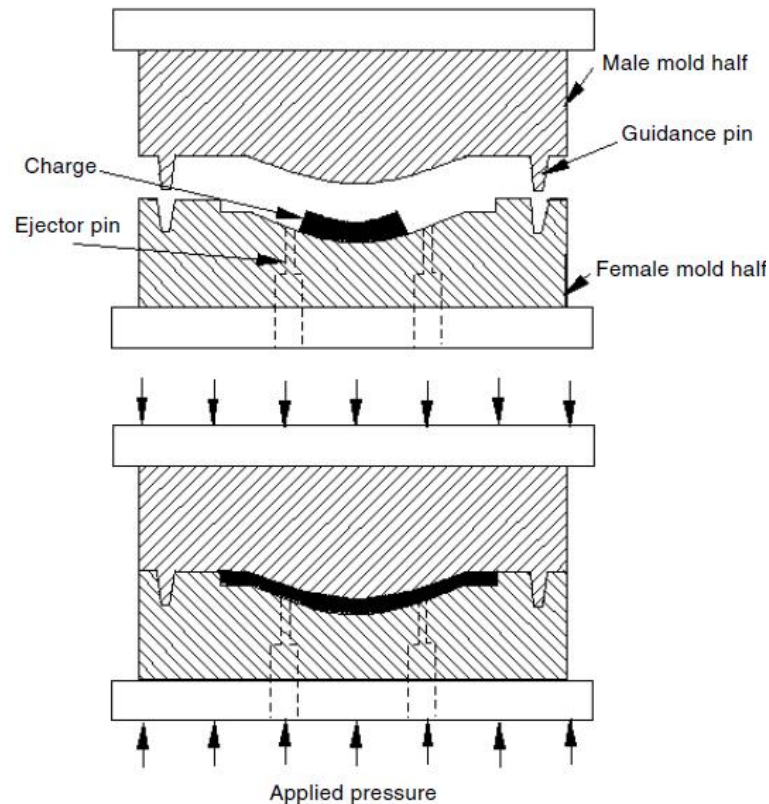


Processos de fabrico de PMCs (18)

- **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 fabrico de PMCs (19)

- Moldagem por compressão (compression molding)



Processos de ligação de PMCs (1)

- 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 actuantes 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 (2)

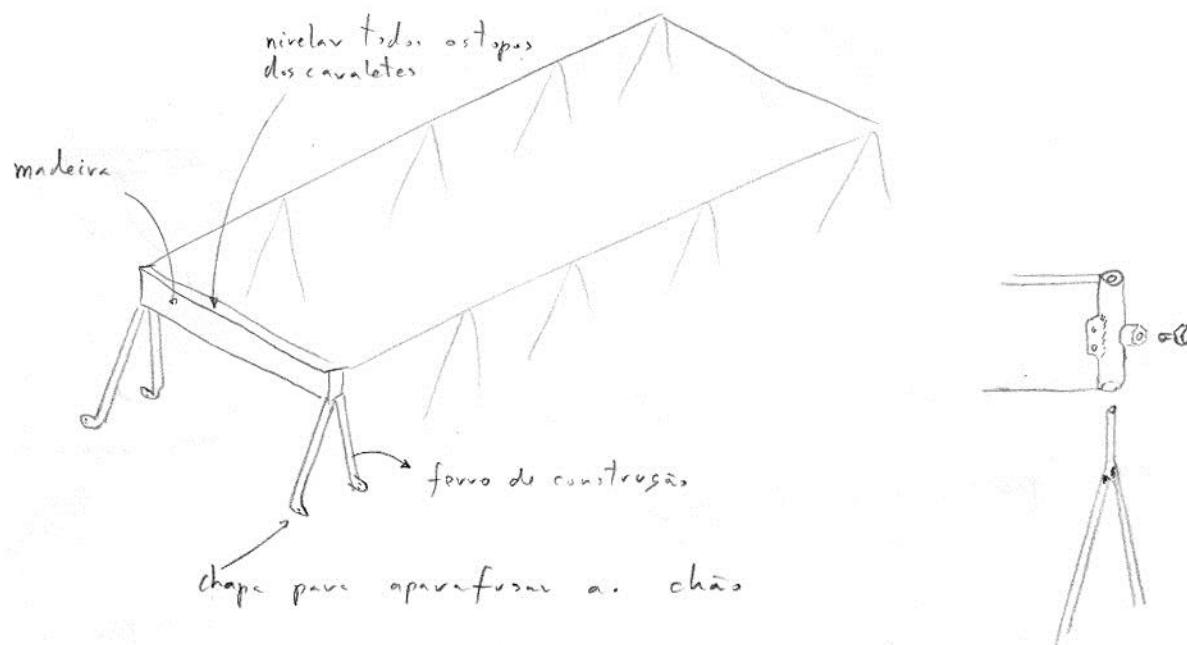
- Juntas aparafusadas/rebitadas

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

Técnicas construtivas

Fabricação de modelos (1)

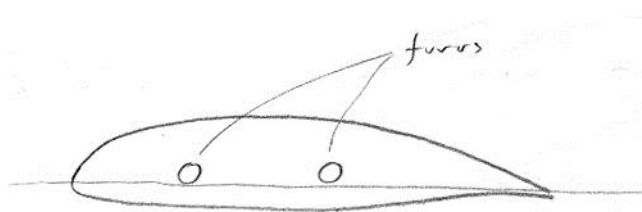
- Asas e empenagens
- 1. Projetar o modelo
- 2. Montar o estaleiro



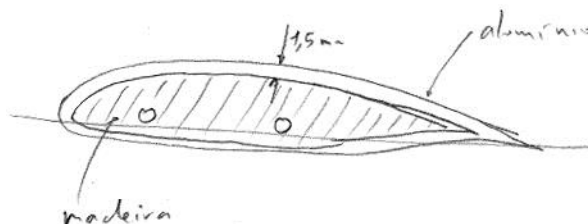
Técnicas construtivas

Fabricação de modelos (2)

- 3. Fabricar modelos de nervuras em alumínio com espessura de 3mm.



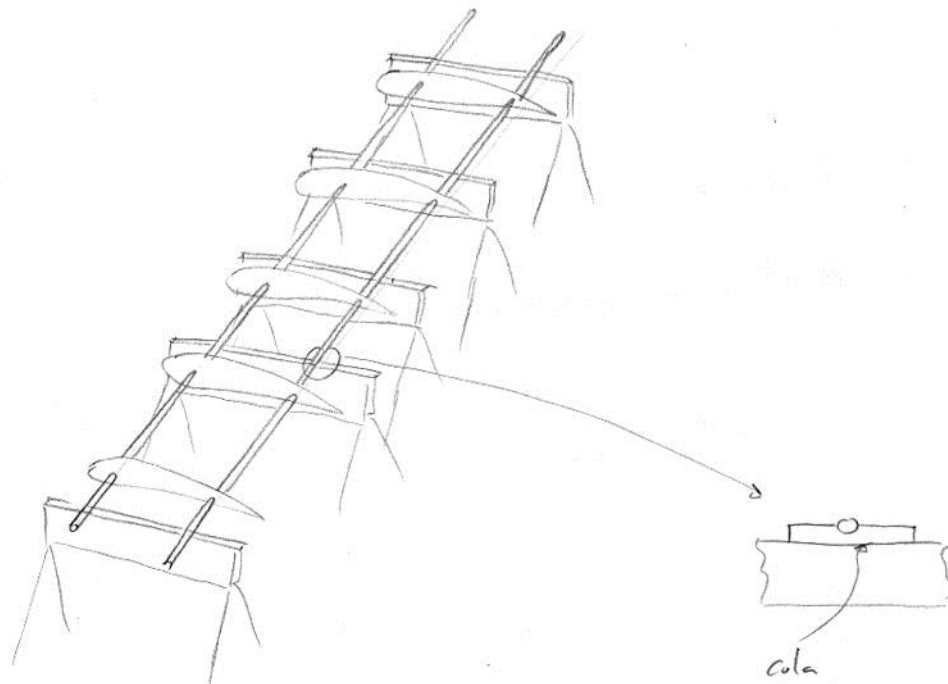
- 4. Colocar pedaços de madeira (com espessura de 10mm) em ambos os lados do alumínio com uma folga no perímetro de cerca de 1,5mm.



Técnicas construtivas

Fabricação de modelos (3)

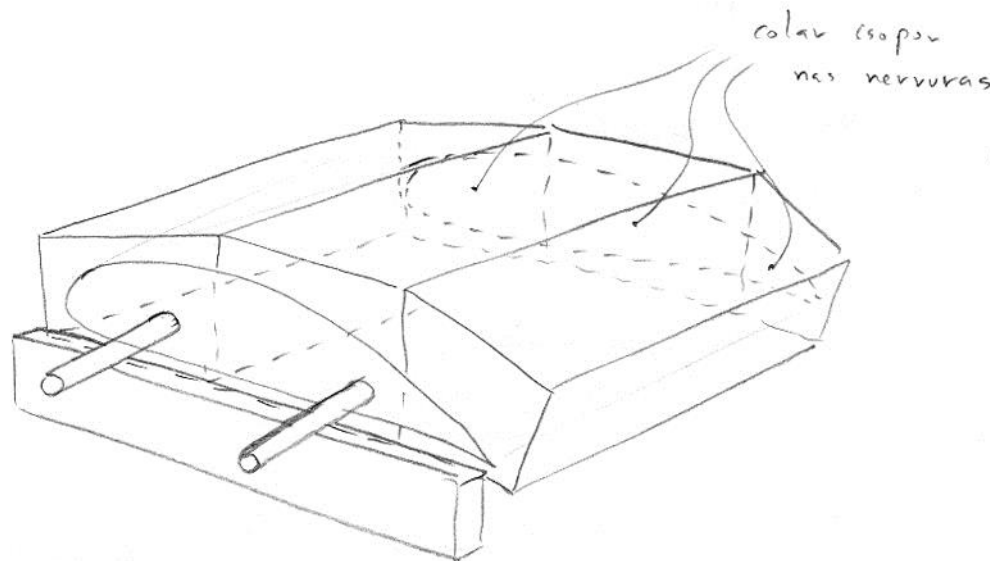
- 5. Montar o conjunto de nervuras no estaleiro.



Técnicas construtivas

Fabricação de modelos (4)

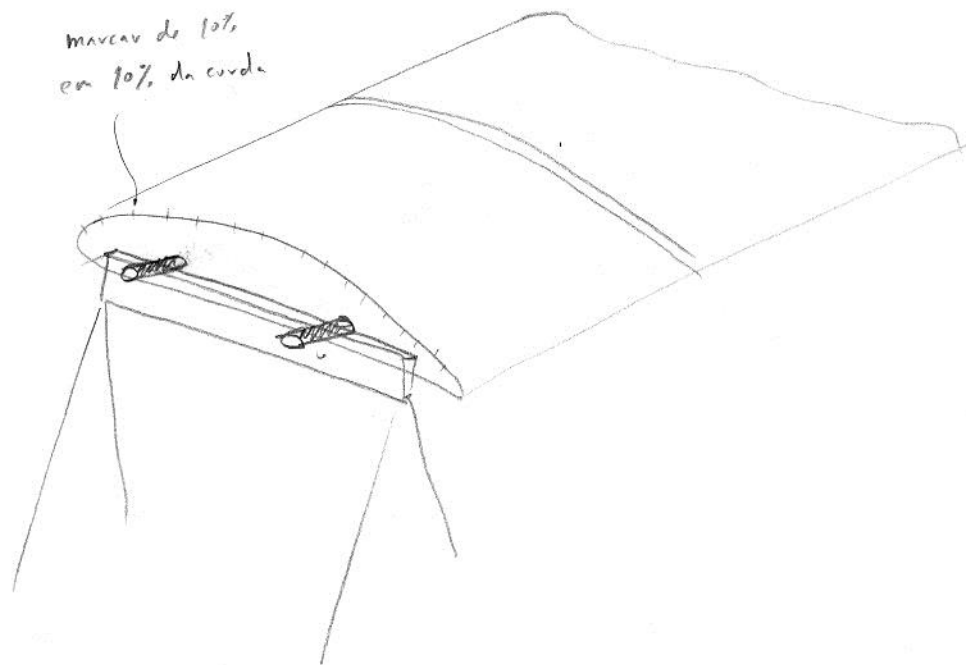
- 6. Encher os espaços entre os modelos das nervuras com espuma de poliestireno.



Técnicas construtivas

Fabricação de modelos (5)

- 7. Cortar o excesso de espuma com fio quente.



Técnicas construtivas

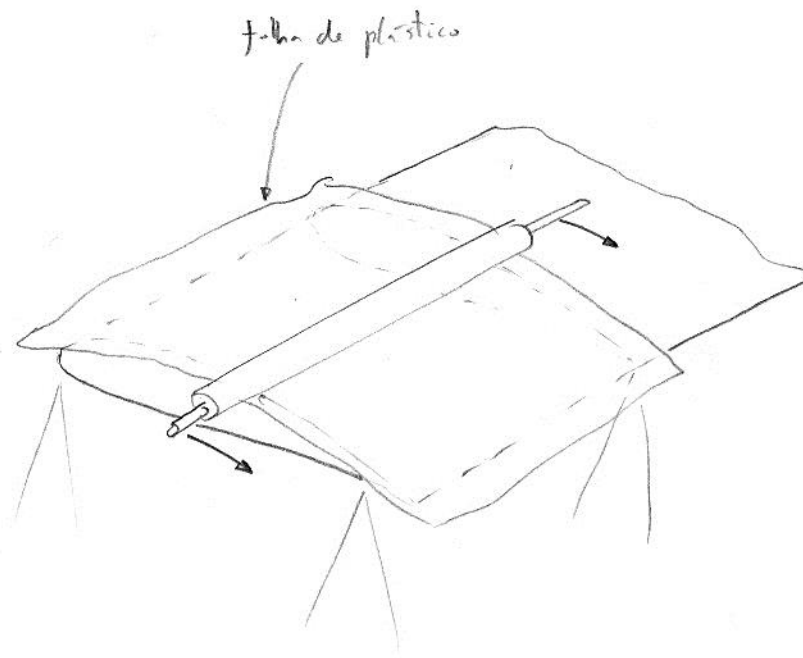
Fabricação de modelos (6)

- 8. Lixar a superfície de espuma.
- Aplicar uma camada de fibra de vidro sobre a espuma lixada (usar resina epoxy pois a resina de poliéster pode atacar a espuma).
- Fabricar um rolo com mancais de bronze com tamanho maior do que a distância entre as nervuras.
- Preparar uma mistura de resina com micro-esferas ocas (microballoons).
- Aplicar a mistura sobre a asa e entre as nervuras.
- Colocar uma folha de plástico transparente (espessura de 0,5mm) sobre a mistura.

Técnicas construtivas

Fabricação de modelos (7)

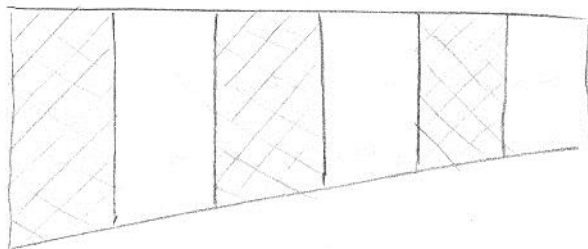
- Pessionar o rolo sobre o bordo de ataque e rolá-lo em direção ao bordo de fuga. Fazer este movimento segundo as geratrizes da região de trabalho.



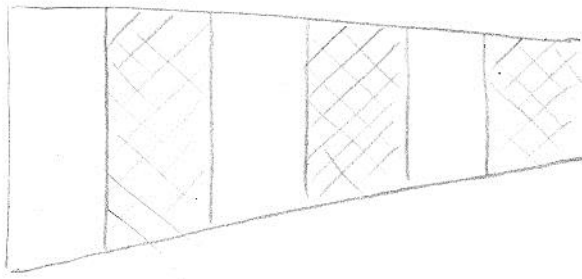
Técnicas construtivas

Fabricação de modelos (8)

- No primeiro dia fazer os gomos ímpares.



- No segundo dia fazer os gomos pares.



Técnicas construtivas

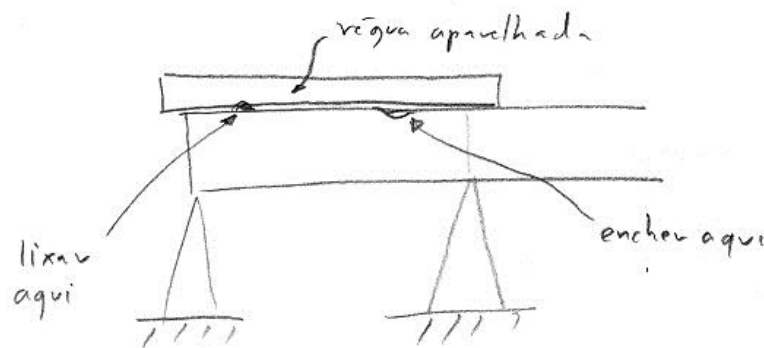
Fabricação de modelos (9)

- Só remover os plásticos após a cura da resina. A cura demora de 12 horas a 24 horas dependendo da temperatura ambiente.
- Nota: A resina epoxy demora cerca de 24 horas a endurecer a 20°C podendo ser manipulada mas as suas propriedades mecânicas máximas só se atingem ao fim de uma a duas semanas.
- Nota: Para acelerar o endurecimento da resina pode aumentar-se a temperatura de cura tendo em atenção os limites de temperatura de todos os materiais que são usados.

Técnicas construtivas

Fabricação de modelos (10)

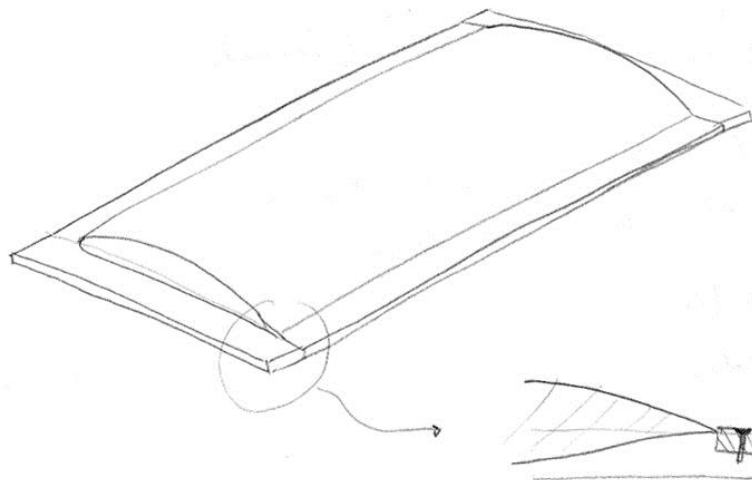
- 9. Colocar uma régua sobre as geratrizes da peça para verificara qualidade da superfície.
- Lixar as zonas altas.
- Preencher as zonas baixas com micro-esferas.
- Repetir a operação até a superfície ficar lisa.



Técnicas construtivas

Fabricação de modelos (11)

- 10. Colocar um beiral de madeira ao longo do perímetro do modelo.



- Aplicar betume
- Lixar com lixa de água
- Pintar
- Polir

Técnicas construtivas

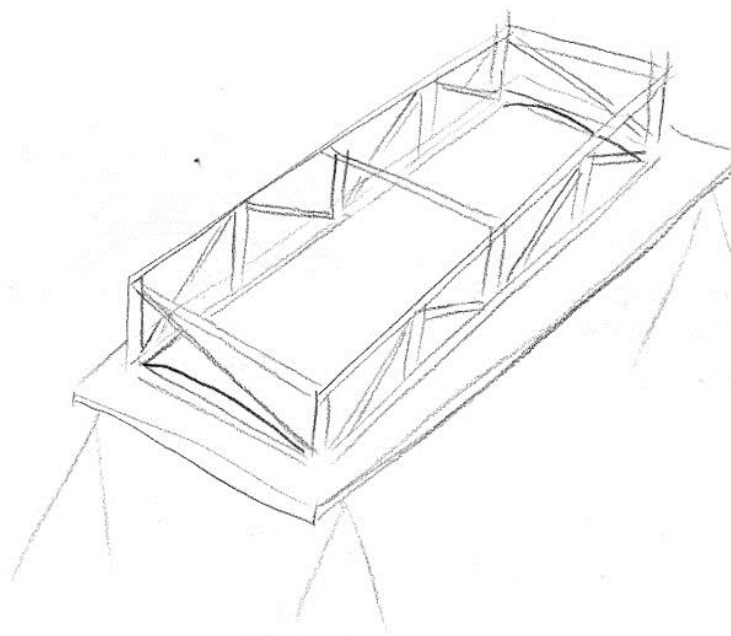
Molde do extradorso (1)

- 1. Aplicar desmoldante sobre o molde.
- álcool polivinílico (PVA) - 3 camadas
- cera e polimento - 3 vezes
- 2. Aplicar uma camada de resina.
- Aplicar uma camada de fibra de vidro sobre esta resina (o tecido já foi cortado previamente)
- Aplicar resina sobre a camada de tecido. Remover o excesso com uma espátula e onde houver escassez aplicar mais resina batendo com o pincel redondo (diâmetro de cerca de 25 mm)
- Repetir esta operação colocando mais 2 camadas de tecido
- Repetir esta operação colocando mais 3 camadas de manta de fibra de vidro.
- Repetir a operação com mais 1 camada de tecido

Técnicas construtivas

Molde do extradorso (2)

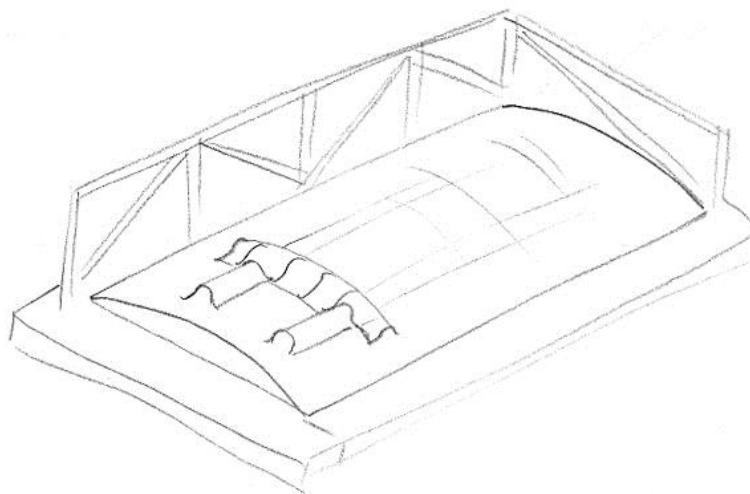
- 3. Fabricar uma estrutura de tubos de aço (com secção retangular) para servir de base para o molde.
- Colocar a estrutura no molde usando pedaços de fibra de vidro e resina epoxy.



Técnicas construtivas

Molde do extradorso (3)

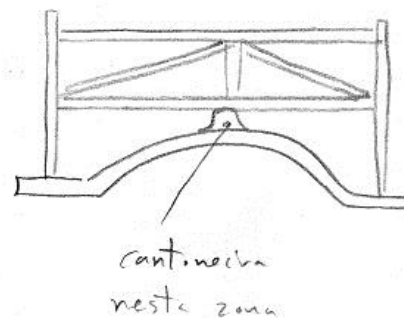
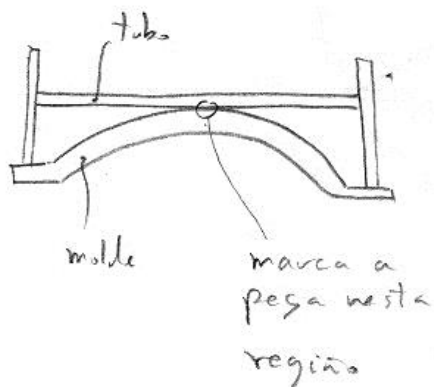
- 4. Fabricar cantoneiras de fibra de vidro para reforçar o molde.



Técnicas construtivas

Molde do extradorso (4)

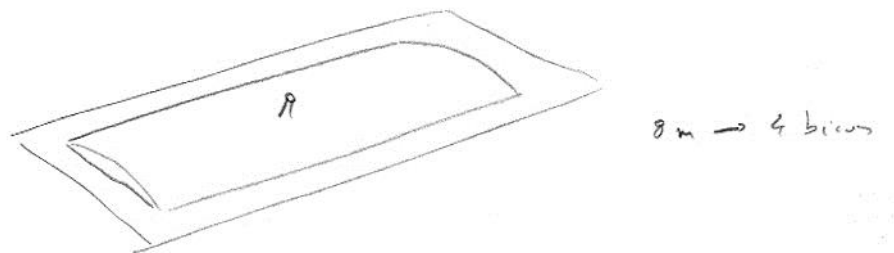
- Nota: evitar que a estrutura metálica toque no molde em zonas que a peça é executada para evitar que a peça fique marcada pela estrutura (defeituosa).



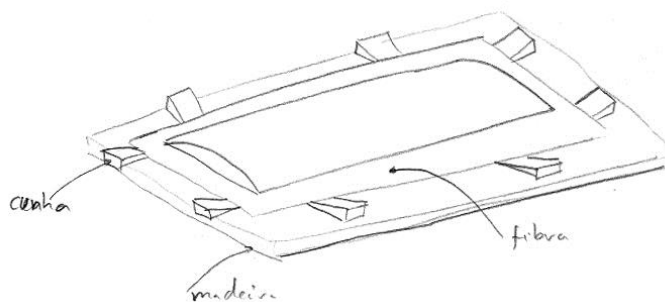
Técnicas construtivas

Molde do extradorso (5)

- 5. Desmoldar o molde do modelo.
- Deixar uma entrada de ar (válvula de câmara de ar, por exemplo) no molde para injetar ar comprimido



- Colocar cunhas ao longo do perímetro da peça e forçar





UBI
Covilhã
Portugal

Técnicas construtivas

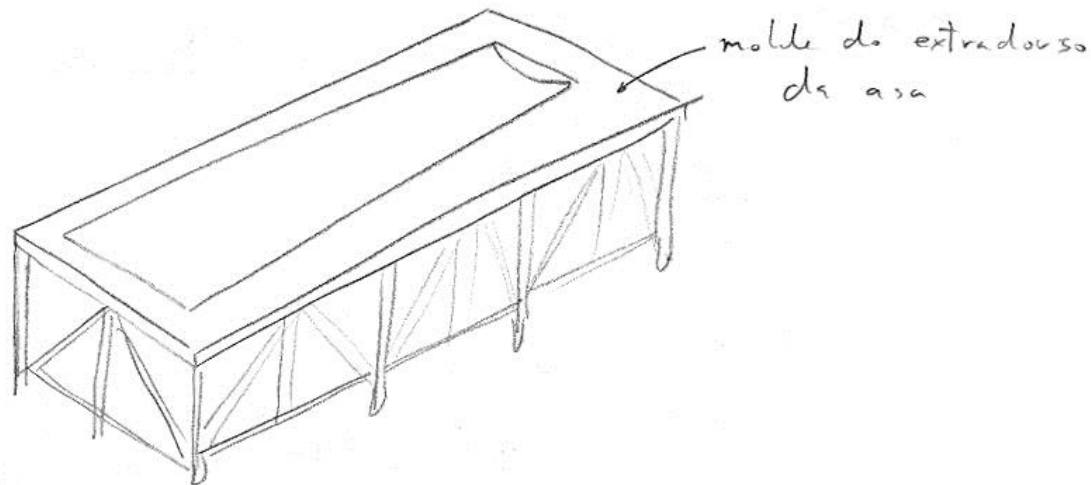
Molde do extradorso (6)

- 6. Voltar o molde para a sua posição.
- Nota: O modelo e o molde do intradorso são feitos do mesmo modo que os do extradorso.

Técnicas construtivas

Fabricação da asa (1)

- 1. Lavar o molde com água e sabão.
- Secar o molde (com ar comprimido)



Técnicas construtivas

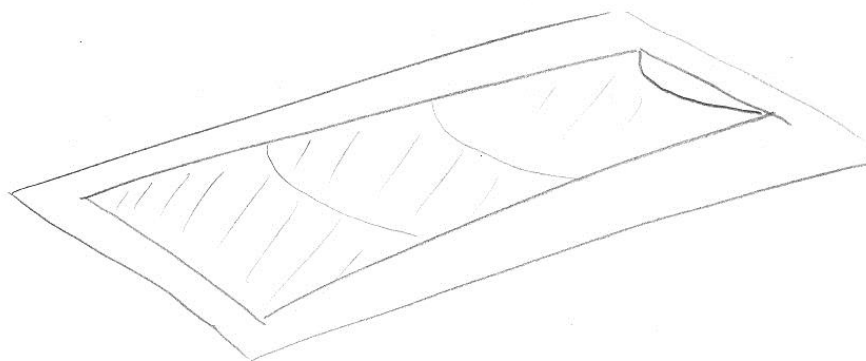
Fabricação da asa (2)

- 2. Aplicar o desmoldante.
- Álcool polivinílico - 3 camadas a pincel e esperar que seque
- Cera - aplicar talco e polir com pano macio 3 vezes
- 3. Recortar os tecidos de fibra de vidro/carbono/kevlar de acordo com a geometria e área desejadas.
- Recortar as placas de epuma de PVC (ou outro material) ajustando a sua forma à desejada paa fazer os núcleos da sandwich
- 4. Aplicar uma camada de resina (feita com resina e endurecedor nas proporções indicadas na ficha técnica). Este passo é feito por partes.

Técnicas construtivas

Fabricação da asa (3)

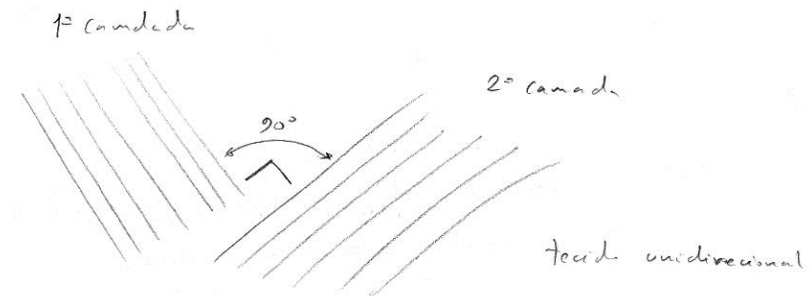
- Colocar a primeira peça de tecido sobre o molde e assentá-la com as mãos (usar luvas de plástico para proteção).
- A resina preparada na altura é lançada sobre o tecido (pesar a peça recortada no tecido e preparar a mesma quantidade em peso de resina)
- Espalhar a resina sobre o tecido usando espátulas (de nylon). Em pontos onde houver falta de embebimento de resina usar um pincel redondo batendo-o no local



Técnicas construtivas

Fabricação da asa (4)

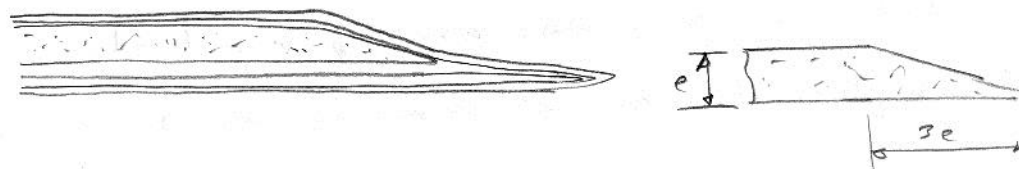
- 5. Aplicar resina sobre o molde no local onde se vai colocar a segunda peça de tecido.
- Colocar a segunda peça de tecido ao lado da primeira com uma sobreposição de 50mm e repetir o processo de aplicação da resina.
- Repetir o processo até que todo o molde esteja coberto com a primeira camada de tecido.
- 6. Voltar à raiz da asa, repetindo o processo e aplicando a segunda camada de tecido com as fibras orientadas 90° em relação à primeira camada.



Técnicas construtivas

Fabricação da asa (5)

- 7. Repetir o processo até o número de camadas indicado ser atingido.
- 8. Passar resina com micro-esferas na parte inferior das espumas (o mínimo possível).
- Colocar as placas de espuma (PVC) sobre as camadas anteriores de tecido (o perímetro do conjunto de placas é chanfrado para permitir melhor aderência dos tecidos)



- Aplicar resina misturada com micro-esferas ocas sobre a face superior das placas.

Técnicas construtivas

Fabricação da asa (6)

- Nota: A adição de micro-esferas à resina epoxy aumenta o seu volume, baixando a densidade da resina. Desta forma pode colar-se zonas extensas sem grande penalização no peso.
- Nota: A adição de várias cargas como micro-esferas, silício, etc. resulta em colas estruturais de alta resistência e baixo peso.
- Nota: A mistura da resina epoxy com o endurecedor tem que ser feita nas proporções exatas especificadas na ficha técnica, caso contrário as propriedades mecânicas da mesma ficam comprometidas e muitas vezes a cura tem se processa normalmente.

Técnicas construtivas

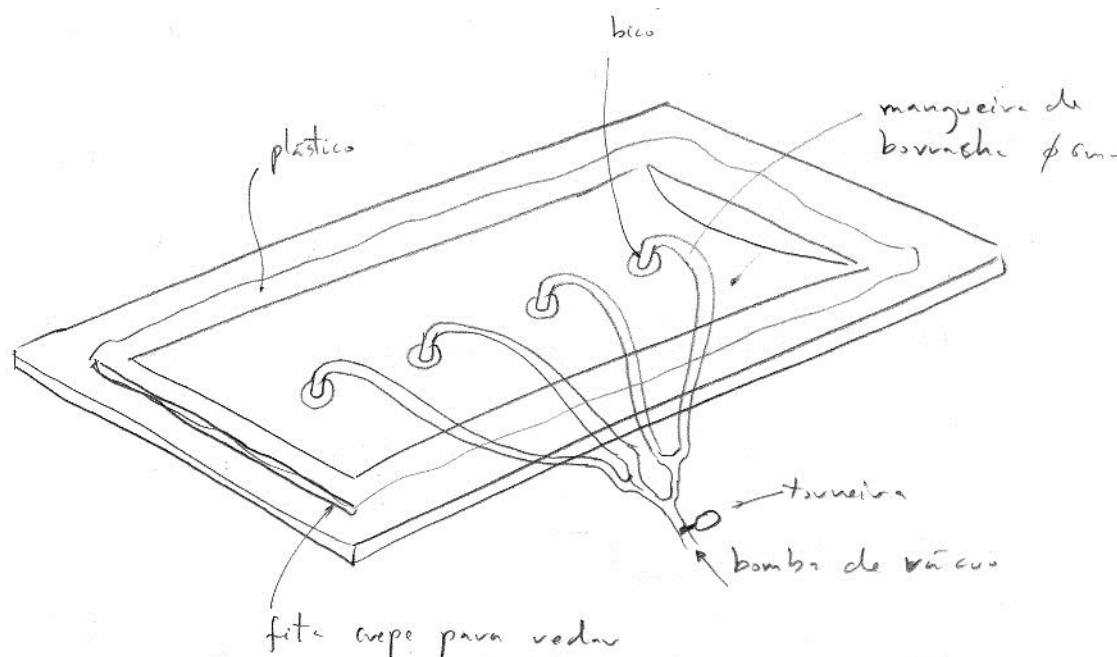
Fabricação da asa (7)

- 9. Aplicar uma (ou mais, conforme o projeto) camada de tecido e resina sobre a espuma.
- 10. Colocar uma camada de plástico perfurado sobre o conjunto (antes pode colocar-se peel-ply para permitir colagens posteriores).
- Nota: A colagem com resina epoxy requer que as duas superfícies de colagem estejam baças e com alguma rugosidade.

Técnicas construtivas

Fabricação da asa (8)

- 11. Colocar manta absorvente sobre toda a peça. Cobrir com plástico de vácuo contendo bicos de sucção por bomba de vácuo.



Técnicas construtivas

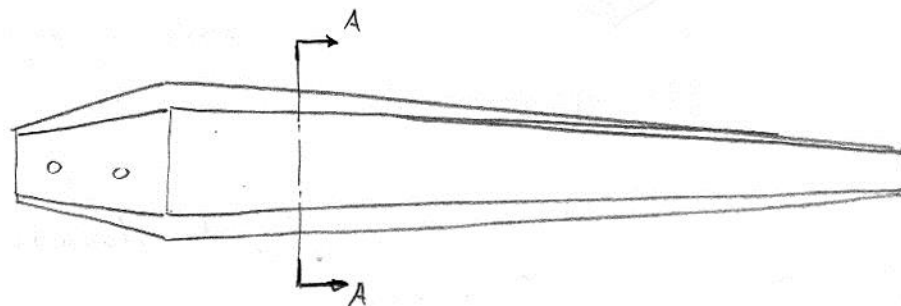
Fabricação da asa (9)

- Manter a bomba de vácuo ligada durante aproximadamente 8 horas.
- Desligar a bomba e fechar a torneira.
- Aguardar 16 horas.
- 12. Remover o plástico, a manta absorvente e o plástico perfurado (e o peel-ply).
- 13. Desmoldar a peça (usar cunhas e/ou ar comprimido)
- Colocar a peça de novo no molde para não deformar.
- Nota: O intradorso da asa processa-se da mesma forma.

Técnicas construtivas

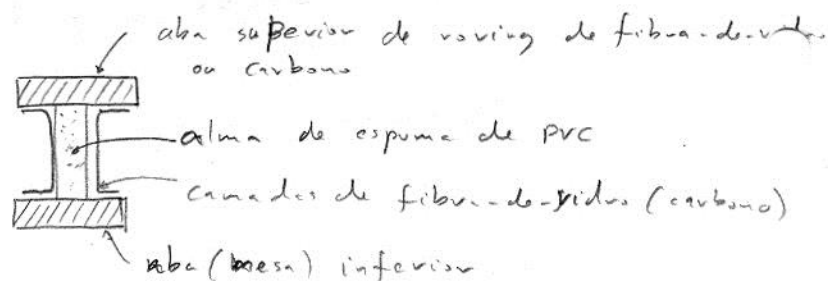
Fabricação da longarina (1)

- Constituição da longarina



SECÇÃO AA

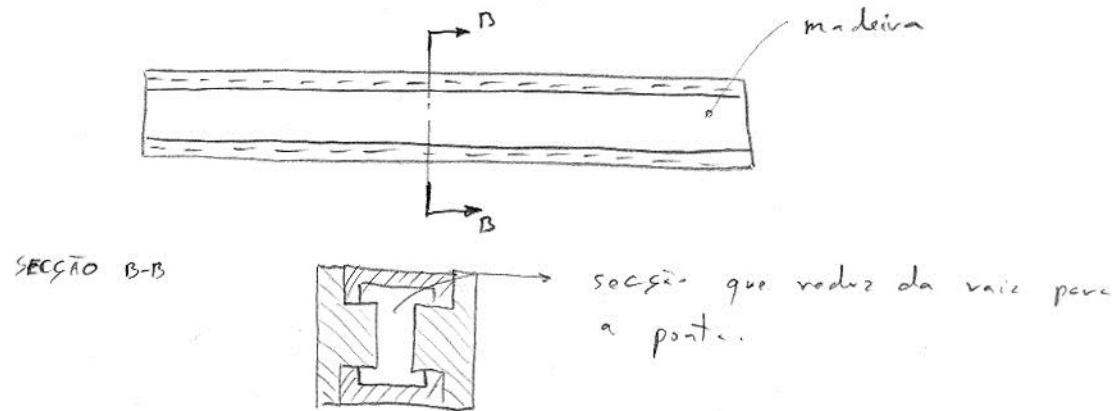
- secção em I



Técnicas construtivas

Fabricação da longarina (2)

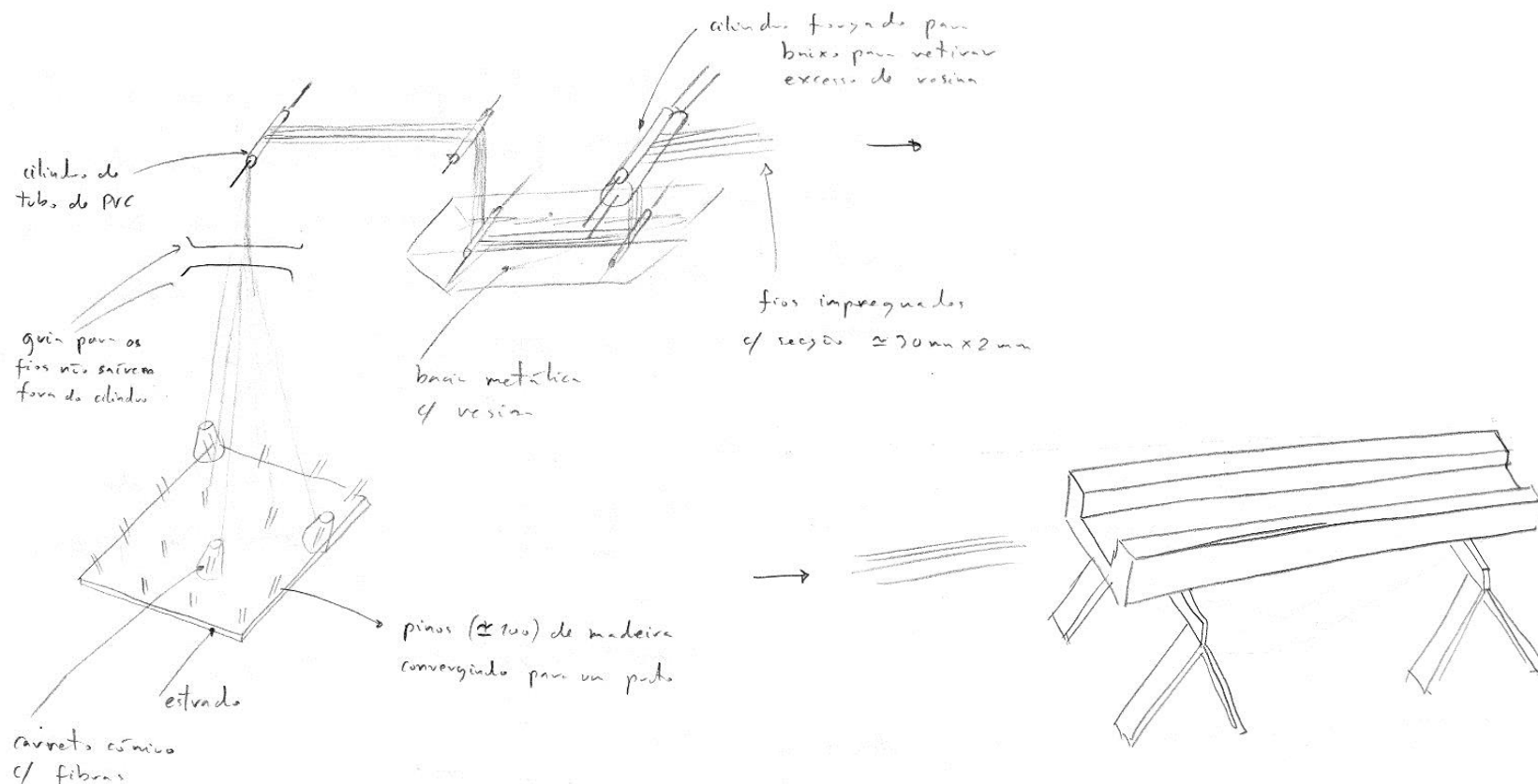
- Molde da longarina



Técnicas construtivas

Fabricação da longarina (3)

- Máquina de “roving”



Técnicas construtivas

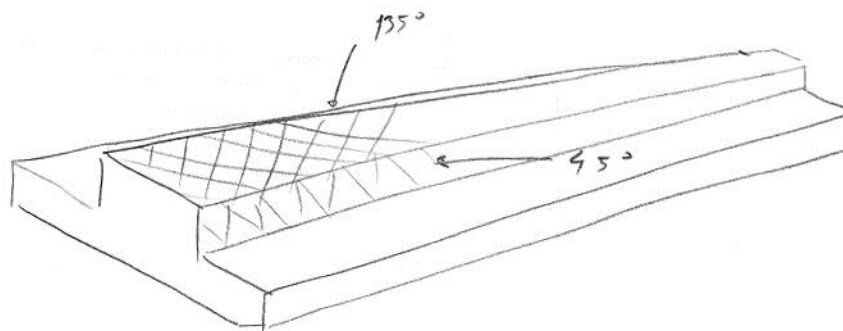
Fabricação da longarina (4)

- 1. Aplicar desmoldante nos moldes das mesas.
- Puxar tiras de fibra impregnada e depositar sobre a cavidade do molde.
- A região da ponta, por ter secção menor, terá a sua cavidade preenchida primeiro. Nas aplicações seguintes de roving é preciso interromper antes de chegar à extremidade do molde. Procede-se desta forma até encher todo o molde.
- Cobrir toda a parte com uma camada de fibra de vidro que ficará incorporada na peça.

Técnicas construtivas

Fabricação da longarina (5)

- 2. Aplicar desmoldante nos moldes da alma.
- Laminar tecidos sobre os moldes.

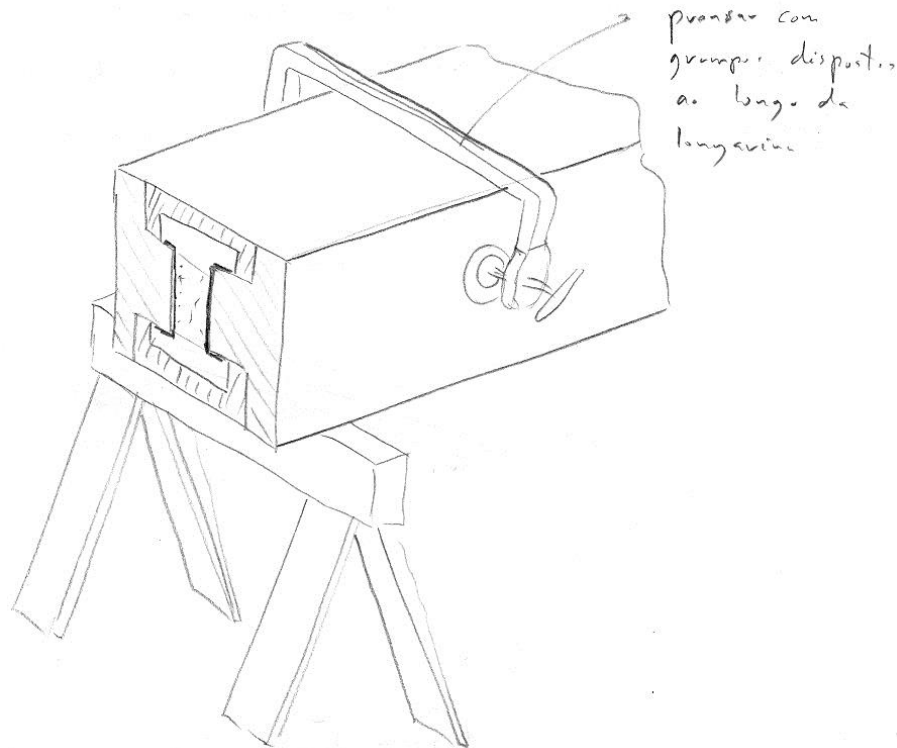


- 3. Passar uma camada de resina com micro-esferas nas duas faces das placas de PVC que farão parte da alma da longarina.
- Colocar as placas de PVC sobre um dos moldes da alma.

Técnicas construtivas

Fabricação da longarina (6)

- 4. Fechar o conjunto.

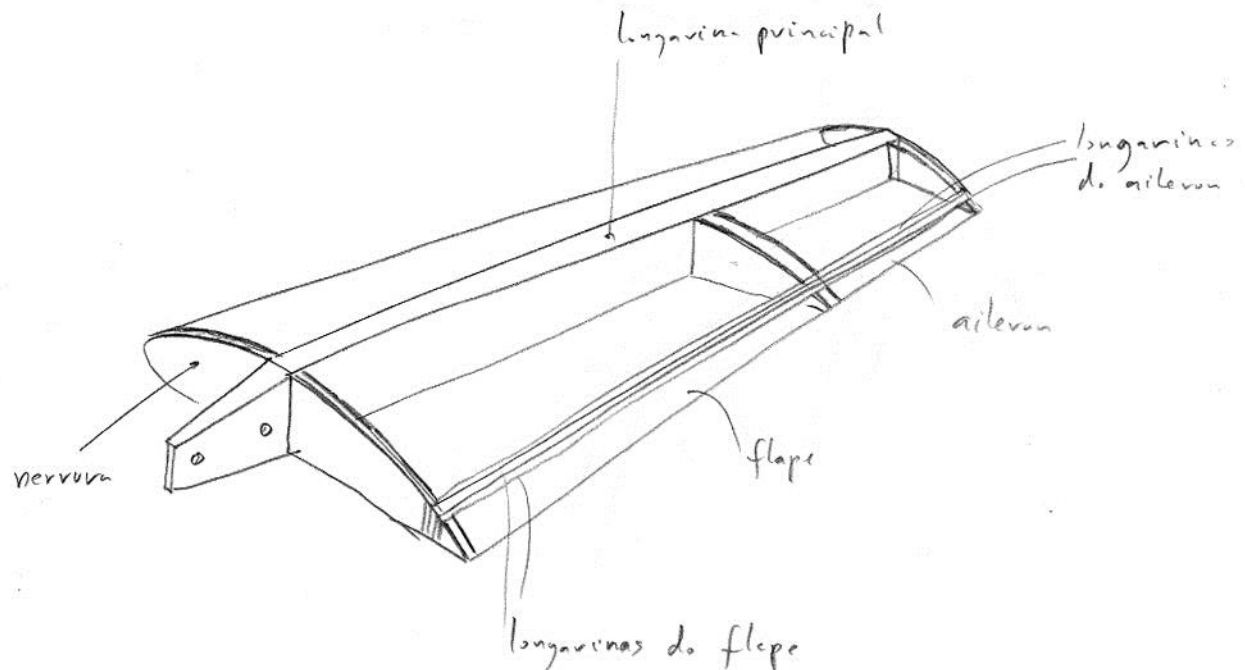


- 5. Aguardar que cure.
- Desmoldar.

Técnicas construtivas

Fabricação de nervuras (1)

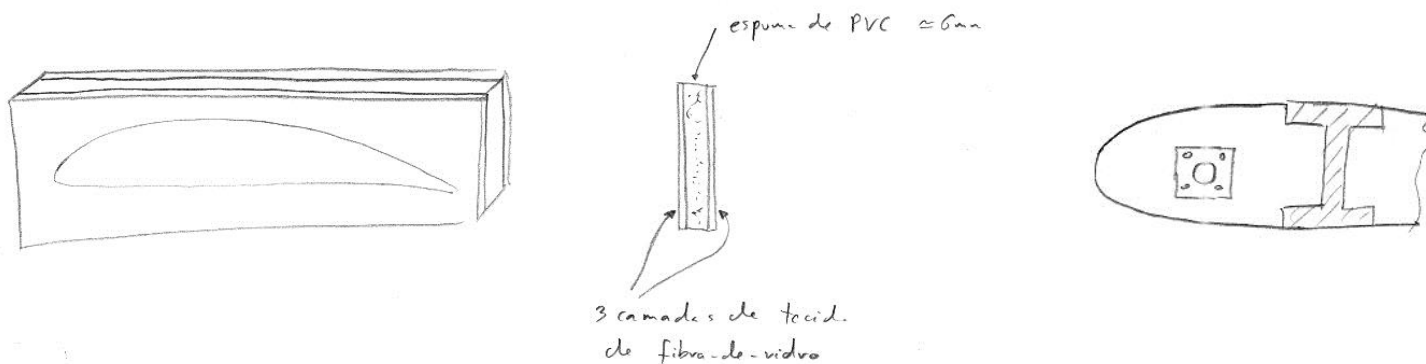
- As nervuras são colocadas no interior da casca para manter a forma da asa, dar estabilidade à casca e transmitir esforços mais concentrados.



Técnicas construtivas

Fabricação de nervuras (2)

- 1. Fazer a sandwich e desenhar a nervura.
- Incluir dentro da sandwich algum reforço para pontos duros (usando madeira maciça por exemplo)



- 2. Recortar a nervura com uma serra tico-tico.



Técnicas construtivas

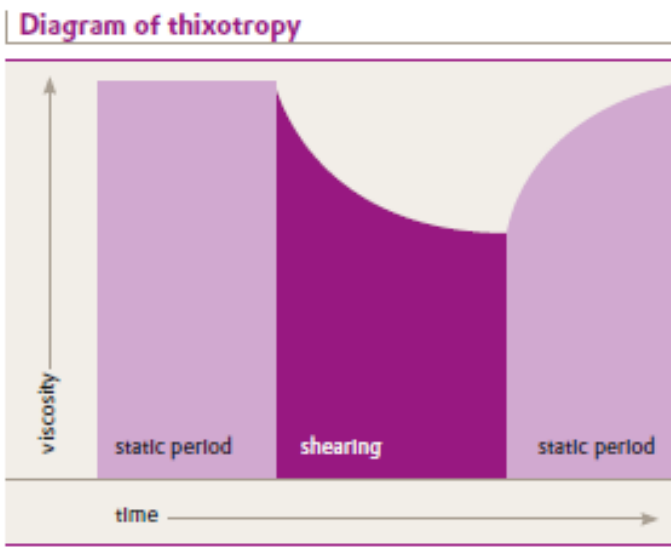
Montagem da asa (1)

- 1. Reunir todas as peças.
- Longarina principal
- Longarinas auxiliares
- Nervuras
- Ferragens
- 2. Marcar a projeção da longarina principal sobre a parte interna da casca do extradorso.
- Fazer o mesmo para as longarinas auxiliares e as nervuras.
- 3. Desengordurar as regiões de colagem (usar acetona)
- Fazer mistura de epoxy com silício coloidal (torna a resina menos viscosa quando mexida) - AEROSIL® ou SILICELL®

Técnicas construtivas

Montagem da asa (2)

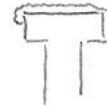
- Nota: a mistura de silício coloidal na epoxi torna a mistura toxitrópica (baixa a sua viscosidade quando mexida) permitindo a sua fácil aplicação sem que escorra posteriormente.



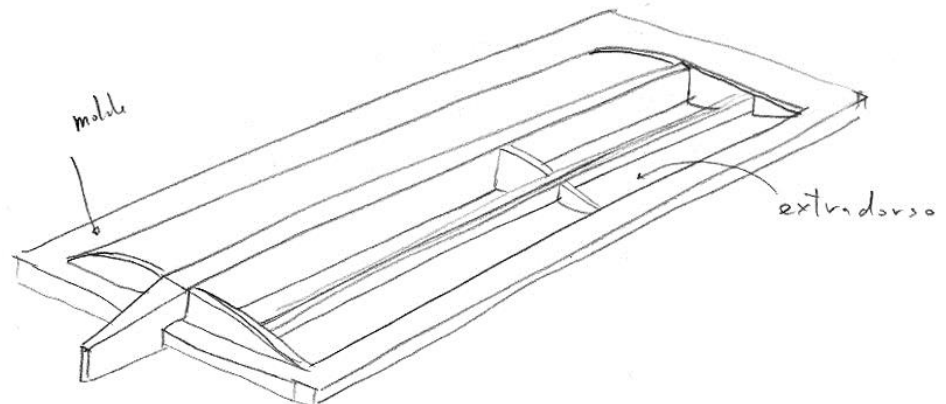
Técnicas construtivas

Montagem da asa (3)

- Aplicar uma camada espessa de mistura na região do extradorso onde se colocará a longarina
- Aplicar uma camada fina de mistura na superfície de colagem da longarina



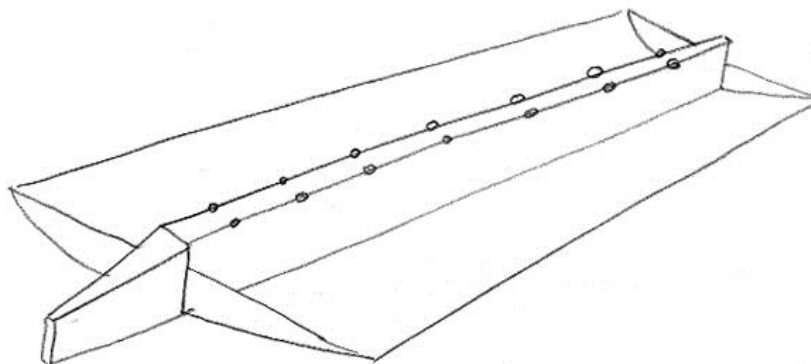
- Colocar a longarina no extradorso
- Colocar pesos sobre a longarina
- Aguardar que cure



Técnicas construtivas

Montagem da asa (4)

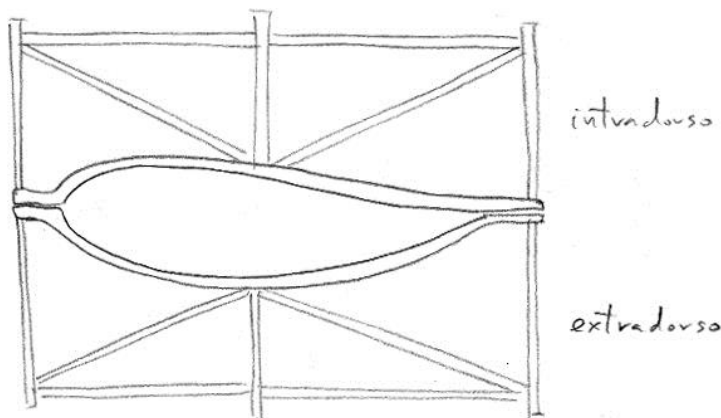
- 4. Repetir o processo para as longarinas auxiliares, nervuras, etc..
- Instalar todas as ferragens e tubos dos sistemas de comando
- 5. Colocar massas de material plástico (pastilha elástica ou bostik, por exemplo) sobre a longarina.



Técnicas construtivas

Montagem da asa (5)

- Colocar o molde do intradorso com a casca do intradorso dentro sobre o molde do extradorso

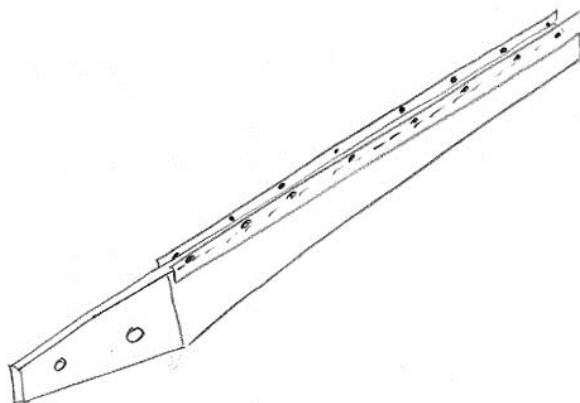


- As bolas de massa plástica vão achatar
- Retirar o molde do intradorso

Técnicas construtivas

Montagem da asa (6)

- 6. Colar fita crepe ao longo da longarina, de ambos os lados, obedecendo às alturas das bolas achatadas da massa plástica.

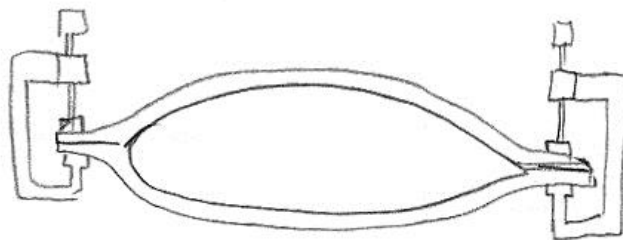


- Retirar a massa plástica
- Desengordorar as superfícies
- Encher o espaço entre as duas fitas crepe com resina epoxy com silício coloidal

Técnicas construtivas

Montagem da asa (7)

- 7. Passar resina com silício coloidal em todas as regiões de contacto (sempre nas duas superfícies de colagem).
- Juntar o intradorso ao extradorso
- Fixar os dois moldes com grampos



Técnicas construtivas

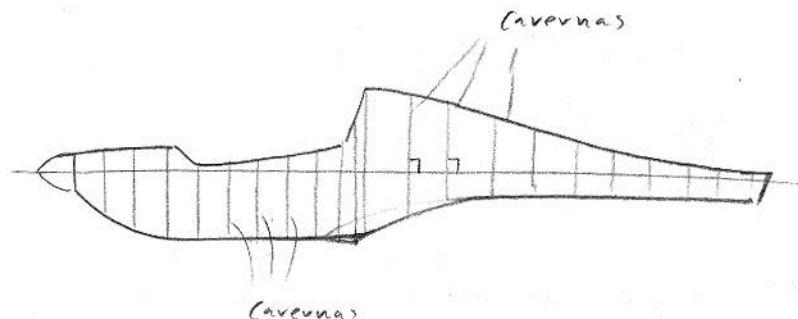
Montagem da asa (8)



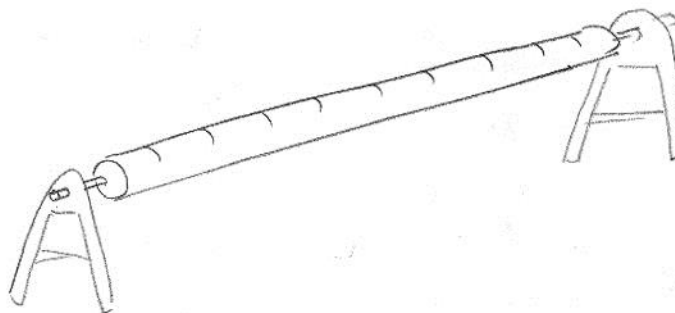
Técnicas construtivas

Construção da fuselagem (1)

- 1. A partir de desenhos da fuselagem obter a geometria das cavernas.



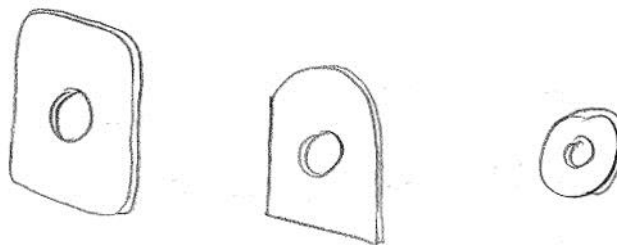
- 2. Providenciar um tubo de alumínio e traçar no mesmo a posição das secções retas e cavernas.



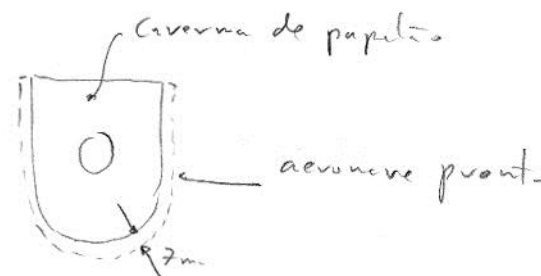
Técnicas construtivas

Construção da fuselagem (2)

- 3. Fabricar as cavernas em cartão grosso ou madeira.



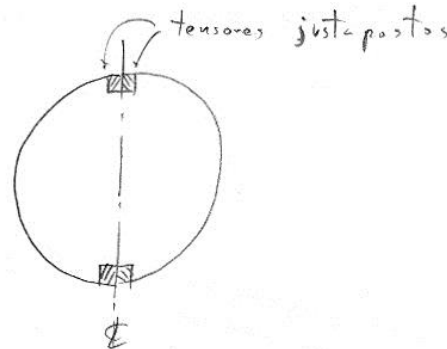
- O perímetro das cavernas é traçado cerca de 7mm para dentro do perímetro definitivo da caverna da aeronave pronta



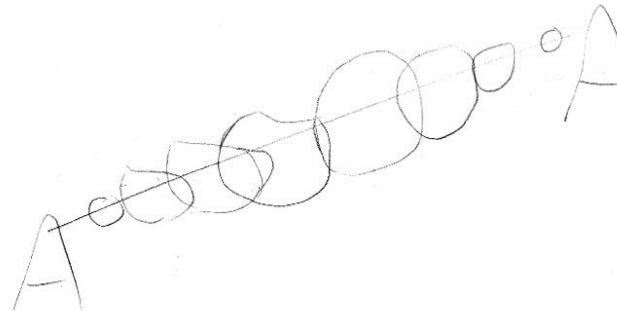
Técnicas construtivas

Construção da fuselagem (3)

- 4. Executar um rasgo nas cavernas, em cima e em baixo, para receberem tensores de madeira.



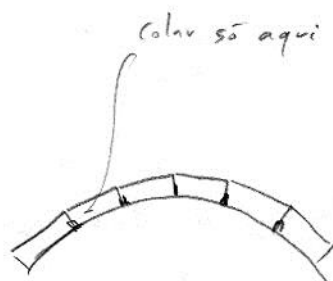
- 5. Colar as cavernas no tubo de alumínio.



Técnicas construtivas

Construção da fuselagem (4)

- 6. Revestir o conjunto com ripas de balsa (secção de 6mm x 20mm).
- Aplicar cola apenas na parte mas interna das ripas



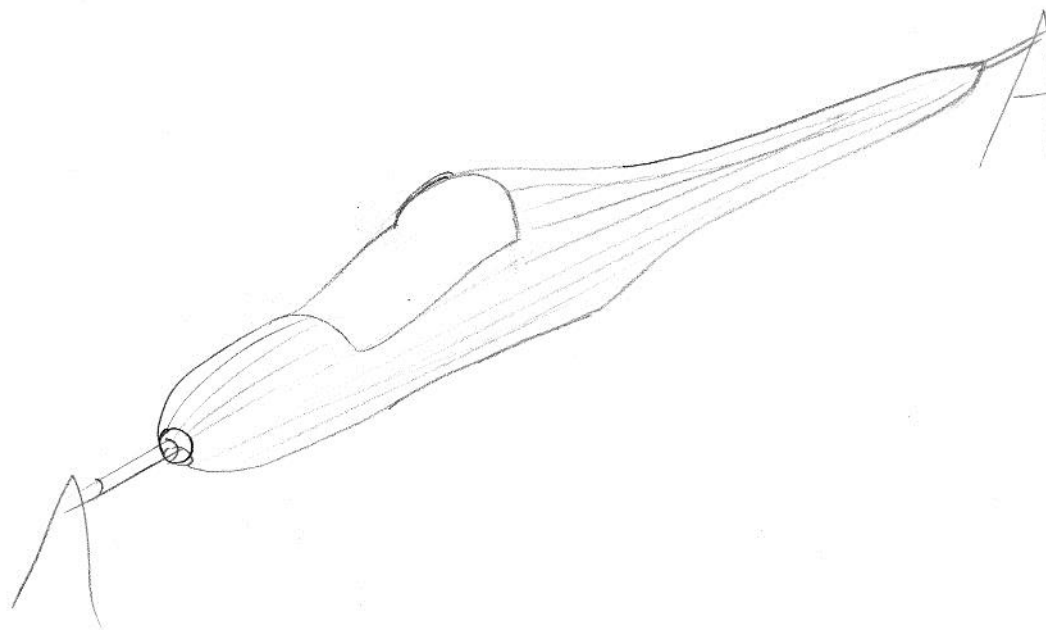
se se colar até acima
tem-se problemas ao lixar
porque a cola é de material
mais duro do que a balsa.



Técnicas construtivas

Construção da fuselagem (5)

- Lixar todo o conjunto



Técnicas construtivas

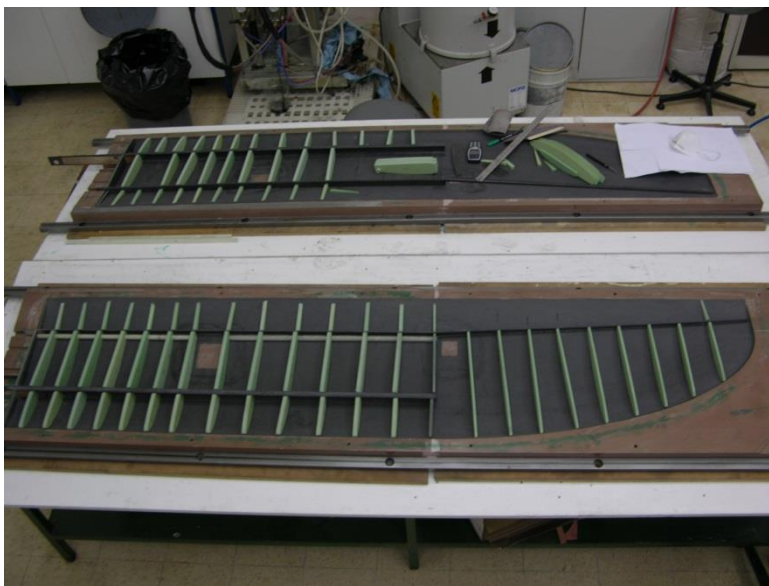
Construção da fuselagem (6)

- 7. Laminar com tecido de fibra de vidro e epoxy sobre o conjunto (o sistema é giratório o que facilita o processo) com as camadas desejadas.
- Aguardar a cura
- 8. Usando uma serra cortar o septo superior e o inferior por entre os tensores de madeira.
- Retirar as cavernas, o tubo de alumínio e a balsa
- 9. A estrutura interna pode ser adicionada posteriormente.
- Nota: este tipo de construção também pode ser usado para criar um modelo para fabrico de moldes esquerdo e direito. A fabricação das duas metades da fuselagem processa-se da mesma forma que para a asa.

Técnicas construtivas

Exemplos (1)

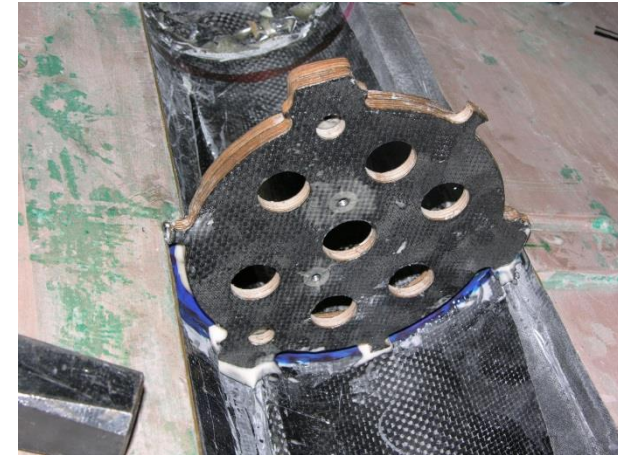
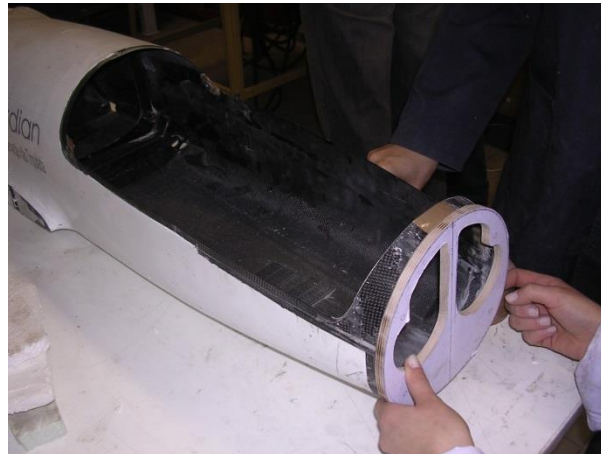
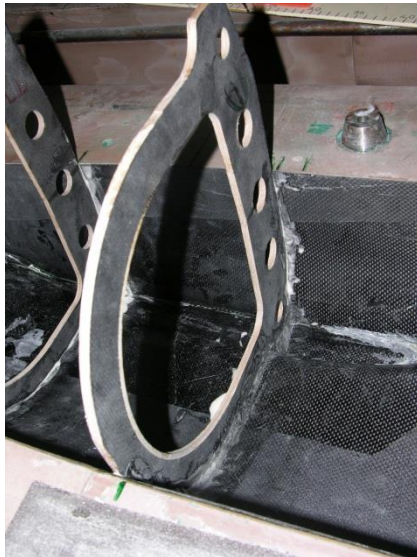
- Asa



Técnicas construtivas

Exemplos (2)

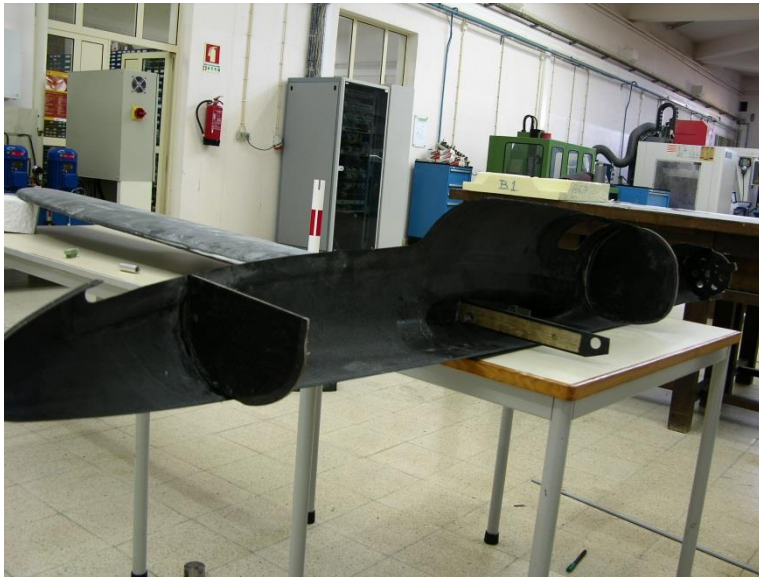
- Fuselagem



Técnicas construtivas

Exemplos (3)

- Montagem



Pintura

- As resinas epoxy são sensíveis à temperatura e à radiação ultravioleta.
- Assim, as peças e componentes em compósito devem ser pintadas com cor branca.
- A cor branca reflete a maior parte da radiação solar evitando o aquecimento do compósito.

