



MANUFATURA DE MATERIAIS COMPÓSITOS

Notas de aulas:

Prof. Sérgio Frascino Müller de Almeida



1. Introdução



O que são materiais compósitos ?

- **Materiais compósitos de uso estrutural em aeronáutica tipicamente são placas laminadas de plástico reforçado com fibras**
- **Os materiais mais comuns dessa classe são o carbono/epoxi, o vidro/epóxi e kevlar/epóxi**
- **Aviões mais modernos como o Boeing 787 e o Airbus A350 e A380 possuem um grande número de partes de materiais compósitos**



DEFINIÇÕES BÁSICAS

materiais compósitos

as fases constituintes de um compósito são:

- **reforço**: geralmente descontínua, mais rígida e mais resistente
- **matriz**: contínua e geralmente menos rígida e resistente



DEFINIÇÕES BÁSICAS

materiais compósitos

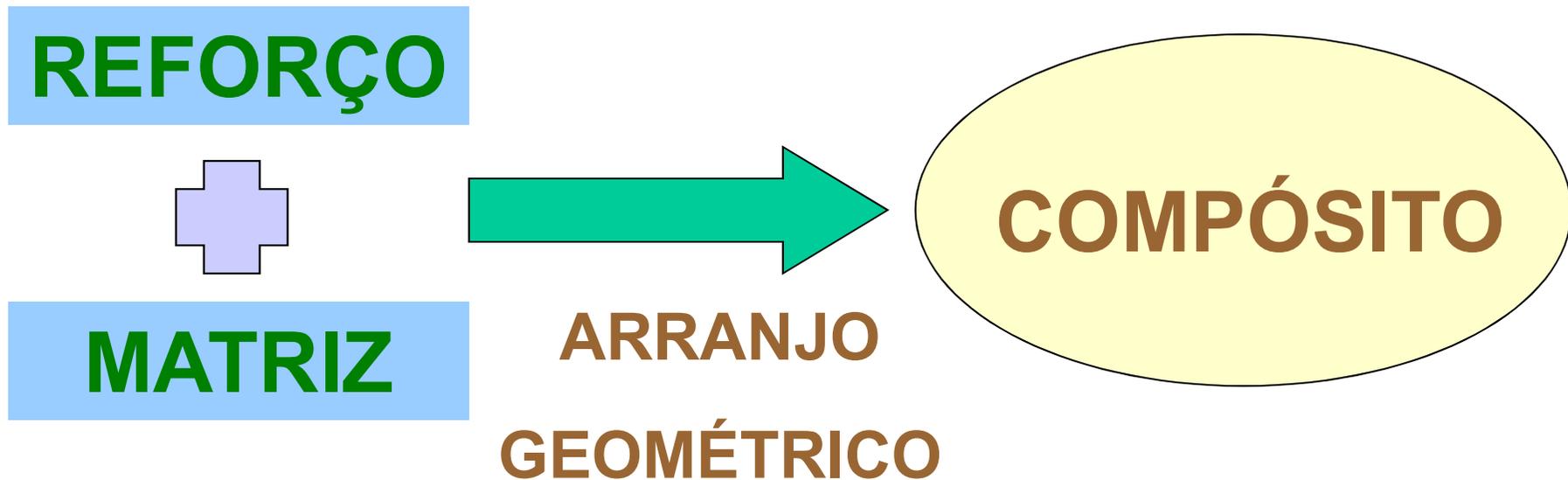
além da matriz e do reforço, a **interface** entre essas fases também afeta as propriedades mecânicas do compósito

uma boa interface (resultado da compatibilidade química entre as fases) é essencial para a resistência e rigidez do compósito



DEFINIÇÕES BÁSICAS

materiais compósitos





DEFINIÇÕES BÁSICAS

funções da matriz

- mantém o reforço agregado e distribui as cargas
- protege o reforço de dano químico e mecânico
- componente dominante nas propriedades de:
 - resistência ao impacto e tenacidade
 - temperatura de serviço
 - comportamento viscoelástico (*creep*)
 - propriedades transversais



DEFINIÇÕES BÁSICAS

anisotropia

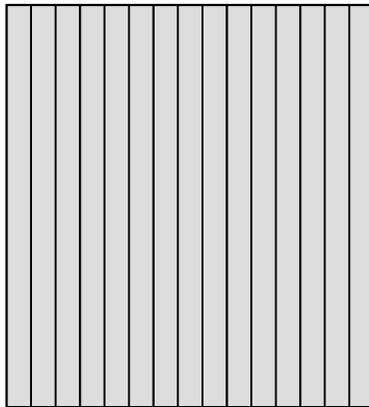
- muitas propriedades dos materiais, tais como rigidez, resistência, expansão térmica e condutividade térmica estão associadas com uma direção ou com a orientação dos eixos de referência
- um material é **anisotrópico** quando as suas propriedades variam com a direção ou com a orientação dos eixos de referência



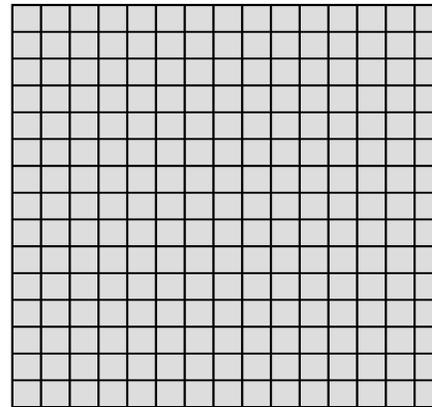
CLASSIFICAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS

quanto ao tipo de reforço – arranjo geométrico

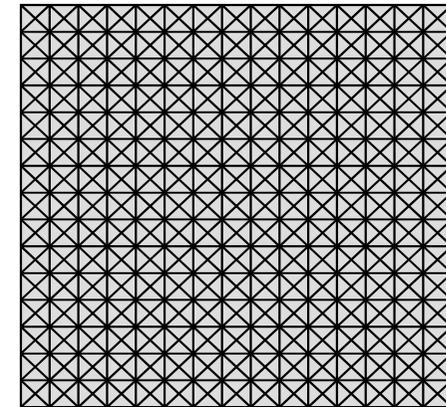
unidirecional



bi-direcional



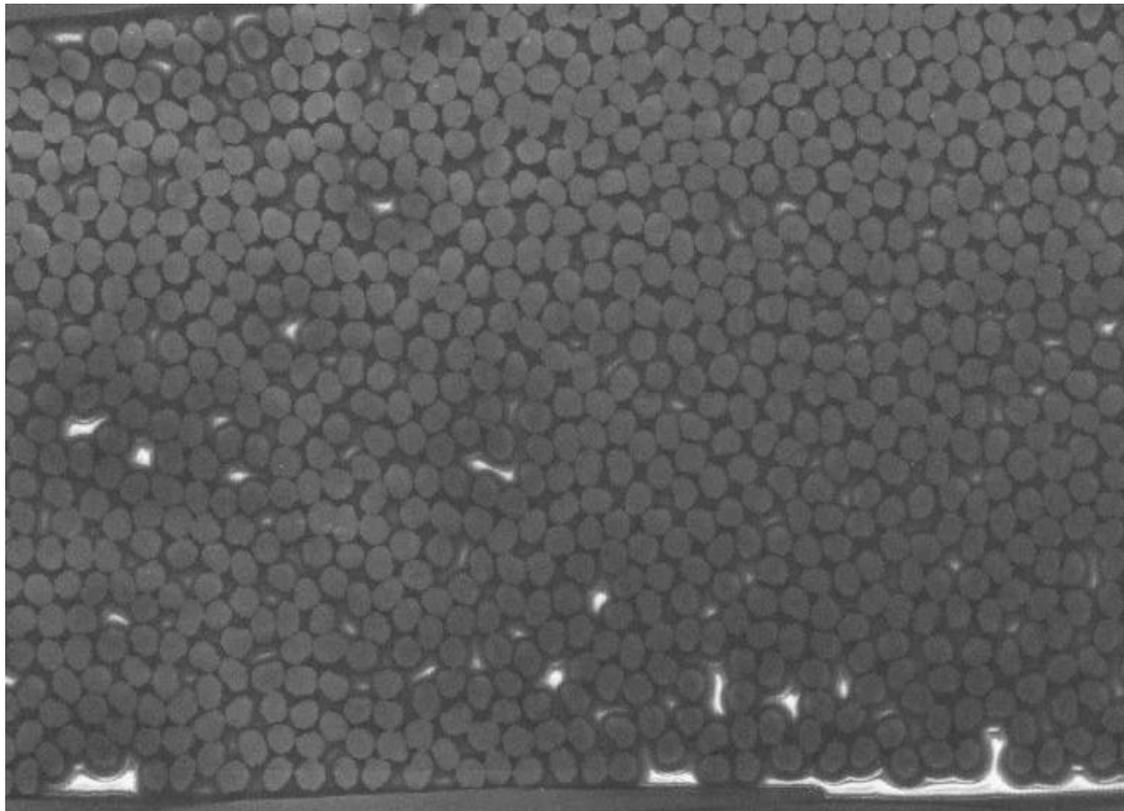
multidirecional





CLASSIFICAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS

quanto ao tipo de reforço – arranjo geométrico



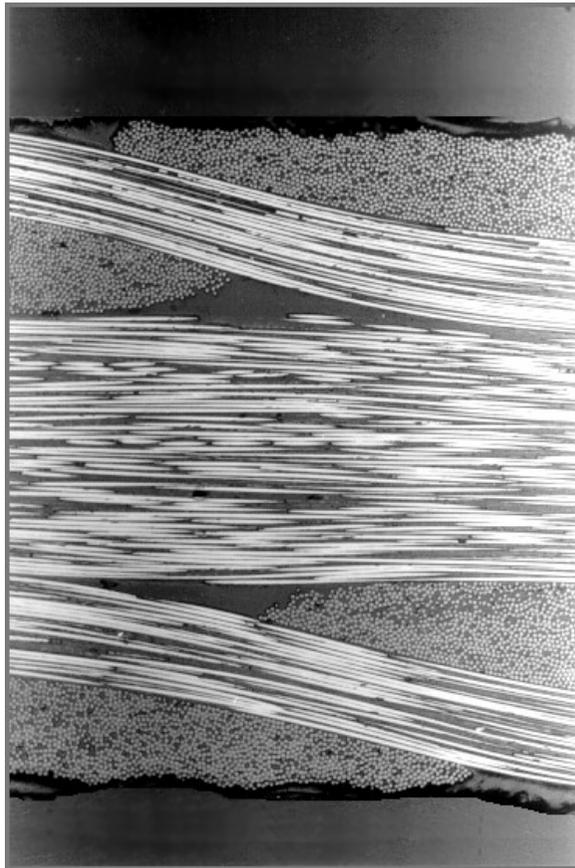
micrografia
de corte
transversal
de lâmina

(material pré-
impregnado)



CLASSIFICAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS

quanto ao tipo de reforço – arranjo geométrico



micrografia de corte
transversal de lâmina
(tecido pré-impregnado)



CLASSIFICAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS

quanto ao tipo de reforço – arranjo geométrico

as fibras são fornecidas em várias formas:

- roving (fio seco)
- lâmina unidirecional pré-impregnada (*tape*)
- tecido (pré-impregnado ou seco)



quanto ao tipo de reforço – arranjo geométrico

roving



fita unidirecional





Projeto e manufatura

- o processo de fabricação afeta a rigidez e resistência e o custo de materiais compósitos
- diferentes processos de fabricação necessitam matrizes com diferentes propriedades físicas e químicas
- **não se deve projetar um componente de compósito sem antes definir o processo de manufatura**



Motivações para o uso de compósitos

Redução de:

- peso
- custo

Requisitos:

- flambagem
- instabilidade aeroelástica
- resistência
- durabilidade

- o custo do carbono/epóxi é maior do que o do alumínio ou aço
- redução de custo só é possível pelo processo de fabricação

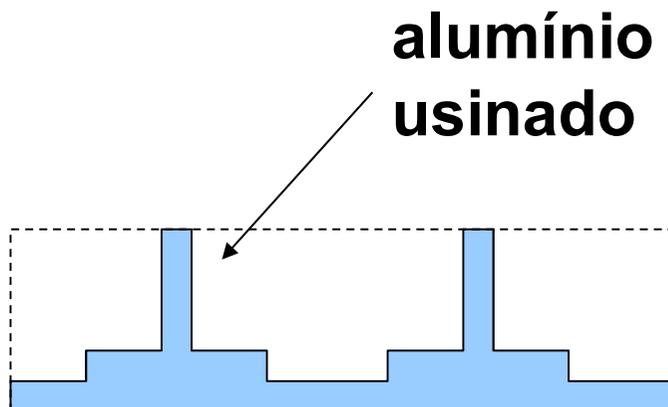


Motivação para uso de compósitos

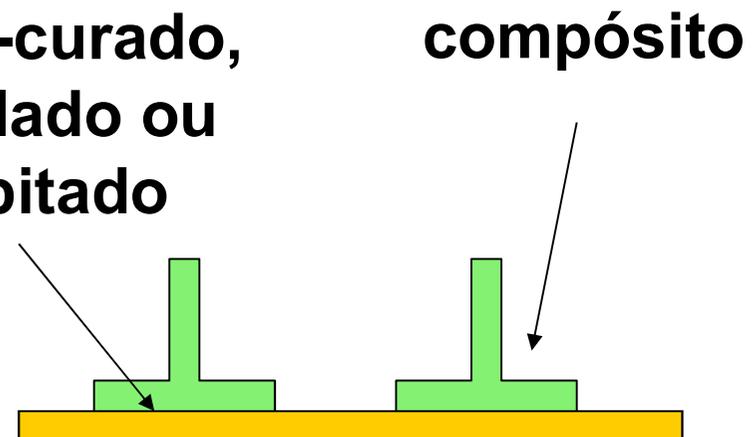
Redução

- peso
- custo

Redução de peso depende do processo de fabricação



reforçador:
co-curado,
colado ou
rebitado





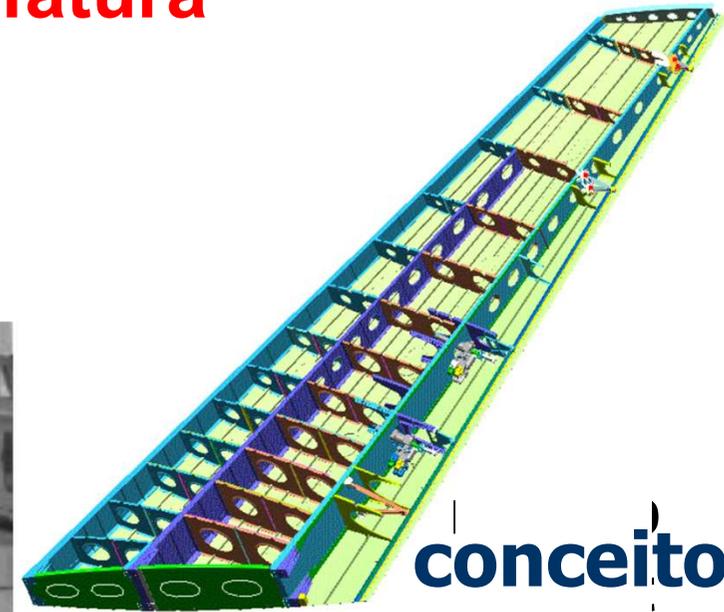
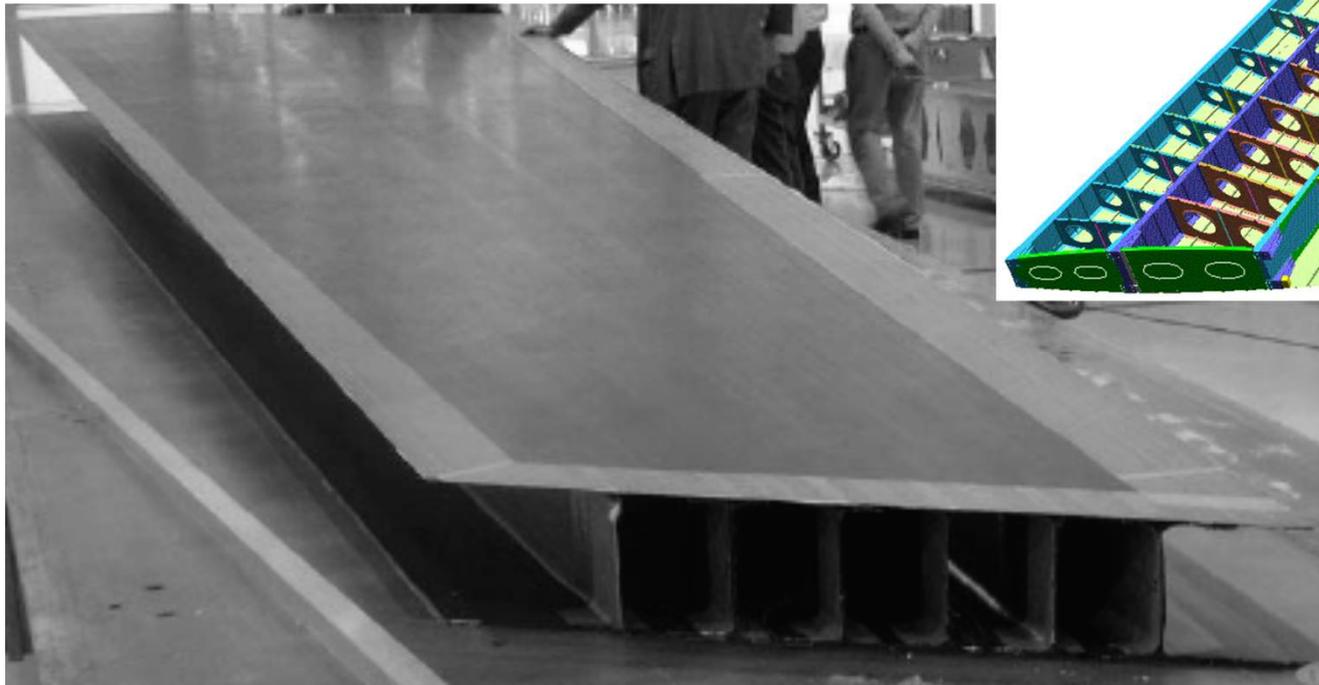
Motivação para uso de compósitos

- **custo do alumínio é mais baixo mas o processo de fabricação é caro**
- **o custo do carbono/epóxi é alto mas o processo é barato; deve-se evitar eventuais delaminações**



Projeto / manufatura

conceito multi-longarina



conceito
clássico



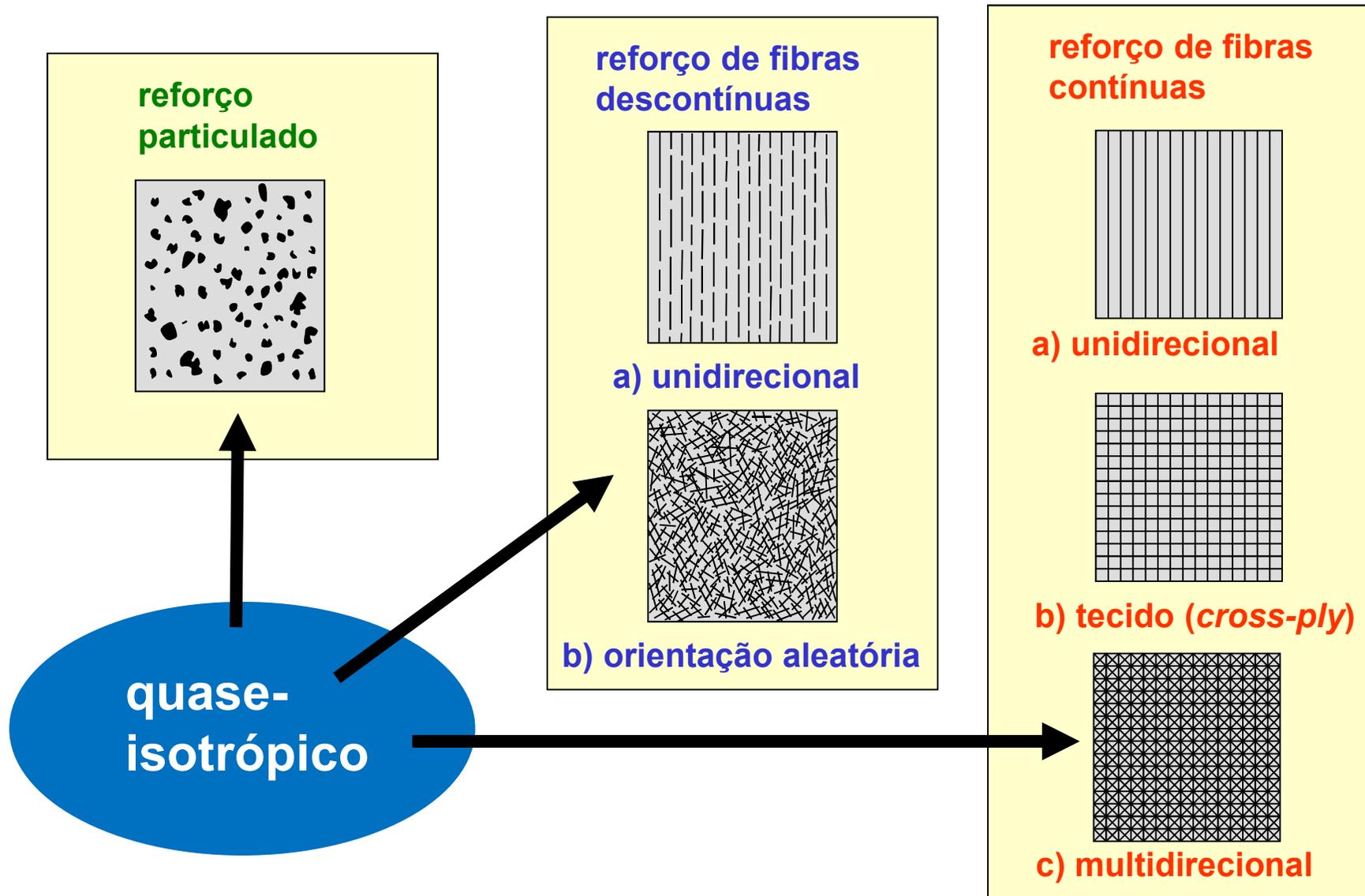
Projeto

pontos críticos

- juntas
- proteção eletromagnética
- resistência ao impacto
- flambagem



● delaminação





módulo de elasticidade - arranjo geométrico

rigidez

Material	E_x (GPa)	E_y (GPa)	G_{xy} (GPa)
Aço	210	210	83
Alumínio	70	70	28
Carbono /epóxi	$[0]_s$	147	10
	$[0/90]_s$	79	79
	$[0/90/45/-45]_s$	58	58

- a rigidez do aço é maior que o carbono epóxi unidirecional
- a rigidez do alumínio é da ordem do laminado $[0/90]_s$



módulo de elasticidade - arranjo geométrico

rigidez por unidade de peso

Material	E_x / ρ (Mm)	E_y / ρ (Mm)	G_{xy} / ρ (Mm)
Aço	26,9	26,9	10,6
Alumínio	28,0	28,0	11,0
Carbono /epóxi	$[0]_s$	91,9	6,4
	$[0/90]_s$	49,3	4,4
	$[0/90/45/-45]_s$	36,4	36,4

- a rigidez do carbono/epóxi por unidade de peso é maior que a do aço e alumínio
- a rigidez do laminado de carbono/epóxi depende da orientação das camadas



2. FABRICAÇÃO DE ESTRUTURAS EM COMPÓSITOS

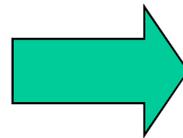


SELEÇÃO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO

Depende do material escolhido para a matriz e a aplicação

Matriz:

- polimérica
- cerâmica
- metálica



processos de
fabricação
específicos para
cada material



SELEÇÃO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO

Depende do material escolhido para a matriz e a aplicação

Matriz polimérica :

- termorrígido (cura)
- termoplástico (consolidação)

Aplicação:

- alto desempenho (fibras contínuas)
- baixo custo (fibras picadas)



PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

(matriz termorígida, aplicação de alto desempenho)

OBJETIVO:

- posicionar as fibras
- impregnar as fibras
- compactação/remoção de vazios
- promover a cura da matriz



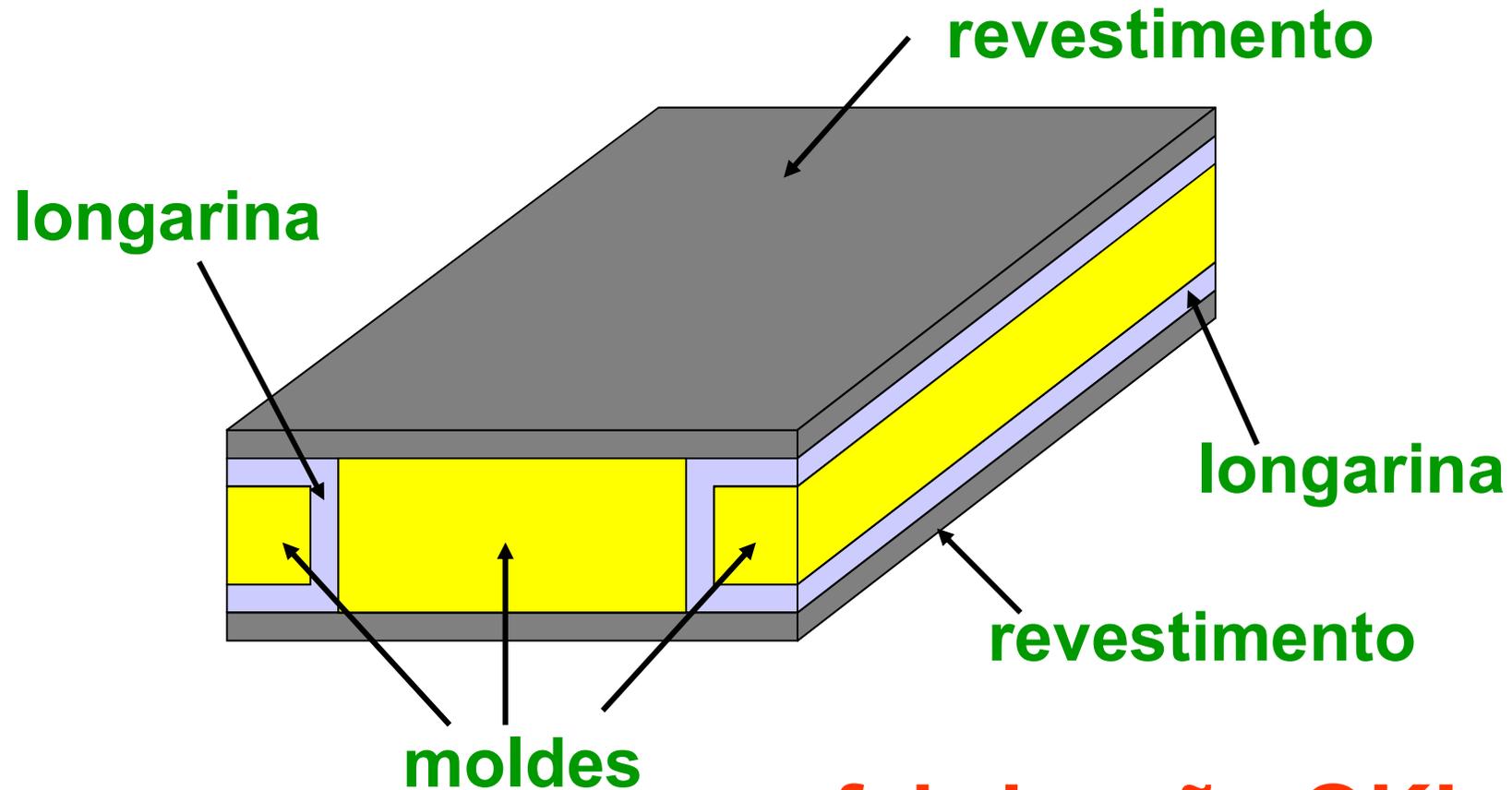
MOLDES

Características:

- dar a forma à peça
- tipos: fechado (rígido) ou aberto (semi-rígido)
 - ✓ monolítico
 - ✓ desmontável ou colapsável
 - ✓ inflável
- material: metálico ou compósito



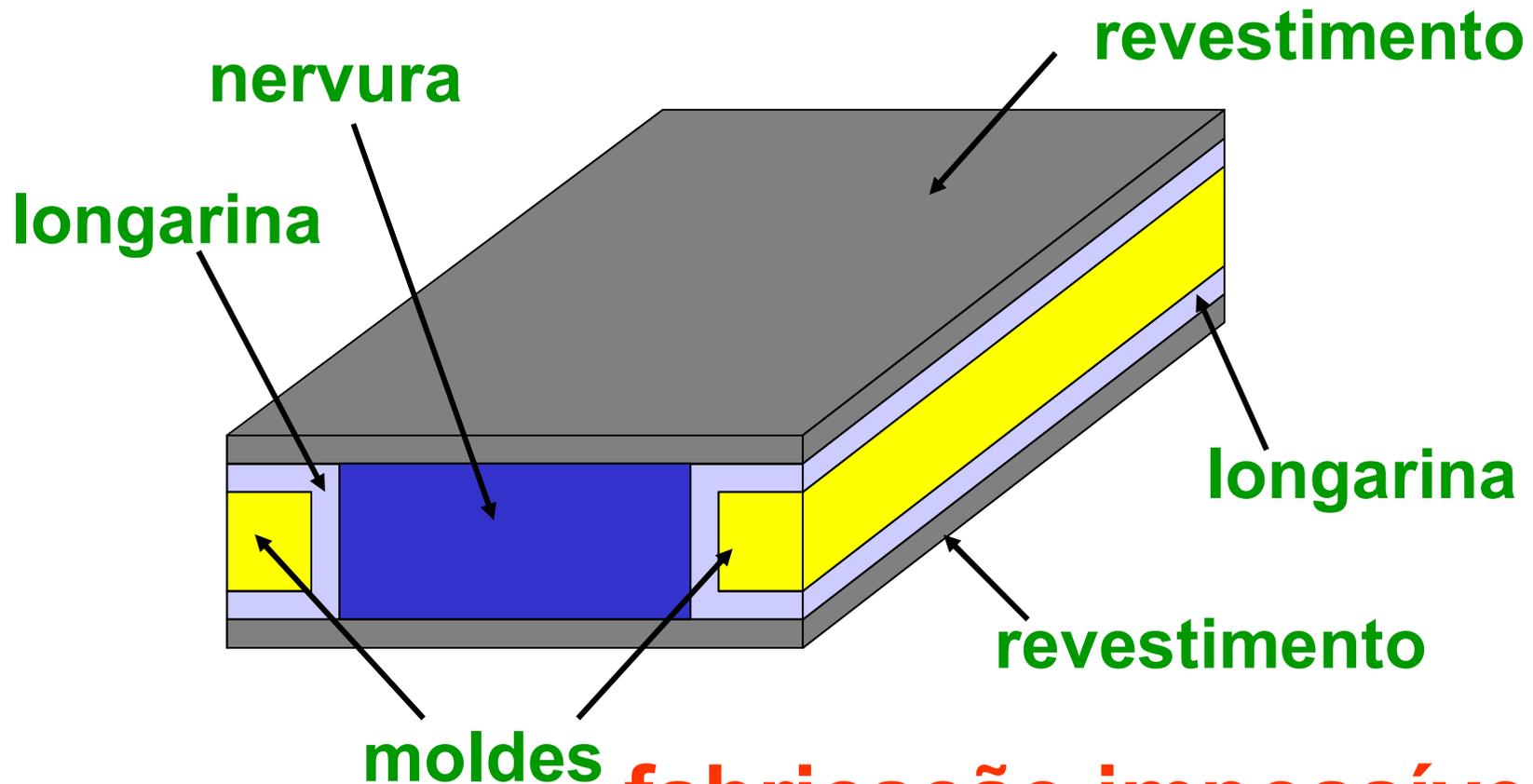
MOLDES



fabricação OK!



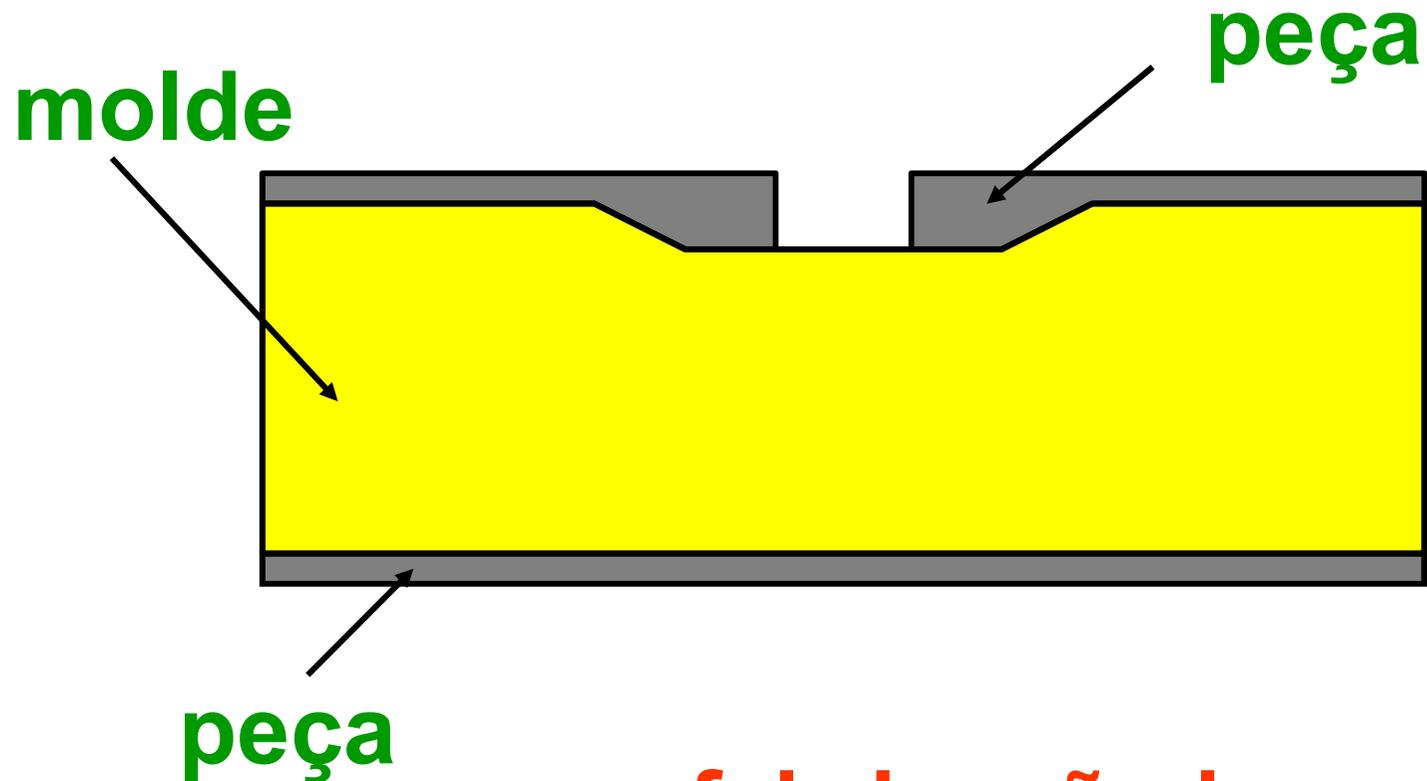
MOLDES



fabricação impossível!



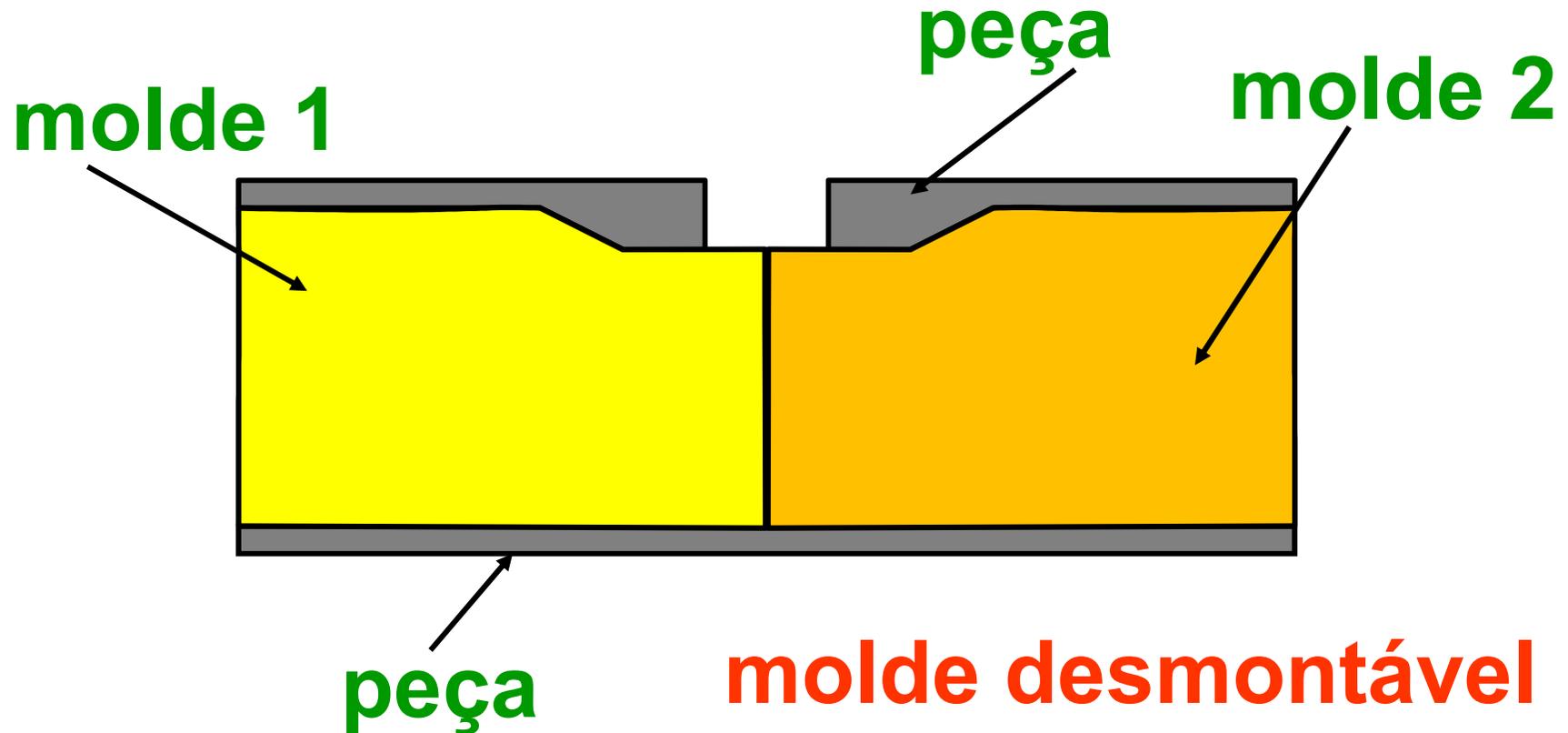
MOLDES



fabricação impossível!



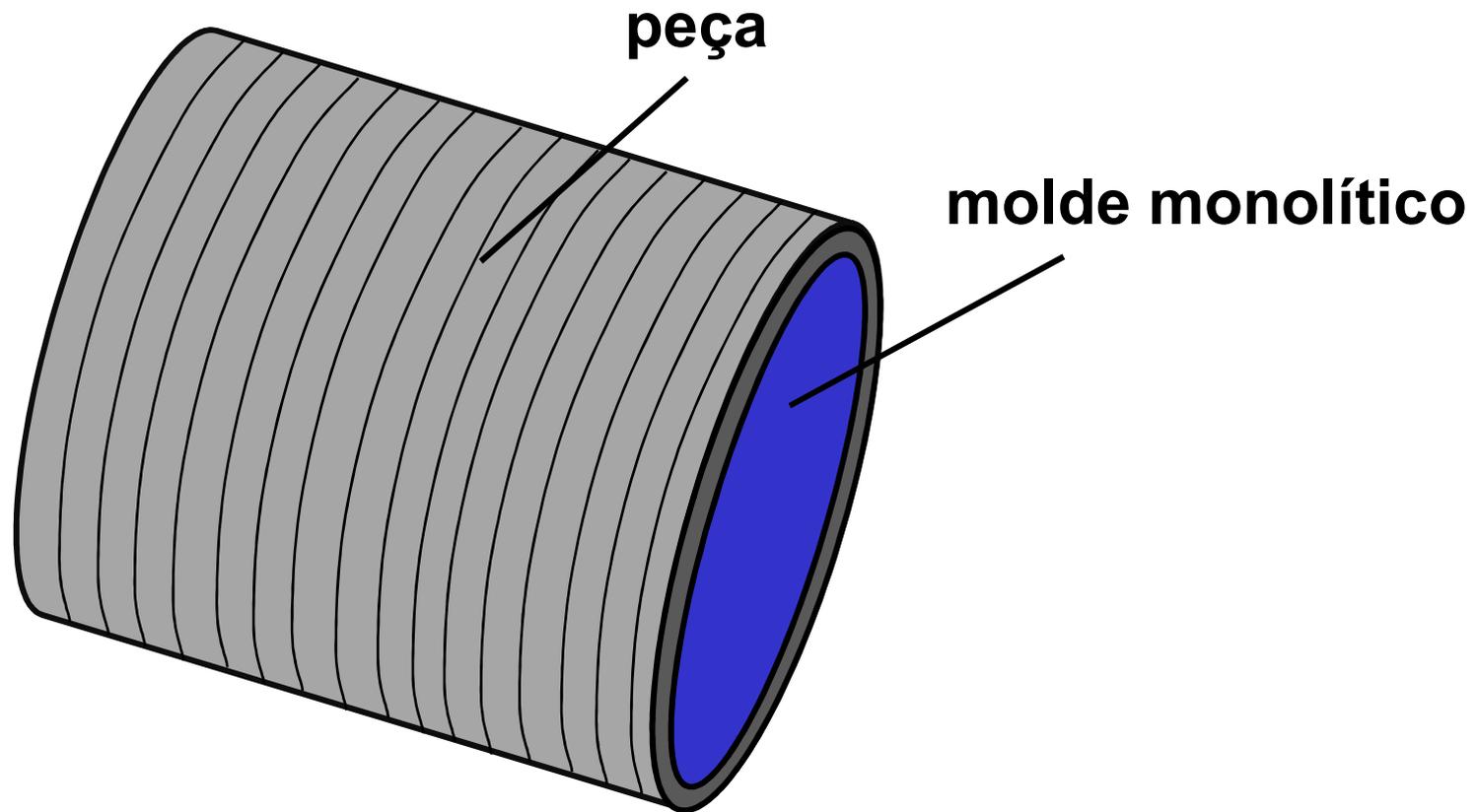
MOLDES



fabricação OK!



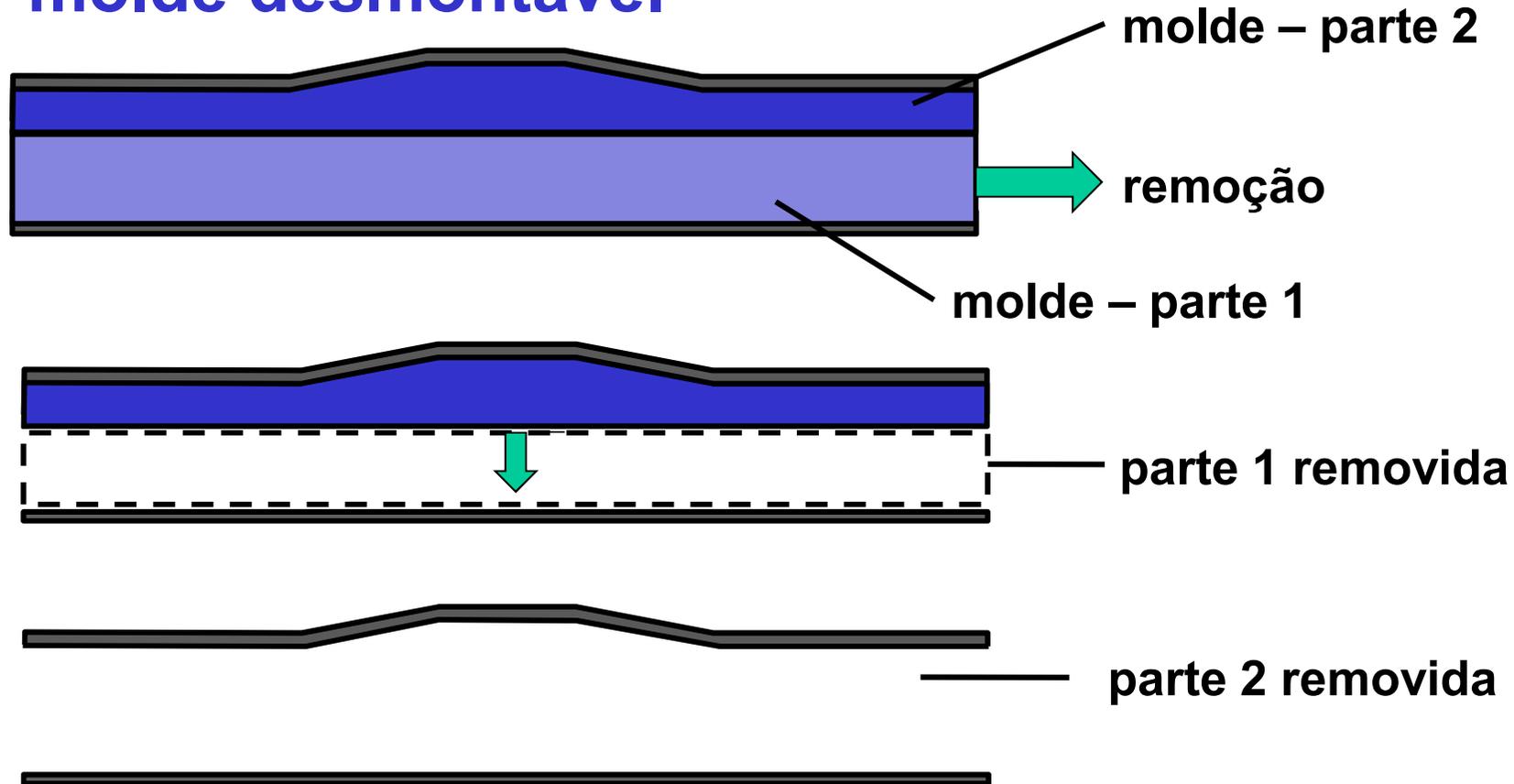
MOLDES





MOLDE

molde desmontável

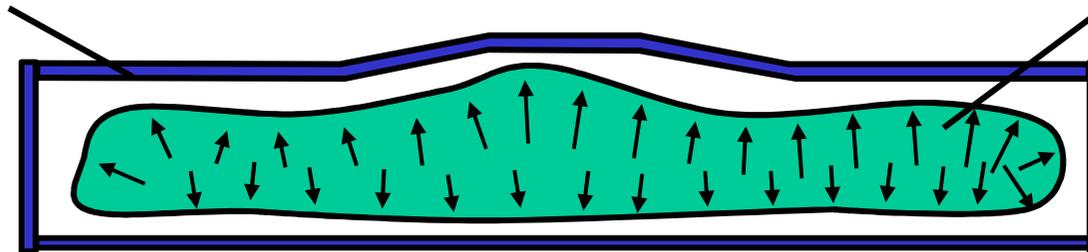




MOLDES

molde fechado desmontável

mandril inflável



mandril inflável

- pressuriza-se o mandril inflável contra um molde fechado
- desmonta-se o molde
- passo optativo: desinfla-se o mandril para removê-lo



PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

1. *Hand layup / Autoclave*
2. **Laminação automática**
3. *Filament winding*
4. **Pultrusão**
5. **RTM**
6. **Braiding**



HAND LAYUP / AUTOCLAVE





HAND LAYUP / AUTOCLAVE

CARACTERÍSTICAS

- **baixo conteúdo de vazios (cura sob pressão)**
- **alto volume de fibras**
- **requer bolsa de vácuo**

APLICAÇÕES

- **peças de espessura fina e forma complexa**
- **estruturas sanduíche**



HAND LAYUP / AUTOCLAVE

ETAPAS DO PROCESSO

- **corte das camadas**
- **laminação das camadas**
- **bolsa de vácuo**
- **cura em autoclave**
- **desmoldagem**



HAND LAYUP / AUTOCLAVE

MATÉRIA-PRIMA

(pré-impregnados)

- **fitas unidirecional**
- **tecido**

FIBRAS

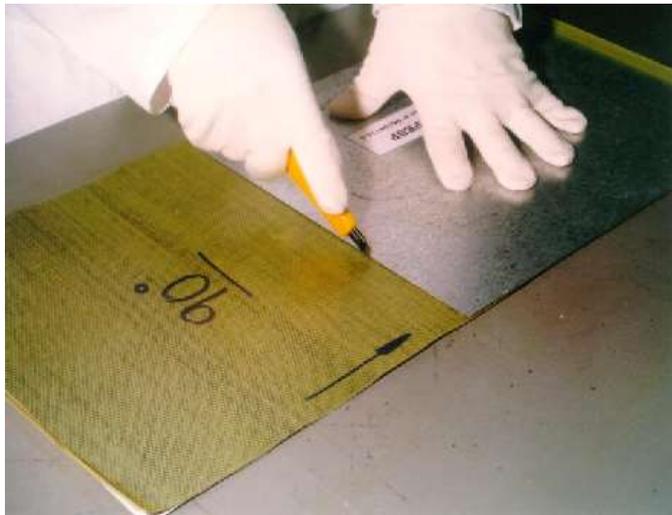
- **carbono**
- **kevlar**
- **vidro**





HAND LAYUP / AUTOCLAVE

Corte das camadas



Laminação





HAND LAYUP / AUTOCLAVE

MOLDES

METÁLICO

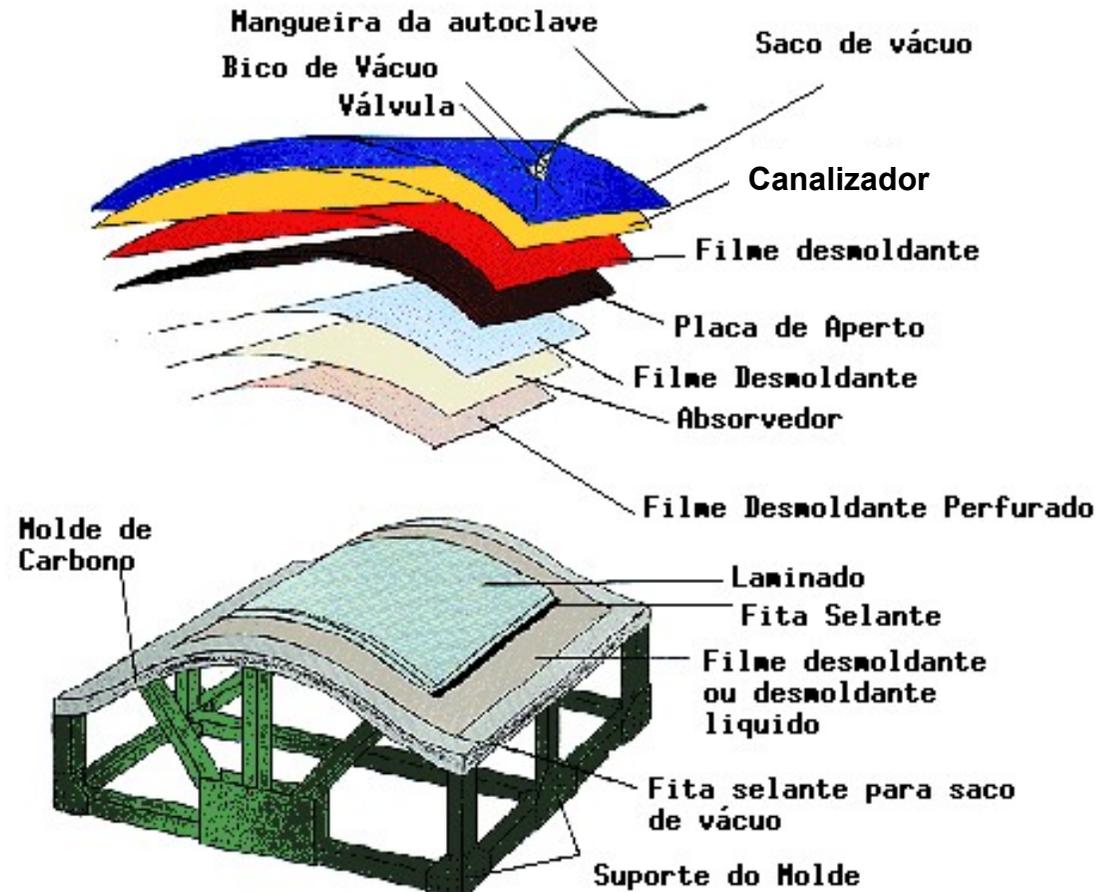
- maior durabilidade
- capacidade térmica
- alto custo
- usinagem

COMPÓSITO

- baixa durabilidade
- geometria simples
- modelagem
- peças de menor responsabilidade



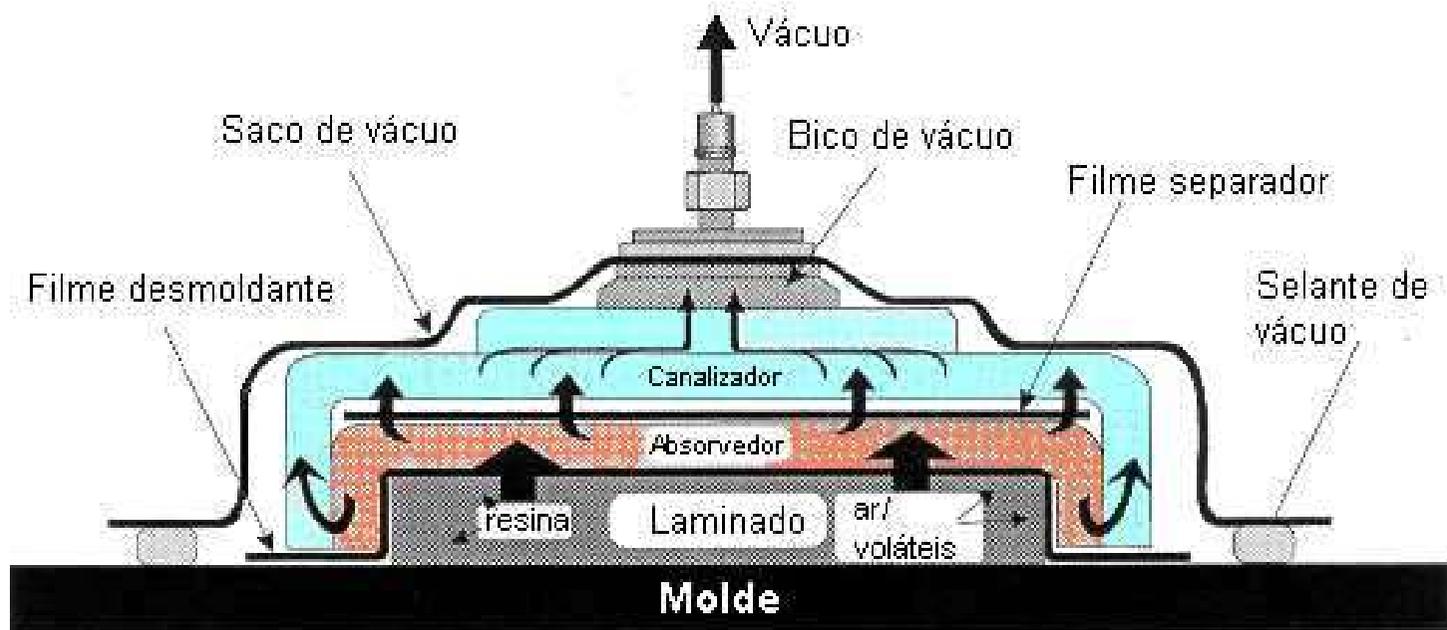
Laminação e bolsa de vácuo





HAND LAYUP / AUTOCLAVE

bolsa de vácuo: descrição

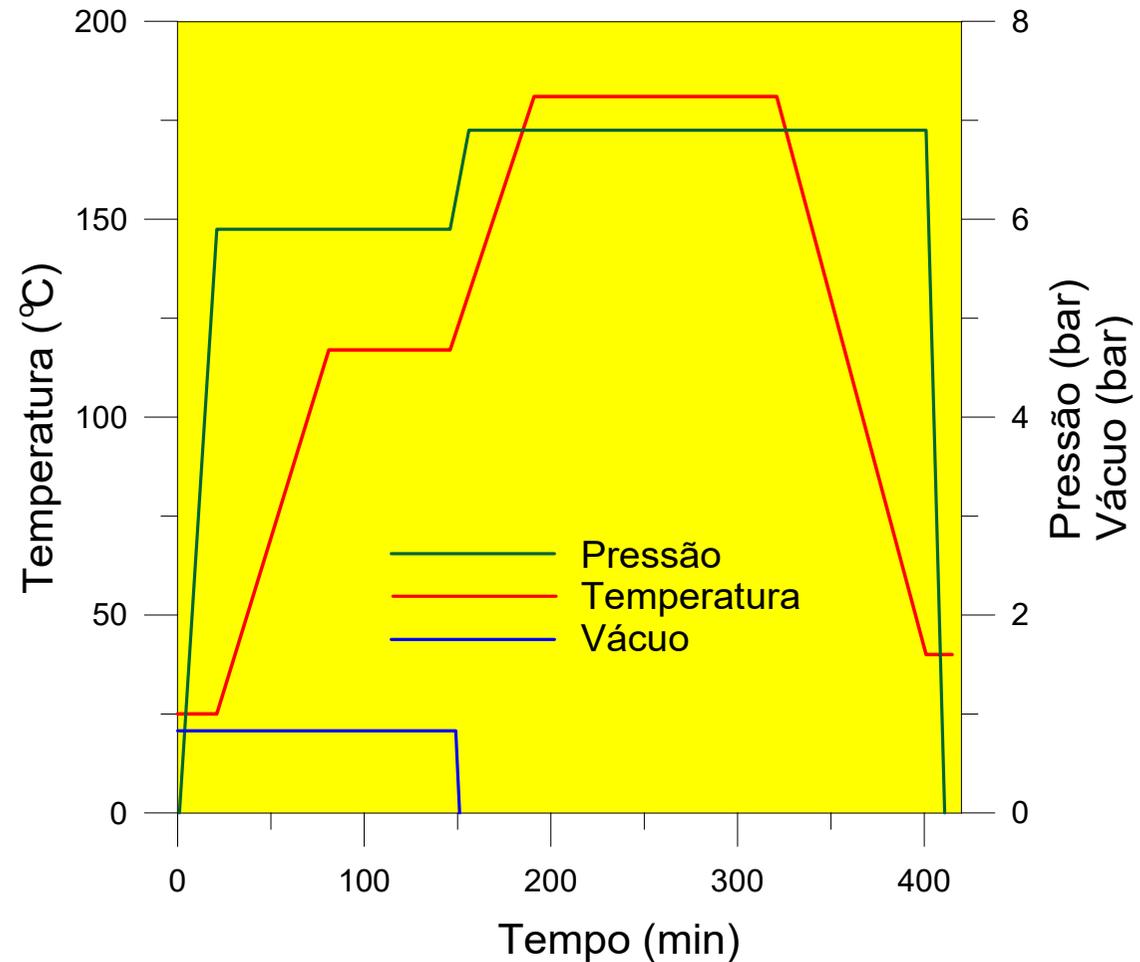




HAND LAYUP / AUTOCLAVE

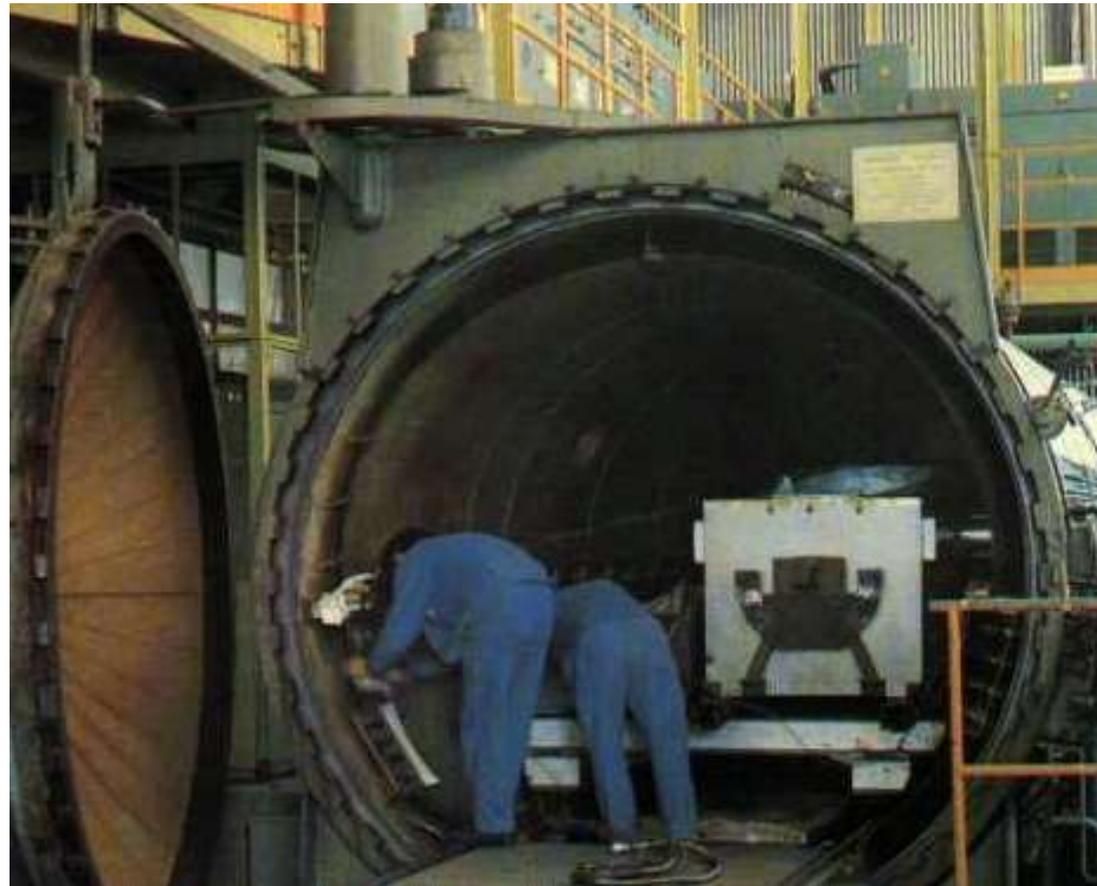
AUTOCLAVE

- pressão
- temperatura
- vácuo





HAND LAYUP / AUTOCLAVE





HAND LAYUP / AUTOCLAVE

VANTAGENS

- **baixa porosidade**
- **rígido controle fibra/resina**
- **ferramental simples**
- **variados ciclos de cura**



HAND LAYUP / AUTOCLAVE

DESVANTAGENS

- **alto custo do prepreg**
- **sobras de material**
- **sala de laminação climatizada**
- **prepreg perecível**
- **elevado consumo de energia**
- **uma única superfície acabada**



LAMINAÇÃO AUTOMÁTICA

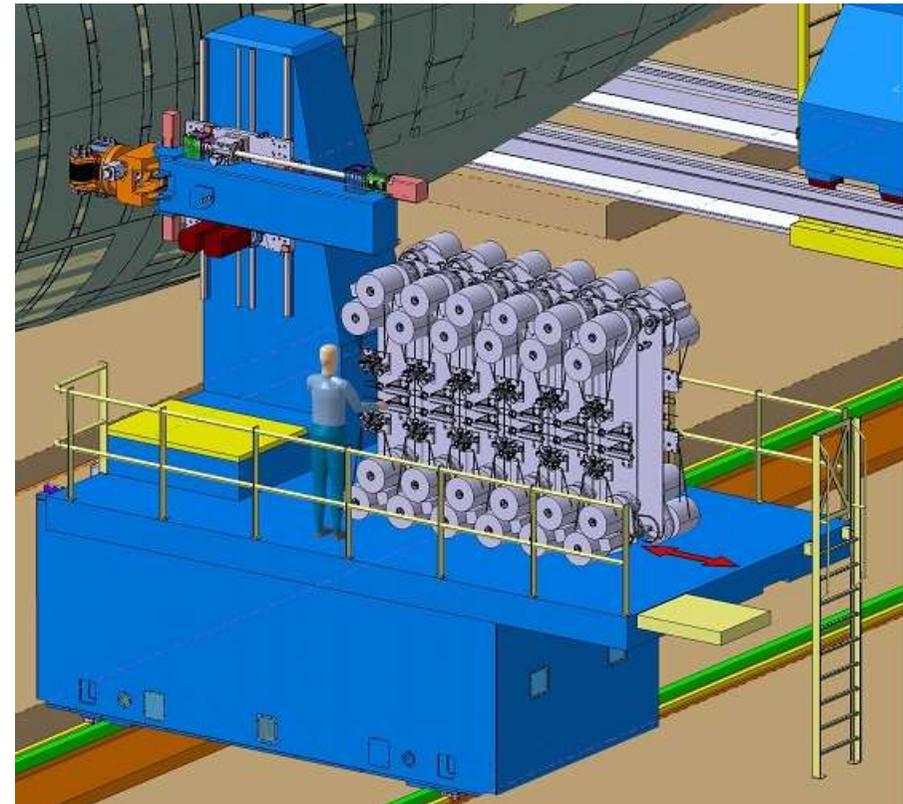
Fiber Placement ou ATL – Automatic tape laying





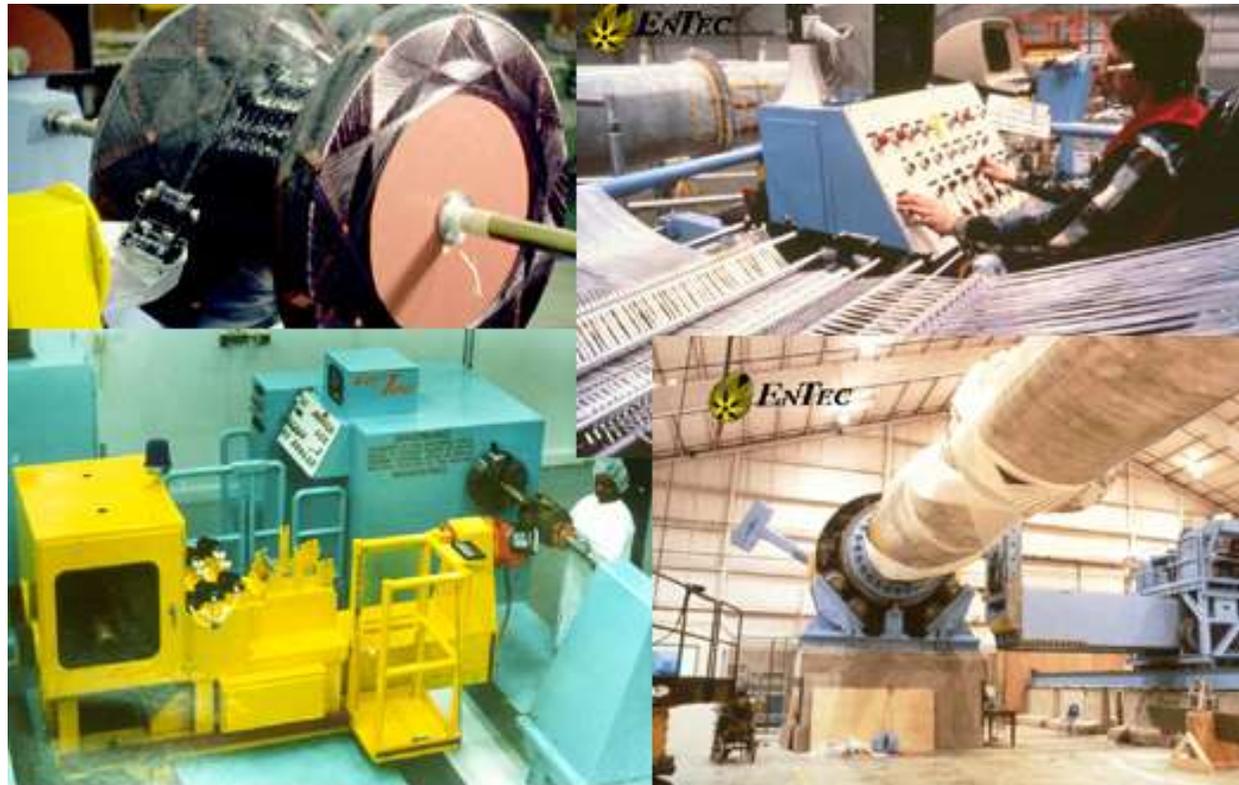
LAMINAÇÃO AUTOMÁTICA

Fiber Placement ou ATL – Automatic tape laying





FILAMENT WINDING **(bobinagem ou enrolamento filamentar)**





FILAMENT WINDING

Aplicações: peças axisimétricas

- **vasos de pressão**
- **tanques de combustível**
- **duto**

Resinas:

- **epóxi**
- **poliester**
- **fenólica**

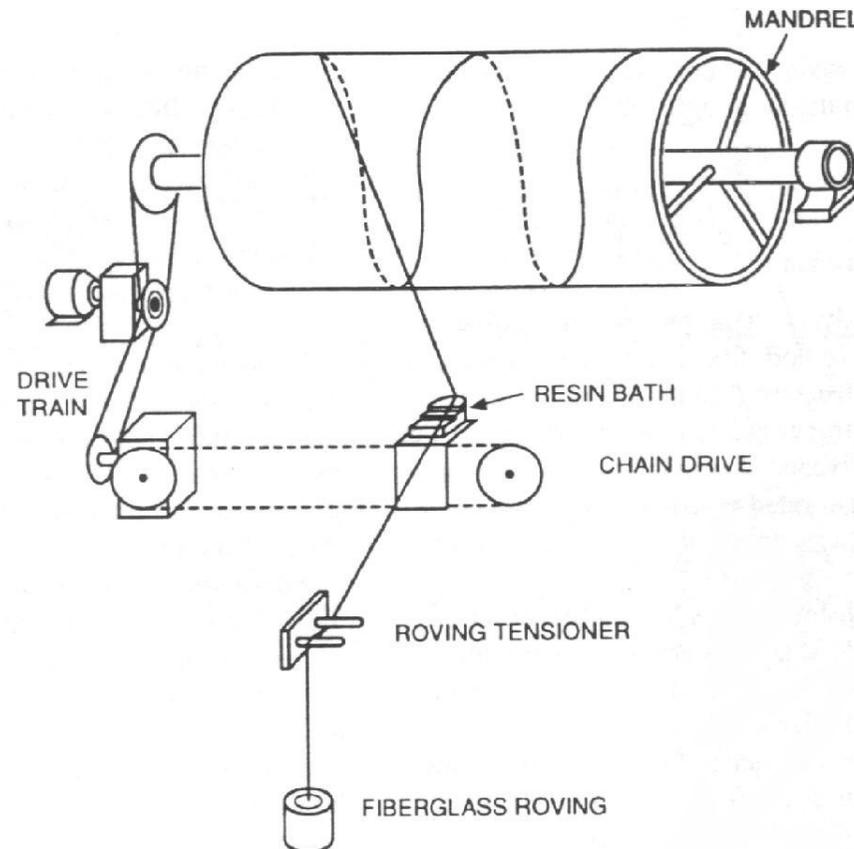
Fibras:

- **vidro-E ou S**
- **carbono**
- **aramida (Kevlar)**



FILAMENT WINDING

PROCESSO





FILAMENT WINDING

PROCESSO

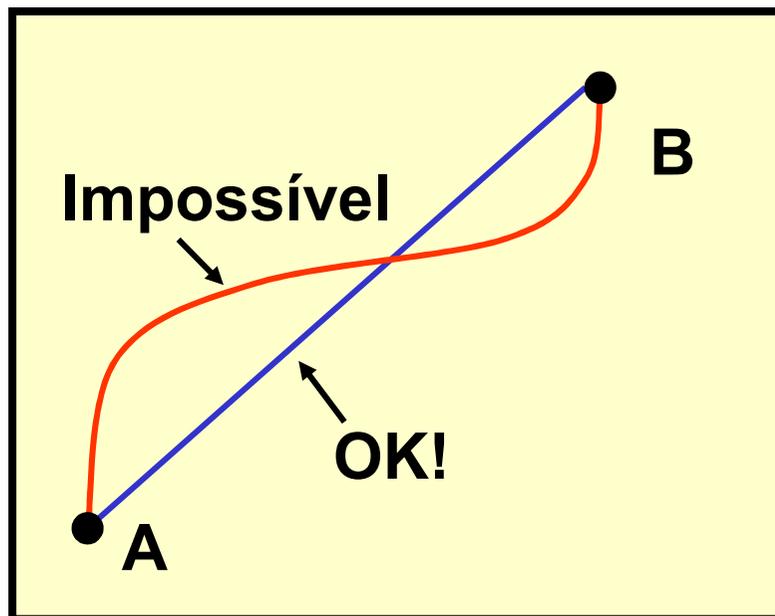
- **a fibra é depositada sob tensão sobre um mandril axisimétrico**
- **essa tensão é essencial para garantir uma boa compactação**
- **consequência: a curvas descritas pela fibra tem que ser geodésicas (ou muito próximos delas em função do atrito)**



FILAMENT WINDING

PROCESSO

- mandril plano:



a curva descrita pela fibra entre dois pontos **tem que ser uma reta** (ou muito próxima de uma reta em função do atrito) porque a fibra está **tensionada!**



FILAMENT WINDING

PROCESSO

mandril não plano:

- **a fibra necessariamente vai ter que estar sobre uma geodésica (curva de menor distância entre dois pontos sobre uma superfície**
- **num plano as curvas geodésicas são retas**



FILAMENT WINDING

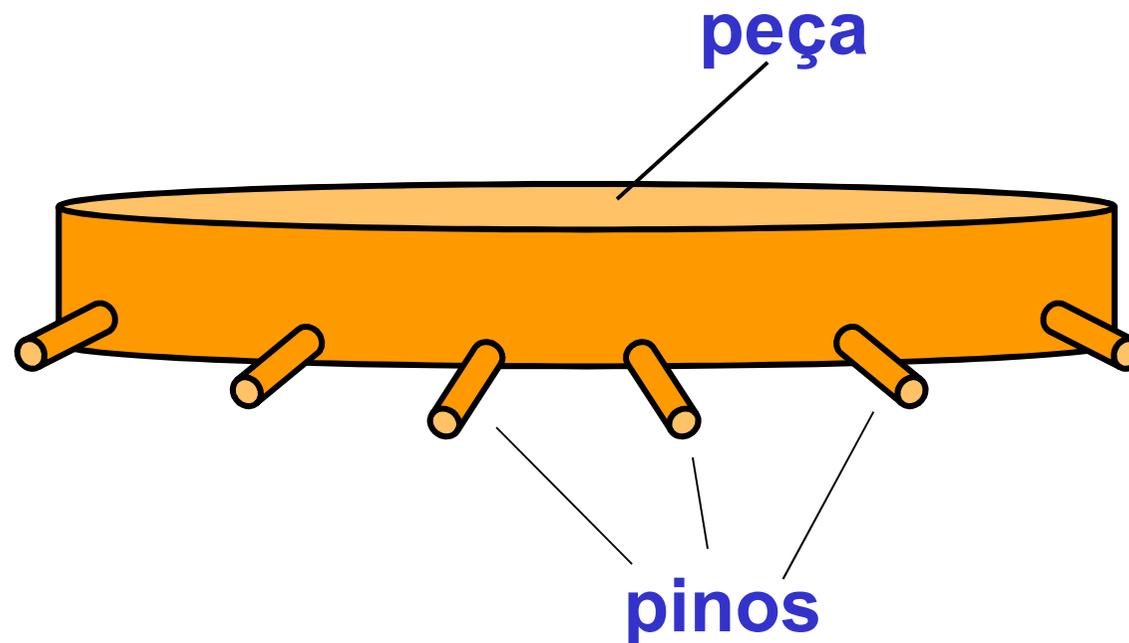
Trajatórias não geodésicas: uso de pinos

- **para se lançar fibras ao longo de curvas não geodésicas é necessário usar pinos como guias**
- **nesse caso pode-se, por exemplo lançar fibras na direção axial de cilindros**
- **a região da peça próxima aos pinos deve ser descartada**



FILAMENT WINDING

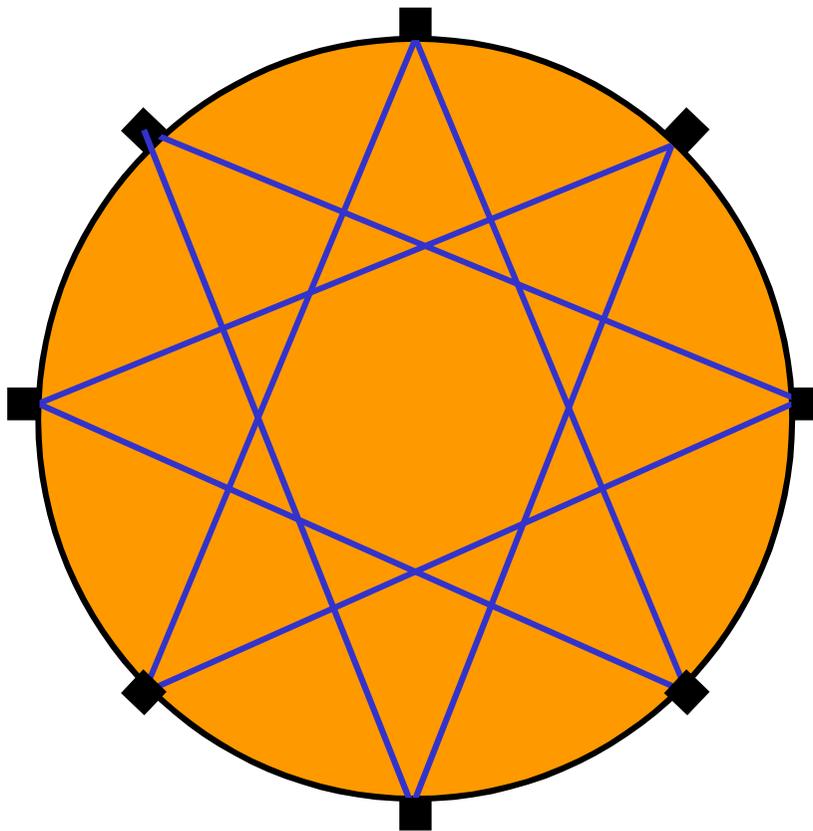
Uso de pinos





FILAMENT WINDING

Uso de pinos: salta dois pinos de cada vez

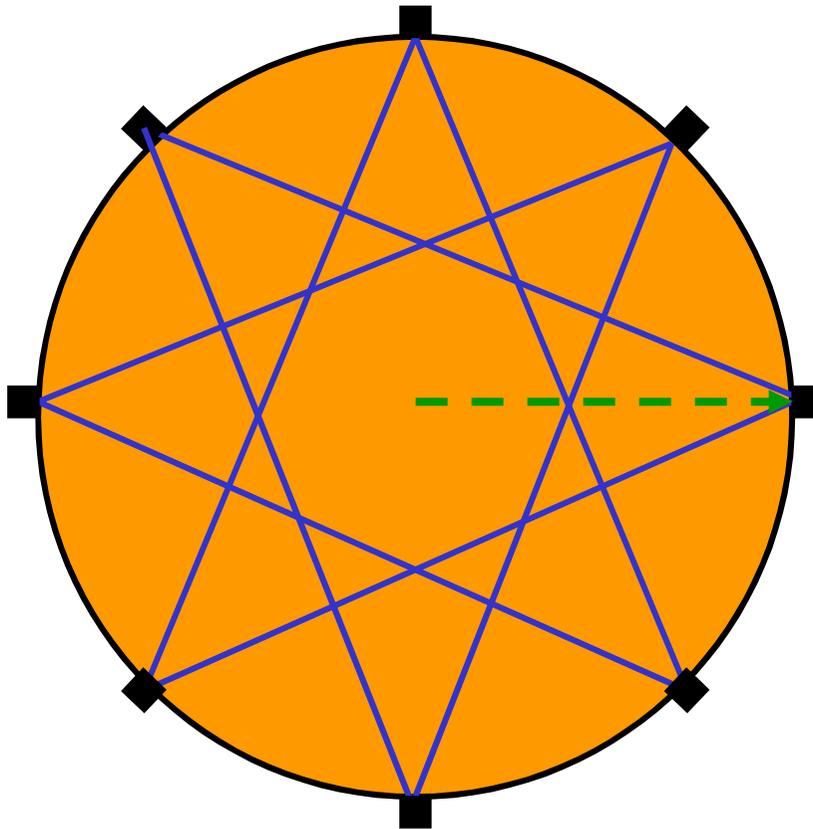


**um padrão
geométrico diferente
da posição das
fibras resulta
dependendo do
número de pinos
que é saltado**



FILAMENT WINDING

Uso de pinos:

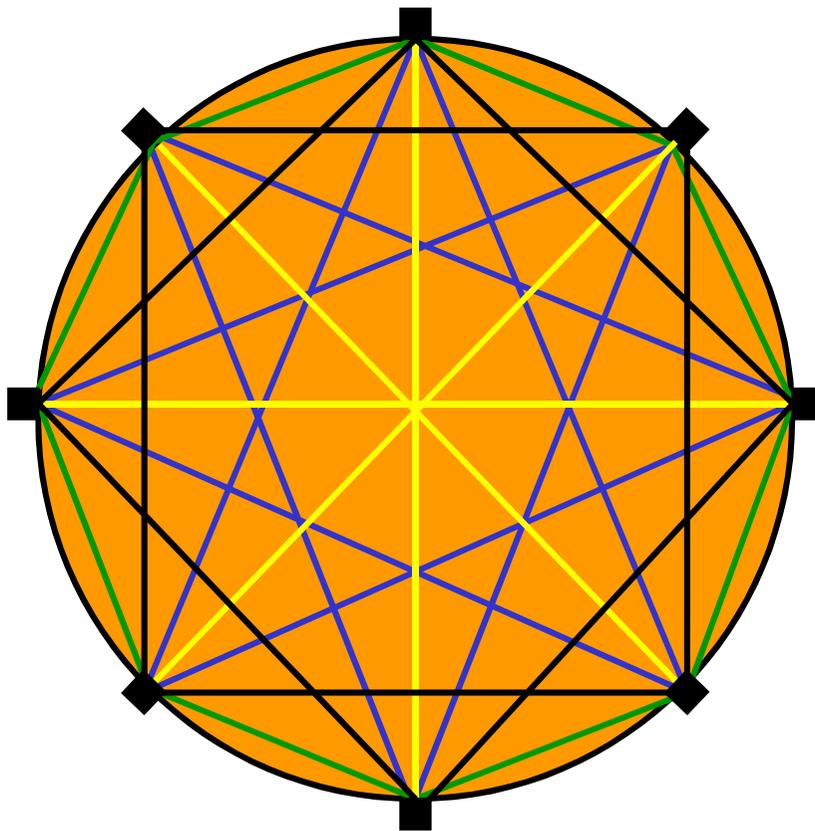


- ângulo das fibras varia ao longo do raio
- espessura (densidade de fibras) da camada varia ao longo do raio



FILAMENT WINDING

Uso de pinos: padrões complexos



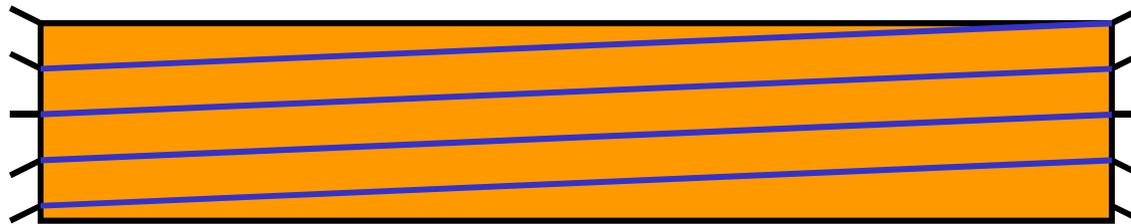
- **laça cada pino**
- **laça a cada 2 pinos**
- **laça a cada 3 pinos**
- **laça a cada 4 pinos**



FILAMENT WINDING

Uso de pinos: mandril cilíndrico

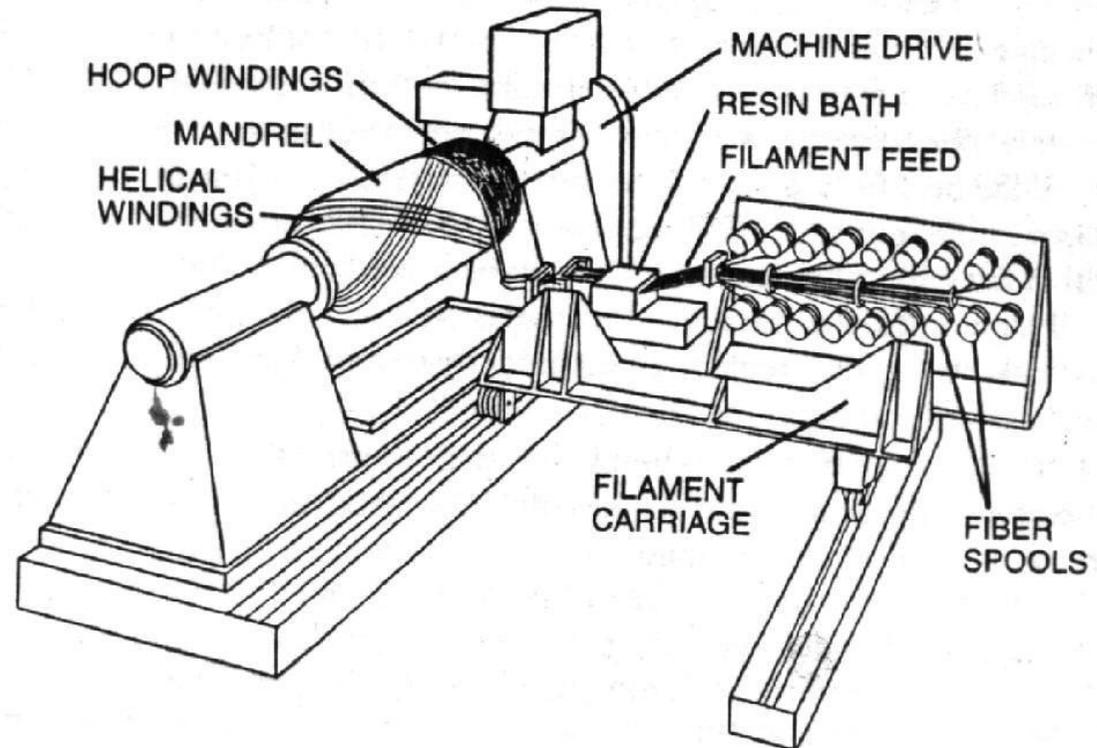
lançamento de fibras na posição quase axial





FILAMENT WINDING

PROCESSO

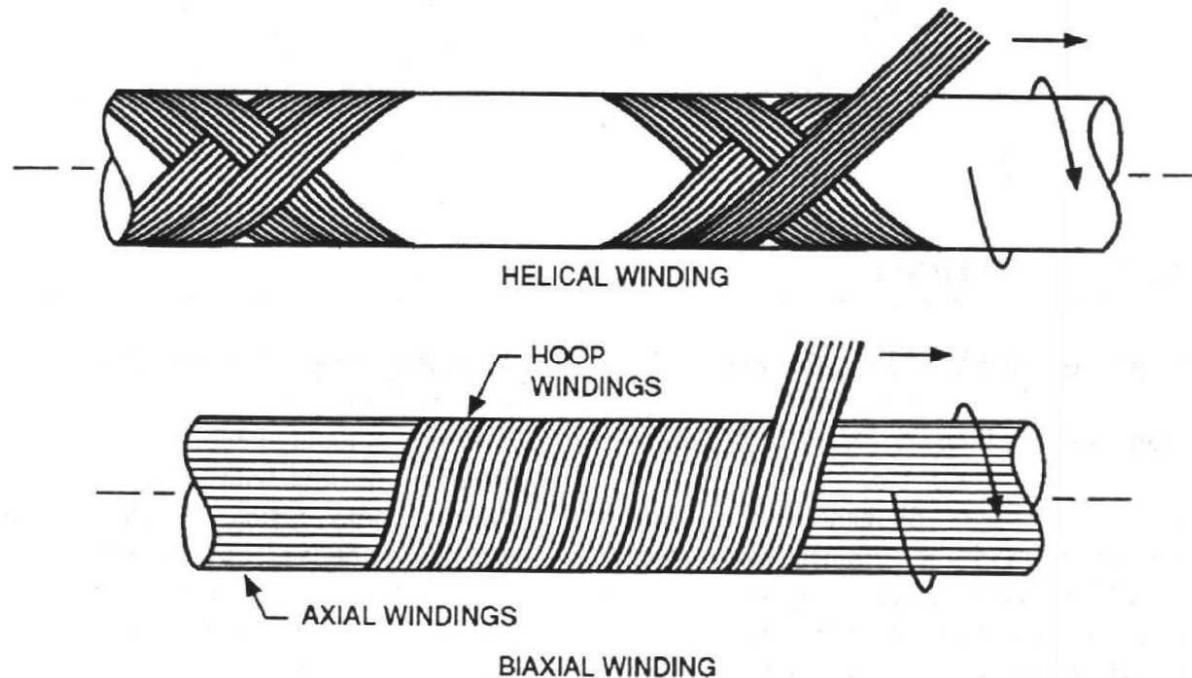




FILAMENT WINDING

PROCESSO

Enrolamento radial e helicoidal

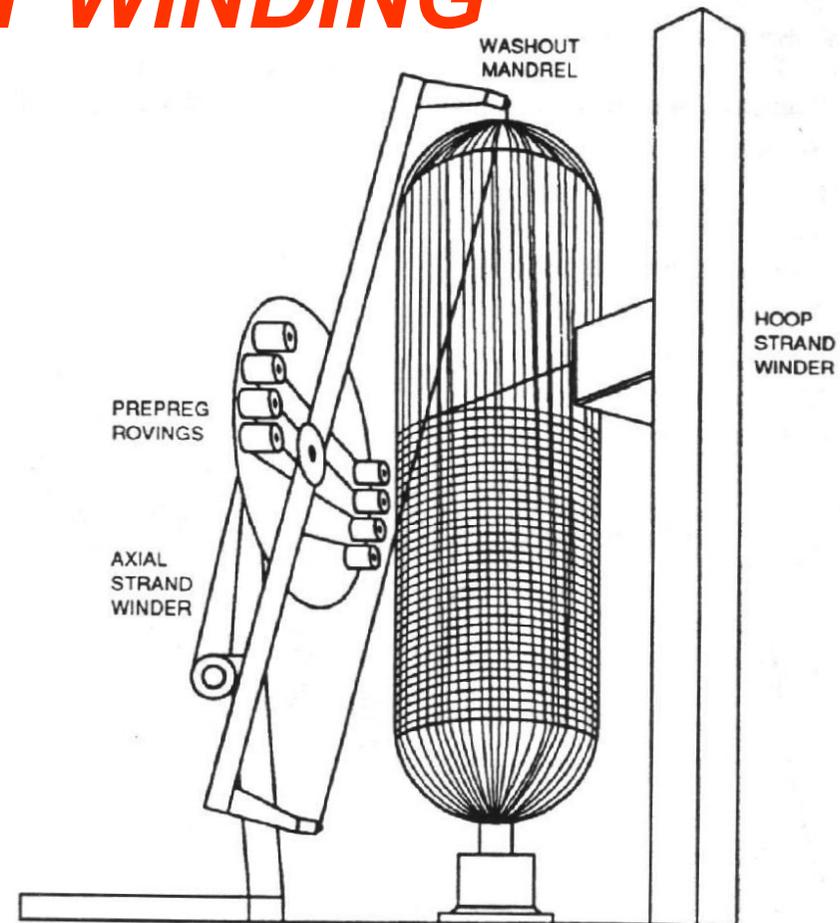




FILAMENT WINDING

PROCESSO

Enrolamento polar





FILAMENT WINDING

REMOÇÃO DO MANDRIL

- **conicidade**
- **mandril desmontável**
- **mandril solúvel**
- **mandril inflável**



FILAMENT WINDING

CARACTERÍSTICAS

- **baixo conteúdo de vazios (cura sob pressão)**
- **bom controle do posicionamento da fibra**
- **bom aproveitamento do material**
- **junções podem ser realizadas**



FILAMENT WINDING

PARÂMETROS DO PROCESSO

- **viscosidade da resina**
- **remoção de excesso de resina**
- **tensão na fibra (conteúdo de vazios)**
- **velocidade**
- **posicionamento da fibra (controle numérico)**



FILAMENT WINDING

VANTAGENS

- **peças grandes e pequenas**
- **controle da posição da fibra**
- **excelente aproveitamento do material**
- **uso de *liners* em vasos de pressão**



FILAMENT WINDING

DESVANTAGENS

- limitado a formas axisimétricas
- mau controle do conteúdo de resina
- controle operacional
(programação, parâmetros do processo)



FILAMENT WINDING

MÁQUINA DE ENROLAMENTO





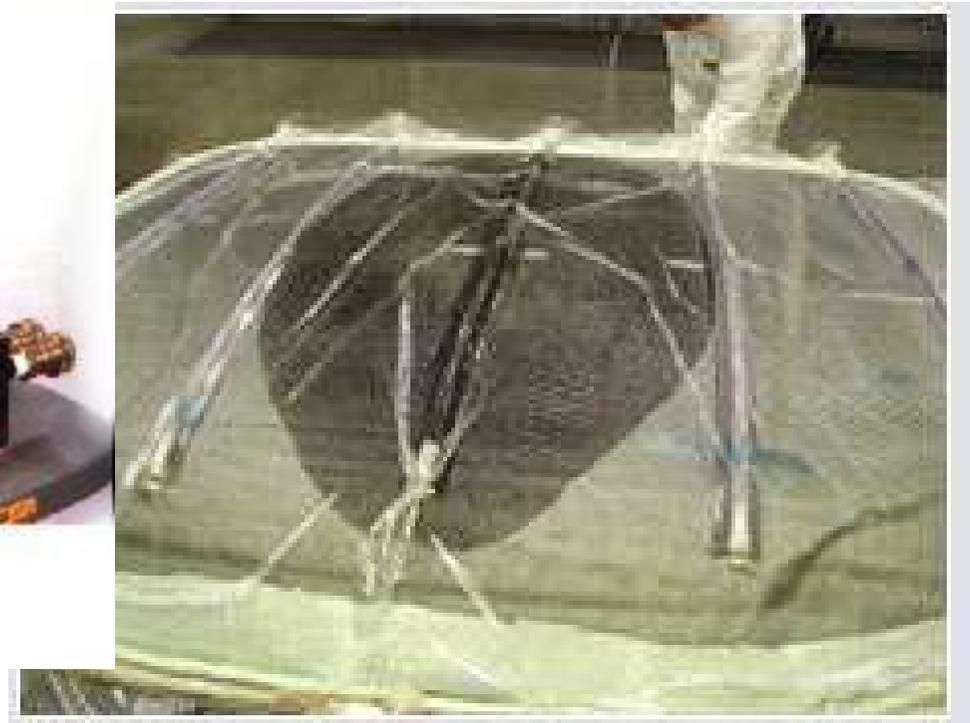
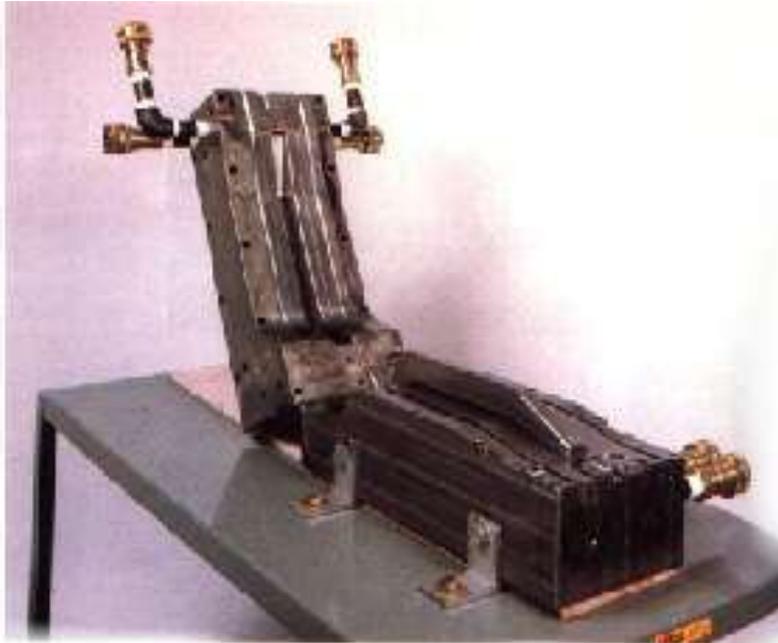
FILAMENT WINDING

MÁQUINA DE FILAMENT WINDING





TÉCNICAS DE INFUSÃO DE RESINA





TÉCNICAS DE INFUSÃO DE RESINA

ETAPAS

1. Fabricação da pré- forma seca
2. Moldagem da pré-forma
3. Impregnação com pressão e/ou vácuo
4. Curar da peça
5. Desmoldagem
6. Operações de acabamento

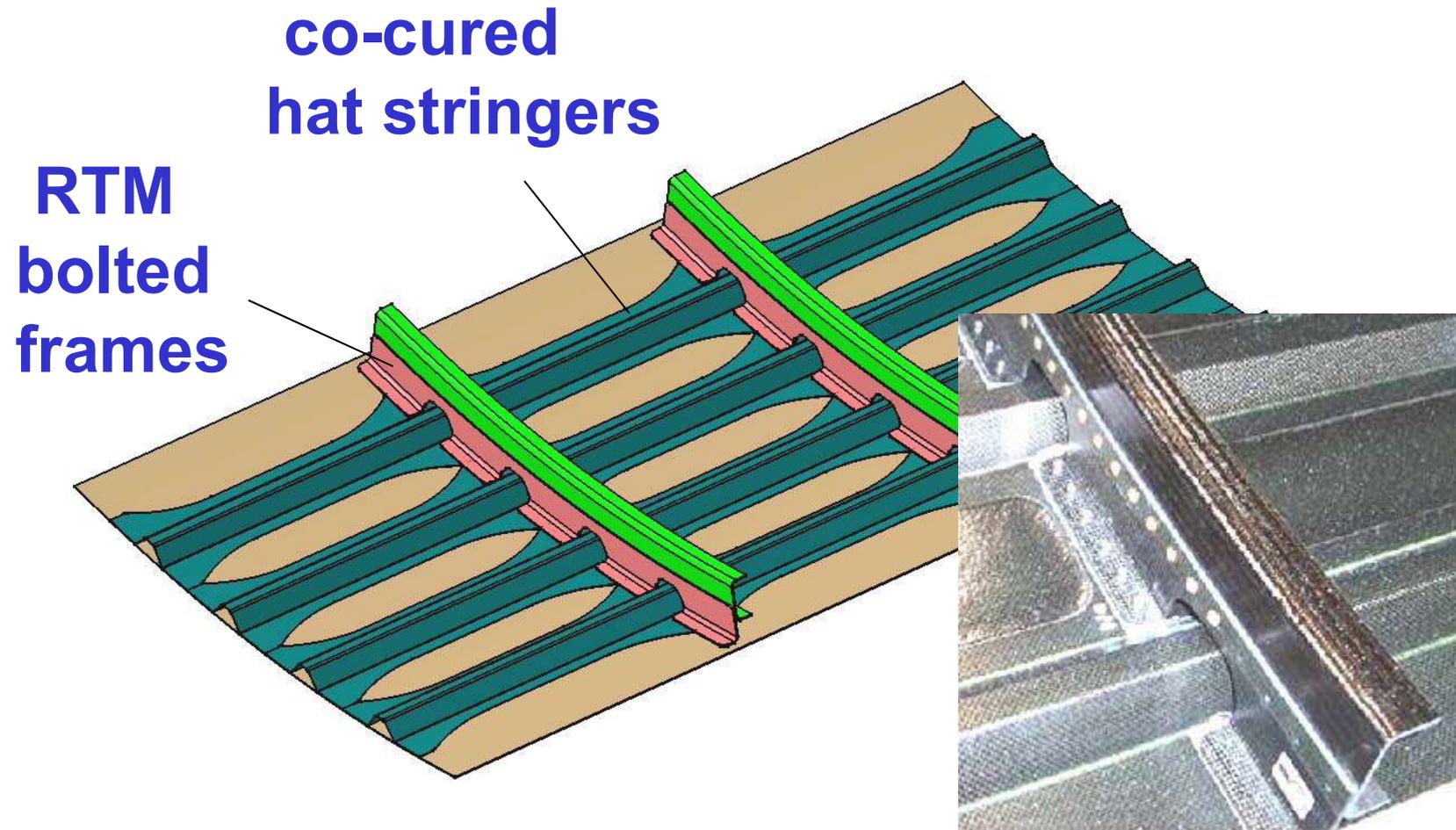


TÉCNICAS DE INFUSÃO DE RESINA

- **RTM (Resin Transfer Molding):**
 - ✓ molde rígido fechado
 - ✓ uso de pressão e vácuo
- **LRI (Liquid Resin Infusion):**
 - ✓ molde semi-rígido
 - ✓ uso de vácuo
- **RFI (Resin Film Infusion):**
 - ✓ molde semi-rígido
 - ✓ filme de resina catalizada e vácuo



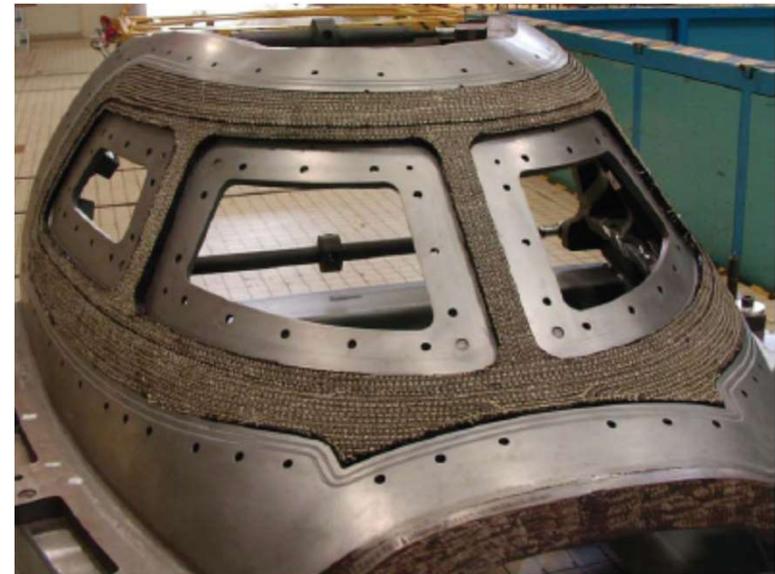
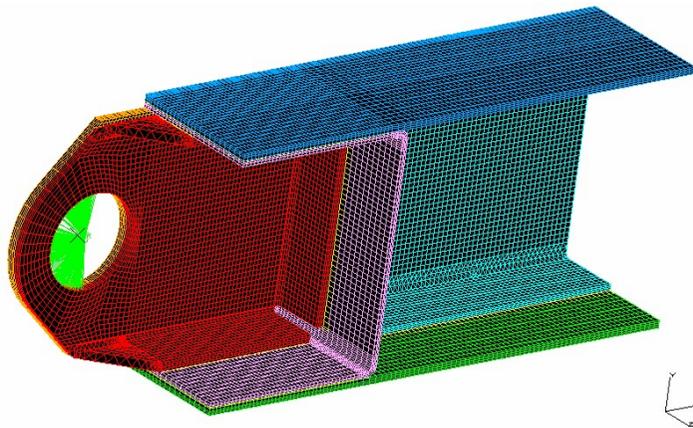
Boeing 787





1. FABRICAÇÃO DA PRÉ-FORMA

- braiding
- laminação (uso de *binder*)
- *filament winding*

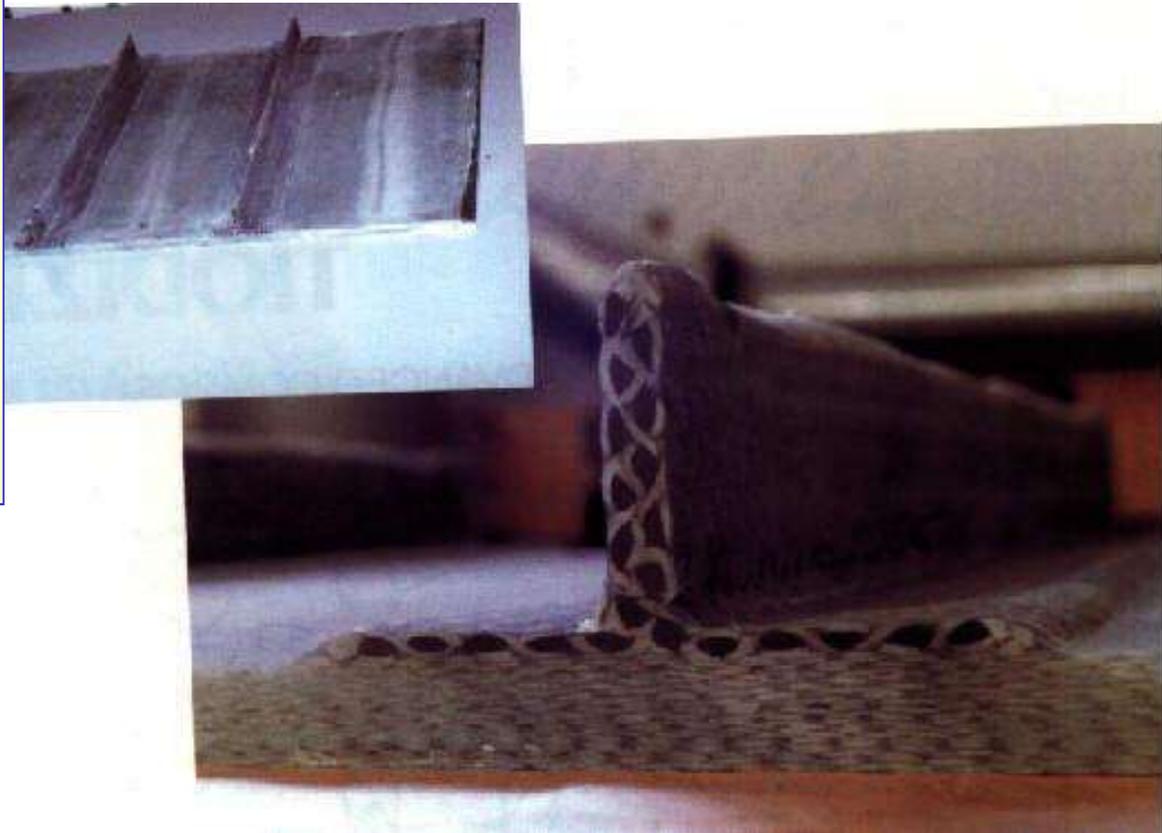




1. FABRICAÇÃO DA PRÉ-FORMA

braiding

- resistente à delaminação
- processo feito sob medida e caro





1. FABRICAÇÃO DA PRÉ-FORMA

laminação

- baixa resistência à delaminação
- processo mais barato que *braiding*





1. FABRICAÇÃO DA PRÉ-FORMA

binder

- **adição de termoplástico em tecido seco para permitir conformação da pré-forma**
- **melhora a conformabilidade e permeabilidade (dependendo da compatibilidade do *binder* com a resina)**



1. FABRICAÇÃO DA PRÉ-FORMA

filament winding

- aplicável somente para peças axisimétricas
- resulta em boa resistência à delaminação



2. MOLDAGEM DA PRÉ-FORMA

3. IMPREGNAÇÃO

- **uso de vácuo**
- **injeção (resina de baixa viscosidade)**
 - ✓ **injeção em alta temperatura:**
 - **diminui a viscosidade**
 - **reduz o tempo de gel**



IMPREGNAÇÃO

dificuldades na impregnação:

- escoamento em um meio poroso
- cinética de cura (reação exotérmica)
- capilaridade
- viscosidade varia durante o processo
- medida de permeabilidade
- *racetracking*



IMPREGNAÇÃO

racetracking

- a deformação da pré-forma no processo de preformagem (causada perto de bordas e por flexão, cisalhamento e estiramento) causa variações permeabilidade e de espessura
- isso causa variações físicas na pré-forma durante a moldagem criando regiões de alta porosidade da pré-forma



IMPREGNAÇÃO

racetracking

- regiões que oferecem menor resistência à vazão da resina injetada
- altera significativamente a forma da frente de propagação da resina, a pressão da injeção e do molde
- frequentemente causa regiões vazias e formação de outros defeitos.

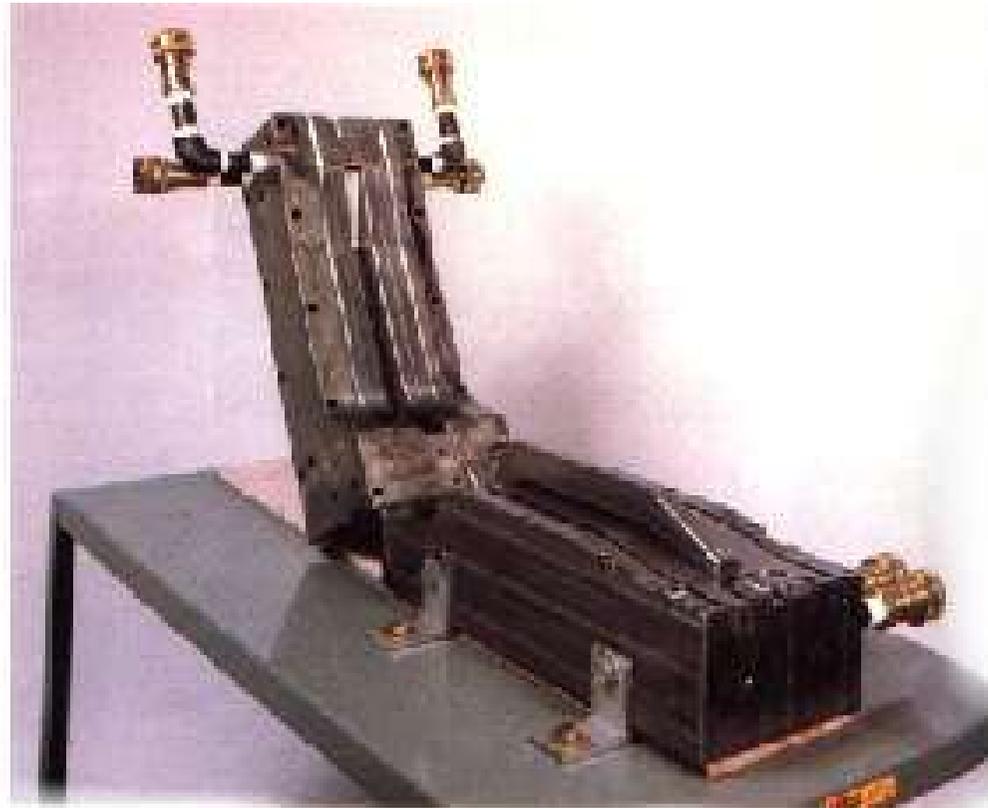


MODELAGEM DO PREENCHIMENTO DO MOLDE

- a modelagem numérica de processos de infusão é essencial porque o processo de preenchimento do molde é extremamente complexo
- é fundamental um modelo para projetar o molde e inclusive a orientação das camadas (efeito de capilaridade)



RTM
*(Resin
Transfer
Molding)*





RTM

CARACTERÍSTICAS

- pré-forma impregnada em molde fechado
- alta cadência de produção
- bom aproveitamento do material
- acabamento nas duas superfícies

APLICAÇÕES

- peças com grandes lotes
- geometrias complexas



RTM - ETAPAS DO PROCESSO

1. FABRICAÇÃO DA PRÉ-FORMA

- **braiding**
- **laminação**

2. MOLDAGEM DA PRÉ-FORMA

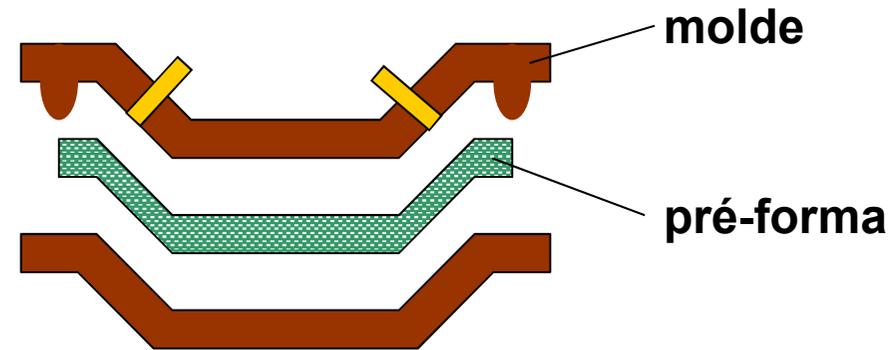
3. IMPREGNAÇÃO

- **uso de vácuo**
- **injeção (resina de baixa viscosidade)**
- **cura (molde aquecido)**

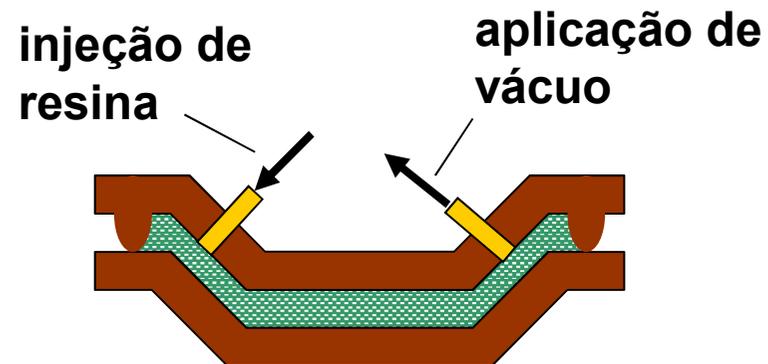


MOLDAGEM

RTM



IMPREGNAÇÃO

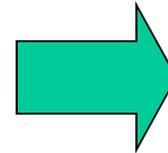




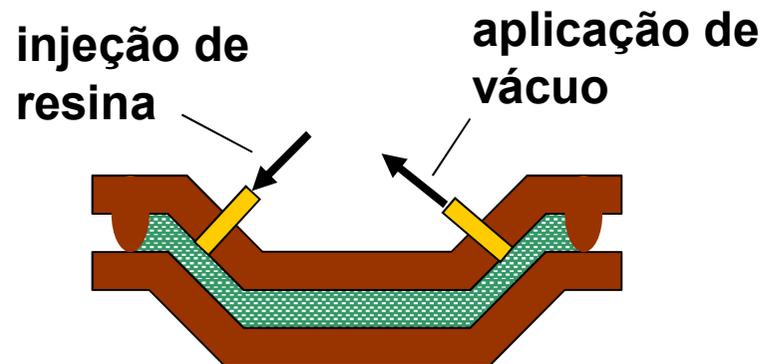
RTM

MOLDE

- alta pressão interna
- temperatura elevada
- sistema de aquecimento
- bom acabamento

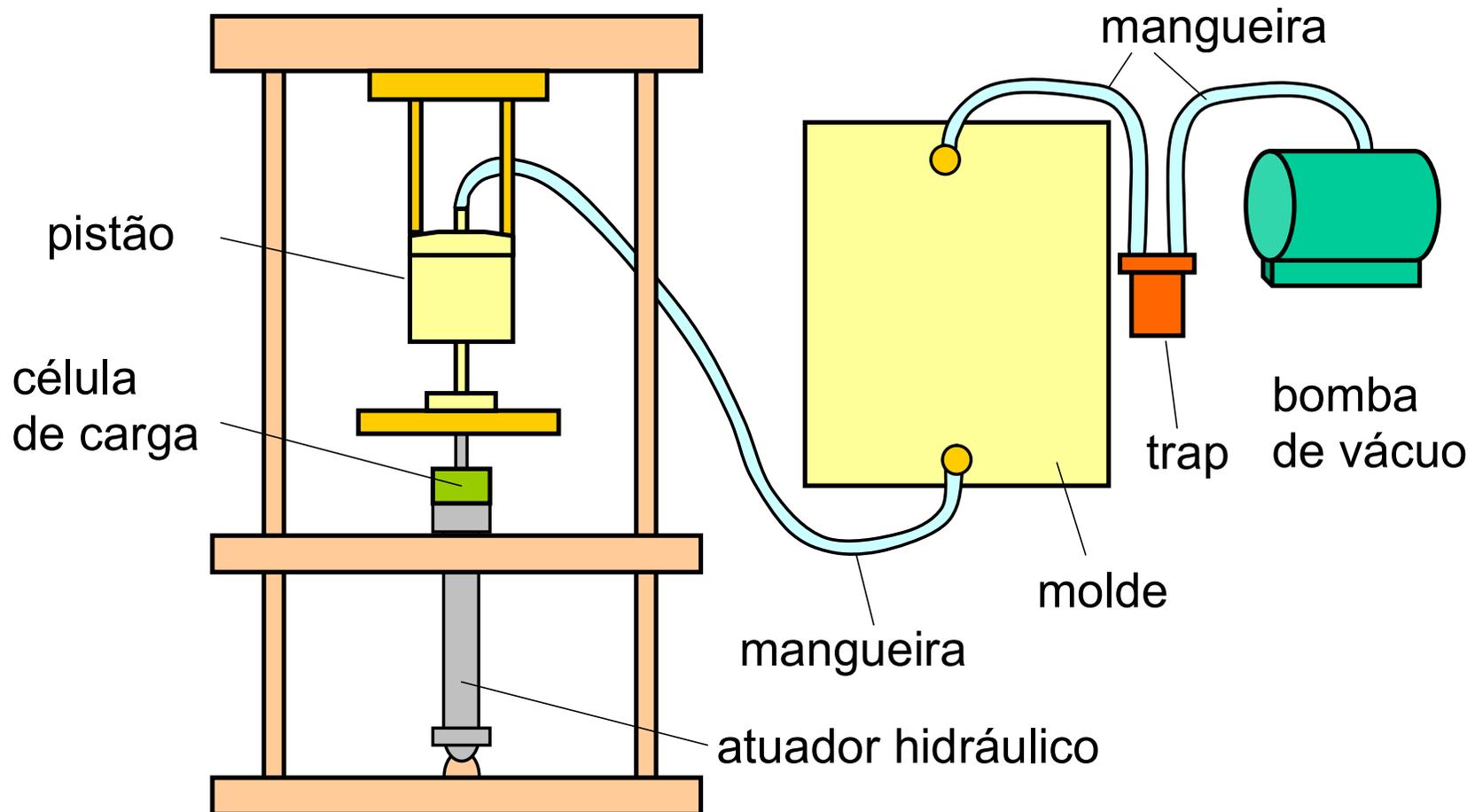


alto custo





SISTEMA DE INJEÇÃO





RTM

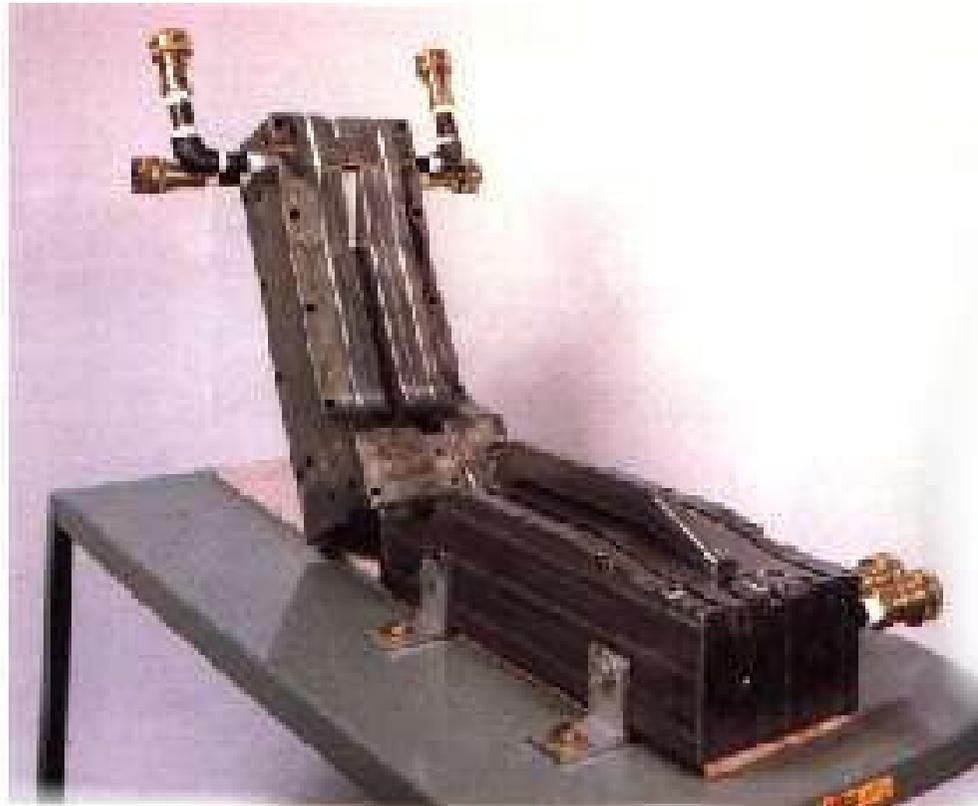
MATÉRIA PRIMA

- manta
- tecido seco
- braiding





MOLDE PARA RTM





RTM

PARÂMETROS DO PROCESSO

- alta velocidade causa bolhas / dobras
- alta viscosidade exige alta pressão
- alta pressão deforma o molde
- posição do injetor/saída (molhar o material)



RTM

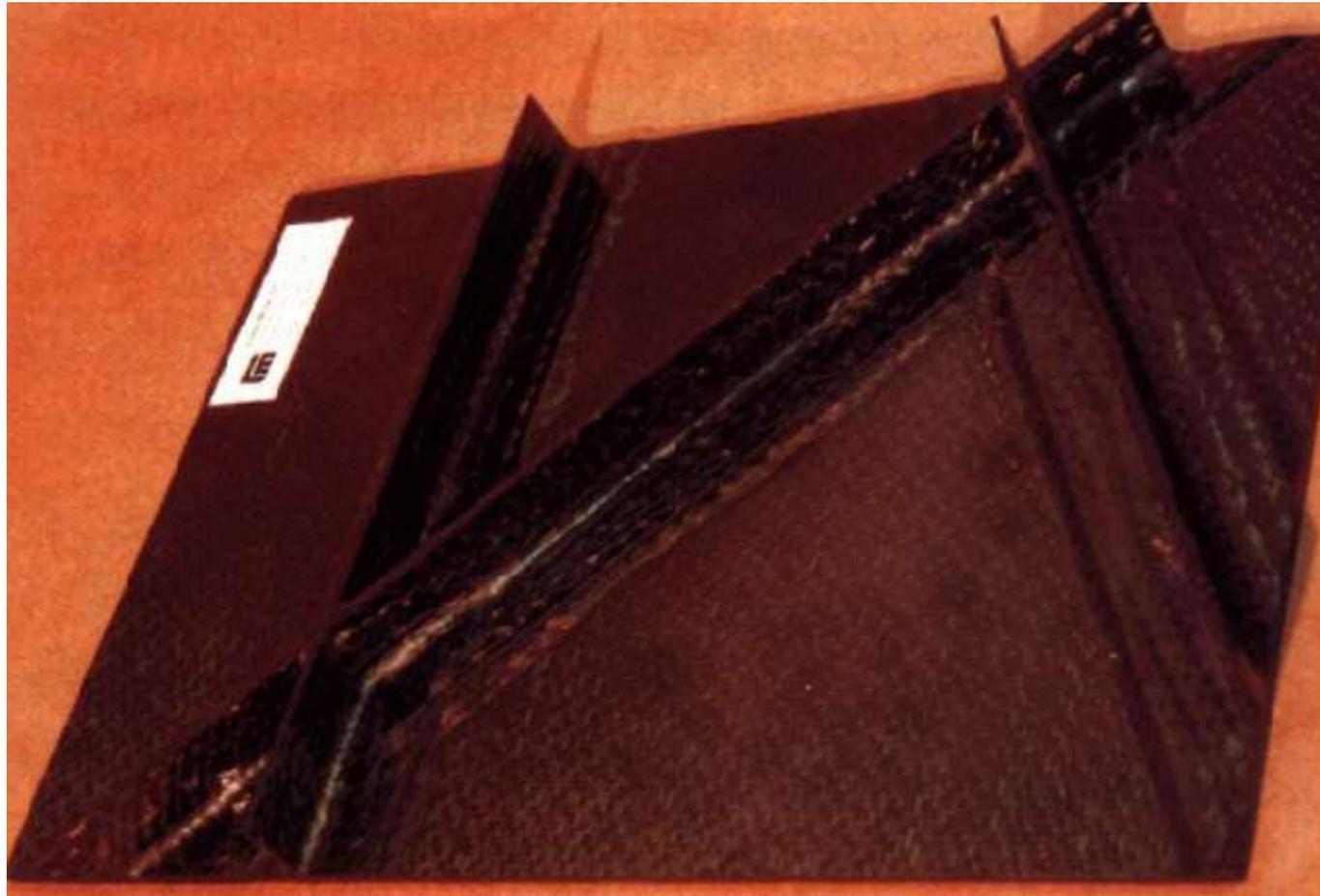
APLICAÇÕES





RTM

APLICAÇÕES





RTM

APLICAÇÕES





RTM

VANTAGENS

- bom aproveitamento do material
- alta taxa de produção
- bom acabamento nas duas superfícies
- moldagem de formas complexas
- peças médias e pequenas



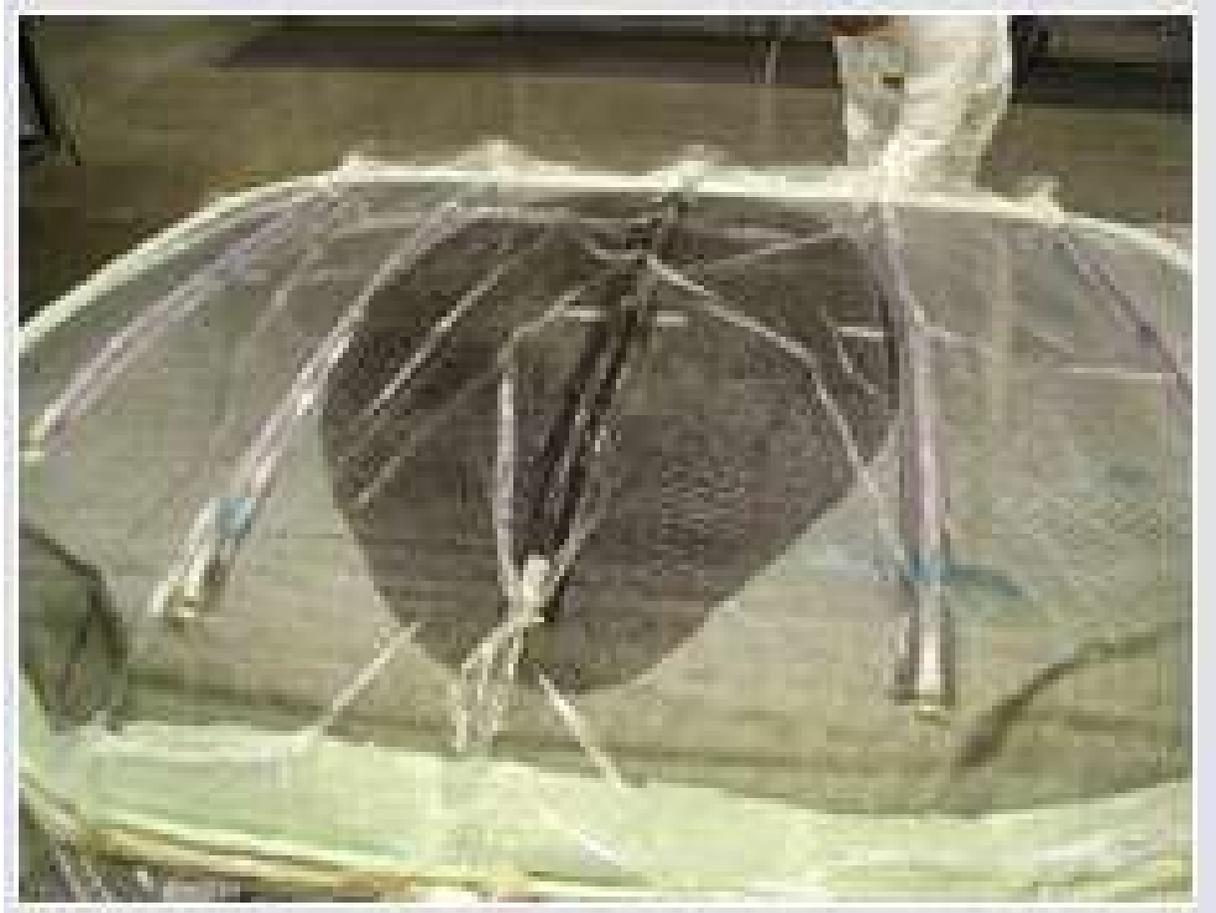
RTM

DESVANTAGENS

- custo do molde
- limitação de tamanho
- viável somente para lotes grandes



TÉCNICAS DE INFUSÃO DE RESINA





TÉCNICAS DE INFUSÃO DE RESINA

CARACTERÍSTICAS

- pré-forma impregnada a vácuo
- molde rígido e saco de vácuo
- limite de conteúdo de fibra
- acabamento em uma superfície

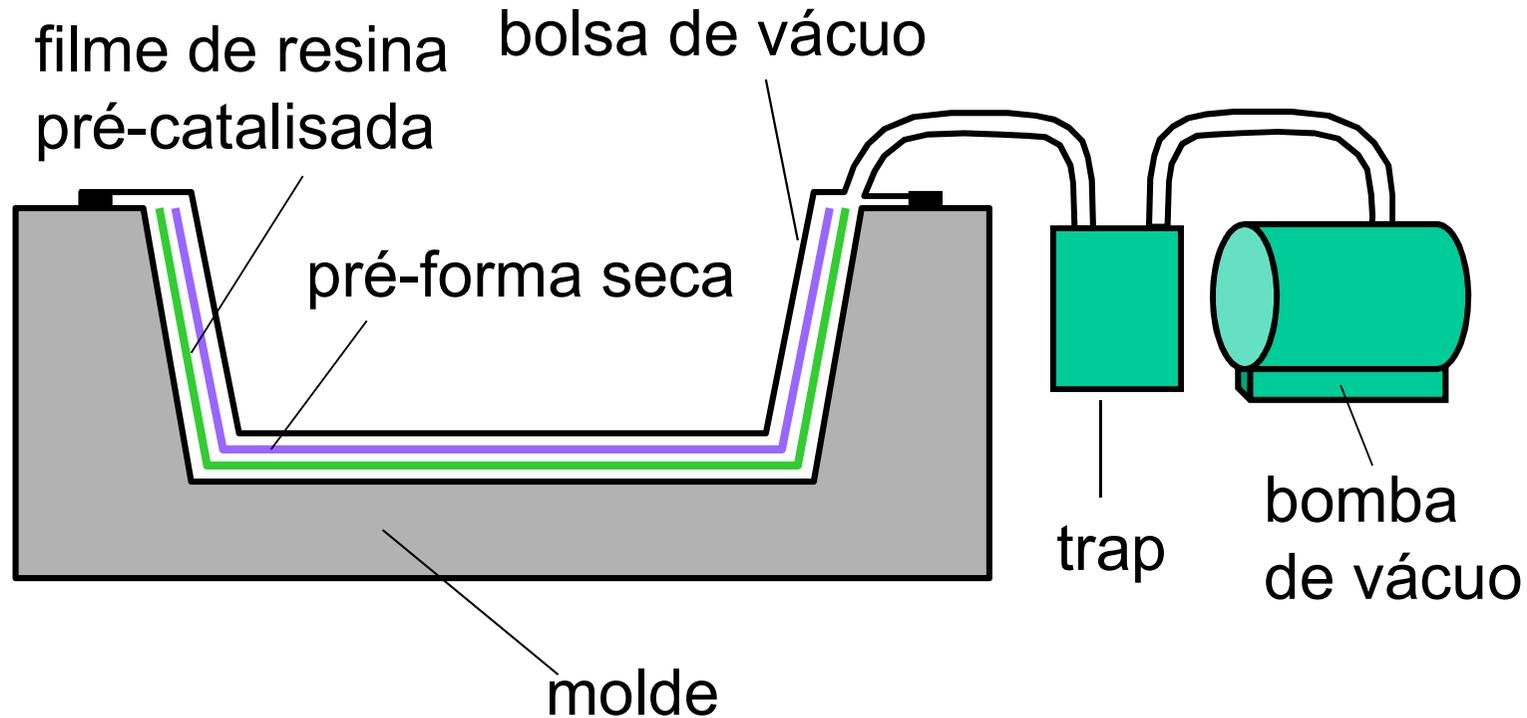
APLICAÇÕES

- peças de grande porte sem responsabilidade estrutural com conteúdo de fibra moderado



TÉCNICAS DE INFUSÃO DE RESINA

RFI – resin film infusion





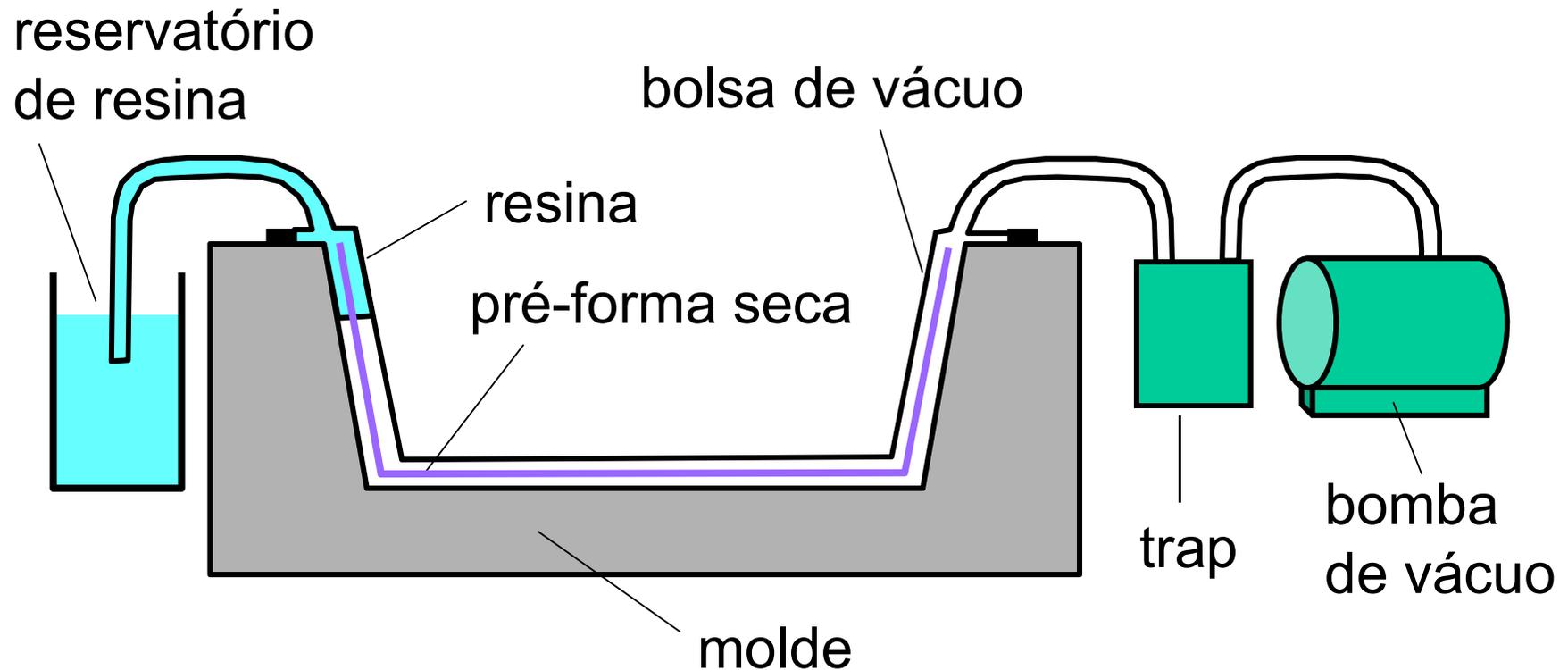
RFI – resin film infusion

- **fabricação da preforma**
- **posicionar filme de resina e preforma**
- **montar saco de vácuo**
- **aplicar calor e vácuo**
- **saturação da preforma com resina**
- **curar a peça**
- **desmoldagem**



TÉCNICAS DE INFUSÃO DE RESINA

LRI – liquid resin infusion



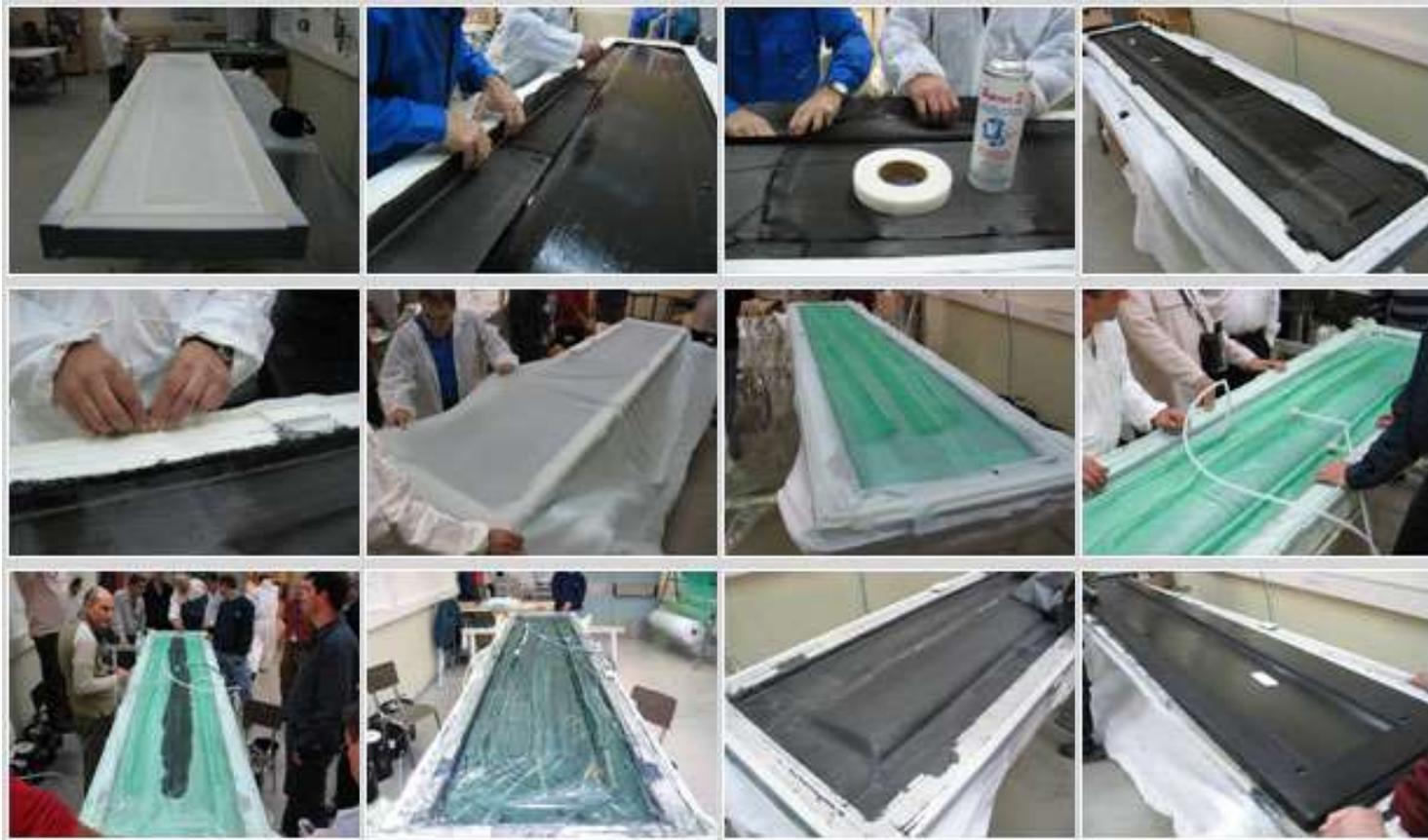


LRI – liquid resin infusion

- **fabricação da preforma**
- **posicionar preforma no molde**
- **montar saco de vácuo**
- **infusão da resina a vácuo**
- **aplicar calor e vácuo**
- **curar a peça**
- **desmoldagem**



TÉCNICAS DE INFUSÃO DE RESINA



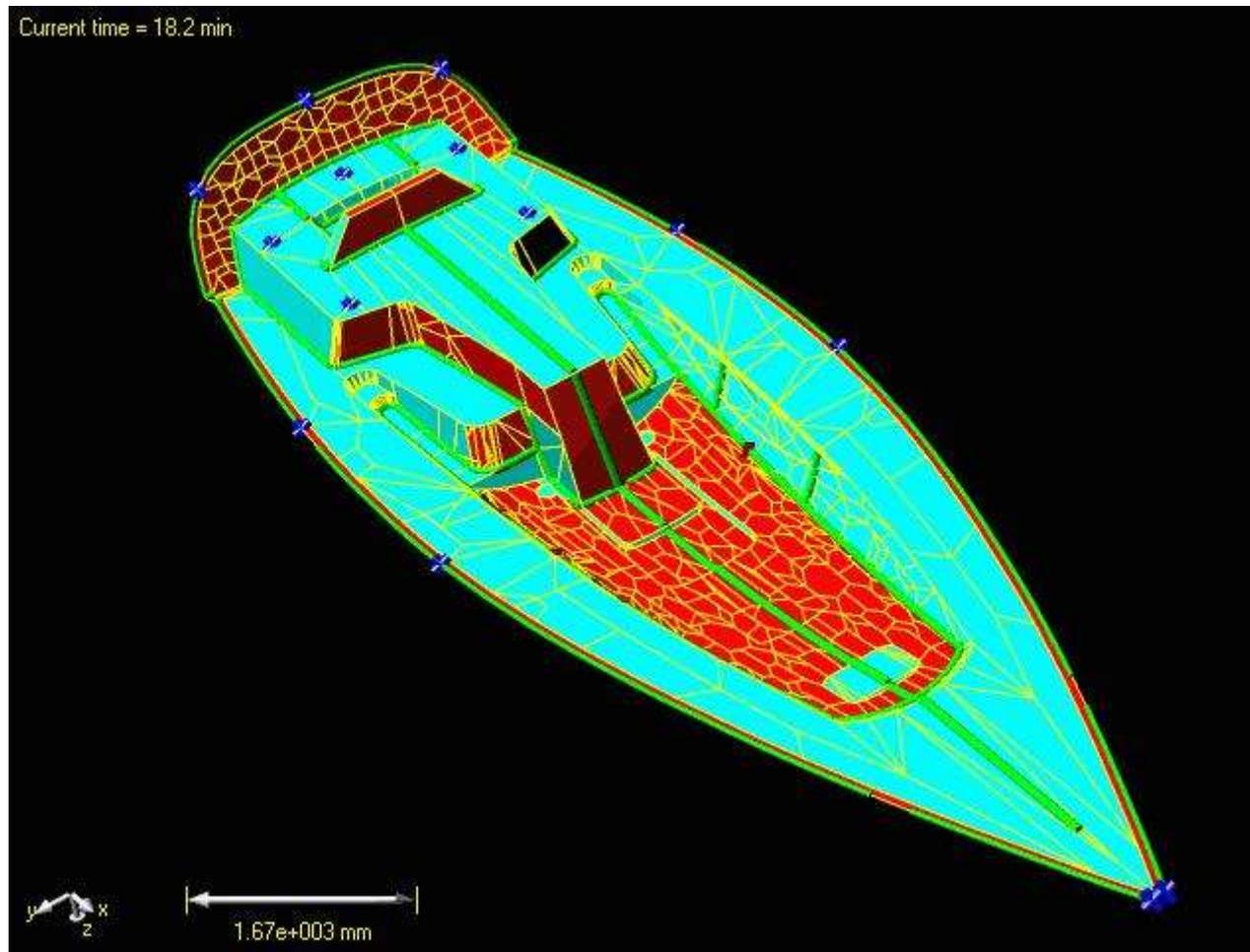


TÉCNICAS DE INFUSÃO DE RESINA





TÉCNICAS DE INFUSÃO DE RESINA





TÉCNICAS DE INFUSÃO DE RESINA

VANTAGENS

- bom aproveitamento do material
- alta taxa de produção
- molde de custo relativamente baixo
- moldagem de formas complexas
- peças de qualquer tamanho
(particularmente útil para peças grandes)



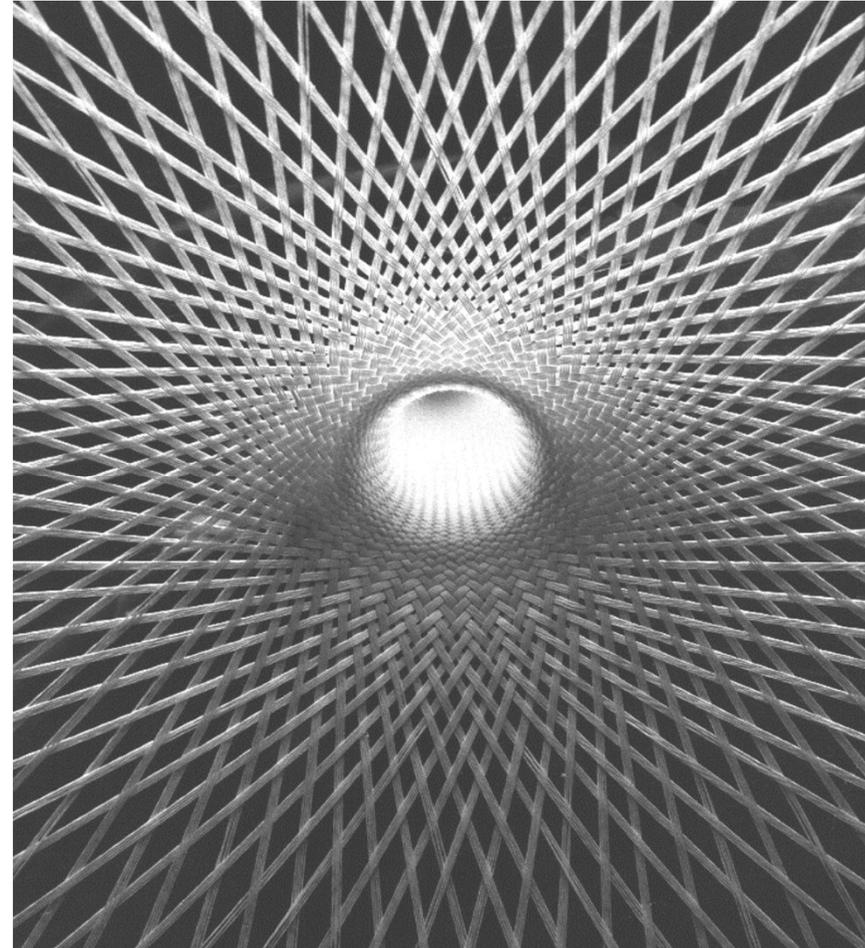
TÉCNICAS DE INFUSÃO DE RESINA

DESVANTAGENS

- acabamento em apenas uma superfície
- volume de fibra não muito elevado
- peças de baixa responsabilidade estrutural

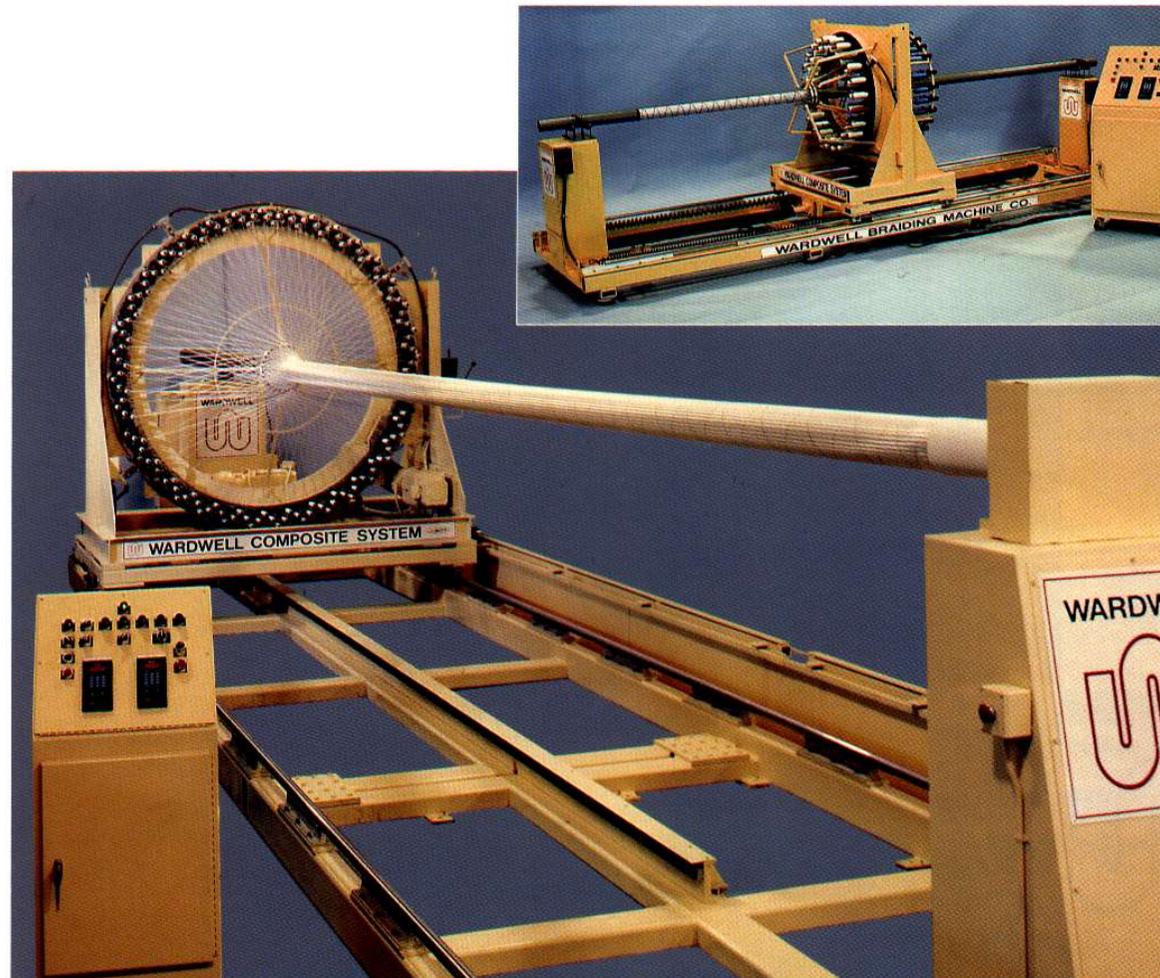


BRAIDING





Máquina de Braiding





BRAIDING

APLICAÇÕES

algumas configurações de peças
produzidas por braiding





BRAIDING

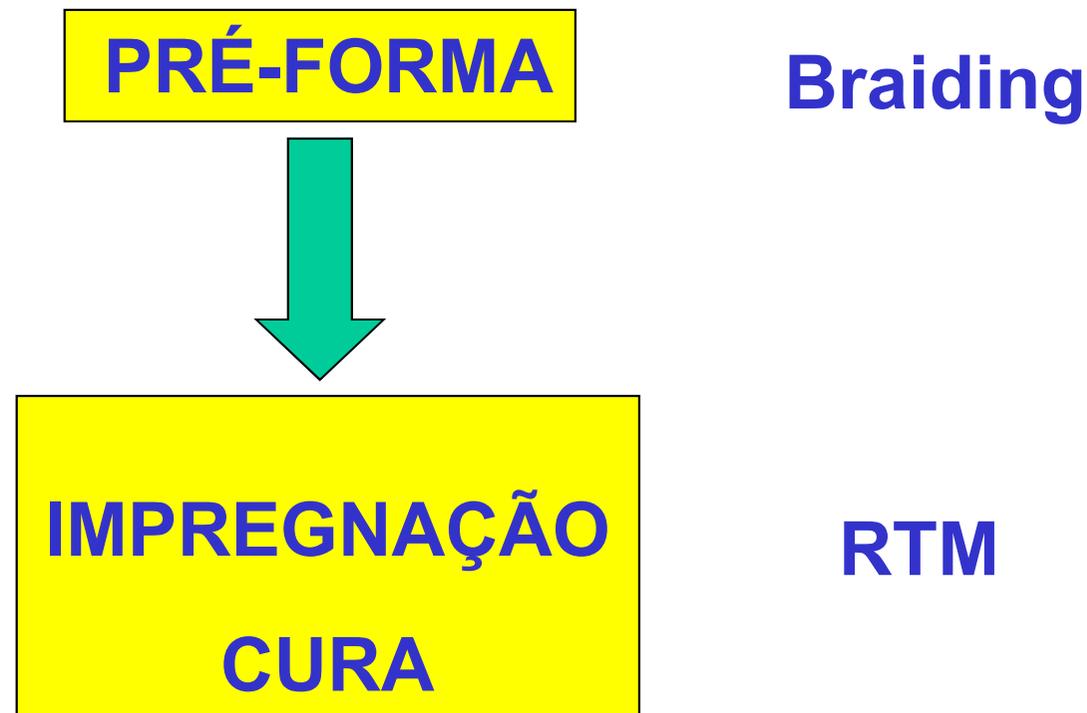
Cabos produzidos por braiding





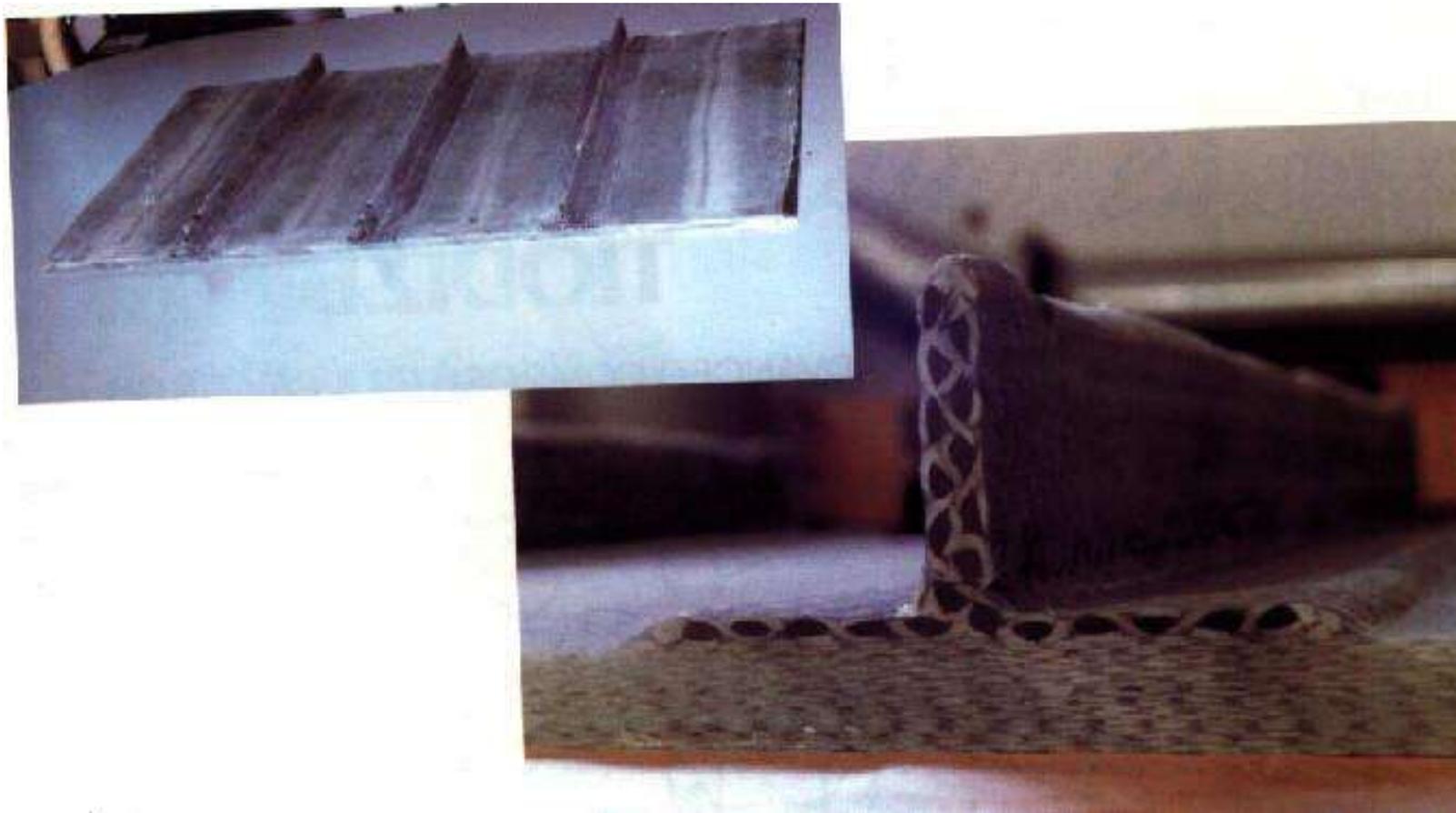
BRAIDING

COMBINAÇÕES COM OUTROS PROCESSOS





BRAIDING



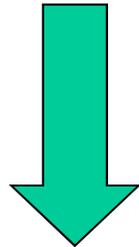


BRAIDING

COMBINAÇÕES COM OUTROS PROCESSOS

PRÉ-FORMA

Braiding

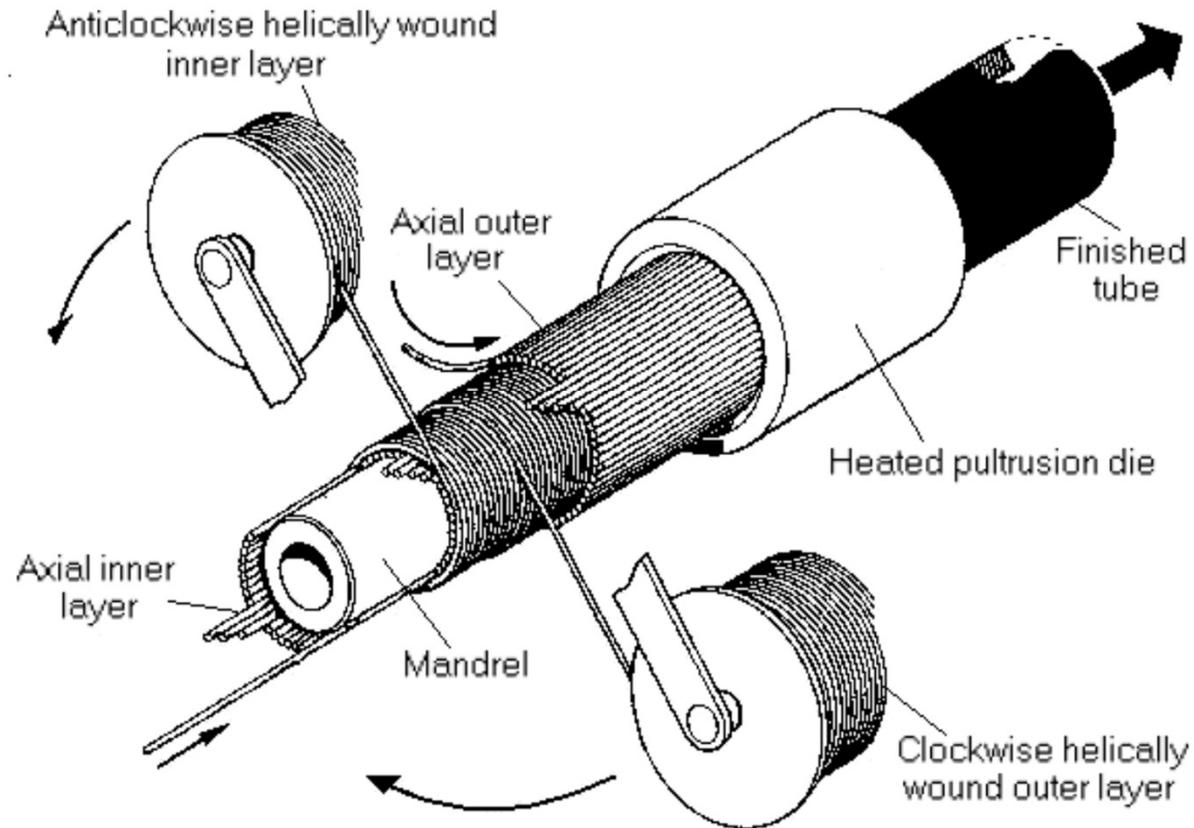


**IMPREGNAÇÃO
CURA**

Pultrusão



BRAIDING





Tecidos 3D

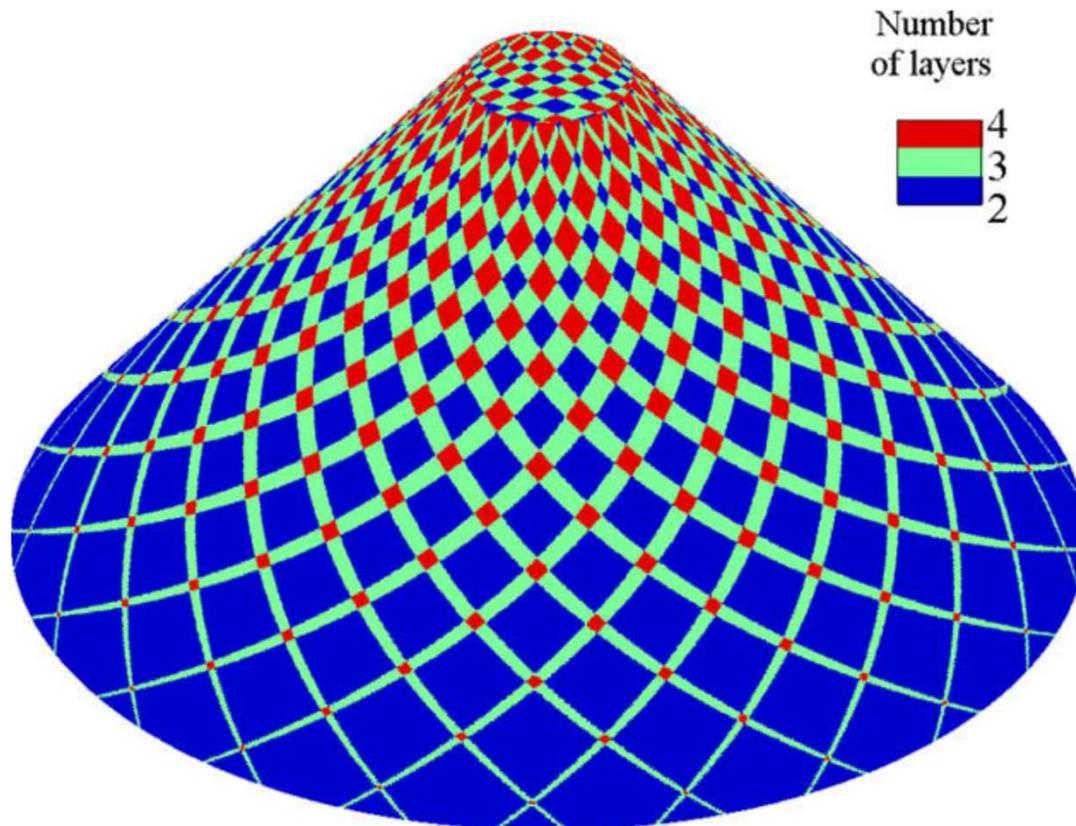


Tecidos 3D

- **tecidos 3D são laminados fabricados por braiding constituídos tipicamente de uma única camada**
- **vantagem: não há delaminação e minimiza problema de *draping***
- **desvantagem: fabricação mais complexa**

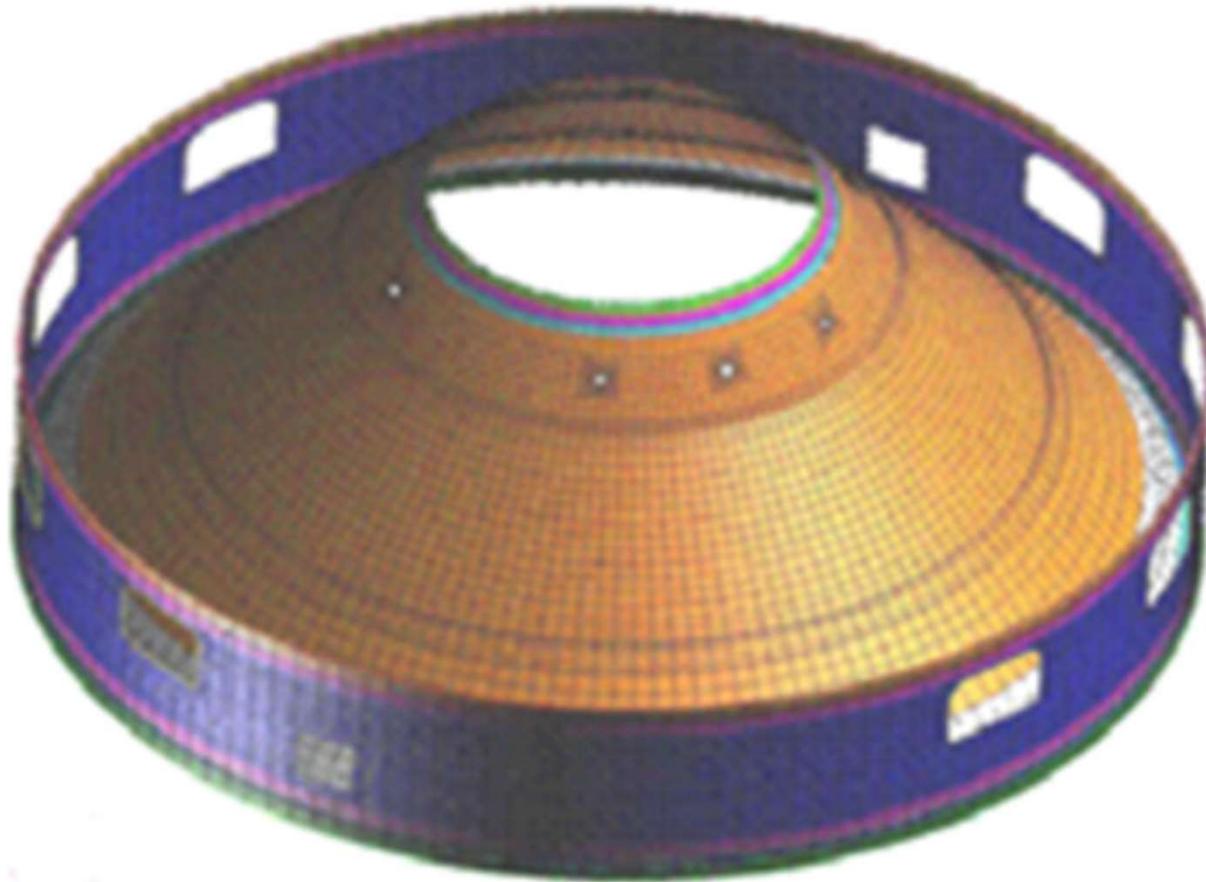


Tecidos 3D



draping: há gaps e overlaps ao se depositar camadas sobre uma superfície de curvatura dupla

afeta a resistência



**solução: uso
de tecido 3D**

Ariane 5 ME equipment bay structure



Tecidos 3D

Impactos mecânicos

soluções:

- ✓ **Braiding (tecido 3D)**
- ✓ ***fiber metal laminates (glare)***
- ✓ **laminados híbridos (carbono e kevlar)**