



# 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 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

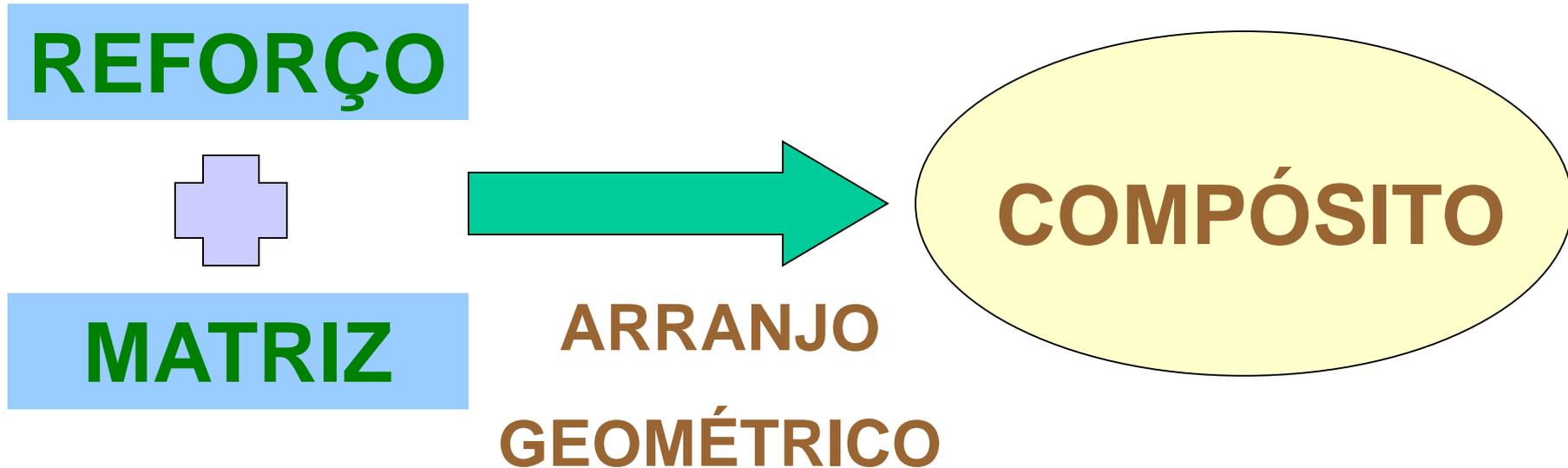
além da matriz e do reforço, a **interface** entre essas fases também afeta as propriedades mecânicas do compósito

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

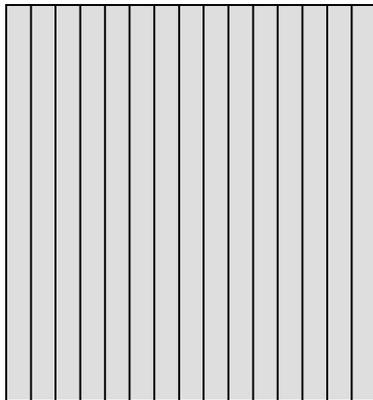
- muitas propriedades dos materiais, tais como rigidez, resistência, expansão térmica e condutividade térmica estão associadas com uma direção ou com a orientação dos eixos de referência
- um material é **anisotrópico** quando as suas propriedades variam com a direção ou com a orientação dos eixos de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



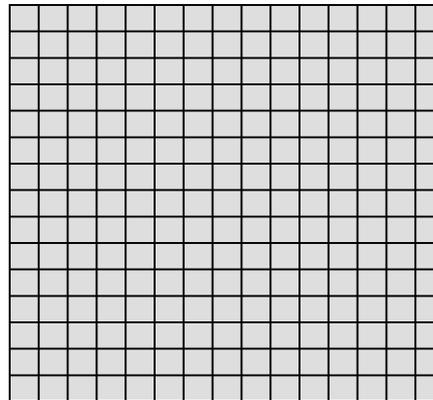
# CLASSIFICAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS

## quanto ao tipo de reforço – arranjo geométrico

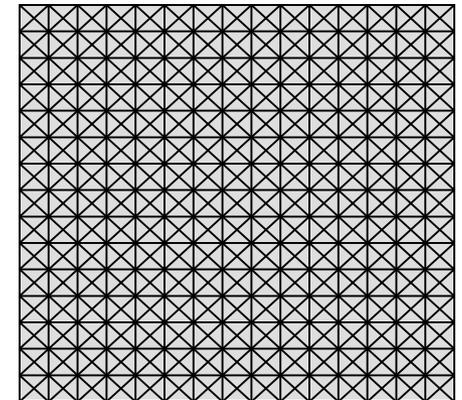
unidirecional



bi-direcional



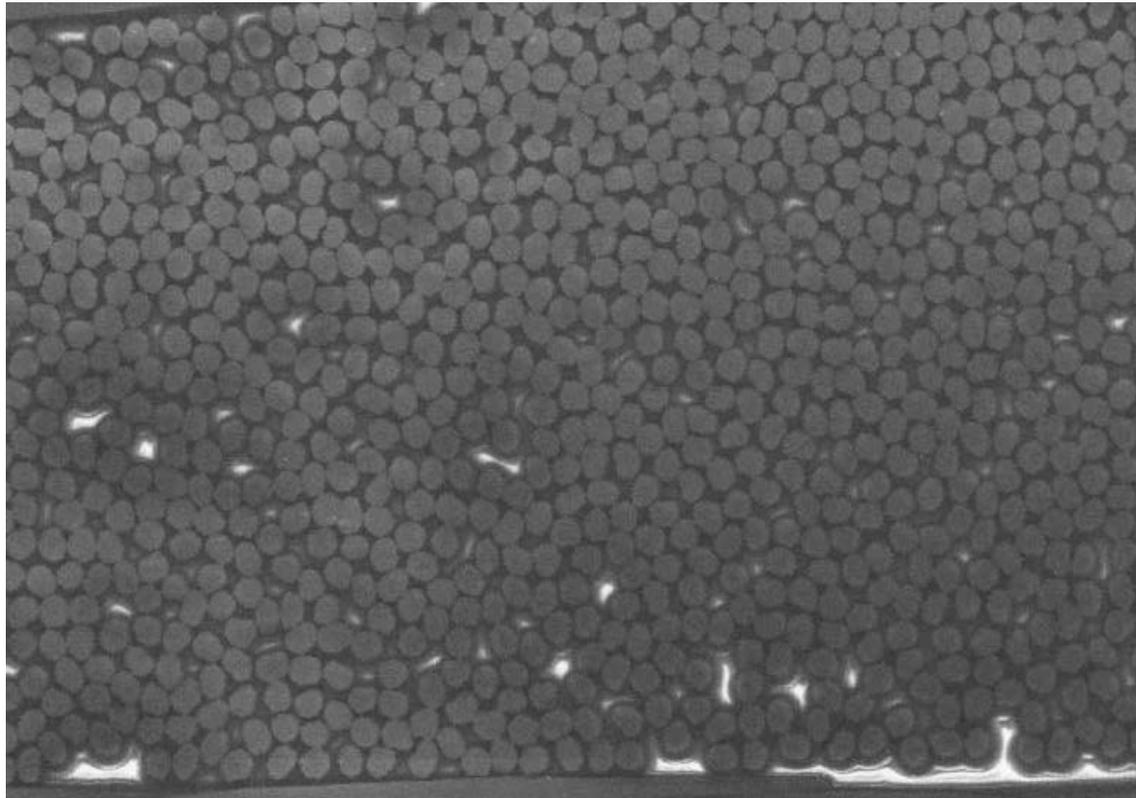
multidirecional





# CLASSIFICAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS

## quanto ao tipo de reforço – arranjo geométrico



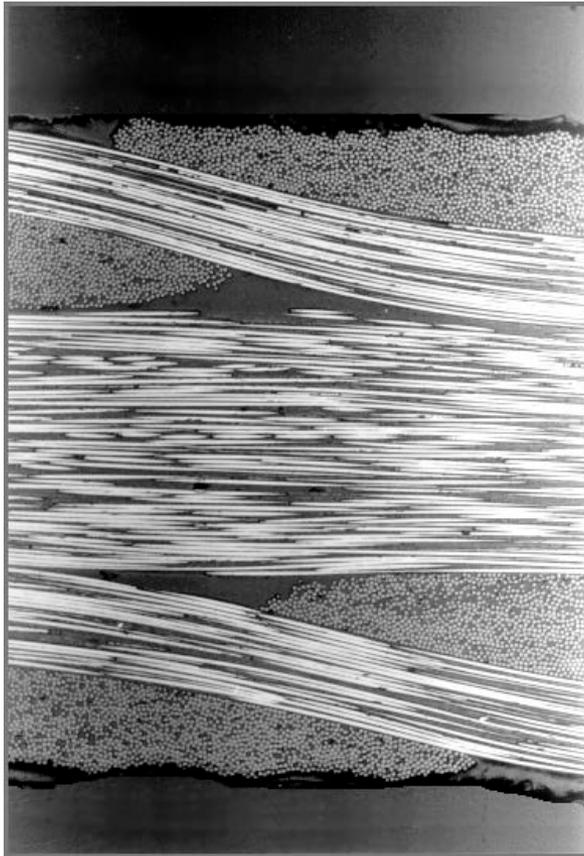
micrografia  
de corte  
transversal  
de lâmina

(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**

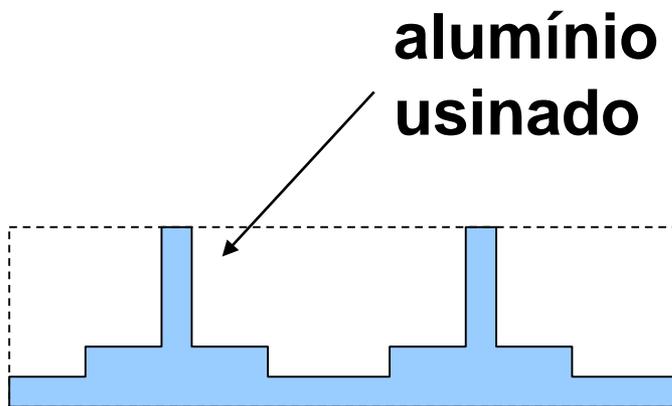


# Motivação para uso de compósitos

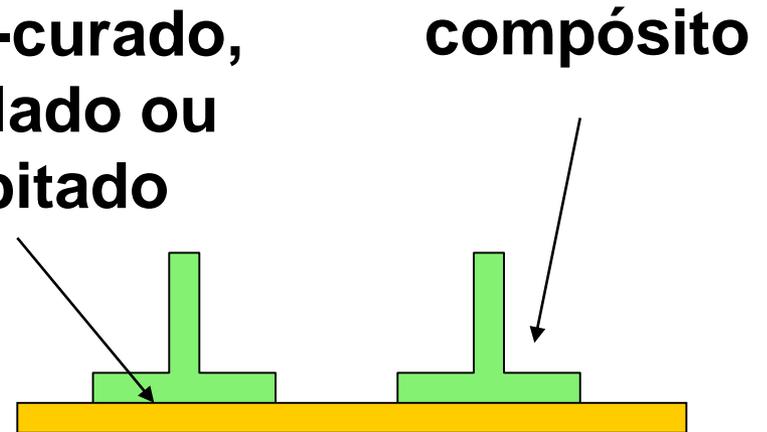
## Redução

- peso
- custo

## Redução de peso depende do processo de fabricação



reforçador:  
co-curado,  
colado ou  
rebitado





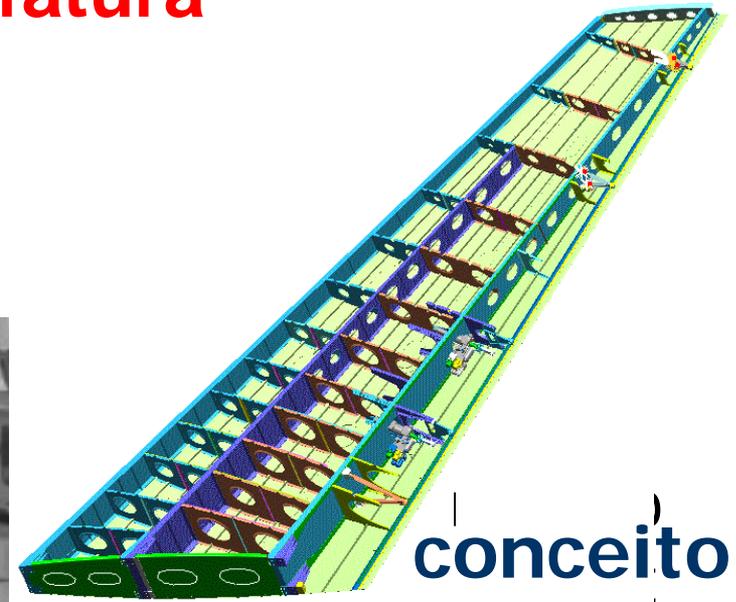
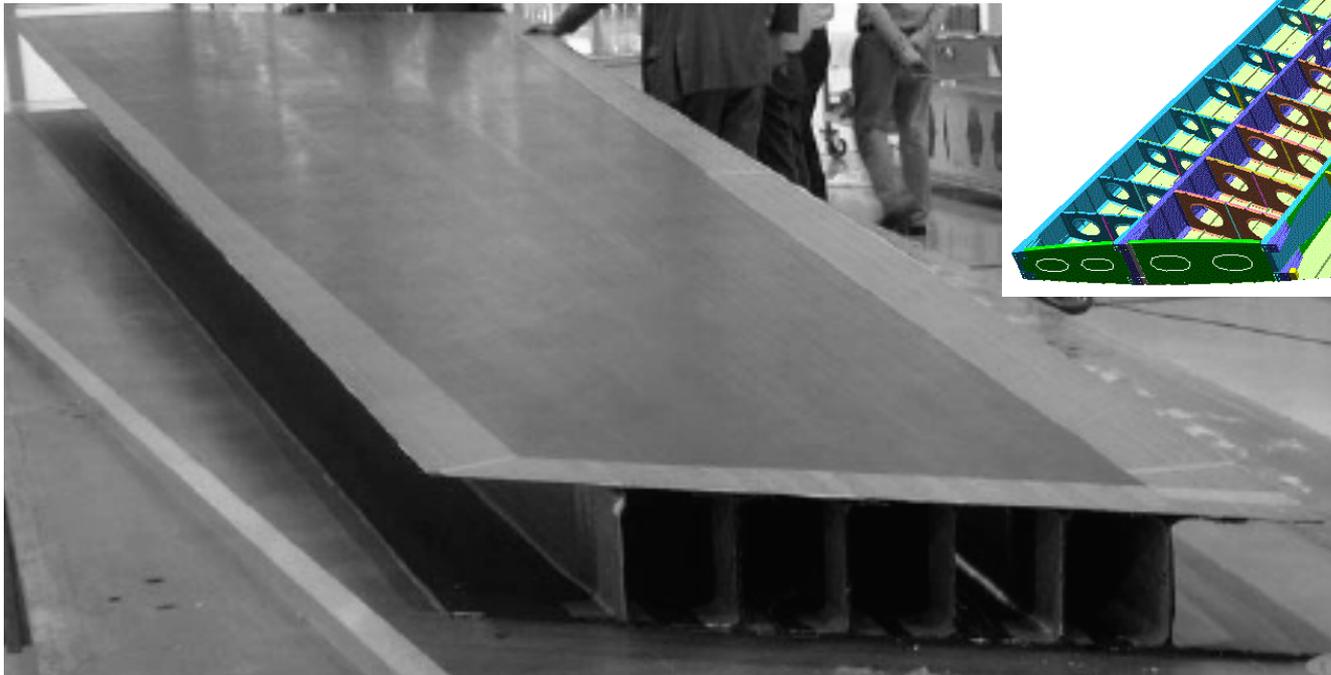
# Motivação para uso de compósitos

- **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



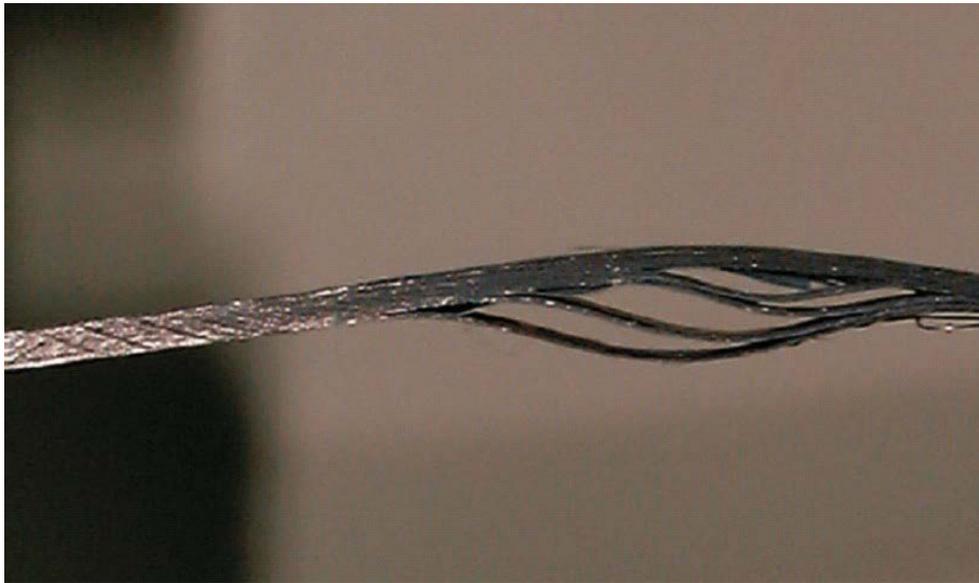
conceito clássico



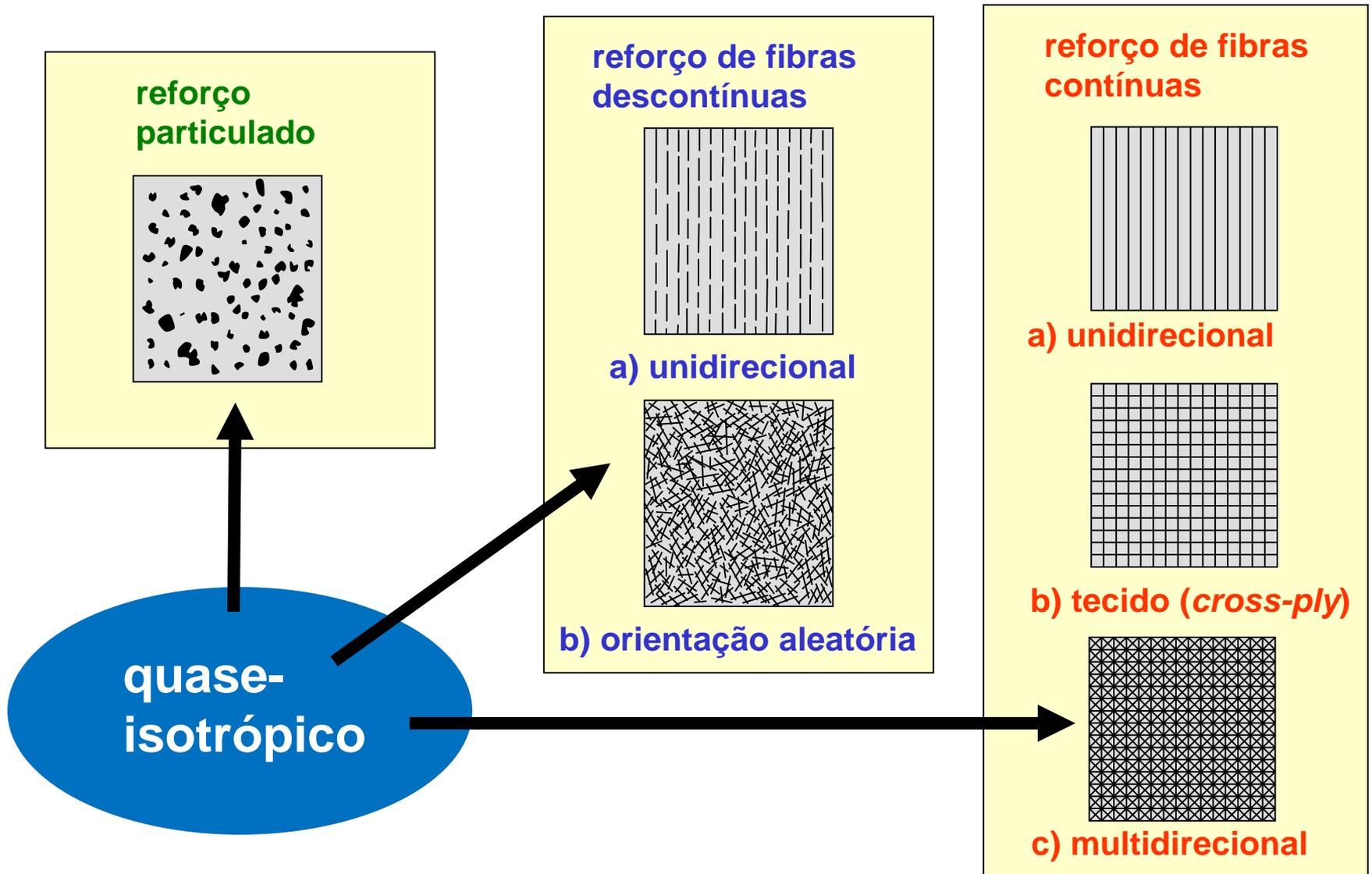
## Projeto

### 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)
<b>Aço</b>	<b>210</b>	<b>210</b>	<b>83</b>
<b>Alumínio</b>	<b>70</b>	<b>70</b>	<b>28</b>
Carbono /epóxi	[0] <sub>s</sub>	147	10
	[0/90] <sub>s</sub>	79	79
	[0/90/45/-45] <sub>s</sub>	58	58

- a rigidez do aço é maior que o carbono epóxi unidirecional
- a rigidez do alumínio é da ordem do laminado [0/90]<sub>s</sub>



# módulo de elasticidade - arranjo geométrico

## rigidez por unidade de peso

Material	$E_x / \rho$ (Mm)	$E_y / \rho$ (Mm)	$G_{xy} / \rho$ (Mm)
<b>Aço</b>	<b>26,9</b>	<b>26,9</b>	<b>10,6</b>
<b>Alumínio</b>	<b>28,0</b>	<b>28,0</b>	<b>11,0</b>
<b>Carbono /epóxi</b>	<b>[0]<sub>s</sub></b>	<b>6,4</b>	<b>4,4</b>
	<b>[0/90]<sub>s</sub></b>	<b>49,3</b>	<b>4,4</b>
	<b>[0/90/45/-45]<sub>s</sub></b>	<b>36,4</b>	<b>14,1</b>

- 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

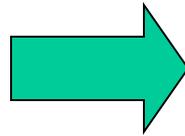


# SELEÇÃO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO

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



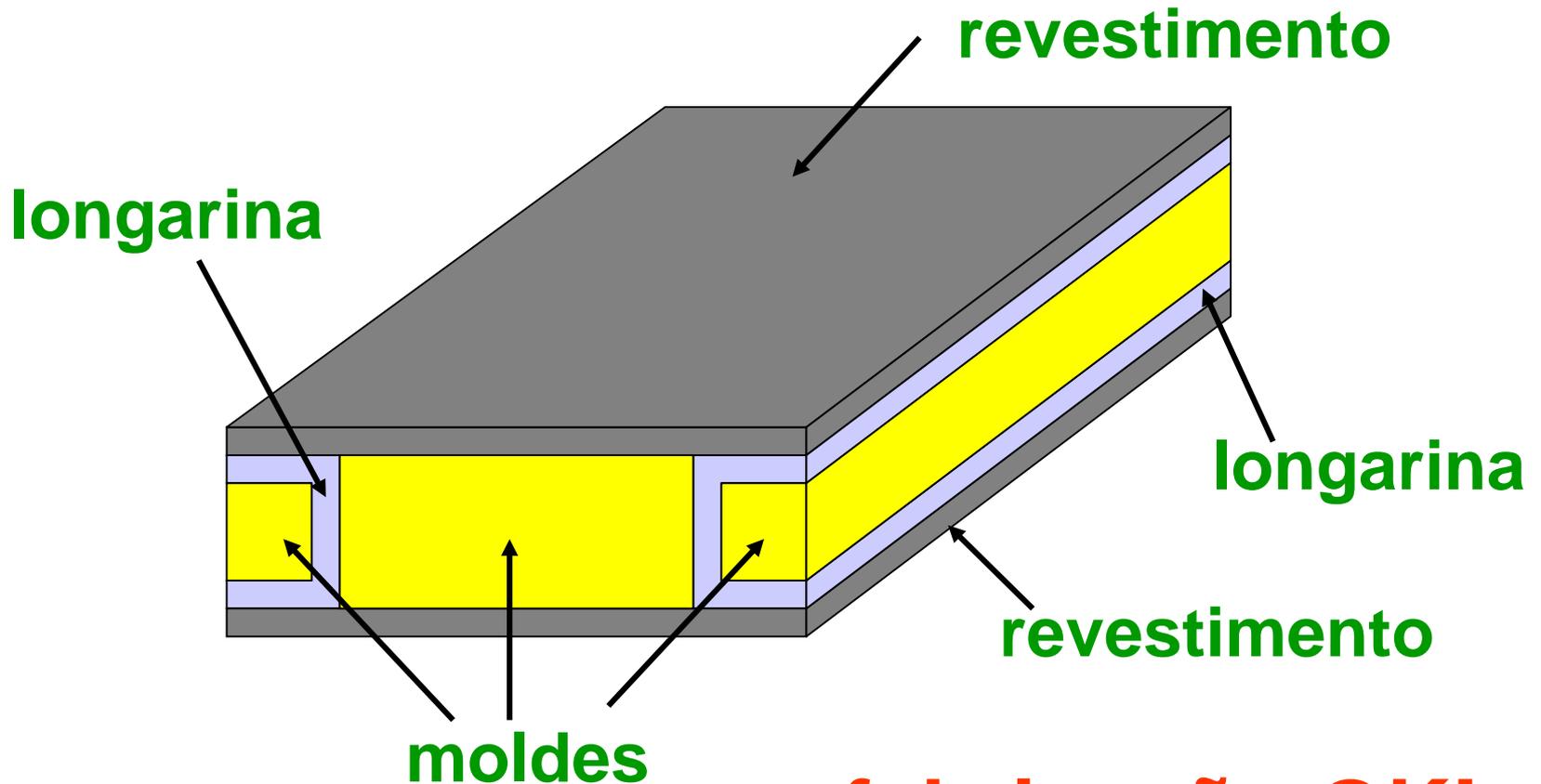
# MOLDES

## Características:

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



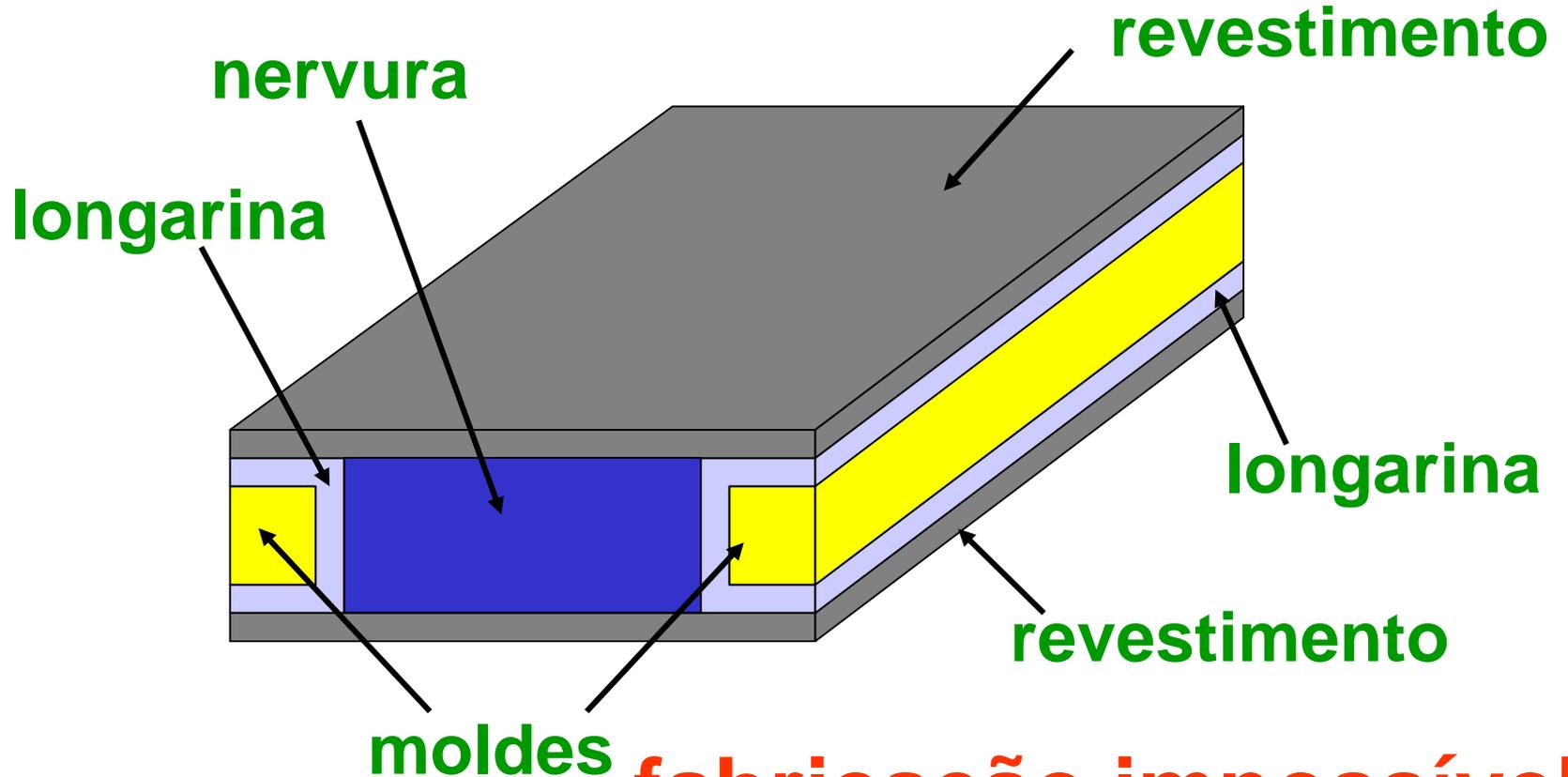
# MOLDES



**fabricação OK!**



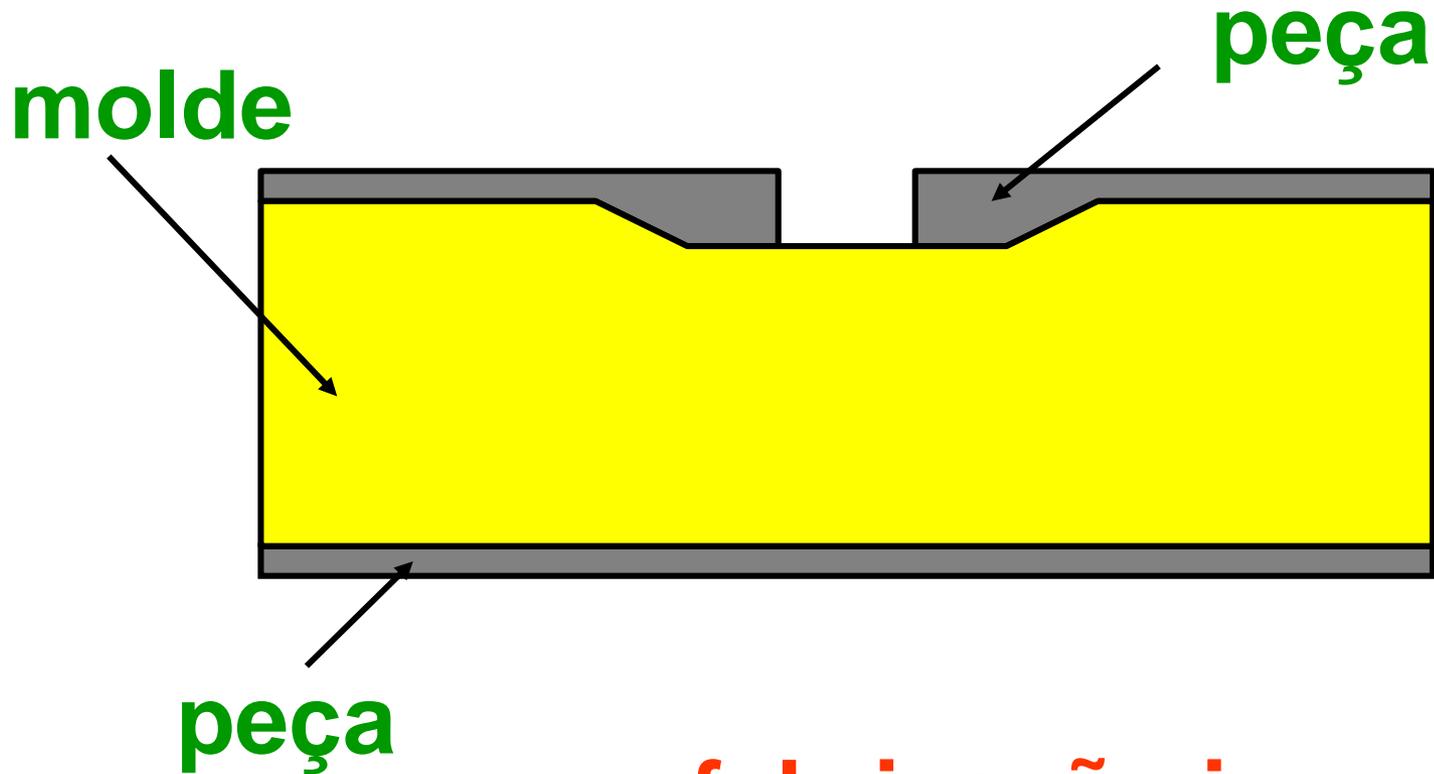
# MOLDES



**fabricação impossível!**



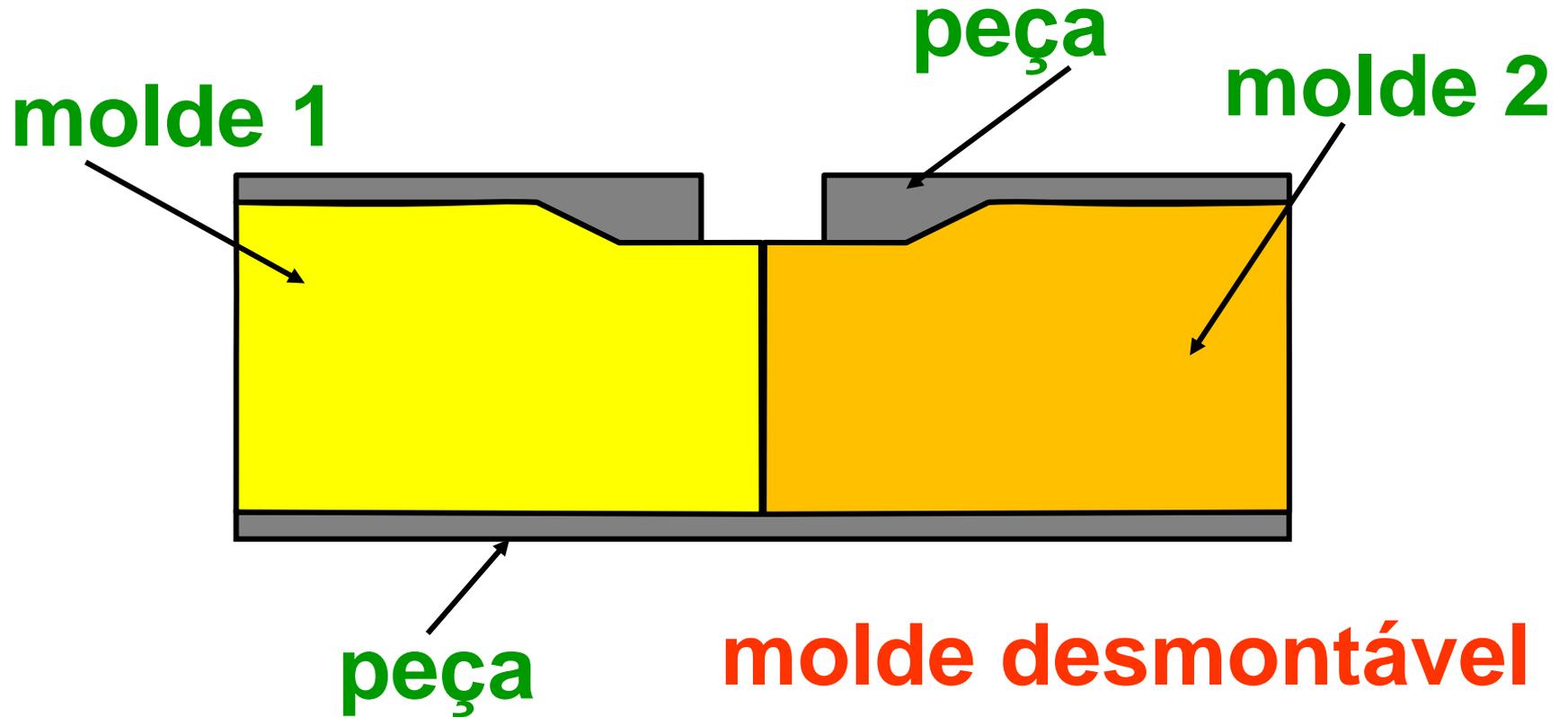
# MOLDES



**fabricação impossível!**

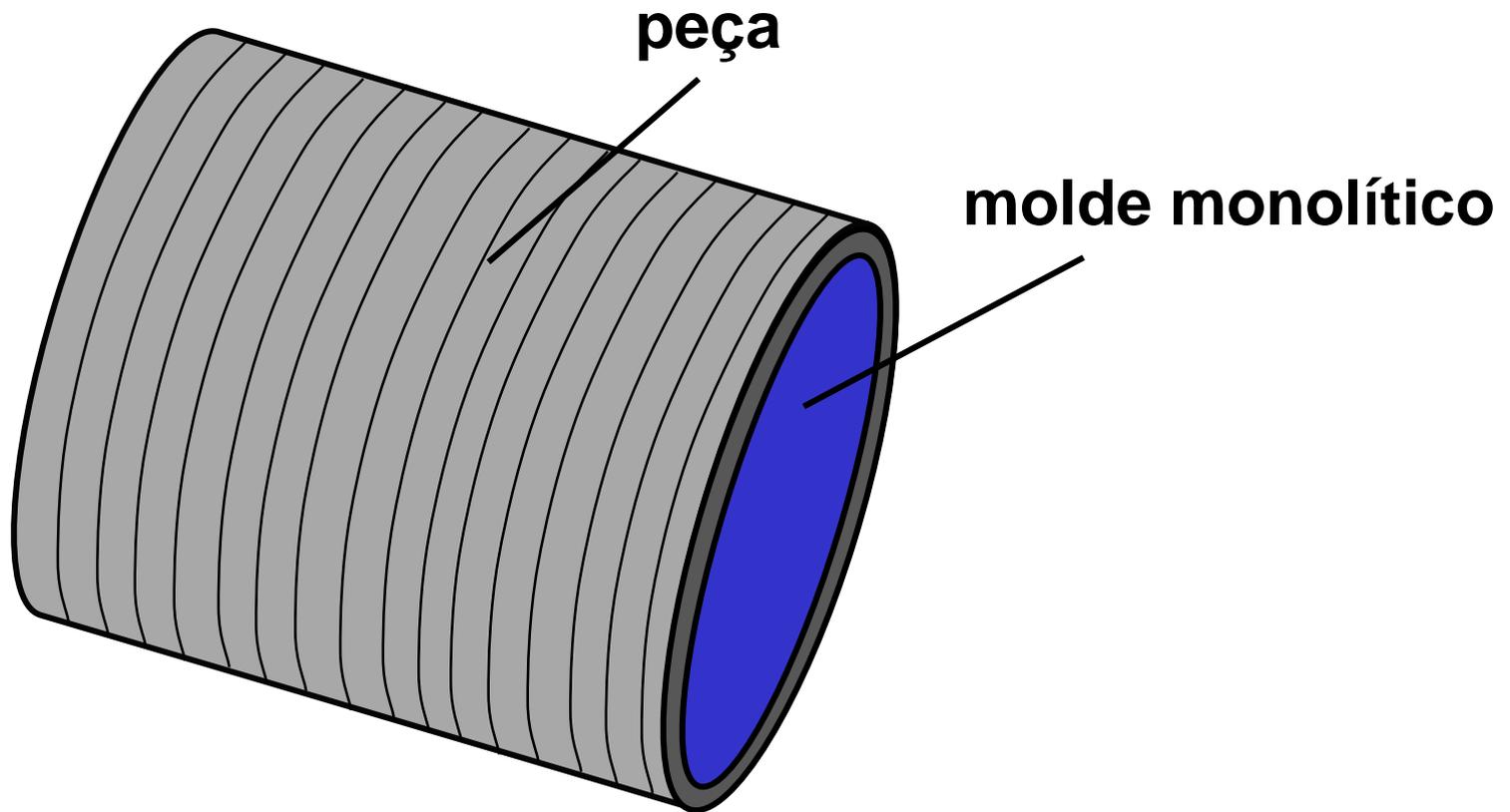


# MOLDES





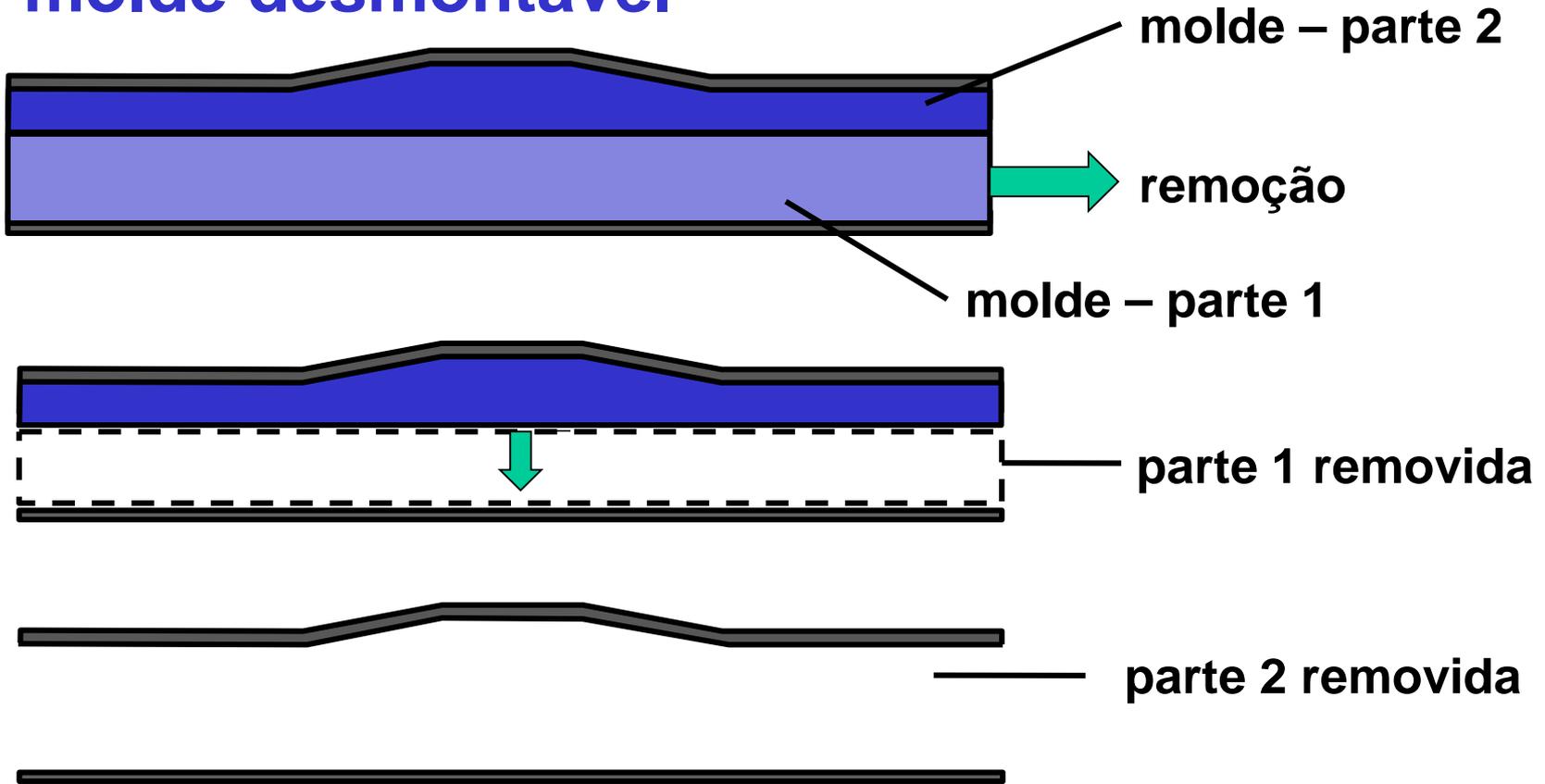
# MOLDES





# MOLDE

## molde desmontável

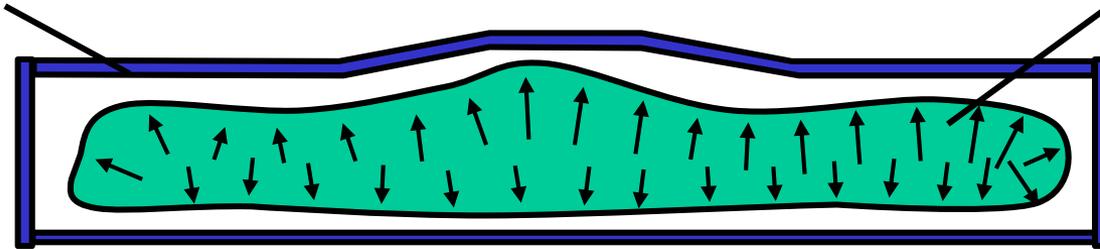




# MOLDES

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)**

- **fita unidirecional**
- **tecido**

### **FIBRAS**

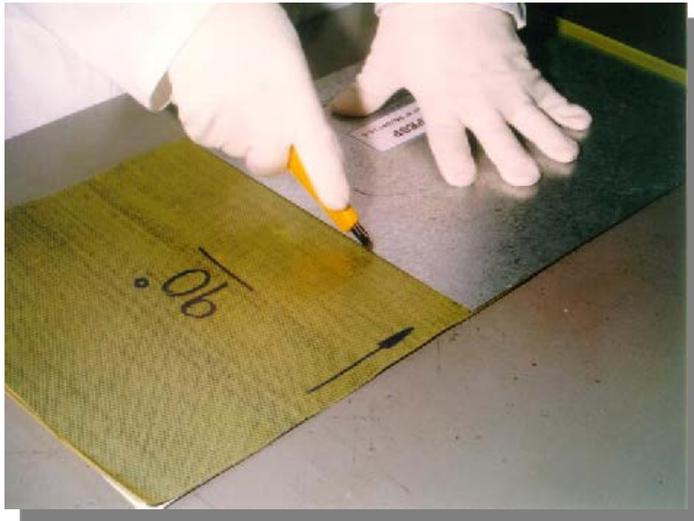
- **carbono**
- **kevlar**
- **vidro**





# HAND LAYUP / AUTOCLAVE

## Corte das camadas



## Laminação





# **HAND LAYUP / AUTOCLAVE**

## **MOLDES**

### **METÁLICO**

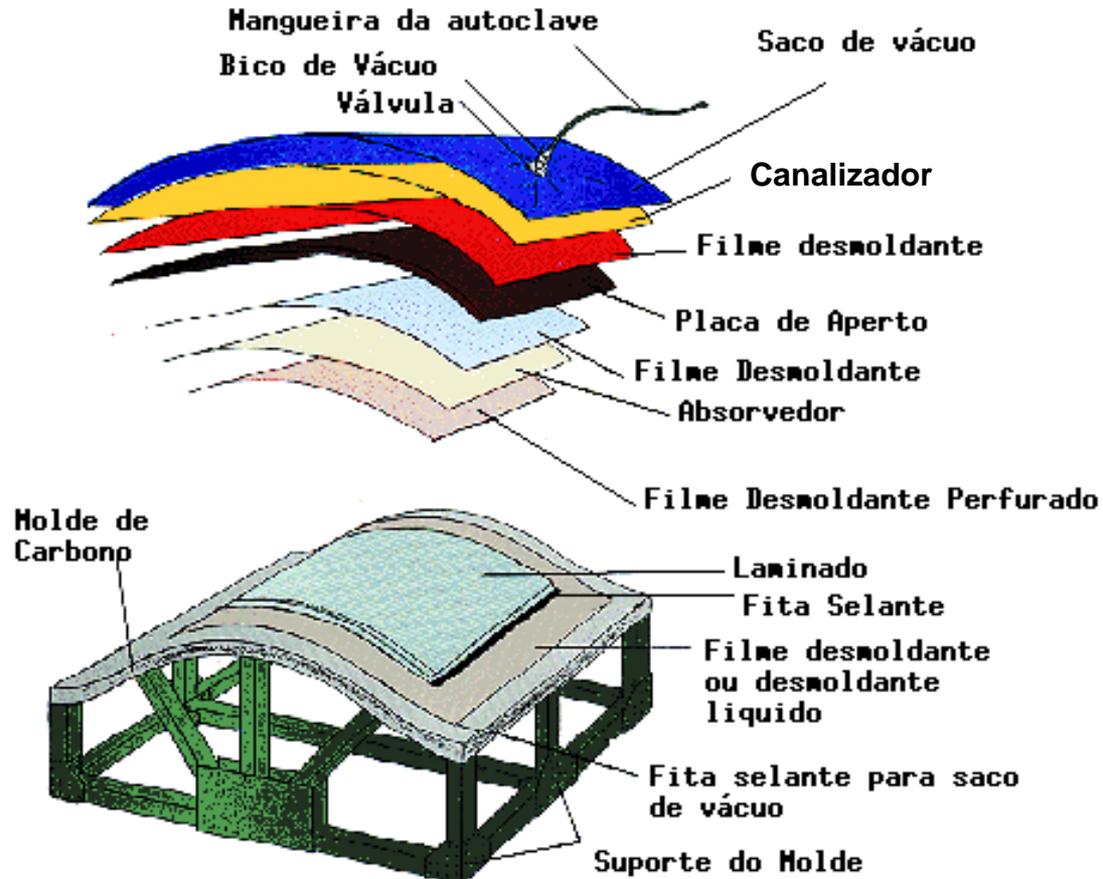
- maior durabilidade
- capacidade térmica
- alto custo
- usinagem

### **COMPÓSITO**

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



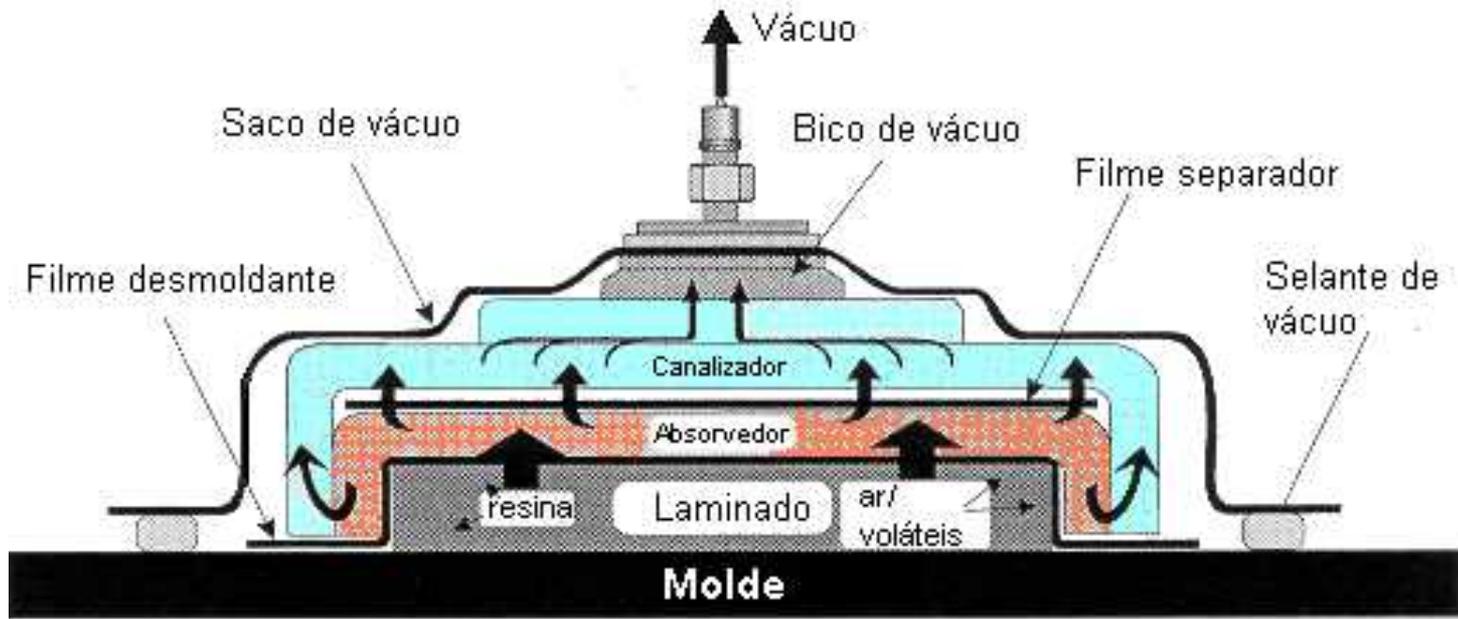
## Laminação e bolsa de vácuo





# HAND LAYUP / AUTOCLAVE

## bolsa de vácuo: descrição

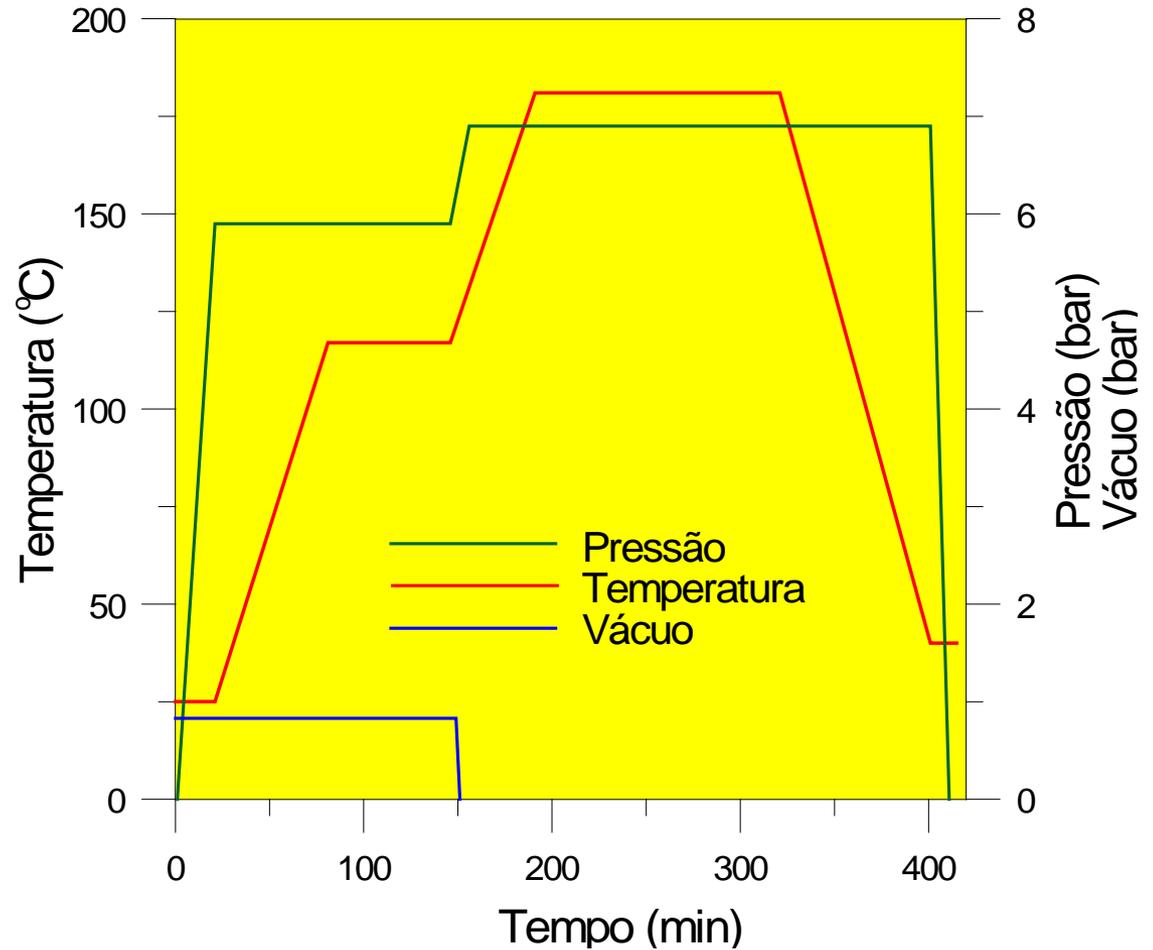




# HAND LAYUP / AUTOCLAVE

## 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

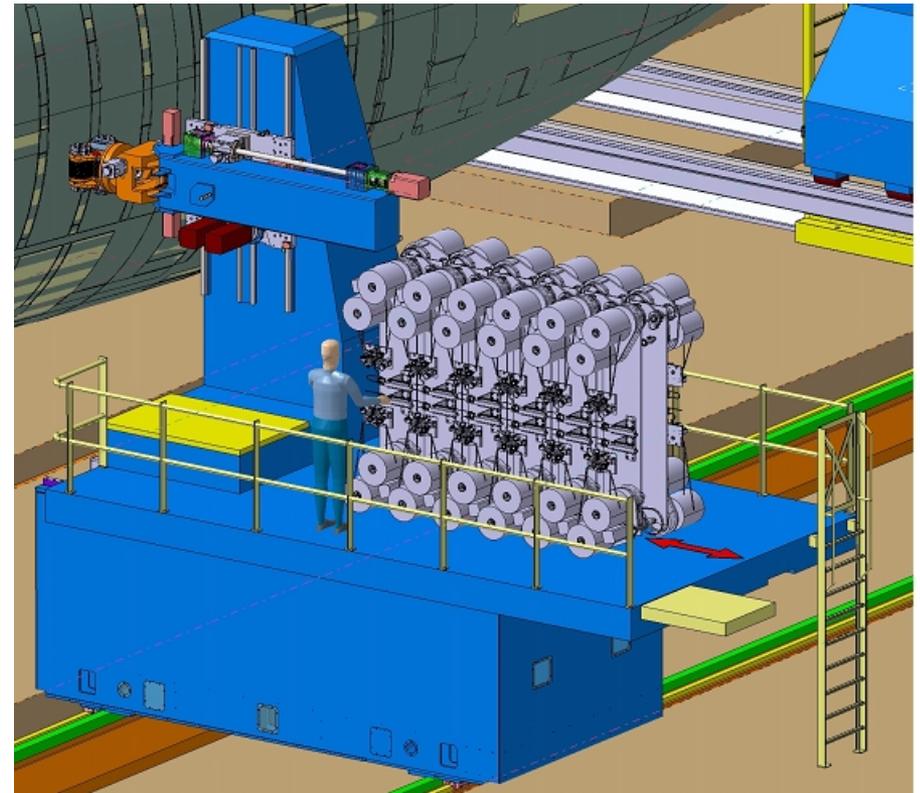
## Fiber Placement ou ATL – Automatic tape laying





# LAMINAÇÃO AUTOMÁTICA

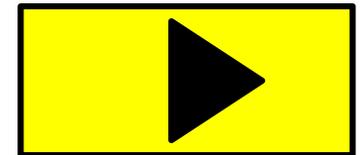
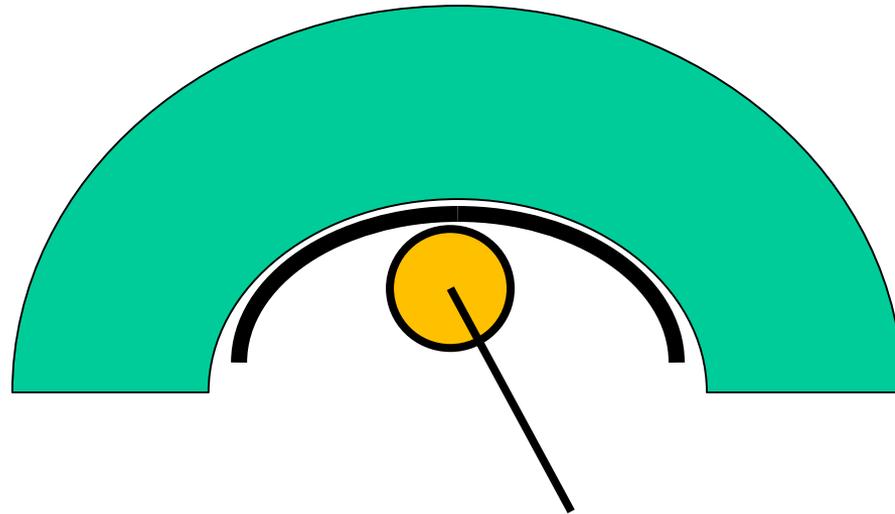
## Fiber Placement ou ATL – Automatic tape laying





# LAMINAÇÃO AUTOMÁTICA

## Compactação automática





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





# **FILAMENT WINDING**

## **Aplicações: peças axisimétricas**

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

### **Resinas:**

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

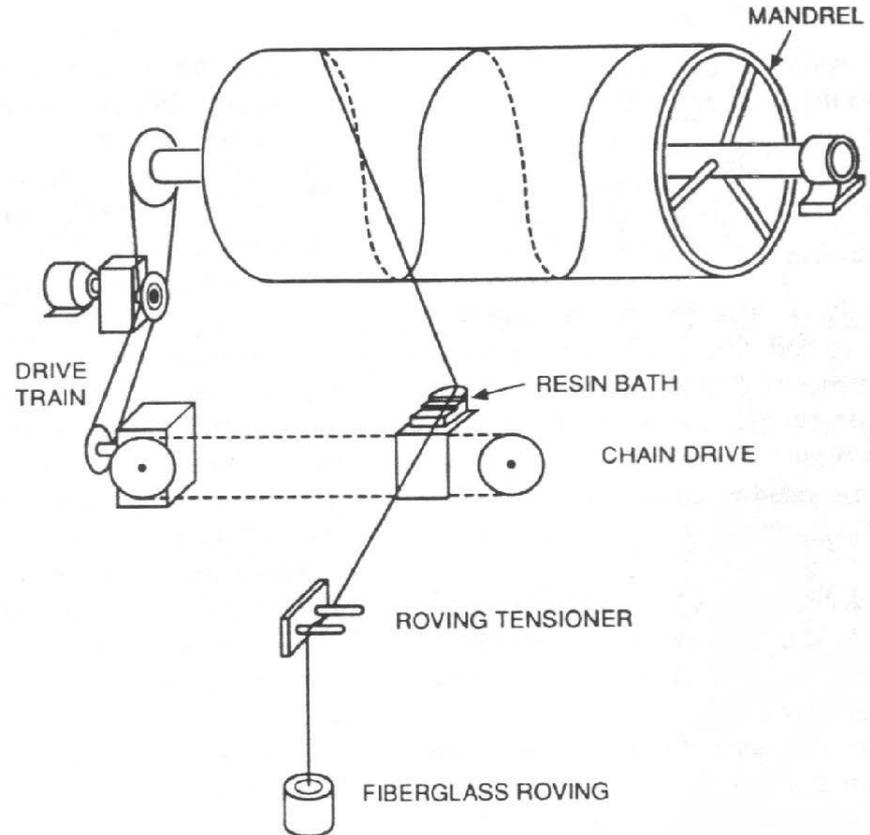
### **Fibras:**

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



# FILAMENT WINDING

## PROCESSO





# ***FILAMENT WINDING***

## **PROCESSO**

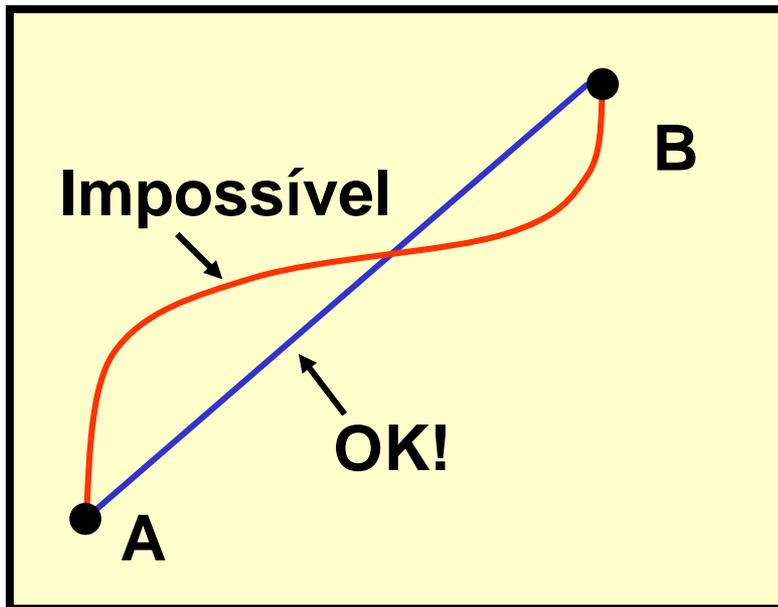
- a fibra é depositada sob tensão sobre um mandril axisimétrico
- essa tensão é essencial para garantir uma boa compactação
- consequência: a curvas descritas pela fibra tem que ser geodésicas (ou muito próximos delas em função do atrito)



# 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***

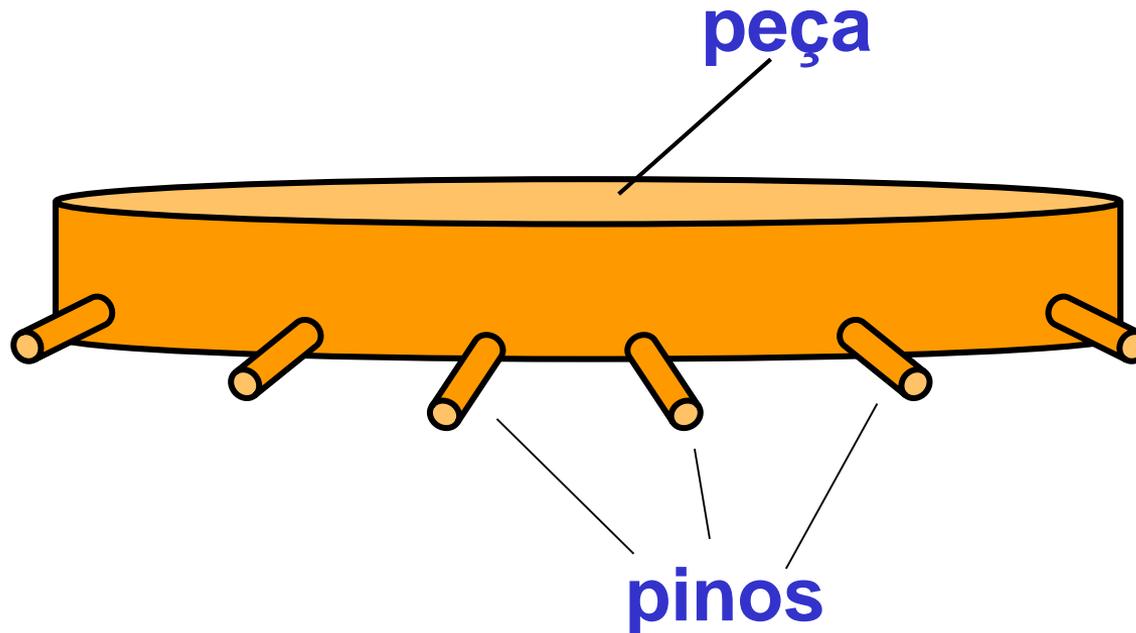
## **Trajatórias não geodésicas: uso de pinos**

- **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

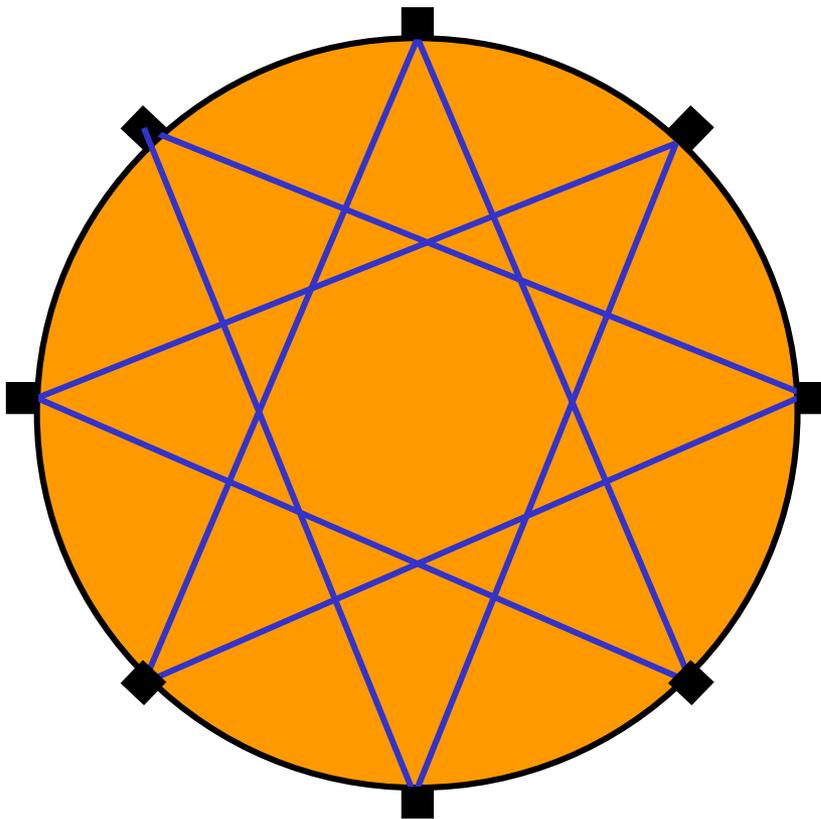
## Uso de pinos





# FILAMENT WINDING

Uso de pinos: salta dois pinos de cada vez

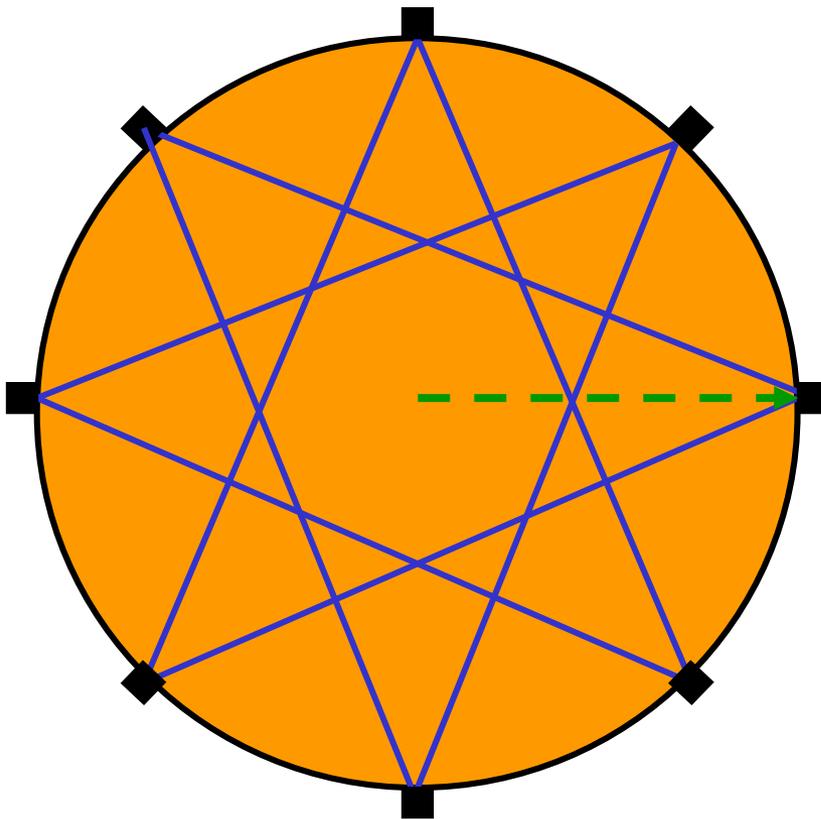


um padrão  
geométrico diferente  
da posição das  
fibras resulta  
dependendo do  
número de pinos  
que é saltado



# FILAMENT WINDING

## Uso de pinos:

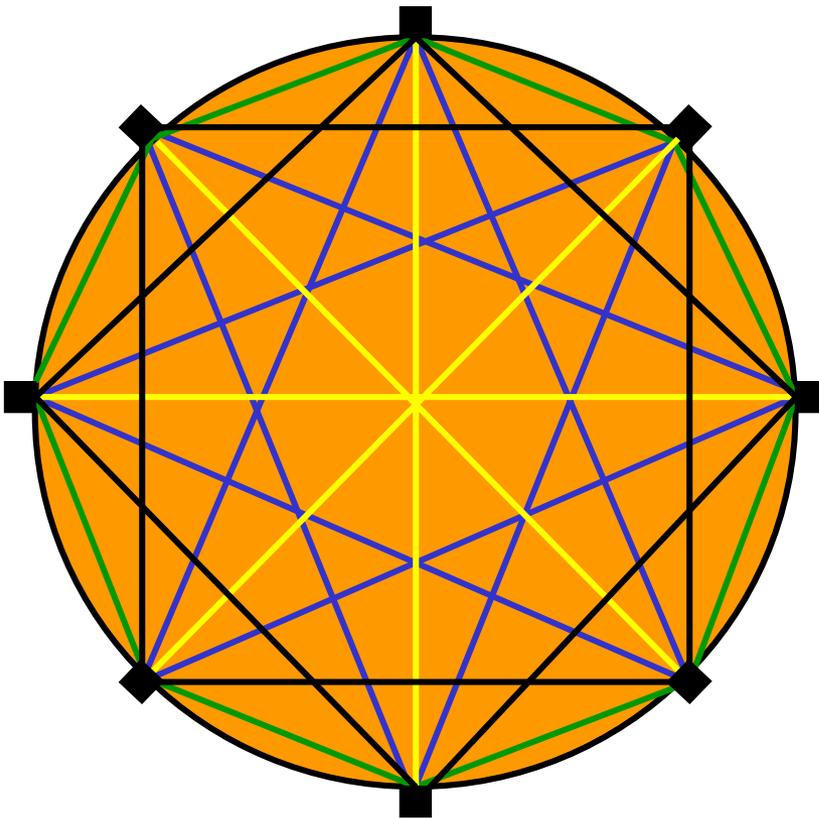


- ângulo das fibras varia ao longo do raio
- espessura (densidade de fibras) da camada varia ao longo do raio



# FILAMENT WINDING

## Uso de pinos: padrões complexos



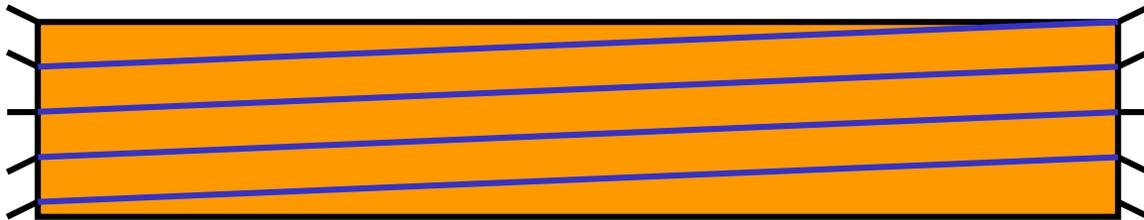
- **laça cada pino**
- **laça a cada 2 pinos**
- **laça a cada 3 pinos**
- **laça a cada 4 pinos**



# ***FILAMENT WINDING***

**Uso de pinos: mandril cilíndrico**

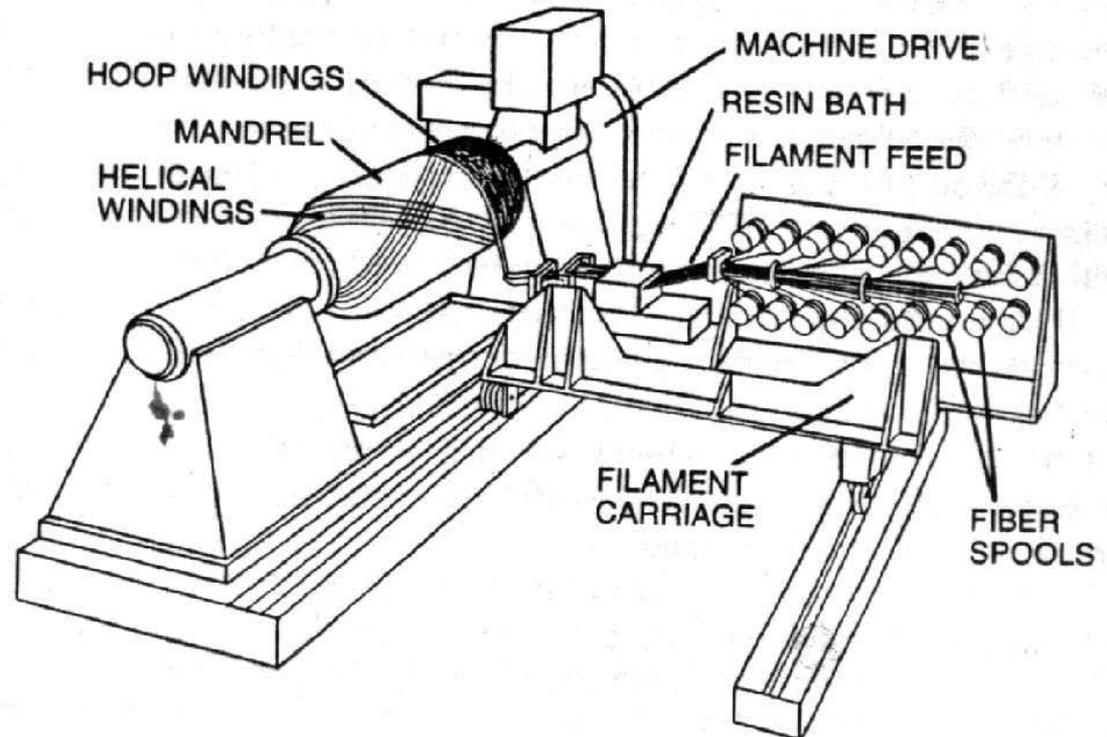
**lançamento de fibras na posição quase axial**





# FILAMENT WINDING

## PROCESSO

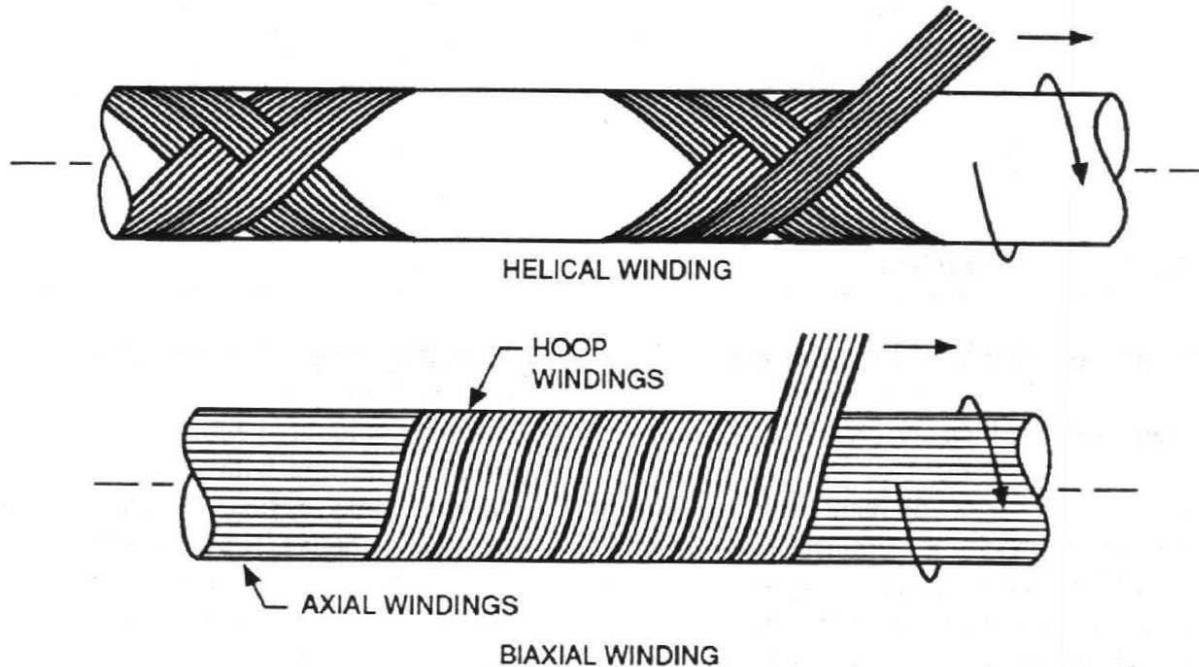




# FILAMENT WINDING

## PROCESSO

### Enrolamento radial e helicoidal

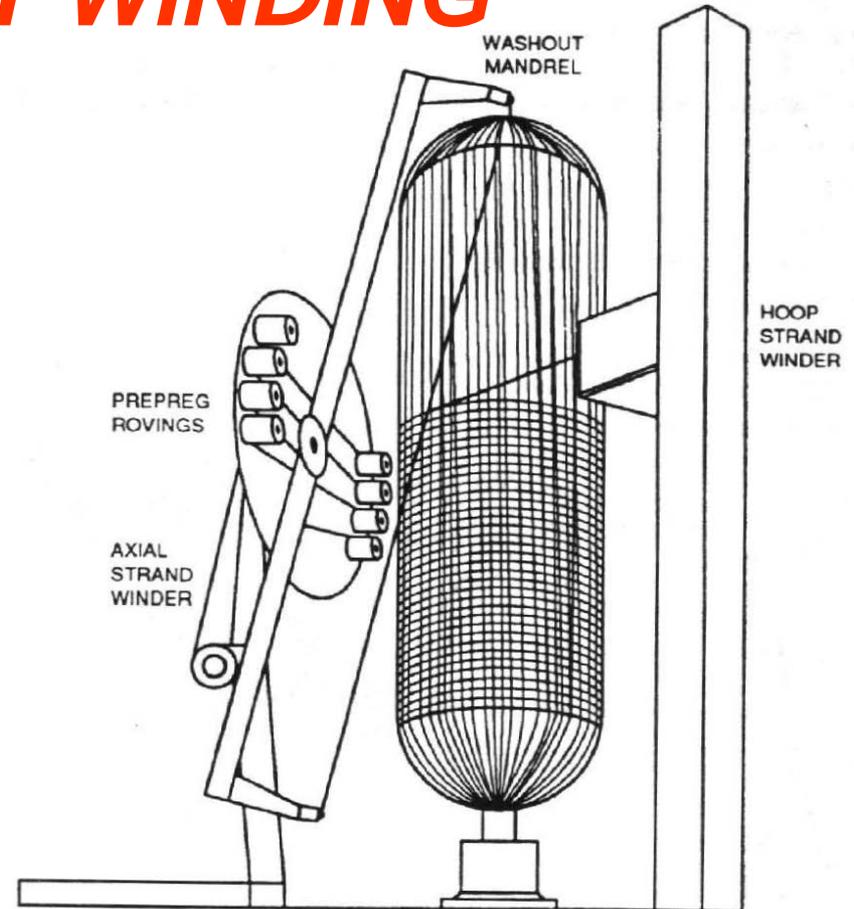




# FILAMENT WINDING

## 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***

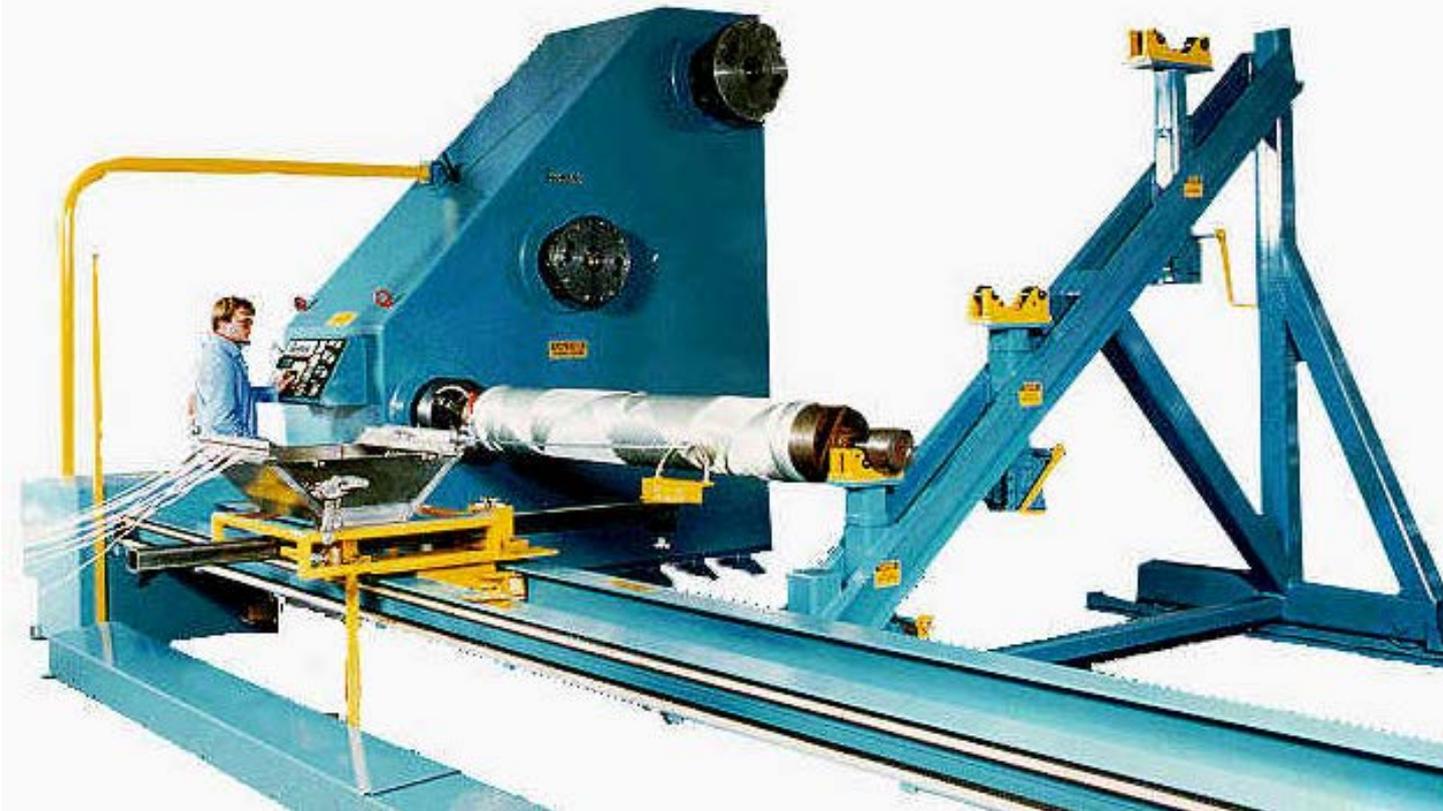
## **DESVANTAGENS**

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



# ***FILAMENT WINDING***

## **MÁQUINA DE ENROLAMENTO**





# **FILAMENT WINDING**

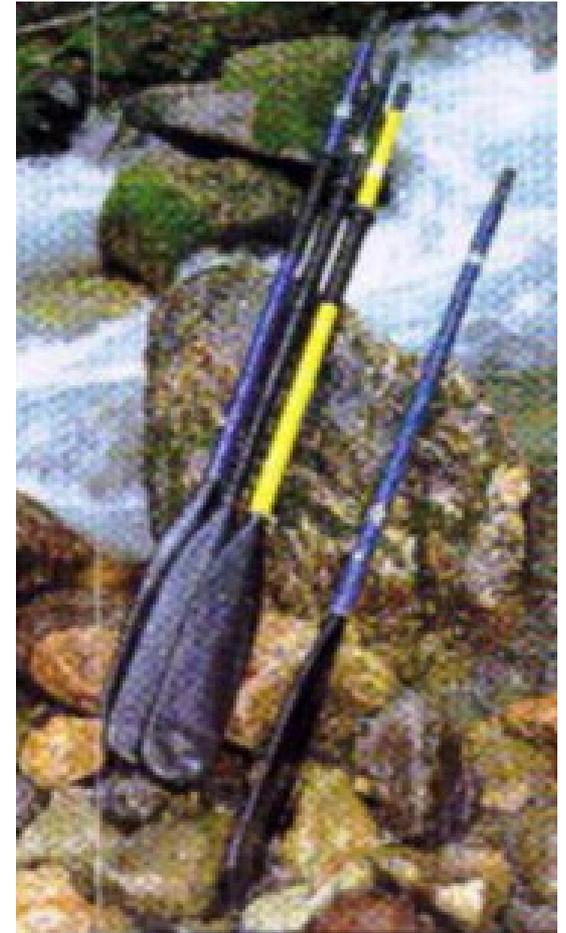
## **MÁQUINA DE FILAMENT WINDING**





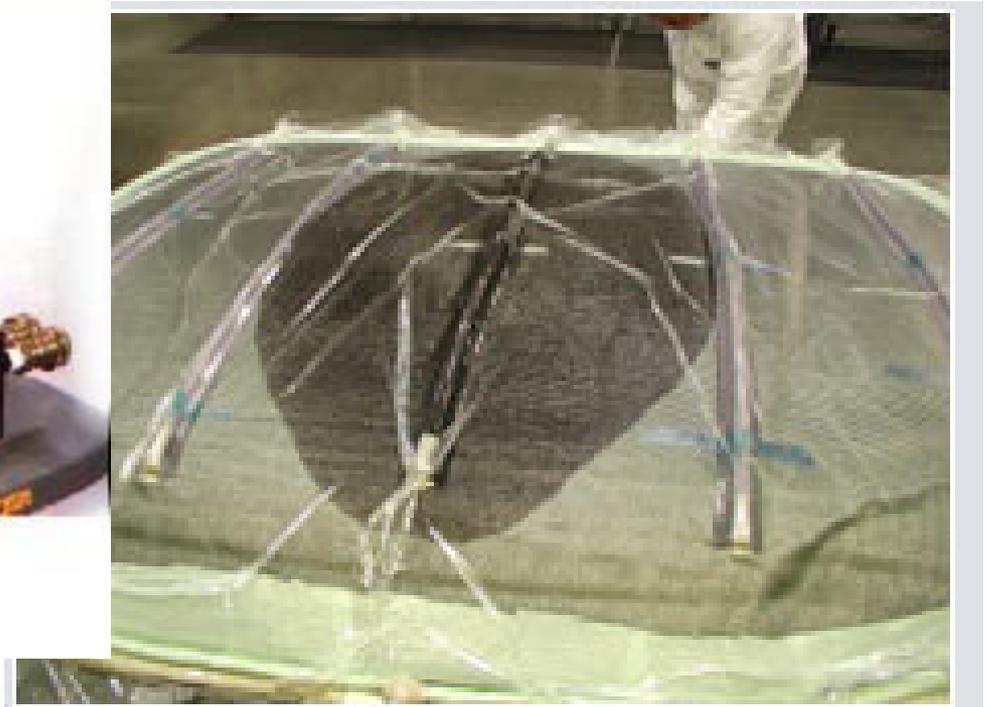
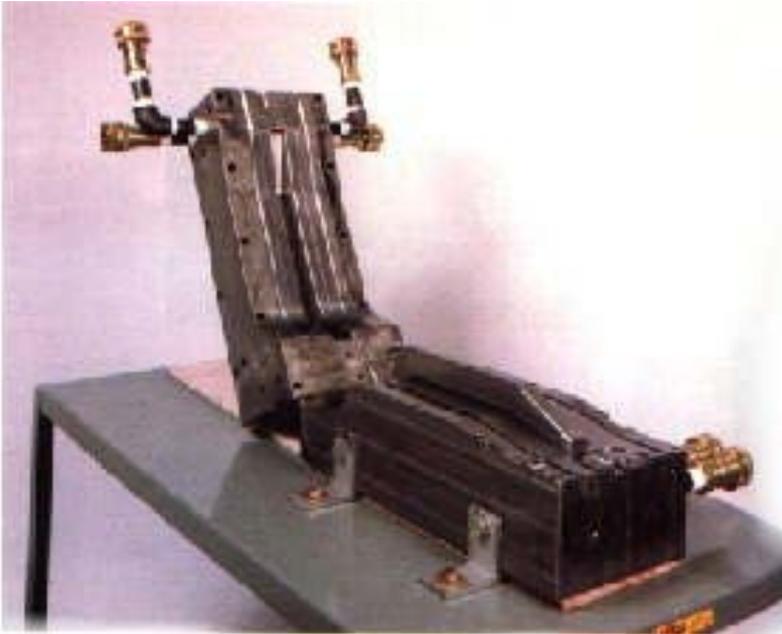
# ***FILAMENT WINDING***

## ***APLICAÇÕES***





# 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

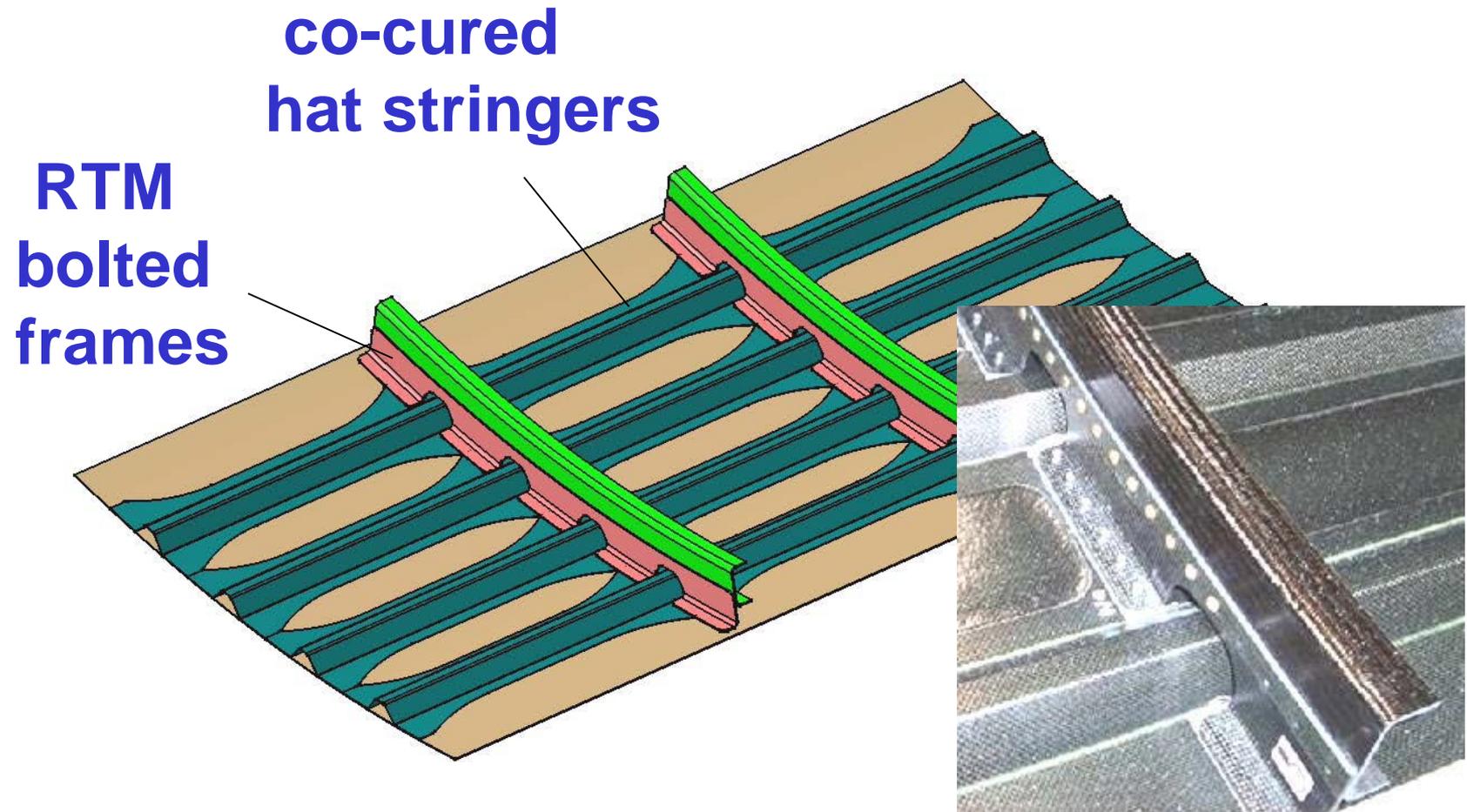


# TÉCNICAS DE INFUSÃO DE RESINA

- **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



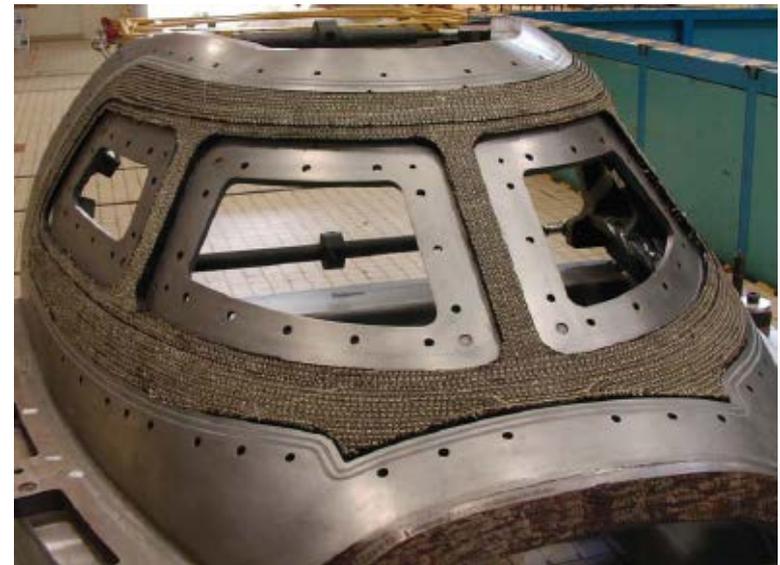
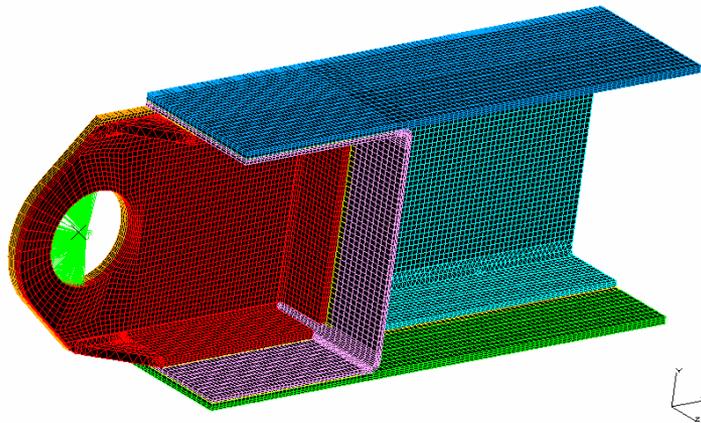
# Boeing 787





# 1. FABRICAÇÃO DA PRÉ-FORMA

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

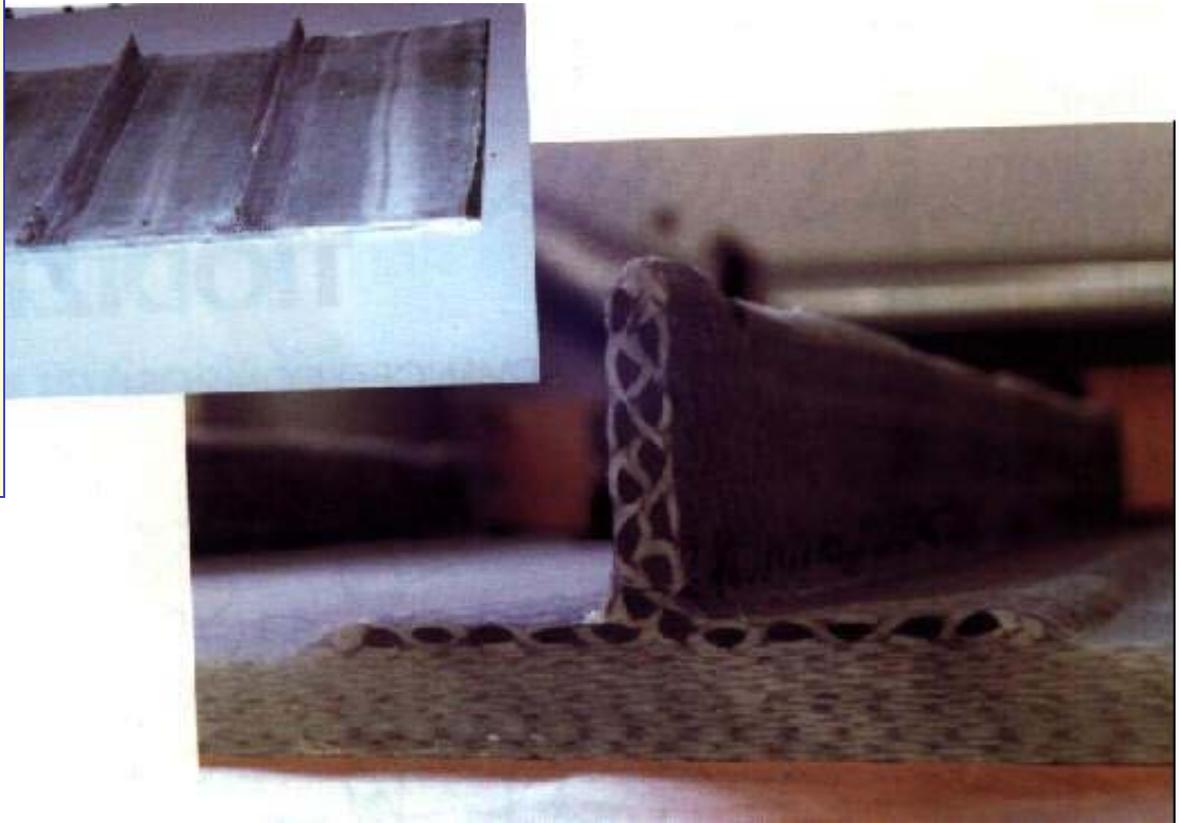




# 1. FABRICAÇÃO DA PRÉ-FORMA

## 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.

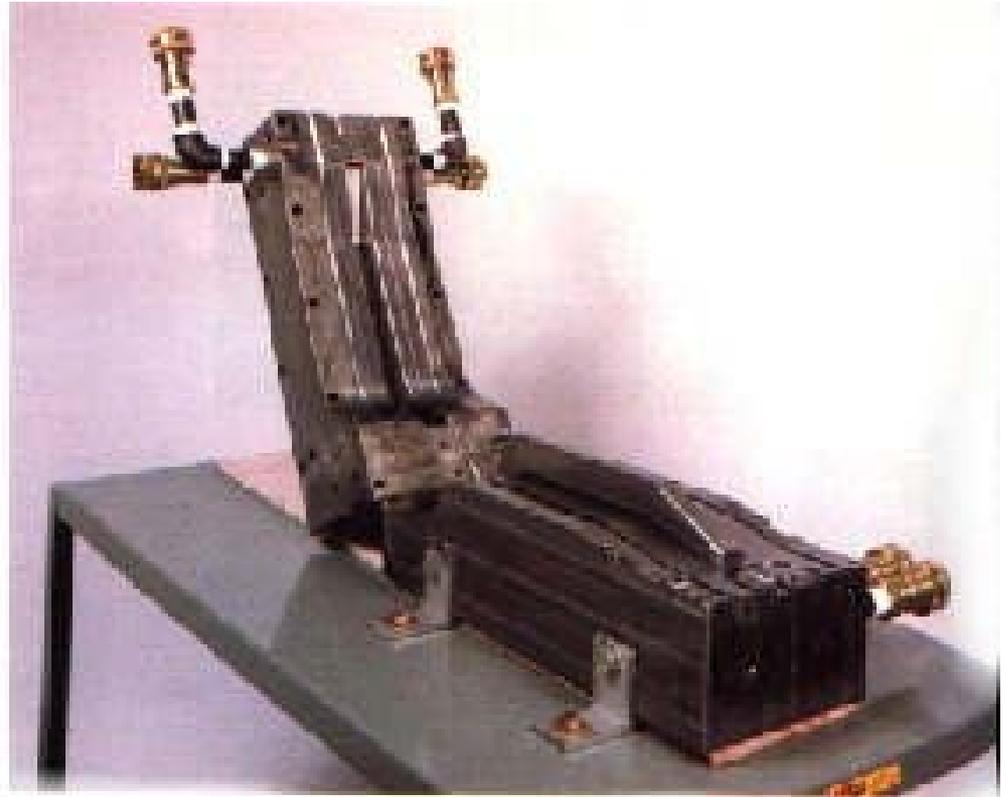


## **MODELAGEM DO PREENCHIMENTO DO MOLDE**

- 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

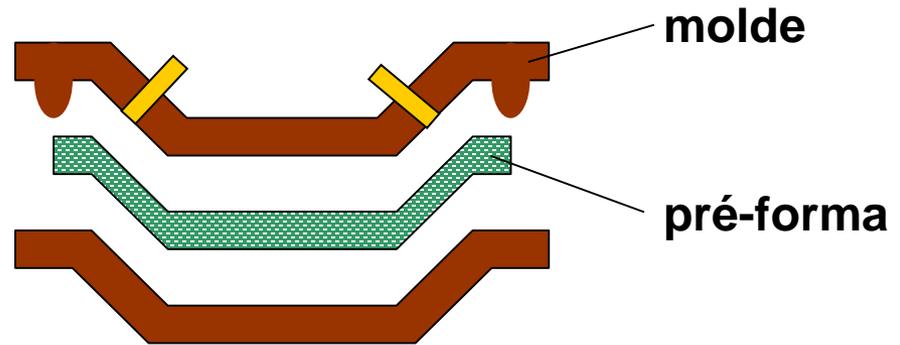
## 3. IMPREGNAÇÃO

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

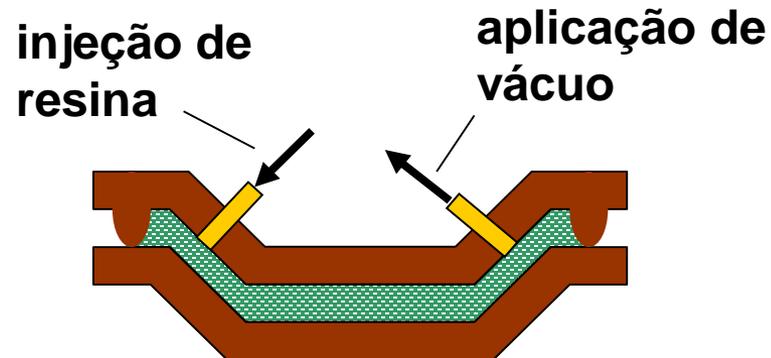


# RTM

## MOLDAGEM



## IMPREGNAÇÃO

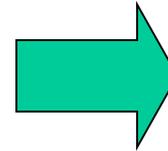




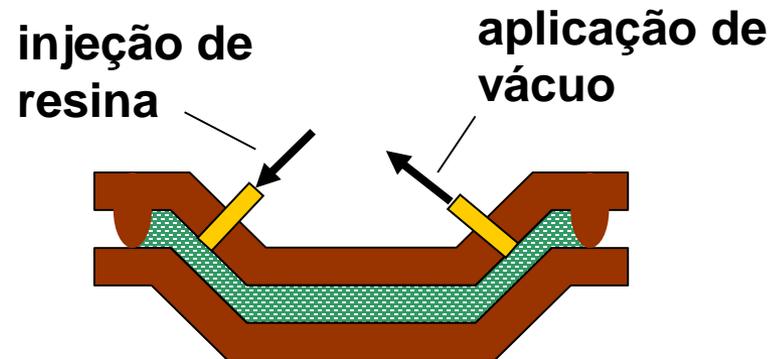
# RTM

## MOLDE

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

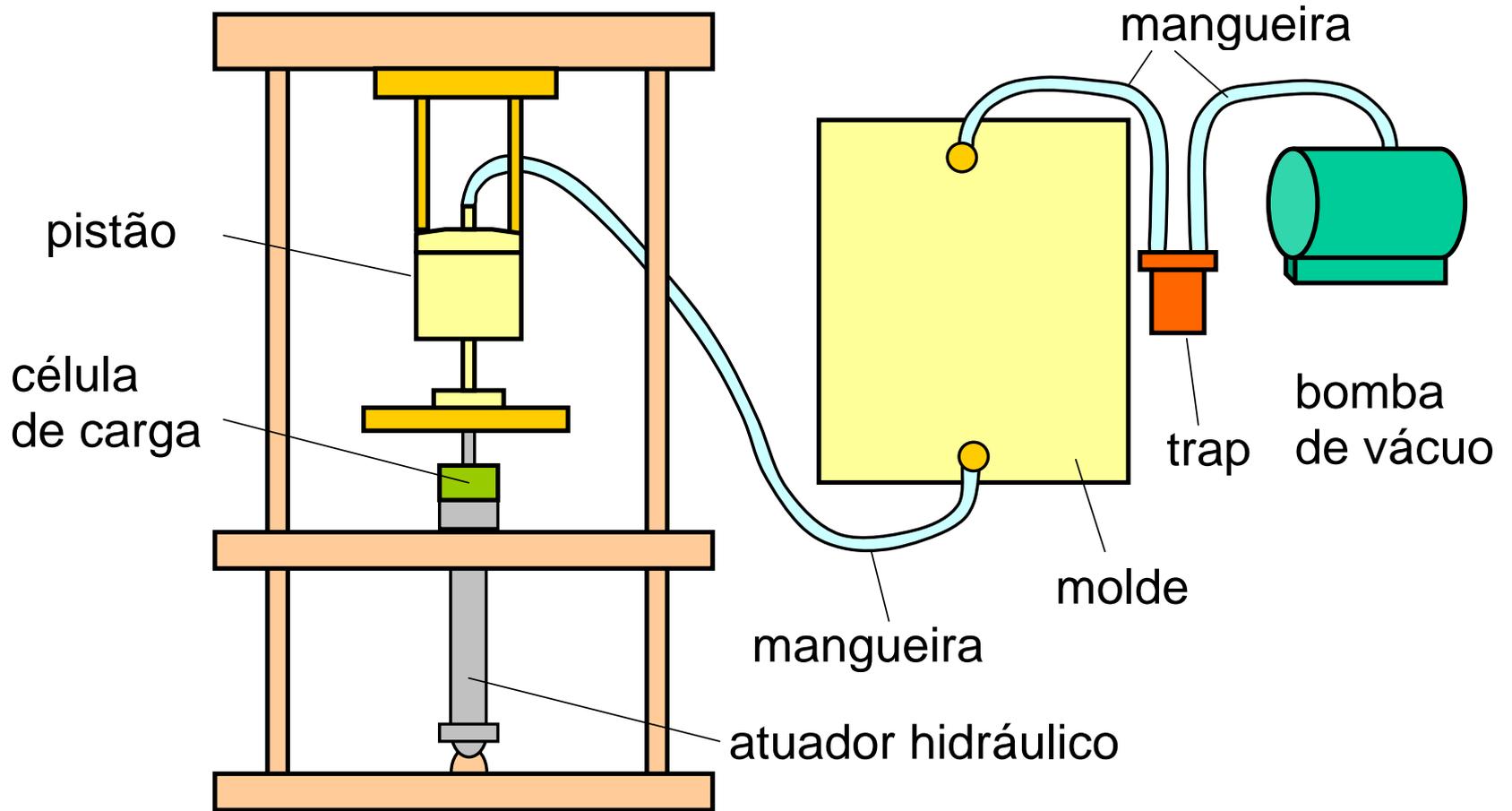


**alto custo**





# SISTEMA DE INJEÇÃO





# RTM

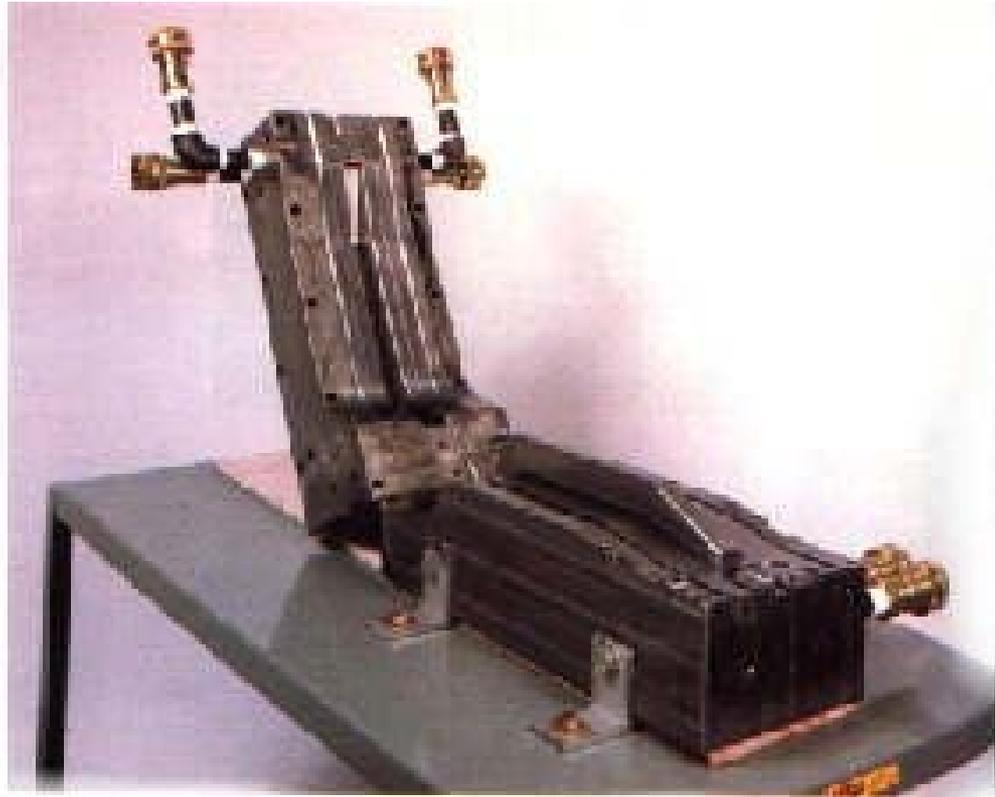
## MATÉRIA PRIMA

- 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

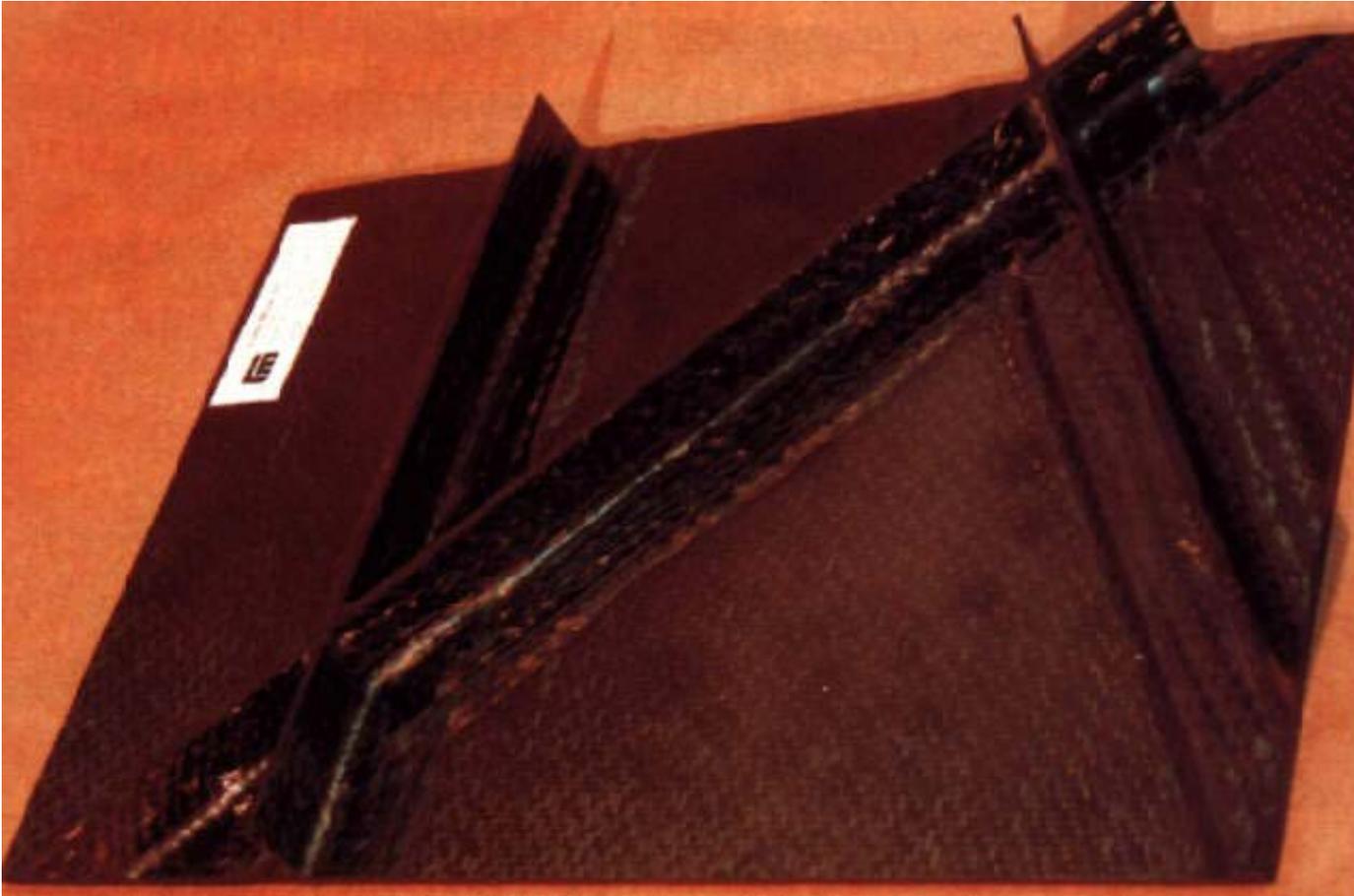
## APLICAÇÕES





# 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



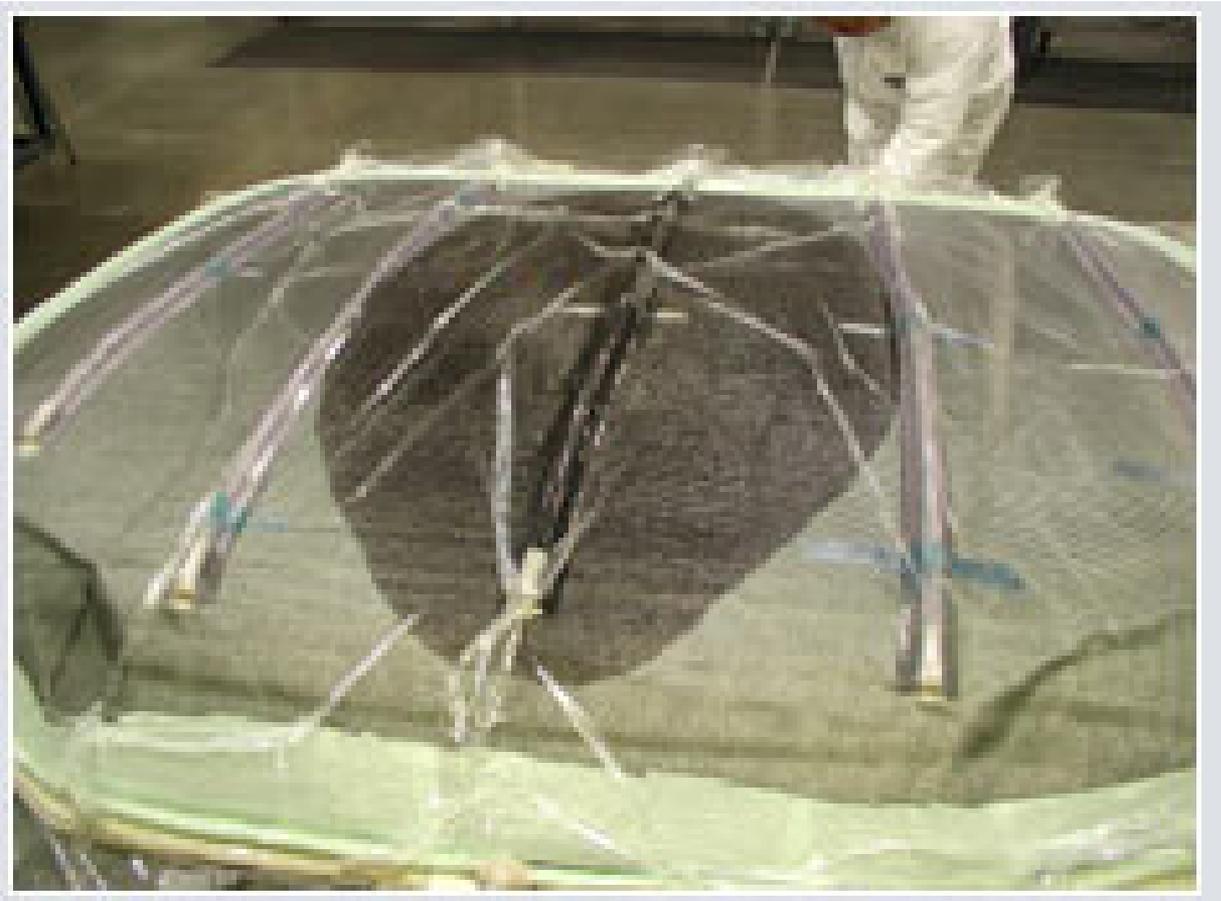
# RTM

## 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

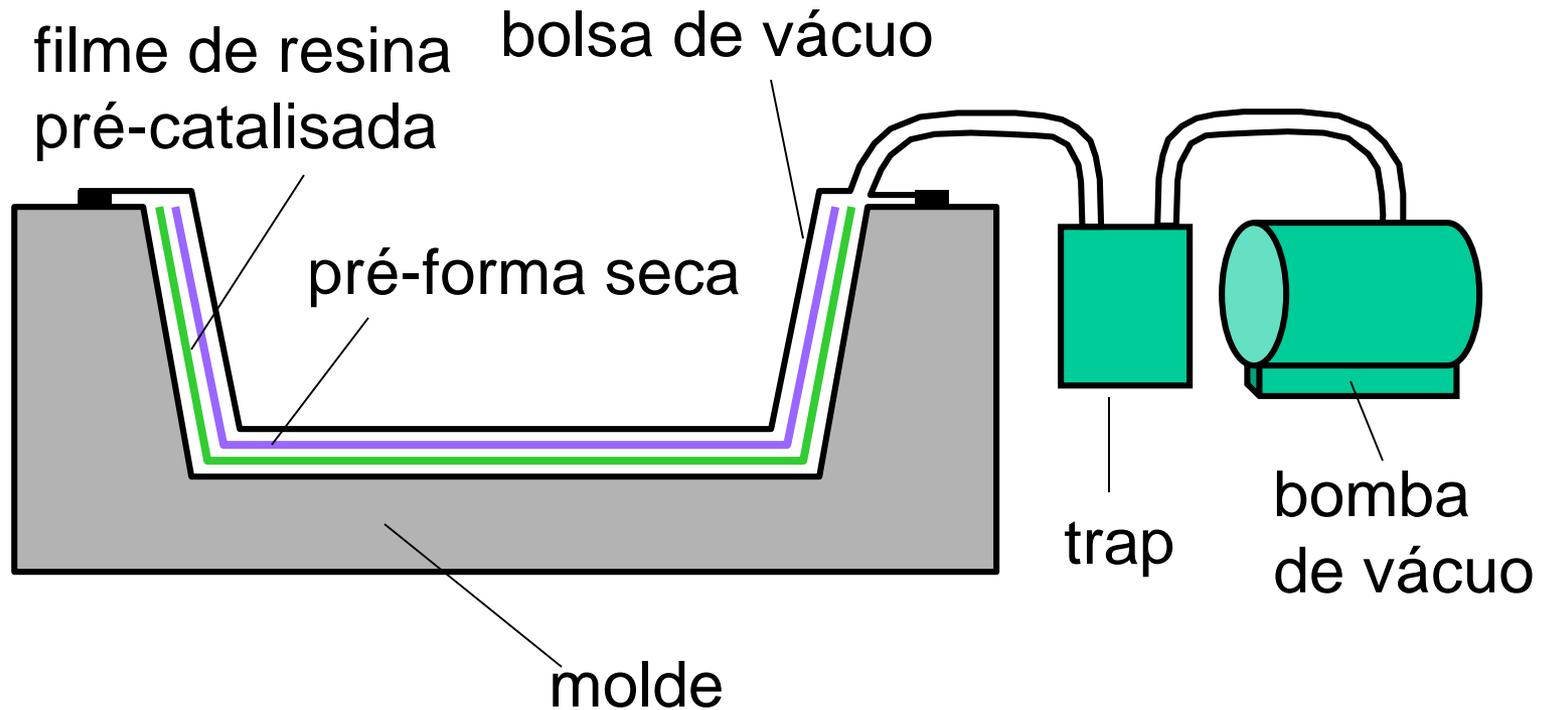
## APLICAÇÕES

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



# TÉCNICAS DE INFUSÃO DE RESINA

## RFI – resin film infusion





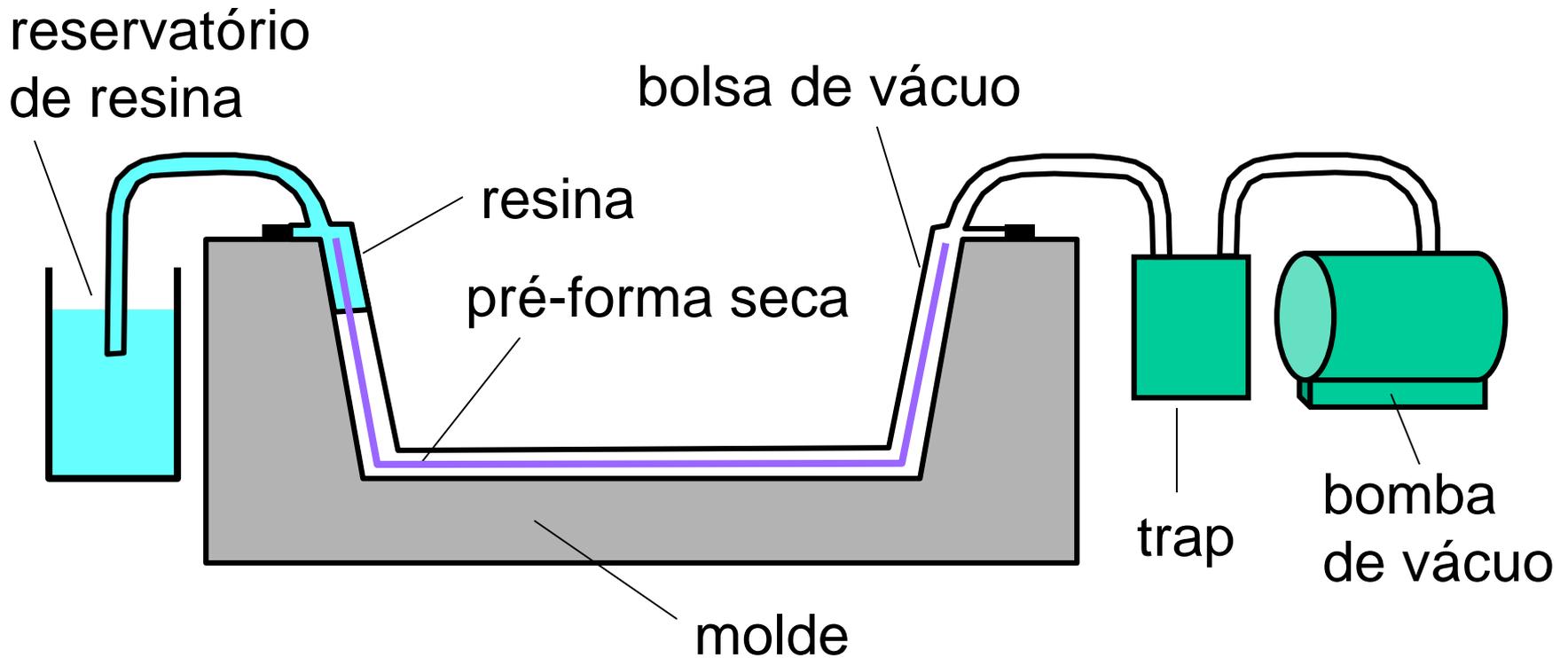
# RFI – resin film infusion

- 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



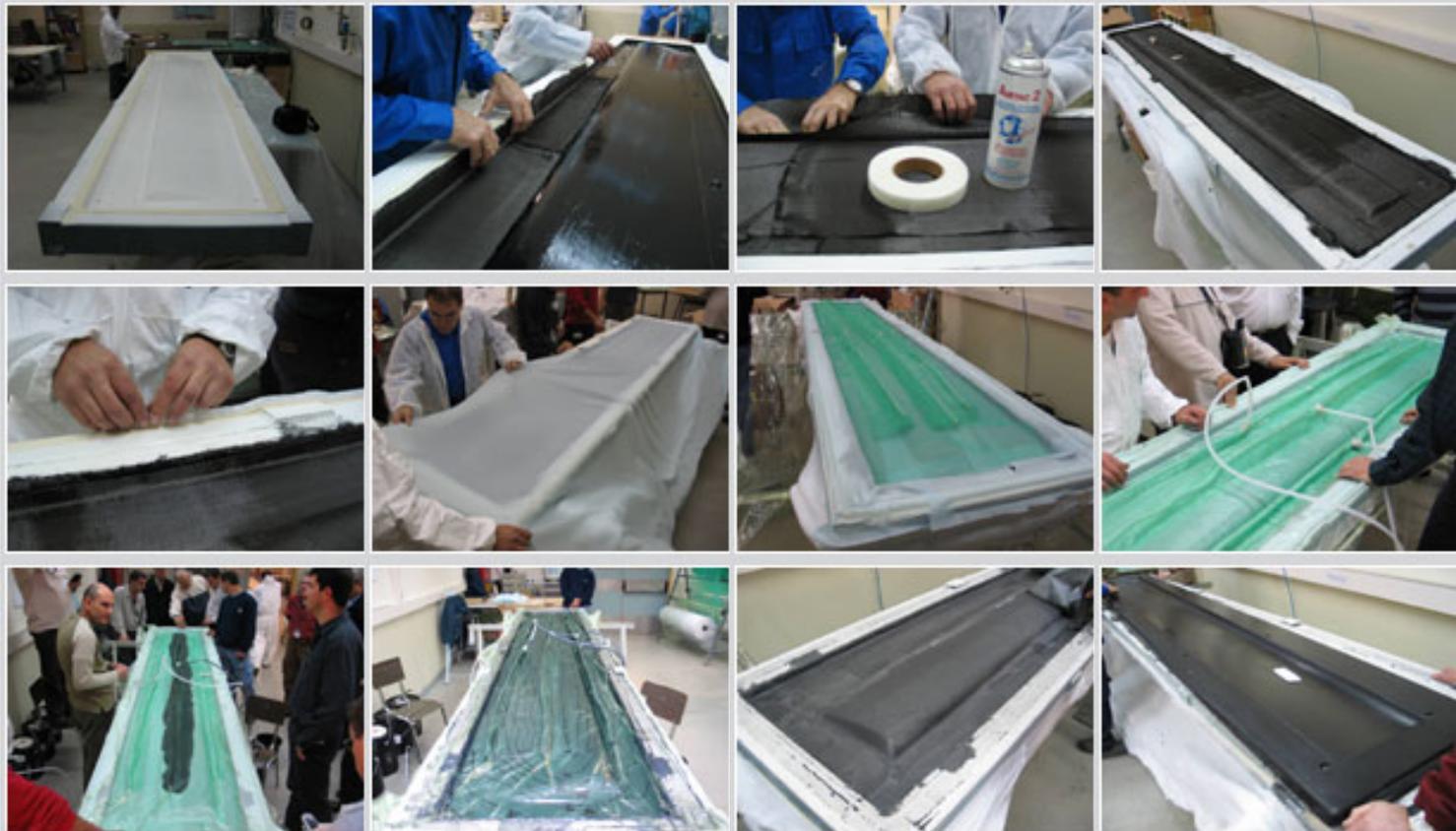


# LRI – liquid resin infusion

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

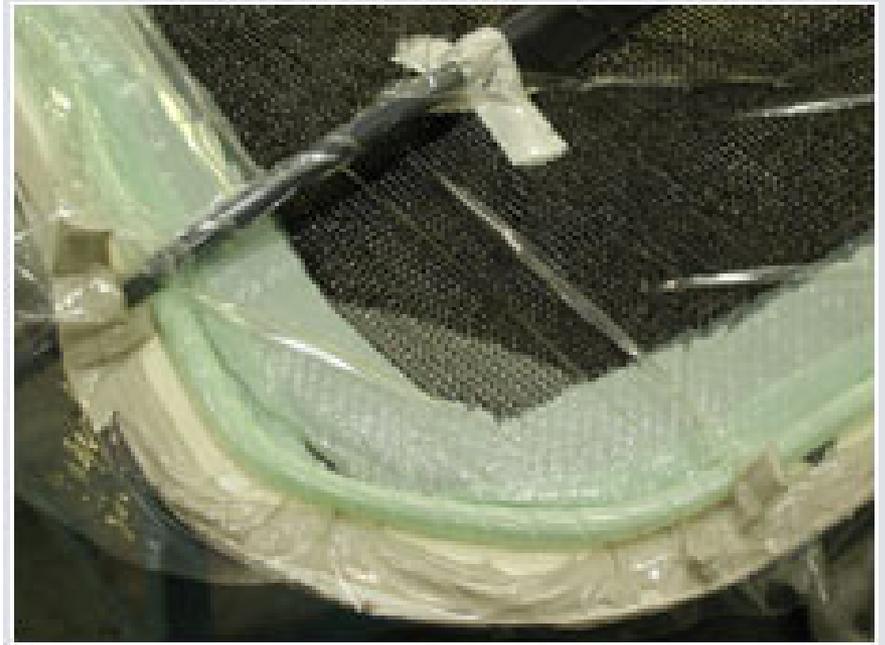
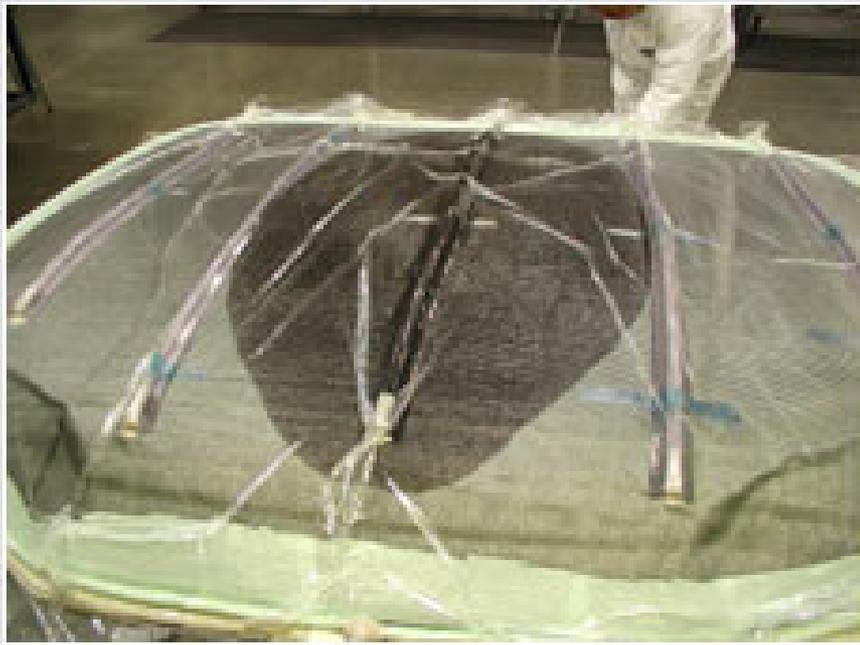


# TÉCNICAS DE INFUSÃO DE RESINA



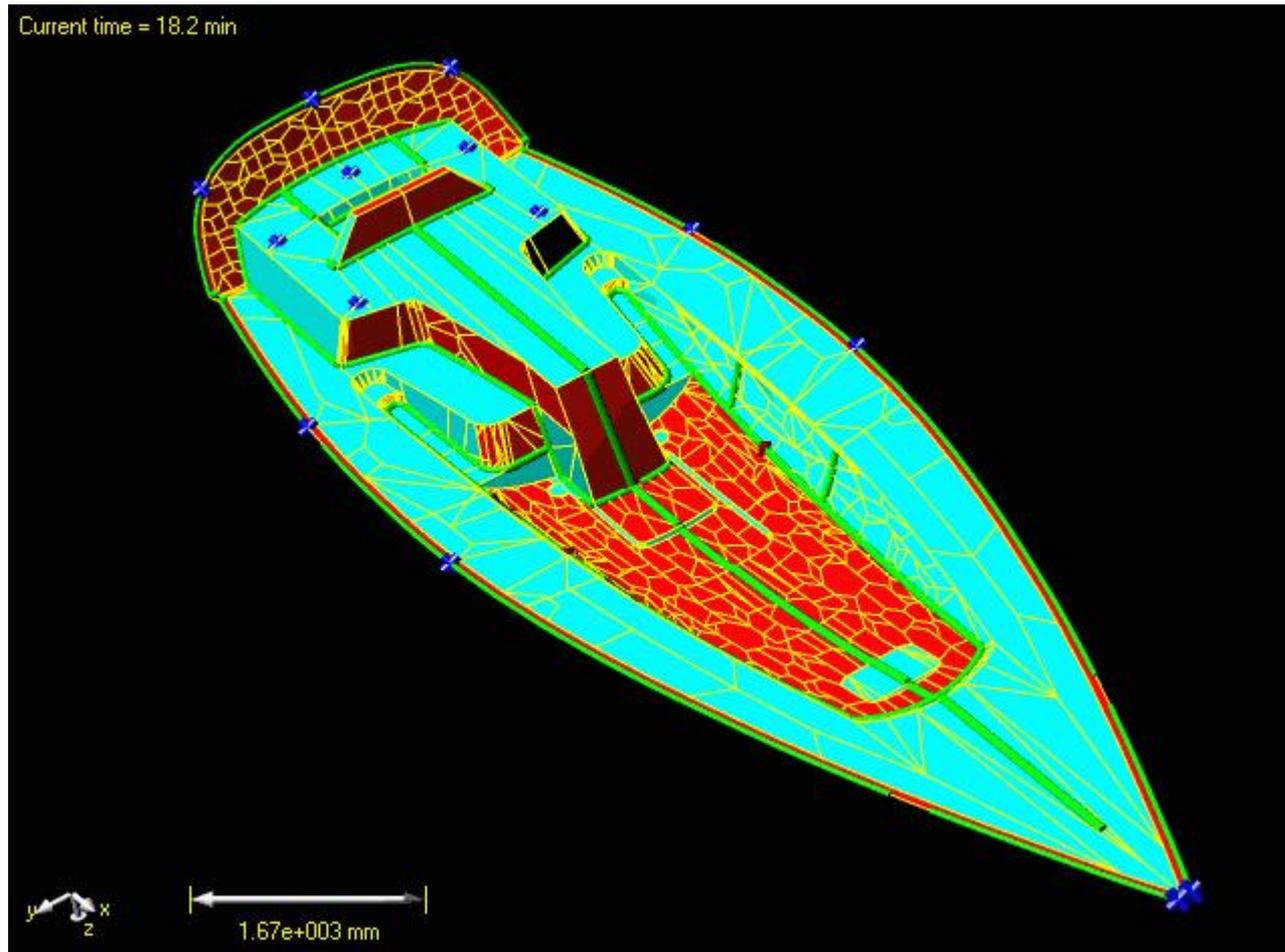


# TÉCNICAS DE INFUSÃO DE RESINA





# 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



# PULTRUSÃO





# PULTRUSÃO

## CARACTERÍSTICAS

- processo contínuo
- baixo conteúdo de vazios
- alto volume de fibras
- ótimo aproveitamento do material

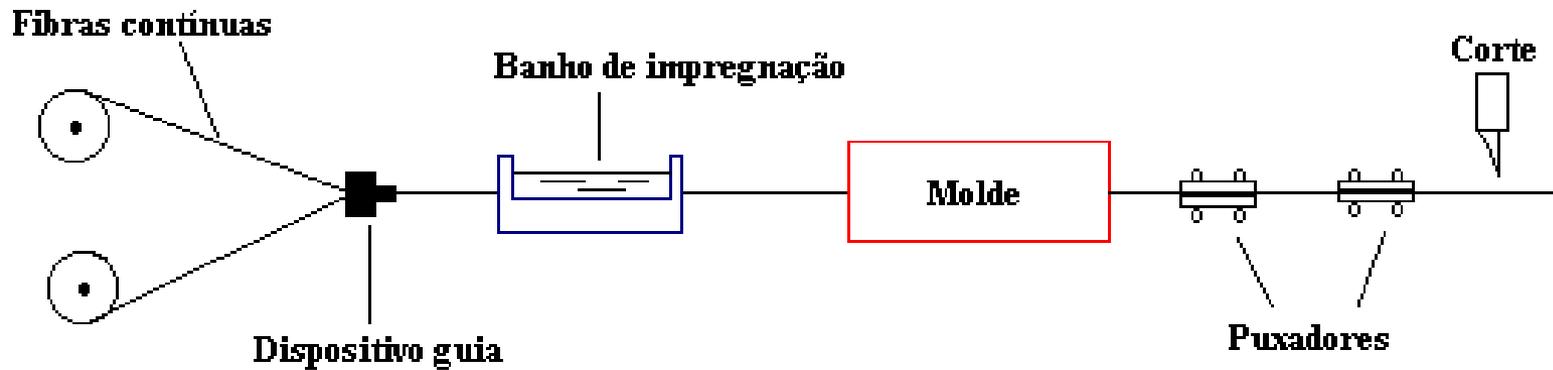
## APLICAÇÕES

- peças com seção transversal constante (sólidas ou vazadas)



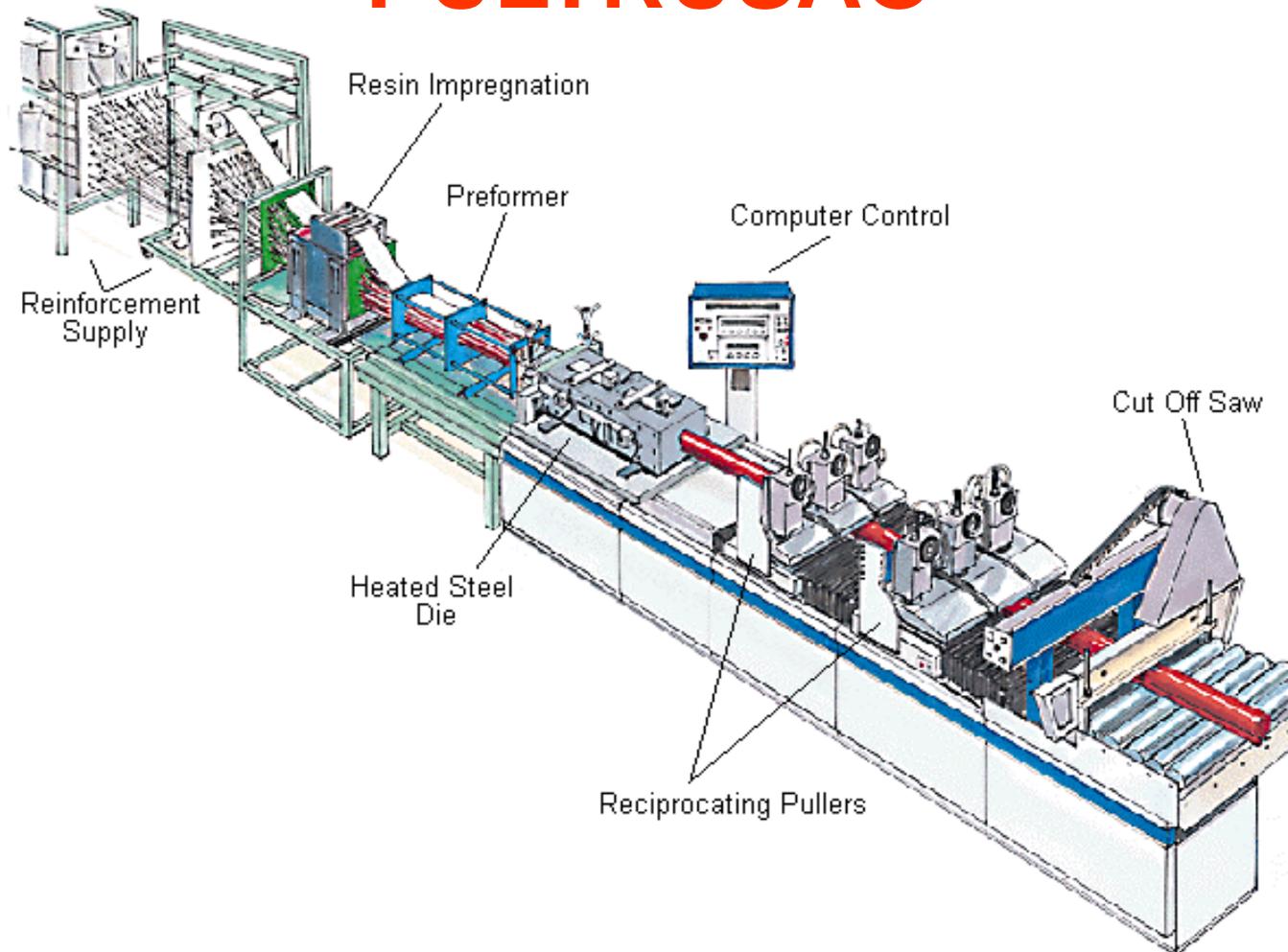
# PULTRUSÃO

## PROCESSO





# PULTRUSÃO





# PULTRUSÃO

## MATÉRIA-PRIMA

### FIBRAS

- carbono
- kevlar
- vidro

### RESINAS

- poliéster
- epóxi
- fenólica



# PULTRUSÃO

## MATÉRIA-PRIMA

- roving
- manta
- tecido
- braiding





# PULTRUSÃO

## VANTAGENS

- excelente aproveitamento do material
- alta taxa de produção
- alto conteúdo de resina (ou fibra)



# PULTRUSÃO

## DESVANTAGENS

- seção transversal tem que ser uniforme
- cura rápida pode reduzir propriedades
- baixa resistência transversal (com reforço unidirecional)



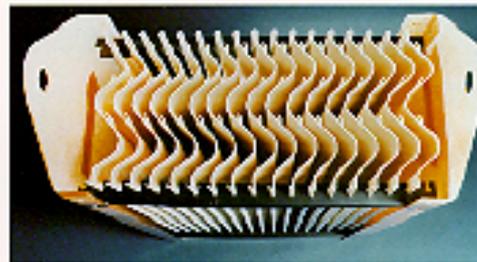
# PULTRUSÃO APLICAÇÕES





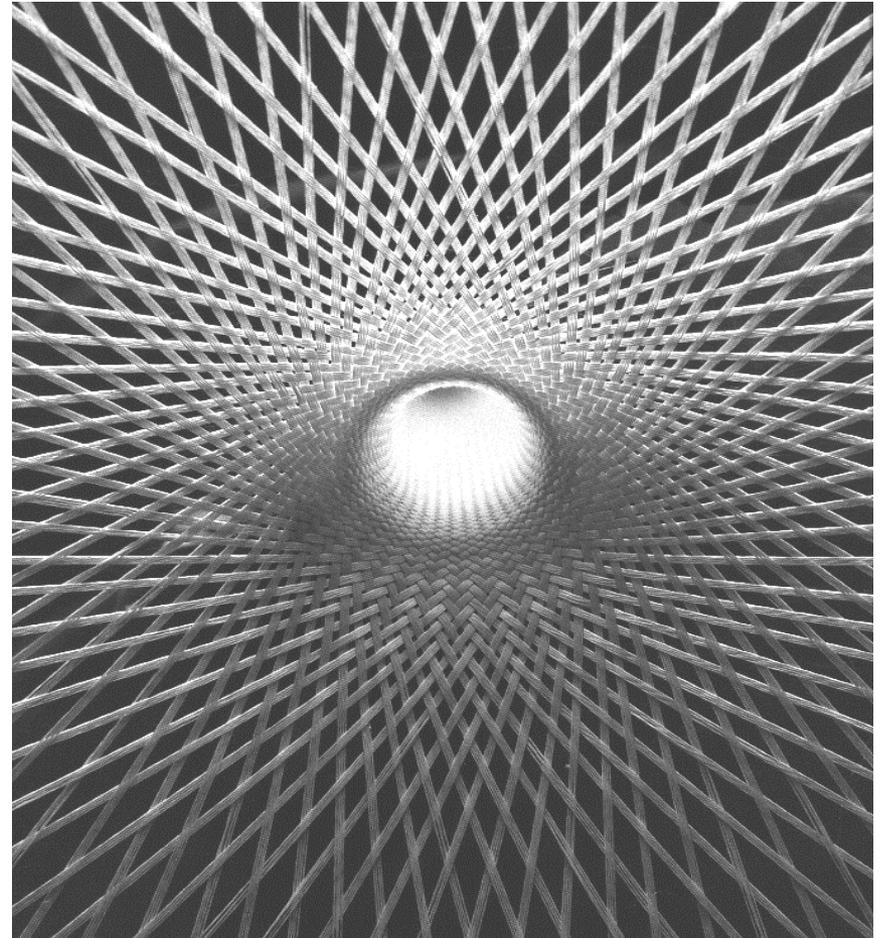
# PULTRUSÃO

## APLICAÇÕES



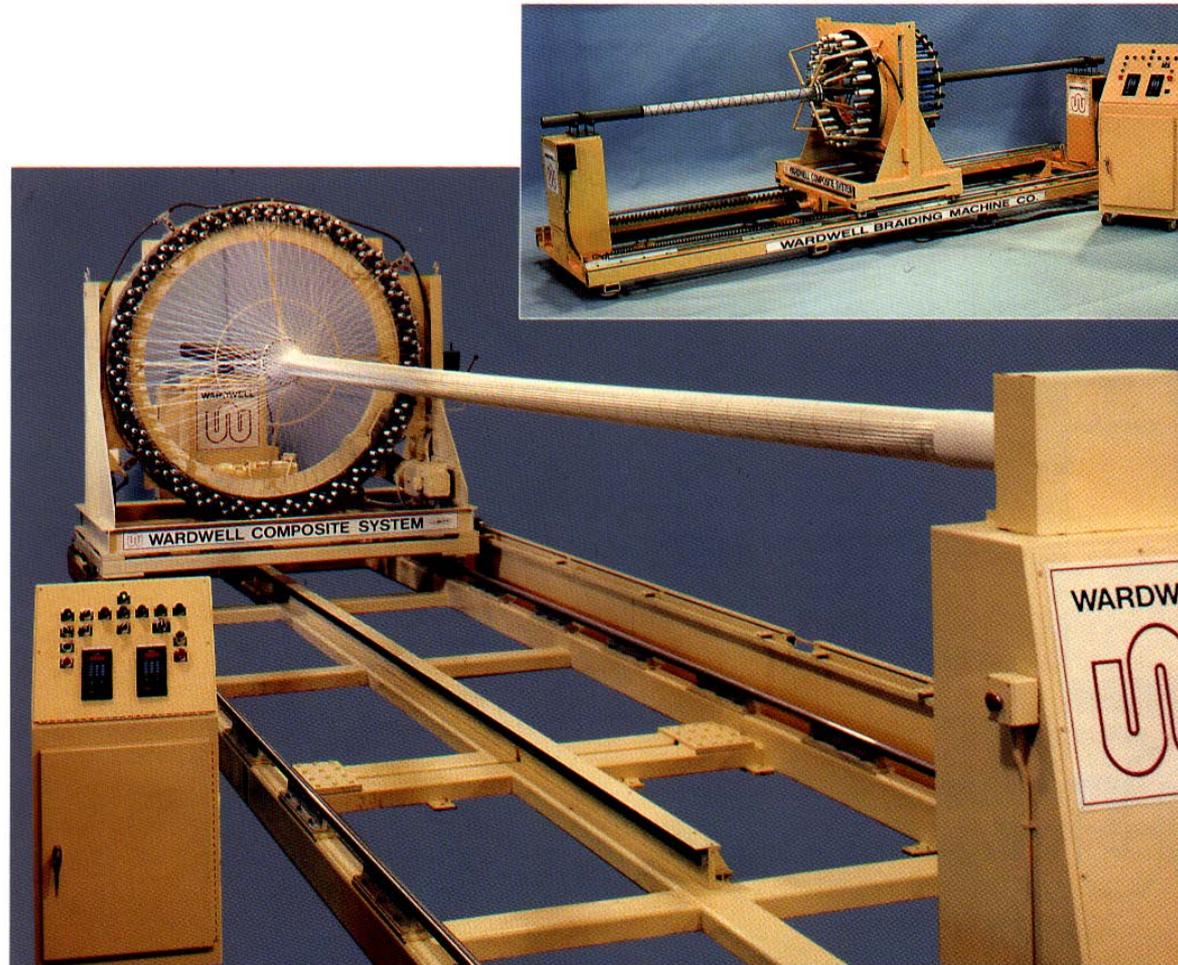


# BRAIDING





# Máquina de Braiding





# BRAIDING

## APLICAÇÕES

algumas configurações de peças produzidas por braiding





# BRAIDING

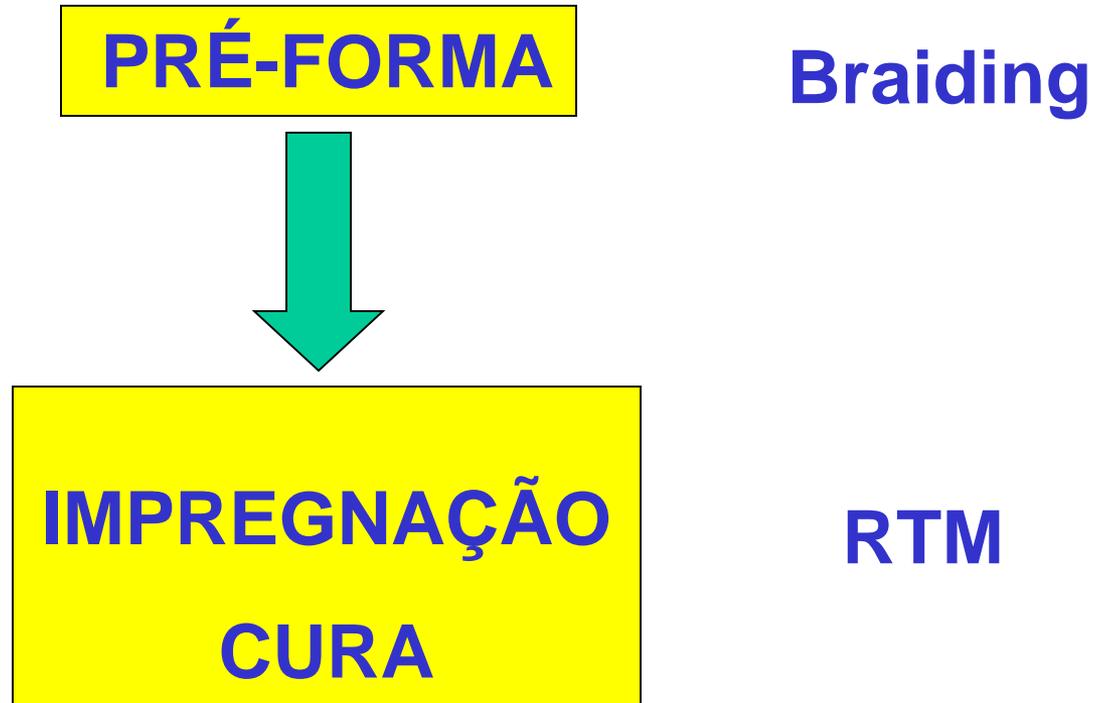
## Cabos produzidos por braiding





# BRAIDING

## COMBINAÇÕES COM OUTROS PROCESSOS





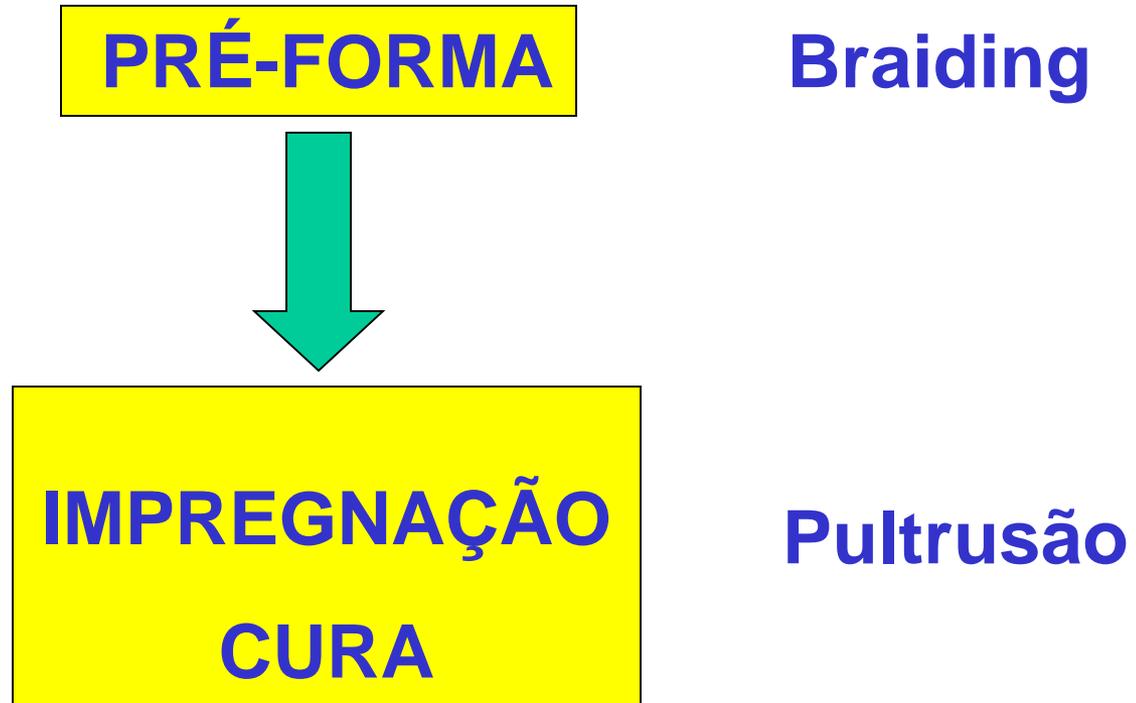
# BRAIDING





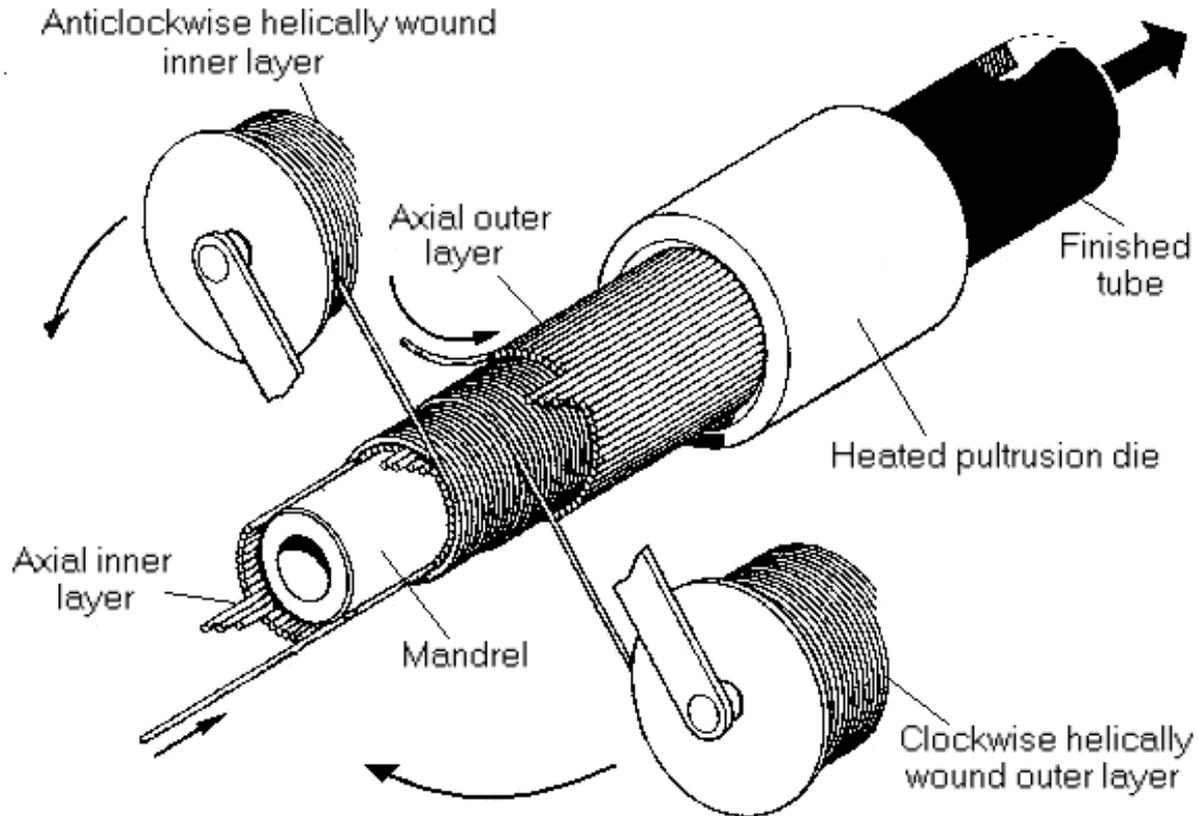
# BRAIDING

## COMBINAÇÕES COM OUTROS PROCESSOS





# BRAIDING





# Tecidos 3D

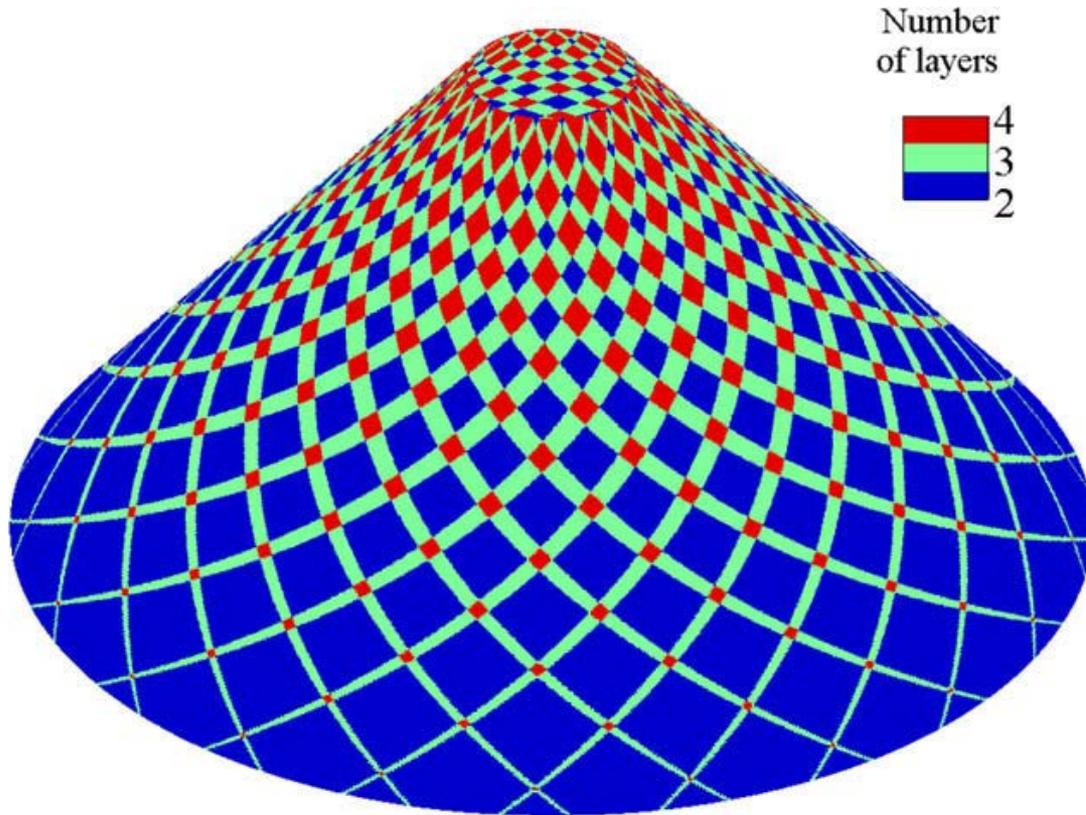


## Tecidos 3D

- **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**

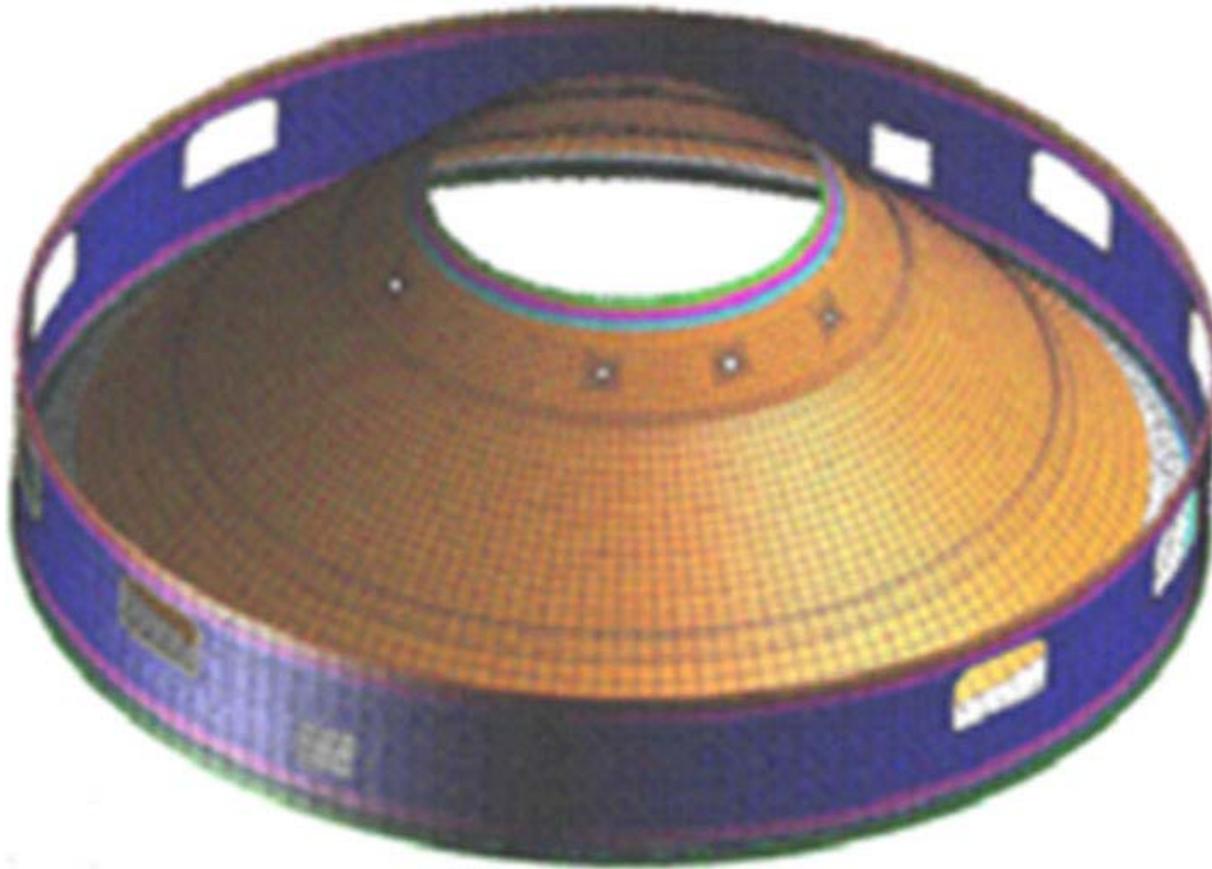


# Tecidos 3D



***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)**