

# **MATERIAIS DE ENGENHARIA - (SEM 5908) -**

## *Aula 11 – Projeto e Manufatura de Compósitos*

**Prof. Dr. Carlos Alberto Fortulan**

# Projeto

# Projeto – Considerações

- ✓ Orientação das fibras → permite a otimização do comportamento mecânico ao longo uma direção específica.
- ✓ O material é elástico até a ruptura. Não pode haver deformação plástica localizada como ocorre nos materiais metálicos clássicos.
- ✓ A resistência a fadiga é excelente.

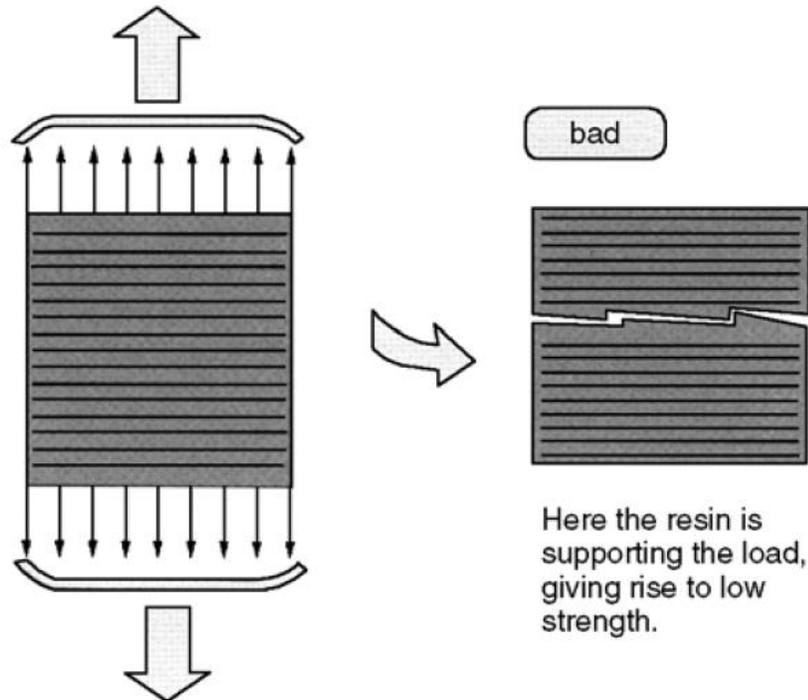
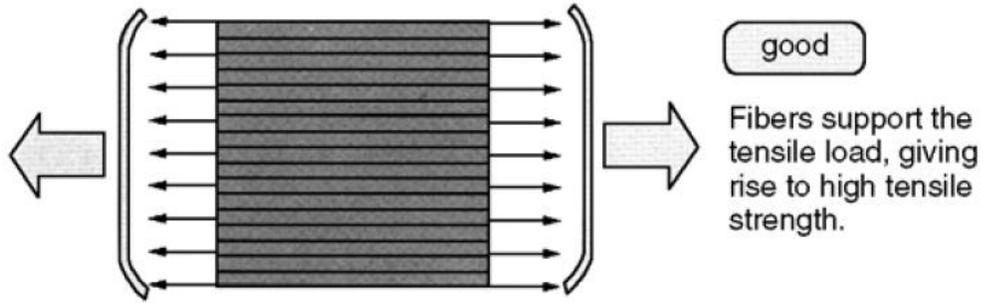
# Fatores de segurança e incertezas:

- ✓ A magnitude das características mecânicas de reforço e matriz;
- ✓ As concentrações de tensão;
- ✓ A imperfeição das hipóteses de cálculo;
- ✓ O processo de fabricação;
- ✓ O envelhecimento dos materiais.

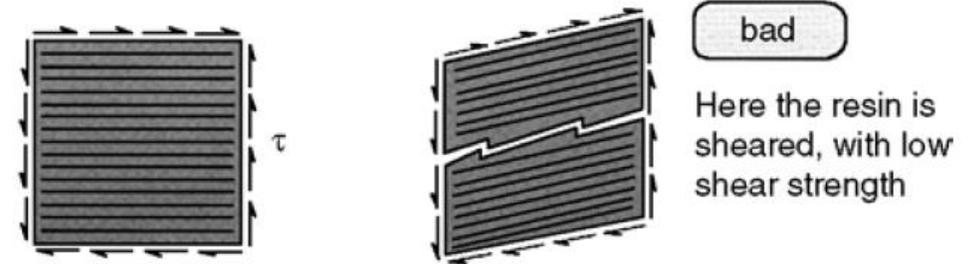
# Laminados:

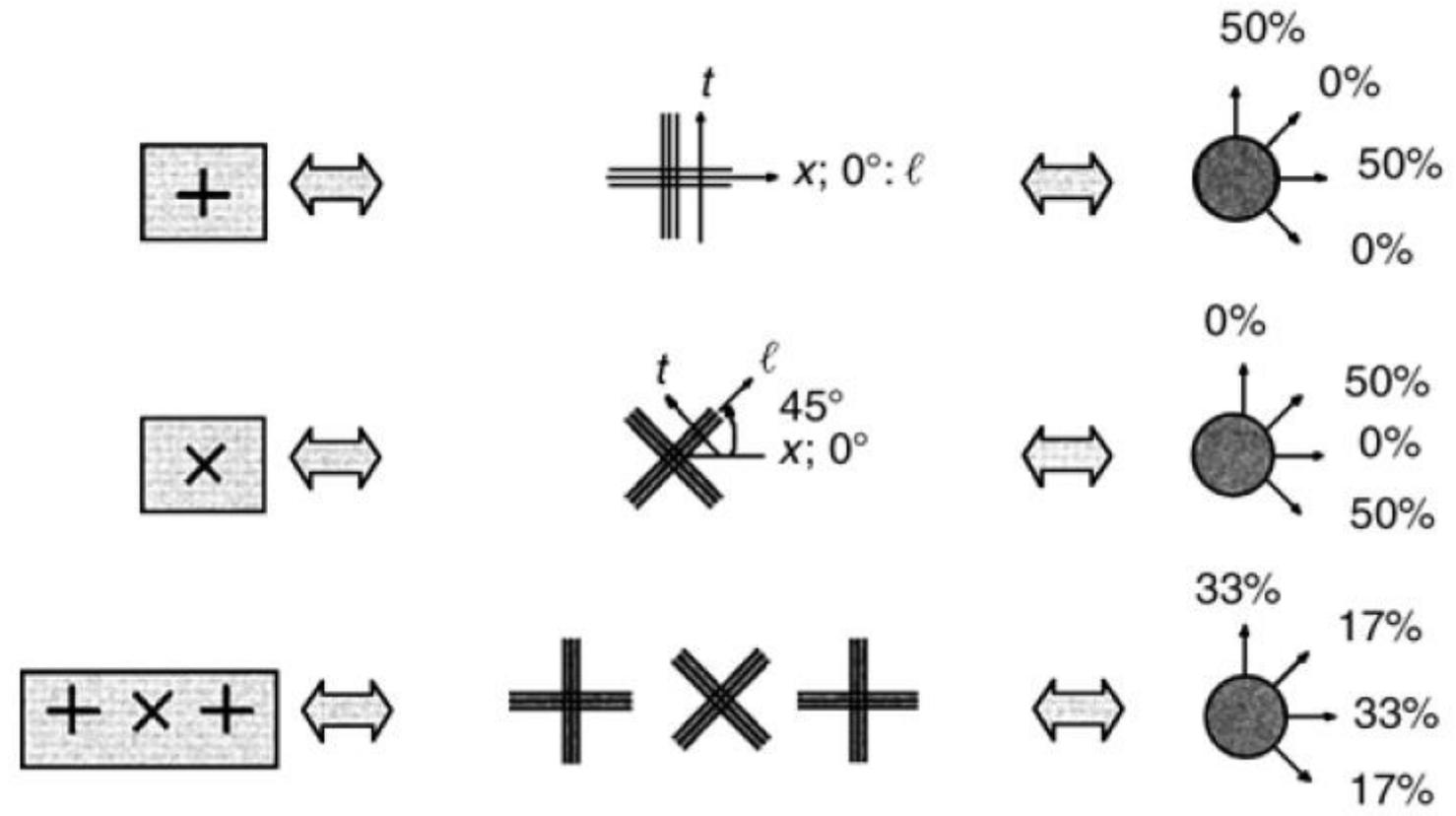
- ✓ Considerar o empilhamento e as proporções de direções;

○ Tension -compression

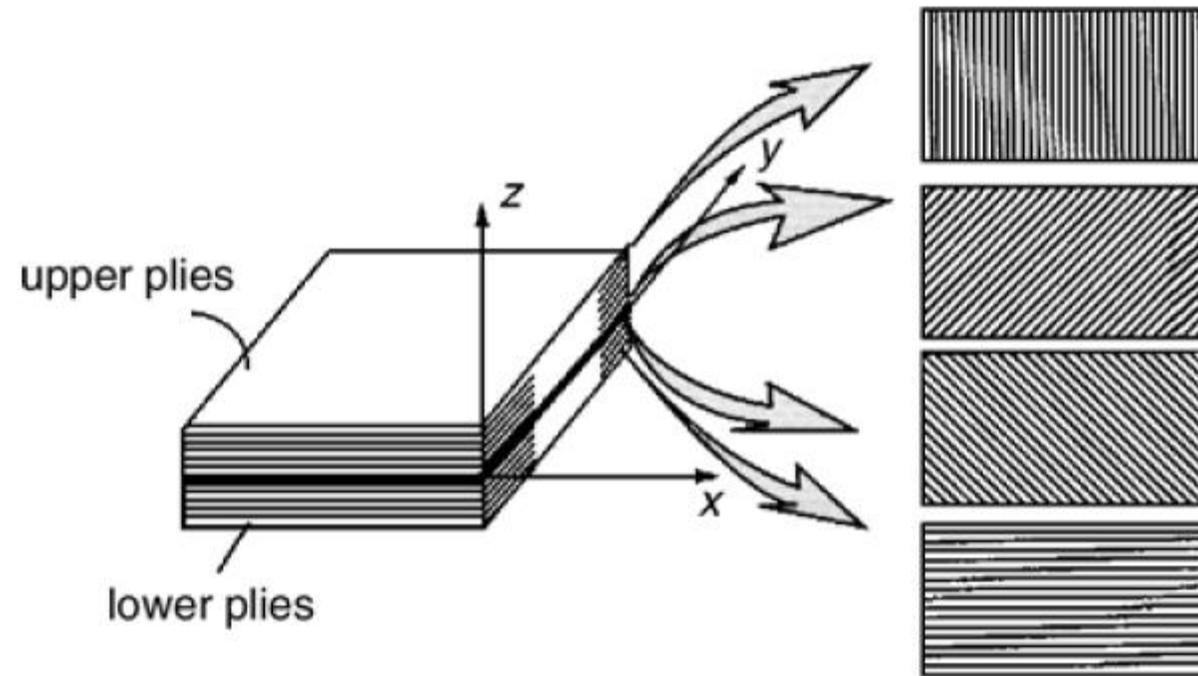


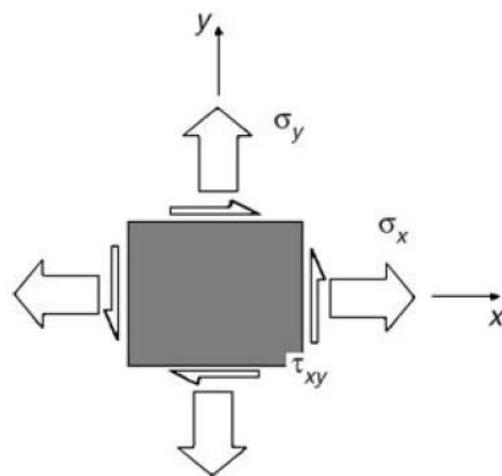
○ Shear





# Laminados com balanço dos tecidos





$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}$$

Ex11.1. Qual o será o módulo elástico e o coeficiente de expansão térmica para o laminado fibra de vidro/epoxy ( $V_f = 60\%$ ) com a configuração mostrada?

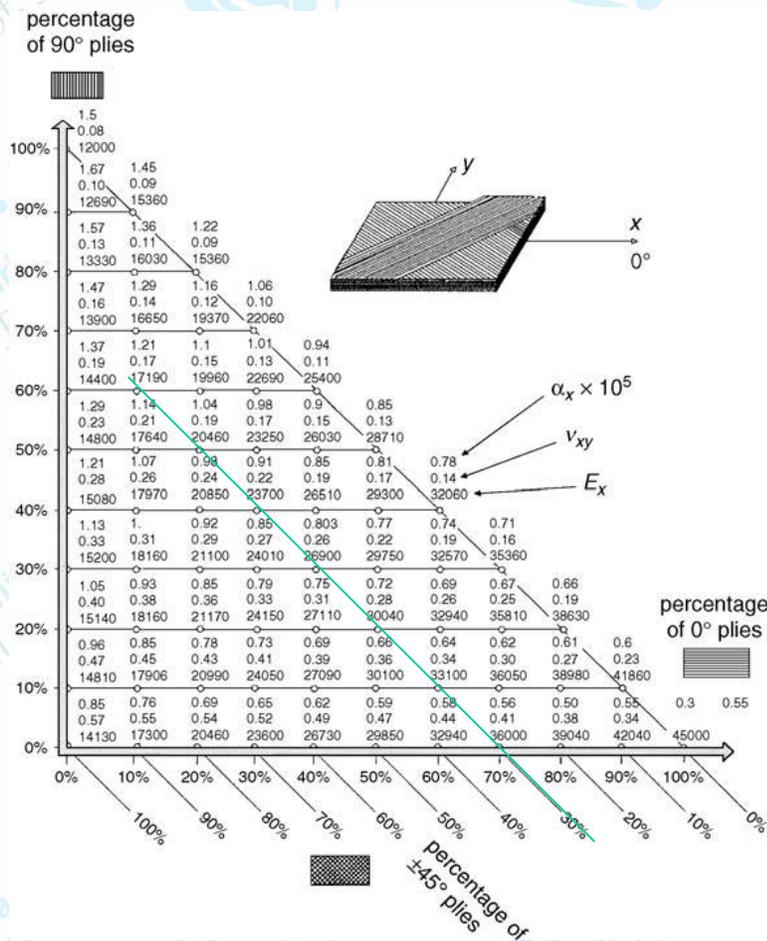
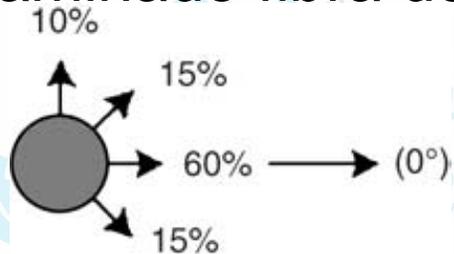
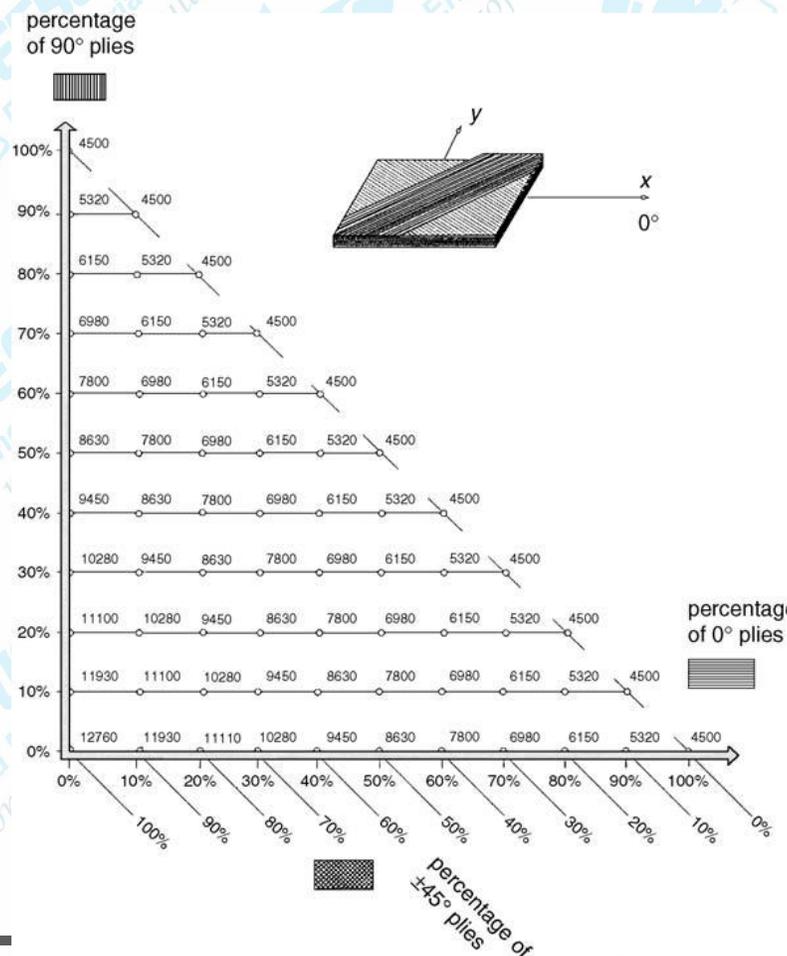
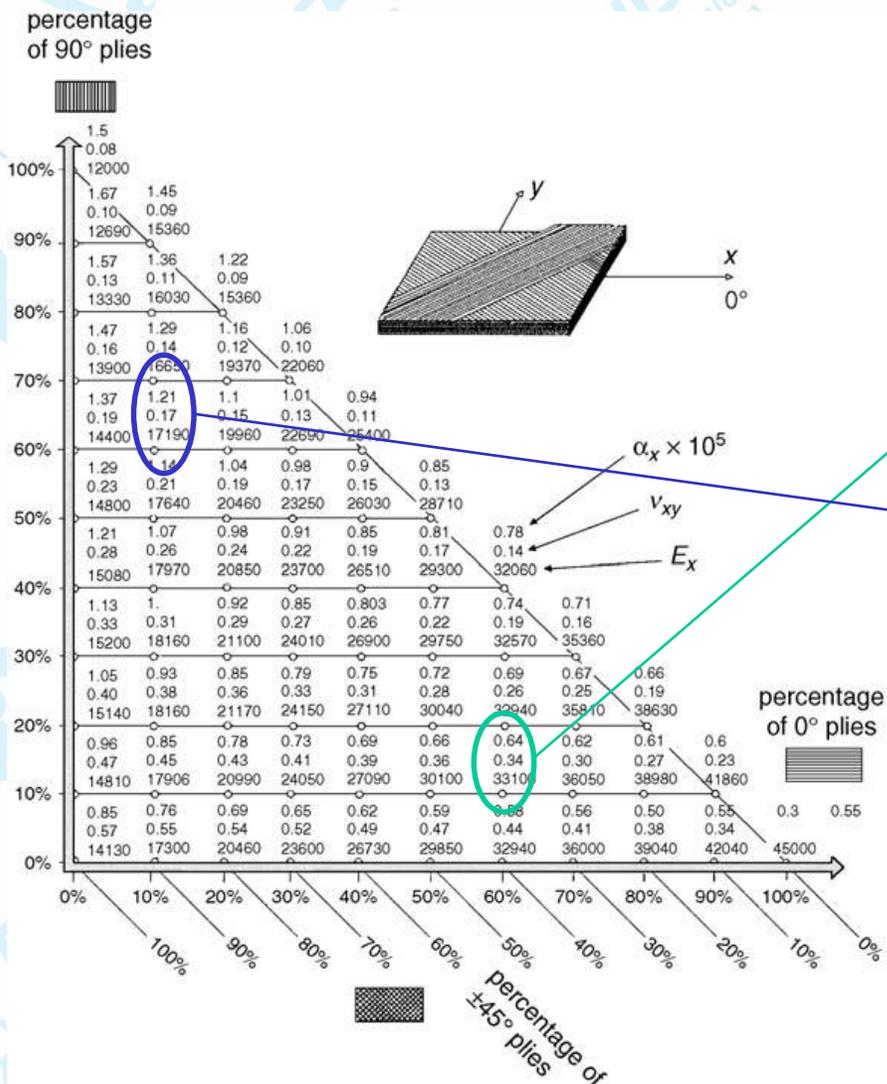


Table 5.14 Glass/Epoxy Laminate:  $V_f = 60\%$ , Ply Thickness = 0.13 mm

Table 5.15 Glass/Epoxy Laminates.  $V_f = 60\%$ . Ply Thickness = 0.13 mm



**Table 5.14 Glass/Epoxy Laminate:  $V_f = 60\%$ , Ply Thickness = 0.13 mm**



$E_x = 33,100 \text{ MPa}$

$\alpha_x = 0.64 \times 10^{-5}$

$v_{xy} = 0.34$

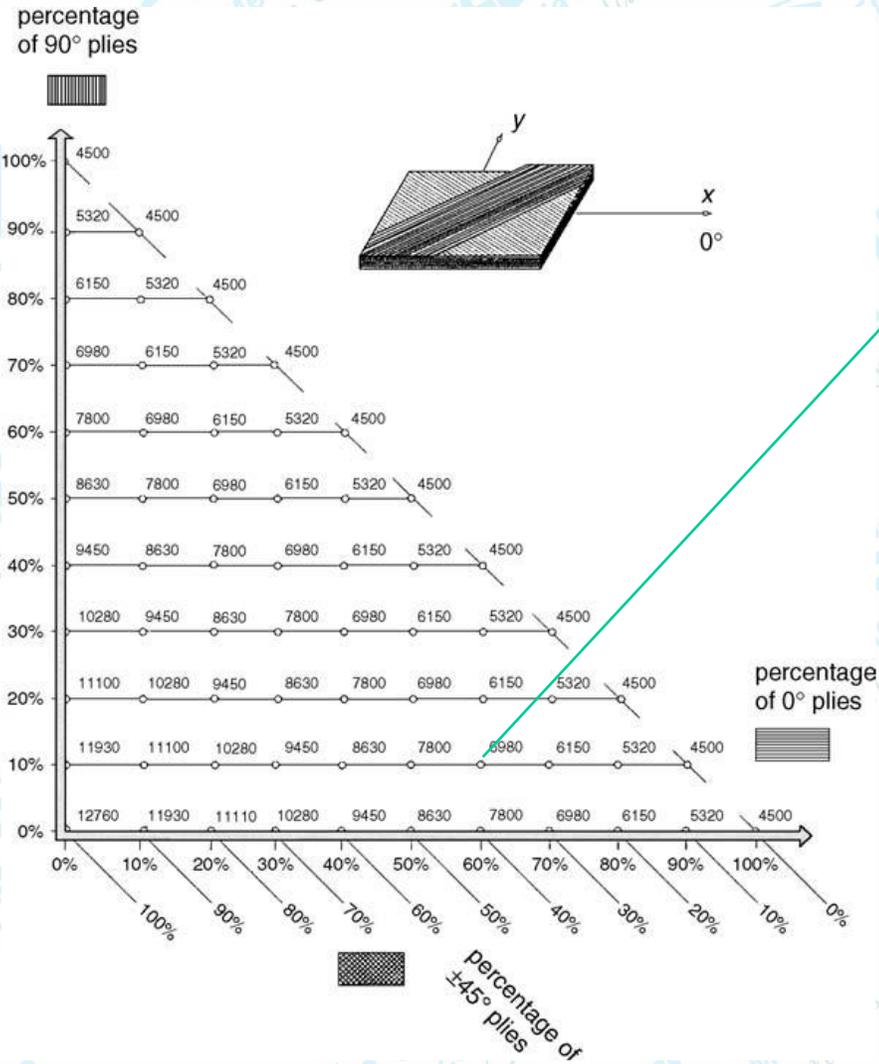
$E_y = 17,190 \text{ MPa}$  (Permutando a proportion of 0° e 90°)

$v_{yx} = 0.17$

$\alpha_y = 1.21 \times 10^{-5}$  (Permutando a proportion of 0° e 90°)

Longitudinal modulus  $E_x$  (MPa), Poisson ratio  $v_{xy}$ , and coefficient of thermal expansion  $\alpha_x$  as a function of the ply percentages in the directions 0°, 90°, +45°, -45°.

**Table 5.15 Glass/Epoxy Laminates.  $V_f = 60\%$ . Ply Thickness = 0.13 mm**



$G_{xy} = 6,980 \text{ MPa.}$

One then obtains the strains  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$ ,  $\gamma_{xy}$ , when the stresses are known, using the matrix relation mentioned above.

For the coefficient of thermal expansion, Table 5.14 shows:

Manufatura

# Processos

- Hand lay-up (manual);
- Vacuum bagging/autoclave;
- Moldagem por compressão SMC/BMC;
- Moldagem por resina líquida;
- Moldagem por transferência de resina.

# PROCESSOS

Pultrusão;

Filament winding;

Injeção;

Processamento termoplástico;

Tape laying automatizado;

# Manual lay-up

- Processo em que a aplicação de resina e reforço é feita manualmente diretamente sobre a superfície do molde. O laminado resultante é obtido após a cura da matriz sem tratamento posterior.



(piscinas, caixa d'água, carenagens de automóveis),  
lanchas.

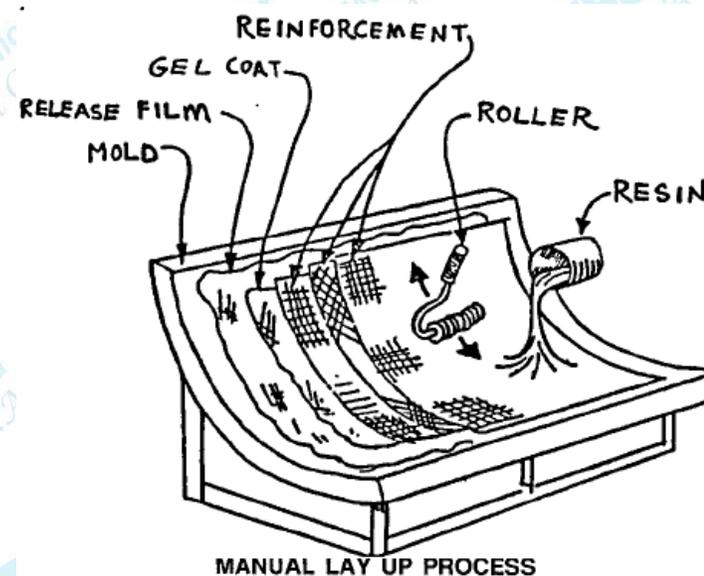




Foto: Edson Lopes Jr./Terra



Foto: Edson Lopes Jr./Terra



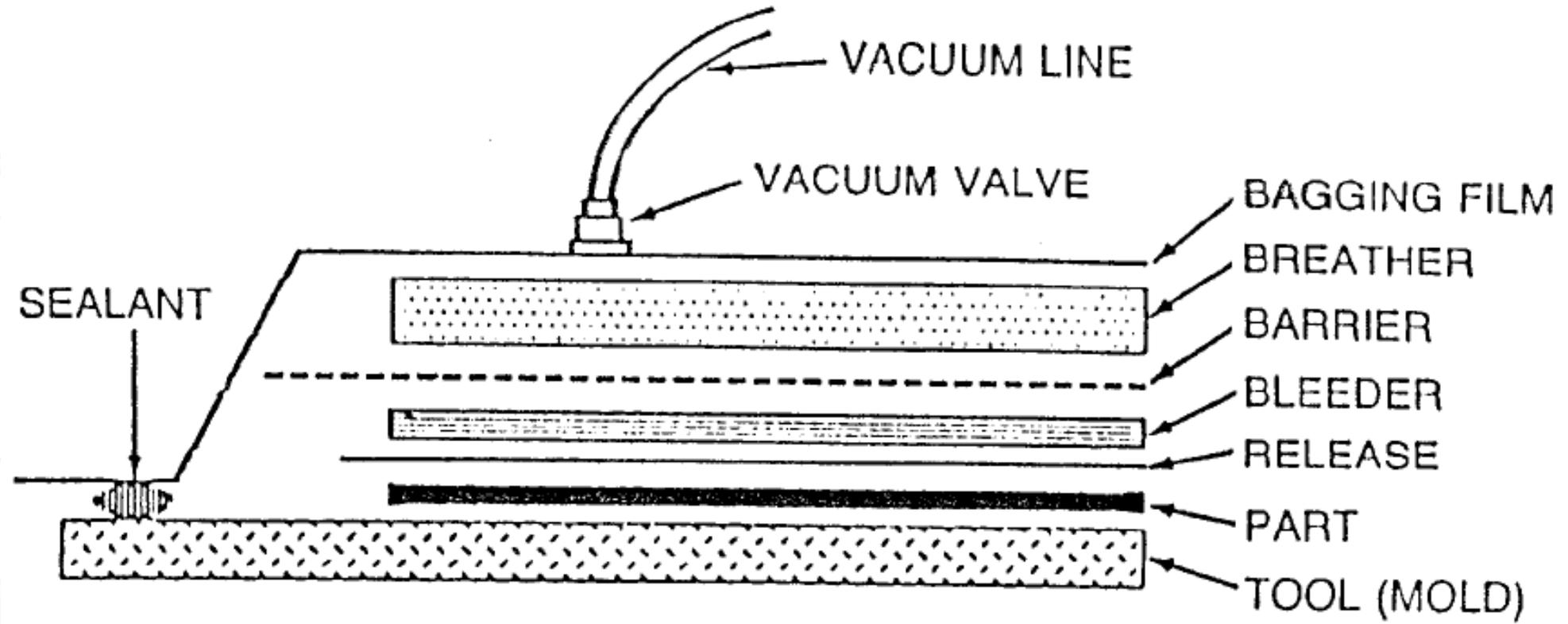
Foto: Edson Lopes Jr./Terra



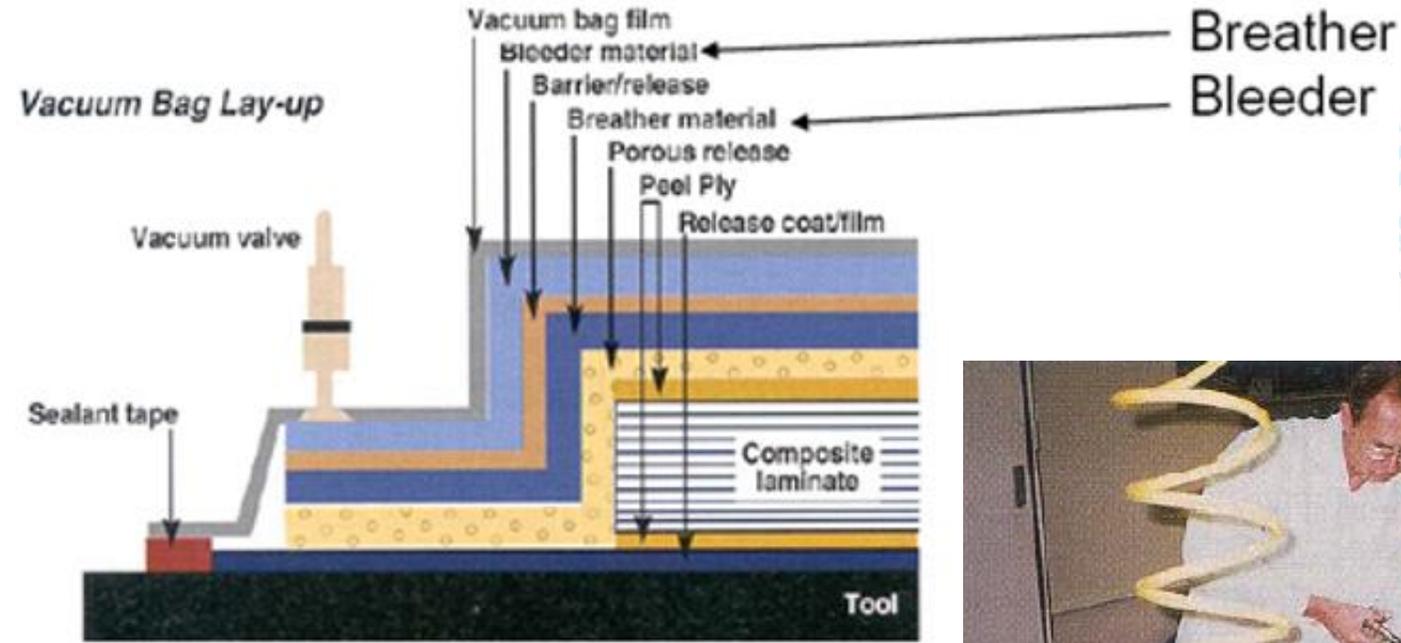
# Hand spray-up



# Vaccum bag assembly



# Vaccum bag



# Lay-up

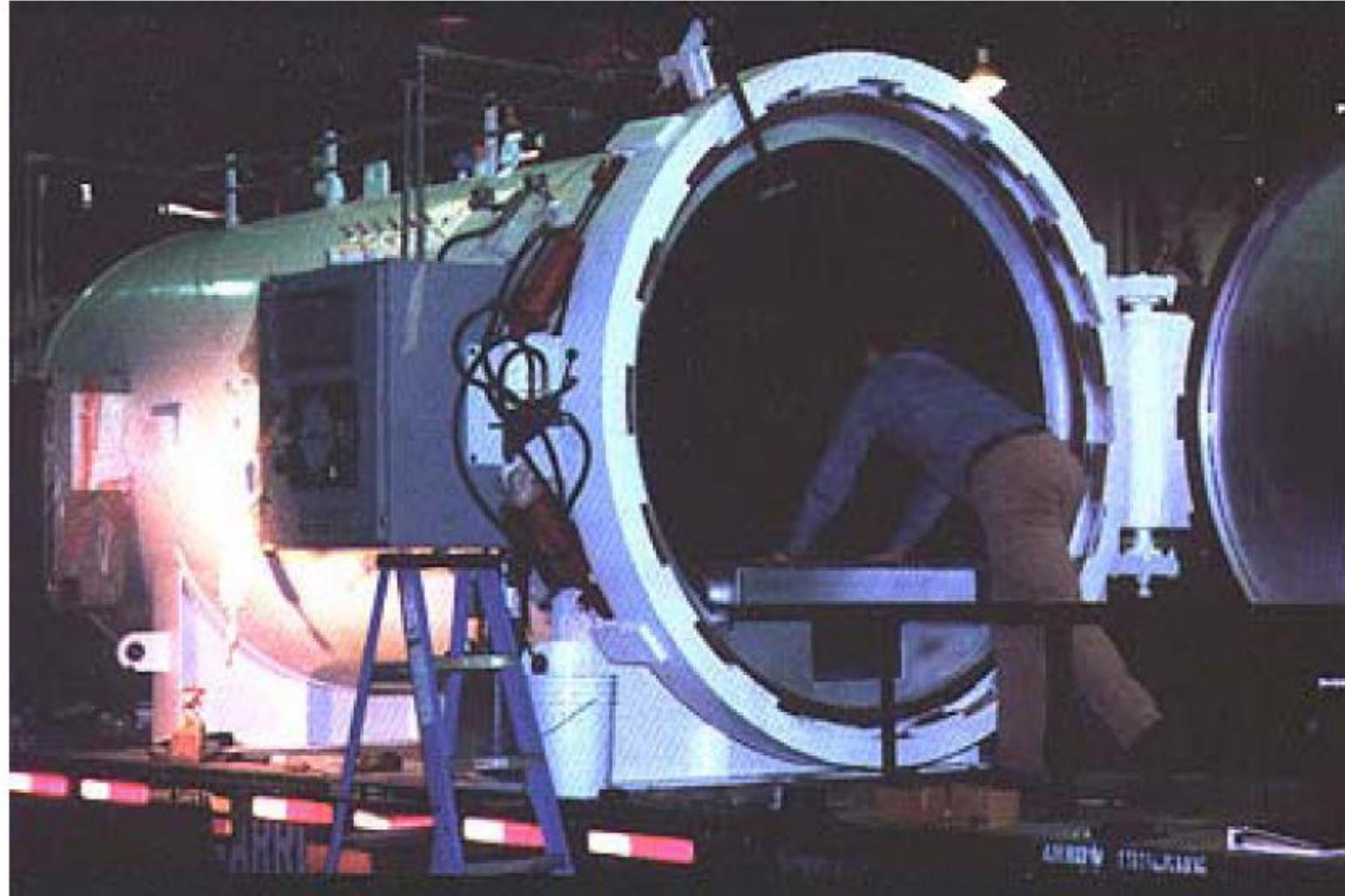


Material on stiffening structure

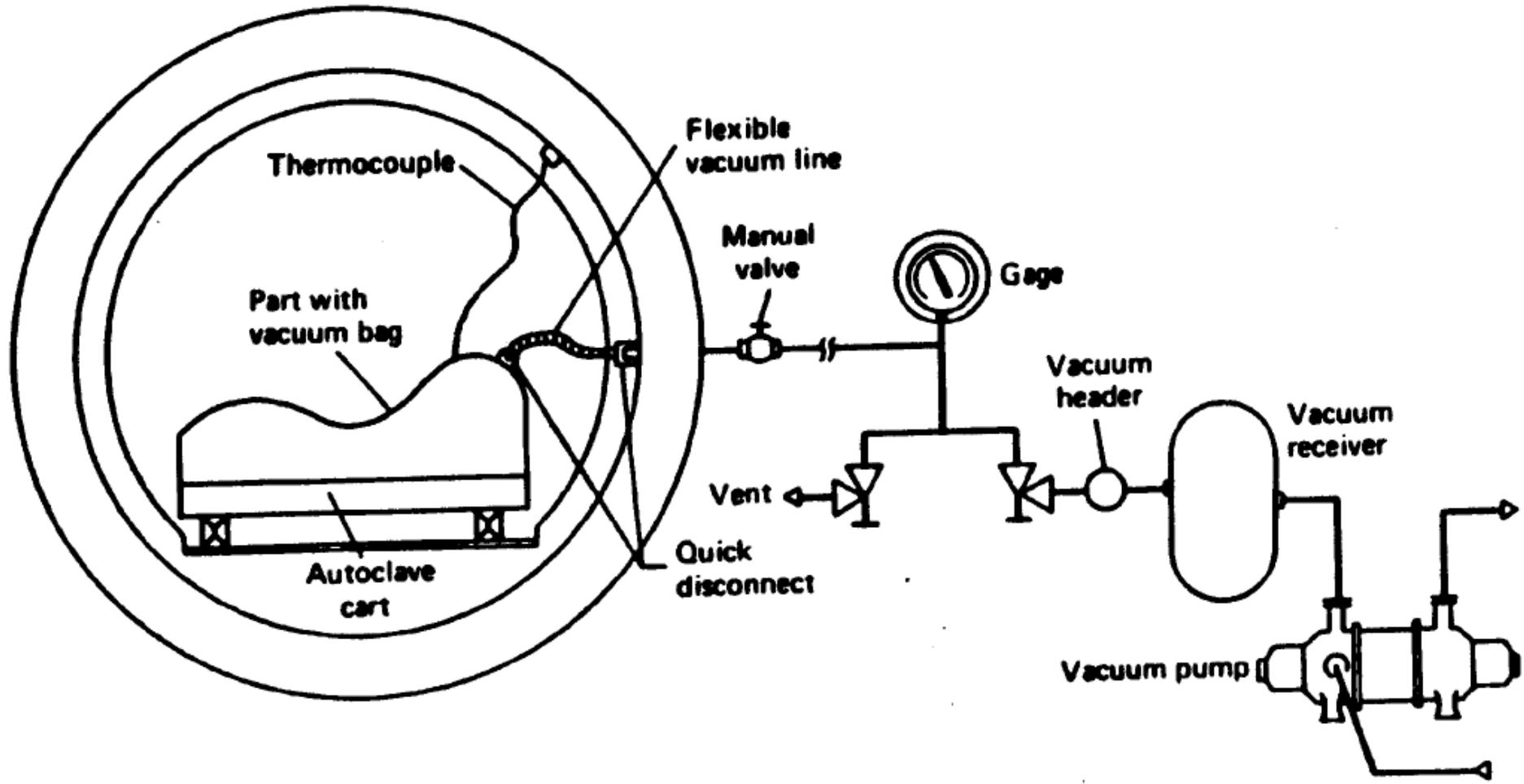
Vacuum bag and fittings attached



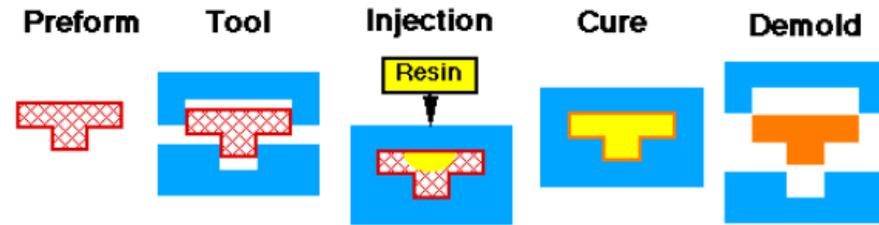
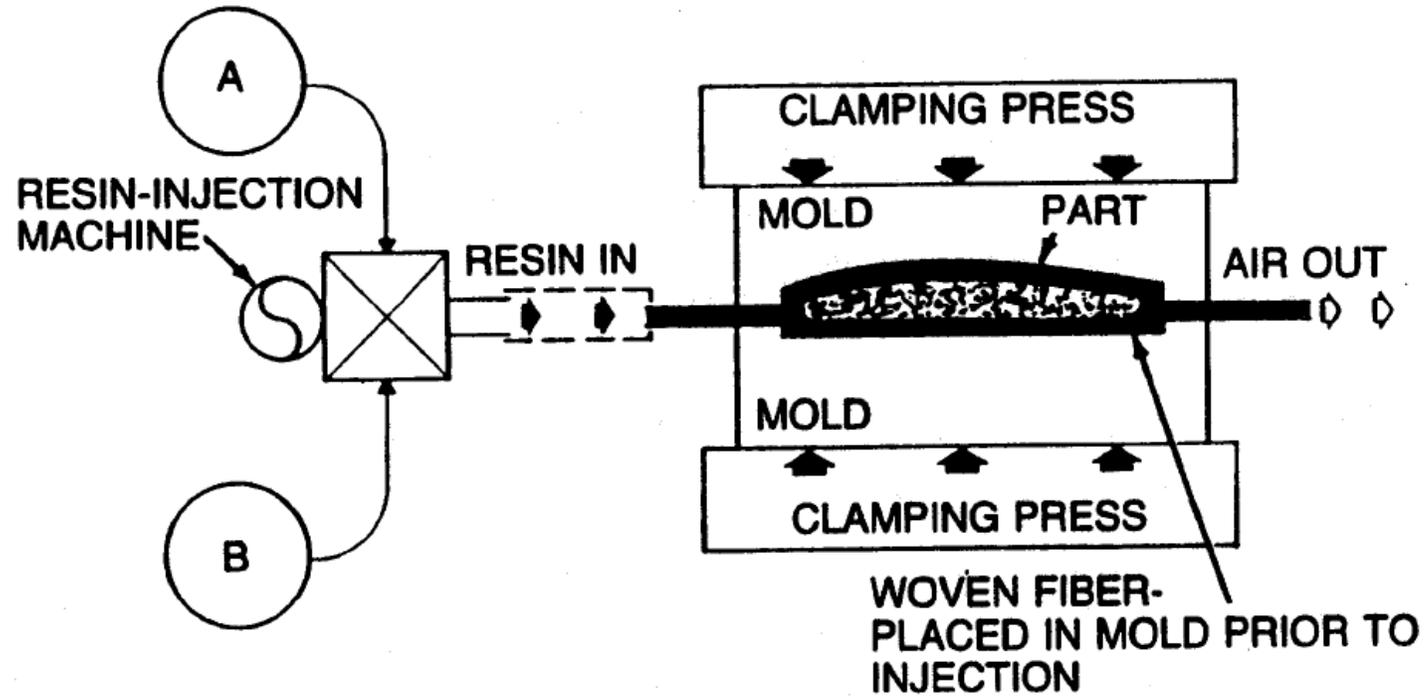
# Autoclave



# Autoclave

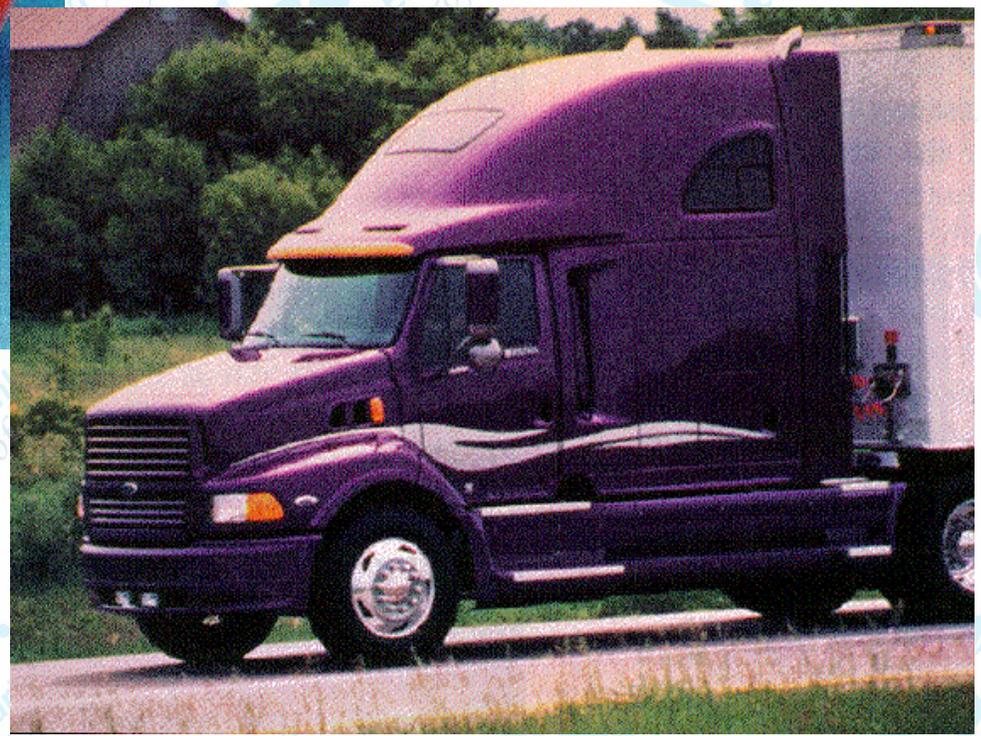


# Moldagem por transferência de resina (RTM)



# RTM aplicações

- Componentes de automóveis;
- Defletores de ar de caminhões;
- Hélices;
- pás de geradores eólicos;
- tanques de armazenamento de químicos;
- piscinas.

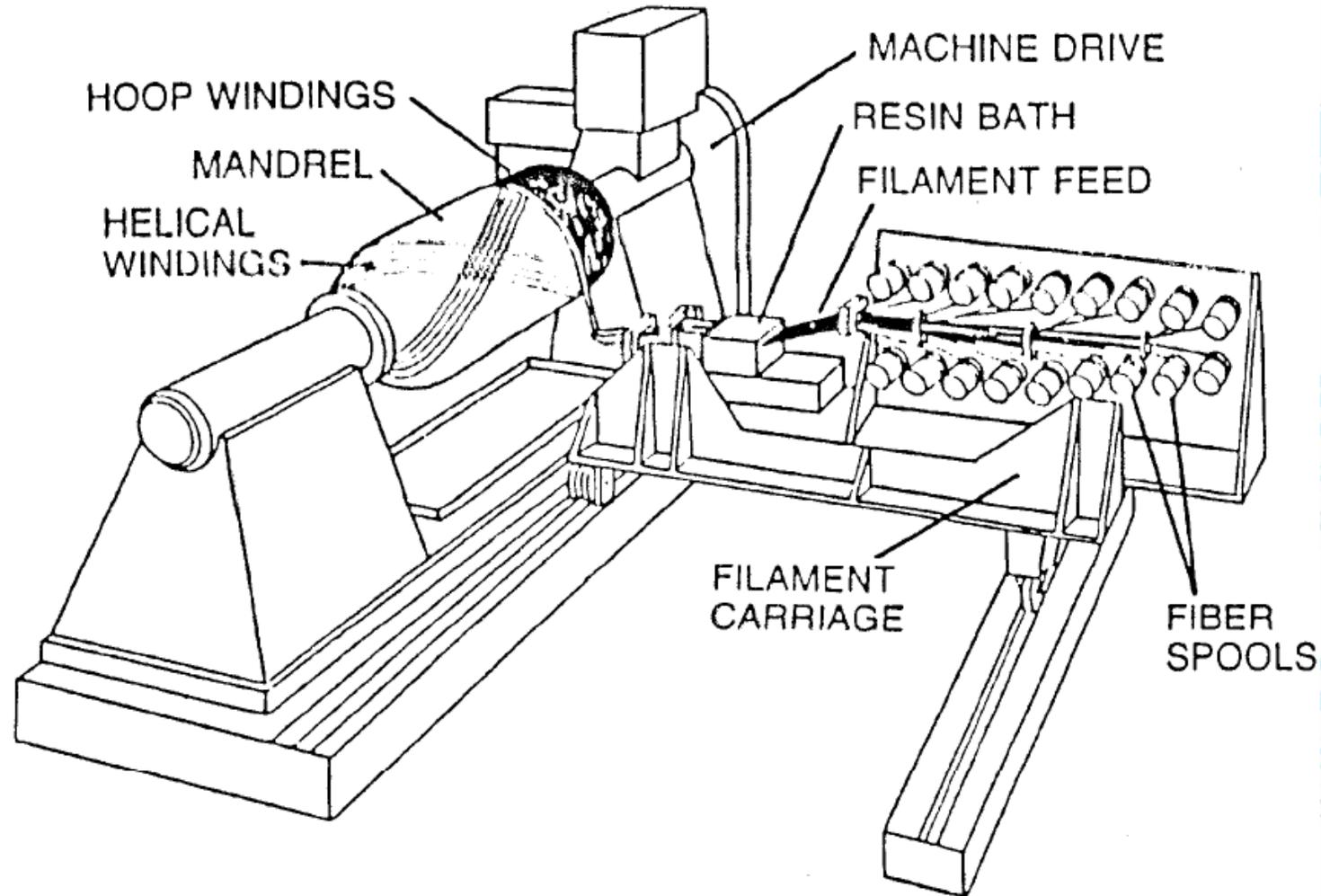


# Filament Winding

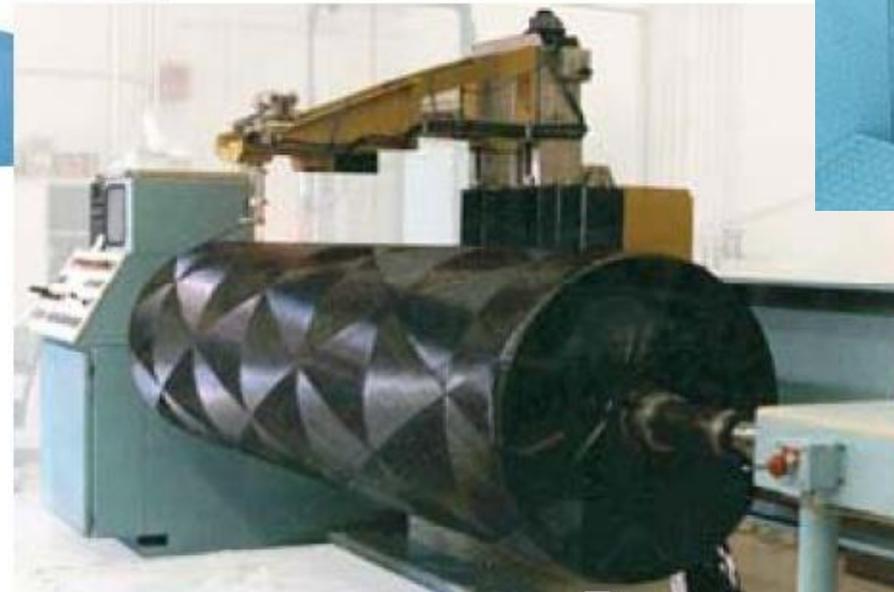
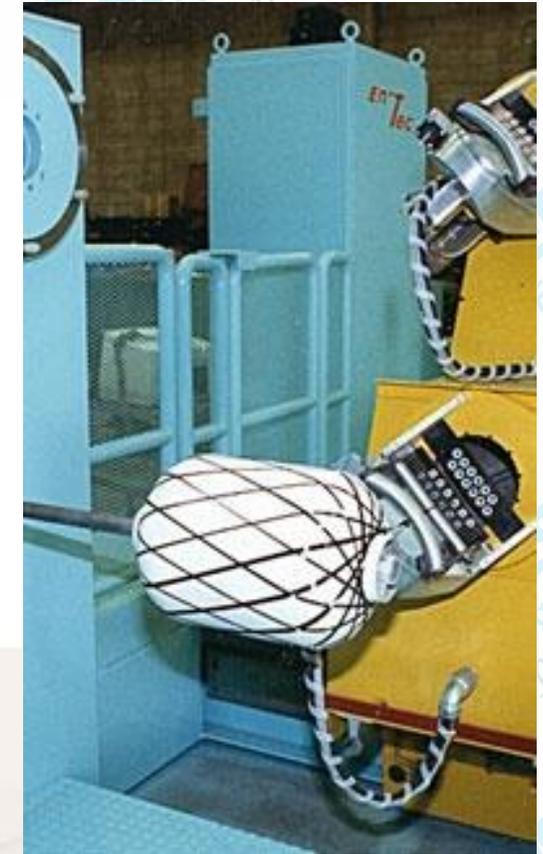
*Filament winding* (sinuoso) é o processo de bobinar resina impregnada de fibra ou fita na superfície de um mandril com um padrão geométrico preciso. Isto é realizado girando o mandril enquanto um cabeçote posiciona as fibras na superfície de mandril. Fibras contínuas de carbono, fibra de vidro ou de outros materiais são direcionadas na direção das tensões principais.

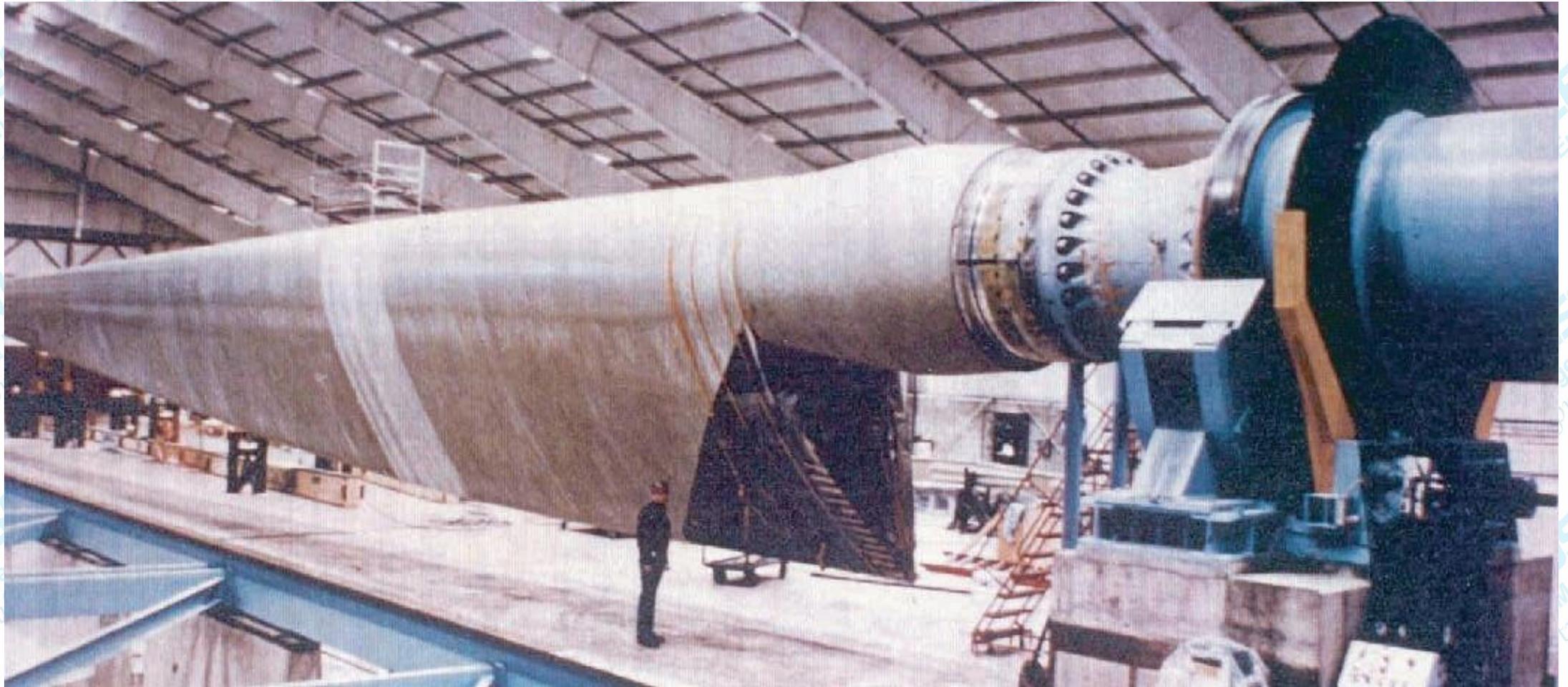
Uma máquina *filament winding* pode ser tão simples quanto um eixo de movimento ou tão complicado quanto cinco ou mais eixos de movimentos na criação de padrões precisos para produtos de alto desempenho.

# Filament Winding



# Filament Windign - equipamentos





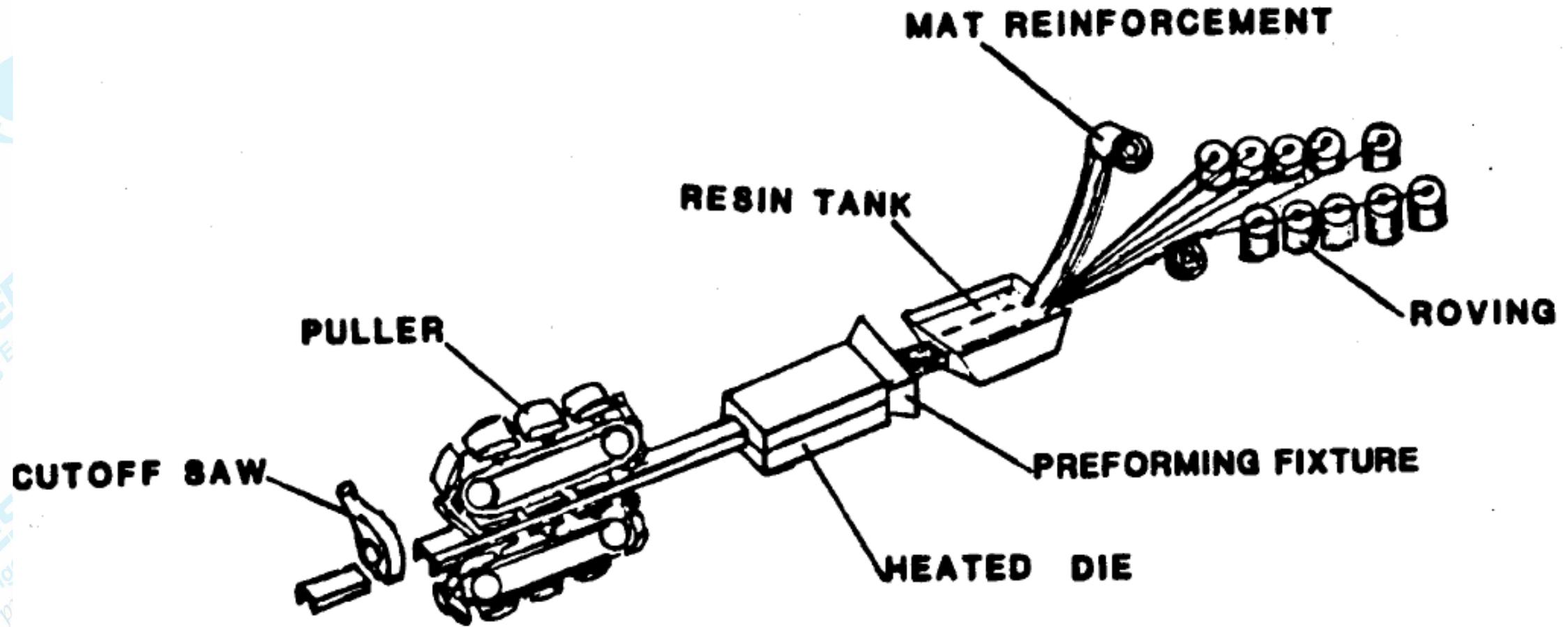
Entec Composite Machines, Inc.

# Pultrusão

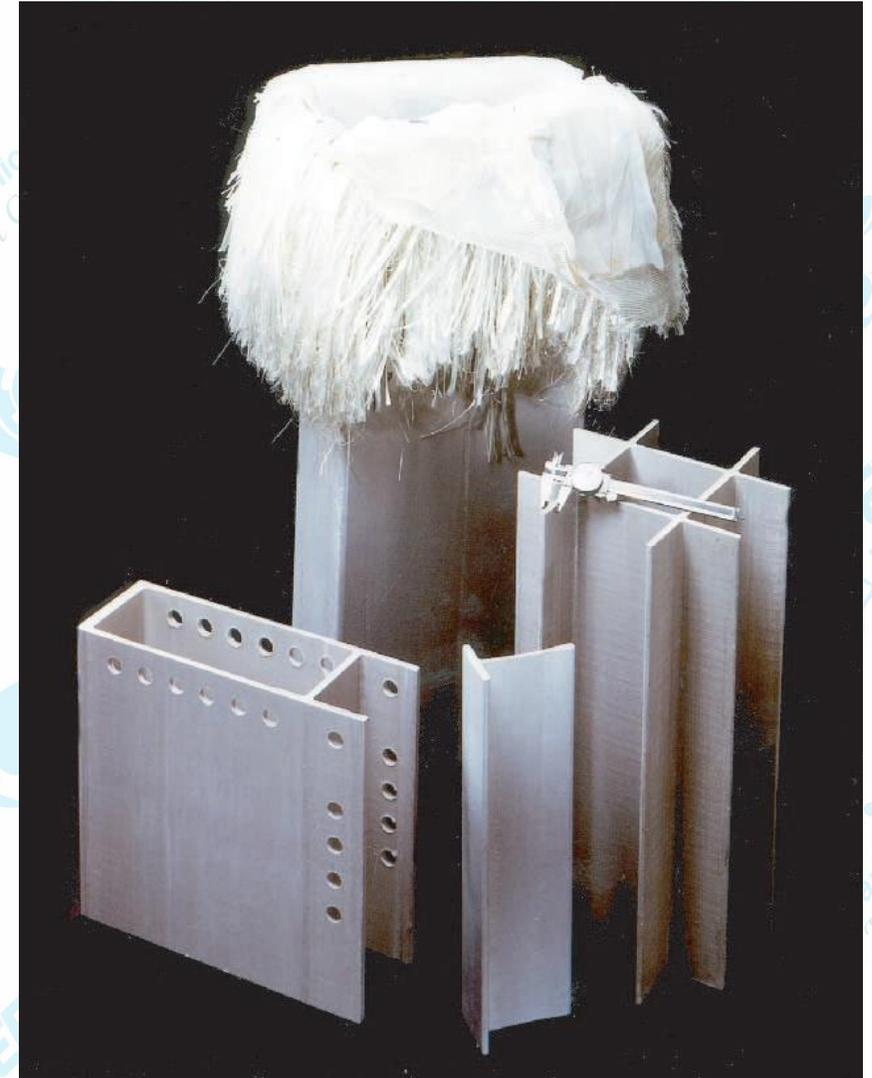
Durante o processo de pultrusão um reforço de fibra contínuo é passada por um banho de resina. As fibras cobertas são unidas por um guia e então são puxadas por uma matriz aquecida. A resina com catalizador é curada através de calor. O resultado é um perfil contínuo que é cortado no comprimento desejado.

O processo se assemelha ao de extrusão, porém os materiais são puxados ao invés de empurrados.

# Pultrusão - processo



# Pultrusão - processo



Entec Composite Machines, Inc.



Entec Composite Machines, Inc.

# Prática

## OBJETIVOS

Apresentar ao aluno a técnica de laminação manual (“*hand lay-up*”) associada ao processo de prensagem para a fabricação de placas laminadas (compósitos). Serão fabricados corpos-de-prova, com orientação das fibras na direção longitudinal ( $0^\circ$ ) e transversal ( $90^\circ$ ), para ensaio de flexão segundo a norma ASTM D790-96a.

## Materiais:

Tecido de fibra de carbono

Resina Epóxi: RenLam M; Endurecedor: Ren HY 956  
([www.maxepoxi.com.br](http://www.maxepoxi.com.br)).

## Roteiro:

01- limpar o molde e lubrificá-lo com graxa de silicone.

02 – montar o molde com o estampo inferior.

03 – cortar 4 tecidos com dimensão pouco inferior a cavidade do molde 80x120mm.

04 - pesar a quantidade de tecido de fibra de carbono (4 tecidos) a fim de se obter uma estimativa da fração volumétrica (em fibra) do laminado final;

05 - pesar 30g de resina e 6g de catalisador e misturar com espátula;

06 - depositar uma lâmina de tecido sobre a cavidade do molde metálico e, logo em seguida, aplicar com pincel certa quantidade da mistura (molhar) resina-catalisador sobre a lâmina e com as cerdas pressionar por entre as fibras.

- 07- Repete-se a etapa 06 até o empilhamento do número de tecidos desejado. Dessa forma, pode-se obter diferentes frações volumétricas em fibra, alterando assim, o número de camadas (lâminas) do laminado bem como as diferentes seqüências de empilhamento;
- 06- Fecha-se o molde e aplica-se pressão sobre o mesmo através de uma prensa hidráulica (moldagem por compressão) 30T;
- 07 -Desmolda-se após 24 horas uma placa retangular em compósito;
- 08 - Pesara placa a fim de quantificar o volume de resina retido no compósito, podendo-se assim, calcular a fração volumétrica do laminado;
- 09 - Corta-se a placa em corpos-de-prova especificados pela norma técnica;
- 10 - Lixam-se as bordas dos corpos-de-prova para finalmente poder armazená-los em recipientes fechados.

# Ensaio de Flexão:

ASTM D790-96a.

Na TABELA 2 estão os valores de comprimento, largura, espessura e “*span*” (distância entre apoios).

O “*span*” e a sequência de empilhamento adotada podem determinar uma maior ou menor influência das tensões de cisalhamento.

## Relatório:

O aluno deverá elaborar relatório técnico sobre a fabricação e ensaios onde deve constar:

- Resumo;
- Introdução;
- Pesquisa Bibliográfica (compósitos, fibras, resinas, ensaios mecânicos);
- Metodologia;
- Resultados.

Teórico para as direções das fibras (módulo de elasticidade, resistência à flexão, deformação);

Experimentais;

- Conclusões: correlação entre Teoria x Experimento;
- Bibliografia.

## Referências

- AGARWAL, B.D.; BROUTMAN, L.J. (1990). *Analysis and performance of fiber composites, second edition*. New York, John Wiley & Sons, Inc.
- ASTM D790-96a. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.
- <https://www.ccm.udel.edu/Techsite/Pages/Simulations-Index.html>
- HYER, M. W. (1998). *Stress analysis of reinforced composite materials*. Singapore, WCB/McGraw-Hill.