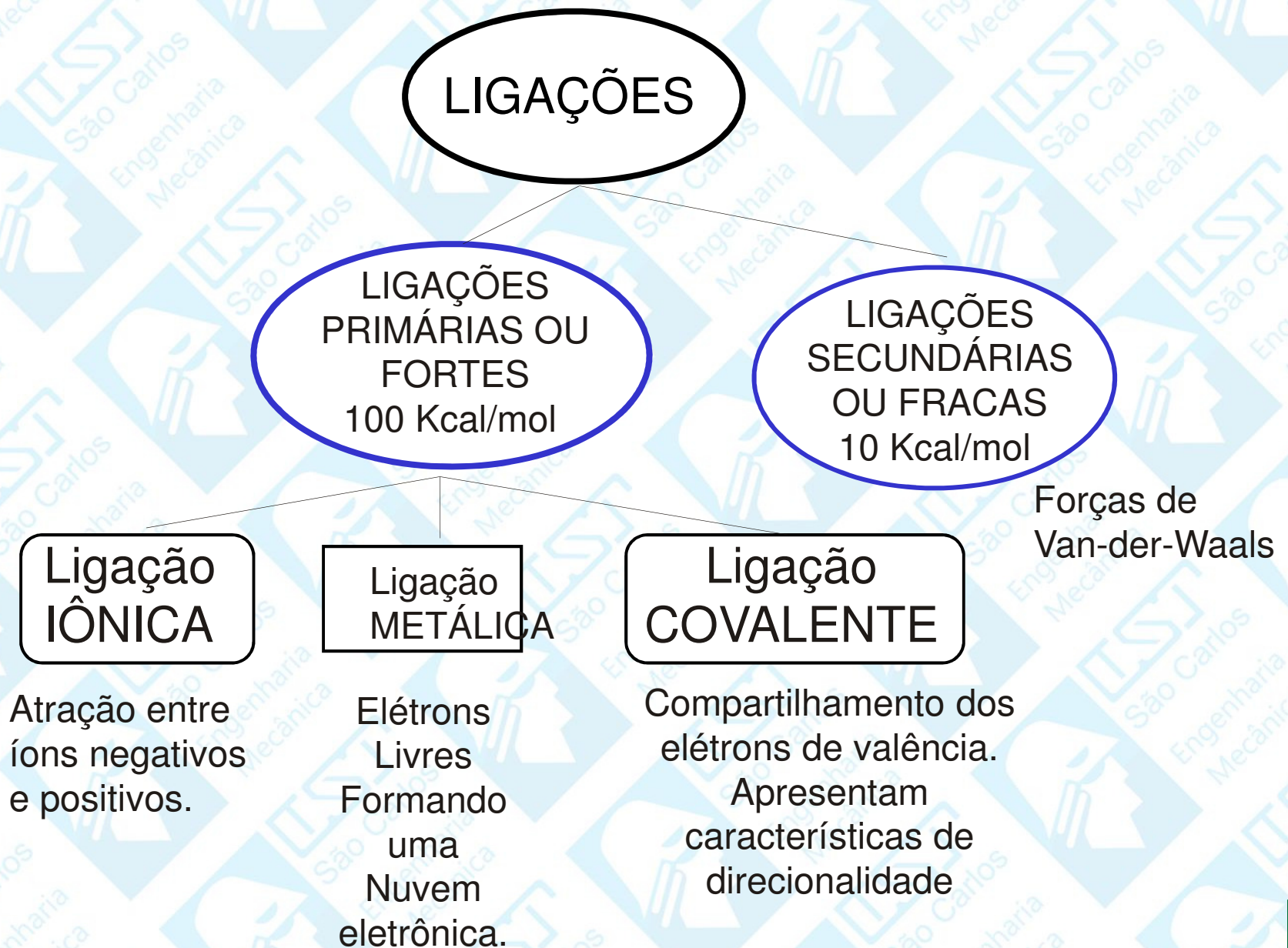


MATERIAIS DE ENGENHARIA ***- (SEM 5908) -***

Aula 09 – Materiais Compósitos

Prof. Dr. Carlos Alberto Fortulan
Prof. Dr. João Manuel Domingos de Almeida Rollo





MATERIAIS

METÁLICOS

POLÍMEROS

CERÂMICAS

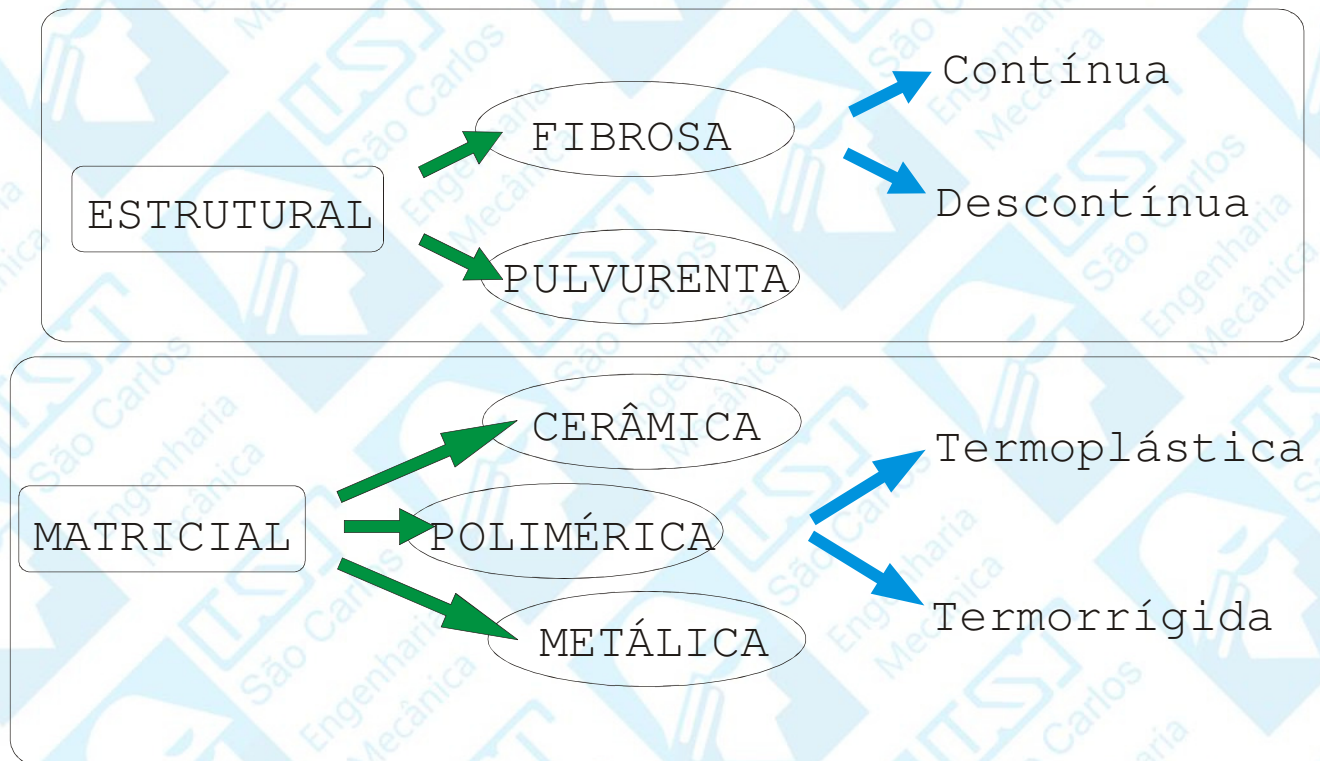
COMPÓSITOS

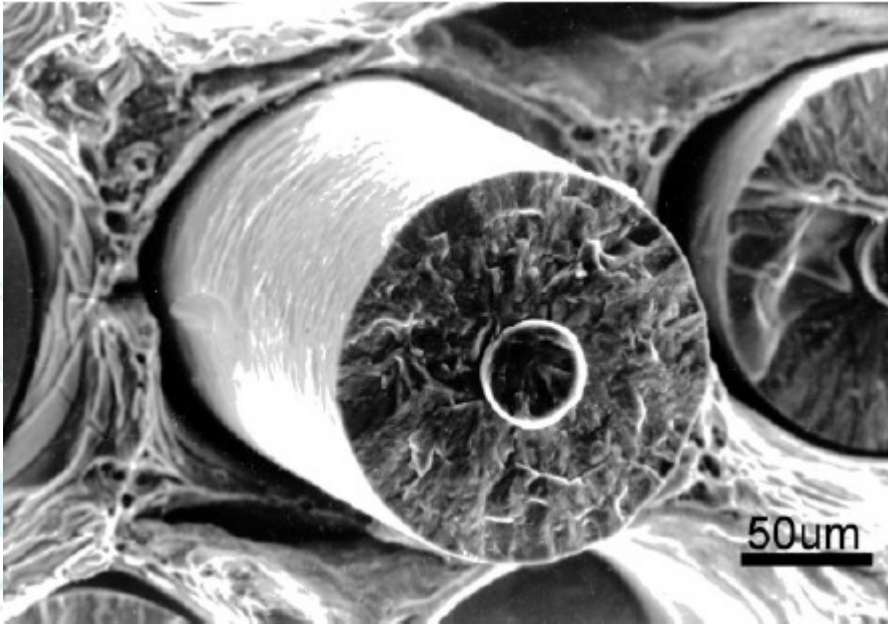
São materiais que consistem de pelo menos, dois componentes: a matriz e o agente de reforço. O principal objetivo é o de melhorar determinadas propriedades da matriz com características complementares.



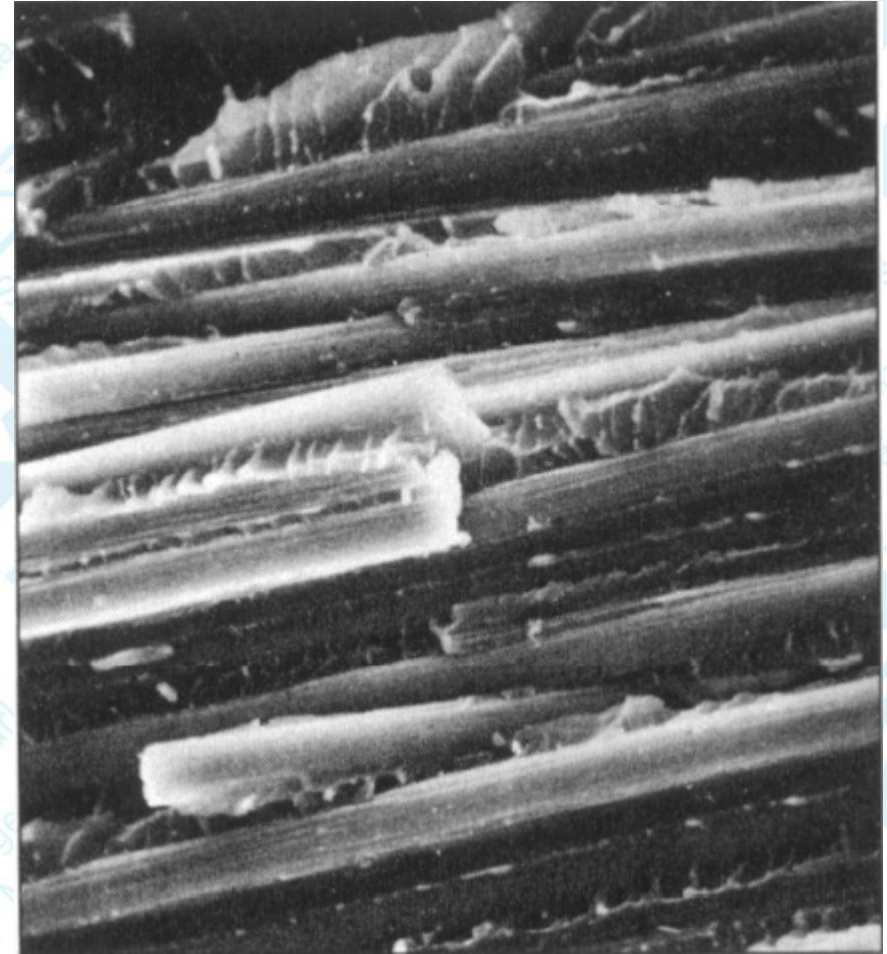
COMPÓSITOS

Constituem de uma classe de materiais heterogêneos multifásicos. Neles um dos componentes descontínuos, fornece a principal resistência ao esforço (**componente estrutural**), e o outro contínuo é o meio de transferência deste esforço (**componente matricial**).





Compósito de fibra polimérica

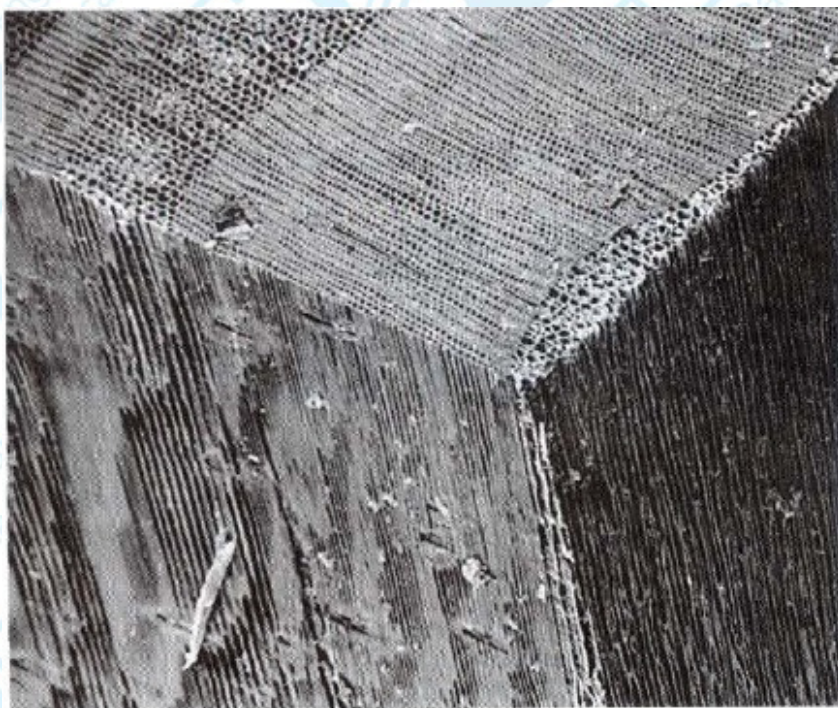


Compósito de matriz polimérica

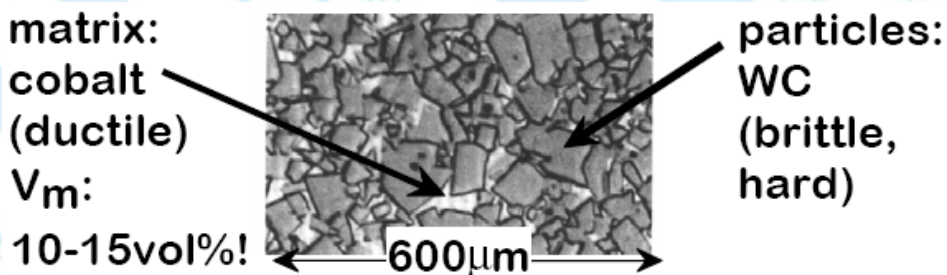
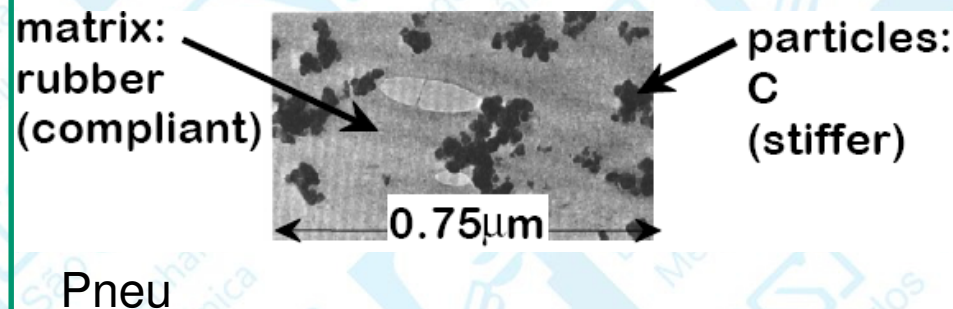
Tipos e exemplos

- Pessoas (tecidos ósseos, ...)
- Árvores
- Matrizes reforçadas com fibras
fibras de vidro-epoxi
- Matrizes reforçadas com particulados
pneus (negro de fumo na borracha, mas
também contém fibras contínuas (arame de
aço ou cinta polimérica)

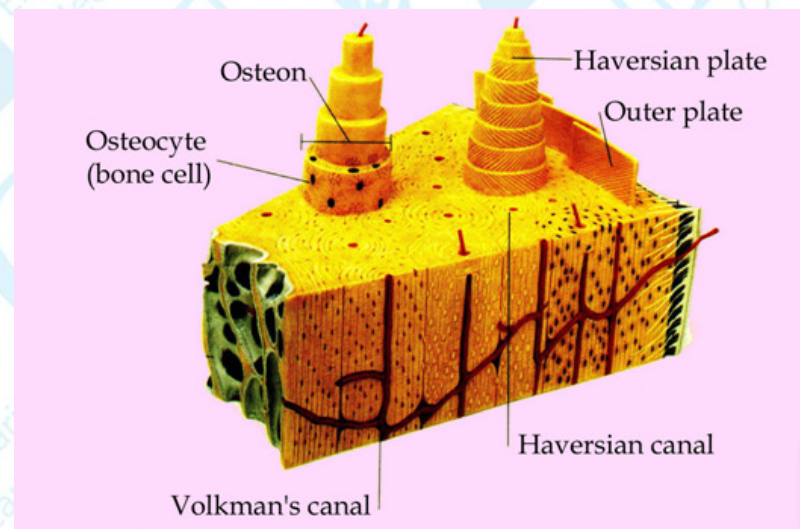




Pinho



Ferramenta de corte WC/Co



Constituintes do osso: colágeno (20% em peso), fosfatos de cálcio (70% em peso) e água (9% em peso), proteínas polissacarídeos, e lipídeos.



FIBRAS E PARTÍCULAS COMO AGENTE DE REFORÇO

Vidro;
 Kevlar;
 Carbono;
 Termoplástico;
 Alumina
 SiC (Carbeto de Silício)
 Aço
 Si_3N_4 (Nitreto de Silício)
 SiO_2 - Sílica
 Talco
 Rochas
 Negro de Fumo
 Carbonato de Cálcio



FIBRAS DE VIDRO

Convencional - com fibras de vidro com valor de módulo elástico moderadamente alto.

Compósitos avançados – com fibras de vidro com valores de módulos elásticos maiores que o do E-vidro.

Table 14.1 *Compositions of Glass-Reinforcing Fibers*

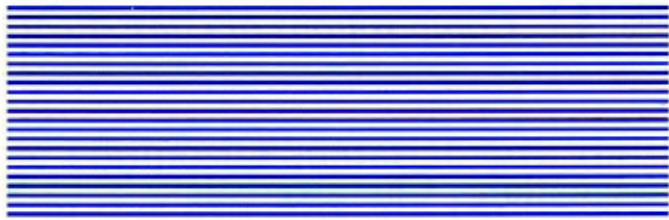
Designation	Characteristic	Composition ^a (wt %)								
		SiO ₂	(Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃)	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	B ₂ O ₃	TiO ₂	ZrO ₂
A-glass	Common soda–lime silica	72	<1	10		14				
AR-glass	Alkali resistant (for concrete reinforcement)	61	<1	5	<1	14	3		7	10
C-glass	Chemical corrosion resistant	65	4	13	3	8	2	5		
E-glass	Electrical composition	54	15	17	5	<1	<1	8		
S-glass	High strength and modulus	65	25		10					

Source: Data from J. G. Mohr and W. P. Rowe, *Fiber Glass*, Van Nostrand Reinhold Company, Inc., NY, 1978.

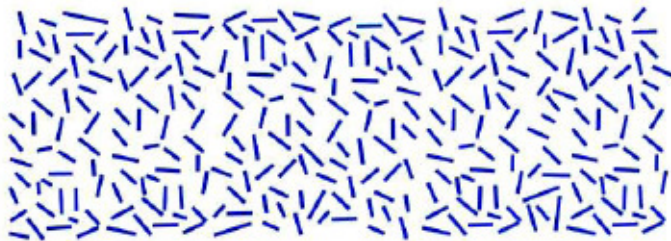
^a Approximate and not representing various impurities.



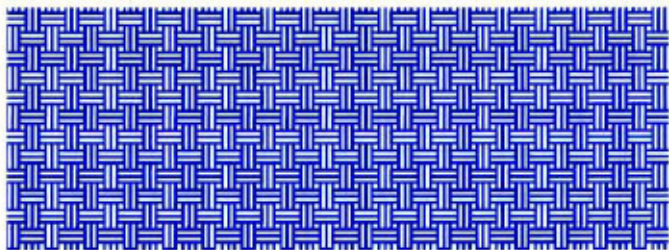
FORMATOS



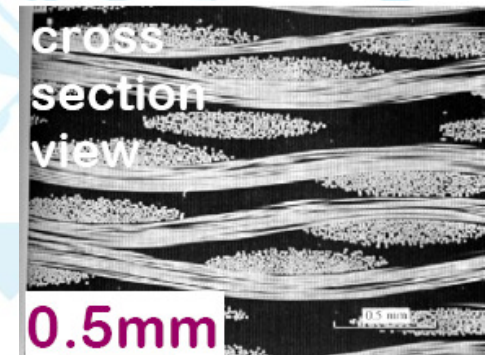
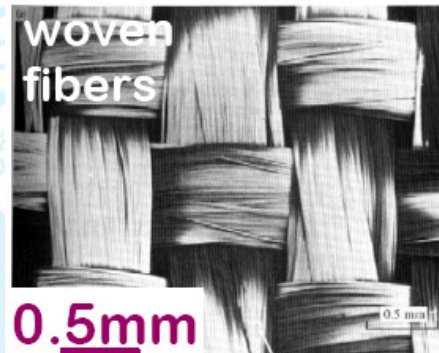
(a)



(b)



(c)



a) contínuo, b) particulado, c) tecido, pulvurento.



REFORÇO - TECIDO

Tecido de material contínuo

Tecido de material cortado



-Superfície (Vel)



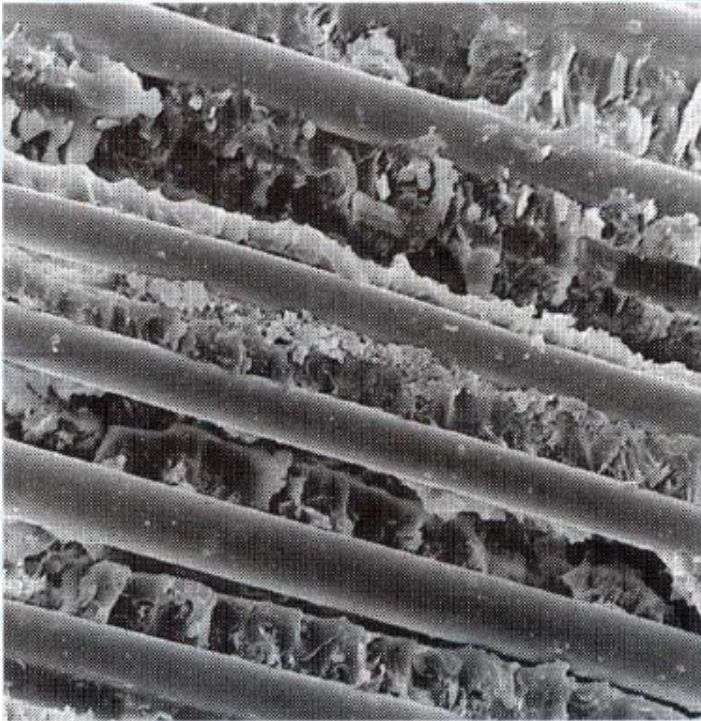
MATRIZES

Protegem e separam os reforços, transmitem esforços

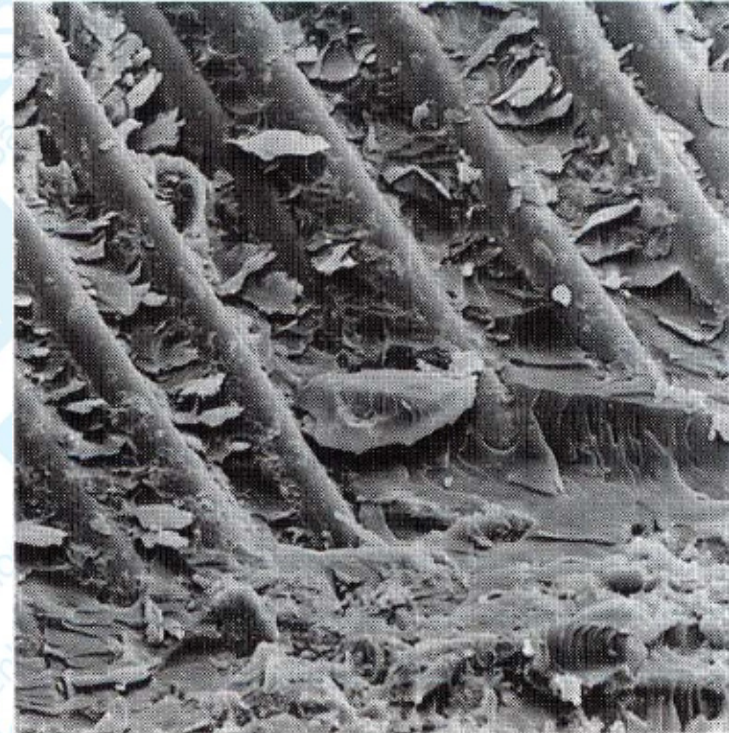
- Polímeros
 - Epoxi; poliéster, poliuretano, borracha
- Metal
 - Al, Cu, Ti, Ni
- Cerâmica
 - vidro, cimento



INTERFACE x INTERFASE



Fraca união química matriz-reforço



Forte união química matriz-reforço

Fonte: SHACKELFORD, J. F. *Ciência dos Materiais*. Pearson. 2008. p331



Table 14.2 *Polymeric Matrix Materials for Fiberglass*

Polymer ^a	Characteristics and applications
Thermosetting	
Epoxies	High strength (for filament-wound vessels)
Polyesters	For general structures (usually fabric reinforced)
Phenolics	High-temperature applications
Silicones	Electrical applications (e.g., printed-circuit panels)
Thermoplastic	
Nylon 66	Less common, especially good ductility
Polycarbonate	
Polystyrene	

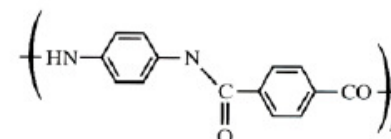
Source: Data from L. J. Broutman and R. H. Krock, Eds., *Modern Composite Materials*, Addison-Wesley Publishing Co., Inc., Reading, MA, 1967, Chapter 13.

^aSee Tables 13.1 and 13.2 for chemistry.



Table 14.3 *Advanced Composite Systems Other Than Fiberglass*

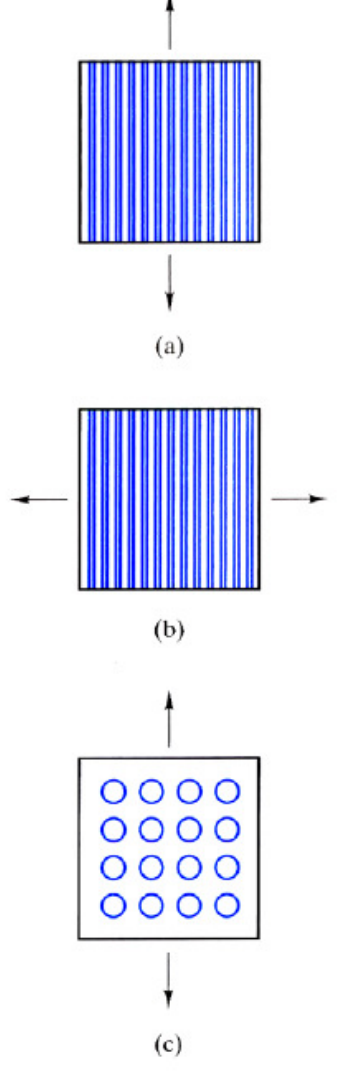
Class	Fiber/Matrix
Polymer matrix	Para-aramid (Kevlar ^a)/epoxy Para-aramid (Kevlar ^a)/polyester C (graphite)/epoxy C (graphite)/polyester C (graphite)/polyetheretherketone (PEEK) C (graphite)/polyphenylene sulfide (PPS)
Metal matrix	B/Al C/Al Al ₂ O ₃ /Al Al ₂ O ₃ /Mg SiC/Al SiC/Ti (alloys)
Ceramic matrix	Nb/MoSi ₂ C/C C/SiC SiC/Al ₂ O ₃ SiC/SiC SiC/Si ₃ N ₄ SiC/Li–Al–silicate (glass-ceramic)



Formula for para-aramid



PROPRIEDADES



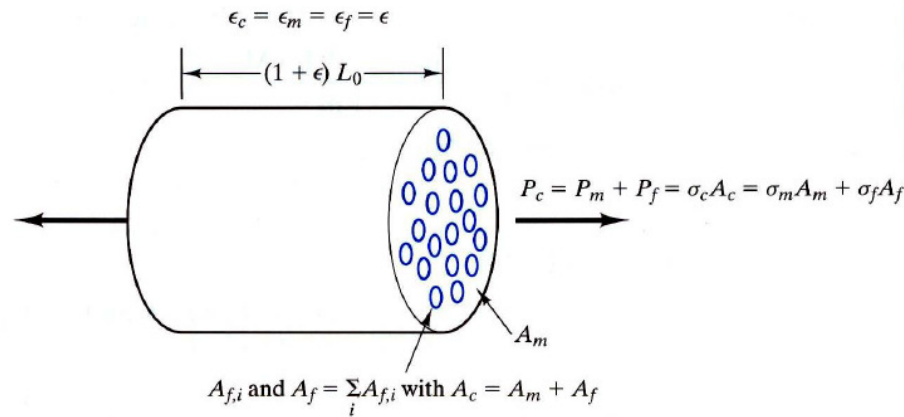
De natureza altamente anisotrópica

De natureza isotrópica



Carregamento paralelo ao reforço das fibras - isostrain

(Iso deformação)



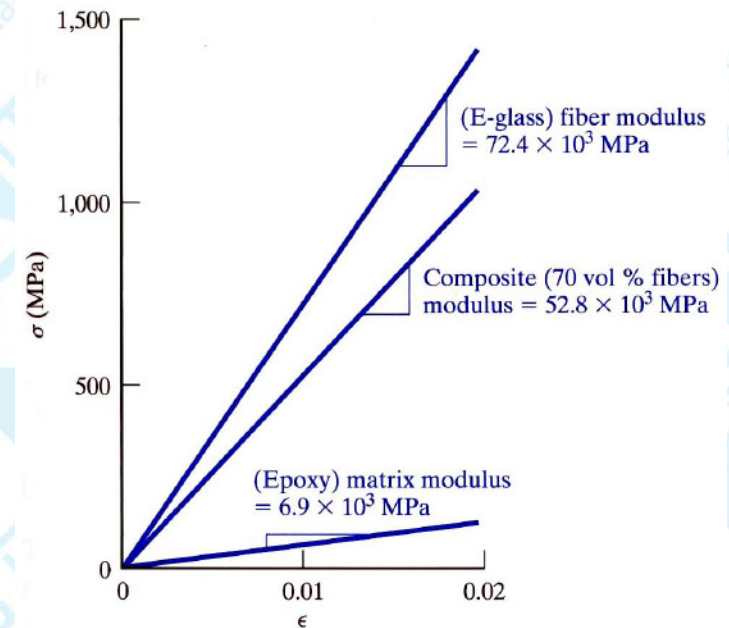
$$E_c = V_m E_m + V_f E_f$$

$$V_m + V_f = 1$$

$$P_f/P_c = E_f/E_c \cdot V_f$$

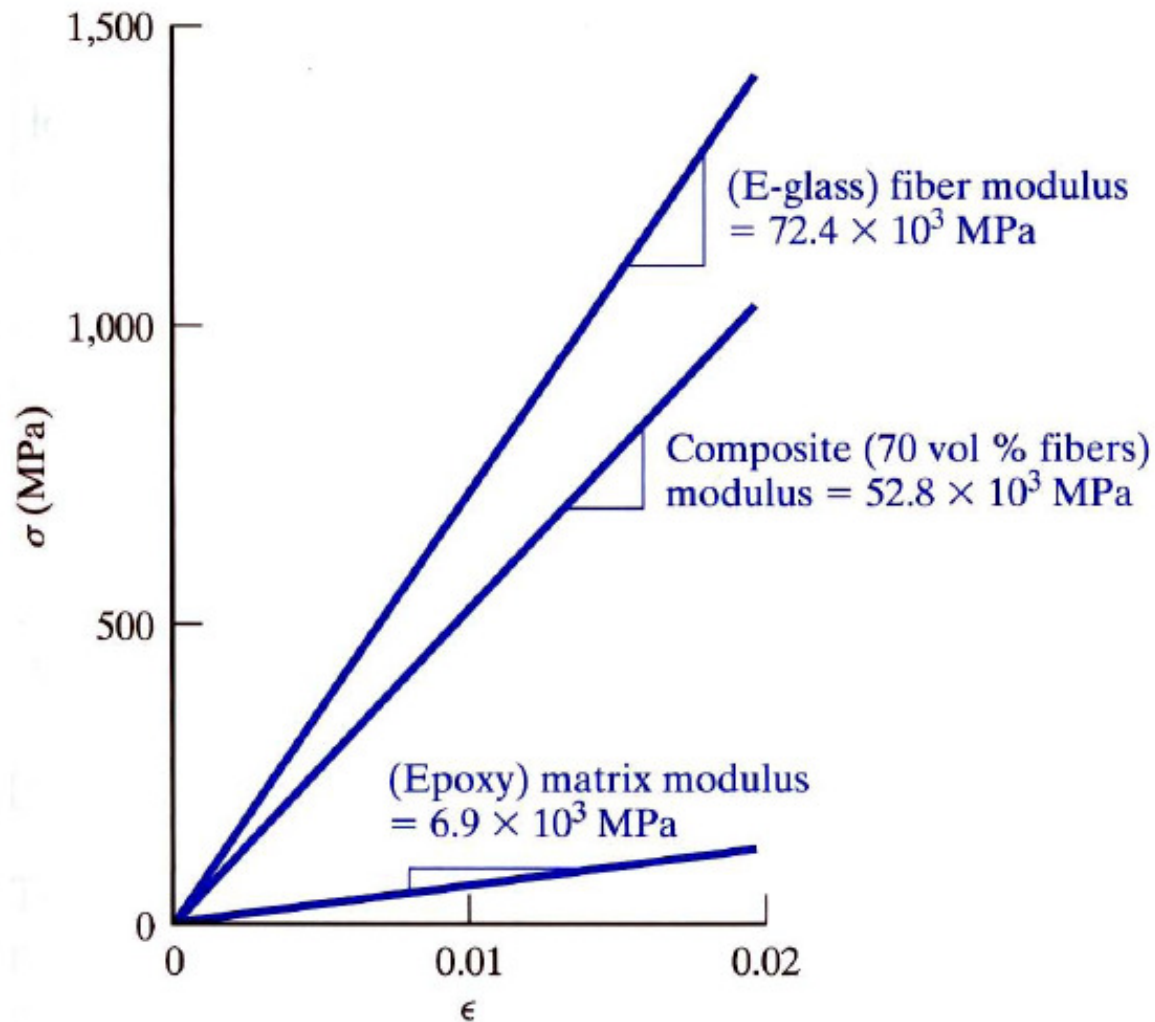
$$X_c = V_m X_m + V_f X_f$$

X pode ser diferentes propriedades como: difusividade, condutividade térmica, cond. elétrica,...



70vol% reinforcing phase





70vol% reinforcing phase



Calcule o módulo elástico e a condutividade do compósito para o poliéster reforçado com 60 vol% de vidro-E sob condições de isodeformação.

$$E_{\text{poliéster}} = 6,9 \text{ GPa}$$

$$k_{\text{poliéster}} = 0,17 \text{ W/m.K}$$

$$E_{\text{vidro-E}} = 72,4 \text{ GPa}$$

$$k_{\text{vidro-E}} = 0,97 \text{ W/m.K}$$

$$E_c = 42,2 \text{ GPa}$$

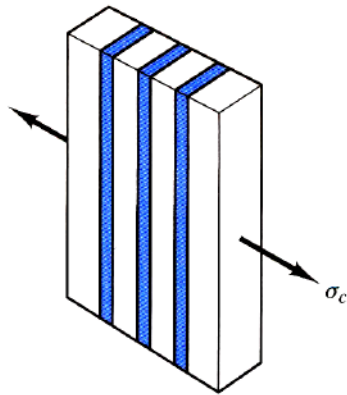
$$k_c = 0,65 \text{ W/m.K}$$



Carregamento perpendicular ao reforço das Fibras: ISOSTRESS

(Iso tensão)

$$\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f$$



$$\frac{1}{E_c} = \frac{\nu_m}{E_m} + \frac{\nu_f}{E_f},$$

$$E_c = \frac{E_m E_f}{\nu_m E_f + \nu_f E_m}.$$

$$X_c = \frac{X_m X_f}{\nu_m X_f + \nu_f X_m},$$



Calcule o módulo elástico e a condutividade do compósito para o poliéster reforçado com 60 vol% de vidro-E sob condições de isotensão.

$$E_{\text{poliester}} = 6,9 \text{ GPa}$$

$$k_{\text{poliester}} = 0,17 \text{ W/m.K}$$

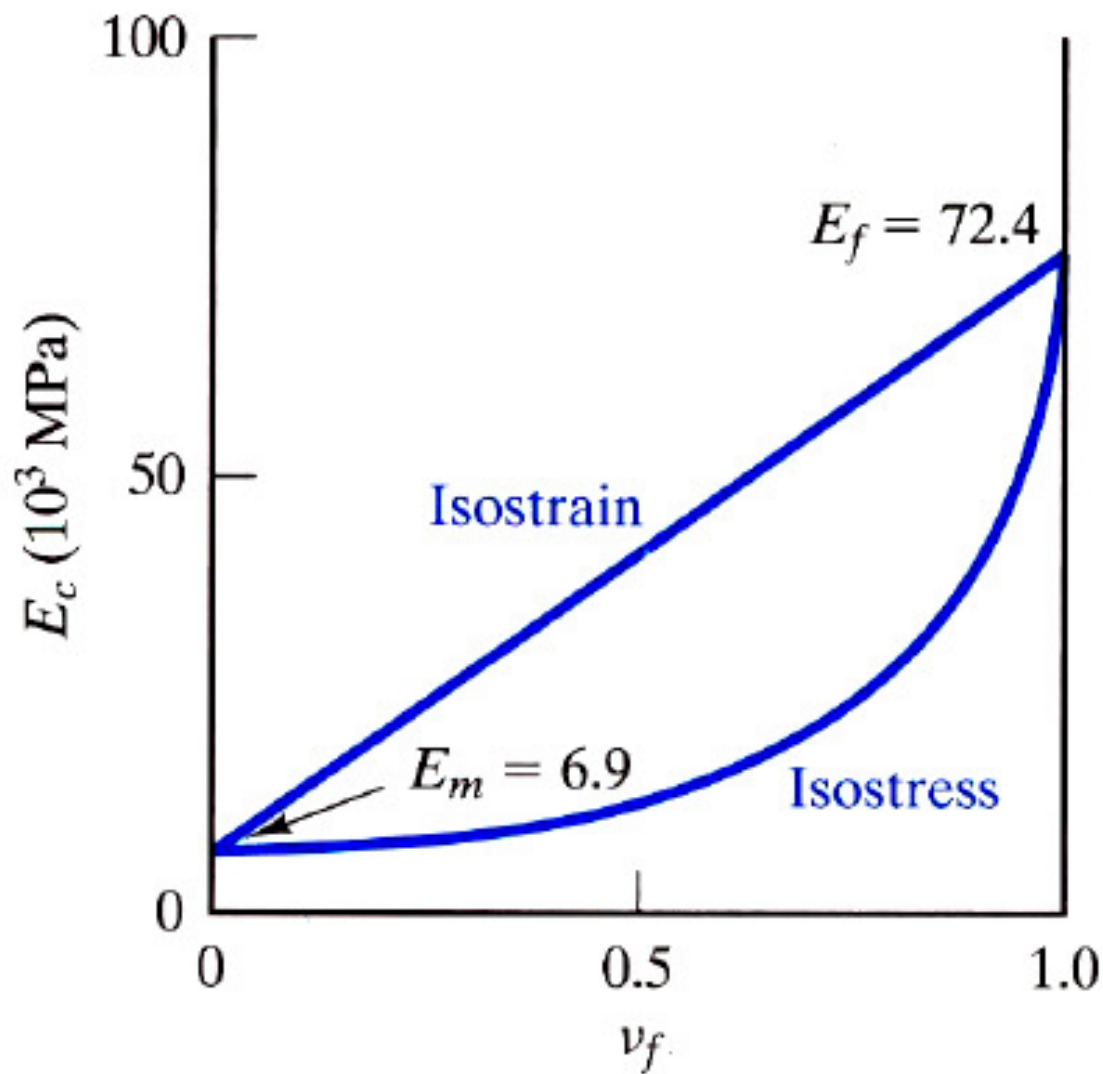
$$E_{\text{vidro-E}} = 72,4 \text{ GPa}$$

$$k_{\text{vidro-E}} = 0,97 \text{ W/m.K}$$

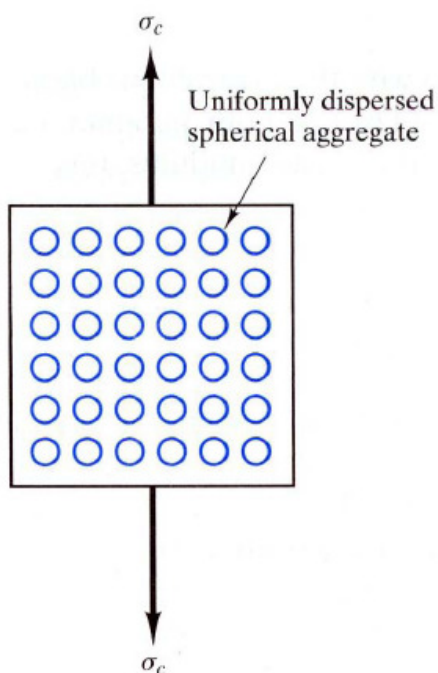
$$E_c = 15,1 \text{ GPa}$$

$$k_c = 0,34 \text{ W/m.K}$$





Carregamento compósito com particulado uniformemente distribuído



$$E_c^n = v_l E_l^n + v_h E_h^n$$

l – the low-modulus phase

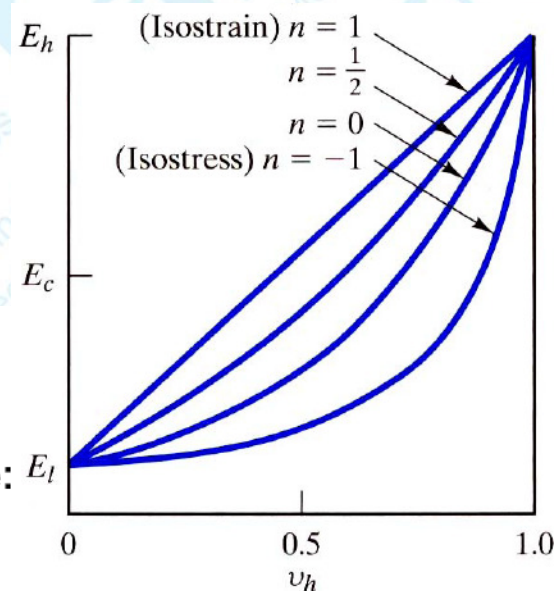
h – the high modulus phase

***n* = 1**, for the isostrain case, an extreme case: rubber balls in a steel matrix

***n* = -1**, for the isostress case, such as steel balls in a rubber matrix

***n* = 0**, a higher-modulus aggregate in a low-modulus matrix

***n* = 1/2**, a low-modulus aggregate in a higher-modulus matrix



Um compósito formado por 50 vol% de WC em matriz de cobalto tem módulo elástico igual a 366 GPa. Calcule o valor de n para que este compósito seja usado como ferramenta de corte.

$$E_{Co}=207 \text{ GPa}$$

$$E_{WC}=704 \text{ GPa}$$

$$n \sim 0$$



Table 1.4 Properties of Commonly Used Resins

Resins	Density ρ (kg/m ³)	Elastic Modulus E(Mpa)	Shear Modulus G(Mpa)	Poisson Ratio ν	Tensile Strength σ_{Ult} (Mpa)	Elongation E%	Coefficient of Thermal Expansion α (°C ⁻¹)	Coefficient of Thermal Conductivity λ (W/m°C)	Heat Capacity C(J/kg°C)	Useful Temperature Limit T_{max} (°C)	Price 1993 (\$/kg)
<i>Thermosets</i>											
Epoxy	1200	4500	1600	0.4	130	2 (100°C) 6 (200°C)	11×10^{-5}	0.2	1000	90 to 200	6 to 20
Phenolic	1300	3000	1100	0.4	70	2.5	1×10^{-5}	0.3	1000	120 to 200	
Polyester	1200	4000	1400	0.4	80	2.5	8×10^{-5}	0.2	1400	60 to 200	2.4
Polycarbonate	1200	2400		0.35	60		6×10^{-5}		1200	120	
Vinylester	1150	3300			75	4	5×10^{-5}			>100	4
Silicone	1100	2200		0.5	35					100 to 350	
Urethane	1100	700 to 7000			30	100				100	4
Polyimide	1400	4000 to 19,000	1100	0.35	70	1	8×10^{-5}	0.2	1000	250 to 300	
<i>Thermoplastics</i>											
Polypropylene (pp)	900	1200		0.4	30	20 to 400	9×10^{-5}		330	70 to 140	
Polyphenylene sulfone (pps)	1300	4000			65	100	5×10^{-5}			130 to 250	
Polyamide (pa)	1100	2000		0.35	70	200	8×10^{-5}		1200	170	6
Polyether sulfone (pes)	1350	3000			85	60	6×10^{-5}			180	25
Polyetherimide (pei)	1250	3500			105	60	6×10^{-5}	0.2		200	20
Polyether-ether-ketone (peek)	1300	4000			90	50	5×10^{-5}	0.3		140 to 250	96



Table 14.10 Mechanical Properties of Common Matrix Materials

Class	Example	E [MPa (ksi)]	T.S. [MPa (ksi)]	Flexural strength [MPa (ksi)]	Compressive strength (after 28 days) [MPa (ksi)]	Percent elongation at failure	K_{IC} (MPa $\sqrt{m}$)
Polymer ^a	Epoxy	6,900 (1,000)	69 (10)	—	—	0	0.3–0.5
	Polyester	6,900 (1,000)	28 (4)	—	—	0	—
Metal ^b	Al	$69 \times 10^3 (10 \times 10^3)$	76 (11)	—	—	—	—
	Cu	$115 \times 10^3 (17 \times 10^3)$	170 (25)	—	—	—	—
Ceramic ^c	Al ₂ O ₃	—	—	550 (80)	—	—	4–5
	SiC	—	—	500 (73)	—	—	4.0
	Si ₃ N ₄ (reaction bonded)	—	—	260 (38)	—	—	2–3
Portland cements ^d	Type I	—	2.4 (0.35)	—	24 (3.5)	—	—
	Type II	—	2.3 (0.33)	—	24 (3.5)	—	—
	Type III	—	2.6 (0.38)	—	21 (3.0)	—	—
	Type IV	—	2.1 (0.30)	—	14 (2.0)	—	—
	Type V	—	2.3 (0.33)	—	21 (3.0)	—	—

^aFrom Tables 6.8 and 8.3.

^bFor high-purity alloys with no significant cold working from *Metals Handbook*, 9th ed., Vol. 2, American Society for Metals, Metals Park, OH, 1979.

^cSource: Data from A. J. Klein, *Advanced Materials and Processes*, 2, 26 (1986).

^dSource: Data from R. Nicholls, *Composite Construction Materials Handbook*, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1976.



Table 14.11 *Mechanical Properties of Common Dispersed-Phase Materials*

Group	Dispersed phase	<i>E</i> [MPa (ksi)]	T.S. [MPa (ksi)]	Compressive strength [MPa (ksi)]	Percent elongation at failure
Glass fiber ^a	C-glass	$69 \times 10^3 (10 \times 10^3)$	3,100 (450)	—	4.5
	E-glass	$72.4 \times 10^3 (10.5 \times 10^3)$	3,400 (500)	—	4.8
	S-glass	$85.5 \times 10^3 (12.4 \times 10^3)$	4,800 (700)	—	5.6
Ceramic fiber ^a	C (graphite)	$340 - 380 \times 10^3 (49 - 55 \times 10^3)$	2,200–2,400 (320–350)	—	—
	SiC	$430 \times 10^3 (62 \times 10^3)$	2,400 (350)	—	—
Ceramic whisker ^a	Al ₂ O ₃	$430 \times 10^3 (62 \times 10^3)$	$21 \times 10^3 (3,000)$	—	—
Polymer fiber ^b	Kevlar ^c	$131 \times 10^3 (19 \times 10^3)$	3,800 (550)	—	2.8
Metal filament ^a	Boron	$410 \times 10^3 (60 \times 10^3)$	3,400 (500)	—	—
Concrete aggregate ^d	Crushed stone and sand	$34 - 69 \times 10^3 (5 - 10 \times 10^3)$	1.4–14 (0.2–2)	69–340 (10–50)	—

^a Source: Data from L. J. Broutman and R. H. Krock, Eds., *Modern Composite Materials*, Addison-Wesley Publishing Co., Inc., Reading, MA, 1967.

^b Source: Data from A. K. Dhingra, Du Pont Company.

^c Trade name, Du Pont.

^d Source: Data from R. Nicholls, *Composite Construction Materials Handbook*, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1976.



Table 14.12 Mechanical Properties of Common Composite Systems

Class	E [MPa (ksi)]	T.S. [MPa (ksi)]	Flexural strength [MPa (ksi)]	Compressive strength [MPa (ksi)]	Percent elongation at failure	K_{IC}^a (MPa $\sqrt{m}$)
Polymer-matrix						
E-glass (73.3 vol %) in epoxy (parallel loading of continuous fibers) ^b	56×10^3 (8.1×10^3)	1,640 (238)	—	—	2.9	42–60
Al ₂ O ₃ whiskers (14 vol %) in epoxy ^b	41×10^3 (6×10^3)	779 (113)	—	—	—	—
C (67 vol %) in epoxy (parallel loading) ^c	221×10^3 (32×10^3)	1,206 (175)	—	—	—	—
Kevlar ^d (82 vol %) in epoxy (parallel loading) ^c	86×10^3 (12×10^3)	1,517 (220)	—	—	—	—
B (70 vol %) in epoxy (parallel loading of continuous filaments) ^b	$210 - 280 \times 10^3$ ($30 - 40 \times 10^3$) ^c	1,400–2,100 (200–300) ^c	—	—	—	46
Metal matrix						
Al ₂ O ₃ (10 vol %) dispersion-strengthened aluminum ^b	—	330 (48)	—	—	—	—
W (50 vol %) in copper (parallel loading of continuous filaments) ^b	260×10^3 (38×10^3)	1,100 (160)	—	—	—	—
W particles (50 vol %) in copper ^b	190×10^3 (27×10^3)	380 (55)	—	—	—	—
Ceramic-matrix						
SiC whiskers in Al ₂ O ₃ ^c	—	—	800 (116)	—	—	8.7
SiC fibers in SiC ^e	—	—	750 (109)	—	—	25.0
SiC whiskers in reaction-bonded Si ₃ N ₄ ^e	—	—	900 (131)	—	—	20.0
Wood						
Douglas fir, kiln-dried at 12% moisture (loaded parallel to grain) ^d	13.4×10^3 (1.95×10^3) ^f	85.5 (12.4) ^f	—	49.9 (7.24)	—	11–13
Douglas fir, kiln-dried at 12% moisture (loaded perpendicular to grain) ^d	—	—	—	5.5 (0.80)	—	0.5–1
Concrete						
Standard concrete, water/cement ratio of 4 (after 28 days) ^g	—	—	—	41 (6.0)	—	0.2
Standard concrete, water/cement ratio of 4 (after 28 days) with air entrainer ^g	—	—	—	33 (4.8)	—	—



Table 14.13 *Specific Strengths (Strength/Density)*

Group	Material	Specific strength [mm (in.)]
Noncomposites	1040 steel ^a	$9.9 \times 10^6 (0.39 \times 10^6)$
	2048 plate aluminum ^a	$16.9 \times 10^6 (0.67 \times 10^6)$
	Ti–5Al–2.5Sn ^a	$19.7 \times 10^6 (0.78 \times 10^6)$
	Epoxy ^b	$6.4 \times 10^6 (0.25 \times 10^6)$
Composites	E-glass (73.3 vol %) in epoxy (parallel loading of continuous fibers) ^c	$77.2 \times 10^6 (3.04 \times 10^6)$
	Al ₂ O ₃ whiskers (14 vol %) in epoxy ^c	$48.8 \times 10^6 (1.92 \times 10^6)$
	C (67 vol %) in epoxy (parallel loading) ^d	$76.9 \times 10^6 (3.03 \times 10^6)$
	Kevlar ^e (82 vol %) in epoxy (parallel loading) ^d	$112 \times 10^6 (4.42 \times 10^6)$
	Douglas fir, kiln-dried to 12% moisture (loaded in bending) ^c	$18.3 \times 10^6 (0.72 \times 10^6)$



Deseja-se fabricar um implante com mesmo módulo elástico do osso cortical (17-25 GPa), quanto devo adicionar de micro fibra de biovidro no acrílico para obtê-lo? E se o acrílico for poroso a 60 vol%?



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

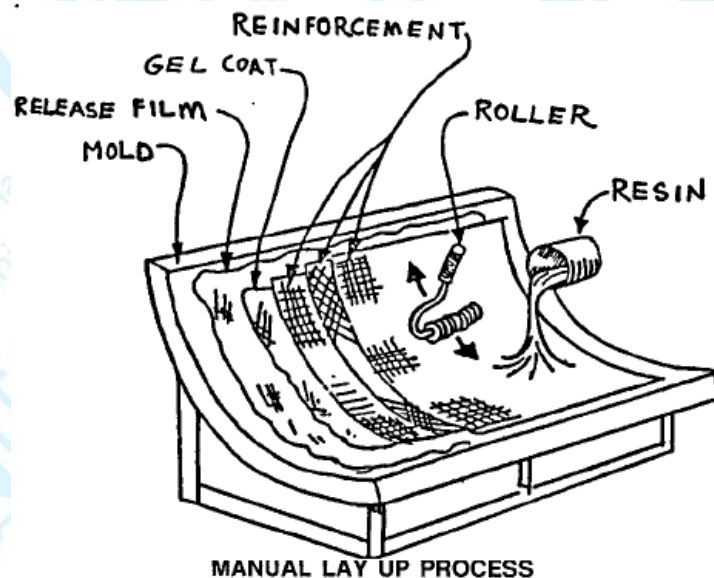
Processamento termoplástico

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





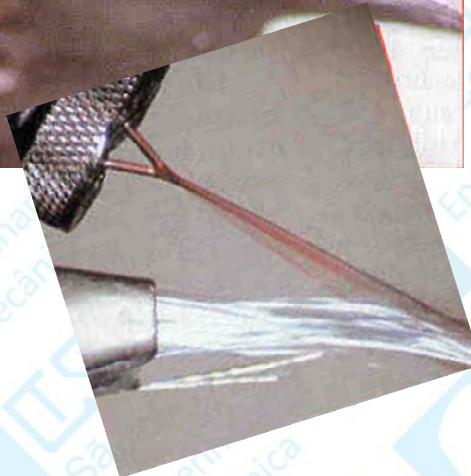
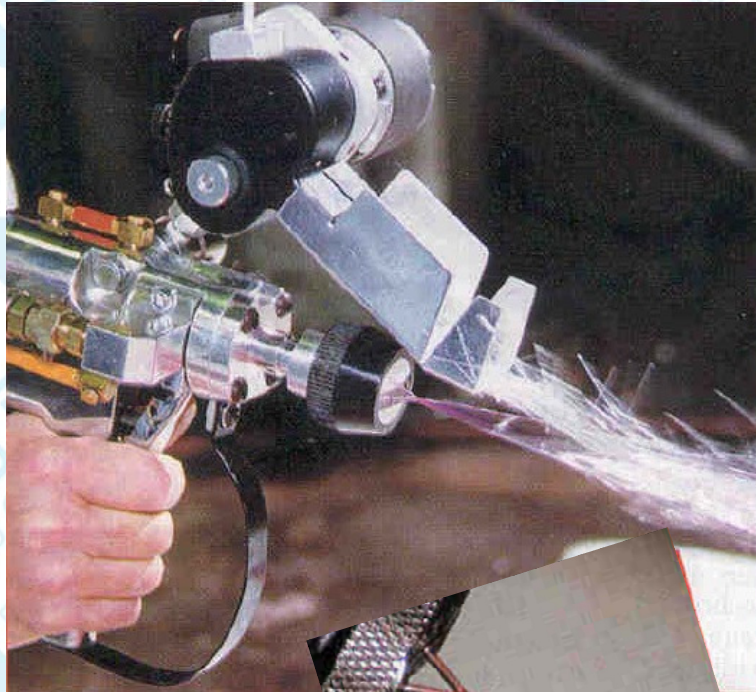
Foto: Edson Lopes Jr./Terra



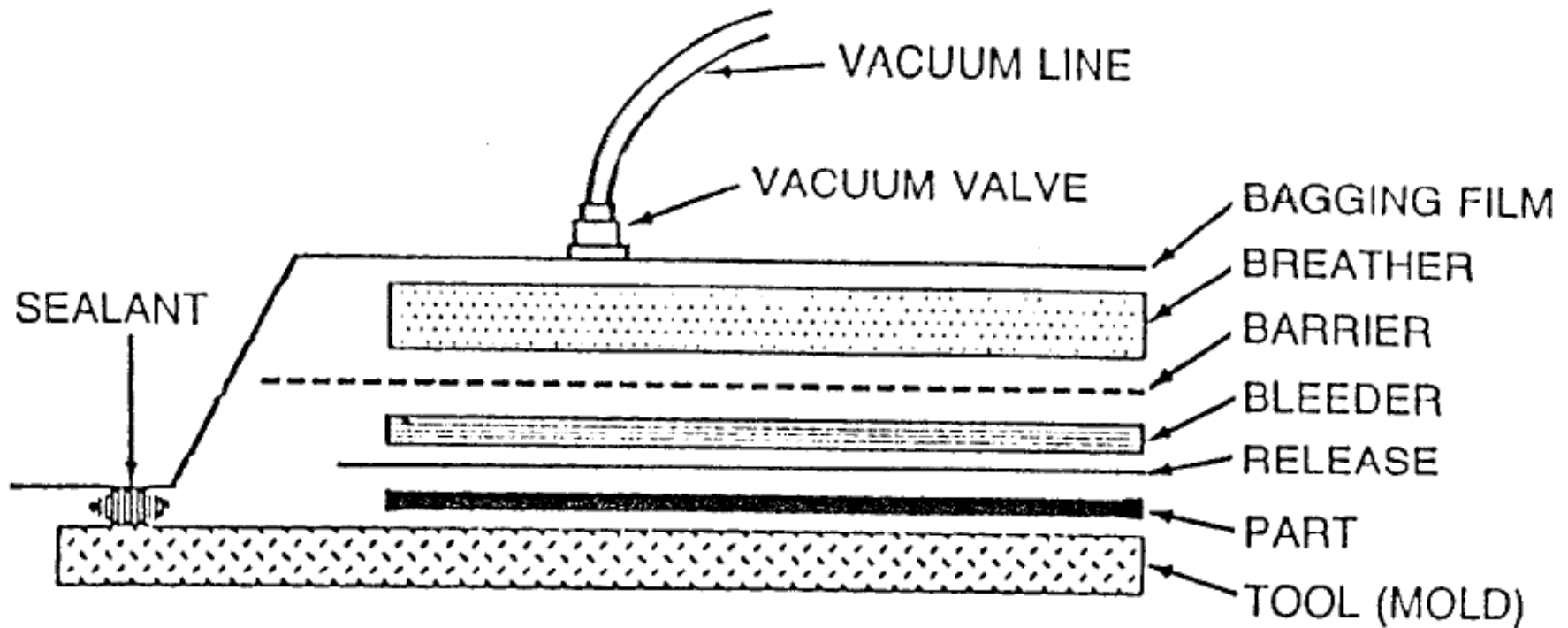




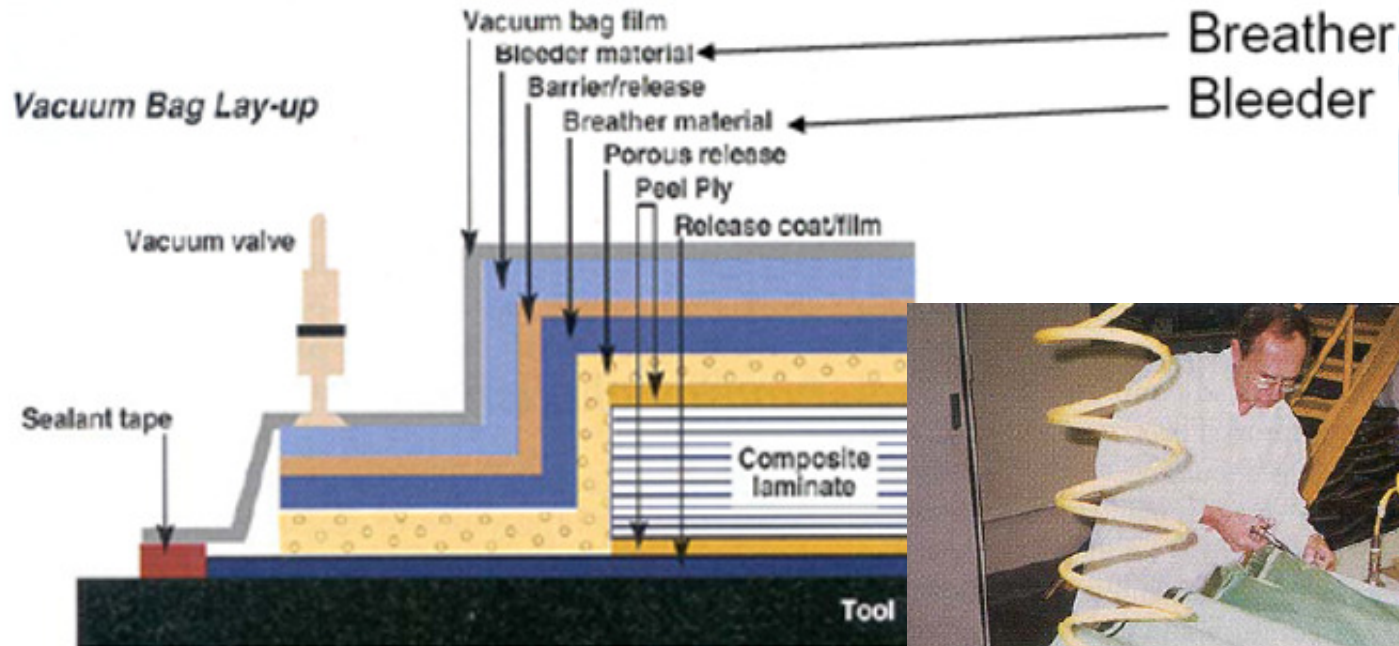
Hand spray-up



Vaccum bag assembly



VACCUM BAG



Lay-up

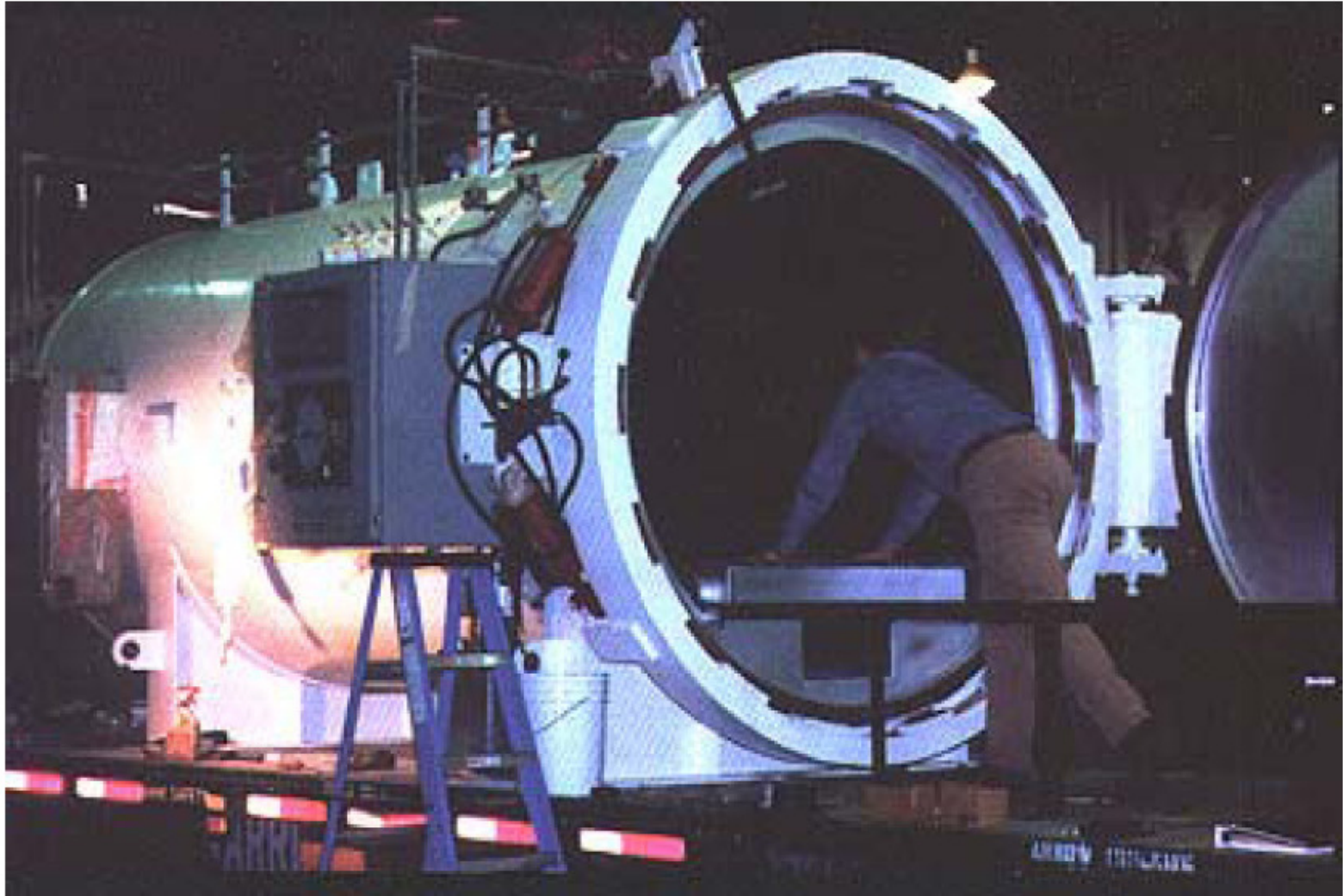


Material on stiffening structure

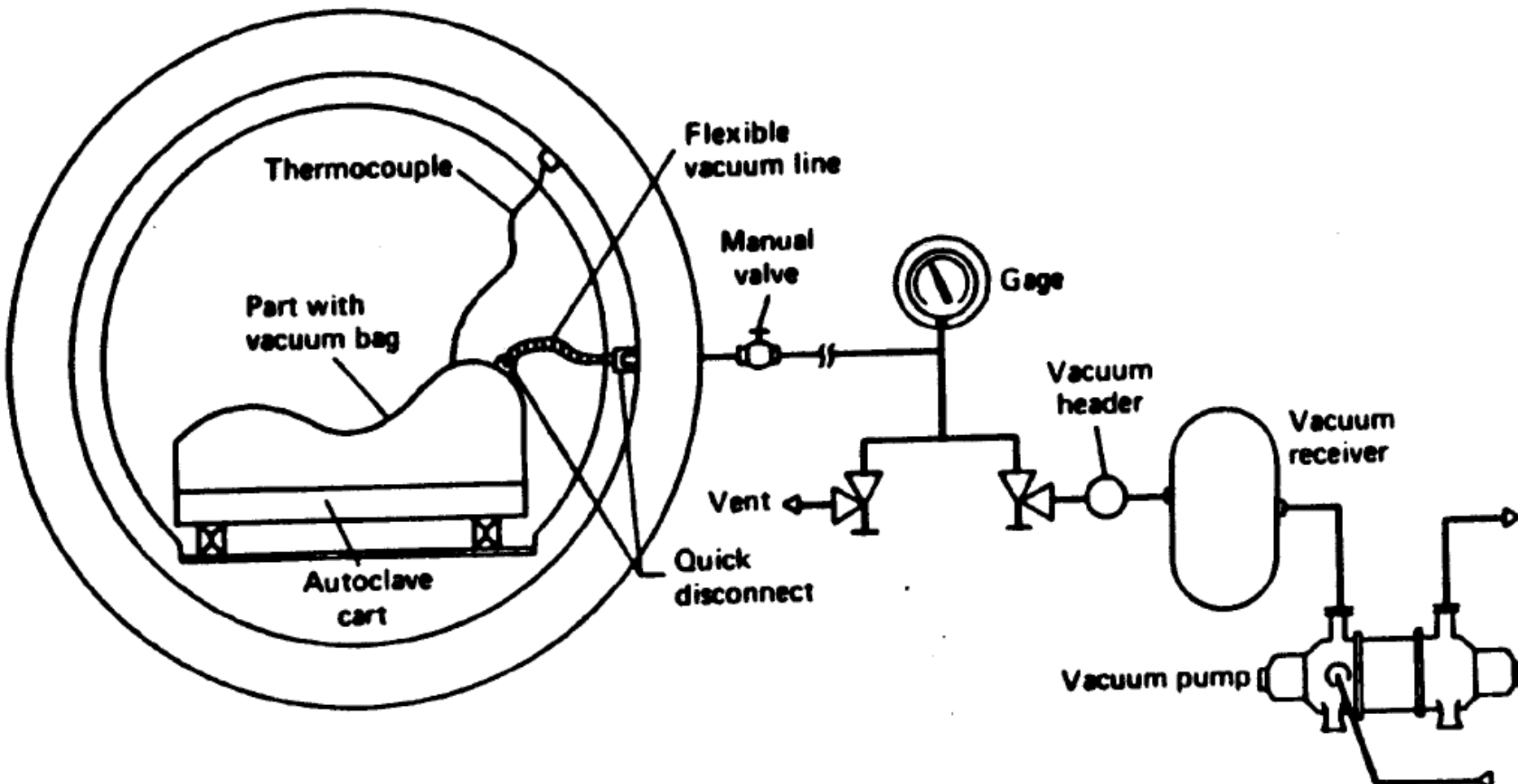
Vacuum bag and fittings attached



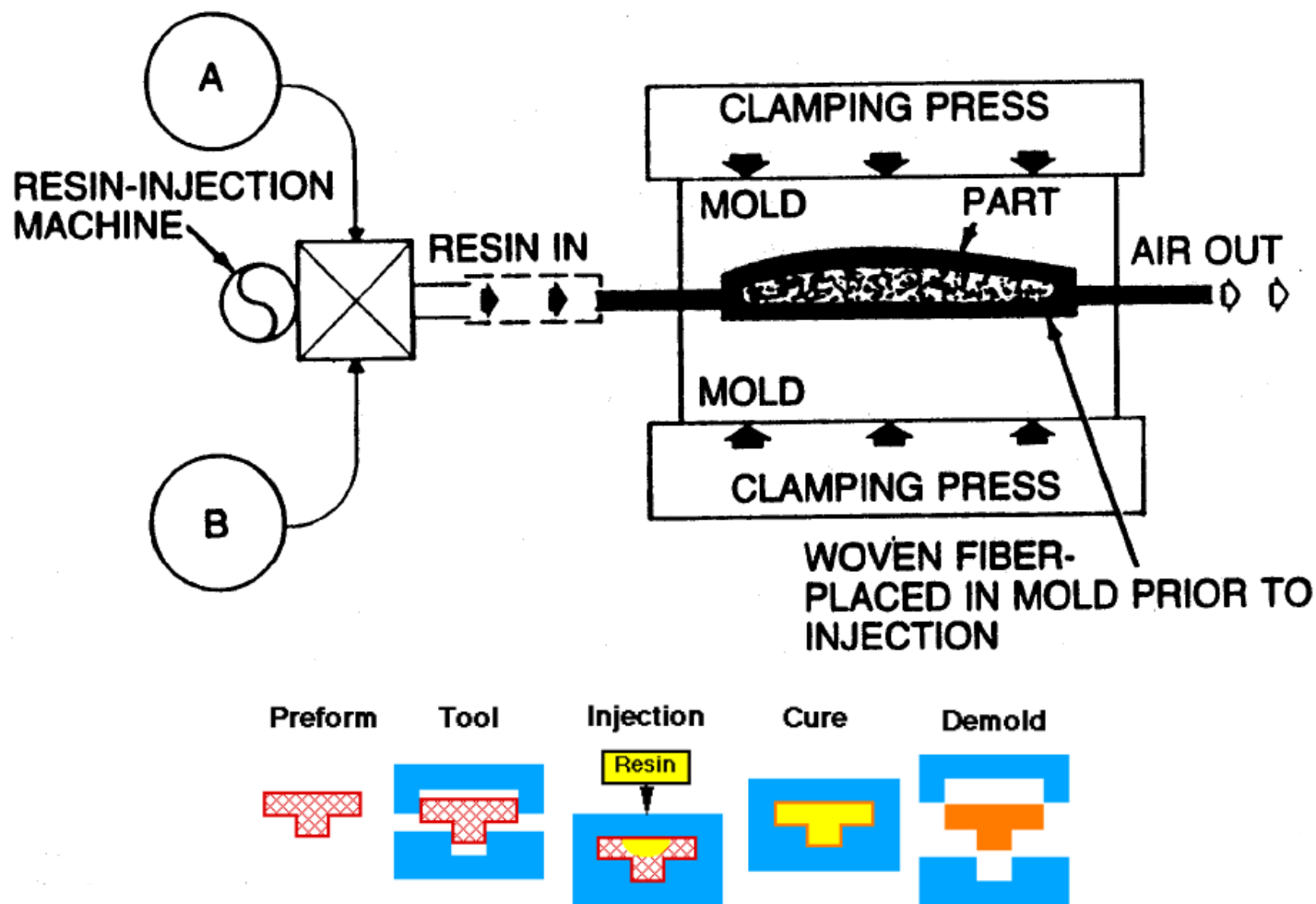
Autoclave



Autoclave



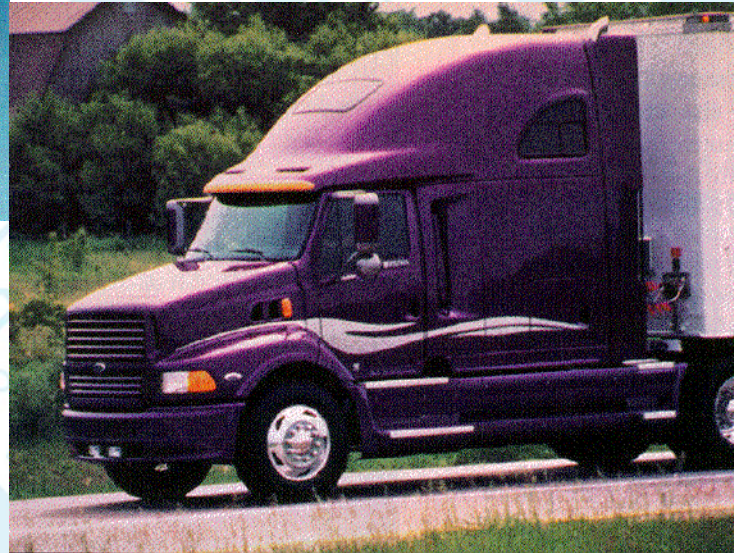
Moldagem por transferência de resina (RTM)



RTM aplicações

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





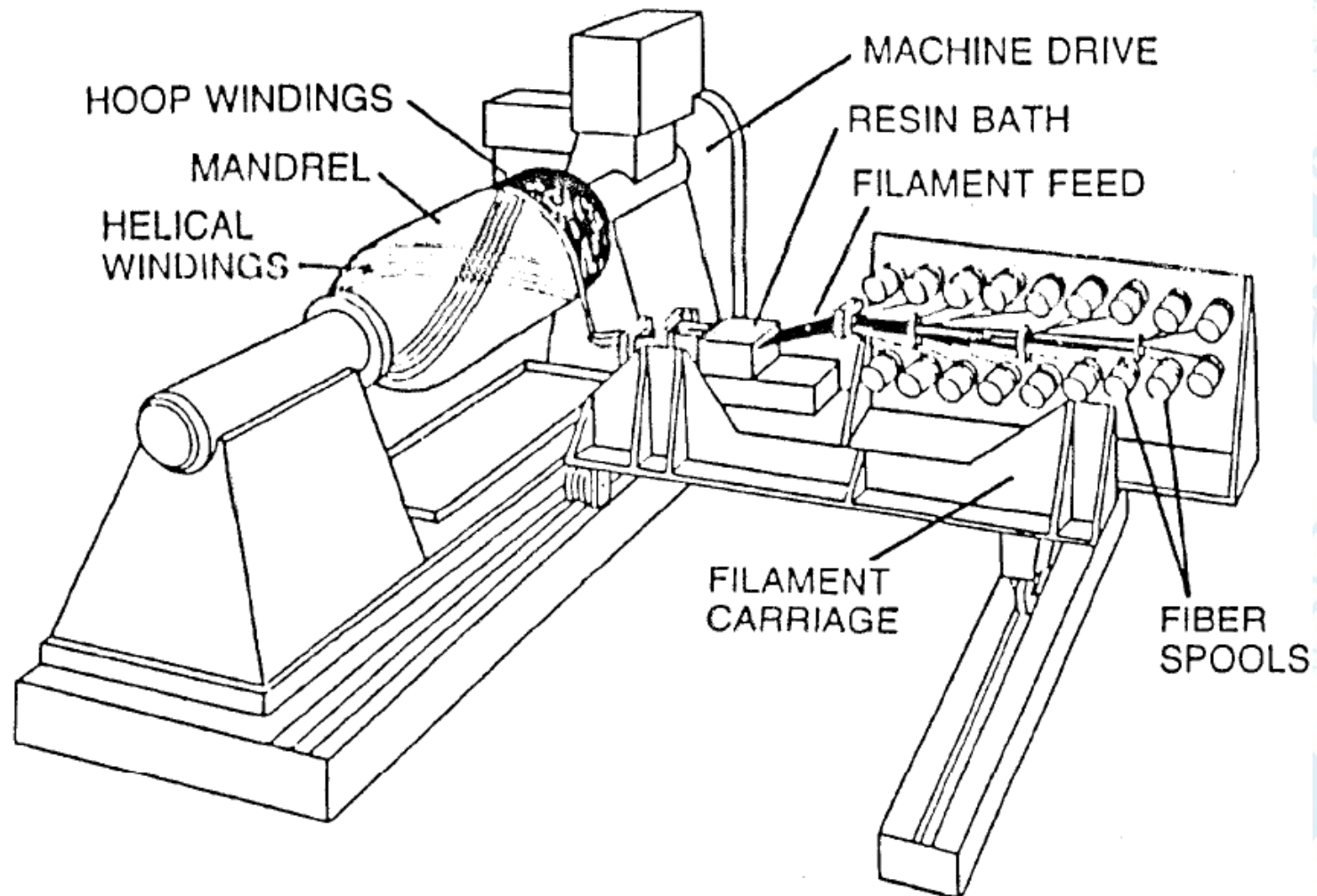
Filament Winding

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.

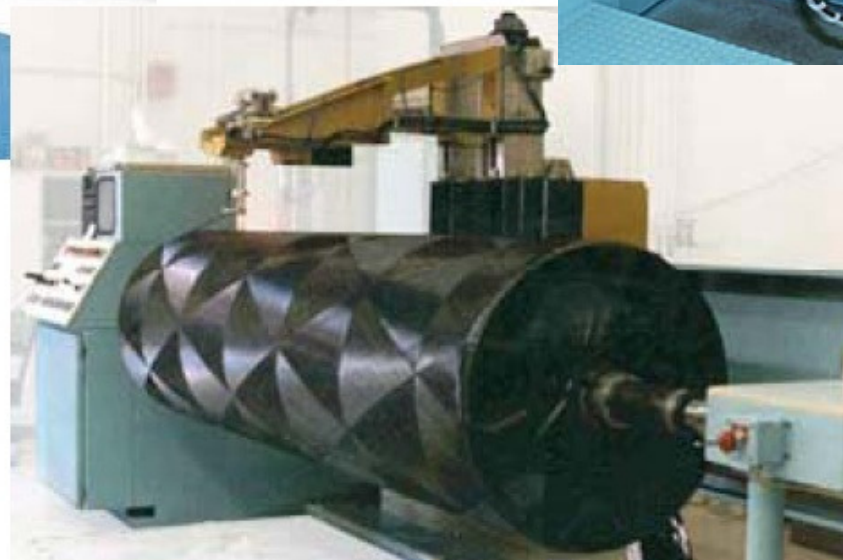
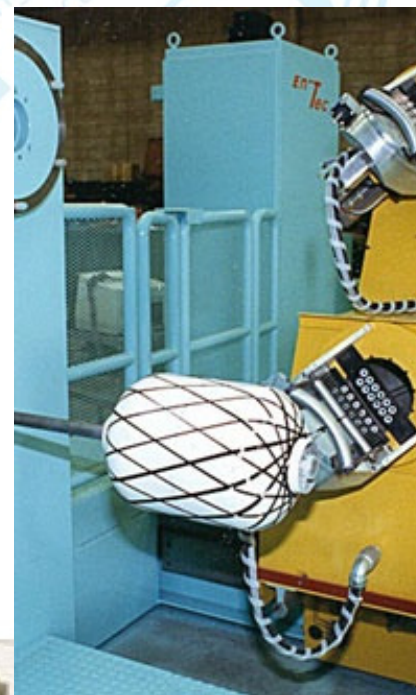
Uma máquina *filament winding* pode ser tão simples quanto um eixo de movimento ou tão complicado quanto cinco ou mais eixos de movimentos na criação de padrões precisos para produtos de alto desempenho.

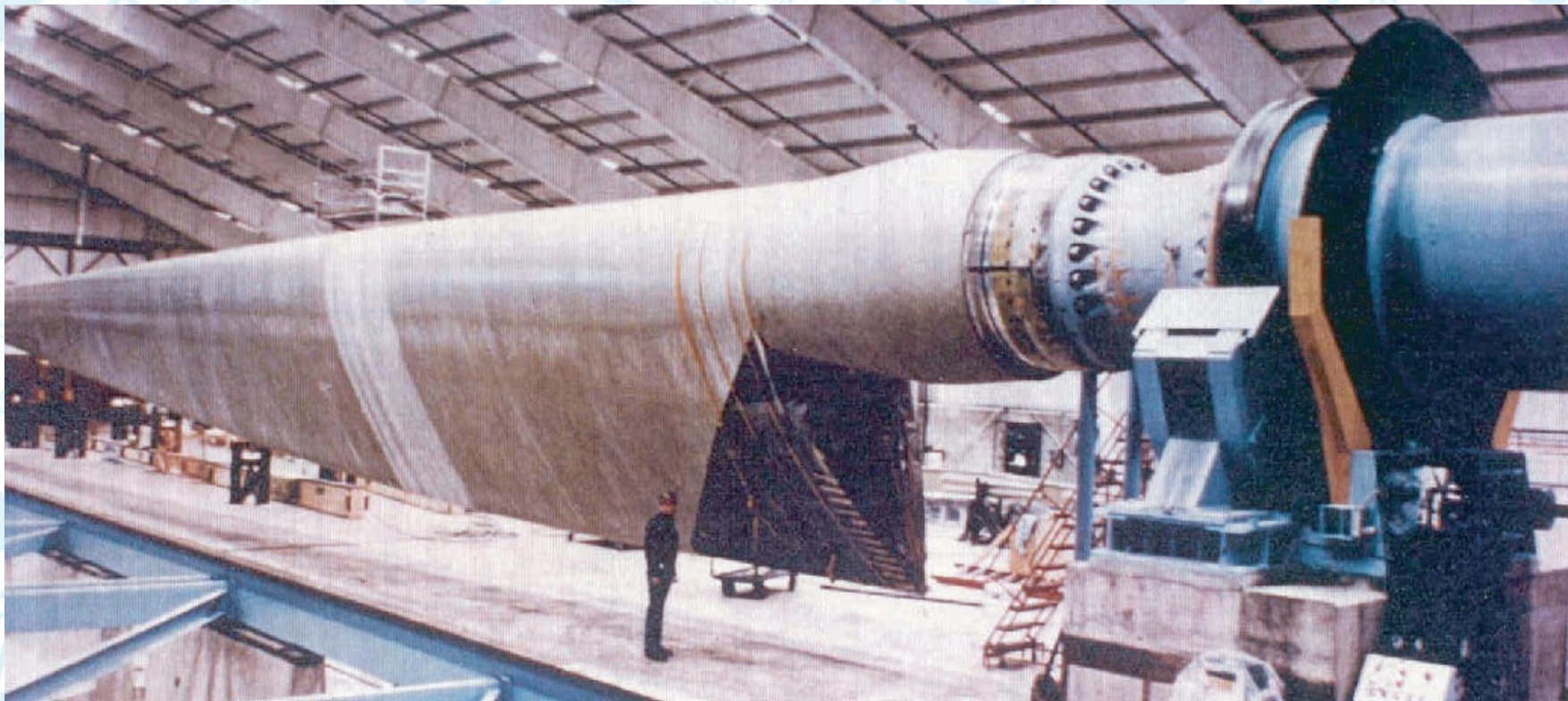


Filament Winding



Filament windign - equipamentos





Entec Composite Machines, Inc.

Materiais de Engenharia (SEM 5908) - ROLLO, J.M.D.de A, FORTULAN, C.A. (2015)



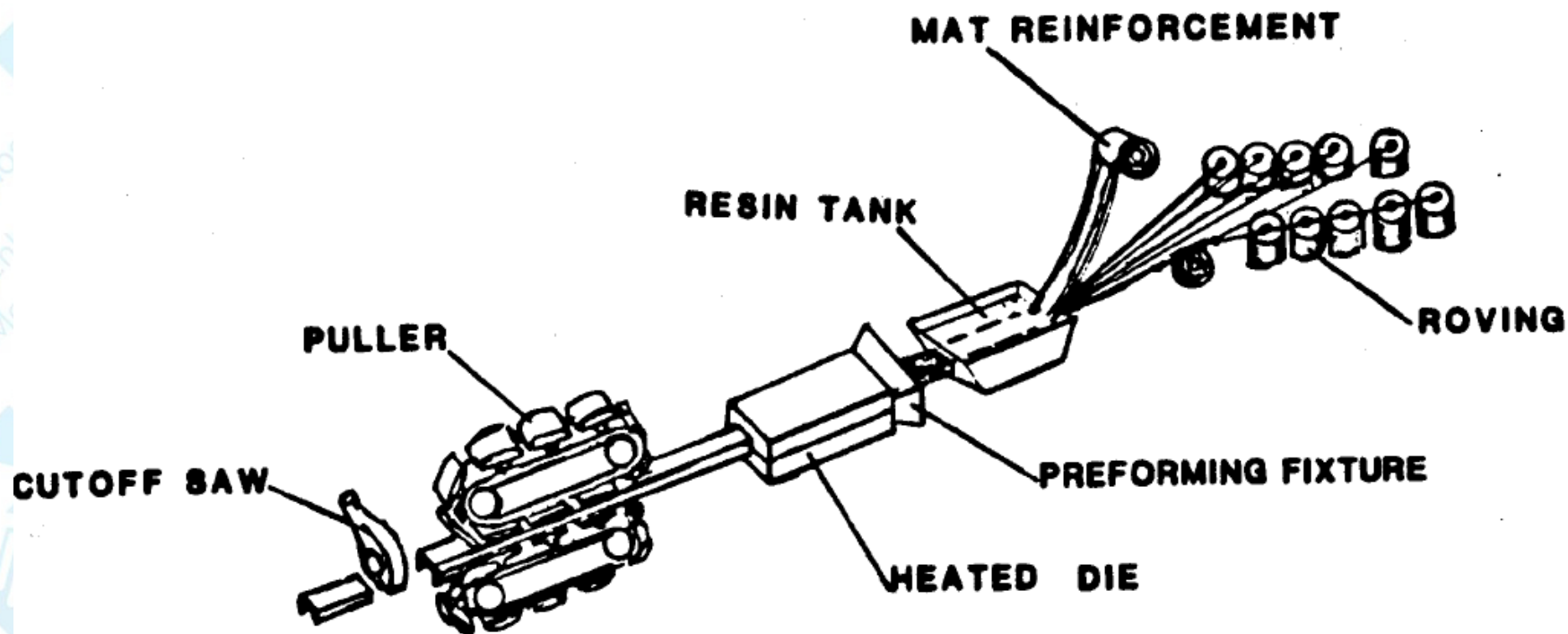
Pultrusão

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.

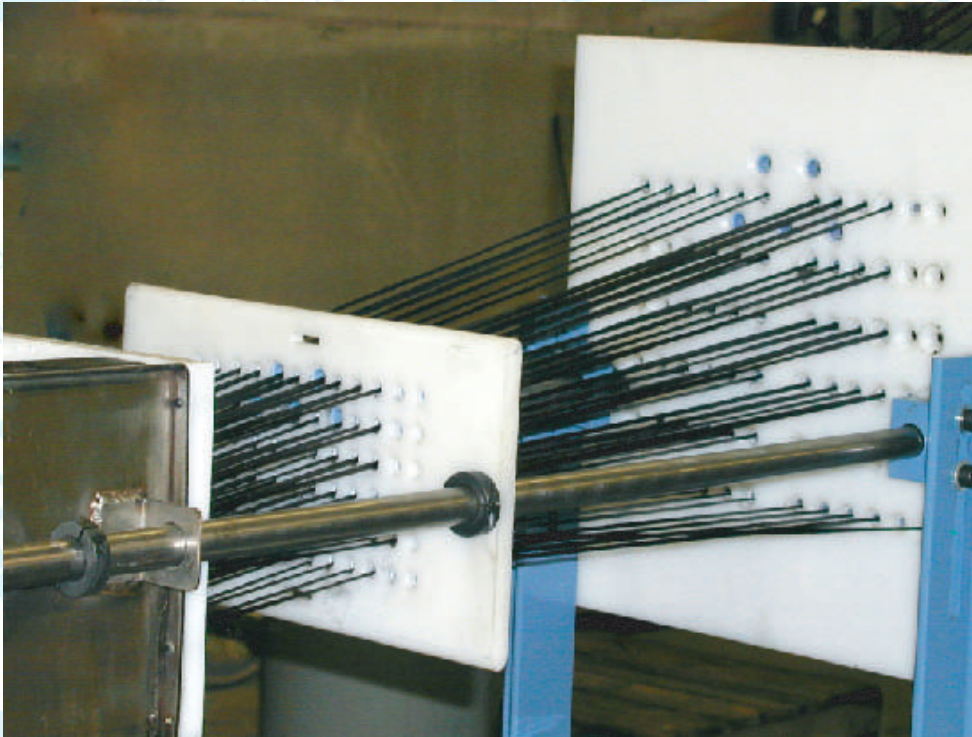
O processo se assemelha ao de extrusão, porém os materiais são puxados ao invés de empurrados.



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°) e transversal (90°), 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).



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 - Pesar a 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.



Testes de Flexão:

ASTM D790-96a.

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

O “*span*” e a sequencia 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.

