

Parte I

**Projeto de Compostos e
Estruturas-sanduiche**

Capítulo 1

Tipos e propriedades de compostos, fibras e matrizes

Este capítulo dedica-se a uma série de aspectos qualitativos referentes aos materiais compostos. Uma razoável familiaridade com esses aspectos é fundamental antes que se passe às formulações matemáticas que serão objeto de diversos dos demais capítulos. Basicamente, serão considerados aqui aspectos como tipos de compostos existentes, características dos compostos reforçados por fibras de alto desempenho, características e propriedades das fibras e de diversos tipos de polímeros usados como matrizes e, finalmente, características de alguns processos de fabricação de compostos.

1.1 Definição e tipos de material composto

Inicialmente é importante contar com uma definição formal do que se entende por *materiais compostos*. Consideramos que:

Um material composto é um conjunto de dois ou mais materiais diferentes, combinados em escala macroscópica, para funcionarem como uma unidade, visando obter um conjunto de propriedades que nenhum dos componentes individualmente apresenta.

Todos os termos da definição são de fácil compreensão, mas um deles merece cuidado especial, que é o de especificar que os componentes aparecem em escala macroscópica no composto. Isso para distingui-lo das ligas, por exemplo, nas quais também são combinados diferentes materiais, como o ferro e manganês no aço, mas em escala atômica. Nos compostos, a escala de dimensões das inclusões é tipicamente da ordem de um micrometro ou maior.

O conceito de material composto é uma ferramenta filosófica poderosa no sentido de que ele permite ao engenheiro, até certo ponto, *criar* um novo material, enfatizando certas características desejáveis, enquanto minimiza outras indesejáveis, por meio da combinação de componentes. Uma gama bastante ampla de aspectos de comportamento do material pode ser manipulada no projeto de um composto, e efetivamente é, como por exemplo:

- Resistência estática e à fadiga;
- Rigidez;
- Resistência à corrosão;
- Resistência à abrasão;
- Redução de peso;
- Capacidade de trabalho a alta e baixa temperatura;
- Isolamento ou condutividade térmica, elétrica ou acústica;
- Dureza, ductilidade;
- Aparência estética.

Note que, embora o desenvolvimento e uso de materiais compostos seja considerado um evento recente, do século XX, a ideia de combinar intimamente diferentes tipos de materiais é aparentemente

tão antiga quanto a civilização. Como relatado no livro do Êxodo, já os egípcios antigos, do segundo milênio antes de Cristo, embora utilizassem pedra para a construção dos monumentos que deveriam desafiar o tempo, usavam em todas as demais construções urbanas um tipo de tijolo construído por barro reforçado por palha vegetal picotada. Observe que aqui temos todos os ingredientes dos modernos compostos: o barro, o material barato, fácil de produzir, de moldar, porém de características mecânicas pobres, e a palha, o material fibroso mas resistente, encarregado de manter o barro agregado e de adicionar resistência a ele.

Mais recentemente, os **pneus** automobilísticos se constituíram num componente de material composto, embora não usualmente visualizados como tal. Lembremos que, nas primeiras décadas de desenvolvimento dos automóveis, as rodas eram como as das carruagens, de madeira. O pneu moderno combina diferentes tipos de materiais, de forma a apresentar uma série de propriedades desejáveis: aderência ao solo por atrito, flexibilidade, baixo peso (para minimizar o momento de inércia rotacional), resistência à tração. Isso é conseguido com a combinação de ar pressurizado, borracha na superfície de contato, fibras sintéticas e arames de aço estrategicamente orientados na carcaça.

Uma das classes mais abrangentes e clássicas de compostos é sem dúvida o **concreto armado**. Estão presentes o concreto propriamente dito, constituído pela mistura de cimento, areia e água, a brita e o reforço de aço. O cimento e a brita são as parcelas de alto volume relativo no composto, são frágeis e apresentam baixos valores de propriedades mecânicas à tração, embora tenham bom comportamento à compressão. Já a fase de aço contribui no desempenho do composto com sua alta capacidade de carga e sua ductibilidade. O resultado da junção dos três componentes é conhecido: versatilidade de formas construtivas, baixo custo relativo, resistência a intempéries, alta durabilidade, baixo custo de manutenção, facilidade construtiva. Algumas desvantagens estão também presentes, dentre as mais notáveis, o alto peso específico e aparência estética relativamente ruim. Com tudo isso, este livro não abordará o cálculo de estruturas de concreto. Toda uma área da engenharia civil dedica-se ao desenvolvimento de processos de cálculo para concreto já a mais de um século, de forma que toda a experiência acumulada pode ser obtida em material específico.

O objeto deste livro, entretanto, é estudar o que se convencionou chamar de **materiais compostos modernos** ou **compostos de plásticos reforçados por fibras de alta resistência**. As teorias descritas têm aplicação geral na descrição do comportamento mecânico da maioria dos compostos, quer sejam de fibra-polímero, fibra-metal, metal-metal, cerâmica-metal ou outros. A Figura 1.1 ilustra alguns elementos típicos dos compostos reforçados por fibras.

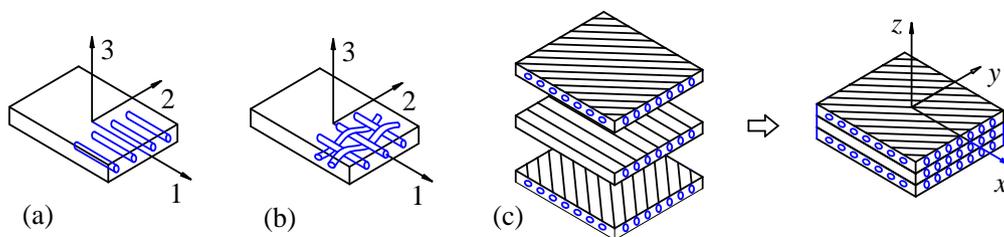


Figura 1.1: Tipos de lâminas: (a) lâmina com fibras unidirecionais; (b) lâmina com fibras tecidas; (c) laminado composto por várias lâminas orientadas em diferentes direções.

As Figuras 1.1a e b ilustram **lâminas** compostas por uma **matriz**, geralmente um **plástico**, reforçada por fibras de alto desempenho, tais como as fibras de vidro, carbono ou kevlar. Lâminas reforçadas por fibras possuem boas propriedades mecânicas apenas nas suas direções preferenciais. Dessa forma, geralmente as lâminas são combinadas em **laminados**, como na Figura 1.1c, de forma a desenvolver características em outras direções, conforme as necessidades impostas pelo carregamento determinado na etapa de projeto. Os laminados tanto podem ser planos, em forma de placas, quanto curvos, formando cascas. Os compostos podem ainda ser conformados como corpos tridimensionais.

Os compostos ilustrados na Figura 1.1 se enquadram na categoria de compostos reforçados por fibras, mas essa não é a única categoria existente. De forma geral, existem os seguintes tipos de compostos:

Compostos reforçados por fibras. As fibras podem ser contínuas, longas, ou curtas, na faixa de 5 mm a 25 mm de comprimento. Quanto à sua disposição, elas podem ser paralelas, unidirecionais como na Figura 1.1a, ou bidirecionais, em forma de tecido como na Figura 1.1b, ou ainda podem ser aleatoriamente orientadas como uma nuvem, quer de fibras contínuas, quer de picotadas.

Compostos reforçados por partículas ou compostos particulados. A partícula não possui uma dimensão predominante como as fibras e geralmente sua presença não é tão efetiva no incremento da resistência da matriz. A presença de partículas muito rígidas em matriz frágil pode de fato reduzir sua resistência em virtude da concentração de tensões no material da matriz adjacente. Entretanto, o uso de partículas visa ao incremento de outras propriedades, como:

- Condutividade ou isolamento térmico e elétrico;
- Resistência a altas temperaturas;
- Redução de atrito;
- Resistência ao desgaste superficial;
- Melhoria de usinabilidade;
- Aumento de dureza superficial;
- Redução de custos.

Por exemplo, partículas de materiais frágeis, como tungstênio, cromo e molibdênio, são incorporadas em metais dúcteis para melhorar sua capacidade de trabalho em alta temperatura enquanto mantêm algo de sua ductilidade em temperatura ambiente.

Outros tipos são os compostos de partículas de carbeto de tungstênio em matriz de cobalto, usados em ferramentas de corte e em partes de válvulas, onde se necessita alta dureza superficial. Também o carbeto de titânio em matriz de níquel ou cobalto é adequado a aplicações de alta temperatura, como bicos de tochas, partes de turbinas e termopares.

Outros tipos de compostos. Alguns outros tipos de compostos podem ser citados. Por exemplo, a **madeira**, por si, pode ser considerada um material composto natural, que apresenta uma variedade enorme de tipos e características mecânicas. Seus constituintes são a resina de linino reforçada pelas fibras longitudinais de celulose. A **balsa**, por exemplo, tem sido usada desde o início do século XX até os dias de hoje na construção de painéis estruturais de aviões.

Flocos de mica. Têm sido usados há décadas como isolamento elétrico. Ao longo do texto, diversos outros tipos de compostos serão comentados.

Neste capítulo, é apresentado um sumário sobre propriedades e aspectos qualitativos dos principais materiais usados para compor os materiais compostos modernos, os usos e processos de fabricação. Mais informações podem ser obtidas na literatura como em [41], [57], [59], [105], [73], [131], [167] e [211].

1.1.1 Compostos reforçados por fibras

No caso de componentes estruturais, as principais **propriedades mecânicas** do material são:

- Rigidez
- Resistência (ruptura, fadiga etc.)
- Peso específico.

Uma das razões para o uso de fibras como reforço consiste no fato conhecido experimentalmente de que a resistência e rigidez de um material, quando em forma de fibra, são algumas ordens de magnitude maiores que os valores obtidos para o mesmo material em bloco. Por exemplo, um vidro comum como o da janela apresenta valores de resistência à ruptura na faixa de 0,7 GPa. Já em forma de fibras, a resistência vai a 3,5 GPa ou até a 4,6 GPa, dependendo do tipo da fibra. As Tabelas 1.1 e 1.2 listam valores típicos de propriedades de materiais em forma de fibra, enquanto a Tabela 1.3 apresenta valores para materiais em bloco.

Aparentemente, esse fenômeno foi primeiro demonstrado por Griffith [79]. Em 1920, ele mediu a resistência de barras de vidro e identificou que a resistência crescia com a redução da espessura da

Tabela 1.1: Propriedades mecânicas típicas de alguns materiais em forma de fibra.

Propriedade	Fibras						
	vidro-E	vidro-S	grafite			kevlar	
			raiom	<i>pitch</i>	PAN	29	49
Densidade ρ_f	2540	2490	1700	2160	1770(1)	1440	1470
Resistência à tração σ_{Rf} a 22°C	3450	2600	2070- 2700	2241	5033(1)	2750	3792
Resistência à tração σ_{Rf} a 540°C	1720	2400					
Tensão de escoamento a 540°C	830	1900					
Resistência específica σ_{Rf}/ρ_f , 10 ⁶ Nm/kg	1,36	1,85	1,22- 1,59	1,04	1,39- 1,72	1,91	2,5
Módulo de elasticidade E_f a 22°C	72,4	85,5	400- 550	690	290(1)	62	131
Módulo específico E_f/ρ_f , 10 ⁶ Nm/kg	28,5	34,3	235- 324	319	111- 194	43,1	96,1
Elongamento elástico a 22°C, %	4,8	5,4	0,4- 0,7	0,3	0,7- 1,2	4,4	2,9
Elongamento à ruptura a 22°C, %	4,8	5,4	0,4- 0,7		0,7- 1,2	4,4	2,9
Diâmetro da fibra d_f , μm	3-20	8-13	6,5		7,5	12	12
Temp. de fusão	845	860	3000	3000	3000	-	-
Temp. de trabalho	550	650	2500		2000	150	150
Calor específico kJ/N/°C	0192 (2)	0,176 (2)	0,36 (3)		0,36 (3)		
Coef. dilat. térmica							
axial α_{af}	5,0	2,9			-0,7 a -0,5	-2,0	-2,0
radial α_{rf}	5,0	2,9			7,0 a 10,0	60,0	60,0

Para projeto, usar dados de fabricantes ou experimentais. Tensões em MPa, módulos de elasticidade em GPa, coeficiente de dilatação térmica em 10⁻⁶/°C, temperaturas em °C. (1) Marca comercial Amoco, tipo T-650/42. (2) Valor a 22°C. (3) Valor médio entre 22°C e 1480°C.

fibra: com uma espessura de 0,1 mm, o corpo de provas já apresentava uma resistência quase tão baixa quanto o vidro em bloco. Análise desses resultados foi feita por Gordon [76].

Tabela 1.2: Propriedades mecânicas típicas de alguns materiais em forma de fibra.

Propriedade	Fibras						
	boro (1)		asbestos		carbeto de	aços	alumínio
	$\phi 100$	$\phi 200$	crisolite	<i>amfibole</i>	silício (2)		
Densidade ρ_f	2610	2390	2500	3300	3040	7800	2680
Resistência à tração σ_{Rf} a 22°C	3516 (3)	2540- 3800	5500	4100	3450	4100	620
Resistência específica $\sigma_{Rf}/\rho_f, 10^6$	0,97- 1,46	1,06- 1,60	2,2	1,24	1,113	0,53	0,23
Módulo de elasticidade E_f a 22°C	385- (400)(3)	385- 445	160	190	427	207	73
Módulo específico $E_f/\rho_f, 10^6$	148- 170	160- 186	64	57,6	140	26,5	27,2
Elongamento elástico a 22°C, %	0,57- 1,0	0,57- 1,0				2,0	0,85
Elongamento ruptura a 22°C, %	0,57- 1,0	0,57- 1,0				35	40
Diâmetro da fibra $d_f, \mu\text{m}$	100	200	0,02	0,02	140	1-2	150
Temperatura de fusão	2040	2040					
Temperatura de trabalho	700	700	500	300	900	850	400
Coef. dilatação térmica							
axial α_{af}	4,9	4,9	9,2	9,2		11,7	6,1-6,8
radial α_{rf}	4,9	4,9	9,2	9,2		11,7	6,1-6,8

Para projeto, usar dados de fabricantes ou experimentais. Tensões em MPa, módulos de elasticidade em GPa, coeficiente de dilatação térmica em $10^{-6}/^\circ\text{C}$, temperaturas em $^\circ\text{C}$.

(1) Notação: boro $\phi 100$ e $\phi 200$ se referem ao valor do diâmetro da fibra, em μm .

(2) Produzido pelo método CVD da empresa AVCO Specialtry Materials Co., ou da Textron.

(3) Marca Textron.

Os altos valores de resistência observados para as fibras se aproximam dos valores teóricos, sendo a discrepância entre os valores de fibras e em bloco explicada pela presença de imperfeições ou falhas no material. Um bloco de material possui uma população de trincas inerentes ao processo de fabricação. Já uma fibra de vidro, por exemplo, é fabricada com diâmetros na faixa de 0,010 mm. Esse diâmetro diminuto torna inviável o desenvolvimento excessivo de trincas durante a fabricação. Isso explicaria os altos valores de resistência das fibras comparados aos dos materiais em bloco. Também, em virtude do próprio processo de fabricação, a estrutura da fibra tende a ser muito mais bem organizada, mesmo nos casos não-cristalinos, que o mesmo material em bloco.

Note que, apesar das propriedades fantásticas que apresentam, as fibras geralmente não podem ser usadas sozinhas. Um feixe de fibras apenas pode suportar forças trativas longitudinais. Para suportar cargas compressivas longitudinais, quaisquer forças transversais ao eixo, ou cargas cisalhantes, torna-se necessário que as fibras sejam embebidas em uma matriz. Como exceção à regra, conhece-se pelo menos uma classe de situações em engenharia em que se usam fibras praticamente puras: obviamente naqueles casos em que a carga é declaradamente uniaxial e trativa. Exemplo são as pontes pênses e estaiadas, em que tradicionalmente eram usados feixes de cabos de aços torcidos, posteriormente feixes de arames de aço em paralelo e, modernamente, feixes de fibras de vidro ou carbono protegidos

Tabela 1.3: Propriedades mecânicas típicas de alguns materiais em bloco.

Propriedade	Materiais em bloco					
	concretos (a, b)	aços	alumínio	tungstênio	berílio	vidro
Densidade ρ_f , kg/m ³	2408	7800	2710	19300	1830	2500
Resistência à tração σ_{Rf} a 22°C, MPa	21,(c) 35	300- 2000	140- 600	1000- 4000	700	170
Resistência específica σ_{Rf}/ρ_f , 10 ⁶ Nm/kg	0,00872- 0,0145	0,038- 0,26	0,052- 0,26	0,052- 0,21	0,38	0,068
Módulo de elasticidade E_f a 22°C, GPa	21- 35	207	70	350	300	70
Módulo específico E_f/ρ_f , 10 ⁶ Nm/kg	0,00872- 0,0145	26,5	25,8	18,1	164	28
Elongamento elástico a 22°C, %		0,15- 0,97	0,20- 0,86	0,29- 1.1	0,23	1,0- 3,0
Temperatura de fusão		1350	2050	3390	1284	
Coef. dilatação térmica (d)	10,8	11,7				

Para projeto, usar dados de fabricantes ou experimentais.

- (a) Concreto de 36 litros de água por saco de 50 kg de cimento. Ensaio com 28 dias.
- (b) Concreto de 27 litros de água por saco de 50 kg de cimento. Ensaio com 28 dias.
- (c) Valores para compressão. Em tração, considerar valores nulos. Valores admissíveis em compressão estática: 9,5 MPa e 16,0 MPa respectivamente.
- (d) Coeficiente de dilatação térmica em 10⁻⁶/°C.

por resina. Porém, afora esse caso, sempre se terá um composto de fibras suportadas por uma matriz. Como esperado, as propriedades de resistência da matriz serão frequentemente bastante inferiores às da fibra. Por consequência, os compostos obtidos não apresentam os valores espetaculares de resistência exibidos pelas fibras, mas valores intermediários. O quanto os valores finais se aproximarão de um ou outro extremo depende obviamente, mas não exclusivamente, da porcentagem de fibras usada.

A Tabela 1.4 lista valores de densidade, módulo de elasticidade E e resistência à ruptura em tração para uma série de laminados. Os valores para os laminados foram obtidos conforme a porcentagem relativa de fibras, definida por:

$$V_f = \frac{\text{volume de fibras}}{\text{volume total do composto}} \quad \text{e} \quad M_f = \frac{\text{massa de fibras}}{\text{massa total do composto}}. \quad (1.1)$$

Os valores de ρ , E_1 , E_2 , X_t e Y_t de cada lâmina foram calculados a partir das propriedades de ρ , E e σ_R das fibras e da matriz, usando as técnicas de análise micromecânica a serem vistas no Capítulo 3. Os valores de módulos e resistências dos laminados foram obtidos usando o desenvolvimento apresentado no Capítulo 6 e calculados usando o programa CedricT. As propriedades usadas para as fibras e resinas foram obtidas das Tabelas 1.1 e 1.10, páginas 6 e 19.

De forma geral, observando-se os valores na Tabela 1.4 para os laminados e comparando-os aos valores das fibras, Tabelas 1.1 e 1.2, notamos que a presença das resinas usadas, tais como as de epóxi ou poliéster, reduz acentuadamente as resistências das fibras, mas, quando comparadas às densidades, os compostos ainda se apresentam atrativos em relação aos materiais tradicionais mostrados na Tabela 1.3. Por exemplo, as resistências específicas dos aços ficam na faixa de 0,038 Nm/kg a 0,26 · 10⁶ Nm/kg, enquanto as lâminas de vidro-E/poliéster têm resistências na faixa de 0,18 a 0,52 · 10⁶ Nm/kg. Sem dúvida, lâminas ainda mais resistentes e rígidas podem ser obtidas, usando fibras de vidro-S ou de grafite com matriz epóxi, por exemplo.

Lâminas comerciais

Em lugar de estimar as propriedades das lâminas a partir das propriedades das fibras e da matriz como feito na Tabela 1.4, essas propriedades podem ser obtidas experimentalmente. Nas Tabelas 1.5

Tabela 1.4: Propriedades de alguns compostos laminados.

Material	V_f/M_f	Módulo E_1/E_2	Ruptura X_t/Y_t	Densidade ρ	E_1/ρ	X_t/ρ
Uma lâmina						
1 Vidro-E/poliéster uniaxial	15/27	12560/ 2960	295/ 43	1400	9,0	0,21
2 Idem, aleatório	15/27	7450	85	1400	5,3	0,061
3 Vidro-E/poliéster uniaxial	30/48	23100/ 4290	543/ 43	1600	14,4	0,34
4 Idem, aleatório	30/48	12700		1600	7,9	
5 Grafite/epóxi uniaxial	60/68	163400/ 17840	1634/ 78,4	1580	103,4	1,03
Laminado de 9 lâminas, $[0^\circ/90^\circ]_s = [0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ//0^\circ//90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ]$						
6 Vidro-E/poliéster	60/76	28940/ 24990	360/274 (578)	2000	14,5	0,18
7 Grafite/epóxi	60/68	99220/ 82900	814/581 (908)	1580	62,8	0,52
8 Kevlar/poliéster	60/64	25400/ 22100	388/289 (940)	1344	18,9	0,29

- a) Nas lâminas, E_1 e E_2 são os módulos de elasticidade nas direções das fibras e transversais a elas, conforme a Figura 1.1. X_t e Y_t são as respectivas resistências à ruptura sob tração.
- b) Nos laminados, E_1 e E_2 são os módulos de elasticidade nas direções 0° e 90° respectivamente, da mesma forma que X_t e Y_t para as resistências.
- c) Propriedades da fibra de vidro usada: $E_f = 72.400$ MPa, $\nu_f = 0,2$,
 $\rho_f = 2.540$ kg/m³, $\sigma_{Rf} = 1.700$ MPa.
- d) Propriedades da fibra de grafite usada: $E_f = 270.000$ MPa, $\nu_f = 0,2$,
 $\rho_f = 1.800$ kg/m³, $\sigma_{Rf} = 2700$ MPa.
- e) Propriedades da fibra de kevlar-29 usada: $E_f = 62.000$ MPa, $\nu_f = 0,2$,
 $\rho_f = 1.440$ kg/m³, $\sigma_{Rf} = 2.760$ MPa.
- f) Propriedades do poliéster usado: $E_m = 2.000$ MPa, $\nu_f = 0,35$,
 $\rho_f = 1.200$ kg/m³, $\sigma_{Rm} = 75$ MPa.
- g) Propriedades do epóxi usado: $E_m = 3.500$ MPa, $\nu_f = 0,35$,
 $\rho_f = 1.250$ kg/m³, $\sigma_{Rm} = 35$ MPa.
- h) V_f é o volume de fibras/volume do composto, em %. M_f é o análogo para a massa.
- i) Unidades: MPa, kg, m.
- j) Os laminados têm 5 lâminas orientadas a 0° e a 90° . Dessa forma a rigidez e a resistência são diferentes nas duas direções. Os valores de resistência apresentados na tabela são aqueles em que toda a matriz se rompeu, mas não as fibras. A falha final na direção de 0° é indicada nos valores entre parênteses.

e 1.6, são apresentados valores experimentais para alguns compostos comerciais de alto desempenho.

Tabela 1.5: Propriedades termomecânicas de alguns compostos fibrados comerciais.

	V_f	ρ	E_1	E_2	ν_{12}	G_{12}	α_1	α_2	β_1	β_2
T300/N5208										
carbono/epóxi	0,7	1600	181	10,3	0,28	7,17	0,02	22,5	0	0,6
AS/H3501										
carbono/epóxi	0,66	1600	138	8,96	0,30	7,10	-0,3	28,1	0	0,6
AS/APC2										
carbono/PEEK	0,66	1600	134	9,80	0,28	5,10	-	-	0	-
B-4/N5505										
boro/epóxi	0,50	2000	204	18,5	0,23	5,59	6,10	30,3	0	0,6
Scotchply 1002										
vidro-E/epóxi	0,45	1800	38,6	8,27	0,26	4,14	8,60	22,1	0	0,6
Kevlar 49/										
epóxi	0,60	1460	76,0	5,50	0,34	2,30	-4,0	79,0	0	0,6
IM6/epóxi										
carbono/epóxi	0,66	1600	203	11,2	0,32	8,40	-	-	-	0,6
T300/Fiberite 934										
carbono/epóxi	0,6	1500	74,0	74,0	0,05	4,55	-	-	-	0,6

Módulos E_1 , E_2 e G_{12} em GPa; coeficientes de dilatação térmica α_1 e α_2 em $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$; densidade ρ em kg/m^3 . As fibras são unidirecionais, exceto no último material. Coeficientes de dilatação higrométrica β_1 e β_2 . Espessura de uma lâmina é 0,125 mm. V_f é o volume relativo de fibras.

1.2 Tipos e propriedades de fibras

Nas Tabelas 1.1 e 1.2, são apresentados valores típicos de propriedades termomecânicas de algumas fibras. Na presente seção, são comentados em mais detalhes aspectos e características das fibras de alto desempenho mais usadas nos últimos anos.

1.2.1 Fibras de vidro

O vidro, usado inicialmente apenas como contas em colares, data aproximadamente de 2500 a.C. Originou-se possivelmente na Mesopotâmia e foi depois levado ao Egito. Até a época de Cristo, já era conhecido na península itálica, na Grécia, Chipre, atual Líbano, Síria e Índia. A técnica e a qualidade do trabalho com vidro atingiram um pico com os romanos até o século II, quando entrou quase em esquecimento no Ocidente por cerca de um milênio. A partir da Renascença encontrou novamente um trajeto contínuo de desenvolvimento até o início do século XIX, com a incorporação dos avanços científicos da química e processos industriais de produção. O “processo Salvay” de produção foi estabelecido em 1863 na Bélgica. Em 1932, W. H. Zachariasen publicou um dos artigos que talvez tenha tido maior influência na ciência do vidro.

As fibras de vidro apareceriam pouco antes de 1930, com o desenvolvimento de sua técnica de produção, mas o uso intensivo só se deu a partir da Segunda Guerra Mundial, em conjunção com as resinas de poliéster. O surgimento do radar e sua subsequente instalação em caças e bombardeiros gerou um problema, pois os elementos de proteção deveriam ser suficientemente fortes para resistir às cargas aerodinâmicas, às baixas temperaturas ambientes, às intempéries e, simultaneamente, deveriam ser transparentes às ondas de alta frequência do radar. Essa restrição excluía qualquer solução com materiais metálicos. Tais estruturas passaram então a ser construídos com compostos de vidro/poliéster.

De forma resumida, podemos mencionar as principais vantagens e desvantagens das fibras de vidro:

Tabela 1.6: Propriedades termomecânicas de alguns compostos fibrados comerciais.

	X_t	X_c	Y_t	Y_c	S	F_{11}	F_{22}	F_{12}	F_{66}	F_1	F_1
T300/N5208 carbono/epóxi	1500	1500	40	246	68	0,444	101,6	-3,36	216,2	0	20,93
AS/H3501 carbono/epóxi	1447	1447	51,7	206	93	0,476	93,48	-3,33	115,4	0	14,50
AS/APC2 carbono/PEEK	2130	1100	80	200	160	-	-	-	-	-	-
B-4/N5505 boro/epóxi	1260	2500	61	202	67	0,317	-2,53	222,7	0,393	0,393	11,44
Scotchply 1002 vidro-E/epóxi	1062	610	31	118	72	273,3	-10,27	-10,27	122,9	-0,697	23,78
Kevlar 49/ epóxi	1400	235	12	53	34	3,039	1572	-34,56	865,0	-3,541	64,46
IM6/epóxi carbono/epóxi	3500	1540	56	150	98	-	-	-	-	-	-
T300/Fiberite carbono/epóxi	499	352	458	352	46	-	-	-	-	-	-

Tensões de resistência à tração e compressão, nas direções principais 1 e 2, X_t , X_c , Y_t , Y_c e S em MPa. Os fatores do critério de Tsai-Wu, F_{ij} em MPa^{-1} , fornecidos por Tsai, [203].

F_{12} obtido pela eq.(4.120) na página 106.

Vantagens:

- baixo custo em relação às demais fibras;
- alta relação resistência/densidade (a resistência específica) σ_{Rf}/ρ_f .

Desvantagens:

- baixa relação módulo de elasticidade/densidade (a rigidez específica) E_f/ρ_f ;
- baixa resistência à abrasão, o que reduz a resistência à ruptura;
- adesão pobre às resinas, especialmente em presença de umidade.

Processo de fabricação das fibras de vidro

O processo de fabricação é esquematizado na Figura 1.2 e segue aproximadamente as etapas abaixo:

1. Ingredientes como areia, alumínio e bórax são misturados e alimentados continuamente em uma fornalha refratária para fusão. A temperatura é da ordem de 1.250°C .
2. Após purificado e refinado, o vidro fundido é escoado por gravidade através de uma série de furos de uma placa de platina perfurada. São centenas de furos com diâmetros de 1 a 2 mm.
3. Num processo contínuo, o vidro que escoar por cada furo é puxado até ser reduzido ao diâmetro apropriado.
4. Os fios são, então, resfriados por *sprays* de água.
5. Em seguida, os fios correm sobre uma esteira e são recobertos por uma camada superficial de proteção. Essa camada visa melhorar a resistência à abrasão e permitir que o fio produzido possa ser manipulado em usos subsequentes. A baixa resistência à abrasão dos filamentos de vidro constitui um de seus aspectos característicos.

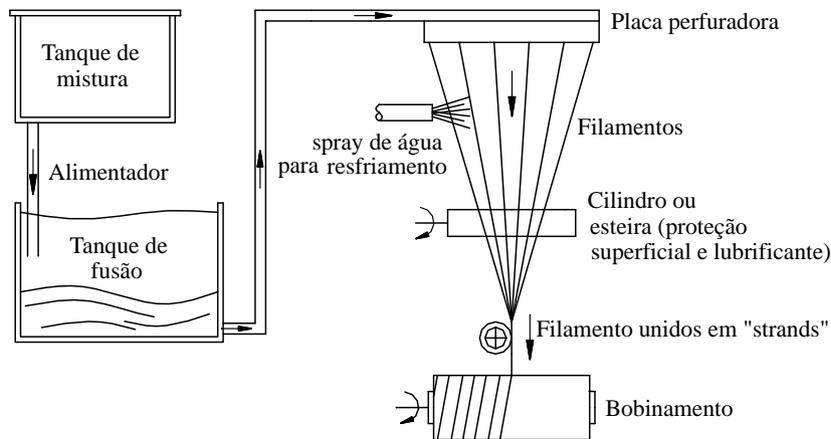


Figura 1.2: Esboço do processo de produção de fibras de vidro.

6. Os filamentos são unidos, formando *strands*. O *strand* de fibras de vidro consiste tipicamente em 204 filamentos.
7. Os *strands* são bobinados para uso subsequente, a velocidades de até 3 km/min.

Observe que, de forma geral, o processo descrito acima é apenas uma forma automatizada e industrial do processo artesanal usado há séculos, e ainda em uso, de trabalhar com o vidro na produção de vasos, adornos, utensílios, garrafas etc., baseado em “amolecer”, “puxar” e resfriar o produto.

Diversos tipos de fibras de vidro são produzidos, como vidro-E, vidro-S, vidro-D, vidro-A, vidro-C e vidro-L. Estruturalmente, a quase totalidade das aplicações usa o tipo E e o S. Historicamente, o primeiro tipo produzido foi o vidro-E, visando aplicações elétricas, donde o índice -E. Logo em seguida foram identificadas as potencialidades estruturais do produto. O vidro-S resultou de um aprimoramento sobre o -E, alterando sua composição, de forma a incrementar sua resistência. O índice -S se refere a *strength*, em inglês “resistência”. As composições são aproximadamente aquelas apresentadas na Tabela 1.7.

Tabela 1.7: Composição típica das fibras de vidro, em porcento.

Componente	vidro-E	vidro-S	vidro-A	vidro-C
Óxido de silício, SiO ₂	52-56	64,2	72	65
Óxido de alumínio, Al ₂ O ₃	12-16	24,8	0,6	4
Óxido de cálcio, CaO	16-25	0,01	10	14
Oxido de magnésio, MgO	0-6	10,3	2,5	3
Óxido de boro, B ₂ O ₃	8-13	0,01	-	6
Óxido de sódio, Na ₂ O	0-3	0,27	14,2	8

Formas comercialmente disponíveis das fibras de vidro

Após produzidas e bobinadas, as fibras são trabalhadas de forma a serem fornecidas em diversas configurações, mais adequadas ao uso. Em razão de seu reduzido diâmetro, elas podem ser dobradas e flexionadas, apesar de o material ser bastante frágil, tão quebradiço quanto o vidro da janela. As fibras podem então ser trabalhadas de forma semelhante aos fios têxteis, sendo combinadas em fios

mais grossos, ou ainda tecidas em diversos tipos de tramas. A seguir comentamos algumas dessas formas.

Mechas de fibra de vidro (*roving*)

A forma básica disponível das fibras são as mechas, que consistem de uma coleção de *strands*, geralmente 20, bobinados juntos, de forma contínua e paralela. Existem também mechas em que os *strands* são mantidos juntos por uma leve torção e por resina.

As mechas são especificadas por um parâmetro chamado **rendimento** (*yield*) definido como o **número de metros/unidade de massa**. Geralmente, as mechas são produzidas com rendimentos de 3.600 m/kg a 450 m/kg.

As mechas são usadas diretamente em produtos obtidos por bobinamento, como carcaças cilíndricas de motores de foguetes, vasos de pressão, reservatórios e tubulações. São também usadas na manufatura de preregs e no processo de extrusão (definidos em seções seguintes).

Mantas de fibras (*mats*)

Existem basicamente dois tipos de mantas: as mantas de fibras contínuas e de fibras picotadas.

As **mantas de fibras contínuas** (*continuous strand mat*) são mantas não tecidas em que as fibras são depositadas de forma emaranhada. São facilmente manipuláveis e geram lâminas aproximadamente homogêneas e isotrópicas. A Figura 1.3a ilustra uma manta desse tipo.

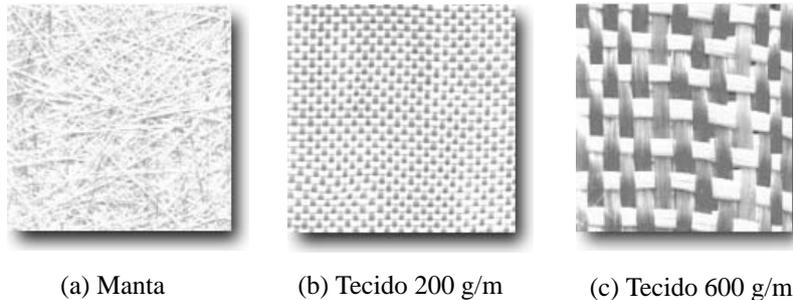


Figura 1.3: Algumas formas disponíveis para a fibra de vidro: (a) manta de fibras aleatoriamente orientadas; (b) e (c) tecidos com iguais propriedades a 0° e 90° (*woven roving*).

As **mantas de fibras picotadas** (*chopped-strand mat*) são formadas por mechas picotadas em comprimento de 25 mm a 50 mm, uniformes e aleatoriamente distribuídas num plano e aderidas entre si por um adesivo, de forma a facilitar a manipulação até sua utilização final, quando da combinação com a resina na construção do composto. Essas mantas são produzidas em larguras desde 5 cm até 2 m e pesos de $0,25 \text{ kg/m}^2$ a $0,92 \text{ kg/m}^2$.

Mantas podem ser ajustadas a formas complicadas sem desmanchar ou rasgar, tornando-se úteis na moldagem manual de peças e na moldagem por prensa.

Tecidos de fibras (*woven roving*)

Tecidos de fibras são mantas de estruturas análogas às dos tecidos têxteis. Os tecidos mais comuns são de estrutura regular simples, com iguais padrões em duas direções ortogonais, como aqueles ilustrados na Figura 1.3b e c. Uma representação esquemática é vista na Figura 1.4b. Esse tipo de tecido tem propriedades mecânicas iguais nas duas direções de fibras. É especificado pelo seu peso/área.

Os tecidos regulares são os mais baratos e, como todos os tecidos, são de fácil uso, principalmente em modelagem manual e por prensagem, porém sofrem de uma deficiência, a de apresentar rigidez e módulo de elasticidade bastante baixos. Isso ocorre em virtude das ondulações que cada mecha faz ao longo da trama. Durante a aplicação de carga uniaxial, as ondulações primeiro tendem a se endireitar antes de começar a suportar cargas. Isso pode resultar em deformações exageradas, ocasionando falta de rigidez.

Tecidos com nível superior de rigidez são conseguidos com tramas irregulares como a da Figura 1.4c, que mostra uma trama tipo **cetim**. Existem dezenas de diferentes tramas. No caso do cetim, cada fio sofre menor número de ondulações, estendendo-se em linha reta por extensões mais longas.

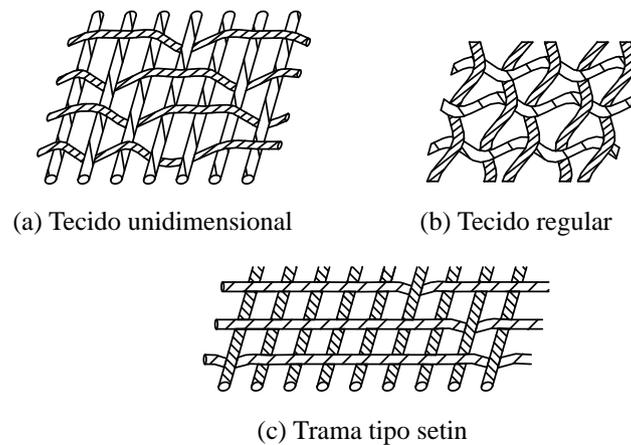


Figura 1.4: Diferentes tipos de tramas para tecidos de fibra de vidro.

A forma mais rígida possível é conseguida com feixes de fios ou mechas paralelas. Obviamente esse tipo de conjunto por si só seria impossível de ser manipulado. Duas formas de conseguir esses **feixes unidirecionais** são:

- Com o auxílio de fios mais finos na direção transversal, responsáveis apenas por manter as mechas unidas. As mechas não são onduladas.
- Outra forma, frequentemente construída em oficina, consiste em costurar as fileiras paralelas de mechas em costuras colocadas a distâncias regulares, de forma a conseguir uma manta unidirecional e manipulável.

Por causa do custo e da facilidade de manuseio, os tecidos são bastante usados na construção de grandes peças e como partes de fuselagem de aviões, cascos de barcos e dutos. Um tecido de 342 g/m^2 , por exemplo, pode gerar uma lâmina de cerca de 1 mm de espessura. De forma geral, os tecidos permitem a construção de grandes espessuras com poucas camadas, o que simplifica o processo construtivo manual. Ao mesmo tempo, grandes extensões podem ser cobertas pela sobreposição de peças de tecido, formando uma estrutura contínua, sem emendas ou uniões, de espessura praticamente uniforme.

Fibra moída (*milled fiber*)

Mechas de fibras contínuas podem ser moídas a comprimentos de 0,14 mm a 6,5 mm. São usadas como carga, ou seja, misturadas à resina de forma a alterar sua resistência mecânica.

Uso atual da fibra de vidro

Características como resistência e rigidez, aliadas ao baixo custo, fazem com que a fibra de vidro seja usada numa ampla faixa de componentes. Tradicionalmente esses componentes se restringiam principalmente às áreas industrial e militar. Nas últimas décadas, a tendência tem sido de expandir-se num mercado muito mais amplo, o dos artigos de consumo. Uma coletânea concisa das aplicações atuais é a seguinte:

- **Indústria naval:** cascos para barcos de lazer, navios, submarinos científicos e de prospecção. Reservatórios de água e combustível. Dutos de ventilação, boias.
- **Indústria química:** bandejas farmacêuticas, tanques de armazenamento, tubulações e dutos, em virtude de sua resistência a ataques corrosivos.
- **Indústria militar e aeroespacial:** carcaças de foguetes, hélices de aviões e helicópteros, vasos de pressão, barcos de desembarque. Note que, graças à necessidade de maior rigidez, geralmente esses componentes são feitos de fibras de carbono.
- **Indústria automobilística:** partes de carroceria de automóveis, caminhões e ônibus. Para-choques, painéis de instrumentos, revestimento interno.
- **Construção civil:** perfis estruturais, pisos, painéis e divisórias, concreto armado por aço e fibras ou varetas. Pontes suspensas por feixes paralelos de fibras em substituição aos cabos de aço. Isolamento térmico e elétrico.
- **Material esportivo e de lazer:** raquetes, esquis, capacetes, piscinas, parques de diversão, parques aquáticos, arcos e flechas, bicicletas, varas de pescar. (Algumas dessas aplicações fazem uso mais intensivo de fibras de carbono.)

1.2.2 Fibras de carbono e grafite

As terminologias “fibra de carbono” ou “de grafite” são usadas para distinguir o conteúdo de carbono: “grafite” para mais de 98,8% de carbono e “carbono” para conteúdos entre 80% e 95%. As fibras de grafite comparam-se às fibras de vidro através de diversas características, algumas das quais podem ser identificadas comparando-se os dados de propriedades mecânicas listados na Tabela 1.1 na página 6. De forma geral, pode-se dizer que as fibras de grafite, em relação às de vidro, apresentam:

- maior rigidez;
- maior resistência a altas temperaturas, quando o vidro tende a se fundir;
- densidade inferior, cerca de 68% da do vidro;
- custo maior.

Essas características explicam por que as fibras de grafite são o reforço predominante em aplicações de alto desempenho.

Conquanto a tecnologia de produção de fibras de vidro seja razoavelmente comum, a produção de fibras de carbono é ainda área estratégica de alguns países no mundo. A produção é feita a partir de filamentos precursores orgânicos. Para isso, três tipos de materiais são usados: fibras de poliacrilonitrile (PAN), de raio ou fibras *pitch*. Grosso modo, a fibra precursora é esticada durante um período como 24 horas a uma temperatura na faixa de 230°C, depois é carbonizada a 1.500°C em atmosfera inerte e ainda sofre um processo de grafitização a 3.000°C.

Embora as fibras de carbono tenham sido proibitivamente caras no passado para muitas aplicações, o custo caiu significativamente na última década conforme o volume de produção e a demanda mundial cresceram. Dessa forma, as fibras de carbono e grafite são as mais usadas na indústria aeroespacial e tendem a espalhar-se pelas demais áreas da indústria. Simultaneamente, o desenvolvimento prossegue, gerando novas variações como a fibra baseada no precursor *pitch* P-100 da AMOCO, com módulo de elasticidade de 690 GPa, mais do triplo do aço.

Formas disponíveis

Da mesma forma que o vidro, as fibras de grafite são disponíveis nas formas contínua, picotada, em mantas e em tecidos. As fibras contínuas são produzidas na seguinte forma:

Fio (*tow*) – um conjunto de 400, 10 mil ou até 160 mil filamentos paralelos.

Linha (*yarns*) – é um fio torcido.

Mecha (*roving*) – é um conjunto de *strands* em paralelo.

Fita – consiste em fios ou linhas colocados lado a lado temporariamente numa película ou costurados juntos.

1.2.3 Fibras de kevlar

Kevlar é a designação comercial de uma fibra aramida desenvolvida pela Du Pont em 1971. Fibras poliméricas, em geral, já vinham sendo usadas há vários anos, como o raio, poliéster e o náilon, como reforço em pneus radiais na substituição do aço.

As fibras de kevlar apresentam excepcionais características de resistência e rigidez (ver dados na Tabela 1.1). Possuem, porém, baixa resistência à compressão. Por outro lado, apresentam textura flexível, não frágil como as demais fibras, sendo bastante semelhantes às fibras têxteis de vestuário, permitindo serem tecidas em tramas muito mais miúdas e complexas que o permitido nos tecidos de vidro. Isso explica seu uso em aplicações como grandes balões e dirigíveis, coletes à prova de balas e tecidos impermeáveis emborrachados. Outra característica interessante do kevlar é sua baixa densidade, de 1.440 kg/m^3 , em comparação ao grafite, com 1.800 kg/m^3 , ao vidro, com 2.540 kg/m^3 e ao aço, com 7.800 kg/m^3 .

1.2.4 Fibras de monocristais – Whiskers

Os monocristais são semelhantes às fibras no que concerne ao diâmetro, porém são mais curtos que essas. Tipicamente o comprimento de um monocristais é de no máximo algumas centenas de vezes seu diâmetro. Eles são obtidos por cristalização em uma escala bastante pequena, resultando em uma estrutura cristalina quase que perfeitamente alinhada. Como resultado, os monocristais tendem a apresentar valores de resistência ainda mais próximos dos valores teóricos que no mesmo material em forma de fibra. Por exemplo, o ferro em forma de aço em bloco apresenta resistências entre 300 a 1.400MPa. Um *whisker* de ferro apresenta resistência da ordem de 13.000 MPa, mais próximo do valor teórico de 19.000 MPa. A Tabela 1.8 mostra valores típicos para alguns monocristais filamentosos.

Tabela 1.8: Propriedades típicas de monocristais.

Material	densidade ρ_f , kg/m^3	temperatura de fusão $^{\circ}\text{C}$	resistência σ_{Rf} , MPa	módulo E_f , GPa	módulo E_f/ρ_f	resistência σ_{Rf}/ρ_f
Óxido de alumínio, Al_2O_3	3.890	2.080	14.000 a 27.000	700 a 2.400	3,6 a 6,9	180 a 617
Carbeto de boro, B_4C	2.495	2.450	6.700	450	2,7	180
Grafite	2.250	3.590	20.700	1.000	9,2	444
Carbeto de silício α , SiC	2.147	2.315	6.900 a 34.000	700 a 1.000	2,2 a 10,8	222 a 318
Ferro	7.820	-	13.000	207	1,7	27
Cobre	8.900	-	3.000	125	0,34	14
Níquel	8.951	-	3.900	215	0,44	24

1.2.5 Asbesto

É um material tradicional, usado em diversas aplicações associadas à sua característica de incom bustibilidade. Trata-se de um produto fibroso natural, sedoso, que não apodrece nem se altera facilmente com o tempo, clima, chama, calor e produtos químicos.

Asbesto designa tanto o produto específico, o crisótilo, como genericamente toda a gama de minerais inorgânicos fibrosos anfíbolos. O crisótilo representa cerca de 95% da produção mundial de asbesto. É um silicato hidratado de magnésio.

O asbesto é disponível em forma de fibras curtas, fios, mantas, tecidos, fitas e feltros. É usado tanto como reforço na injeção de termoplásticos, onde entra em fibras curtas, quanto na moldagem de termofixos.

O uso de asbesto como reforço de resina fenólica pode gerar compostos com temperatura máxima de trabalho contínuo entre 200°C a 320°C. Tecido de asbesto em silicone gera compostos para a faixa de 230°C a 400°C. Tecidos de vidro podem levar à mesma faixa de temperatura de trabalho.

1.2.6 Fibras cerâmicas

As fibras cerâmicas são usadas como reforço de matrizes metálicas e cerâmicas em aplicações de altas temperaturas. Elas combinam alta resistência e rigidez com resistência térmica e resistência a ataques químicos. Diversas marcas comerciais são disponíveis, como:

- Fibras de alumínio, da Du Pont de Nemours & Co. com nome de *Fiber FP*. Elas retêm resistência até 1.370°C. Têm diâmetro de 20 μm , densidade de 3.450 kg/m³, resistência de ruptura de 1.380 MPa e módulo de elasticidade de 379 GPa.
- Carbetos de silício, SiC, produzidos pela AVCO Special Materials Co., pela Nippon Carbon Co., e pela Textron.
- Outro processo de produção é aquele por pirólise, que produz fibras com diâmetros menores, 10 μm –20 μm e menor densidade (2.600 kg/m³) que os demais, embora com resistência e módulos inferiores, 2.000 MPa e 180 GPa.
- Spectro 900 da Allied Chemical Corporation. É uma fibra de polietileno UHMW (*ultra-high-molecular-weight*), com densidade de apenas 970 kg/m³.

1.3 Tipos e propriedades das matrizes

Como já mencionado, fibras por si só são incapazes de suportar estados multiaxiais de tensões, apenas tensões trativas na direção axial das fibras. Essa deficiência é ilustrada na Figura 1.5, onde um feixe de fibras é submetido a solicitações transversal e cisalhante. Pode-se observar que a integridade do conjunto dependerá fundamentalmente do desempenho de uma matriz que aglutine as fibras e transmita as tensões. Como consequência, diversos modos de falha de um composto fibroso serão diretamente relacionados à resistência e à falha na matriz. A importância da matriz num composto estende-se também na forma de proteção das fibras contra ataques químicos ou danos provenientes do manuseio ou desgaste pelo uso.

Para a fabricação de compostos reforçados, três tipos principais de matrizes são usadas:

- matrizes metálicas;
- matrizes cerâmicas;
- matrizes de resina plástica, também denominadas resinas poliméricas.

Nas seções seguintes, alguns aspectos dos principais polímeros usados em compostos são comentados.

1.3.1 Polímeros

Os polímeros, comumente conhecidos como plásticos, são materiais sintéticos, geralmente de origem orgânica. Diversas das propriedades e características dos compostos derivam diretamente das características básicas dos polímeros que os compõem. Algumas dessas características são sumarizadas na Tabela 1.9.

O item **facilidade de fabricação** inclui diversos fatores, todos eles relacionados ao custo final do produto. Os níveis de força, de temperatura e de energia necessários para moldar, fundir, cortar, furar, usinar, unir ou realizar qualquer outro tipo de trabalho com plásticos em geral são algumas ordens de grandeza inferiores aos dos metais estruturais como o aço. Isso se reflete frequentemente em redução do **capital inicial de investimento em equipamento**.

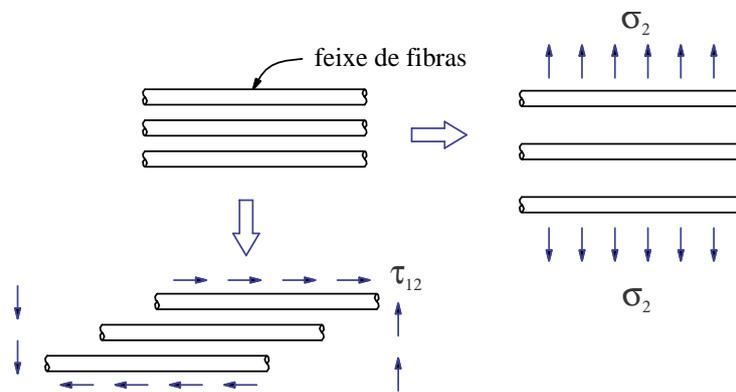


Figura 1.5: Vista expandida de um feixe de fibras paralelas sob ação de solicitações transversais e cisalhantes.

Como listado na Tabela 1.9, os plásticos possuem inúmeras vantagens quando comparados aos metais e outros materiais, e diversas de suas deficiências são contornáveis com o desenvolvimento contínuo de pesquisas. Entretanto, uma única restrição aparentemente permanece absoluta: a limitação ao uso em **altas temperaturas**. Um engenheiro que investiga a possibilidade de substituir materiais numa dada aplicação, quer por plásticos simples, quer por materiais compostos baseados em plásticos, deve estar pronto a reconhecer essa limitação imediatamente. Todo um vasto conjunto de aplicações como fornos, cadinhos, partes de caldeiras, torres de refino petroquímico, bicos de tochas e outros, provavelmente jamais serão substituídos por partes plásticas. Deve-se lembrar, porém, que essa restrição aplica-se apenas aos materiais compostos baseados em resinas. Compostos baseados em **matrizes metálicas e cerâmicas**, por exemplo, obviamente não sofrem esse tipo de restrição.

Algumas das características mostradas na Tabela 1.9 são referentes a propriedades mecânicas, cujos valores típicos são listadas na Tabela 1.10. A Tabela 9.7, página 260, apresenta as propriedades de alguns **plásticos expandidos e espumas** comumente usados como núcleos de **placas-sanduiche**.

Polímeros termofixos e termoplásticos

O componente básico de um material plástico é uma resina formada por processos de síntese química conhecidos como reações de **polimerização**, a partir de um produto simples, denominado **monômero**. As reações de polimerização, portanto, formam moléculas maiores através da repetição da unidade básica, o “mero”. Isso explica a nomenclatura “poli-mero”. Entretanto, nem todos os polímeros se compõem de um tipo único de unidade básica, apenas os chamados homopolímeros. Já os copolímeros se compõem de dois ou mais monômeros distintos.

O comprimento das moléculas nos polímeros é variável. Uma amostra será sempre constituída por uma mistura de moléculas com pesos moleculares diferentes, estatisticamente distribuídas em torno de um valor médio. Os polímeros usuais apresentam pesos moleculares na faixa 10^3 a 10^6 .

Os polímeros podem apresentar moléculas sem ramificações, conhecidos como **polímeros lineares**, ou **com ramificações**. As cadeias podem ser independentes ou podem estar ligadas entre si, formando reticulados tridimensionais ou ligações cruzadas (*crosslinks*). Essas variações aparecem ilustradas na Figura 1.6.

Do ponto de vista da sua estrutura e de seu comportamento quanto à refusibilidade, os plásticos são classificados em dois grandes grupos, os chamados termoplásticos e os termofixos, comentados a seguir.

Termoplásticos – São os polímeros que amolecem ou fundem quando aquecidos. Consistem em moléculas lineares com ou sem ramificações. Eles possuem fortes ligações intramoleculares, mas fracas ligações intermoleculares. Se um termoplástico é aquecido, essas ligações são enfraquecidas, tornando possível a movimentação relativa das moléculas e, portanto, a deformação. O resfriamento restabelece as forças de ligação solidificando-o novamente. O processo de aquecimento–amolecimento–resfriamento–endurecimento é, portanto, reversível, de forma que esses polímeros podem ser reutiliza-

Tabela 1.9: Vantagens e desvantagens dos polímeros em relação aos metais e outros materiais.

Vantagens	
(a)	Facilidade de fabricação.
(b)	Baixo peso, baixa densidade.
(c)	Resistência a ataques químicos.
(d)	Isolamento térmico e elétrico.
(e)	Autolubrificação.
(f)	Aparência decorativa.
(g)	Transparência. Foi a primeira classe de materiais transparentes descoberta após séculos.
(h)	Amortecimento mecânico, usado para absorção de energia.
Desvantagens	
(a)	Baixa resistência, mesmo considerando sua baixa densidade.
(b)	Rigidez inferior à dos metais, cerâmicos e madeira.
(c)	Mais frágil que muitos metais e madeira.
(d)	Dureza baixa. Risca com facilidade.
(e)	Expansão térmica superior à dos metais (pode ser de 5 a 10 vezes maior).
(f)	Mais inflamáveis que os metais.
(g)	Temperatura máxima de serviço baixa.
(h)	São suscetíveis à deterioração pela exposição à radiação ultravioleta como a presente na luz natural.
(i)	Muito suscetíveis à deformações de fluência.
(j)	Baixa resistência a produtos químicos orgânicos.

Tabela 1.10: Propriedades típicas de alguns polímeros.

Material	Termofixos					Termoplásticos	
	poliéster	epóxi	poliamidas	fenólicos	silicone	peek(1)	polisufone
Densidade	1.100-	(1.213)	1.460	1.320-	1.850-	1.300	1.250
ρ_m , kg/m ³	1.400	(2)		1.450	2.810		
Módulo elasticidade	2.100-	2.700-	3.500-			4.000	2.800
à tração E_m	4.400	3.380(2)	4.500				
Módulo à compressão		(3.860)(2)					
Ruptura à	34-	29-130	120	50-	17-	92	75
tração σ_{mR}	100	(29)(2)		55	34		
Ruptura à	90-	(158)		190-	60-		
compressão σ_{mR}	250	(2)		250	100		
Elongamento, %	2,0			0,4-0,8			
Temperatura de	140-	150-					
transição T_g	200	200				143	225
Temperatura de	250		260-	150-	260	310	175-
trabalho contínuo			460	(320)(2)			190
Temp.de cura p/ uso geral		(120) (2)(3)			175- 230(4)		
Coefficiente de dilatação	55-	45-65	90	45-			94-
térmica α_m	100			110			100
Absorção de água em	0,15-	0,08-	0,3	0,1-0,2		0,1	0,2
24h, % em volume	0,6	0,15					

Módulos e tensões em MPa, temperaturas em °C. Coeficiente α_m em $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

(1) Sigla de PolyEtherEtherKetone. (2) Valores para a marca comercial NARMCO 2387 [105].

(3) Para uso em alta temperatura, a cura pode ser feita até a 200°C. (4) Pós-cura é necessária para aplicação a alta temperatura. (5) Com carga de asbestos.

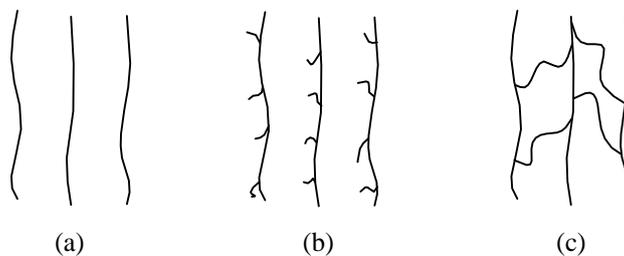


Figura 1.6: Tipos de cadeias poliméricas. Cadeias lineares em (a), cadeias ramificadas em (b), e cadeia com ligações cruzadas em (c).

dos pelo uso de calor e pressão. (Deve-se observar que, de fato, a reversibilidade é apenas parcial, isto é, a cada processo que ele é submetido o produto apresenta redução parcial de propriedades mecânicas.)

Essa característica, a de ser reprocessável, é um dos aspectos mais importantes nos termoplásticos, associado à conservação do meio ambiente e ao equilíbrio ecológico.

Alguns tipos principais de termoplásticos são os seguintes:

- | | |
|-------------------|-------------------------------------|
| • polietileno | • poliéter-éter |
| • poliestireno | • peek |
| • náilon | • acrílicos |
| • policarbonato | • polisulfone |
| • poliacetal | • <i>polifenilene sulfide</i> (PPS) |
| • poliamida-imida | • poliéter-imida |
| • fluocarbonos | • estirenos |
| • fenóis | • <i>polivinil chloride</i> (PVC) |
| • celuloses | • poliolefinos |

Detalhes sobre essas famílias de termoplásticos podem ser vistas, por exemplo, em [59].

Termofixos – Estes plásticos apresentam comportamento diferente daquele dos termoplásticos, pois, uma vez que o material endurece, ele não pode ser fundido ou amolecido pelo calor. Se aquecidos acima de certo limite, esses plásticos simplesmente se decompõem.

A explicação para esse comportamento baseia-se no seguinte: a polimerização desses materiais ocorre em dois estágios. O **primeiro estágio** ocorre no âmbito do fabricante do produto e resulta numa substância intermediária formada por cadeias lineares ou ramificadas. No **segundo estágio**, a polimerização se completa durante a moldagem de um produto na fabricação de uma peça. Essa etapa ocorre sob ação de calor, de um acelerador (agente de cura) e/ou de um catalisador. As moléculas reagem entre si formando estruturas tridimensionais como as da Figura 1.6c. O processo de cura então representa a formação dessas ligações cruzadas. Uma vez que a cura tenha sido feita e o material solidificado, ele não pode mais ser conformado termicamente.

Alguns tipos de plásticos termofixos são:

- | | |
|--------------|-------------|
| • poliéster | • fenólicos |
| • epóxi | • silicones |
| • poliamidas | |

Dentre todos os plásticos, o epóxi, o poliéster e, em menor proporção, os fenólicos, são os mais utilizados como matriz de laminados compostos reforçados por fibras. Isso se dá não só por causa das propriedades mecânicas, frequentemente superiores às dos termoplásticos, mas também por serem menos afetados pela variação de temperatura. Peças e componentes de materiais compostos de plásticos termofixos podem ser produzidos inteiramente à temperatura ambiente, desde a montagem de fibra e matriz até o processo final de cura. Essa é uma vantagem sobre os termoplásticos.

1.3.2 Aditivos

A produção de materiais compostos de plásticos reforçados por fibras envolve a polimerização da resina básica em conjunto com as fibras. No processo, é comum a adição de outros componentes químicos com diversos propósitos. Alguns desses “aditivos” são os seguintes:

- agentes de cura
- catalisadores
- cargas
- corantes e pigmentos
- estabilizadores
- retardantes de chama

a) **Agentes de cura** – no caso de plásticos termofixos, a cura só é desencadeada com a adição de um agente de cura, isto é, um agente que promova a formação das ligações cruzadas entre as cadeias.

b) **Catalisadores** – são substâncias que aceleram ou retardam as reações. Ao contrário dos agentes de cura, os catalisadores não compõem o produto final da reação. As quantidades utilizadas são mínimas. Por exemplo, a cura de 1 kg de resina epóxi requer 1,5 % de catalisador Mek, 15 g. Essa porcentagem não é fixa. Maiores ou menores quantidades alterarão o tempo de cura, e o tempo é escolhido conforme a temperatura de cura, se ambiente ou em forno, e conforme o tempo necessário para o trabalho de formação do composto. Tempos típicos podem variar desde 10 minutos até 24 horas.

c) **Cargas** – são aditivos usados com finalidade de alterar propriedades ou custos. Materiais como serragem ou outros são adicionados simplesmente para manter volume e reduzir custos. Flocos e resíduos triturados de plásticos são também usados com esse fim. **Fibras picotadas** e *whiskers* são adicionados à resina com o objetivo de incrementar módulos elásticos e resistência mecânica. **Limalha de ferro** pode ser usada para torná-la magnetizável. **Asbesto** é usado como carga em aplicações que requerem boas propriedades de resistência à temperatura. As cargas tendem a aumentar a viscosidade da resina, e geralmente são misturadas à resina junto com os corantes e pigmentos. Via de regra, não mais que 40 % do total da mistura pode ser de carga sob pena de afetar as propriedades. Uma outra utilidade das cargas é que, em quantidades corretas, podem reduzir a tendência natural de diversas resinas de se contraírem durante a cura.

d) **Corantes e pigmentos** – cor e aparência de componentes são aspectos importantes, principalmente em produtos de consumo. Os plásticos são em geral incolores. A coloração pode ser feita por pintura, usando procedimentos-padrão com o uso de massa plástica, que é lixada e recoberta com camadas de tinta. Outro procedimento consiste em adicionar o corante diretamente à massa da resina durante a laminação. **Corantes** são compostos orgânicos que se agregam às cadeias do polímero, enquanto os **pigmentos** são compostos inorgânicos que permanecem meramente dispersos pelo plástico. Embora os pigmentos reduzam a transparência e adicionem coloração, o melhor efeito vem dos corantes.

e) **Estabilizadores** – a ação lenta de oxidação e da radiação ultravioleta da luz solar tem o efeito de degradar os plásticos, tornando-os rígidos e quebradiços. Estabilizadores compreendem uma gama de aditivos, uns como antioxidantes, outros como absorvedores de radiação ultravioleta que evitam a ação degradante.

f) **Retardantes de chama** – são adicionados por motivos óbvios de segurança. Para a maioria das aplicações, existem normas que requerem que o plástico seja “auto-extinguível”. Essa propriedade significa que ao plástico é permitido desenvolver chama apenas enquanto submetido à chama ou calor intenso mantido por fonte autônoma. Quando a fonte se extingue, o plástico deve extinguir sua chama após alguns segundos. Diferentes normas impõem essa restrição aos plásticos em aplicações díspares como carpetes, divisórias, forros, roupas, revestimentos internos de automóveis e aviões, e compostos estruturais em dezenas de áreas. Requer-se então da resina uma capacidade auto-extinguível e, adicionalmente, que seja *retardante de chama*. Os epóxios podem ser tornados retardantes de chama por aditivos como o *tetrabromo-bis-fenol A*, o *HET anhydride* ou ainda *tetraclorophthalic anhydride*. Em geral, esses aditivos não alteram as propriedades de resistência da resina. Aditivos a diversas outras resinas podem ser vistos por exemplo em [59]. O comportamento da resina ao fogo pode ser testado, por exemplo, pela norma ASTM E 84-68 para testes de materiais de construção. A chama observada no material é comparada ao comportamento de dois outros materiais de referência, uma

prancha de cimento-asbestos e uma de madeira de carvalho. Esses resultados são associados aos índices 0 e 100 respectivamente, e a mostra é classificada com um índice intermediário.

1.3.3 Poliéster e epóxi

A Tabela 1.10 na página 19 mostra algumas propriedades típicas de alguns polímeros usados na produção de materiais compostos fibrados. Algumas observações merecem ser feitas sobre os materiais compostos fibrados mais usados, o poliéster e o epóxi.

O processo de cura da **resina de poliéster** é iniciado pela adição de uma pequena porção de catalisador, como um peróxido orgânico ou um composto alifático. A cura pode se dar tanto à temperatura ambiente quanto sob temperatura elevada e com ou sem aplicação de pressão.

Na **resina epóxi**, um agente de cura é misturado ao líquido epóxi para desencadear o processo de polimerização e formar o sólido pelas ligações cruzadas. Por exemplo, 10 % de dietileno triamina promove cura rápida à temperatura ambiente.

Como comparação, pode-se dizer que o epóxi é superior ao poliéster em diversos aspectos. Alguns itens de comparação são os seguintes:

- Epóxi adere melhor às fibras. No poliéster, essa adesão é empobrecida na presença de umidade.
- Resistência à absorção de umidade. Como visto nas propriedades da Tabela 1.10 na página 19, ambos absorvem umidade, o poliéster entre 0,15 a 0,6 % em volume em 24 horas de imersão em líquido. O epóxi absorve apenas de 0,08 a 0,15 %. Uma vez que essa umidade absorvida atua tanto reduzindo resistência quanto gerando tensões residuais (como visto nos Capítulos 3 e 8), o epóxi é superior nesse aspecto.
- Ambos são disponíveis em forma líquida, porém o poliéster pode ser usado um pouco mais facilmente. Pode ser aplicado por pincéis, brochas, escoado ou jateado sobre o reforço. Não é necessário o uso de alta pressão no processo de moldagem ou laminação.
- Durante a cura, o poliéster tende a se contrair, o que pode afetar o acabamento superficial ou a precisão dimensional. As resinas de poliéster se contraem até cerca de 6 % em volume ou 2 % nas dimensões lineares. Já os epóxios contraem cerca de 2 % em volume e 0,7 % nas dimensões lineares.

1.3.4 Plásticos fenólicos

Esta é um das famílias de plásticos mais antigas, que inclui o tipo conhecido popularmente como baquelite. Sua primeira forma foi originalmente desenvolvida pelo alemão Adolf Bayer e aperfeiçoada pelo belga Leo Baekeland, gerando um composto de fenol e formaldeído, patenteado em 1907.

Esse é também um dos plásticos mais baratos, o que explica seu uso ainda bastante difundido em artigos de consumo, como pegadores de ferramentas e utensílios, chaves e interruptores elétricos, ligantes para rebolos etc.

Sua temperatura de trabalho máxima em uso contínuo pode chegar a 260°C, mas esse plástico suporta temperaturas muito superiores por curtos períodos. Apresentam também baixa condutividade térmica. Isso o torna útil como proteção térmica em aplicações como nariz e câmara de motor de foguetes.

Os plásticos fenólicos são extremamente duros e resistentes a risco, sendo também úteis em áreas onde a abrasão é um problema. Uma desvantagem de seu uso é que, durante a cura, eles liberam grandes quantidades de voláteis e água, dificultando a moldagem de grandes peças.

A resina pura resulta da combinação de fenóis (hidroxi-benzinas, cresóis etc.) com aldeídos (formaldeído, furfuraldeído etc.). Essa resina é moída até transformar-se em um pó fino, ao qual se adicionam cargas, pigmentos e lubrificantes de acordo com cada especificação [59]. O catalisador é o chamado “hexa” (hexametileno tetramina). A cura é feita a cerca de 160°C de temperatura e 7 MPa de pressão. A pressão visa assegurar o preenchimento do molde e também expulsar a água formada, evitando bolhas e vazios internos [42]. Quando preparado com carga de asbestos, sua temperatura de trabalho em uso contínuo pode chegar a 320°C.

1.4 Processos de fabricação de compostos

Existe uma série de métodos de fabricação de componentes de materiais compostos por **plásticos termofixos** reforçados por fibra. Ao mesmo tempo, a pesquisa e o desenvolvimento em busca de novos processos e variações continuam a se dar de forma intensa.

Cada um dos diversos métodos já estabelecidos é adequado sob determinados aspectos, como:

- **Custo do processo** – envolve o custo do equipamento, se houver, do treinamento, da mão-de-obra, da matéria-prima etc.
- **Escala de produção** – existem diferentes situações: alta produção em série, como na indústria automobilística, ou baixa escala, como na indústria aeronáutica e naval, ou ainda, peças únicas como protótipos e modelos.
- **Dimensão física do componente** – peças grandes como cascos de barcos, carrocerias de ônibus e caminhões, piscinas, tanques e reservatórios necessitam processos de produção distintos de peças diminutas. Peças de grande porte são particularmente beneficiadas, no processo de fabricação, pelo uso de materiais compostos.
- **Volume relativo de fibra** – certos métodos serão mais adequados à produção de peças com baixa porcentagem de fibras, como nos processos manuais com mantas, enquanto outros processos conseguirão naturalmente altas proporções, como no bobinamento, por exemplo.
- **Repetibilidade de características do item** – processos manuais tenderão à baixa repetibilidade e alta variação nas dimensões e qualidade geral dos itens produzidos, em oposição aos métodos automatizados.

Os diversos processos de fabricação de compostos podem ser sumarizados da seguinte forma:

Processos de **Conformação Molhada**:

- processo manual (*hand lay-up*)
- bobinamento (*filament winding*)
- trefilação (*pultrusion*)
- moldagem por **membrana** (*bag molding*)

Processos com **Preformados** (*premixes*):

- premix em bloco – BMC
- premix em folha – SMC
- prepregs

Nos chamados processos de **conformação molhada**, a conformação do item ocorre enquanto a resina ainda está líquida e o processo de cura ocorre em uma única etapa. A combinação dos componentes, fibras e matriz é feita durante a conformação.

Em oposição, os **preformados** são sistemas adquiridos já previamente preparados, em forma de blocos, folhas ou fitas (os prepregs), e as fibras se encontram previamente impregnadas com resina. A resina é preparada com um “agente espessante”, o qual evita que ela grude nos dedos e facilita o manuseio durante o processo de moldagem. O agente de cura também é adicionado e, para evitar a solidificação imediata, o produto é transportado e armazenado a baixas temperaturas (10 a 15°C).

Nas seções seguintes, são apresentados aspectos de cada um dos principais processos de fabricação.

1.4.1 Processo manual

Esta é a técnica mais antiga e simples de manufatura de componentes. Camadas de fibras de reforço em forma unidirecional, tecido, manta etc., são colocadas manualmente sobre a superfície de um molde. Resina é aplicada sobre cada camada com pincel, espátula ou por *spray*. Mais camadas de reforço e resina são sucessivamente aplicadas, até formar a espessura total desejada. O laminado geralmente cura à temperatura ambiente, embora calor possa ser aplicado para acelerar o processo.

Note-se primeiramente que essa técnica permite apenas o trabalho em moldes abertos, isto é, somente uma das superfícies da peça terá contato com o molde. Essa superfície terá um acabamento superficial tão bom (ou ruim) quanto o acabamento da superfície do molde. Na construção de um tanque de fibras, por exemplo, como se deseja um bom acabamento interno, um molde macho seria preparado e sobre ele seria depositado o composto.

A técnica manual é bastante adequada e usada para resinas de poliéster e epóxi, com fibras de vidro em forma de tecido, manta ou picotadas.

As principais **vantagens e características** da técnica manual são:

- É uma técnica perfeita em situações de **baixo volume de produção**, como na produção de partes de aviões.
- Em relação a **peças de grandes dimensões**, como cascos de barcos, carrocerias, piscina, tanques, os compostos apresentam uma vantagem excepcional, a de permitirem a produção de peças grandes de forma contínua, sem emendas ou uniões. Essa característica reduz o custo das operações necessárias para realizar as uniões e contribui para melhoria da resistência da unidade, quando comparada aos processos de uniões de chapas e vigas por solda, rebites ou parafusos.
- Uma característica geral desse método é o **baixo investimento inicial**. Praticamente não se requer nenhum equipamento, exceto na construção do molde. Isso oferece um contraste drástico em relação, por exemplo, ao investimento em equipamentos necessários ao trabalho com metais.
- No que se refere a custo e **qualificação de mão-de-obra**, bem como treinamento. Todo o processo é de tipo artesanal, o que permite flexibilidade de projeto e facilidade de alterações na estrutura, por meio da modificação do molde.
- Facilidade de construção de painéis-sanduiche. Como será visto em capítulo próprio, esses painéis estão entre os componentes estruturais mais eficientes que existem.

Deve-se observar que várias dessas características tanto podem representar vantagens do processo manual como desvantagens. As desvantagens estão quase sempre associadas à sua característica manual, artesanal.

Como **desvantagens** ou dificuldades da técnica, pode-se apontar o seguinte:

- Requer muita mão-de-obra, sendo difícil de automatizar ou mecanizar a maioria de suas etapas. Essa característica pode ou não constituir um problema, dependendo da legislação trabalhista, do custo e da disponibilidade de mão-de-obra na região.
- A técnica é limitada a baixos volumes de produção.
- Os tempos de cura altos, uma vez que geralmente são usados agentes de cura para temperatura ambiente.
- A qualidade do item depende da habilidade do operário. De qualquer forma, a uniformidade do produto é dificilmente mantida, quer entre uma peça e outra, quer entre partes de uma mesma peça.
- Porcentagem de refugo e desperdício pode ser alta.

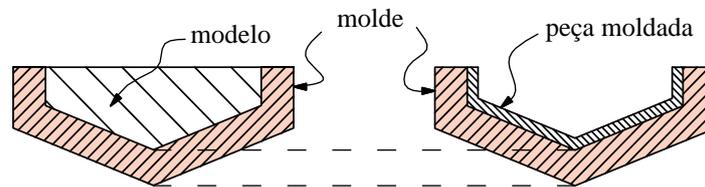


Figura 1.7: Ilustração de modelo, molde (macho, aberto) e peça para o processo manual de moldagem.

Etapas do processo manual

Em geral, o processo envolve as seguintes operações, algumas obrigatórias, outras opcionais:

a) Construção do modelo e molde

Primeiramente é construído um modelo, reproduzindo o mais fielmente possível a forma e as dimensões da peça a ser construída. A função do modelo é unicamente a de ser usado na confecção do molde. Como ilustrado na Figura 1.7, é sobre o molde que será depositado o composto na manufatura da peça. Assim, o molde é um negativo da peça, enquanto o modelo é uma versão similar a ela.

Deve-se notar que, eventualmente, é possível a construção direta do molde, sem partir de um modelo. Isso pode ser mais simples em alguns casos, porém deve-se lembrar que o molde é uma representação negativa da peça, e portanto, a sua ausência pode dificultar a interpretação visual dos detalhes.

Os desenhos das peças, do modelo e do molde, não devem ter sobremedidas, já que a peça fabricada tem a qualidade da superfície do molde, sem necessidade de acabamento.

Os modelos podem ser especialmente construídos, mas também podem ser usadas peças prontas disponíveis. Caso tenham que ser confeccionados, diversos materiais podem ser usados, desde que possam ser facilmente usinados, conformados, sofrer operações de acabamento, ser reutilizados e mantenham estabilidade dimensional. Também é interessante que não se deteriorem e que sejam de baixo custo. Em geral, os mesmos requisitos são desejados para os materiais dos moldes. Diversos materiais são comumente usados para modelo e molde.

Modelos e moldes de madeira – o processo de fabricação, as técnicas de trabalho e equipamentos necessários são os mesmos usados no trabalho de entalhe comum de madeira, usados, por exemplo, na movelaria artesanal. Devem-se usar madeiras nobres que são mais resistentes, mais imunes à absorção de umidade, empenamento e ondulações. Esses problemas constituem uma limitação ao uso prolongado de moldes de madeira.

Modelos e moldes de gesso – são de fabricação simples, porém são facilmente danificados ou riscados. Também são higroscópicos e a presença de umidade dificulta a aplicação e fixação de pintura e ceras desmoldantes.

Modelos e moldes de papel macerado – são também de fabricação fácil e barata, e igualmente sujeitos a danos a cada uso.

Modelos e moldes metálicos – são resistentes ao uso, permitem excelente qualidade superficial, embora dificultem a inclusão de detalhes e irregularidades geométricas. São, via de regra, de confecção cara.

Modelos e moldes de plástico – podem ser tão duráveis ao uso repetitivo quanto os metálicos. Permitem “esculpir” formas com mais facilidade e sua confecção pode ser cara. No procedimento descrito a seguir, considera-se o caso em que o molde é produzido pela laminação de resina reforçada sobre a superfície de um modelo previamente preparado. Dessa forma, a produção do molde é semelhante à produção das peças que serão sobre ele moldadas.

Modelos e moldes mistos – uma forma versátil de construir modelos consiste em empregar diferentes materiais. Por exemplo, suportes de formato simples em metal, detalhes com plástico ou madeira, por exemplo.

De forma geral, observa-se que a técnica de construção de modelos e moldes guarda semelhanças com os moldes e modelos usados em fundição, com uma diferença fundamental, o nível de temperatura envolvido na fusão de um metal e na cura de um plástico. Esse aspecto é que permite, na construção de moldes para compostos, a aplicação de uma gama enorme de diferentes materiais, ao contrário do que se verifica nos moldes de fundição de metais.

b) Preparação do modelo

Lembremos que o modelo deve ser uma réplica, o mais fiel possível, da peça que se deseja fabricar, isto é, qualquer detalhe desejado para a peça deve estar representado no modelo. Assim, alguns aspectos devem ser observados durante o seu projeto:

- Usar ângulos entre superfícies que permitam a desmoldagem. Por exemplo, um molde em forma de calota semi-esférica pode apresentar dificuldade de remoção. Ele pode então ser construído em duas ou mais partes, removíveis uma por vez.
- Considerar o tipo do acabamento superficial, por exemplo liso, texturado, conforme o que se deseja para o molde. Assim, superfícies lisas requerem lixamento mecânico com lixas d'água progressivamente mais finas (de número 400 a 600) até o polimento final.
- Aplicação de desmoldante. Para permitir a desmoldagem, devem ser aplicadas camadas de cera de desmoldagem. A função da cera é a de preencher os poros e rugosidades da superfície do modelo. A penetração de resina nos poros é uma das formas de aderência mecânica que deve ser evitada. Outra função da cera é a de formar uma película delgada não aderente que separe os dois materiais.

De forma geral, diversos produtos de desmoldagem são disponíveis, como:

- ceras sintéticas ou vegetais, como a de carnaúba;
- álcool polivinil (PVA);
- fluorcarbono;
- silicone;
- papéis, filmes e líquidos especiais.

Em geral, uma vez que a cera tenha sido aplicada, não é necessária sua reaplicação antes de várias utilizações do modelo.

c) Aplicação do gel de cobertura (*gel coating*)

A aparência final da peça fabricada pode ser conseguida e melhorada com a aplicação do processo tradicional de pintura sobre ela. No que se refere aos plásticos reforçados, existe uma forma frequentemente mais simples, barata e limpa de conseguir ótimos resultados. A superfície de cobertura da peça com a coloração desejada pode ser incorporada durante o próprio processo de moldagem. Isso substitui, portanto, uma das etapas do processo de fabricação. *gel coating*

O procedimento consiste em aplicar, sobre a camada de desmoldantes, uma camada do chamado *gel coating*, e, sobre ele aplicar as camadas de fibras impregnadas que comporão a peça. Após a desmoldagem, a camada de gel, já curada, constituirá a superfície externa da peça moldada. Produtos comerciais comuns, como banheiras e piscinas, são produzidos dessa forma.

O gel de cobertura é uma resina, normalmente de poliéster, com uma carga de talco industrial para torná-la frágil. (Busca-se um gel frágil para que, em caso de falha do desmoldante, isto é, se a peça permanecer “colada” ao molde após a cura, ela possa ser liberada por meio da ruptura do gel, sem risco de danificar o molde.)

Adicionalmente, o gel de cobertura contém pigmentos para conferir a cor desejada à peça, *peróxido de metil etil cetona* (Mek) como catalisador, e acetona para torná-la fluida e facilitar a aplicação. Finalmente, contém pó de sílica bastante fino, com a finalidade de evitar que o gel escorra sobre superfícies inclinadas. O total de aditivos não deve exceder em cerca de 20% a massa em relação ao total de gel produzido. Em geral, existem géis fabricados e disponíveis comercialmente, dispensando a manipulação de parte dos seus componentes.

O produto cura rápido, em 10 a 15 minutos, o que pode ser verificado por um toque de dedo. As camadas devem ter espessura em torno de 0,5 mm. A aplicação pode ser feita em duas camadas sucessivas, perpendiculares uma à outra.

Após a cura, a laminação pode ser iniciada.

d) Processo de desmoldagem

As peças fabricadas soltam-se dos moldes pela ruptura da película desmoldante. Em moldes pequenos, a área de contato e a força necessária são pequenas e a desmoldagem pode ser feita manualmente. Em peças maiores, ou com geometria complicada, existem alguns “truques” para facilitar a desmoldagem. Por exemplo:

- primeiramente, soltar as bordas com uma espátula delgada;
- introduzir uma cunha de madeira;
- aplicar ar comprimido ou água.

Quando existir dificuldade de extração de moldes fêmeas, pode-se despejar pedras de gelo. A contração da peça facilitará o descolamento. Pancadas moderadas com um martelo de borracha facilitam o descolamento pela aplicação de distorções ao conjunto. A introdução de ar comprimido também é um processo bastante eficiente. O próprio molde pode incorporar bicos nas regiões centrais, para facilitar a aplicação do ar pressurizado.

1.4.2 Processo manual por *spray*

Este processo é uma variação da técnica manual descrita no item anterior. A diferença básica reside na etapa de deposição das camadas de fibra e resina sobre o molde. O processo por *spray* é uma forma parcialmente automatizada da técnica manual.

Nesta técnica, fibra picotada e resina são depositadas simultaneamente sobre o molde por meio de um jato contínuo produzido por um compressor, através de uma pistola, num processo semelhante ao de pintura por pistola. A Figura 1.8 ilustra um dos processos para o uso do *spray*. De um lado, resina e acelerador são precisamente misturados num recipiente, e em outro recipiente, resina e catalisador. Ambos os conteúdos são succionados pelo tubo pressurizado, formando um jato que passa pela pistola.

Simultaneamente, uma ou várias mechas de fibra de vidro são alimentadas por meio de um picador. As fibras picotadas são colhidas por um fluxo de ar comprimido que as carrega à pistola.

Após a deposição, deve-se passar rolos para comprimir o material contra o molde, melhorando a superfície, removendo excessos e eliminando bolhas de ar.

O processo é mais rápido que o manual e apresenta basicamente as mesmas vantagens e desvantagens. Porém, verifica-se uma limitação, a de permitir apenas o trabalho com fibras picotadas. Entretanto, é comum conjugar os dois métodos, isto é, alternar camadas jateadas com camadas de tecido ou mantas depositadas pelo processo manual.

1.4.3 Cuidados gerais de segurança e higiene

Alguns cuidados devem ser tomados, como:

- Não misturar acelerador com catalisador, pois provocam reações violentas. Primeiro misturar o acelerador à resina e depois o catalisador na parte da resina a ser usada imediatamente.
- Untar as mãos com cera para evitar aderência com a resina. Resinas podem provocar queimadura de pele e os solventes, irritação.
- O local de trabalho e armazenamento deve ser ventilado, tendo em vista que vários produtos são voláteis e inflamáveis. A inalação continuada desses produtos pode levar a doenças como anemia e leucemia.
- Fibras em pó ficam em suspensão no ar e causam silicose nos pulmões.
- Quanto mais baixa a temperatura de armazenagem das resinas, maior seu “tempo de prateleira”. Elas têm a tendência natural a se solidificarem ou se alterarem com o passar do tempo.

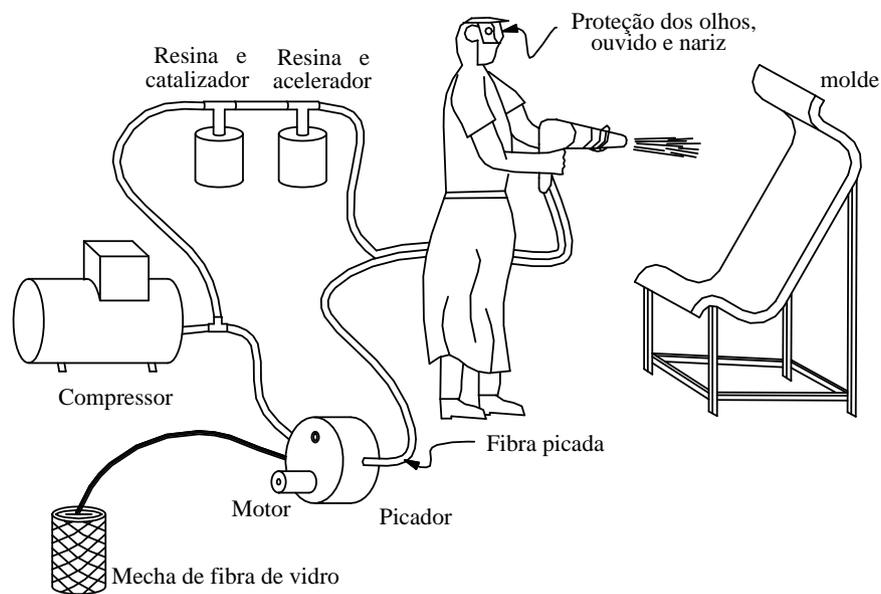


Figura 1.8: Representação esquemática da moldagem por *spray*.

1.4.4 Bobinamento

O bobinamento (*filament winding*) é um processo usado para a produção de componentes de superfície de revolução como tubos, cilindros e esferas. É bastante usado na produção de vasos de pressão e grandes tanques para a indústria química e eixos de transmissão de potência.

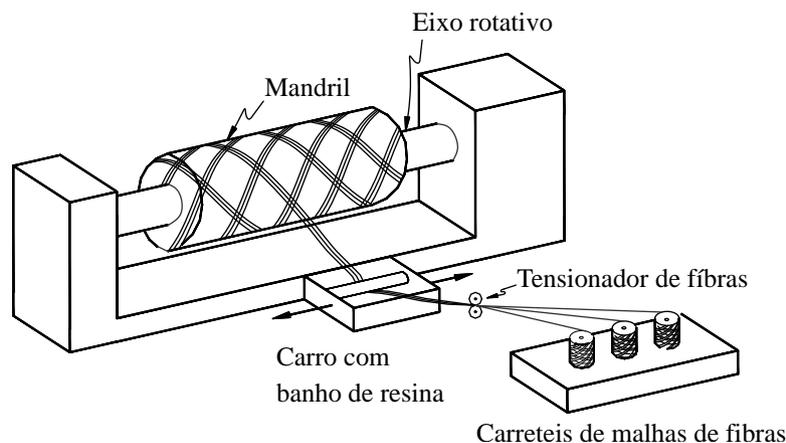


Figura 1.9: Esquemática do processo de bobinamento.

O processo é ilustrado na Figura 1.9. A máquina usada possui basicamente as mesmas características de um torno mecânico de usinagem. De fato, diversas máquinas de bobinamento foram obtidas pela adaptação de tornos. Um mandril, que faz a vez de molde sobre o qual serão enroladas as fibras, é posicionado nos pontos rotativos da máquina. Fibras de diversos carretéis são bobinadas conforme o mandril gira. O posicionamento e o ângulo da fibra são definidos pelo controle das velocidades do mandril e do carro. As fibras são pré-impregnadas com resina e o volume relativo de fibras é controlado pelo seu tensionamento.

Após o bobinamento, o mandril bobinado pode ser levado a um forno para a cura, ou o composto pode ser curado fazendo circular líquido aquecido pelo interior do mandril.

Uma das principais vantagens do método é o de produzir peças com alta porcentagem de fibras uniformemente distribuídas e de forma bastante rápida. Volumes de fibras tão altos quanto 70% são facilmente obtíveis. Deve-se lembrar que, geometricamente, a máxima proporção teórica de fibras

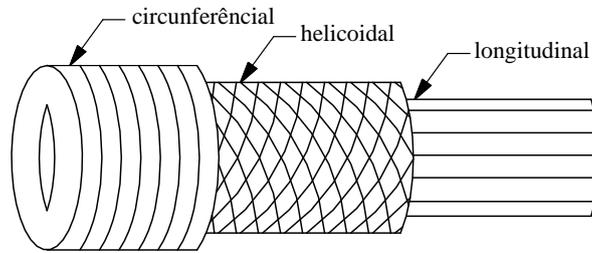


Figura 1.10: Tipos de bobinamento.

de seção circular é 90% do volume do composto.

O nível de resistência obtido depende não apenas do volume de fibras, mas também da orientação das fibras em cada lâmina. A orientação θ da fibra é medida em relação ao segmento axial. Fibras bobinadas em ângulos próximos a $\theta = 90^\circ$ formam os chamados **bobinamentos circunferenciais**, como visto na Figura 1.10. Obviamente, um tubo ou cilindro reforçado unicamente por fibras circunferenciais não teria integridade. Por exemplo, num vaso cilíndrico de pressão de paredes finas, sabe-se que a relação entre as tensões axial/circunferencial segue uma relação $\sigma_t/\sigma_a = (Pr/h) / (Pr/2h) = 2$.¹ Isso sugere claramente a colocação de **lâminas longitudinais**. Fisicamente, porém, as partes rotativas da máquina e as extremidades do mandril impossibilitam a deposição de fibras a $\theta = 0^\circ$. Isso é contornado usando baixos ângulos de bobinamento.

Os **bobinamentos helicoidais** também são usados com ângulos intermediários, de 20° a 70° , por exemplo. Uma das limitações ao uso da técnica de bobinamento refere-se à forma do mandril. Corpos com forma reversa ou de dupla curvatura, apesar de serem de revolução, são difíceis ou impossíveis de serem bobinados, como ilustrado na Figura 1.11.

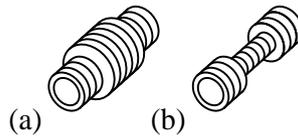


Figura 1.11: Perfis difíceis ou impossíveis de serem bobinados.

Peças de formato completamente inesperado têm sido obtidas por bobinamento, como molas helicoidais e lâminas de feixes de molas de caminhões. Nesse último caso, painéis curvos são obtidos bobinando sobre um mandril de seção elíptica; e, em seguida, são realizados cortes paralelos para formar as lâminas curvas que constituirão o feixe de molas. Outra situação é a produção de placas, como ilustrado na Figura 1.12. Placas produzidas dessa forma tendem a ter grande resistência em virtude do alto volume relativo de fibras conseguido e pelo fato de se usar fibras contínuas em lugar das picotadas ou tecidas.

Um aspecto da técnica que deve ser considerado na etapa de projeto é o processo a ser usado na **remoção do mandril** de dentro do composto, após o bobinamento e cura. Existe uma série de soluções para esse problema, embora ele continue sempre aberto a novas formas de solução.

O corpo a ser formado deve necessariamente ter pelo menos uma abertura num dos polos, para permitir a fixação do mandril à máquina rotativa. Detalhes sobre o processo de bobinamento podem ser vistos em [171] e [74], mas alguns conceitos usuais são os seguintes:

- Mandril feito por segmentos metálicos que podem ser desmontados e removidos por uma das aberturas do corpo.
- Mandril feito por sais eutéticos que posteriormente é dissolvido. Claramente não é reutilizável.

¹Essa é a relação clássica obtida em textos de resistência dos materiais, onde P , r e h são respectivamente a pressão interna, o raio do cilindro e a espessura da parede.

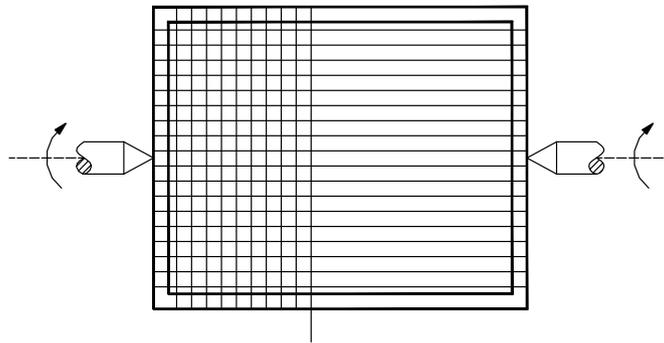


Figura 1.12: Esboço do processo de bobinamento usado na produção de placas de alto volume de fibras.

- A mesma idéia vale para mandris de ligas de baixo ponto de fusão ou gesso.
- Mandril composto por câmara inflável. Essa câmara pode ser removida ou mantida como parte integrante do cilindro, sendo útil, por exemplo, em vedação ou proteção química.
- Tampas ou bocais metálicos para uso definitivo na peça podem ser incorporados aos pólos do cilindro, previamente ao próprio processo de bobinamento.

1.4.5 Trefilação de perfis estruturais

O processo de trefilação (*pultrusion*) de perfis de materiais compostos é um processo automático de geração de perfis contínuos de seção uniforme. Os princípios gerais do processo são ilustrados na Figura 1.13. Uma grande quantidade de fios é puxada através de um banho de resina. As fibras passam então por um dispositivo que dará a forma do perfil desejado, eliminando excessos de resina e bolhas de ar. A barra pré-formada é então curada em processo contínuo e finalmente cortada no comprimento desejado. Podem ser usados fios contínuos ou mantas.

Uma grande variedade de perfis pode ser produzida, como seções circulares maciças e também tubos, perfis L, I, U, T etc.

Uma vantagem desse processo é o alto volume relativo de fibras que ele permite, de 60 a 65% do volume total do composto.

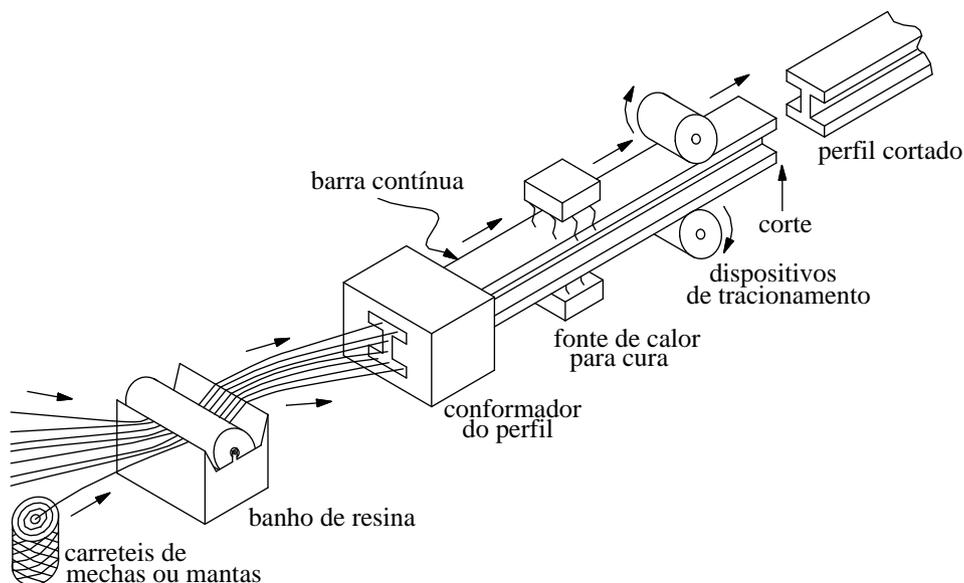


Figura 1.13: Esboço do processo de produção de perfis estruturais por extrusão.

1.4.6 Moldagem por membrana

Os processo de moldagem por membrana constitui um refino do processo manual no qual a superfície externa do composto é recoberta por uma membrana e, com o uso ou de vácuo ou de pressão externa, se consegue:

- A melhoria de qualidade da superfície externa. Lembrando-se que na moldagem manual, apenas a superfície do composto em contato com o molde tem boa qualidade.
- A remoção do excesso de resina, no caso de moldagem molhada. Isso representa aumento na resistência do composto pelo aumento do volume relativo de fibras.
- A expulsão de bolhas de ar aprisionadas. Esse ar, se deixado, pode em alguns casos, chegar a 5% em volume. Com o processo de expulsão, chega-se a valores como 0,1% do composto curado.

Os processos de moldagem por membrana são dos mais antigos. É costume dividi-los em três tipos:

- moldagem a vácuo
- moldagem à pressão
- moldagem em autoclave

Estes processos estão esquematizados nas Figuras 1.14 a 1.16. Note que não necessariamente eles sejam mutuamente excludentes. Pelo contrário, são em geral usados em conjunto. Como os sistemas a vácuo e a pressão são análogos, será considerado com mais vagar apenas o primeiro. As etapas principais do processo a vácuo são:

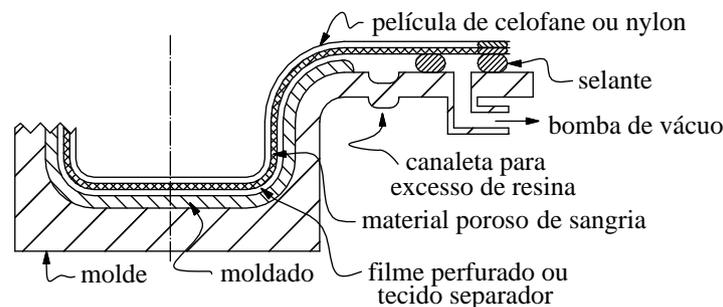


Figura 1.14: Esboço dos principais componentes do processo de moldagem por membrana a vácuo.

- Cobrir o moldado com uma película separadora perfurada, para evitar adesão com as demais membranas.
- Cobrir a película separadora com camadas de material poroso. Esse material, como feltro, deve permitir o fluxo de ar e a saída do excesso de resina.
- Posicionar uma tira de juta, ou outro material semelhante, logo após a borda do moldado.
- Cobrir o conjunto com uma película de celofane ou náilon. Aplicar uma resina selante nas bordas da película.
- Lentamente aplicar vácuo enquanto se elimina com rolos as rugas das membranas e o excesso de ar. O excesso de resina do moldado deve ser conduzido às bordas do molde.
- Manter o conjunto sob pressão de vácuo até que a cura se complete, quer seja a temperatura ambiente quer seja em forno.

O processo de moldagem à pressão é análogo ao descrito, apenas as membranas são forçadas ao encontro do moldado por pressão externa. Essa pressão pode ser de até 0,35 MPa (3,5 atm) e

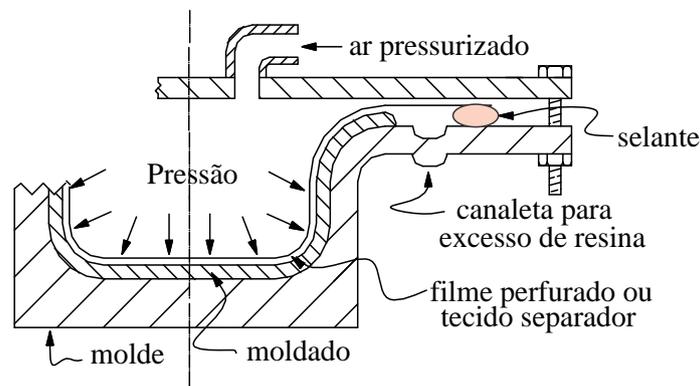


Figura 1.15: Esboço dos principais itens do processo de moldagem por membrana à pressão.

geralmente esse método é preferível ao processo a vácuo, por ser mais efetivo no aumento do volume relativo de fibras.

O processo por autoclave, Figura 1.16, é o processo-padrão na indústria aeroespacial. É usado na fabricação com pré-impregnados, embora, em geral, possa ser usado com qualquer tipo de fibras nos processos molhados já descritos nas seções sobre o processo manual.

Autoclave é simplesmente um vaso de pressão aquecido, no qual todo o conjunto, o molde, moldado e membranas, é colocado e submetido a um ciclo especificado de temperatura e pressão para a cura. As pressões aplicadas ficam na faixa de 0,25 MPa a 0,7 MPa (2,5 atm a 7,0 atm).

Autoclaves existem em uma larga faixa de tamanhos, desde modelos de bancada para laboratórios até unidades de 5 metros de diâmetro para a cura de partes de aeronaves.

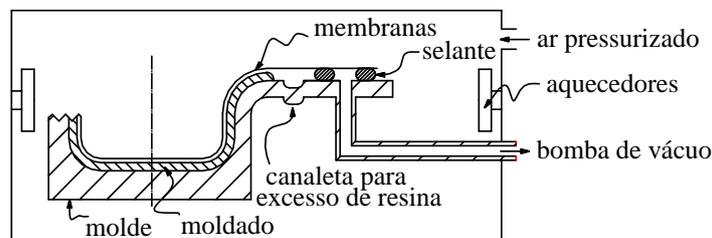


Figura 1.16: Esboço dos principais itens no processo de moldagem em autoclave.

1.4.7 Processo com preformados

Em geral, os processos de produção de compostos vistos anteriormente, especialmente os processos manuais, constituem os chamados processos úmidos ou molhados, isto é, a moldagem é feita trabalhando com a resina em sua forma líquida, para permitir sua impregnação no reforço. Existe toda uma outra classe de processos, chamados processos com preformados (também denominados premixes ou pré-impregnados). Esses preformados são disponíveis comercialmente para a fabricação de peças. Eles vêm com as fibras impregnadas por resina já parcialmente curada. Isso permite métodos de produção de moldados de forma mais limpa, rápida e uniforme, embora frequentemente de forma também mais cara que os métodos molhados.

Geralmente os premixes são classificados em três tipos:

- prepregs;
- chapa preformada (*Sheet Molding Compounds*, SMC);
- blocos preformados (*Bulk* ou *Dough Molding Compound*, BMC, DMC).

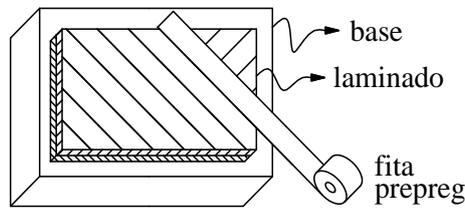


Figura 1.17: Uso de fita prepeg para moldagem manual a seco.

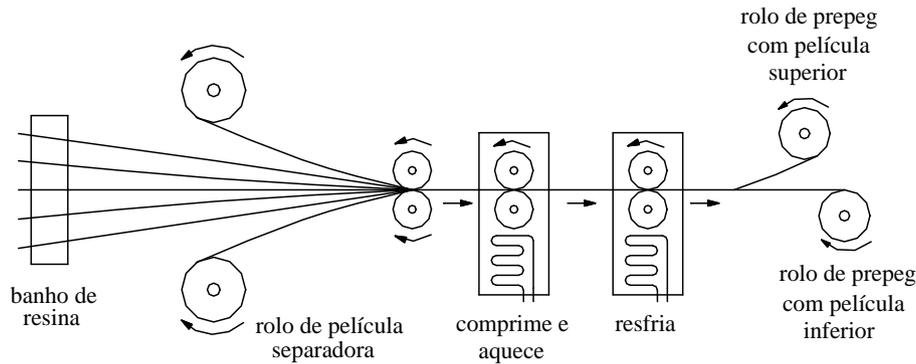


Figura 1.18: Esboço do processo de fabricação de preregs.

Fitas preregs

Uma das maiores revoluções na tecnologia de fabricação de compostos foi o desenvolvimento das fitas preregs. Elas se constituem de uma fita de fibras pré-impregnadas por resina polimérica, geralmente epóxi. As fibras são de vidro, carbono ou aramídeas, em forma contínua ou picotada, unidirecionais ou aleatórias. Em geral, a resina nos preregs não contém espessantes, cargas, pigmentos ou outros aditivos. A Figura 1.17 ilustra a moldagem usando fita prepeg.

Um dos processos de fabricação de fitas preregs é esboçado na Figura 1.18. As fibras são tracionadas através de um banho de resina e são sanduichadas entre duas folhas de papel impregnado de silicone ou película de polietileno. Essas folhas têm a função de evitar aderência e são removidas no momento de uso do prepeg. O conjunto formado pelas fibras, resina e películas é comprimido e aquecido até uma cura parcial. É em seguida resfriado, as rebarbas são cortadas e removidas, a folha é cortada na largura da fita e bobinada.

Preregs podem ser feitos de termofixos ou termoplásticos. No caso de termofixos como o epóxi, eles são parcialmente curados e a fita deve ser mantida sob refrigeração até seu uso final. No caso de termoplásticos, a fita pode ser armazenada à temperatura ambiente até que seja refundida durante seu uso final.

A Figura 1.17 ilustra a moldagem usando preregs. Note que o moldado pode ter qualquer formato passível de ser conformado em molde aberto, não apenas plano. Após a moldagem o conjunto deve ser curado sob pressão e calor, usando um dos processos de membrana. Também pode ser usado no processo de bobinamento.

Placa e bloco preformado

Os blocos preformados são “tijolos” constituídos por uma mistura de resina, reforço, cargas e, eventualmente, pigmentos e outros aditivos. O reforço pode ser vidro, algodão ou qualquer outro material adequado, geralmente picados em comprimentos de 3 mm a 10 mm. Como a mistura é feita sob a forma líquida, em tanque, até atingir uniformidade de composição, o máximo volume relativo de fibras não passa, em geral, de 20%.

A utilização típica desses blocos preformados é ilustrada na Figura 1.19a, onde se observa a técnica de moldes duplos, de encaixe. Dois moldes são preparados com finas tolerâncias dimensionais para

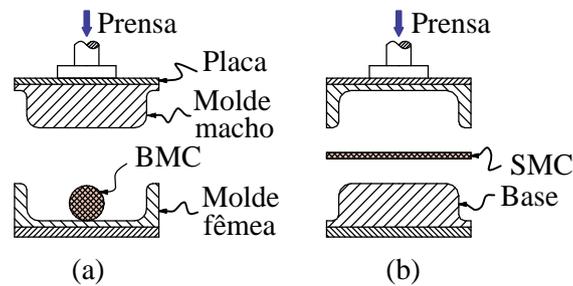


Figura 1.19: Moldagem por compressão usando bloco (BMC) e chapa (SMC) preformados, nas figuras (a) e (b) respectivamente, em moldes de encaixe.

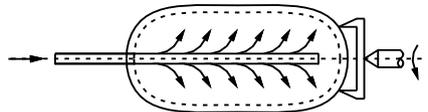


Figura 1.20: Esboço do processo de moldagem por centrifugação.

a peça, de forma que ambas as faces desta são obtidas com qualidade. O preformado é submetido a altas pressões, até 35 MPa (350 kgf/cm²) e temperaturas de até 500°C.

Os custos de preparação dos moldes e as dificuldades de aplicação das forças necessárias de compressão fazem com que esse processo seja mais usado (mas não exclusivamente) na produção em série de peças de pequenas dimensões.

As chapas preformadas (SMC) são geralmente usadas de forma semelhante aos blocos, como ilustrado na Figura 1.19b. Essa é uma importante inovação intensamente usada na indústria automobilística. As chapas SMC são similares às fitas prepregs, mas são produzidas de forma invariavelmente plana, são espessas, compostas por resina poliéster e fibras de vidro picotadas, em vez de fibras contínuas como geralmente são os prepregs. Também as chapas SMC diferem dos blocos BMC, na forma e no conteúdo de fibras, de 20 a 35% em volume. O processo de fabricação também permite fibras mais longas, de 20 a 50 mm, o que implica propriedades mecânicas superiores.

O processo de produção das chapas preformadas SMC é, grosso modo, semelhante ao das fitas prepregs, visto na Figura 1.18, exceto que resina é impregnada sobre as películas separadoras e sobre estas é distribuída a fibra picada.

1.4.8 Outros processos de fabricação

Método por centrifugação

Este processo é utilizado na produção de peças de revolução e pode ser entendido como “oposto” ao bobinamento, isto é, o mandril rotativo é preparado para ser moldado por dentro. Resina e fibras picotadas são introduzidas por um tubo no interior do mandril por um dos pólos do conjunto. A força centrífuga força os componentes contra a parede durante o processo de cura. A cura é acelerada fazendo fluir ar quente pelo interior do mandril.

Moldagem rápida com termoplásticos

Vários dos processos vistos têm a desvantagem de serem lentos. Processos rápidos que permitam produção em alta escala são necessários em indústrias como a automobilística, por exemplo. Um dos processos usados é o de moldagem com termoplásticos, esboçado na Figura 1.21. Primeiro são montados laminados com fitas prepreg de termoplásticos. Esses laminados são chamados *blanks*. Os *blanks* são transportados continuamente por esteira através de um forno infravermelho no qual o plástico é aquecido até quase a fusão. O *blank* aquecido é então colocado nos moldes, prensado e resfriado, quando se tem a peça pronta.

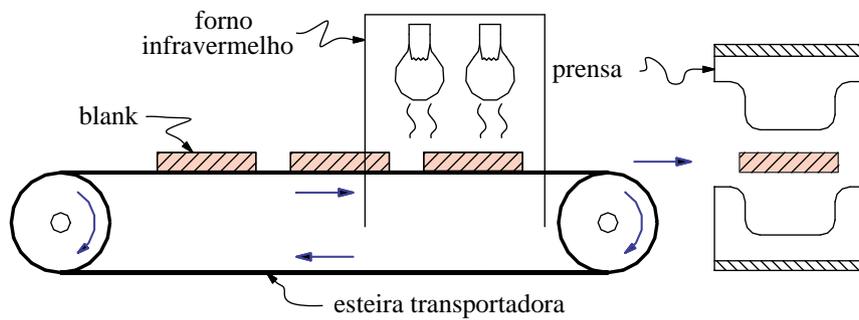


Figura 1.21: Esboço do processo de moldagem de termoplásticos.

1.5 Exercícios

- 1.1 Defina um material composto. Busque outras definições na literatura e compare seus significados.
- 1.2 Comente três vantagens e três desvantagens dos compostos em relação aos materiais convencionais.
- 1.3 Por que um material em forma de fibra apresenta maior resistência que em forma de bloco?
- 1.4 Qual a utilidade da matriz num material composto?
- 1.5 O que são ligações cruzadas? Em que são importantes?
- 1.6 Caracterize os polímeros termofixos e termoplásticos.
- 1.7 Qual a diferença entre agente de cura e catalisador?
- 1.8 O que são e para que servem as cargas?
- 1.9 Descreva três estratégias para lidar com o “problema do mandril” no processo de fabricação por bobinamento.
- 1.10 O que são e como são usados os blocos e folhas preformadas?
- 1.11 Como podem ser usadas as fitas prepregs?
- 1.12 Comente os processos de fabricação por membrana.
- 1.13 Quais as vantagens e desvantagens relativas no uso de polímeros termofixos e termoplásticos em relação à fabricação dos diversos tipos de peças e componentes existentes?

