

Tecnologia de Fabricação de Pré-Impregnados para Compósitos Estruturais Utilizados na Indústria Aeronáutica

Luiz C. Pardini e Rodolfo J.C. Peres

Resumo: Os pré-impregnados são a matéria-prima básica para a manufatura de compósitos estruturais na indústria aeronáutica. No processamento de compósitos, ao mesmo tempo em que se faz o material em si (utilizando-se o pré-impregnado), realiza-se a operação de manufatura da peça acabada, na qual o pré-impregnado é ajustado a uma determinada superfície ou molde. A obtenção de pré-impregnados é feita com a utilização de matrizes termorrígidas e termoplásticas e fibras de reforço tecidas ou unidirecionais. O presente trabalho discute os passos envolvidos na obtenção desses materiais intermediários. Pré-impregnados com matrizes termorrígidas e fibras de carbono ainda são os mais utilizados na obtenção de peças de aeronaves. A resistência mecânica de estruturas manufaturadas em compósitos são comparadas, com relação ao peso e à rigidez, com estruturas equivalentes em materiais metálicos.

Palavras-chave: *Compósitos estruturais, tecnologia de pré-impregnados, matrizes poliméricas, fibras de reforço, processos de fabricação*

Introdução

Os primeiros materiais pré-impregnados surgiram a partir do entelamento de aeronaves. Esse entelamento era realizado usualmente com tecidos de poliéster e um verniz impermeabilizante. O método permitia assim a impermeabilização das superfícies da aeronave. Posteriormente, a indústria eletro-eletrônica deu novo impulso à tecnologia de pré-impregnados. Circuitos impressos eram manufaturados com pré-impregnados utilizando tecidos de fibras de vidro e matriz epóxi com rígidos requisitos de qualidade. Desde o advento das fibras de carbono a indústria aeronáutica tem se utilizado dessa tecnologia na fa-

bricação de peças para aeronaves, resultando em ganho de peso e na concepção da peça de forma integrada¹.

Genericamente, o *pré-impregnado* é um produto intermediário, pronto para moldagem, e pode ser definido como sendo uma mistura (ou composição) de fibras de reforço — ou até mesmo de papel — com um determinado polímero, termorrígido formulado ou termoplástico, em uma particular fração em peso. O termo *pré-impregnado* será tratado aqui apenas como correspondente à fibra de reforço/matriz polimérica. Equipamentos especiais são utilizados na fabricação desses materiais².

Luiz C. Pardini, Centro Técnico Aeroespacial, Instituto de Aeronáutica e Espaço, Divisão de Materiais - AMR - CEP 12228-904, São José dos Campos - SP; Rodolfo J. de C. Peres, Empresa Brasileira de Aeronáutica, Av. Brigadeiro Faria Lima, 2170 - CEP 12227-000, São José dos Campos - SP.

Processos de fabricação de pré-impregnados

Pré-impregnados com matriz termorrígida

As duas matérias-primas básicas para a produção de pré-impregnados são a matriz polimérica e a fibra de reforço na forma de tecidos ou mechas unidirecionais. Há vários processos de fabricação de pré-impregnados que podem ser combinados entre si. Dentre esses processos destacam-se os métodos em que o polímero está em solução ou fundido, e os métodos de polímero em emulsão, polimerização superficial, filme polimérico, pó seco, e tecelagem híbrida. O processo que converte o pré-impregnado manufaturado com matriz termorrígida em uma peça infusível sob a ação do calor e pressão é conhecido como "cura"^{3,4}. Um compósito totalmente curado passa por um processo em que, teoricamente, foram consumidos todos os grupos químicos disponíveis para a transformação do pré-impregnado em um sólido infusível.

O conjunto matriz polimérica / fibra de reforço (*pré-impregnado*) é fornecido ao moldador com proteção contra eventuais contaminações constituída por camadas de filmes separadores, geralmente de polietileno liso ou corrugado. Os pré-impregnados têm as seguintes vantagens em relação aos demais métodos de produção de peças de compósitos^{2, 4}:

- integridade física durante o manuseio;
- tempo de utilização e armazenagem que chega a vários meses, dependendo da temperatura de armazenagem, e dependendo da matriz polimérica utilizada, pode prolongar-se indefinidamente;
- viscosidade controlada para facilitar processamento;
- ciclos de cura e propriedades mecânicas que podem ser ajustados de acordo com a necessidade;
- toxicidade reduzida;
- garantia da qualidade do desempenho do conjunto matriz polimérica / fibra de reforço podendo esta ser avaliada mediante testes de controle de qualidade após a fabricação dos componentes.

A Fig. 1 mostra um fluxograma esquemático da tecnologia envolvida na manufatura de pré-impregnados tendo como matrizes polímeros termorrígidos⁴. Pode-se observar pelo fluxograma que a formulação da matriz compreende a adição de endurecedores, catalisadores de reação e outros aditivos, como agentes tenacificantes ou diluentes. Há um grande número de matrizes poliméricas termorrígidas, além de endurecedores, utilizados na fabri-

cação de pré-impregnados. As estruturas químicas de duas resinas termorrígidas muito utilizadas como matrizes em pré-impregnados são mostradas na Fig. 2^{3,5}. A Fig. 2a mostra a estrutura química da resina epóxi baseada no diglicidil éter do bisfenol-A (DGEBA), e a Fig. 2b mostra a estrutura química da resina epóxi baseada no tetraglicidil metileno diani-

Tabela 1. Propriedades físicas típicas de resinas epóxi utilizadas em pré-impregnados^{4,5}.

	TGMDA	DGEBA
Peso equivalente em epóxi	117-133	182-190
Viscosidade (mPa.s)		
25 °C	*	~12000
50 °C	~20000	~1000
Densidade	1,15 - 1,20	

* semi-sólida

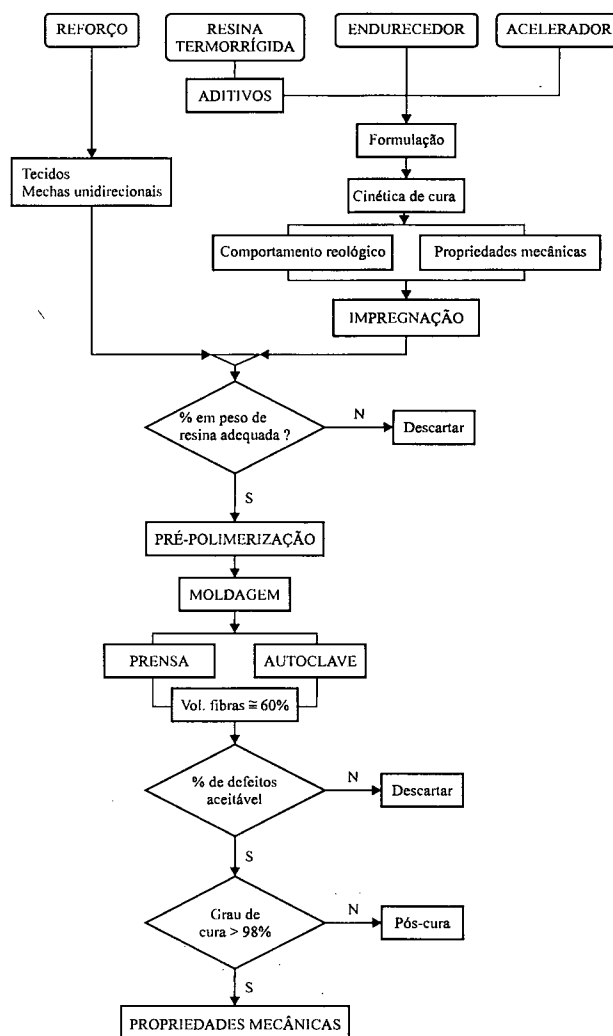


Figura 1. Fluxograma esquemático representativo da fabricação de pré-impregnados de fibra de reforço/matriz polimérica termorrígida⁴.

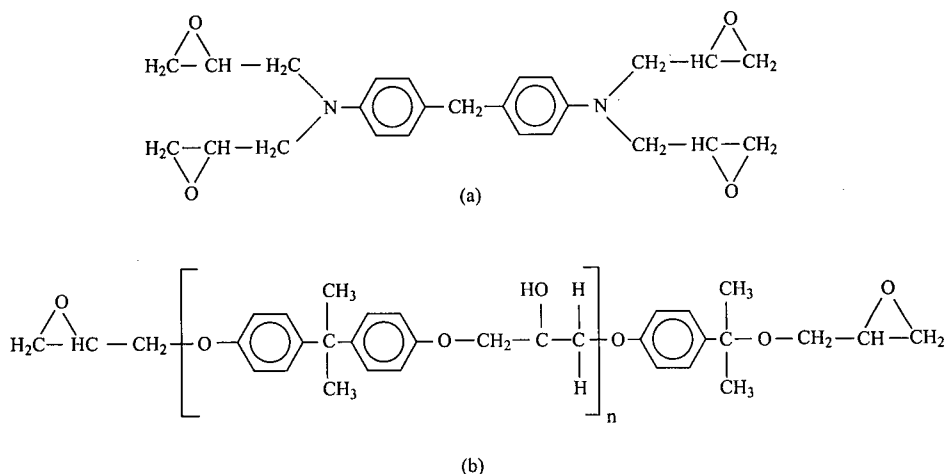


Figura 2. Estruturas químicas de resinas termorrígidas típicas utilizadas na manufatura de pré-impregnados: (a) Tetraglicidil Metileno Dianilina (TGMDA); (b) Diglicidil Éter do Bisfenol-A (DGEBA).

lina (TGMDA). A Tabela 1 mostra propriedades típicas destas duas resinas^{6,7}. Observa-se a alta viscosidade da resina epóxi TGMDA mesmo a 50 °C, em relação a resina DGEBA. É procedimento comum a utilização de blendas destas duas resinas na manufatura de pré-impregnados. Quando a formulação a ser utilizada na manufatura do pré-impregnado tem viscosidade alta (~15000 mPa.s), é usual a utilização de um solvente, como por exemplo, metil etil cetona, com o intuito de reduzir a viscosidade e facilitar a impregnação. Estruturas químicas de endurecedores também comumente utilizados nas formulações são mostrados na Fig. 3a, difenil diamino metileno (DDM), e na Fig. 3b, difenil diamino sulfona (DDS). Esses endurecedores conferem ao compósito obtido temperatura de transição vítrea (Tg) na faixa de 150 a 200 °C.

Após definida a formulação e calculada a porcentagem adequada de endurecedor e aditivo (se conveniente), procede-se ao estudo da cinética de cura e do comportamento reológico da formulação. São avaliadas inicialmente as propriedades mecânicas da formulação previamente projetada, com o intuito de estipular valores básicos de controle. A Tabela 2 mostra propriedades mecânicas típicas para a formulação DGEBA(100)/DDM(27). Ensaio de tração em polímeros são normatizados pela norma ASTM D-638. Os parâmetros obtidos com as análises realizadas até esse estágio de manufatura são de fundamental importância para a determinação da viscosidade adequada no processo de impregnação (usualmente na faixa 50-100 mPa.s).

Nessa fase é necessário definir o tempo para que as fibras de reforço previamente impregnadas sejam tratadas termicamente a uma determinada tempera-

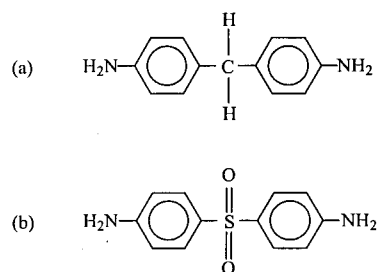


Figura 3. Estruturas químicas de endurecedores típicos de resinas termorrígidas utilizados na manufatura de pré-impregnados: (a) Difenil diamino metileno (DDM); (b) Difenil diamino sulfona (DDS).

Tabela 2. Propriedades mecânicas típicas da formulação DGEBA(100)/DDM(27). Ciclo de cura: 2 h a 55 °C, 2 h a 100 °C, 2 h a 150 °C e 2 h a 180 °C.

Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Coefficiente de Poisson	ϵ (%)	Módulo de cisalhamento(*) (GPa)
73,4	2,8	0,3	9,14	1,10

*Calculado utilizando $G = E/2(1 + \nu)$.
(ϵ = deformação).

tura. Esse tratamento possibilitará a ocorrência de um estágio de pré-polimerização da formulação conhecido como estágio-B, que ao final do processo irá fornecer o material pré-impregnado com características adequadas para manufatura de compósitos estruturais. É importante o controle da porcentagem em peso de matriz formulada incorporada ao reforço, evitando excesso para não reduzir a fração volumétrica de fibras no compósito moldado e também evitando a escassez para não introduzir vazios e áreas secas no compósito.

O pré-impregnado pode ser moldado por prensagem ou em autoclave. Cada um desses métodos tem particularidades de processo que irão objetivar a obten-

ção de uma fração volumétrica de fibras de cerca de 60% que, teoricamente, permite o envolvimento de todas as fibras de reforço e a obtenção de compósitos sem defeitos. Se o compósito não possuir defeitos, uma fração volumétrica de 60% teoricamente permite envolver todas as fibras de reforço. A porcentagem de defeitos (geralmente na forma de vazios) para aceitação da peça é estabelecida pelo moldador, entretanto é desejável que a porcentagem se mantenha abaixo de 2% em volume. A cura da peça deve ser realizada de modo a garantir um grau de cura maior que 98%, assegurando assim que a peça esteja totalmente consolidada.

A impregnação é realizada em equipamentos especiais, como mostrado esquematicamente na Fig. 4; onde as fibras de reforço são imersas na formulação resina epóxi / endurecedor. O processo de imersão geralmente é utilizado para a impregnação de tecidos, devido à dificuldade de penetração da formulação em regiões de cruzamento de fibras. Por esse motivo, tanto a viscosidade quanto a tensão superficial da formulação (resina termorrígida / aditivo / endurecedor), medida através do ângulo de contato, são fatores importantes a serem ajustados para uma boa molhabilidade do reforço. Embora de pouca utilização em comparação a pré-impregnados de tecido, os pré-impregnados com fibras unidirecionais são processados de maneira que a aplicação da formulação se processe no filme protetor (separador), e posteriormente as fibras entram em contato com o mesmo. É necessário um rígido controle da espessura do filme de formulação depositado no filme protetor.

O estágio-B corresponde ao estado em que uma quantidade parcial de ligações cruzadas disponíveis na composição da formulação foi efetuada. Foi verificado que, quando a matriz termorrígida utilizada no

pré-impregnado for resina epóxi, a quantidade adequada de ligações cruzadas a serem efetuadas para obtenção do estágio-B estava entre 25 e 30% do total de grupos epóxi disponíveis para o processo de cura total⁹. Nessa situação, o pré-impregnado obtido tem propriedades de fluxo, adesividade e conformabilidade ao molde que possibilitem a obtenção de um compósito estrutural com qualidade adequada. Praticamente, pode-se estabelecer a porcentagem de consumo de grupos epóxi pela utilização do método analítico de calorimetria diferencial. Este método permite obter o calor total de reação da formulação por meio de varredura dinâmica, e também o calor parcial de reação a uma dada temperatura por meio de varredura isotérmica. A Fig. 5 mostra um exemplo típico dessa análise, utilizando resina DGEBA e endurecedor DDS. A varredura dinâmica (Fig. 5a) mostra uma reação exotérmica com calor total de reação de ~325 J/g. A isoterma de reação a 170 °C (Fig. 5b) mostra também uma reação exotérmica com calor de reação de 75-80 J/g. O resultado mostrou que

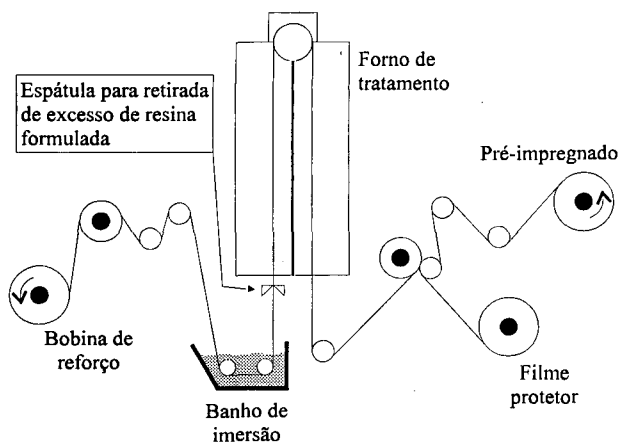


Figura 4. Diagrama esquemático de um equipamento de impregnação por processo de imersão.

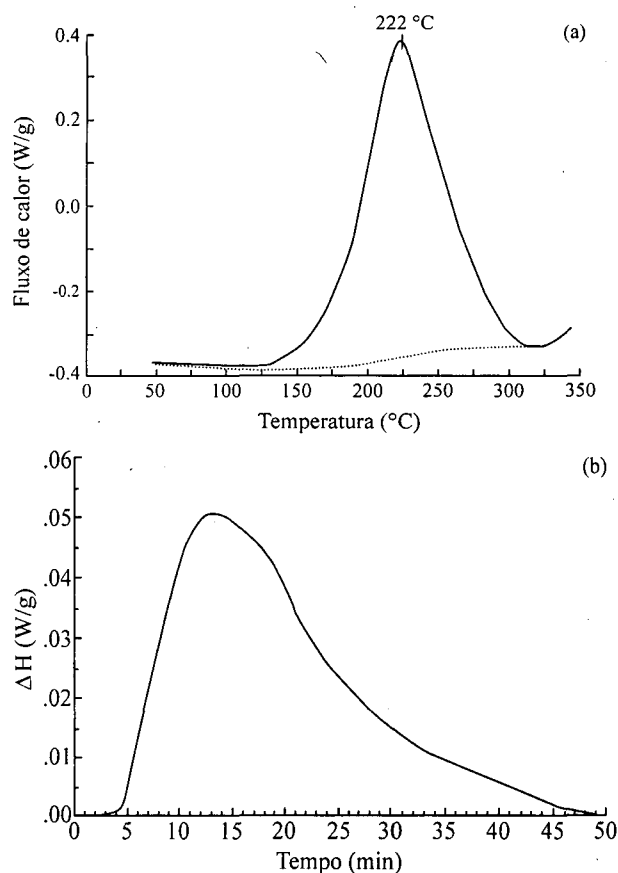


Figura 5. Calorimetria diferencial de varredura da formulação resina epóxi DGEBA e endurecedor DDS. Proporções: DGEBA(100)/DDS(30). (a) varredura dinâmica (~325 J/g), taxa de aquecimento: 10 °C/min; (b) isoterma de reação a 170 °C (75-80 J/g).

o calor parcial de reação a 170 °C corresponde a ~25% do calor total de reação, e a reação completou-se em 50 minutos. Estes parâmetros fornecem dados que delineiam condições de operação no forno de tratamento (Fig. 4) durante o processo de pré-impregnação.

De uma forma geral o processo de cura, e ainda o caso particular de resinas epóxi, pode ser descrito como uma reação de primeira ordem, o que significa que a cura a uma temperatura isotérmica avança como uma função exponencial (conforme mostra a Fig. 6). A taxa de cura (α) é fornecida pela equação^{9,10}:

$$\alpha = 1 - \exp[-k, t] \quad (1)$$

onde a taxa de cura (α) tende à unidade, enquanto o tempo (t) tende ao infinito e k é a taxa de reação, enquanto a derivada $d\alpha/dt = \dot{\alpha}$ tende a zero, conforme a equação:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k_i \exp[-k_i t] \quad (2)$$

onde k_i = a taxa de reação a uma temperatura isotérmica T_i .

Portanto, os parâmetros relacionados à viscosidade e cinética de cura vão determinar os parâmetros de processo na cuba de impregnação e no forno de tratamento, conforme mostra a Fig. 4. Sob o ponto de vista físico-químico, a formulação no estágio-B está congelada entre as fases de gelatinização e associada à formação de moléculas ramificadas, induzindo um aumento no módulo viscoelástico entre o estado inicial, líquido, e a fase de vitrificação, em que o nível de conversão do material e a temperatura são tais que os segmentos das moléculas ramificadas tornam-se

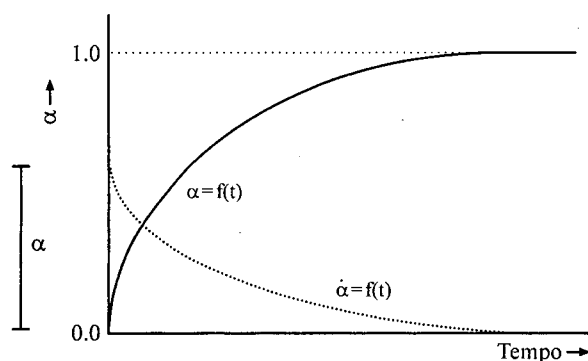


Figura 6. Taxa de cura e primeira derivada equivalente ao tempo de exposição, ou cura, isotérmica.

praticamente imobilizados, e nesse ponto a reação química, para efeitos práticos, está encerrada^{11,12,13}.

Quando os reforços utilizados estão na forma de tecidos, as gramaturas utilizadas podem variar de 50 a 250 g/cm²⁹. O processo de impregnação por imersão é realizado em equipamentos cuja ilustração esquemática é mostrada na Fig. 4. Do ponto de vista mecânico, a função do equipamento é assegurar um fluxo de polímero previamente formulado para o sistema capilar do reforço. A utilização de espátulas é aconselhada após a passagem pela cuba de impregnação com o objetivo de auxiliar a impregnação do reforço. O pré-impregnado é então envolvido com um filme polimérico desmoldante e armazenado a baixas temperaturas, usualmente -5 °C, para posterior utilização.

Pré-impregnados com Matriz Termoplástica

Os métodos de obtenção de pré-impregnados com matrizes termoplásticas são diferentes dos obtidos com matrizes termorrígidas, nas quais são utilizados basicamente os métodos de tecelagem híbrida e deposição

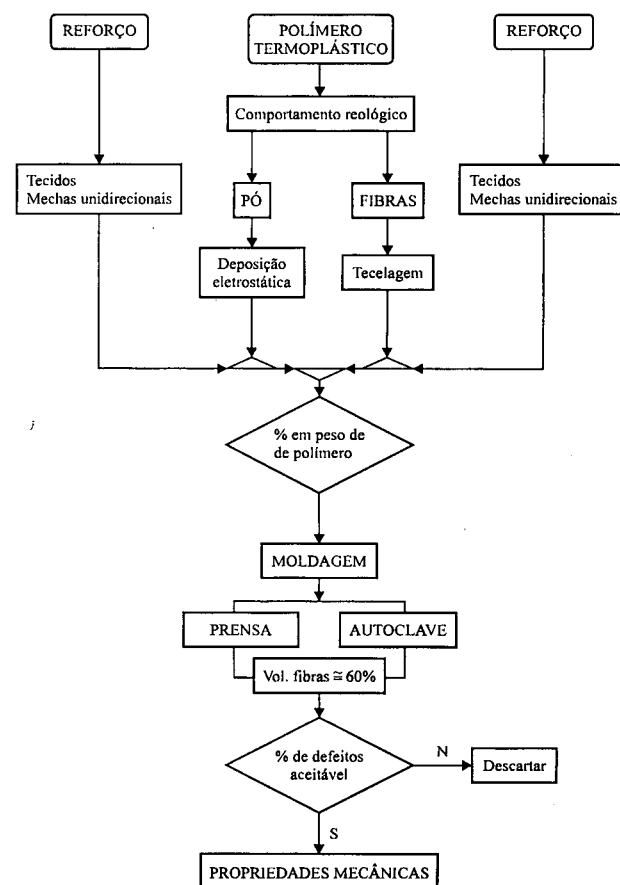


Figura 7. Fluxograma esquemático representativo da fabricação de pré-impregnados de fibra de reforço / matriz polimérica termoplástica.

utilizando polímero em forma de pó^{14,15,16}. A Fig. 7 mostra um fluxograma esquemático das operações de fabricação de pré-impregnados utilizando polímeros termoplásticos. De maneira similar aos pré-impregnados termorrígidos, é fundamental o entendimento do comportamento reológico do polímero termoplástico que será utilizado como matriz na manufatura de pré-impregnados termoplásticos. Entretanto, as características reológicas a serem determinadas serão de utilidade quando da operação de moldagem, pois não há similaridade entre o processo de manufatura de *pré-impregnados* que utiliza como ponto de partida matriz termoplástica e o que utiliza matriz termorrígida em sua formulação. Isso se deve a dificuldades de dissolução de polímeros termoplásticos em solventes voláteis para incorporação de fibras de reforço^{15,16}. Conforme se pode verificar pela Fig. 7, o polímero termoplástico pode ser depositado eletrostaticamente ou ser tecido, na forma de fibras, com o reforço a ser utilizado.

Os compósitos estruturais manufaturados a partir de filamentos poliméricos e de reforço não se constituem, em essência, de um *pré-impregnado*, mas sim de um material pré-formado, híbrido de fibra de reforço e fibra polimérica. A Fig. 8 mostra exemplos de materiais pré-formados para fabricação de compósitos estruturais do tipo fibra de reforço/matriz termoplástica¹⁵. Uma característica importante quando esse tipo de material é utilizado relaciona-se com a conformabilidade do conjunto a contornos complexos. Há que se considerar o fato de que mate-

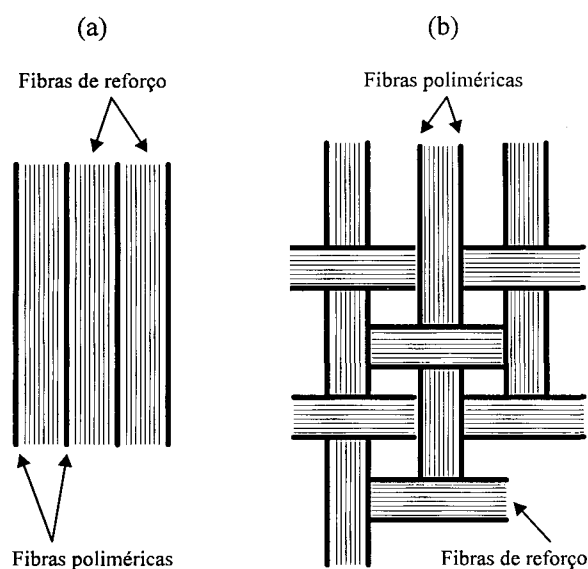


Figura 8. Diferentes formas de tecelagem híbrida fibras de reforço / polímero de reforço. a: Unidirecional; b: Tecido¹⁵.

riais pré-formados híbridos têm que ser obtidos utilizando-se filamentos que possam ser tecidos com a tecnologia disponível de tecelagem para a produção de *pré-impregnados* flexíveis. Além disso, nem todos os termoplásticos de interesse estrutural são passíveis de se obter na forma de filamento para tecelagem, sendo fundamental que todas as fases do processo de fabricação do compósito sejam investigadas previamente à fabricação do pré-formado híbrido.

Compósitos com matriz termoplástica têm tenacidade à fratura e resistência ao impacto no mínimo dez vezes maior que compósitos com matriz termorrígida. O tempo de processamento de compósitos com matriz termoplástica é também relativamente curto (2-15 min) em relação aos compósitos com matriz termorrígida (2-8 horas), e não se tem limite estabelecido de validade para sua utilização.

Um dos métodos mais atraentes para fabricação de pré-impregnados com matrizes termoplásticas é o de deposição eletrostática¹⁶. Nesse método, polímeros em pó são carregados eletrostaticamente e fluidizados em uma câmara onde aderem a mechas de filamentos de reforço. O polímero depositado é então fundido sobre as mechas por aquecimento, usualmente sob a ação de rolos de pressão, aderindo de forma permanente às fibras. A Fig. 9 mostra um desenho esquemático do processo de deposição eletrostática de polímeros na forma de pó para obtenção de pré-impregnados com matriz termoplástica.

As condições de processo que vão determinar a quantidade de polímero em pó aderido à mecha de reforço são, basicamente, tamanho da mecha e da granulometria do pó polimérico, tempo de residência da mecha de reforço na câmara e nível de espalha-

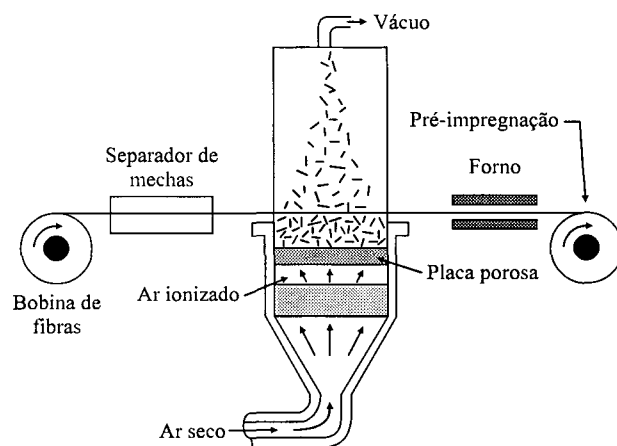


Figura 9. Desenho esquemático do processo de recobrimento eletrostático em leito fluidizado para manufatura de pré-impregnados contínuos de fibra de reforço / matriz termoplástica¹⁴.

mento da mesma, fluxo de ar e voltagem. Segue-se um exemplo das condições típicas de processo que resultam em um pré-impregnado termoplástico manufaturado de poli(éter-éter-cetona) (PEEK) tendo 60%/volume de fibras de carbono são as seguintes¹⁶:

Tamanho de partícula (μm)	~110
Tempo de residência dentro da câmara (s)	~6,7
Voltagem do leito (kV)	~80
Temperatura do forno ($^{\circ}\text{C}$)	~550
Fluxo de ar (cm/s)	4,7

Fabricação de pré-impregnados em escala laboratorial

Na manufatura de pré-impregnados unidirecionais com matriz termorrígida, em escala laboratorial e com finalidade acadêmica, pode-se utilizar um método simples cujo diagrama esquemático é mostrado na Fig. 10.

O processo envolve a bobinagem circunferencial de filamentos de reforço que são previamente impregnados, em uma cuba, com a formulação de resina termorrígida / endurecedor. O mandril é previamente revestido por um filme antes da bobinagem e, completada a operação, um novo filme é utilizado para proteger o conjunto. A lâmina, composta de fibras unidirecionais, é cortada transversalmente na direção das fibras, removida do mandril para o corte dos corpos-de-prova específicos dos ensaios propostos. Essas lâminas podem então ser armazenadas por um período de tempo antes da utilização.

Moldagem de pré-impregnados para obtenção de compósitos

Há basicamente três fatores preponderantes na escolha de um determinado tipo de pré-impregnado no processamento de compósitos:

- natureza da peça a ser produzida (orientação do reforço, geometria e espessura da peça);
- desempenho mecânico solicitado (propriedades mecânicas);
- equipamento disponível para fabricação (autoclave, prensa, etc.).

Estes fatores em conjunto vão determinar as condições de processamento, mas as propriedades mecânicas dos compósitos irão depender das características da fibra de reforço utilizada, da matriz polimérica, da resistência interfacial da ligação fibra / resina, do conteúdo das fibras e da orientação das

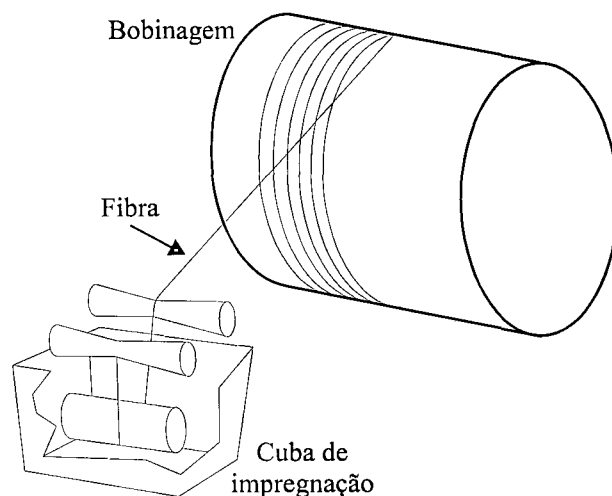


Figura 10. Diagrama esquemático de fabricação de pré-impregnados unidirecionais com matriz termorrígida, em escala laboratorial.

mesmas no compósito. Os defeitos indesejáveis presentes após a moldagem do compósito, tais como vazios e microtrincas, também influenciam de forma negativa as propriedades finais.

Propriedades mecânicas

O projeto de uma estrutura a ser fabricada em compósito estrutural necessita atender a critérios de rigidez, peso, espessura e resistência mecânica. Faz-se necessário então uma combinação desses fatores para otimizar o desempenho estrutural de um determinado componente.

Se considerarmos, para efeito de exercício, uma viga com largura "L", espessura "E" e comprimento "C" sendo tracionada por uma força "F", podemos analisar a influência de cada um dos fatores mencionados anteriormente. Os resultados obtidos para compósitos bidirecionais são comparados aos do alumínio ($\rho = 2,70 \text{ g/cm}^3$), do titânio ($\rho = 4,50 \text{ g/cm}^3$) e do aço ($\rho = 7,8 \text{ g/cm}^3$), cujos gráficos são mostrados nas Figs. 11, 12, 13 e 14. Essas comparações não consideram o processo de fabricação envolvido, e o alumínio é tomado como valor padrão relativo de 100. A massa específica aparente dos compósitos de fibra de vidro ($\rho \cong 2,00 \text{ g/cm}^3$), fibra de aramida ($\rho \cong 1,35 \text{ g/cm}^3$) e fibra de carbono ($\rho \cong 1,55 \text{ g/cm}^3$) correspondem a uma fração volumétrica típica de fibras em torno de 60%. Os ensaios de tração em compósitos bidirecionais são normatizados pela norma ASTM D3445.

A Fig. 11 mostra gráficos da espessura, da rigidez aparente e do peso prováveis de uma viga manufaturada em alumínio, aço, titânio e compósitos com

fibras de vidro, de aramida e de carbono, para uma força de ruptura de valor equivalente. Observa-se que as estruturas do aço e do titânio terão espessura menor (~40%) que a do alumínio e das estruturas de com-

pósitos. Estes compósitos terão espessura equivalente à do alumínio. O alumínio destaca-se pela alta rigidez aparente em relação aos demais materiais envolvidos na comparação. Para a mesma força de

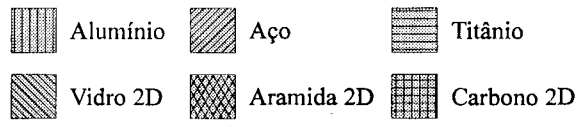
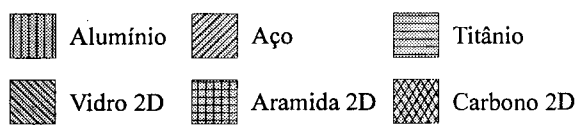
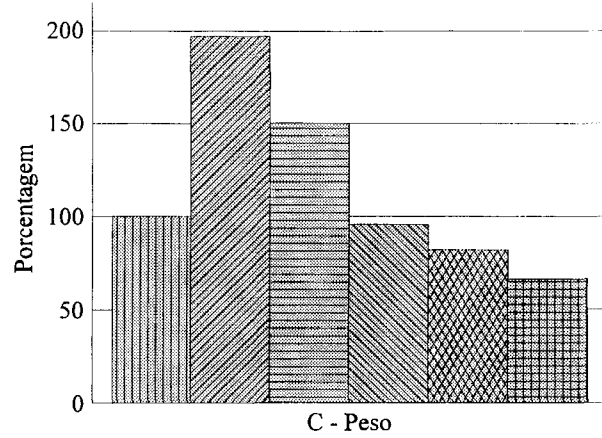
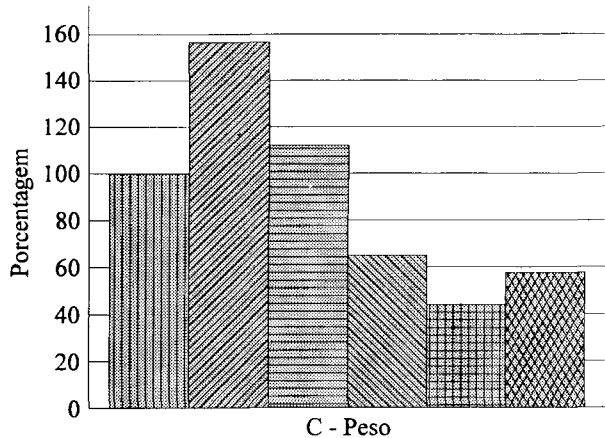
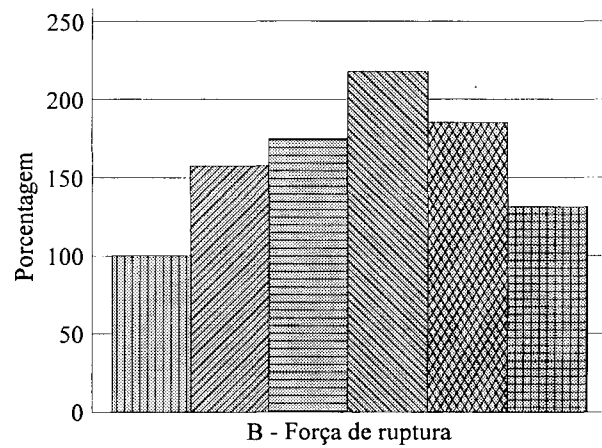
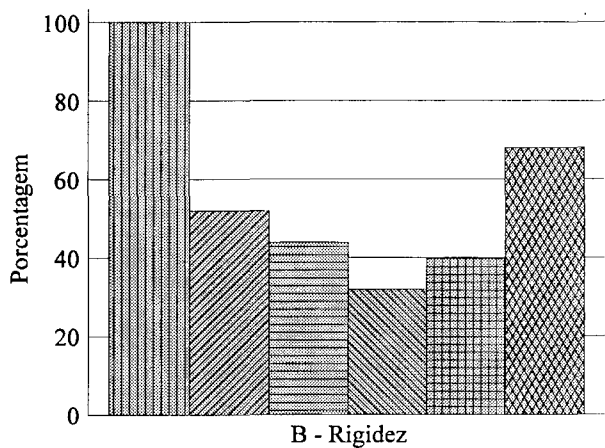
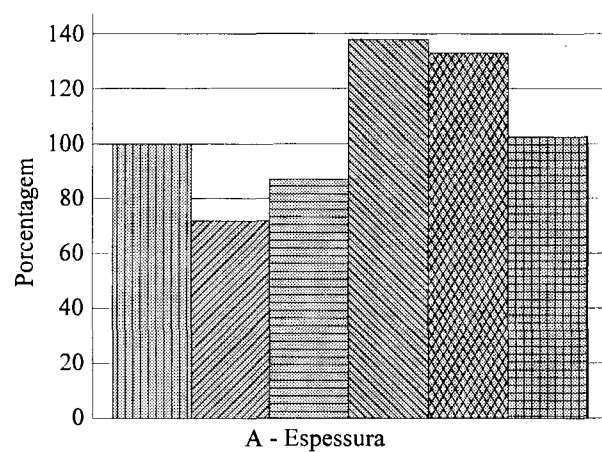
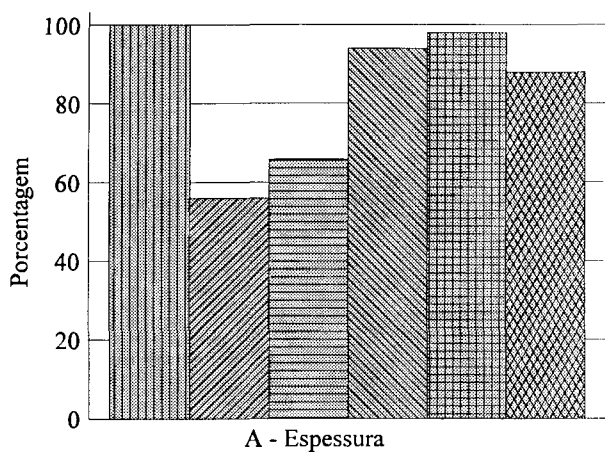


Figura 11. Força de ruptura para uma viga de alumínio, aço, titânio e compósitos bidirecionais de fibra de vidro, de aramida e de carbono, com matriz epóxi, em função da espessura, da rigidez e do peso.

Figura 12. Rigidez aparente de uma viga em alumínio, aço, titânio, e compósitos bidirecionais de fibra de vidro, de aramida e de carbono, com matriz epóxi, em função da espessura, da força de ruptura e do peso.

ruptura, o material mais pesado será o aço, sendo os compósitos os mais leves.

A Fig. 12 mostra gráficos da espessura, da força de ruptura e do peso prováveis de uma viga manu-

faturada em alumínio, aço, titânio e compósitos com fibras de vidro, de aramida e de carbono, para uma rigidez aparente de valor equivalente. Observa-se que os compósitos deverão apresentar uma espessura

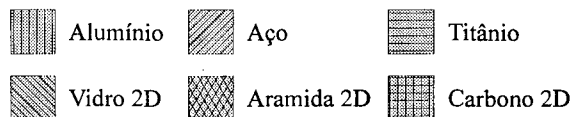
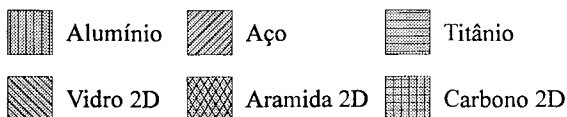
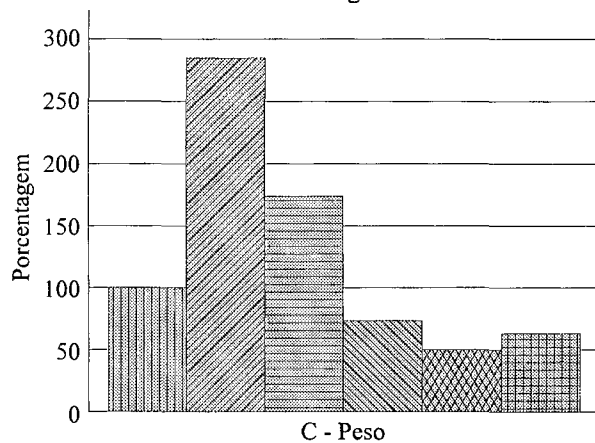
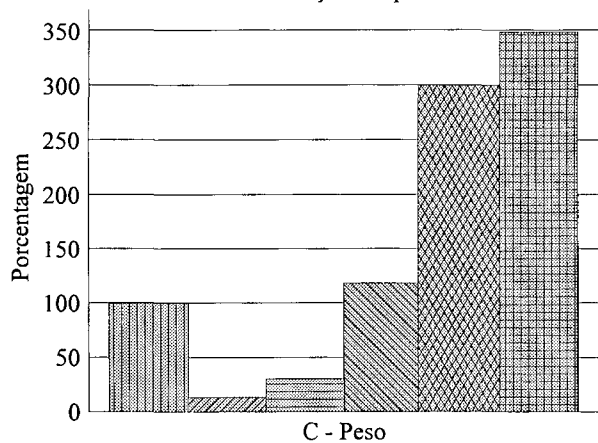
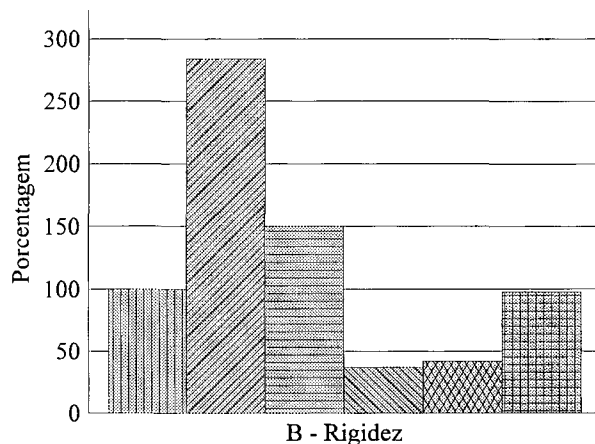
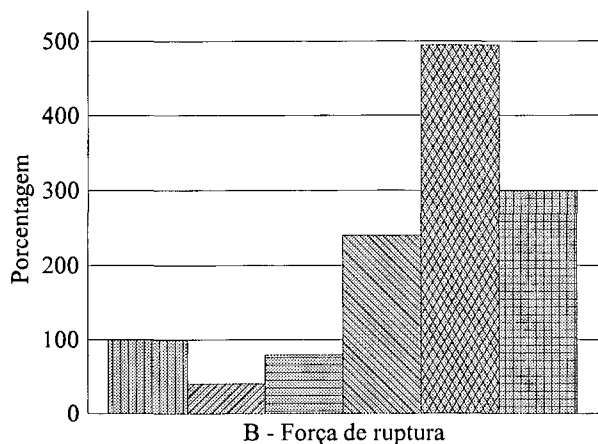
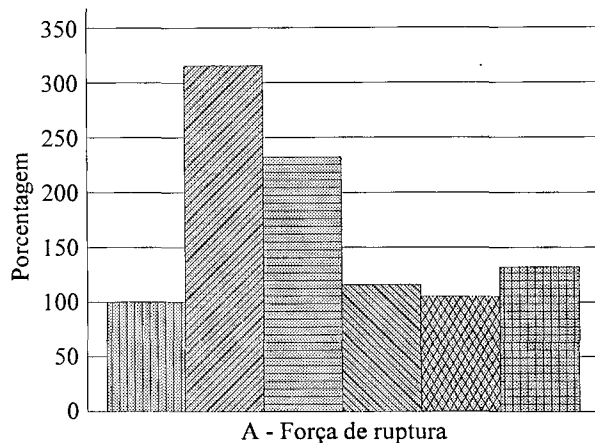
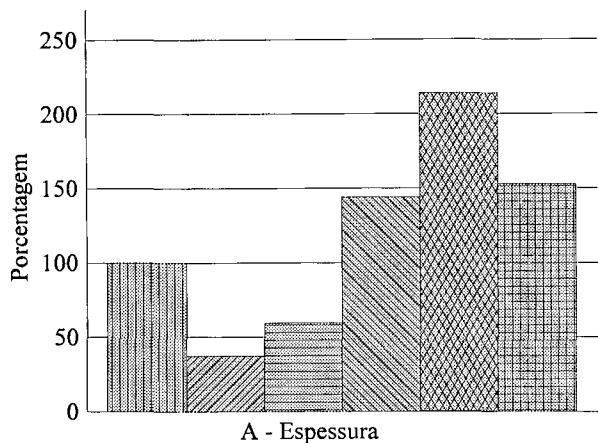


Figura 13. Peso de uma viga em alumínio, aço, titânio e compósitos bidirecionais de fibra de vidro, de aramida e de carbono, com matriz epóxi, em função da espessura, da força de ruptura e da rigidez aparente.

Figura 14. Espessura de uma viga em alumínio, aço, titânio e compósitos bidirecionais de fibra de vidro, aramida e carbono, com matriz epóxi, em função do peso, da força de ruptura e da rigidez aparente.

maior que os materiais metálicos para uma mesma rigidez aparente. O material que nesse particular vai apresentar a maior força de ruptura será o compósito manufaturado com fibras de vidro, sendo que o aço vai apresentar o maior peso. Considerando somente os compósitos envolvidos na comparação, para uma viga com rigidez equivalente, a força de ruptura decresce do compósito manufaturado com fibras de vidro para o manufaturado com fibras de aramida e, finalmente, para o compósito manufaturado com fibras de carbono.

A Fig. 13 mostra gráficos da espessura, da força de ruptura e da rigidez aparente prováveis de uma viga manufaturada em alumínio, aço, titânio e compósitos com fibras de vidro, de aramida e de carbono, para um peso de valor equivalente. Observa-se que as espessuras das vigas manufaturadas em compósitos deverão apresentar um aumento significativo (>50%), resultando conseqüentemente em uma força de ruptura também significativamente maior que os materiais metálicos (~250% para compósitos com fibra de vidro e de carbono e ~500% para compósitos com fibras de aramida). Considerando, ainda, uma barra de mesmo peso, a rigidez aparente dos compósitos de fibra de aramida e de carbono é cerca de 300% maior que os outros materiais.

A Fig. 14 mostra gráficos da força de ruptura, rigidez aparente e peso prováveis de uma viga manufaturada em alumínio, aço, titânio e compósitos com fibras de vidro, de aramida e de carbono, para uma espessura de valor equivalente. Observa-se que a força de ruptura para os compósitos têm a mesma magnitude, enquanto o aço e o titânio têm força de ruptura significativamente maior (>200%). Com espessura equivalente, o aço se destaca pela maior rigidez com relação aos demais materiais, porém tem como desvantagem o peso.

Conclusão

Os pré-impregnados, matérias-primas básicas para manufatura de compósitos, são confeccionados com fibras de reforço, tecidas ou unidirecionais, previamente impregnadas com polímeros termorrígidos ou termoplásticos. As características do pré-impregnado, como por exemplo a extensão de pré-cura e a adesividade, vão definir os parâmetros de processo (pressão, tempo de cura, temperatura de cura).

O processo de fabricação de pré-impregnados com matriz termorrígida, em processo contínuo, en-

volve basicamente a imersão de fibras de reforço em um banho de resina formulada com endurecedor. A formulação (resina/endurecedor) é "pré-curada" pela passagem do material através de uma estufa para tratamento térmico, conferindo consistência e integridade física ao "pré-impregnado". A variedade de formulações é bastante grande, podendo ser ajustada às condições de processamento e propriedades mecânicas requeridas pelo componente a ser fabricado. O ambiente de estocagem do pré-impregnado deve ser mantido a baixas temperaturas para evitar avanço na reação de cura da formulação, tendo portanto tempo de estocagem limitado.

Há dois processos de fabricação de pré-impregnados com matriz termoplástica, em processo contínuo: a) deposição eletrostática de pó polimérico nas fibras de reforço, b) tecelagem de fibras poliméricas e de fibras de reforço. O pré-impregnado com matriz termoplástica tem tempo de estocagem ilimitado, porém o número de termoplásticos de interesse estrutural para essa finalidade é limitado.

As estruturas fabricadas em compósitos estruturais caracterizam-se pela elevada resistência mecânica específica (resistência / densidade) e módulo de elasticidade específico (módulo / densidade) em relação a materiais metálicos. Os compósitos, portanto, são os materiais mais indicados quando se considera o peso como o fator preponderante de um projeto. Dentre esses compósitos, os manufaturados com fibras de carbono são os que apresentam maior rigidez. Embora tenham vantagens de caráter mecânico estrutural, os compósitos com matriz polimérica têm alto custo e limitações quanto ao emprego a temperaturas superiores a 150 °C.

Agradecimentos

Agradecemos à Téc. Margareth F.P. Azevedo e à Eng^a Eunice A. Campos, da Divisão de Química / IAE, pela realização das análises térmicas (DSC).

Referências Bibliográficas

1. Hull, D. - An Introduction to Composite Materials, Cambridge University Press, (1992).
2. Fitzer, E. - Technical Status and Future Prospects of Carbon Fibres and Their Application in Composites with Polymer Matrix (CFRP), em Carbon Fibres and Their Composites, Ed. E. Fitzer, (1983).

3. Lee, H.; Neville, K. - Handbook of Epoxy Resin, McGraw-Hill, Inc. USA, (1967).
4. Gillham, J.K. - Curing, Encyclopedia of Polymer Science and Engineering, Vol. 4, 2nd Ed. (1986).
5. Pardini, L.C. - Comportamento Dinâmico Mecânico e a Fratura de Materiais Compostos Epóxi/Elastômero/Fibra de Carbono - Tese de Mestrado, UFSCar, (1990).
6. Gulino, D.; Galy, J.; Pascault, J.P. - Etude du pré-polymère époxy de par chromatographie et ^1H NMR à 350 MHz, 2^a, Makromol. Chem., Vol. 184, pp. 411-429, (1983).
7. Boletim Técnico "Formulações Básicas com Resinas Epoxi Dow", 60p. Dow Química S/A, (1987).
8. Boletim Técnico Ciba-Geigy Química S/A.
9. Wiedemann, G.; Rothe, H. - Review of Prepreg Technology, in *Developments in Reinforced Plastics, Vol. 5, Processing and Fabrication*, Chapter 3, Ed. Geoffrey Pritchard, Elsevier Applied Sci, pp. 83-119, London, (1986).
10. Prime, R.B. - Thermosets, in *Thermal Characterization of Polymeric Materials*, Ed. E. A. Turi, Chapter 5, Academic Press, pp. 435-569, (1981).
11. Hayes, B.J. - Effect of Resin Choice on Prepreg Processing, Carbon Fibres and their Composites, Ed. by Erich Fitzer, Springer-Verlag, (1984).
12. Adabbo, H.E.; Williams, R.J.J. - The evolution of Thermosetting Polymers in a Conversion-Temperature Phase Diagram, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 27, 1327-1334, (1982).
13. Harran, D.; Laudouard, A. - Rheological Study of the Isothermal Reticulation of an Epoxy Resin, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 32, 6043-6062, (1986).
14. Moseley, J.D.; Nowak, R.M. - Engineering Thermoplastics: Materials for the future, Chemical Engineering Progress, (1986).
15. Lynch, T. - Thermoplastic/Graphite Fiber Hybrid Fabrics, SAMPE Journal, Vol. 25, No. 1, pp. 17-22, (1989).
16. Muzzy, J.; Varughese, B.; Thammongkol, V.; Tincher, W. - Electrostatic Prepregging of Thermoplastic Matrices, SAMPE Journal, Vol. 25, No.5, pp. 15-21, (1989).