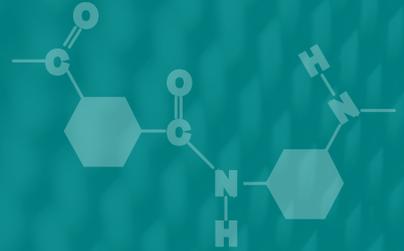
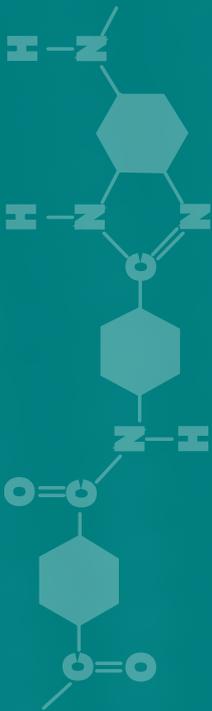


CLAUDIA MERLINI

CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE
COMPÓSITOS
POLIMÉRICOS



Artliber
EDITORA

PREFÁCIO

O grande avanço tecnológico dos últimos anos tem exigido o desenvolvimento de novos materiais que apresentem propriedades avançadas e multifuncionalidades para satisfazerem os requisitos de inúmeras aplicações. Com isso, tem crescido o interesse no uso de materiais compósitos, especialmente com matriz polimérica, uma vez que esses materiais apresentam elevada versatilidade. Essa versatilidade está relacionada à possibilidade de combinação de diferentes tipos de materiais, variando-se composição química, geometria e a forma como são combinados, possibilitando, assim, a obtenção de materiais com propriedades personalizadas para um determinado componente. No entanto, inúmeros desafios encontram-se presentes na tecnologia de compósitos poliméricos, uma vez que, diversos fatores influenciam no processo, na qualidade do componente obtido e principalmente, nas propriedades finais alcançadas. Nesse contexto, é importante o conhecimento da estrutura e propriedades dos materiais utilizados como base para o desenvolvimento dos materiais compósitos, bem como o efeito da combinação deles.

Este livro tem como objetivo abordar sistematicamente os conceitos essenciais de compósitos com matriz polimérica, em nível básico e intermediário, contemplando diversos aspectos da área. O conteúdo foi direcionando especialmente aos cientistas, profissionais e estudantes da área de Engenharia de Materiais e a todos que buscam maior compreensão sobre tecnologia de materiais compósitos. Através deste livro, busca-se preencher uma lacuna relacionada às obras escritas em português, relacionadas ao tema.

Estruturalmente, o livro consiste em um capítulo introdutório onde são abordados as definições básicas, importância e classificação de compósitos. No segundo capítulo são apresentados exemplos de aplicações, onde busca-se destacar os requisitos de cada aplicação e os materiais que atendem à tais demandas. Posteriormente, no capítulo 3, aborda-se sobre as matrizes utilizadas no desenvolvimento de compósitos, com destaque para estrutura e propriedades dos polímeros e outros aspectos relevantes para seu uso na fabricação de compósitos. Os capítulos 4 e 5 abordam os tipos de cargas, particuladas e fibrosas, utilizadas em compósitos poliméricos. No caso de compósitos particulados são discutidos conceitos relacionados à influência do formato, geometria, tamanho, dispersão e fração volumétrica das cargas na estrutura e propriedade dos compósitos. São abordadas diferenças em termos de eficiência de reforço de fibras com diferentes geometrias, bem como uma ampla abordagem da estrutura e propriedades dos principais tipos de fibras, tais como fibras de carbono, vidro, aramida e vegetais. Compósitos com fibras tecidas e pré-formas apresentam atualmente uma grande importância tecnológica, cuja temática é discutida no Capítulo 6. Conceitos relacionados à interação entre os componentes e métodos de modificação superficial para aumentar a compatibilidade entre matriz e cargas, bem como para melhorar a dispersão são discutidos no Capítulo 7. Tipos e características de estruturas do tipo sanduíche são abordados no Capítulo

8. No Capítulo 9 é apresentada uma discussão sobre os principais processos que podem ser utilizados para a fabricação de compósitos poliméricos, onde destacam-se as distinções quanto à geometria das cargas e tipos de matrizes possíveis de serem utilizadas em cada processo, bem como a influência das condições de fabricação, nas propriedades finais do componente. Aprofundando-se em termos de conteúdo, os Capítulos 10 e 11 trazem a abordagem de materiais mais avançados, com destaque para nanocompósitos poliméricos e compósitos híbridos. Modos de falhas de compósitos com diferentes tipos de cargas e ensaios não destrutivos são temas abordados no Capítulo 12. Por fim, no Capítulo 13 são discutidos aspectos relacionados à reciclagem de materiais compósitos, assunto ainda pouco pautado atualmente na área de compósitos, mas que merece destaque. Assim, espera-se que este livro possa agregar conhecimento a cada leitor, mas, acima de tudo, que desperte o interesse por essa área científica importante e fascinante.

Dra. Claudia Merlini

Julho de 2021

SUMÁRIO

PREFÁCIO	5
1. CONCEITOS INTRODUTÓRIOS	13
1.1 – Importância e evolução dos materiais compósitos	13
1.2 – Definição, classificação e componentes	15
2. APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS	23
2.1 – Indústria aeronáutica	25
2.2 – Indústria automobilística	28
2.3 – Equipamentos esportivos	32
2.4 – Aplicações biomédicas e dispositivos protéticos	34
2.5 – Aplicações marítimas	38
2.6 – Construção civil	40
3. MATRIZES	45
3.1 – Matrizes poliméricas	46
3.2 – Matrizes cerâmicas	65
4. CARGAS PARTICULADAS PARA COMPÓSITOS	71
4.1 – Compósitos particulados	71
5. COMPÓSITOS COM FIBRAS	89
5.1 – Compósitos com fibras contínuas	91
5.2 – Compósitos com fibras descontínuas (ou curtas)	94
5.3 – Tipos de fibras	102
6. TECIDOS E PRÉ-FORMAS	145
6.1 - Tecidos têxteis (2D)	146
6.2 – Pré-formas	150

7. ADESÃO E INTERFACE CARGA/MATRIZ	157
7.1 – Tratamentos superficiais de cargas.....	165
8. ESTRUTURAS SANDUÍCHE	179
8.1 – Compósitos sanduíches com núcleo colmeia (<i>honeycomb</i>)	183
8.2 – Modos de falha sob flexão	187
9. PROCESSAMENTO DE MATERIAIS COMPÓSITOS	191
9.1 – Processos de fabricação de compósitos com matriz polimérica	193
10. NANOCOMPÓSITOS POLIMÉRICOS	231
10.1 – Definições básicas de nanotecnologia.....	231
10.2 – Compósitos poliméricos nanoestruturados.....	232
11. MATERIAIS COMPÓSITOS HÍBRIDOS	249
11.1 – Compósitos híbridos com cargas sintéticas.....	253
11.2 – Biocompósitos híbridos.....	255
11.3 – Compósitos híbridos com fibras vegetais e sintéticas	255
11.4 – Compósitos híbridos multiescalas	256
11.5 – Compósitos híbridos nanoestruturados.....	262
12. ANÁLISE MICROMECAÂNICA	267
12.1 – Materiais compósitos reforçados com partículas.....	267
12.2 – Materiais compósitos reforçados com fibras	268
13. MODOS DE FRATURA E FALHA EM COMPÓSITOS	277
13.1 – Modos de falha	277
13.2 – Falha sob tensão longitudinal em compósitos unidirecionais	286
13.3 – Falha sob tensão transversal em compósitos unidirecionais.....	289
13.4 – Falha sob carregamento compressivo longitudinal em compósitos unidirecionais	290
13.5 – Falha sob carregamento compressivo transversal em compósitos unidirecionais	292
13.6 – Falha em compósitos com fibras descontínuas aleatoriamente distribuídas.....	293
13.7 – Testes não destrutivos para previsão de falha em compósitos	294

14. RECICLAGEM DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS	301
14.1 – Reciclagem mecânica.....	303
14.2 – Reciclagem térmica	305
14.3 – Reciclagem química.....	309
14.4 – Estratégias para consolidação da reciclagem	310
REFERÊNCIAS	313
A AUTORA.....	327



Figura 17 – Exemplos de materiais esportivos desenvolvidos a partir de compósitos poliméricos

Bicicletas fabricadas a partir de compósitos com fibras de carbono apresentam uma estrutura complexa com características de desempenho que incluem leveza, rigidez, durabilidade, absorção de choque etc. A fabricação de componentes utilizando-se compósitos permite a fabricação de peças com variações de propriedades/formato ao longo do comprimento do quadro (melhora a rigidez e aerodinâmica), possibilita diferentes ângulos de fibras, diferentes camadas, camada de diferentes espessuras, diferentes combinações de materiais (fibras híbridas, carbono e aramida com matriz epóxi, por exemplo). Assim, as propriedades do produto fabricado a partir de um compósito podem ser adaptadas às certas especificações. Um quadro de bicicleta de corrida (*Carbon Ultimate F10*) fabricado em fibra de carbono pela IVW's em cooperação com a *Canyon Bicycles GmbH*, apresenta um peso de apenas 1,26 kg (incluindo os garfos dianteiros).

Em algumas aplicações, como raquetes de tênis e esquis para neve, o uso de compósitos com matriz epóxi e com fibras de carbono e boro, como parte externa e espuma de poliuretano como parte interna, permite reduzir peso sem comprometer a rigidez. Um amortecimento mais rápido das vibrações reduz o choque transmitido ao braço do jogador de tênis. As raquetes de tênis fabricadas a partir de fibras de carbono, além do bom desempenho na absorção de impactos e vibrações, destacado anteriormente, apresentam menor peso, maiores tamanhos (a área de uma raquete poderia ser aumentada em 115 vezes, para um mesmo peso, comparada a raquetes de madeira) e a tensão dos cabos aumenta de 20 a 45%. No caso dos arcos e varas de arremesso, a maior rigidez específica auxilia na propagação a longas distâncias.

Além de equipamentos esportivos, equipamentos de segurança utilizados pelos atletas também podem ser fabricados a partir de materiais compósitos. Um dos principais exemplos são os capacetes utilizados em diferentes esportes. Além da leveza, o principal requisito mecânico para essa aplicação é a elevada resistência ao impacto, que pode ser alcançada pela utilização de fibras com maior ductilidade, como fibras vegetais e fibras de aramida. Em alguns casos, para que um maior balanço de propriedades seja atingido, compósitos híbridos com diferentes fibras vegetais ou híbridos aramida/carbono têm sido utilizados.

2.4 – Aplicações biomédicas e dispositivos protéticos

O avanço no desenvolvimento de materiais compósitos tem permitido, nos últimos anos, grandes melhorias no design dos componentes para substituir ou integrar partes do corpo, danificados por traumas ou eventos patológicos, promover a regeneração de tecidos, propiciar a liberação controlada de fármacos etc., promovendo uma recuperação mais eficiente do paciente e o aumento da qualidade de vida. Dentre as aplicações de compósitos na área biomédica destacam-se aplicações em restauração de dentes, próteses e órteses, *scaffolds* para a regeneração de ossos e nervos, coberturas para feridas, materiais com propriedades antimicrobianas etc.

Os compósitos poliméricos reforçados com fibras são atualmente os materiais multifásicos mais utilizados em ortopedia e próteses, em razão das excepcionais características de resistência/peso e biocompatibilidade. O conforto e a facilidade do controle de um membro artificial dependem diretamente da qualidade da interface entre a parte amputada e a prótese, e uma diferença na rigidez entre o implante e tecido hospedeiro pode causar severos danos. As propriedades dos compósitos poliméricos reforçados com fibras podem ser adaptadas de várias maneiras, alterando-se o arranjo de fibras ou variando-se a fração volumétrica de modo a apresentar o conjunto de propriedades mecânicas requeridas. Além disso, implantes para substituição óssea ou fixadores, fabricados a partir de polímeros reforçados com fibras, permitem a criação de imagens de raios-X, Ressonância Magnética (MRI) e Tomografia Computadorizada (TC), comumente usadas para interpretação diagnóstica.

As aplicações de materiais compósitos reforçados com fibras em tecidos duros incluem: reconstrução de crânio, reparo de fratura óssea, substituição de joelho, tornozelo, quadril e outras articulações, bem como aplicações dentárias. Existem dois tipos distintos de reparo de fratura óssea, via fixação externa e interna, conforme exemplos apresentados na figura 18. Sistemas externos de fixação em compósitos poliméricos só ganharam popularidade recentemente, quando fibras de carbono se tornaram mais prontamente disponíveis. No caso particular das órteses de fibra de carbono, tem sido relatada melhora na agilidade e velocidade de caminhada, redução de 10% na frequência cardíaca do paciente e no consumo de oxigênio, em razão da redução de cerca de 29% no peso em comparação com os equivalentes de aço inoxidável.

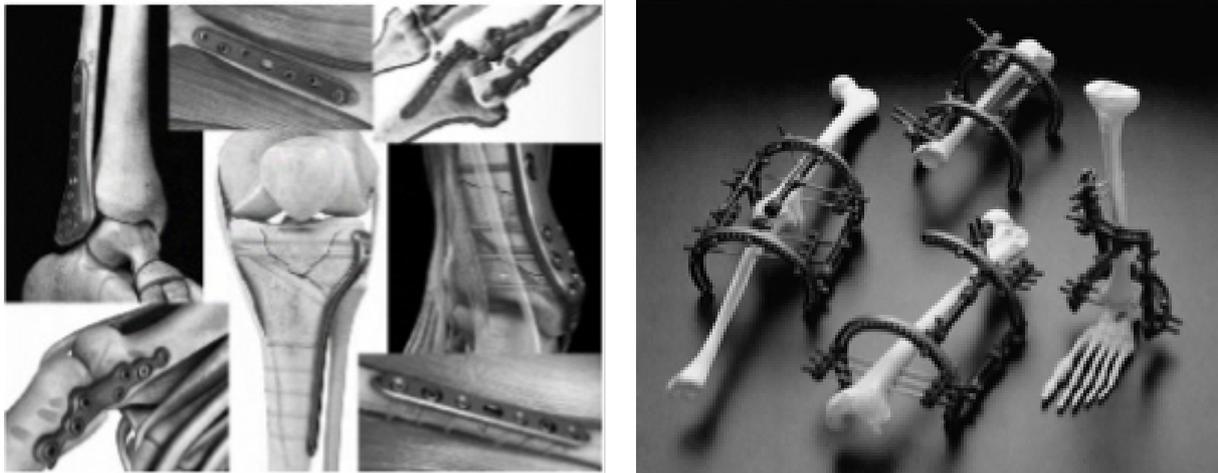


Figura 18 – Sistema de fixação de reparo de fratura óssea, feitos em compósitos: (a) Fixação de fragmento ósseo via placas e parafusos e (b) Sistema de fixação óssea externa

Para uso clínico em humanos, diferentes polímeros podem ser utilizados como matrizes, como os polímeros reabsorvíveis: poli(ácido láctico) (PLA), poli(ácido glicólico) (PGA) e poli(ácido láctico-*co*-ácido glicólico) (PLGA), matrizes não absorvíveis termofixas como epóxi (com fibras de vidro e carbono) e termoplásticas como o poli(éter-éter-cetona) (PEEK). Cada um desses materiais apresenta características quanto à compatibilidade, propriedades mecânicas e toxicidade que devem ser consideradas em cada aplicação. Em polímeros reabsorvíveis, geralmente é difícil alcançar a degradação atóxica, a uma taxa aceitável, e ainda reter boas propriedades mecânicas, e quando reforçados com fibras podem apresentar propriedades mecânicas adequadas, no entanto, tornam-se parcialmente absorvíveis. No caso do epóxi, a preocupação está relacionada à toxicidade do monômero parcialmente curado, mas quando se utiliza o PEEK, a principal dificuldade é fabricar peças com boa qualidade.

Próteses para substituição total de quadril em metais têm sido as mais utilizadas. No entanto, em razão dos problemas como indução de estresse nos ossos e soltura da prótese, têm levado à busca pela utilização de compósitos poliméricos, pela possibilidade de atender a requisitos mecânicos variados, como resistência e rigidez, redução de concentrações de tensões e maior eficiência na transferência de tensões na interface prótese/osso. Compósitos para essa aplicação, incluem poliamida 12/fibra de carbono, podendo ter inclusão de hidroxiapatita.

Próteses de pés e pernas para pessoas com amputações (figura 19), especialmente aquelas utilizadas por atletas em competições, são hoje fabricadas em fibras de carbono e epóxi. No entanto, são extremamente caras, não sendo sempre economicamente viáveis. Próteses em fibras de vidro e polietileno de alta densidade (PEAD) apresentam-se como alternativas mais baratas, são confortáveis e com bom desempenho mecânico.

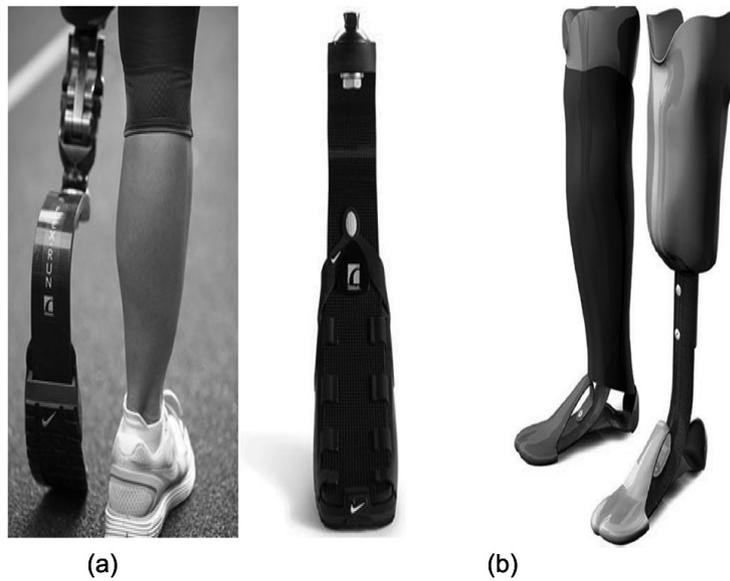


Figura 19 – Próteses fabricadas em (a) fibras de carbono e epóxi e (b) fibras de vidro e PEAD

Atualmente, inúmeras pesquisas estão sendo conduzidas para o desenvolvimento de materiais compósitos com estrutura porosa, para serem utilizados como *scaffolds*, para diversas aplicações na engenharia de tecidos, como crescimento celular para regeneração óssea e nervosa e liberação controlada de fármacos. Estruturas fibrosas, conforme ilustrado na figura 20, são de particular interesse, pois apresentam elevada área de superfície e porosidade, o que aumenta a adesão e proliferação das células, bem como pela possibilidade de incorporação de diferentes tipos de nanocargas, visando introduzir diferentes propriedades e funcionalidades.

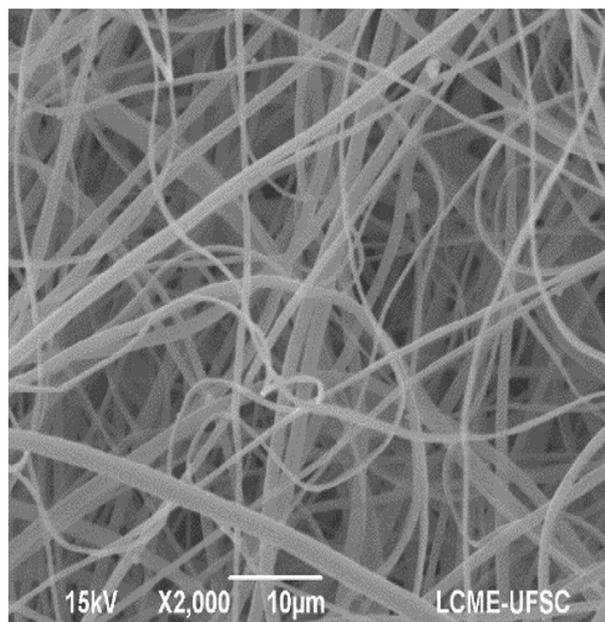


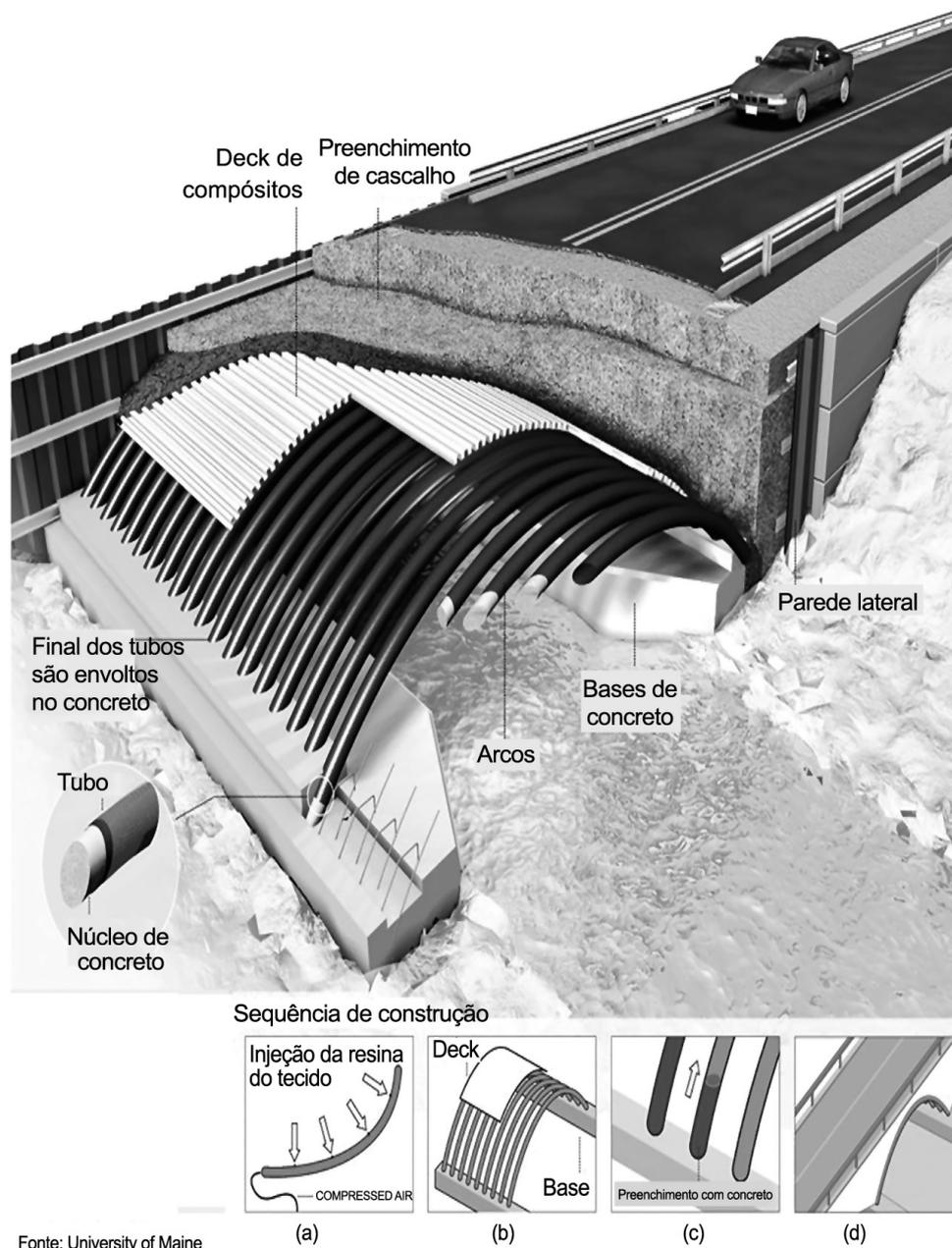
Figura 20 – Membrana porosa (*scaffold*) constituído de poli (fluoreto de vinilideno) e polipirrol fabricado a partir da técnica de eletrofiação

revestimento dessas estruturas com um compósito visa proteger a estrutura de intempéries, sendo um método mais vantajoso do que os reparos convencionais. O fortalecimento pode ser realizado diretamente na estrutura utilizando-se processos de laminação em que o tecido de fibras de vidro ou carbono é impregnado com o polímero (epóxi, por exemplo) e ligado à superfície do concreto. Quando curado, o compósito torna-se parte integrante da estrutura, atuando como um sistema de reforço externo.



Figura 25 – Exemplo de reforço de estruturas de concreto com compósitos poliméricos com fibras de carbono

Um exemplo interessante de estrutura construída a partir de materiais compósitos é a ponte *Neal Bridge*, construída sobre o Rio Royal River em Pittsfield, Maine (figura 26). Os arcos fabricados em compósito polimérico com fibras de vidro e carbono são implantados no local, preenchidos com concreto e cobertos por um deck. Sobre o deck é colocada uma fina camada de concreto, terra, cascalho e asfalto. Os tubos protegem o concreto da água e de outros elementos naturais, prolongando sua expectativa de vida. Prevê-se que os custos de manutenção sejam mais baixos, juntamente com os impactos ambientais reduzidos. Esse método de construção também é conhecido como “*Bridge-in-a-backpack*” em virtude do seu baixo peso e portabilidade.



Fonte: University of Maine

Figura 26 – Ponte construída sobre o Rio Royal River em Maine (*Bridge-in-a-Backpack*), destacando-se a seqüência de construção da ponte: (a) fabricação dos tubos de material compósito, (b) instalação dos tubos na forma de arcos, (c) preenchimento dos tubos com concreto e (d) ponte concluída

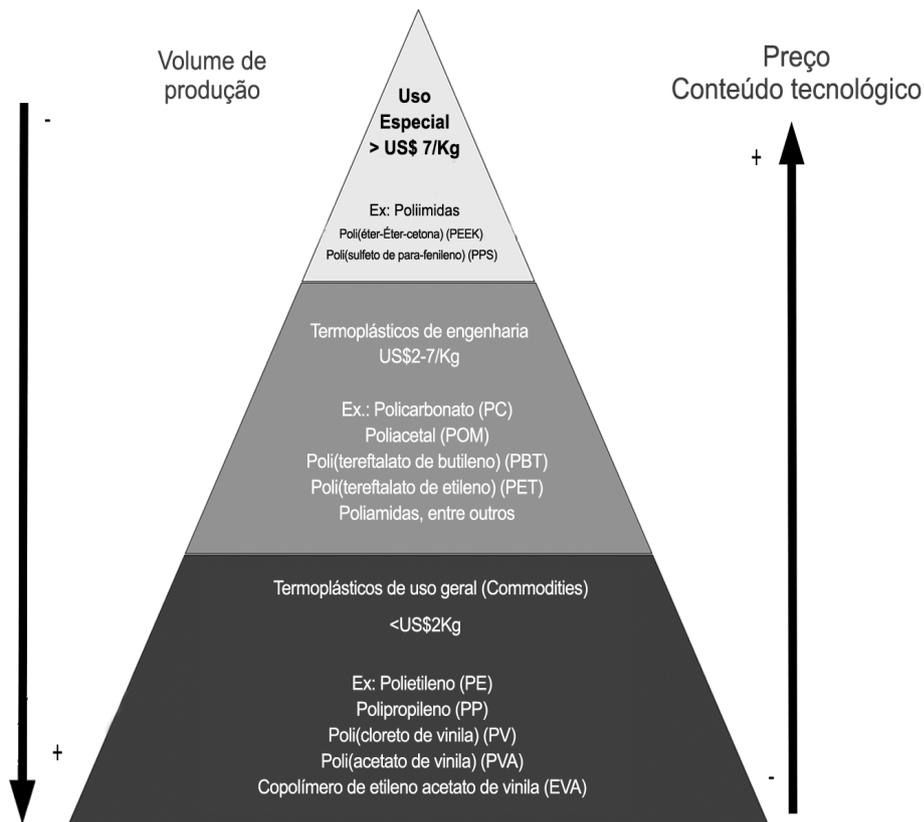


Figura 31 - Classificação dos termoplásticos de acordo com o desempenho mecânico e resistência à temperatura

As vantagens mais importantes de polímeros termoplásticos em relação aos termofixos é a elevada resistência ao impacto e à fratura, que propicia excelente tolerância ao dano de um material compósito. De maneira geral, termoplásticos apresentam maior deformação na ruptura do que termofixos, o que proporciona à matriz maior resistência às trincas em compósitos laminados. Outras vantagens são:

- sem limite de estocagem em temperatura ambiente;
- tempo de fabricação muito curto;
- possibilidade de pós-conformação (por exemplo, por termoformagem);
- fácil reparo por soldagem, ligação com solventes etc;
- fácil manuseio (não apresenta aderência);
- pode ser reciclado.

Apesar das vantagens dos termoplásticos, o desenvolvimento de compósitos com matrizes termoplásticas é consideravelmente menor do que com matrizes termofixas. Em razão da elevada viscosidade no estado fundido, a incorporação de fibras contínuas e tecidos em matrizes termoplásticas é difícil de ser realizada. O processamento de compósitos com matrizes

CAPÍTULO 4

CARGAS PARTICULADAS PARA COMPÓSITOS

Além da composição química da matriz e das cargas e da interação matriz/carga, as propriedades mecânicas dos compósitos são fortemente influenciadas por outros fatores, como geometria da fase dispersa (formato e tamanho), fração volumétrica dos componentes, dispersão, distribuição e orientação das cargas. Assim, todos esses fatores são importantes na determinação das propriedades dos compósitos, conforme será abordado a seguir.

Cargas podem ser definidas como materiais sólidos, não solúveis, que são adicionadas em uma matriz em quantidades suficientes para alterar alguma propriedade, conferir uma nova funcionalidade ou por razões econômicas. Cargas utilizadas em aplicações estruturais normalmente estão na forma de fibras contínuas, unidirecionais, bidirecionais, tecidos e pré-formas, em razão do fato de que na forma de fibras, os materiais são mais resistentes. No entanto, as cargas podem apresentar-se na forma de partículas, com diferentes formatos e tamanhos, bem como na forma de fibras curtas etc. Estas últimas geometrias citadas, cargas particuladas e fibras curtas, têm sido cada vez mais utilizados em razão da flexibilidade de projeto; facilidade de processo, especialmente utilizando-se técnicas de fabricação normalmente empregadas para polímeros; versatilidade de cargas disponíveis, o que possibilita uma vasta gama de combinações matriz/carga particulada. Além disso, com o avanço da nanotecnologia, nanocargas com elevada área de superfície podem ser incorporadas em matrizes, especialmente poliméricas, resultando em uma eficiente modificação de diferentes propriedades.

4.1 – Compósitos particulados

Os compósitos particulados são constituídos de um ou mais tipos de partículas dispersas em uma matriz polimérica, cerâmica ou metálica, conforme exemplo ilustrado na figura 41, que ilustra a micrografia de um compósito de poliuretano termofixo com 5,5% em volume de negro de fumo. A inclusão de cargas particuladas, especialmente em materiais poliméricos, é uma prática bem estabelecida pela indústria de polímeros, podendo aumentar significativamente as propriedades da matriz e simultaneamente reduzir o custo do componente, permitindo expandir sua aplicação.

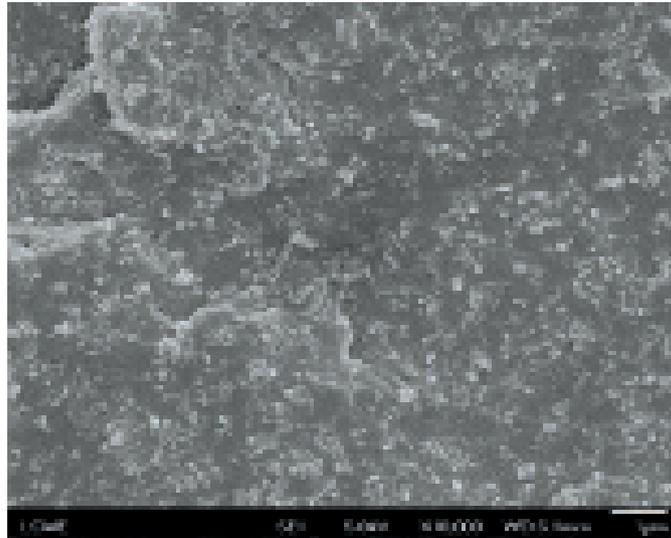


Figura 41 – Compósito de poliuretano termofixo com negro de fumo

Quando comparado aos reforços fibrosos, as cargas particuladas são menos efetivas no aumento das propriedades mecânicas. Sob um carregamento mecânico aplicado, a tensão é transferida a partir da matriz mais fraca, através da interface, para a carga tipicamente com maior rigidez. Desse modo, a carga deve suportar a maior parte do carregamento aplicado ao compósito. Devido à menor razão de aspecto (relação entre o comprimento (L) e o diâmetro (d) ou espessura) dos materiais particulados, a transferência de tensão não é tão eficiente como no caso das fibras, mas ainda pode ser significativo, dependendo das características geométricas e dimensões das cargas. Esse comportamento está apresentado na figura 42, que ilustra o padrão de deformação em uma matriz ao redor de uma fibra e de uma partícula, em um compósito que está sujeito à aplicação de uma carga de tração.

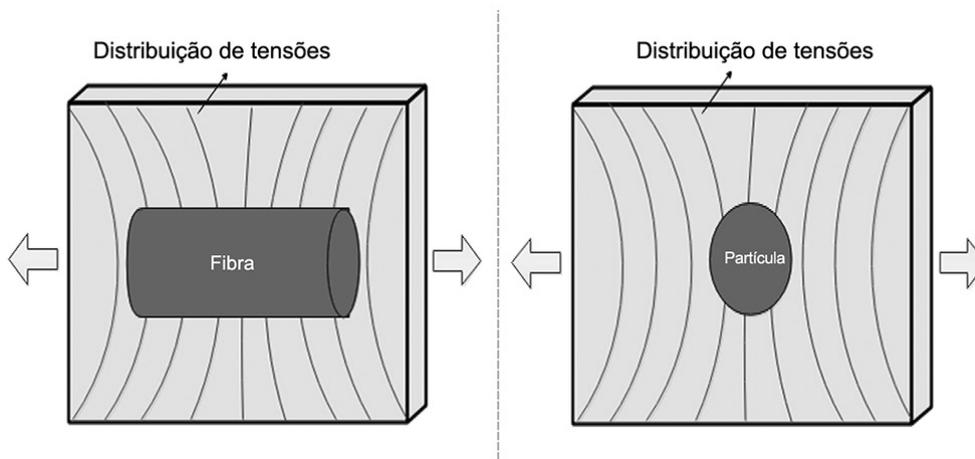


Figura 42 – Padrão de deformação na matriz em volta de uma fibra e de uma partícula, em um compósito que está sujeito à aplicação de uma carga de tração

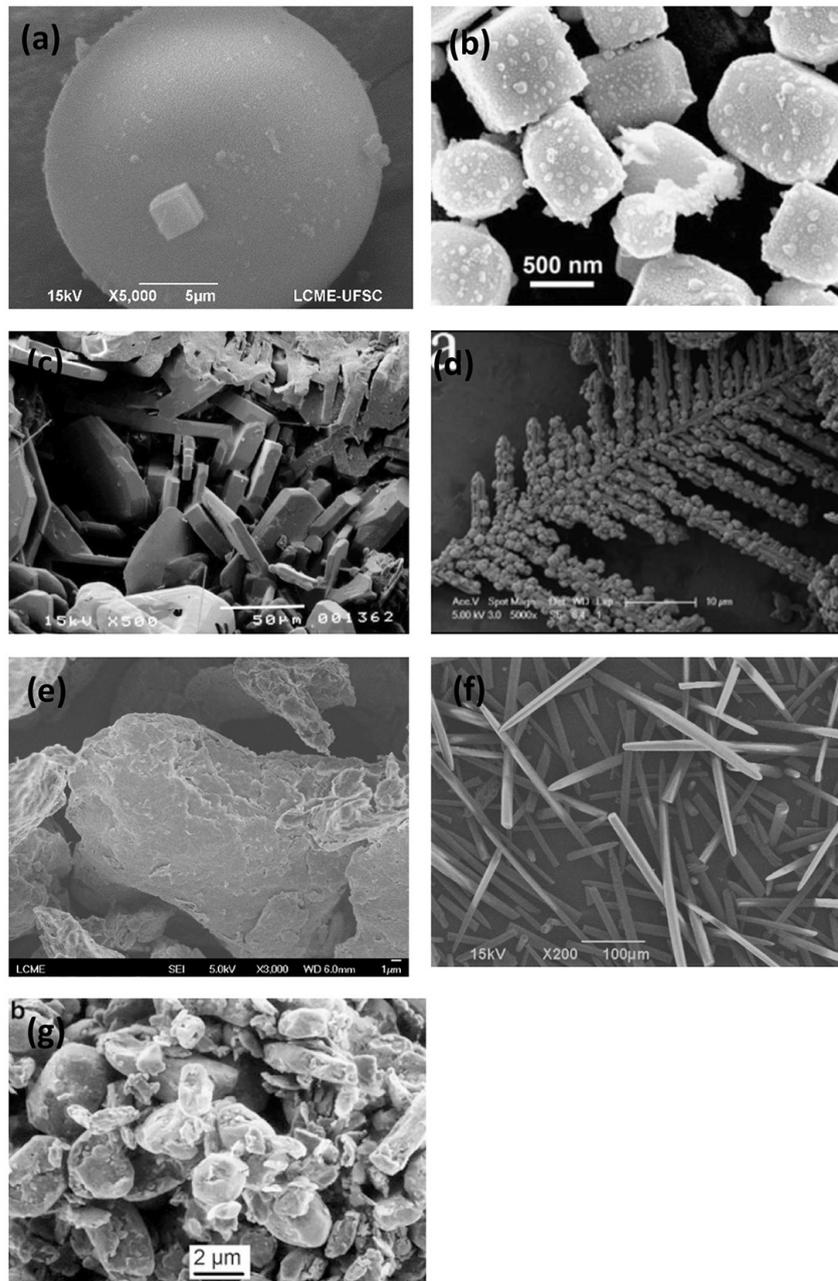


Figura 43 – Micrografias de cargas com diferentes geometrias: (a) Sílica (Esfera), (b) Prata (cúbica), (c) Feldspato (laminar), (d) Cobre (dendrítica), (e) Montmorilonita (lamelar), (f) Sílica (acicular) e (g) Titânio (irregular)

Conforme destacado na tabela 8, cada formato de partícula oferece algumas vantagens e desvantagens. Esferas por exemplo, conferem a menor razão de aspecto dentre todas as cargas (1), o que limita a área para interação com a matriz. Dessa forma, a incorporação de uma carga esférica em uma matriz polimérica pode resultar em adesão inadequada entre a carga e a matriz. No entanto, normalmente a adição de esferas não altera significativamente a viscosidade de uma solução polimérica, possibilitando a incorporação de maiores frações mássicas, quando comparado a partículas não esféricas.

Cargas em formato lamelar (*flakes*) apresentam geometria em duas dimensões, o que resulta em tensões iguais em ambas as direções do plano, quando comparado às fibras, que são reforços unidirecionais. Cargas lamelares, quando colocadas paralelamente, podem empacotar-se mais eficientemente do que fibras ou partículas esféricas. Dessa forma, quando utilizados em compósitos, podem orientar-se na superfície, podendo ser eficiente em aumentar as propriedades de barreiras, pois um gás deverá percorrer um caminho mais tortuoso para penetrar no material. Dentro desse contexto, durante a escolha do tipo de carga que se deseja utilizar em um compósito, deve-se considerar também o formato da partícula, pois essa característica poderá contribuir significativamente na modificação de uma determinada propriedade.

Tabela 8 – Exemplos de formato de partículas típicas de algumas cargas

Formato	Exemplo de cargas	Vantagens
Esférico	Pó de alumínio, óxido de alumínio, negro de fumo, grânulos de cerâmica e vidro, cobre, sílica, prata, dióxido de titânio, óxido de zinco.	Uniforme distribuição de tensão e menor viscosidade.
Cúbico	Hidróxido de cálcio, feldspato.	Bom reforço e densidade de empacotamento.
Dendrítico	Níquel, cobre.	Maior área de superfície para interação.
Lamelar (<i>Flakes</i>)	Alumínio, grafite, montmorilonita, caolinita, mica, perlita, talco, vermiculite.	Facilidade de orientação e menor permeabilidade de líquidos, gases e vapor.
Alongado	Borato de alumínio (<i>whisker</i> ou cilindros), atapulgita (agulha), dióxido de titânio e wollastonita (acicular).	Reforço superior, reduz o encolhimento e expansão térmica.
Irregular	Óxido de alumínio, hidróxido de alumínio, antracito, atapulgita, barita, carbonato de cálcio, argila, dolomita, hidróxido de magnésio, sílica precipitada.	Não apresentam vantagens aparente, contudo são mais fáceis de serem fabricadas e, assim, são mais baratas.

O formato da partícula é importante, pois determina a razão de aspecto (L/d), e quanto maior a razão de aspecto maior é a área de superfície. A tabela 9 apresenta a razão de aspecto típica de partículas com diferentes formatos e fibras. A maioria das cargas apresenta razão de aspecto menor do que 10. Partículas alongadas de origem mineral tem razão de aspecto entre 10 e 70, e fibras, normalmente, apresentam razão de aspecto superior a 100.

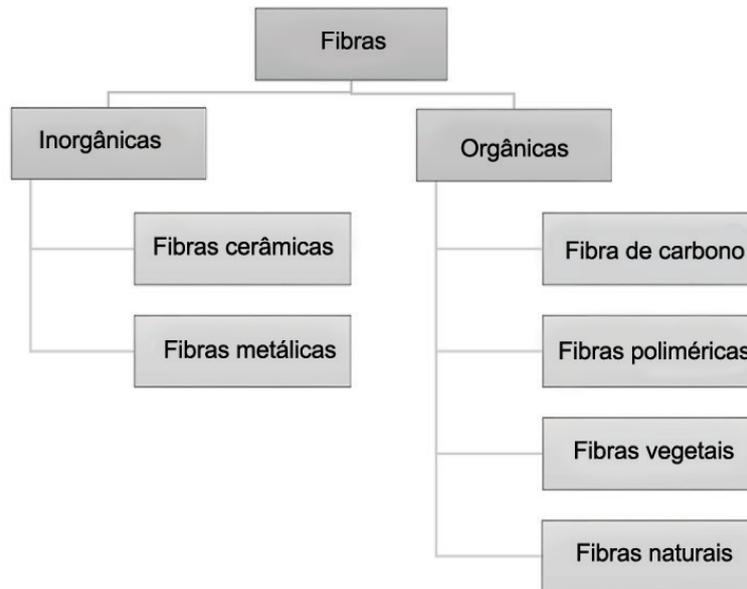


Figura 65 – Classificação dos diferentes tipos de fibras que podem ser utilizadas em compósitos

Na escolha de um determinado tipo de fibra a ser utilizado no desenvolvimento de um compósito, diversos fatores devem ser considerados, como:

- tipo, composição química e propriedades da matriz a ser reforçada;
- desempenho pretendido e condições que o compósito será utilizado;
- técnica de fabricação empregada;
- custo;
- geometria do componente.

Dentre esses fatores, inicialmente, a matriz a ser utilizada é um dos fatores mais importantes a ser considerado, uma vez que matrizes poliméricas, cerâmicas e metálicas diferem em termos de temperatura de uso e de fabricação, processos a serem utilizados na confecção do componente e aplicações a que se destinam, requerendo, desta forma, a utilização de fibras específicas que se adequem as características das mesmas.

Em compósitos com matriz cerâmica, a seleção das fibras dependerá de cada tipo de aplicação, no entanto, normalmente, devem ser utilizadas fibras que suportam elevadas temperaturas requeridas para a produção dos materiais cerâmicos. Além disso, as fibras devem apresentar estabilidade em temperaturas elevadas por longos períodos, bem como resistência à fluência e oxidação. Fibras poliméricas e vegetais não podem ser utilizadas em compósitos com matriz cerâmica em razão da degradação em temperaturas superiores a 500 °C. Fibras que podem ser utilizadas no desenvolvimento de compósitos com matriz cerâmica, incluem fibras de carbono, fibras de vidro e fibras cerâmicas.

níveis baixíssimos de óxidos que reduzem a fusão e viscosidade (Na_2O) em razão da estreita faixa de temperatura para formação do filamento.

Tabela 13 – Composição típicas de alguns tipos de fibras de vidro utilizadas no desenvolvimento de compósitos

Constituintes	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	B_2O_3	K_2O	BaO	FeO
Vidro E	54,3	15,2	17,2	4,7	0,6	8,0	–	–	–
Vidro C	64,6	4,1	13,2	3,3	7,7	4,7	1,7	0,9	–
Vidro S	64,2	24,8	0,01	10,27	0,27	0,01	–	0,2	0,21

As fibras de vidro são usualmente amorfas, porém alguma cristalização pode ocorrer após prolongado aquecimento em elevadas temperaturas, o que pode reduzir a resistência mecânica. A figura 66 apresenta uma representação bidimensional de uma fibra de vidro, e cada poliedro consiste em átomos de oxigênio ligados covalentemente a átomos de silício (figura 66(a)). Quando o Na_2O é adicionado, os íons de sódio são ligados ionicamente com oxigênio, mas não se juntam à rede diretamente. A adição de outros óxidos metálicos altera a estrutura e, conseqüentemente, as propriedades, o que permite a obtenção de fibras com diferentes propriedades químicas e físicas. Diferentemente das fibras de carbono, as propriedades das fibras de vidro, especialmente módulo e coeficiente de expansão térmica, são isotrópicos, ou seja, iguais em todas as direções, devido à estrutura tridimensional.

Tabela 14 – Propriedades típicas de fibras de vidro utilizadas em compósitos

Tipo de fibra	Vidro E	Vidro S
Densidade (g.cm^{-3})	2,54	2,48
Resistência à tração (GPa)		
a 22 °C	3,44	4,58
a 371 °C	2,62	3,75
a 538 °C	1,72	2,41
Módulo de Elasticidade (GPa)	72,40	85,5
Deformação na ruptura (%)	4,80	5,70
Coeficiente de expansão térmica ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	$5,0 \times 10^{-6}$	$5,6 \times 10^{-6}$
Preço (US\$/kg)	1,65 – 2,20	13,00 – 17,50
Resistividade volumétrica ($\Omega.\text{cm}$)	10^{15}	10^{16}
Preço (US\$/kg tecido)	10 – 20	20 – 40

6.1 - Tecidos têxteis (2D)

Os tecidos possuem um maior custo quando comparados às mantas, porém oferecem a possibilidade de desenvolvimento de compósitos com maior resistência, rigidez e maior estabilidade dimensional. Os materiais têxteis podem ser classificados como tecidos planos (2 fios - trama e urdume), malhas (laçadas - 1 fio) e tecidos não tecidos (fibras aleatórias formando as mantas).

Um tecido pode ser definido como uma estrutura produzida pelo entrelaçamento de um conjunto de fios de urdume e outro conjunto de fios de trama, formando diferentes ângulos. As fibras são as unidades formadoras de um fio, e a quantidade de fibras em um fio pode variar de 200 a 1200. Os tecidos têm duas direções principais, e o urdume refere-se à direção longitudinal (comprimento) do tecido e a trama a direção transversal.

Os tecidos biaxiais (2D) consistem em um conjunto de fios entrelaçados ou tecidos a ângulos de 0 e 90°, em um determinado padrão. De acordo com o arranjo entre urdume e trama, diferentes tipos de tecidos podem ser formados, como tecido plano (*plain*), tecido laço diagonal ou sarja (*twill*) e tecido cetim (*satín*). Estes três tecidos diferenciam-se pela sua frequência de entrelaçamento dos fios e pela linearidade dos segmentos de fios.

Os tecidos planos são a forma mais simples dentre os tecidos utilizados em compósitos, e consistem em fios entrelaçados de urdume e trama, os quais se dispõem em um padrão, entrelaçando-se acima e abaixo dos fios de urdume, sendo essa sequência invertida na fileira seguinte, conforme ilustrado na figura 103. Esse tipo de arranjo proporciona maior estabilidade ao tecido, dificulta o escorregamento das fibras, confere porosidade razoável aos compósitos, além de propiciar uma maior compactação do laminado. A orientação não é apenas na direção 0 e 90°, mas também em cerca de 45°, o que confere ao tecido maior capacidade de resistir a esforços de torção. Existem outras variações do tecido plano, denominados de *basket*, onde o padrão de tecelagem é formado por dois ou mais fios de urdume por fileira e dois ou mais fios de trama por fileira. Outra variação, o *basket* tipo Oxford, utiliza duplo fio de urdume e um fio de trama.

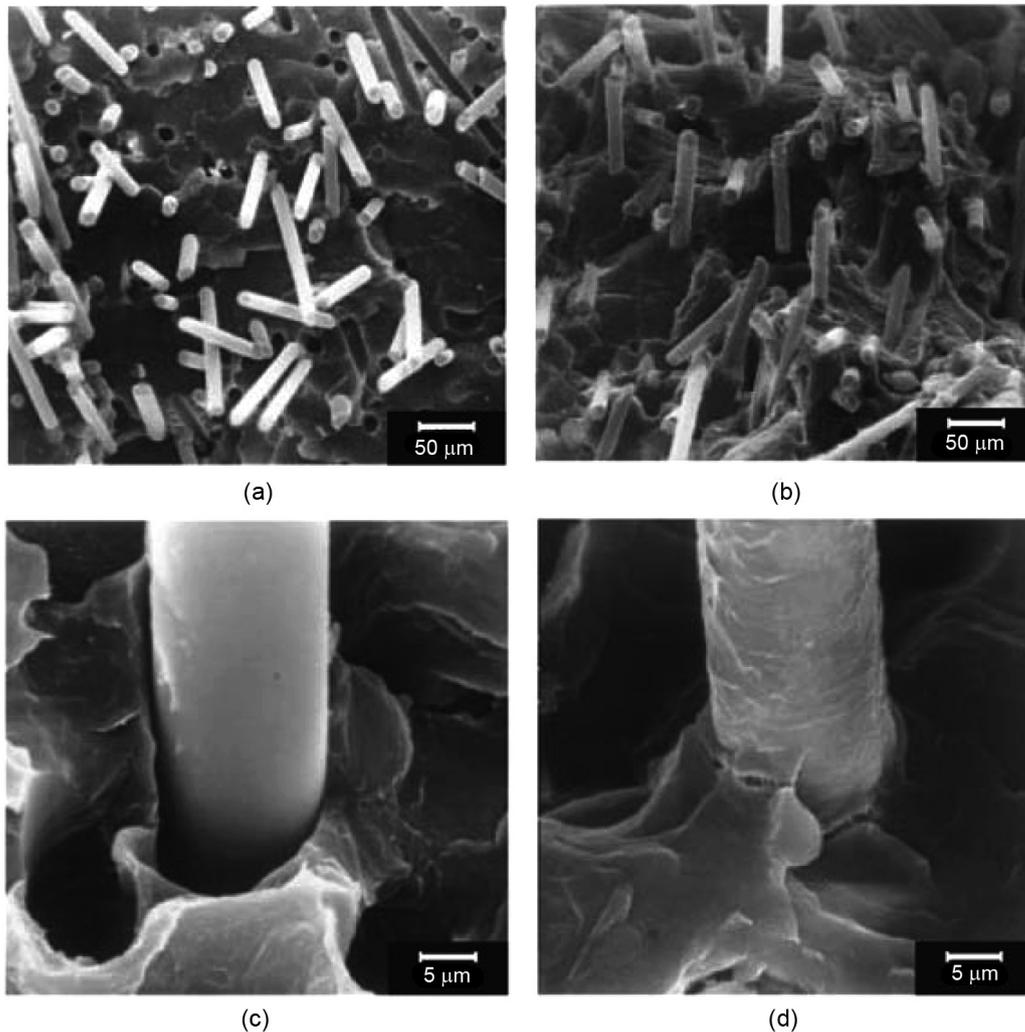


Figura 127 – Micrografias MEV de superfícies fraturadas dos compósitos PP com 30% m fibras de vidro sem (a e c) e com compatibilizante interfacial (b e d)

A ligação interfacial criada pelo agente de acoplamento silano ou de outra natureza, permite melhor transferência de tensões entre fibra e matriz, o que aumenta a resistência à tração, bem como a tensão de cisalhamento interlamelar do compósito. No entanto, a extensão da melhora dependerá da compatibilidade entre o agente de acoplamento e a matriz.

7.1.2 – Tratamento superficial de fibras de carbono

As fibras de carbono, apesar de muito caras, são as favoritas para o desenvolvimento de compósitos estruturais de alto desempenho. Sua superfície, no entanto, é quimicamente inerte, o que pode resultar em um grave problema, que é a inadequada adesão interfacial. Dessa forma, para explorar ao máximo seu potencial como carga em compósitos, as fibras precisam

CAPÍTULO 8

ESTRUTURAS SANDUÍCHE

Durante a Segunda Guerra Mundial, a necessidade de estruturas mais leves para serem utilizadas na fabricação de aeronaves levou ao desenvolvimento de um tipo de construção, considerada revolucionária à época, constituída de um núcleo de madeira leve (madeira balsa, oriunda da América Latina), revestido por placas mais resistentes, também de madeira. Essa estrutura era mais leve e resistente, sendo utilizada para a construção de cerca de 8000 aviões usados em conflitos nesse período. Posteriormente, essa estrutura evoluiu, sendo então utilizadas placas metálicas para revestir o núcleo de madeira balsa, bem como a fabricação de núcleos de espuma.

Um dos maiores desafios para o engenheiro das indústrias aeronáutica e espacial é a redução de peso dos componentes. Nesses mercados, cada quilograma tem um custo elevado, portanto, em componentes estruturais, os compósitos sanduíches se tornaram uma das soluções mais eficientes por combinarem maior rigidez à flexão, com maior relação resistência/peso. As estruturas sanduíches (figura 133) são um tipo especial de material compósito que são fabricadas pela junção de um material fino, denso e forte, que constitui as faces externas, com um material de núcleo muito leve e de baixo módulo, sendo tipicamente espuma, madeira e “colmeias”. As lâminas externas podem ser constituídas de ligas de alumínio, titânio, aço, polímeros reforçados com fibras ou madeira. Cada componente isoladamente pode ser relativamente fraco e flexível, no entanto, quando unidos adequadamente (a partir de colagem), resultam em uma estrutura com elevada resistência e leveza.

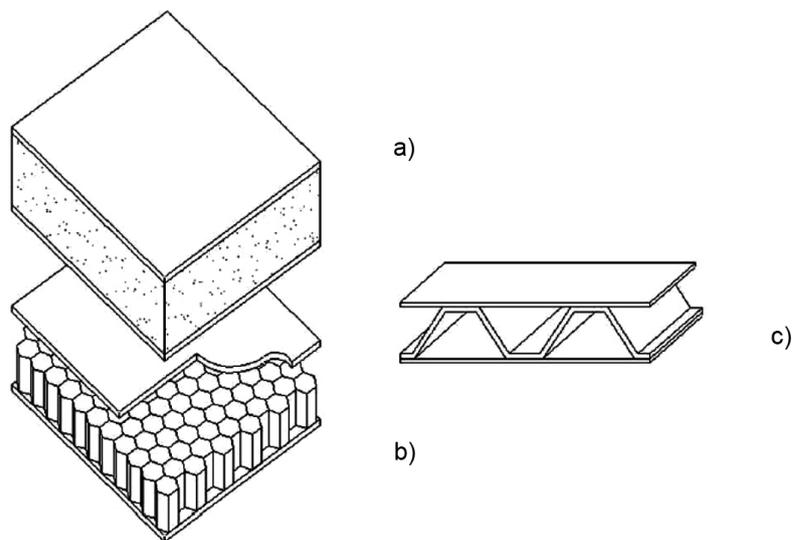


Figura 133 – Estruturas sanduíches com núcleo (a) polimérico, (b) colmeia, (c) corrugado

CAPÍTULO 9

PROCESSAMENTO DE MATERIAIS COMPÓSITOS

Em razão da grande diversidade de materiais e técnicas de processamento, a tarefa de selecionar o processo de fabricação mais apropriado para a produção de peças a partir de compósitos torna-se relativamente difícil. A qualidade de um produto fabricado a partir de um material compósito é fortemente influenciada pelo processo de fabricação. Caso o processo de fabricação não seja corretamente escolhido, pode haver variações na fração volumétrica da carga e matriz, orientação da carga, tempo de trabalho e de cura da matriz. Assim, algumas condições básicas devem ser alcançadas durante a etapa de produção de um compósito: i) deve ocorrer total impregnação das cargas pela matriz; ii) as cargas devem estar uniformemente dispersas na matriz, sem gerar agregados ou aglomerados; iii) a razão de aspecto das cargas não deve ser alterada durante o processamento; iv) no caso de termofixos, a cura deve ser uniforme ao longo de toda a peça; v) a remoção de bolhas de ar (vazios) deve ser efetiva; vi) em casos em que elevadas temperaturas de processos são utilizadas, tanto a carga como a matriz devem ser termicamente estáveis na temperatura utilizada.

Há muitos processos que podem ser utilizados para a fabricação de compósitos. Cada um apresenta vantagens econômicas, de produção e desempenho, o que deverá ser cuidadosamente considerado na etapa de projeto. Para a escolha do processo mais adequado, quatro conjuntos de fatores devem ser considerados: i) desenho (concepção); ii) tipo de matriz polimérica; iii) estrutura da carga; e iv) possibilidades de processo, conforme esquematizado na figura 143. O problema é relativamente complexo, tanto pelas possibilidades oferecidas, como pelas interações entre o projeto, a estrutura e o processo.

CAPÍTULO 10

NANOCOMPÓSITOS POLIMÉRICOS

10.1 – Definições básicas de nanotecnologia

A nanotecnologia vem criando uma revolução no século 21, explorando novas propriedades, fenômenos e funcionalidades exibidas pela matéria em escala nanométrica. Os materiais em nanoescala são reconhecidos como únicos, pois apresentam novos comportamentos, quando comparados ao mesmo material em escala macroscópica, possibilitando a criação de materiais revolucionários.

A nanotecnologia pode ser definida como a habilidade de trabalhar no nível molecular, átomo por átomo, para criar estruturas com novas propriedades fundamentais e funcionalidades. Por convenção, a nanotecnologia engloba a pesquisa de estruturas com dimensões entre 1 e 100 nm (desde dimensões atômicas até aproximadamente o comprimento da luz visível), pois alterações nessa faixa de tamanho causam mudanças mais significativas nas propriedades dos materiais. A dimensão em nanoescala é representada pela grandeza física nano, e sua notação é nm ou um bilionésimo de metro, 10^{-9} m. Para visualizar materiais com essa dimensão, pode-se fazer uma análise comparativa com outras estruturas, objetos e organismos, conforme ilustrado na figura 175.

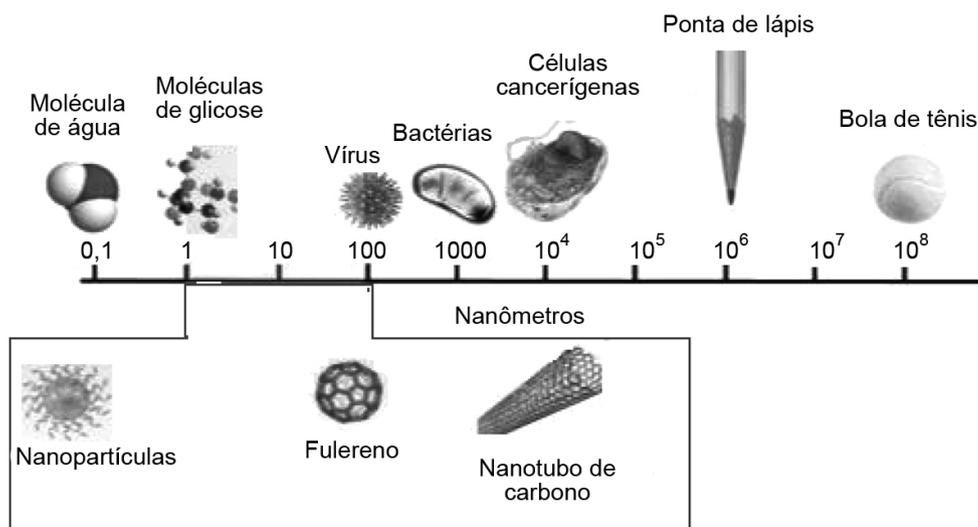


Figura 175 – Dimensões representativas de algumas moléculas, organismos e objetos em várias escalas

Todos os materiais são formados por átomos, no entanto, estes diferem entre si pelo tipo de átomos que os compõem e na forma como estes átomos interagem através das ligações ou interações químicas. O tamanho de um sólido tem grande efeito no comportamento dos

10.2.1 – Nanocompósitos com nanocargas a base de carbono

O carbono é um dos elementos mais fascinantes e o sexto elemento mais abundante no Universo. Uma das características que torna o carbono tão importante é sua habilidade de formar ligações com vários elementos em diferentes formas, inclusive com ele mesmo. Diferentemente de outros elementos que formam ligações fracas entre seus próprios átomos, as ligações C-C podem apresentar elevada energia de ligação (por exemplo, energia de uma ligação C-C simples é de 348 kJ/mol), conferindo elevada estabilidade estrutural. Assim, o carbono pode formar diferentes alótropos, e o diamante e o grafite são considerados as formas cristalinas naturais e puras. No entanto, outros derivados também são encontrados, como grafeno, nanotubos de carbono, negro de fumo e fulerenos. Todas esses alótropos, apesar de serem constituídos majoritariamente por carbono, apresentam propriedades completamente distintas entre si, com diferentes estruturas e dimensionalidades (0D, 1D, 2D e 3D), conforme ilustrado na figura 181.

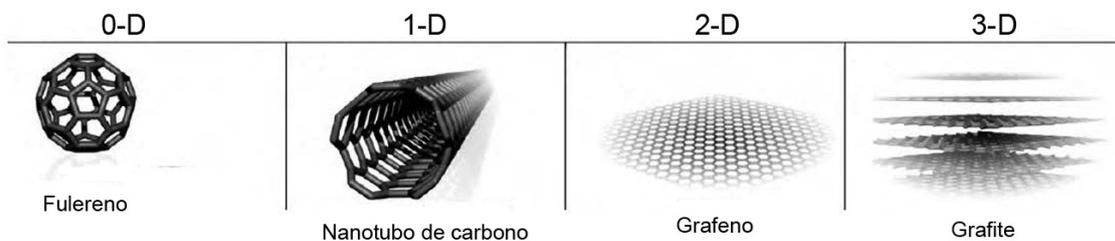


Figura 181 – Modelos de estruturas de diferentes nanomateriais a base de carbono, exibindo dimensionalidades 0D (fulereno), 1D (nanotubo de carbono), 2D (grafeno) e 3D (grafite)

O desenvolvimento intenso nas últimas duas décadas, especialmente de nanomateriais, tem despertado o interesse e fascínio por materiais nanoestruturados a base de carbono, para serem utilizados no desenvolvimento de nanocompósitos. Isso deve-se ao conjunto de propriedades apresentadas por esses materiais, como elevadas propriedades mecânicas, condutividade elétrica, condutividade térmica, área de superfície, estabilidade térmica, baixa densidade (entre 1,8 e 2,5 g/cm³, dependendo do aditivo), inércia química e grande área de superfície específica.

Alguns materiais carbonáceos já têm sido utilizados há muitos anos como nanocargas, como é o caso do negro de fumo e do grafite, principalmente em razão da disponibilidade e do seu baixo custo. Outros têm sido explorados mais recentemente, como o grafeno e nanotubos de carbono e, apesar de serem muito mais caros, podem resultar em modificações mais significativas de propriedades mecânicas e elétricas dos nanocompósitos, devido à maior razão de aspecto e maior área de superfície. Esses materiais apresentam diferentes formatos de partícula (figura 182), com diferentes razões de aspecto, que resultam em variadas áreas de superfície para interação com a matriz. O grafeno e o grafite apresentam estrutura lamelar, no entanto, normalmente o grafeno resulta em compósitos com propriedades superiores, por ser

A funcionalização do grafeno é considerado uma rota eficiente para manter a sua estabilidade, otimizar e expandir seu uso em nanocompósitos poliméricos.

O isolamento do grafeno pode ser realizado através da esfoliação química a partir do grafite intercalado, conforme discutido anteriormente, no entanto, dificilmente obtém-se uma única folha de grafeno. Essa rota permite a obtenção de quantidades muito pequenas de grafeno puro, não sendo ainda viável para a fabricação de nanocompósitos poliméricos em larga escala, visto que é um processo muito caro e demorado. Outra metodologia que pode ser utilizada é o crescimento das folhas de grafeno via deposição química em fase vapor de hidrocarbonetos em substratos metálicos.

10.2.1.3 – Nanotubos de carbono

O nanotubo de carbono é uma forma alotrópica do carbono, composto por anéis hexagonais de átomos de carbono, unidos por ligações do tipo sp^2 . Para visualização, pode-se considerar um nanotubo como uma folha de grafeno que se enrola em um formato cilíndrico (figura 186), com diâmetros de poucos nanômetros e comprimento em micrometros. Os nanotubos de carbono podem ser classificados de duas formas: nanotubos de carbono de paredes simples (NTCPs), constituído por um único cilindro, ou nanotubos de carbono de paredes múltiplas (NTCPMs), formados por vários cilindros de grafeno enrolados de forma concêntrica, espaçados uns dos outros por distâncias de 0,34 – 0,36 nm, onde as forças de Van der Waals mantêm os tubos unidos.

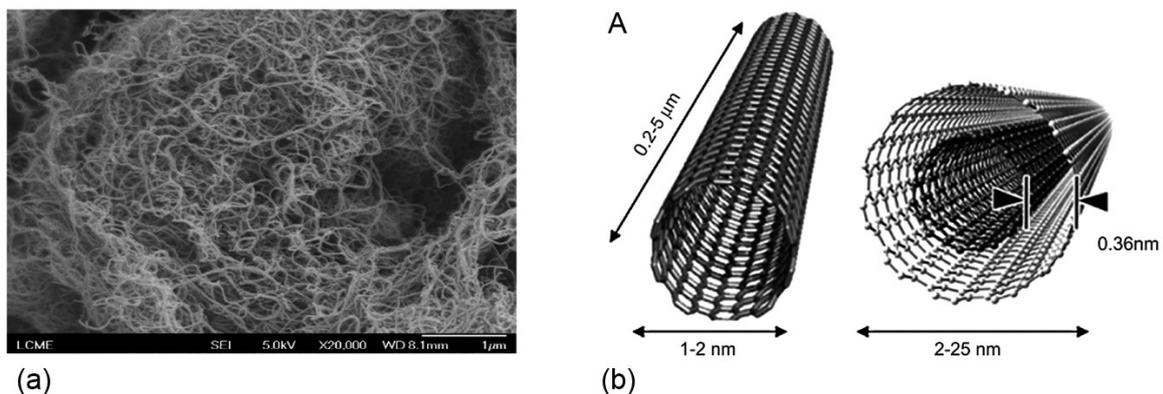


Figura 186 – (a) Microscopia Eletrônica de Varredura de nanotubos de carbono e (b) diagrama esquemático da estrutura de nanotubos de carbono de paredes simples (NTCPs) e nanotubos de carbono de paredes múltiplas (NTCPMs)

Dentre as nanocargas à base de carbono, os nanotubos de carbono (NTCs) têm recebido atenção especial para o desenvolvimento de nanocompósitos, uma vez que esses materiais possuem elevada resistência à tração e são considerados 100 vezes mais resistentes que o aço, associada à menor densidade (1,3 a 2,6 $g \cdot cm^{-3}$). O módulo elástico dos NTCs é superior a todos os tipos de fibras de carbono, com valores superiores a 1 TPa, que é aproximadamente

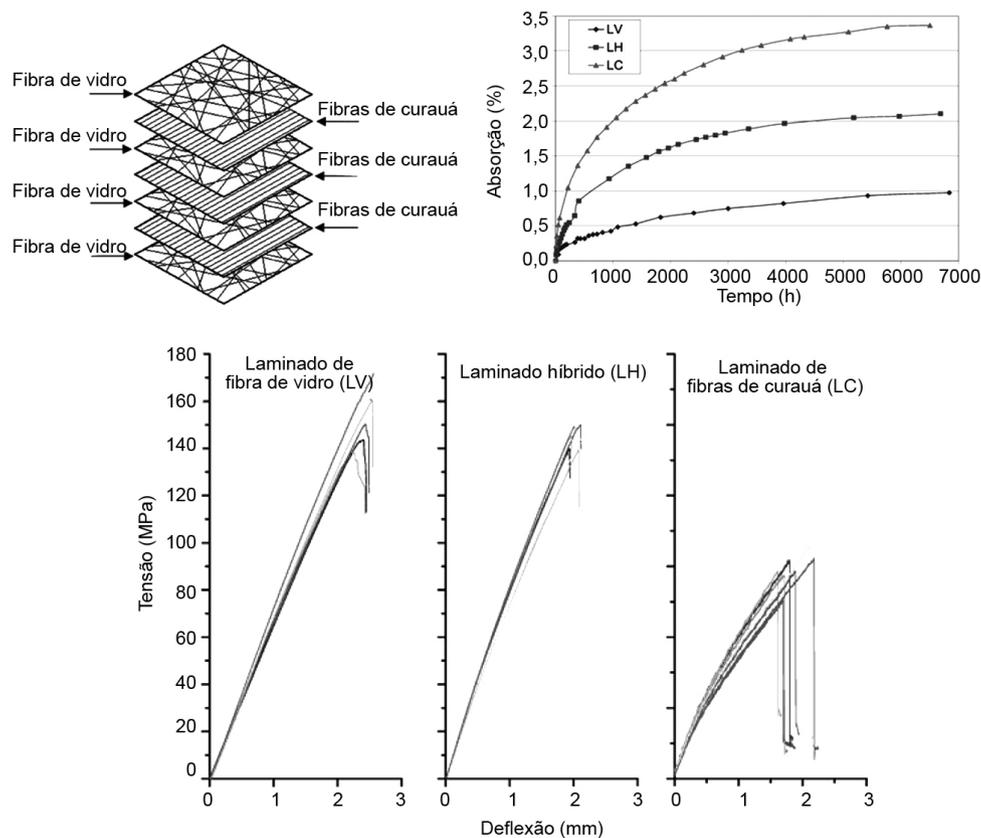


Figura 194 – Exemplo de um laminado *híbrido* com fibra de vidro/curauá, destacando-se a absorção de umidade e resistência à tração dos compósitos com fibras de vidro e curauá

11.4 – Compósitos híbridos multiescalas

A engenharia aeroespacial é um dos setores técnicos que mais buscam inovações em materiais avançados de alto desempenho, a fim de melhorar o desempenho e a segurança, além de reduzir o consumo de combustíveis, devido à redução de peso dos componentes. Pesquisas multidisciplinares e inovações no setor de engenharia de materiais tornou possível o desenvolvimento de materiais multifuncionais extraordinários, que estão ganhando enorme destaque no mercado industrial. Materiais compósitos avançados são uma classe de materiais inovadores com enorme potencial de aplicação, pela possibilidade de combinar diferentes materiais, que podem ser facilmente adaptáveis a diferentes designs com um amplo conjunto de propriedades. Além disso, o avanço recente na área de nanotecnologia tem possibilitado o desenvolvimento de compósitos avançados com novas propriedades e funcionalidades. Dentro desse contexto, a utilização de nanomateriais e fibras estruturais para o desenvolvimento de compósitos híbridos multiescalas pode ser uma estratégia para o desenvolvimento de materiais com propriedades avançadas.

referenciada como *Fuzzy Fiber-Reinforced Plastic Laminate* (FFRP)) podem atuar como ponte da trinca, ligando as duas camadas do laminado e, assim, resultando em um incremento da força de cisalhamento interlamelar, que pode ser aumentada em até 70%. Além disso, conforme discutido anteriormente e demonstrado nas figuras 198 e 199, NTCs podem ser introduzidos nas regiões interlamelar e intralamelar, propiciando um reforço tridimensional.

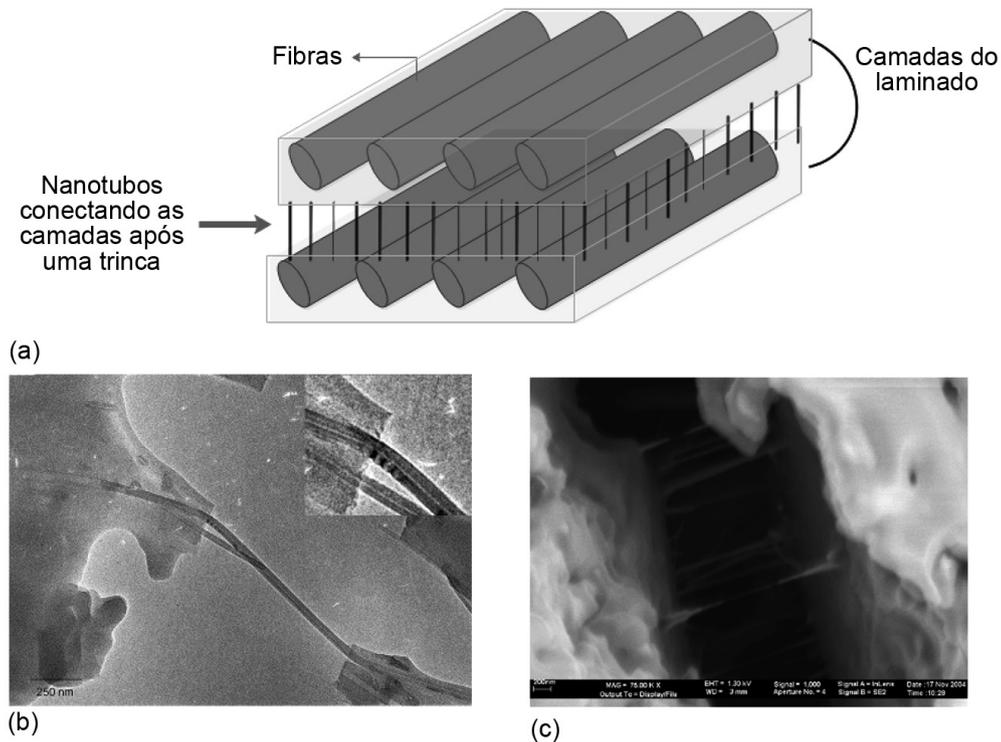


Figura 198 – Ilustração de uma arquitetura de um compósito híbrido ideal: (a) NTC entre duas camadas de um laminado atuando como ponte da trinca, ligando as duas camadas do laminado; (b) micrografia obtida por microscopia eletrônica de Transmissão de NTCs ligando uma trinca na matriz; e (c) micrografia de MEV de um compósito epóxi com NTCs, mostrando a superfície de uma trinca, ligada por nanotubos

CAPÍTULO 13

MODOS DE FRATURA E FALHA EM COMPÓSITOS

Durabilidade e tolerância a danos são fatores críticos no design de compósitos estruturais. Tolerância a danos, ou seja, manutenção de propriedades após longos períodos de uso, é usualmente requerida para certificações de segurança em estruturas, como em componentes de aeronaves. A durabilidade está relacionada ao tempo de uso de uma estrutura e tem sido identificada como um fator importante para a fabricação de componentes a partir de compósitos. Ambos os conceitos implicam que o componente está sendo exposto às condições de aplicação, como carregamento mecânico e condições ambientais, temperatura e agentes químicos por longos períodos.

Em sentido amplo, a falha de uma estrutura pode ser declarada quando seu desempenho não é mais satisfatório. No entanto, a definição de falha é diferente de uma aplicação para outra, e, em algumas aplicações, pequenas deformações podem ser consideradas como falha, enquanto em outras apenas a ruptura total ou separação dos constituintes é considerada como falha.

13.1 – Modos de falha

Quando um material sólido é submetido a qualquer tipo de carregamento, estático ou sob impacto, pode ocorrer a absorção de energia através de dois mecanismos: (a) criação de uma nova superfície, e ii) deformação do material. A deformação ocorre primeiro, no entanto, se a energia fornecida é elevada o suficiente, uma trinca pode ser iniciada e propaga-se, atuando, assim, como segundo mecanismo de absorção de energia. A deformação do material continua, conforme a propagação da trinca avança.

No caso de compósitos, a falha interna geralmente inicia muito antes ser observada qualquer mudança macroscópica ou no comportamento e desempenho do componente. A falha interna em um compósito pode acontecer a partir de diferentes modos, dependendo, dentre outras coisas, da microestrutura do compósito (tipos de carga, fração volumétrica, diâmetro, comprimento e distribuições das fibras), das condições de carregamento externas e do dano resultante das tensões térmicas induzidas durante o processo de fabricação ou uso. Considerando que muitos fatores podem contribuir para a fratura de um compósito, diferentes modos de falha podem estar presente em um mesmo compósito.

Em um compósito, o modo de fratura é determinado acima de tudo pelo comprimento das fibras e pela ductilidade da matriz, ou seja, o modo como a matriz reage à elevada tensão imposta na ponta da trinca (fratura frágil ou dúctil). Durante a propagação da trinca, a energia é absorvida pela fratura de fibras e matriz, no entanto, outros mecanismos de dissipação de

energia podem acontecer. Em alguns casos, o efeito de um dano interno na resposta macroscópica do material pode ser observado antes da falha total do compósito. Por outro lado, pode haver casos em que há efeito na resposta macroscópica do material apenas quando esse dano é significativamente elevado.

De acordo com o modelo desenvolvido por Outwater e Murphy (1969), o crescimento de uma trinca inicia-se na extremidade da fibra e se espalha ao longo da interface. No entanto, é possível a formação de trincas a partir da fibra e sua propagação pela matriz. Esse comportamento é caracterizado por diferentes modos de propagação e fratura do compósito. Dentre os principais modos de falhas que podem acontecer em compósitos poliméricos fibrosos (figura 205), destacam-se: a) ruptura das fibras, b) arrancamento das fibras da matriz (*pull-out*), c) descolamento na interface, d) microtrincas na matriz, e e) separação das camadas de um laminado (delaminação). Em muitos casos, mais de um modo de falha pode ser observado em um compósito, os quais contribuem para o processo de fratura do componente.

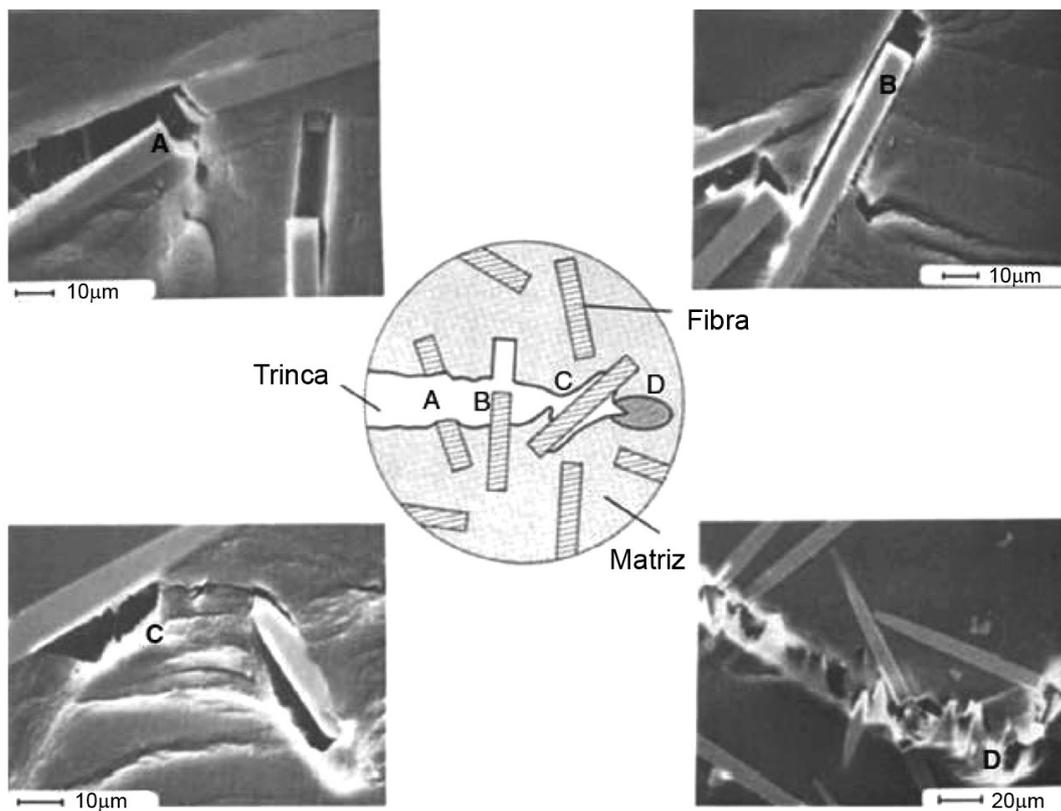


Figura 205 – Modos típicos de falha em compósitos com fibras curtas: (a) ruptura das fibras, (b) arrancamento das fibras da matriz (*pull-out*), (c) descolamento na interface, (d) microtrincas na matriz

CAPÍTULO 14

RECICLAGEM DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

Os materiais compósitos têm sido utilizados em uma grande variedade de aplicações industriais, especialmente as que requerem elevada relação resistência-peso, visando a substituição de materiais metálicos. A demanda mundial desses materiais cresce a cada ano, com destaque para os compósitos poliméricos, com expectativa de crescimento de mais de 6% no período de 2021 a 2024. Com a crescente demanda no uso desses materiais, cresce também a quantidade de resíduos gerados, sejam eles oriundos dos processos de produção ou pós-consumo. Desse modo, o principal desafio é o gerenciamento dos resíduos, especialmente com a criação de técnicas avançadas de reciclagem, para reduzir o impacto ambiental, proteger o meio ambiente e criar eficiência de recursos, promovendo o uso desses resíduos como matérias-primas.

A política de tratamentos de resíduos fundamenta-se em cinco etapas hierárquicas: i) prevenção de geração; ii) reuso; iii) reciclagem, são prioritárias; seguidas por iv) outras formas de recuperação (incineração), sendo a v) disposição em aterro sanitário, a última alternativa. As legislações vêm tornando-se cada vez mais restritivas e rigorosas, de forma a forçar o cumprimento dessas etapas hierárquicas. Nos USA, por exemplo, em 2015 as Diretivas de Ciclo de Vida de Veículos impôs o reuso ou reciclagem de 85% de um automóvel, restringindo as formas tradicionalmente adotadas de descarte, especialmente a deposição em aterros sanitários. No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) estabelece a logística reversa como um dos instrumentos de implementação da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida de diversos produtos, como agrotóxicos, óleos lubrificantes, seus resíduos e embalagens, pilhas e baterias, pneus, lâmpadas fluorescentes, produtos eletroeletrônicos e seus componentes, porém, não engloba diretamente diversos produtos que utilizam massivamente materiais compósitos. Dessa forma, é extremamente importante a conscientização de indústrias que fabricam componentes a partir de compósitos, para que adotem medidas de preservação ambiental, como a reciclagem, reaproveitamento de materiais e processos de logística reversa, de modo a reduzir os impactos ambientais e aumentar a lucratividade.

Dentro deste contexto, atualmente o desenvolvimento sustentável têm se tornado uma necessidade, e a reciclagem de materiais compósitos contribuirá para o desenvolvimento de processos e produtos mais sustentáveis. Atualmente, metais, polímeros, vidros e muitos outros materiais de engenharia são reciclados em larga escala. No entanto, os materiais compósitos, hoje tão importantes como materiais de engenharia, ainda não são reciclados apropriadamente.

Dentre as razões que restringem ou dificultam a reciclagem dos materiais compósitos, destacam-se:

- Compósitos são, por natureza, a combinação de diferentes materiais (matriz e cargas, podendo ainda conter outros aditivos ou ser combinados com outros materiais), existindo poucas formulações específicas, uma vez que para a maioria das aplicações, o tipo e a proporção dos componentes são adaptados ao uso que se destina. Essa heterogeneidade de composição resulta em variabilidade dos resíduos produzidos, tornando difícil definir rotas de reciclagem.
- A identificação de diferentes composições é tecnicamente desafiadora, fazendo com que a coleta e separação sejam dificultadas.
- Para a reciclagem ou o reaproveitamento dos materiais, a separação das cargas e da matriz é necessária, uma vez que eles apresentam estrutura, composição química e propriedades diferentes. Esta é uma etapa básica, porém, a mais desafiadora e trabalhosa.
- Grande parte dos compósitos produzidos utilizam como matriz, polímeros termofixos, que apresentam em sua estrutura ligações cruzadas, que impossibilitam sua remoldagem por fusão ou solubilização.
- Falta de infraestrutura para reciclagem e mercado para os produtos.

As atuais práticas de gerenciamento de resíduos em compósitos são dominadas por aterros, que ainda é uma opção relativamente barata para a indústria. No entanto, tem sido reconhecido que a deposição em aterros não será inviável para as indústrias, principalmente em razão das restrições impostas pelas legislações. Adicionalmente, legislações ambientais recentes, como as diretivas americanas para ciclo de vida de veículos e para resíduos elétricos e eletrônicos, têm levado a uma crescente demanda por técnicas que levem à reciclagem dos materiais compósitos, que normalmente estão presentes nesses componentes. Essas legislações ajudarão a promover a reciclagem, no entanto, é necessário o desenvolvimento de novas tecnologias para consolidar a reciclagem.

Devido ao fato de que grande parte do mercado de compósitos é dominada pelos compósitos poliméricos com matrizes termofixas, o desenvolvimento de tecnologias de reciclagem tem sido focado especialmente para esse tipo de compósito. No entanto, diferentes tecnologias têm sido propostas e desenvolvidas para a reciclagem de compósitos poliméricos com matrizes termofixas e termoplásticas, incluindo reciclagem mecânica, térmica e química, de acordo com as características apresentadas na tabela 28. A reciclagem mecânica envolve a trituração e moagem, seguida da reutilização, e os reciclados têm uma qualidade relativamente baixa. O processamento térmico utiliza alta temperatura (entre 300 e 1000 °C) para decompor a resina e separar as cargas. Cargas limpas são gerados para reutilização, e, posteriormente, combustível ou energia térmica pode ser produzido por pirólise, gaseificação ou combustão. A reciclagem química visa a despolimerização química ou remoção da matriz usando solvente orgânico ou inorgânico e liberação das fibras.

Na figura 229, foi ilustrado o exemplo de uma partícula de compósitos com tecido de fibras de vidro e matriz de poliéster, obtida por reciclagem mecânica. O reciclado (após moagem) apresenta predominantemente partículas com um tamanho variando de 0,3 a 2,3 mm, com feixes de fibras encapsuladas com a resina de poliéster. A partir da imagem de microscopia com maior aumento, pode-se observar mais claramente a camada de resina sobre as fibras, havendo algumas regiões mais ricas em resina. Adicionalmente é possível observar a fratura de algumas fibras no tecido.

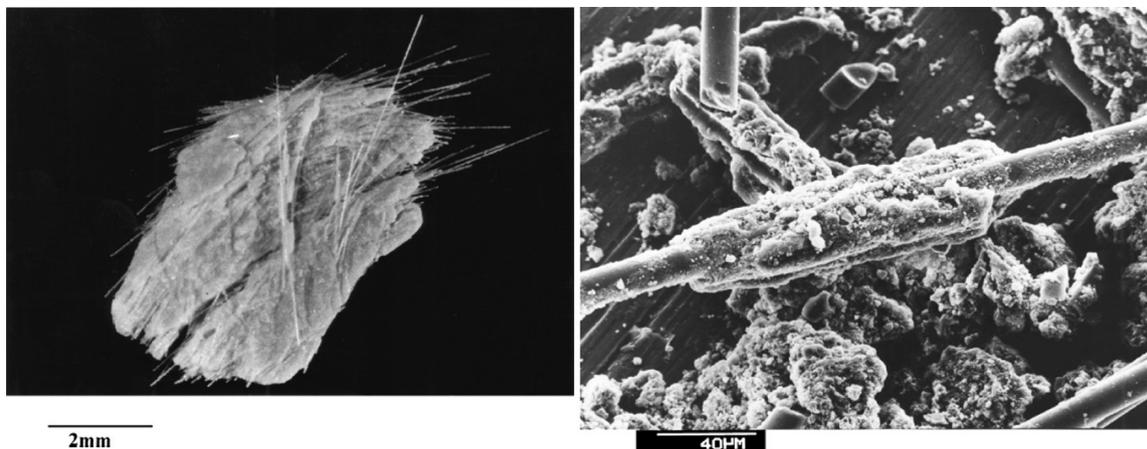


Figura 229 – Exemplo de partícula, obtida por reciclagem mecânica, de compósito com tecido de fibras de vidro e matriz de poliéster

Os materiais reciclados por esse método podem ser utilizados em diversas aplicações, no entanto, o uso mais comum é como carga para o desenvolvimento de novos compósitos. O uso das partículas como carga em matrizes poliméricas, pode ser utilizada com a finalidade de reforço ou enchimento. A incorporação destes compósitos reciclados como carga limita-se a uma quantidade menor do que 10% em massa, em razão da deterioração das propriedades mecânicas e aumento da viscosidade em maiores concentrações, atribuída à maior absorção de polímero, o que leva a problemas de processamento. Além disso, mesmo em baixas frações, a utilização desses materiais, como carga, pode ser dificultada, uma vez que a presença do polímero reciclado na superfície das fibras (especialmente reciclados a partir de polímeros termofixos), impede uma boa adesão com a nova matriz, resultando em baixas propriedades mecânicas do compósito. No entanto, o aumento no tempo de mistura pode aumentar a eficiência da molhabilidade pela matriz e, conseqüentemente, a adesão interfacial.

O uso desses materiais reciclados como carga de enchimento, pode não ser comercialmente viável em razão do baixo custo de cargas virgens, como carbonato de cálcio, sílica ou fibras vegetais. No entanto, uma das vantagens desses materiais é a menor densidade em comparação ao carbonato de cálcio ($2,7 \text{ g.cm}^{-3}$). Para atuar como reforço, normalmente usam-se cargas com maior razão de aspecto, porém, de maneira geral, verifica-se a redução nas propriedades mecânicas, como dureza e resistência à tração, em razão da falta de interação entre o polímero e o material reciclado e devido ao fato de que as partículas com elevado tamanho atuam como pontos concentradores de tensões. Dessa forma, partículas de compósitos reciclados via

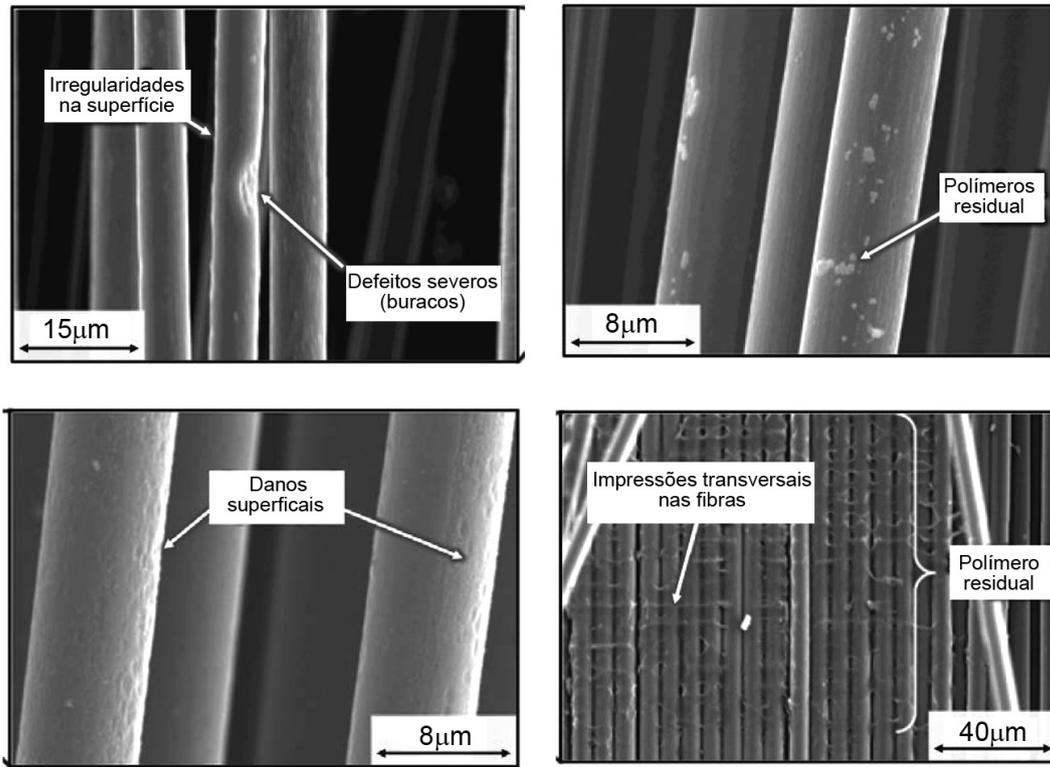


Figura 232 – Defeitos que podem ser incorporados na superfície das fibras de carbono após o processo de pirólise

A pureza da superfície da fibra reciclada, por exemplo, tem um efeito na capacidade de adesão em um novo polímero. Quando há presença de polímero residual na superfície da fibra, isso reduz a adesão com a nova matriz, levando a baixas propriedades mecânicas. A rugosidade superficial pode contribuir positivamente para a adesão, promovendo o ancoramento mecânico, no entanto, essa rugosidade superficial após a reciclagem não deve ser severa, pois reduz a resistência mecânica das fibras. Uma estratégia que pode ser adotada para melhorar a compatibilização da fibra reciclada é a aplicação de um novo revestimento superficial (*sizing*) após a reciclagem, de modo a promover uma melhor adesão fibra/matriz.

Polímeros termofixos, como todos os materiais orgânicos, apresentam uma capacidade calorífica e podem ser utilizados como fontes de energia. A capacidade calorífica da maioria dos polímeros termofixos é de cerca de 30.000 kJ/Kg. Como a maioria das cargas inorgânicas utilizadas não são combustíveis, a capacidade de um compósito termofixo com fibras inorgânicas, depende apenas da proporção dos componentes, conforme ilustrado na figura 233.