

Capítulo IX – Noções gerais sobre materiais compósitos

- Materiais compósitos são aqueles formados por dois ou mais constituintes, os quais podem ser distinguidos seja de forma macroscópica ou microscópica;
- Um material compósito é formado por uma mistura heterogênea ou pela combinação de dois ou mais macro ou micro constituintes;
- A importância dos compósitos em engenharia reside no fato de que combinando-se materiais diferentes, pode-se obter um material que reúna um conjunto de propriedades e características, que os componentes isolados não possuem;
- Esta classe engloba uma grande quantidade de materiais de engenharia dentre os quais serão destacados e abordados em seguida:

1. Materiais plásticos reforçados com fibras;
2. Concreto;
3. Asfalto e misturas asfálticas;
4. Madeiras
5. Estruturas em sanduíche.

1. Materiais plásticos reforçados com fibras

- Os materiais poliméricos mais importantes usados como matriz para obtenção de plásticos reforçados por fibra, são o poliéster insaturado e a resina epoxídica;
- As resinas de poliésteres são mais baratas, porém são menos resistentes que as resinas epoxídicas.
- Estes materiais que são usadas como matrizes de plásticos reforçados por fibra tem ampla aplicação como: cascos de barcos, painéis de construção de construção e estruturais de automóveis, de aviões e de vários tipos de aparelhos domésticos;
- As resinas epoxídicas são mais caras, porém possuem boa resistência mecânica e são normalmente utilizadas como material para matriz de compósitos de fibra de carbono e aramido.

1.1. Fibras para reforço de materiais plásticos

- As principais fibras sintéticas usadas para reforçar materiais plásticos são: fibras de vidro, aramido e carbono;
- As fibras de vidro são mais usadas e mais baratas;
- As fibras de aramido e carbono apresentam resistência mecânica elevada e baixa densidade. Devido a preço mais elevado, seu uso é mais restrito embora amplamente usadas nas indústrias aeronáuticas e aeroespaciais.

1.1.1. Fibra de vidro => apresentam características favoráveis tais como:

- Elevada relação resistência peso (são mais densas que a fibra de carbono e aramido);
- Boa estabilidade dimensional;
- Boa resistência ao calor, à baixa temperatura, à umidade e à corrosão;
- Boas propriedades de isolamento elétrico;
- Facilidade de fabricação; e
- Custo relativamente baixo.

- Os tipos de vidros mais utilizados como fibras para compósitos são: vidro boro-silicato e vidro de silício;
- A fabricação da fibra de vidro é feita por meio de trefilagem de monofilamentos de vidro a partir do vidro fundido em forno. A seguir promove-se a junção de um grande número destes filamentos de modo formar um feixe de fibras de vidro;
- Pode-se encontrar estas fibras de feixes contínuos ou entrelaçados entre si;
- Apresenta menor resistência à tração e rigidez do que as fibras de carbono e aramido.

1.1.2. Fibras de carbono

- Materiais poliméricos reforçados com fibra de carbono apresentam:
 - Baixa densidade;
 - Resistência mecânica muito elevada;
 - Elevada rigidez;
 - Grande aplicação aeroespacial;
 - Custo elevado (algumas limitações industriais);

- São fabricadas a partir de poliacrilonitrila (PAN) ou piche;
- São produzidas a partir de fibras de PAN por meio de oxidação ao ar a 220⁰C, seguida de aquecimento entre 1000 e 1500⁰C para a retirada dos átomos de nitrogênio, hidrogênio e oxigênio da cadeia PAN.

1.1.3. Fibras de aramido

- São designadas genericamente como às fibras de poliamida aromática sob nome comercial de Kevlar;
- Kevlar 29 e 49 => elevada resistência mecânica e baixa densidade indicada para aplicações de blindagem, cordas e cabos e especificamente a Kevlar 49 por possuir modulo de elasticidade tem grande aplicação nas industria aeroespacial, marítima e automobilística;
- As resinas epoxídicas reforçadas por Kevlar são largamente utilizadas no ônibus e nave espacial.

1.1.4. Comparação de propriedades mecânicas de fibras de carbono, de aramido e de vidro usadas para reforçar plásticos.

- As fibras de carbono são as que apresentam melhores combinações, porém as fibras de vidro são as mais baratas e por isso são utilizadas em larga escala.

Propriedade	Vidro	Carbono	Aramido
Resistência à tração GPa	2410	3100	3617
Módulo de elasticidade em tração GPa	69	220	124
Alongamento na ruptura %	3.5	1.40	2.5
Densidade g/cm ³	2.54	1.75	1.48

1.2. Resinas de poliéster reforçadas por fibras de vidro

- A resistência mecânica dos plásticos reforçados por fibra de vidro está relacionada com a quantidade de vidro presente e com a deposição das fibras, ou seja, quanto maior a quantidade, mais resistente é o material;
- Quando os feixes de vidro são paralelos, a porcentagem de fibras no material pode atingir 80% em massa, o que torna o material com maior resistência mecânica;

- Qualquer desvio de alinhamento das fibras reduz sua resistência mecânica do material.

1.1.5. Resina Epoxídica reforçadas com fibras de carbono

- As fibras de carbono incorporado aos materiais poliméricos originam materiais compósitos com excelentes propriedades de rigidez e à tração;
- O bom alinhamento das fibras melhora a resistência ao impacto;
- A principal vantagem das fibras de carbono resulta do fato de apresentarem valores muito elevados de resistência e de módulo de elasticidade associados com baixa densidade;
- Por essa razão, os compósitos de fibra de carbono substituem os metais em algumas aplicações na indústria aeronáutica e aeroespacial, mais especificamente nas asas de aviões, lemes de profundidade e nas portas de compartimento de carga do ônibus espacial.

2. Concreto

- Concreto é o principal material de engenharia usado em construção civil, tais como, pontes, edifícios, barragens, pavimentos de estradas e etc;
- As vantagens que o concreto oferece, é a flexibilidade na escolha das formas, pode ser vazado, economia, durabilidade, resistência ao fogo e aparência estética;
- Do ponto de vista da engenharia, as principais desvantagens do concreto residem na sua baixa resistência à tração, baixa ductilidade;
- O concreto é um compósito cerâmico formado por uma mistura de um material granular constituído por pedras e areia, embebida numa matriz dura obtida a partir da pasta de um cimento (ligante);
- O concreto pode ter composições variadas, mas contém normalmente (em volume) entre 7 e 15 % de cimento tipo portland, 14 a 21 % de água, 0,5 a 8 % de ar, 24 a 30 % de agregados finos e 31 a 51% de agregados grossos.

2.1. Cimento portland

- As matérias-primas básicas do cimento portland são a cal (Cão), a sílica (SiO_2), a alumina (Al_2O_3) e o óxido de ferro (Fe_2O_3).
- As matérias-primas são trituradas, moídas e pesadas, de modo a obter-se a composição desejada e posteriormente são misturadas;
- A mistura é então introduzidas num forno rotativo, onde é aquecida a temperaturas entre 1400 e 1650 °C e posteriormente resfriado e reduzido a pó;
- Adiciona-se ao cimento uma pequena quantidade de gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) a fim de se controlar o tempo de presa do concreto.

2.2. Água

- São poucas as limitações em relação às águas utilizadas nos concretos. Apenas quando o teor de impurezas na água atingir níveis elevados, devem ser realizados testes, a fim de determinar o efeito das mesmas sobre a resistência mecânica do concreto.

2.3. Agregados

- Os agregados constituem normalmente de 60 a 80 % do volume do concreto e afetam muitas as suas propriedades;
- As partículas finas constituem em grãos de areia com granulometria inferior 6 mm (ASTM) e as partículas grossas maior que 1.18 mm (ASTM) e são geralmente rochas;

2.4. resistência à compressão do concreto

- O concreto apresenta uma resistência à compressão muito superior à resistência à tração. Por essa razão, nos projeto de engenharia, o concreto é solicitado fundamentalmente em compressão;
- A resistência mecânica do concreto varia com ao longo do tempo, uma vez que sua resistência se desenvolve por meio das reações de hidratação, uma vez que a sua resistência à compressão depende muito da relação água e cimento.

2.5. Concreto armado

- Quando uma peça em concreto está submetida a forças de tração (por exemplo, como uma viga), o concreto é normalmente moldado de modo a conter no seu interior barras de aço como reforço;
- O concreto reforçado por aço, na forma de barras, redes ou outras armaduras colocadas, recebe o nome de concreto armado.

2.6. Concreto pré-esforçado

- A resistência à tração do concreto armado pode ser melhorada por introduções de tensões compressivas no concreto, por meio de pré-tensionamento ou pós-tensionamento, usando cabos ou barra de aço;
- A vantagem do concreto pré-esforçado está no fato de que somente após terem sido ultrapassadas tensões compressivas introduzidas pelos cabos ou barras de aço, o concreto poderá ficar sujeito a tensões de tração.

3. Asfalto e Misturas Asfálticas

- O asfalto é um *betume*, constituído, basicamente, por uma mistura de hidrocarbonetos com enxofre, oxigênio, e impurezas, que apresenta as características mecânicas de um material polimérico termoplástico;
- Quimicamente, os asfaltos contêm entre 80 e 85 % de carbono, 9 a 10 % de hidrogênio, 2 a 8 % de oxigênio, 0,5 a 7 % de enxofre, e pequenas quantidades de nitrogênio, bem como vestígios de metais;
- O maior parte do asfalto é obtido a partir da refinação do petróleo, mas há outras fontes como o xisto betuminoso e os depósitos sedimentares superficiais (asfalto dos lagos). O teor de asfalto nos petróleos não refinados (ou crus) varia entre cerca de 10 e 60 %;
- A maior parte do consumo de asfalto é para pavimentação de vias públicas e rodovias. O restante é usado principalmente para impermeabilização de telhados e em obras de construção civil;

- O asfalto age como um ligante betuminoso que serve de aglomerante de partículas de inertes (pedra britada, areia) de modo a obter-se uma *mistura asfáltica*, que é usada fundamentalmente para pavimentação de estradas;
- Se a porcentagem de asfalto for demasiado elevada pode, num dia quente, concentrar-se na superfície da estrada e reduzir o atrito, diminuindo a resistência às derrapagens.

4. Madeira

- A madeira é um material largamente utilizado em construção civil. Além de ser aplicada em estruturas, revestimentos para alvenaria de forma geral, em residências, edifícios, pontes, etc., é utilizada para a fabricação de materiais compósitos como laminados de diversos tipos e painéis reforçados;
- A madeira é um material compósito natural formado, fundamentalmente, por um arranjo complexo de moléculas de celulose e outros compostos orgânicos reforçadas por uma substância polimérica muito complexa, com ligações cruzadas do tipo tridimensional, formadas a partir de unidades fenólicas;

- Dessa forma, a partir da madeira não são obtidos produtos homogêneos como aqueles produzidos a partir de aços ou materiais plásticos moldados por injeção;
- A resistência mecânica da madeira é altamente anisotrópica, sendo sua resistência à tração muito maior segundo a direção paralela ao tronco da árvore.

4 . 1 - Madeiras macias e madeiras rígidas

- Contrariamente às madeiras macias, as madeiras rígidas possuem *vasos* de grande diâmetro para a condução dos fluídos. Os vasos são estruturas de parede fina, constituída por elementos individuais, e formam-se segundo a direção longitudinal do tronco da árvore;
- As células longitudinais responsáveis pela sustentação do tronco das árvores de madeira rígida são fibras. Nas árvores de madeira rígida, as fibras são células alongadas com extremidades aguçadas e paredes geralmente espessas. O comprimento das fibras varia entre 0,7 e 3 mm e, em média, o seu diâmetro é inferior a cerca de 20 μm .

4.2 - Propriedades das madeiras

4.2 .1 - teor de umidade

- As madeiras contêm sempre alguma umidade. Por convenção, a porcentagem de água nas madeiras é definida pela seguinte equação:

$$\%de.umidade = \frac{massa.de.agua.na.amostra}{massa.da.amostra.sec.a} \times 100$$

4 . 2 . 2 - Resistência mecânica

- A resistência à compressão da madeira na direção longitudinal é cerca de dez vezes superior a resistência à compressão a direção transversal;
- A razão para esta diferença resulta do fato de que, na direção longitudinal, a resistência da madeira é devida fundamentalmente às fortes ligações covalentes existentes nas cadeias das microfibras de celulose, as quais estão orientadas principalmente segundo as direções longitudinais;

- Na direção transversal a resistência da madeira é menor, porque depende da resistência das ligações de hidrogênio, mais fracas, que ligam lateralmente as moléculas de celulose;
- A madeira no estado verde é menos resistente do que quando seca.

4. 2 . 3 - Contração

- A madeira em verde contrai-se à medida que a umidade é eliminada, o que provoca a distorção das peças de madeira, para as direções radial e tangencial num corte transversal de uma árvore;
- A madeira contrai-se bem mais na direção transversal do que na direção longitudinal, sendo a contração transversal normalmente entre 10 e 15%, enquanto a contração longitudinal é apenas de cerca de 0,1%;
- Quando a água é eliminada das regiões amorfas da parte exterior das microfibras, estas aproximam-se uma das outras e a madeira torna-se mais densa.

5 - Estruturas em sanduíche

- Nas estruturas usadas na engenharia, freqüentemente são aplicados materiais compósitos construídos por um material central, colocado entre duas camadas exteriores mais finas;
- Os dois principais tipos destes materiais são as estruturas em sanduíche tipo ninho de abelha (ou favo-de-mel) e os materiais revestidos (ou "clads").

5 . 1 - Estrutura em sanduíche tipo ninho de abelha

- Há mais de trinta anos estruturas em sanduíche tipo ninho de abelha, constituem um dos principais materiais de construção na indústria aeronáutica. Na maioria dos aviões aplica-se este material de construção;
- O maior parte dos “ninhos de abelhas” atualmente em uso é fabricado com ligas de alumínio, ou com polímeros fenólicos reforçados com fibra de vidro, poliésteres reforçados com fibra de vidro, ou materiais reforçados com fibras aramídicas;

- Este tipo de construção permite obter um painel em sanduíche, bastante rígido, resistente e leve.

5 . 2 - Materiais metálicos revestidos

- A disposição em sanduíche é usada também para se obter "clads", isto é, compósitos com um núcleo metálico revestido por camadas exteriores de outro metal ou metais;
- Na maioria dos casos, as camadas metálicas exteriores são pouco espessas e aderem por laminagem a quente ao material metálico do núcleo, formando-se ligações metalúrgicas (por difusão atômica) entre os metais das camadas exteriores e do núcleo central;
- Este tipo de material compósito tem muitas aplicações na indústria. Por exemplo, as ligas de alumínio de alta resistência possuem uma resistência à corrosão relativamente baixa, mas podem ser protegidas por uma camada fina de revestimento em alumínio macio e muito resistente à corrosão.

5 . 3 - Compósitos de matriz metálica (CMMs)

- Muitos materiais compósitos com elevada relação resistência / peso são produzidos com matriz metálica. A maioria destes materiais tem sido desenvolvida para a indústria aeroespacial, mas alguns são também usados em outras aplicações como em motores de automóveis;
- De forma geral, de acordo com o tipo de reforço que é utilizado, os principais tipos de CMMs são:
 - de fibras contínuas;
 - de fibras descontínuas e;
 - de partículas.

5 . 4 - Compósitos de matriz cerâmica (CMCs)

- Muitos materiais compósitos com resistência e tenacidade mais elevadas são obtidos reforçando materiais cerâmicos. Esses compósitos cerâmicos são obtidos reforçando-se uma matriz cerâmica com reforço de fibras contínuas, ou de fibras descontínuas, ou ainda usando reforço por partículas.
 - CMCs reforçados por fibras contínuas
 - CMCs reforçados por fibras descontínuas (*whiskers*) e por partículas.