

# Propriedades e características dos materiais compósitos poliméricos aplicados na Engenharia de Construção

*Luiz Antonio Vieira Carneiro\* e Ana Maria Abreu Jorge Teixeira\*\**

## **Resumo**

*Este trabalho apresenta um resumo dos diversos tipos de materiais compósitos poliméricos aplicados em estruturas para a engenharia de construção. Abordam-se as principais características e propriedades desses materiais e de seus elementos constituintes básicos: resinas e fibras. Verifica-se que, para o sucesso de determinada obra de construção, faz-se necessário o conhecimento e o entendimento das características e propriedades destes materiais.*

## **Palavras-chave**

*Propriedades, características, compósitos, resinas, fibras, engenharia de construção.*

## **Introdução**

O aço foi amplamente utilizado a partir da década de 1960 em forma de chapas e tubos de diferentes espessuras e configurações em obras residenciais, comerciais e industriais e obras de arte. Devido à sua grande desvantagem relacionada à corrosão, que afeta sua resistência, durabilidade e aderência com o concreto, além do seu alto custo de manutenção, elevado peso, relativa dificuldade de manuseio e necessidade de colocação de sistemas de emendas e fixação nas suas juntas por limitações de tamanhos,

o aço passou a ser menos usado na década de 1990.

Com o avanço da ciência dos materiais, impulsionado pela demanda de materiais mais leves, duráveis e resistentes, surgiram os materiais compósitos poliméricos, de diferentes tipos, que começaram a ser usados nas indústrias aeronáutica, aeroespacial, militar, naval, automobilística e de materiais esportivos. A partir da década de 1990, a indústria da construção também passou a empregá-los, tendo em vista a sua versatilidade, leveza e facilidade de colocação, além de suas elevadas resistências à

\* Professor e Chefe da Seção de Ensino de Engenharia de Fortificação e Construção, Instituto Militar de Engenharia.

\*\* Professora e Chefe do Laboratório de Materiais de Construção e Concreto, Seção de Ensino de Engenharia de Fortificação e Construção, Instituto Militar de Engenharia.

corrosão, à fadiga química e bom desempenho quanto à fluência e à relaxação.

Diversos são os tipos de materiais compósitos poliméricos que podem ser empregados em estruturas para a engenharia de construção (CARNEIRO, 2004; TEIXEIRA, 2007). Neste trabalho, procurou-se apresentar esses tipos de materiais, que podem ser empregados em serviços de construção e de reparo e reforço de estruturas, além de listar suas principais características e propriedades.

### Materiais compósitos poliméricos

Compósitos são materiais cuja estrutura é constituída por uma combinação de dois ou mais produtos não solúveis entre si. Um dos seus produtos é chamado de fase de reforço e outro de matriz. A matriz envolve o reforço, podendo ter em sua composição adições, tais como aditivos e materiais de enchimento (*fillers*), que modificam e podem melhorar suas propriedades. Concreto, madeira e osso humano são alguns tipos de compósitos.

Os materiais compósitos poliméricos, ou plásticos reforçados com fibras, chamados de *fiber reinforced plastics* ou *fiber reinforced polymers* (FRP) na literatura internacional, são compostos, basicamente, por fibras de elevada resistência envolvidas numa matriz polimérica (resina). Esses materiais podem ter comportamento anisotrópico, ortotrópico ou quase isotrópico, dependendo do tipo e das direções preferenciais das fibras, que são o componente mais resistente e rígido do compósito.

Segundo Hull e Clyne (1996), o valor do módulo de elasticidade de compósitos poliméricos, na direção perpendicular ao sentido longitudinal das fibras, tende a variar entre 3% e 10% do valor do módulo de elasticidade na direção longitudinal.

Há uma grande variedade de resinas e fibras que podem ser usadas na fabricação de um compósito. A escolha da resina mais adequada depende do tipo de ambiente o qual o compósito estará submetido. As fibras, por outro lado, devem ser selecionadas em função da resistência, rigidez e durabilidade requeridas.

Os materiais compósitos poliméricos podem ser utilizados para reparo e reforço de estruturas convencionais de concreto e também no projeto de estruturas novas. Eles são comercialmente encontrados no mercado da construção na forma de tecidos bidirecionais, laminados unidirecionais, perfis e barras. Os tecidos bidirecionais ou laminados pré-fabricados unidirecionais (figura 1) são comumente empregados no reforço de lajes e vigas de concreto. Os tubos rígidos ou folhas flexíveis unidirecionais, pré-impregnadas ou não (figura 2), são mais utilizados no confinamento de pilares de concreto. As barras nervuradas e as cordoalhas podem ser empregadas em substituição às armaduras e cordoalhas de aço (figura 3). Os perfis de seções transversais constantes, cheias ou vazadas, têm sido utilizados no projeto de estruturas novas (figura 4).

As propriedades dos materiais compósitos poliméricos dependem das propriedades dos seus materiais constituintes, resinas e fibras, e da interação entre estes elementos (KAW, 1997; JUVANDES, 1999).

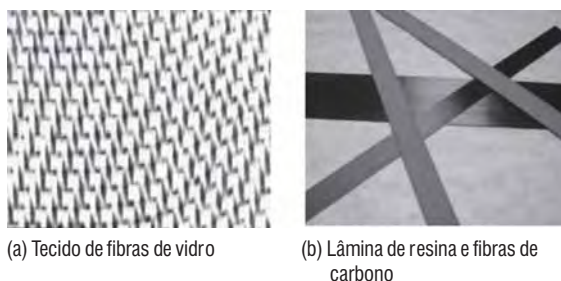


Figura 1 – Exemplos de tecido e laminado pré-fabricado de resina e fibras de carbono



(a) Tubo de resina e fibras de carbono (b) Folha de fibras de carbono

Figura 2 – Exemplos de tubo de compósito e folha unidirecional



(a) Barras lisas ou nervuradas (b) Barras ou cordoalhas

Figura 3 – Exemplos de barras de compósito de resina e fibras

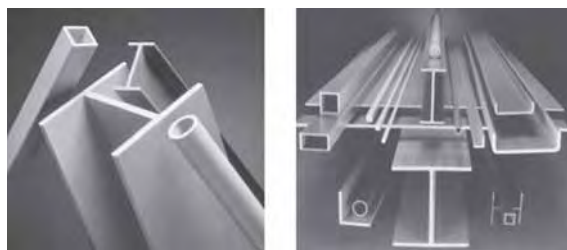


Figura 4 – Exemplos de tipos de perfis de compósito de resina e fibras

A tabela 1 mostra algumas propriedades de lâminas de compósitos poliméricos, com 2,5mm de espessura e percentagem média volumétrica de fibras de 50%. Pode-se perceber a influência da orientação das fibras nas propriedades do compósito.

Na tabela 2, são apresentadas resistências à tração de diversos tipos de materiais compósitos utilizados para o reparo e reforço de estruturas e disponíveis no mercado, em função da massa específica das fibras. Verifica-se a grande influência das fibras nas propriedades do compósito (ACI 440.2R, 2002).

Os coeficientes de dilatação térmica dos compósitos poliméricos diferem em função do tipo de resina, do tipo de fibras, da percentagem volumétrica de fibras e de sua orientação no compósito (tabela 3). Nota-se que, na direção paralela às fibras, os compósitos de resina e fibras de aramida se contraem com o aumento da temperatura, os de fibras de vidro possuem coeficiente de dilatação térmica semelhante ao do concreto e os de fibras de carbono possuem este coeficiente quase nulo. Na direção transversal às fibras observa-se a dilatação dos três tipos de compósito com o aumento da temperatura. A estrutura da fibra de vidro é isotrópica, enquanto as da fibra de carbono e de aramida são anisotrópicas.

**Tabela 1 – Propriedades de diferentes lâminas de compósitos poliméricos em função da orientação das fibras (ACI 440.2R, 2002).**

Tipos de Lâmina (Orientação das Fibras)	Resistência à Tração $f_f$ (MPa)		Módulo de Elasticidade $E_f$ (GPa)		Deformação Última $E_{f_u}$ (‰)
	0°	90°	0°	90°	0°
<b>Carbono (0°)</b>	1020 a 2080	35 a 70	100 a 140	2 a 7	10 a 15
<b>Carbono (0°/90°)</b>	700 a 1020	700 a 1020	55 a 76	55 a 75	10 a 15
<b>Carbono (+45°/-45°)</b>	180 a 280	180 a 280	14 a 28	14 a 28	15 a 25
<b>Vidro (0°)</b>	520 a 1400	35 a 70	20 a 40	2 a 7	15 a 30
<b>Vidro (0°/90°)</b>	520 a 1020	520 a 1020	14 a 34	14 a 35	20 a 30
<b>Vidro (+45°/-45°)</b>	180 a 280	180 a 280	14 a 21	14 a 20	25 a 35
<b>Aramida (0°)</b>	700 a 1720	35 a 70	48 a 68	2 a 7	20 a 30
<b>Aramida (0°/90°)</b>	280 a 550	280 a 550	28 a 34	28 a 35	20 a 30
<b>Aramida (+45°/-45°)</b>	140 a 210	140 a 210	7 a 14	7 a 14	20 a 30

**Tabela 2 – Valores de resistência à tração de diferentes sistemas de reforço com 1mm de espessura (ACI 440.2R, 2002).**

Sistema de Reforço	Massa Específica das Fibras(g/m <sup>3</sup> )	Resistência à Tração $f_f$ (MPa)
Folhas de Resina e Fibras de Carbono	200 400	500 620
Folhas de Resina e Fibras de Carbono de Alta Resistência	230 300 620	320 700 960
Folhas de Resina e Fibras de Carbono de Elevado Módulo de Elasticidade	300	600
Tecidos de Resina e Fibras de Carbono	300	180
Folhas de Resina e Fibras de Vidro	900 350	720 230
Tecidos de Resina e Fibras de Vidro	300	120
Folhas de Resina e Fibras de Aramida	420	700
Lâminas de Resina Epóxi e Fibras de Carbono de Alta Resistência	2380	3300
Tubos de Resina Viniléster e Fibras de Vidro	1700	1580

**Tabela 3 – Coeficiente de dilatação térmica dos compósitos poliméricos com percentagem volumétrica de fibras entre 50% e 70% segundo o ACI 440.2R (2002).**

Direção	Coeficiente de Dilatação Térmica $\alpha$ (x 10 <sup>-6</sup> /°C)		
	Fibras de Carbono	Fibras de Vidro	Fibras de Aramida
Longitudinal	-1,0 a 0,0	6,0 a 10,0	-6,0 a -2,0
Transversal	22,0 a 50,0	19,0 a 23,0	60,0 a 80,0

Na tabela 4, são comparadas tensões de ruptura à tração e peso específico de aço e madeira

usuais na construção civil, tais como o aço carbono MR-250 e madeira de eucalipto, com o material compósito com fibras de vidro unidirecionais e resina de poliéster, produzido por empresa brasileira com 65% de fibras por volume (TEIXEIRA, 2007). Pelos dados apresentados verifica-se que os materiais compósitos apresentam a melhor relação resistência/peso específico.

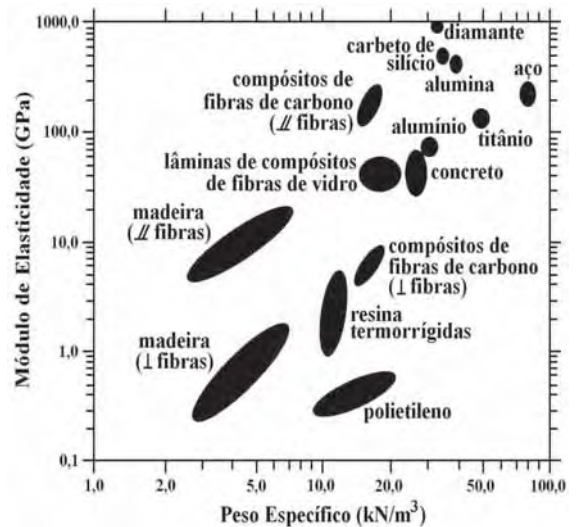


Figura 5 – Módulo de elasticidade x peso específico de diversos materiais (HULL e CLYNE, 1996).

**Tabela 4 – Tensão de ruptura e peso específico de material compósito de fibra de vidro e resina de poliéster (TEIXEIRA, 2007), aço MR-250 e madeira de eucalipto.**

Propriedades	Compósito de Fibra de Vidro e Resina de Poliéster	Aço MR-250	Madeira de Eucalipto Citriodora
Resistência de Ruptura à Tração, $f_f$ (MPa)	423	400	124
Peso Específico, $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	17,3	78,5	10,0
$f_f/\gamma$	24,5	5,1	12,4

Há vários processos para fabricação dos materiais compósitos, como a pultrusão, a moldagem por transferência de resina, o enrolamento de filamentos, a laminação manual e a moldagem por compressão.

Na pultrusão, fibras unidirecionais contínuas são banhadas em resina e puxadas por intermédio de um molde. O processo da pultrusão, ilustrado na figura 6, é bastante simples e possibilita a fabricação de perfis contínuos de seção transversal constante (figura 4) e com elevada resistência na direção das fibras.

Os materiais compósitos pultrudados têm sido utilizados em estruturas secundárias, tais como passadiços, grades para pisos, guarda-corpos e escadas e também em estruturas de pontes (SOBRINO et al, 2002; KELLER, 2002; SEDLACEK, 2004; MIERES, 2005).

Dados sobre os perfis pultrudados estão reunidos na tabela 5. Nela constata-se que há uma grande variação entre os valores disponíveis na literatura técnica e nos catálogos de fabricantes, mesmo para valores próximos de fração volumétrica de fibras.

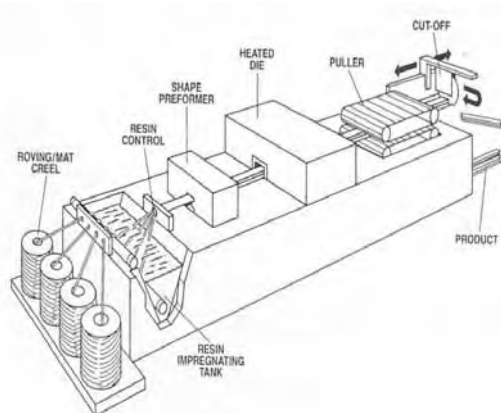


Figura 6 – Esquema ilustrativo do processo da pultrusão (AGARVAL, 1999)

**Tabela 5 – Propriedades de Perfis Pultrudados de Fibras de Vidro e Resina de Poliéster.**

Fabricante	Literatura	Resistência à Tração $f_f$ (MPa)	Módulo de Elasticidade $E_f$ (GPa)	Peso Específico (kN/m <sup>3</sup> )	Fração Volumétrica das Fibras (%)
	Barbero (1999)	903	37,9	18,5	50
Cogumelo - Brasil (www.cogumelo.com.br)		211	17,6	17,2 a 18,0	-
	Eurocomp (1996)	690	41,0	-	65
Fiberline Composites - Dinamarca (www.fiberline.com)		240	23,0 a 28,0	-	-
Glasforms Inc. - EUA (www.glasforms.com)		292	18,4	17,2	47
Strongwell Corporation - EUA (www.strongwell.com)		207	17,2	17,2 a 19,4	-
Topglass - Itália (www.topglass.it)		450	32,0	18,0	60

A laminação manual é bastante utilizada na ligação entre componentes. Esse processo é ilustrado na figura 7. Aplica-se, inicialmente, uma camada de resina sobre os componentes a serem ligados. Em seguida, aplica-se uma camada de reforço na forma de fibras curtas dispostas aleatoriamente e unidas por um selante ou fibras longas dispostas em duas direções perpendiculares e também unidas por um selante. O reforço é impregnado com resina com o auxílio de uma escova ou um rolo. A aplicação de reforço e da resina para impregná-lo é repetida tantas vezes quantas forem necessárias, de modo a obter a espessura desejada. Este processo pode ser utilizado na fabricação de componentes de qualquer dimensão, mas geralmente se limita a formatos simples.

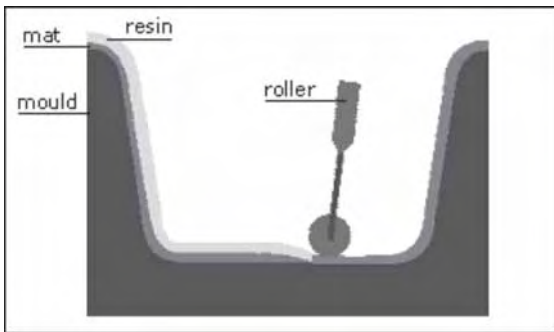


Figura 7 – Laminação manual de material compósito

O enrolamento de filamentos é normalmente utilizado na fabricação de componentes vazados convexos, circulares ou ovais, tais como tubos, tanques de armazenamento e cilindros de alta pressão. Fibras unidirecionais contínuas são banhadas em resina antes de serem enroladas em um mandril de cilindro rotativo, nas mais variadas orientações (figura 8). As principais vantagens da técnica de enrolamento de filamentos são: rapidez do método e muito boas propriedades estruturais obtidas para os laminados. As

principais desvantagens são: a aplicação do método apenas a componentes com formatos convexos, a dificuldade de aplicação de fibras na direção longitudinal do componente, o elevado custo do mandril para componentes longos e o aspecto irregular da superfície externa final do componente.

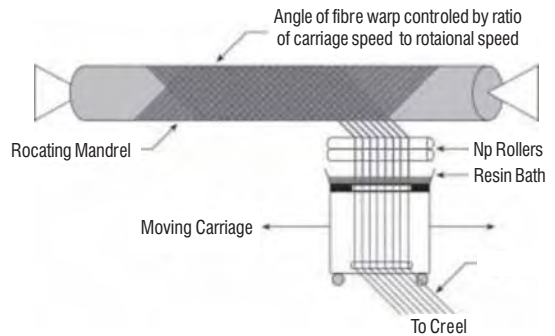


Figura 8 – Enrolamento de filamentos

As propriedades apresentadas pelos materiais compósitos poliméricos, tais como baixa condutividade térmica, elevada resistência em relação ao baixo peso específico, estabilidade dimensional e resistência à corrosão, tornam atraentes a sua utilização em projetos de construção e reparo e reforço de estruturas.

## Resinas

A matriz polimérica dos compósitos pode ser constituída de resinas do tipo termorrígidas, que são as mais comuns e compostas por epóxi, fenol, poliéster, viniléster, poliuretano e silicone, ou do tipo termoplásticas, que podem ter polietileno, poliestireno ou metacrilato de polimetila na sua composição.

As resinas têm a função de envolver e aglutinar as fibras para garantir adequada transferência de tensões entre as mesmas e protegê-las contra agressões ambientais e desgastes. Suas propriedades também devem conduzir a uma

perfeita aderência entre as interfaces concreto e material de reforço e proporcionar adequadas durabilidade e aplicabilidade ao compósito.

Têm pouca influência na resistência à tração do compósito, mas são importantes para evitar a flambagem das fibras nos compósitos submetidos à compressão, para a resistência ao cisalhamento do compósito e para a sua resistência sob ação de temperaturas elevadas.

As resinas termoplásticas podem ser repetidamente fundidas quando aquecidas e endurecidas quando resfriadas, devido à ligação de forma linear entre suas moléculas. Têm as vantagens sobre as resinas termorrígidas de serem mais resistentes a impactos e microfissuração, devido à sua maior ductilidade e tenacidade. Por outro lado, a fabricação de compósitos de fibras com resinas termoplásticas é limitada, pois sua alta viscosidade dificulta a incorporação de fibras longas.

Por possuírem estrutura formada de moléculas ligadas entre si de forma cruzada e tridimensional com alto grau de polimerização e endurecimento irreversível, as resinas termorrígidas, caso sejam aquecidas depois de endurecidas, não fundem e sofrem decomposição se submetidas a elevadas temperaturas.

Entre as resinas termorrígidas, as compostas por epóxi apresentam melhores propriedades mecânicas e de resistência à umidade, são mais duráveis e mais caras do que as resinas de poliéster ou viniléster (CEB, 2001). Segundo Weatherhead (1980), uma das principais vantagens da resina epóxi com relação à resina poliéster é sua baixa retração durante o processo de cura, variando de 1% a 2%, podendo ser nula quando *fillers* são adicionados à sua composição. A sua baixa viscosidade permite que as fibras sejam adequadamente saturadas e não apresentem desalinhamento entre seus fios.

As propriedades de resistência e rigidez das resinas fenólicas são comparáveis às da resina de poliéster, podendo ser um pouco mais baixas, porém as resinas fenólicas apresentam maior temperatura de distorção térmica, maior resistência ao fogo, menor inflamabilidade e menor emissão de fumaça, além de baixa retração durante a cura (EUROCOMP, 1996).

Todas as resinas são suscetíveis aos raios ultravioletas e necessitam de proteção especial obtida por meio de aditivos ou de camadas de fibras curtas e aleatórias, conhecidas como véu, posicionadas na superfície do material compósito produzido (KELLER, 2003).

No caso de compósitos de folhas unidirecionais ou de tecidos bidirecionais flexíveis, as resinas servem para a colagem destes no concreto e são elementos constituintes, se os mesmos forem pré-impregnados. São aplicadas em parte nas fibras e na superfície de concreto.

Tratando-se de laminados pré-fabricados unidirecionais e de tubos rígidos de fibras, as resinas representam de 25% a 35% do percentual volumétrico do compósito.

Elevados coeficientes de dilatação térmica e de expansão devida à umidade e baixas propriedades elásticas são algumas das principais desvantagens das resinas que formam a matriz polimérica dos compósitos. Além disso, dependendo do tipo de resina, o efeito de temperatura pode prejudicar suas propriedades. Quando ultrapassada a temperatura de transição vítrea, que separa os estados plástico e frágil da resina, na faixa de 60°C a 82°C, o valor do seu módulo de elasticidade pode sofrer significativa redução devido a alterações na sua estrutura interna (ACI 440.2R, 2002).

Na tabela 6, podem ser vistas algumas das propriedades físicas e mecânicas de diferentes tipos de resina, segundo MATTHYS (2000).

Tabela 6 – Propriedades de diferentes resinas (MATTHYS, 2000)

Tipos de Resina	Resistência à Tração $f_f$ (MPa)	Módulo de Elasticidade $E_f$ (GPa)	Peso Específico (kN/m <sup>3</sup> )	Retração na Cura(%)
Poliéster	35 a 104	2,1 a 3,5	11 a 14	5,0 a 12,0
Viniléster	73 a 81	3,0 a 3,5	11 a 13	5,0 a 10,0
Epóxi	55 a 130	2,8 a 4,1	12 a 13	1,0 a 5,0

## Fibras

As fibras são filamentos contínuos e rígidos que podem ser de carbono, de vidro ou de aramida (figura 9). Todas têm em comum o comportamento linear da curva tensão – deformação específica até a ruptura (figura 10), variando, de acordo com o tipo e processo de fabricação, seu módulo de elasticidade longitudinal e sua resistência (RIPPER e SCHERER, 1999).

Dependendo do tipo, as fibras possuem peso específico cerca de três a seis vezes menor que o do aço, o que as tornam de fáceis manuseio e aplicação. As fibras de vidro são as com maior peso específico, cerca de 26kN/m<sup>3</sup>, e as de aramida são as com menor peso específico, na faixa dos 14kN/m<sup>3</sup>. As fibras de carbono têm peso específico intermediário, variando entre 17kN/m<sup>3</sup> e 21kN/m<sup>3</sup>.

Apresentam propriedades térmicas superiores às das resinas. Até em torno de 1000°C, as fibras de vidro conseguem resistir a tensões de tração na sua direção longitudinal. No caso de fibras de aramida e de carbono, esta temperatura situa-se próxima de 175°C e 275°C, de acordo com o ACI 440.2R (2002).



(a) Fibras de carbono ou grafite (b) Fibras de vidro (c) Fibras de aramida

Figura 9 – Alguns exemplos de tipos de fibras

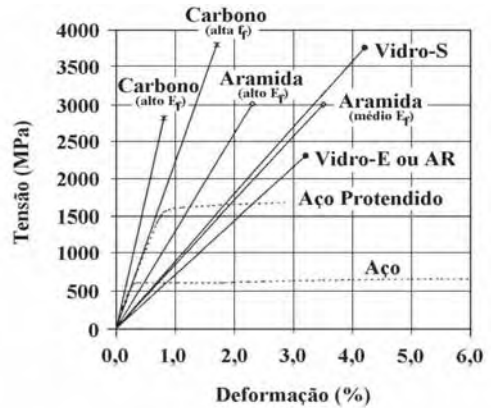


Figura 10 – Curvas tensão x deformação de diferentes fibras e do aço (MATTHYS, 2000).

Valores de algumas das propriedades de diferentes tipos de fibras disponíveis, apresentados em CEB (2001) e ACI 440.2R (2002), são mostrados na tabela 7.

Kaw (1997) relata que existem quatro fatores das fibras que influenciam o desempenho de compósitos poliméricos, que são o comprimento, a orientação, a forma e o material.

## Fibras de carbono e de grafite

O processo de carbonização de polímeros orgânicos (poliacrilonitrila, entre outros) resulta nas fibras de carbono ou de grafite, formadas por dezena de milhares de filamentos com espessura próxima de um quinto da de um fio de cabelo (5µm a 18µm) e possuidoras de características mecânicas excepcionais, fruto do seu arranjo microestrutural.



Tabela 7 – Propriedades das Fibras (CEB, 2001; ACI 440.2R, 2002).

Tipos de Fibras		Resistência à Tração $f_f$ (NPa)	Módulo de Elasticidade $E_f$ (GPa)	Deformação Última $E_{fu}$ (%)
<b>CEB (2001)</b>				
<b>Carbono</b>	Alta $f_f$	3500 a 4800	215 a 235	14,0 a 20,0
	Ultra-alta $f_f$	3500 a 6000	215 a 235	15,0 a 23,0
	Alto $E_f$	2500 a 3100	350 a 500	5,0 a 9,0
	Ultra-alto $E_f$	2100 a 2400	500 a 700	2,0 a 4,0
<b>Vidro</b>	Tipo E	1900 a 3000	70	30,0 a 45,0
	Tipo S	3500 a 4800	85 a 90	45,0 a 55,0
<b>Aramida</b>	Baixo $E_f$	3500 a 4100	70 a 80	43,0 a 50,0
	Alto $E_f$	3500 a 4000	115 a 130	25,0 a 35,0
<b>ACI 440.2R (2002)</b>				
<b>Carbono</b>	Alta $f_f$	3790 a 4820	220 a 240	14,0 (mínimo)
	Ultra-alta $f_f$	4820 a 6200	220 a 240	15,0 (mínimo)
	Alto $E_f$	1720 a 3100	340 a 520	5,0 (mínimo)
	Ultra-alto $E_f$	1380 a 2400	520 a 690	20,0 (mínimo)
<b>Vidro</b>	Tipo E	1860 a 2680	69 a 72	45,0 (mínimo)
	Tipo S	3440 a 4140	86 a 90	54,0 (mínimo)
<b>Aramida</b>	Baixo $E_f$	3440 a 4140	69 a 83	25,0 (mínimo)
	Alto $E_f$	3440 a 4140	110 a 124	16,0 (mínimo)

Após serem expostas ao ar, as fibras são submetidas a elevadas temperaturas, que atingem cerca de 1.300°C, para as de carbono, e excedem de 1.900°C até cerca de 3.000°C, para as de grafite. Além disto, as fibras de carbono possuem uma percentagem de teor de carbono variando entre 93% e 95%, enquanto que as de grafite têm um teor maior que 99%, o que leva estas últimas a serem em torno de 20 vezes mais caras e terem módulo de elasticidade de até cerca de três vezes maior que as de carbono.

As fibras de carbono ou de grafite têm elevadas rigidez e resistência a todos os tipos de ataques químicos (por ser o carbono um material inerte), bom comportamento à fadiga, à variação térmica e reológico, e pequeno peso, o que as tornam ideais para uso na indústria aérea.

Em contrapartida, têm alto custo e apresentam menor resistência ao impacto e elevada condutibilidade elétrica, que pode possibilitar corrosão do tipo galvânica quando em contato com metais.

Geralmente, *rayon*, poliácridonitrila (PAN) e *pitch* são as três principais matérias-primas usadas na fabricação das fibras de carbono ou de grafite, sendo a poliácridonitrila a mais comum. Os processos de pirólise e oxidação de fibras sintéticas resultam na poliácridonitrila, enquanto que o de petróleo destilado ou piche convertido em cristal líquido gera o *pitch*.

Resumidamente, as fibras de carbono são processadas da seguinte maneira: após a poliácridonitrila ser trefilada em cerca de 5 a 10 vezes o seu tamanho com o objetivo de melhorar

suas propriedades mecânicas, a mesma é submetida a três processos de aquecimento, que são a estabilização, a carbonização e a grafitação.

Inicialmente, no processo da estabilização, a poliacrilonitrila é aquecida num forno com temperatura variando entre 200°C e 300°C a fim de tornar estáveis suas dimensões. Aumentando-se a temperatura na faixa de 1.000°C a 1.500°C, dá-se o processo de carbonização, ou seja, a poliacrilonitrila sofre pirólise numa atmosfera inerte de nitrogênio e argônio. No último processo de grafitação, atinge-se temperatura acima de 2.500°C, o que conduz a uma microestrutura da poliacrilonitrila com carbono em rede hexagonal compacta.

Por fim, as fibras resultantes sofrem um processo de tratamento superficial para aumentar sua resistência e aderência e, então, são coletadas numa bobina.

A tabela 8 mostra algumas propriedades de fibras de carbono encontradas no mercado.

## Fibras de Vidro

As fibras de vidro são produtos da mistura de diferentes composições baseadas na sílica, com adições de óxidos de cálcio, boro, sódio, ferro e alumínio.

Possuem boa capacidade de deformação, boa resistência e baixo custo, mas baixas resistências à fadiga, à abrasão e à fluência, menor rigidez e fraca capacidade de aderência a polímeros, e se degradam na presença de água, ácidos e solução alcalina, fato que pode ser contornado com o uso de uma adequada matriz.

As principais fibras de vidro são as do tipo E, usadas em aplicações que envolvem eletricidade e decoração, e as do tipo S, cuja composição possui maior taxa de sílica, conduzindo a maior resistência, rigidez e leveza que as do

tipo E, e comumente utilizadas na indústria aeroespacial.

Existem ainda fibras de vidro do tipo C, usadas em ambientes químicos agressivos e corrosivos, do tipo R, aplicadas em elementos estruturais da indústria da construção, do tipo D, utilizadas onde se requer baixa constante dielétrica, e do tipo A, para melhoria da aparência superficial.

Combinações de diferentes tipos de fibras de vidro também são possíveis, tais como E-CR e AR, usadas quando se necessita de compósitos resistentes à eletricidade, à corrosão e a álcalis.

O processo de produção das fibras de vidro tem início a partir do aquecimento de uma mistura formada de areia e calcário, que é colocada num forno refratário até uma temperatura em torno de 1.400°C.

Após a mistura aquecida passar por dispositivos de abertura de cerca de 10µm, a mesma é processada na forma de filamentos, que recebem solução orgânica por meio de espargidores, cuja fórmula é calibrada com o uso de ligantes, tendo a função de permitir que os filamentos sejam transformados em conjunto de fios, de lubrificantes, que protegem contra abrasão, e de agentes de acoplamento e antiestáticos, que proporcionam uma melhor aderência entre as fibras de vidro e a matriz orgânica.

As fibras são então processadas em cordas, que são compostas por 204 filamentos de 5µm a 25µm de espessura e enroladas em um tubo, sendo secas até a perda de água e de outras soluções.

São mais utilizadas na forma de tecidos bidirecionais no reforço de elementos estruturais (pilares ou abóbadas), ou, mais recentemente, em revestimento de paredes interiores visando à durabilidade. Algumas propriedades de fibras de vidro encontradas no mercado podem ser vistas na tabela 9.

**Tabela 8 – Propriedades de diferentes fibras de carbono.**

Tipos de Fibras	Resistência à Tração $f_f$ (MPa)	Módulo de Elasticidade $E_f$ (GPa)	Deformação Última $E_{fu}$ (%)
<b>Master Builders Technologies – MBT Brasil (MBT, 1998)</b>			
CF-130	3550	235	15,0
CF-530	3000	380	8,0
<b>Sika (SIKA, 2000)</b>			
Sika® Carbodur® S	2800	165	17,0
Sika® Carbodur® M	2400	210	12,0
Sika® Carbodur® H	1300	300	4,5
SikaWrap® Hex-230C	3500	230	15,0
SikaWrap® Hex-103C	3500	230	15,0
<b>Toho Tenax Co.,Ltd.</b>			
HTA	3720 a 3920	235	16,0 a 17,0
UT	5000 e 5390	240 e 255	21,0
IM	4710 e 5790	294 e 285	16,0 e 20,0
LM	3140	155	20,0
HM	3240	345	9,0
TM	3920	345	11,0
UM	3330 a 4900	650 a 382	5,0 a 13,0
<b>Clever Reinforcement Company - S&amp;P FRP Systems</b>			
S&P C-Sheet 240	3800	240	15,5
S&P C-Sheet 640	2640	640	4,0

**Tabela 9 – Propriedades de diferentes fibras de vidro.**

Tipos de Fibras	Resistência à Tração $f_f$ (MPa)	Módulo de Elasticidade $E_f$ (GPa)	Deformação Última $E_{fu}$ (%)
<b>Master Builders Technologies – MBT Brasil (MBT, 1998)</b>			
EG-30	1550	74	21,0
<b>Sika (SIKA, 2000)</b>			
SikaWrap® Hex-100G	2550	70	36,0
<b>Clever Reinforcement Company - S&amp;P FRP Systems</b>			
S&P G-Sheet E	3400	73	45,0
S&P G-Sheet AR	3000	65	43,0

## Fibras de Aramida

São fibras compostas por materiais orgânicos aromáticos sintéticos, formados de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio e resultantes de extrusão

e trefilação de um tipo de *nylon*, cuja estrutura molecular consiste em cadeias de benzeno e amida.

Têm as vantagens de possuírem baixa densidade, condutibilidade elétrica e retração, altas

**Tabela 10 – Propriedades de diferentes fibras de aramida.**

Tipos de Fibras	Resistência à Tração $f_f$ (MPa)	Módulo de Elasticidade $E_f$ (GPa)	Deformação Última $E_{fu}$ (%)
<b>Du Pont</b>			
<b>Kevlar® 29</b>	2920	71	36,0
<b>Kevlar® 49</b>	3000	112	24,0
<b>Kevlar® 119</b>	3100	55	44,0
<b>Kevlar® 129</b>	3400	97	33,0
<b>Clever Reinforcement Company - S&amp;P FRP Systems</b>			
<b>S&amp;P A-Sheet 120</b>	2900	120	25,0

resistências à tração e ao impacto e moderada resistência a ataques químicos. São em geral mais rígidas e resistentes que as fibras de vidro e possuem boa capacidade de deformação, mas degradam-se sob luz solar.


Apresentam de 12µm a 15µm de espessura e, em geral, são conhecidas como *kevlar®*, marca registrada da DuPont. Dois dos tipos mais encontrados no mercado são: *kevlar® 29*, indicadas no uso de coletes à prova de balas, fios e cabos, por serem mais dúcteis, e *kevlar® 49*, cuja aplicação é na indústria aeronáutica, por serem mais rígidas.

São produzidas a partir da mistura de polímeros e ácidos, como, por exemplo, ácido sulfúrico, que é extrudada em cilindros com temperatura de 200°C, lavada e seca em bobinas, sendo então trefilada com o objetivo de aumentar sua resistência e rigidez. Sua separação e seu corte são de difícil execução. Na tabela 10, podem ser vistas algumas proprie-

dades das fibras de aramida encontradas no mercado.

### Considerações finais

Este trabalho apresentou os diversos tipos, propriedades e características de materiais compósitos poliméricos, assim como das resinas e fibras que os compõem.

Com base no levantamento feito, conclui-se que os materiais compósitos poliméricos apresentam propriedades e características que tornam a sua aplicação em estruturas para a engenharia de construção bastante atraente. Esses materiais podem ser utilizados em obras novas, ou obras de reparo ou reforço estrutural. No entanto, para que a sua utilização se torne eficiente, é necessário o conhecimento e o entendimento de suas propriedades e características não somente relativas a aspectos mecânicos, mas também considerando sua aplicabilidade e durabilidade. 

### Referências

- AGARVAL, B. D.; BROUTMAN, L. J., 1999, *Analysis and Performance of Fiber Composites*. 2 ed. New York, John Wiley & Sons, Inc.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, ACI 440.2R., 2002, "Guide for The Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures", *ACI COMMITTEE 400*, Farmington Hills, Michigan, USA, 45 p., Oct.
- BARBERO, E. J., 1999, *Introduction to Composite Materials Design*. Philadelphia, Taylor & Francis.

- CARNEIRO, L. A. V., 2004, *Reforço de Vigas e Pilares de Concreto com Materiais Compósitos de Resina e Fibras*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON, CEB-FIP TG 9.3 FRP, 2001, "Design and Use of Externally Bonded Fibre Reinforced Polymer Reinforcement (FRP EBR) for Reinforced Concrete Structures", *Technical Report Bulletin n.14*, Lausanne, Switzerland, 138 p., Jul.
- DESKOVIC, N., MEIER, U., TRIANTAFILLOU, T. C., 1995a, "Innovative Design of FRP Combined with Concrete: Long-Term Behavior", *Journal of Structural Engineering*, v. 121, n. 7, pp. 1079-1089, Jul.
- DESKOVIC, N., TRIANTAFILLOU, T. C., MEIER, U., 1995b, "Innovative Design of FRP Combined with Concrete: Short-Term Behavior", *Journal of Structural Engineering*, v. 121, n. 7, pp. 1069-1078, Jul.
- EUROCOMP, 1996, "Structural Design of Polymer Composites – Design Code and Handbook, The European Structural Polymeric", *Composites Group*, Ed. J. L. CLARKE, London, UK, E & FN SPON.
- HULL, D., CLYNE, T. W., 1996, *An Introduction to Composite Materials*, 2<sup>nd</sup> ed. Cambridge, England, Cambridge University Press, ISBN 0-521-38190-8.
- JUVANDES, L. F. P., 1999, *Reforço e Reabilitação de Estruturas de Betão Usando Materiais Compósitos de "CFRP"*. Tese de D.Sc., Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- KAW, A. K., 1997, *Mechanics of Composite Materials*, New York, USA, CRC Press LLC, ISBN 0-8493-9656-5.
- KELLER, T., 2002, "Recent all-composite and hybrid fibre reinforced polymer bridges and buildings", *Progress in Structural Engineering and Materials*, v. 3, n. 2, pp 132-140.
- KELLER, T., "Use of Fibre Reinforced Polymers in Bridge Construction", Structural Engineering Documents, IABSE, 2003.
- MASTER BUILDERS TECHNOLOGIES, MBT, 1998, "MBrace<sup>®</sup> Sistema Compósito de Reforço", *Catálogo*, USA.
- MATTHYS, S., 2000, "Structural Behaviour and Design of Concrete Members Strengthened with Externally Bonded FRP Reinforcement", *D.Sc. Thesis*, University of Ghent, Ghent, Belgium.
- MIERES, J. M., CALVO, I., et al., 2005, "First Bridge Constructed of Fibre-Reinforced Polymer in Spain", *Composites in Construction 2005 – Third International Conference*, v. II, pp. 1037-1044, July.
- RIPPER, T., SCHERER, J., 1999, "Avaliação do Desempenho de Plásticos Armados com Folhas Unidirecionais de Fibras de Carbono como Elemento de Reforço de Vigas de Betão Armado", In: *Anais do 41º Congresso Brasileiro do Concreto*, Salvador, Bahia, Brasil, Ago.
- SEDLACEK, G.; TRUMPF, H., 2004, "Development of a Light-Weight Emergency Bridge", *The Structural Engineer International*, v. 14, n. 4, pp. 282-287, November.
- SIKA, 2000, "Guias de Diseño e Instalacion Tejidos SikaWrap", Reforzamiento con Sistemas de Fibras de Carbono (CFRP) y Fibras de Vidrio (GFRP) para Estructuras de Concreto y Madera, Santafé de Bogotá, Colombia, Jan.
- SOBRINO, J. A.; PULIDO, M. D. G., 2002, "Towards Advanced Composite Material Footbridges", *The Structural Engineer International*, v. 12, n. 2, pp. 84-86, May.
- TEIXEIRA, A. M. A. J., 2007, *Ponte Desmontável em Material Compósito de Fibra de Vidro*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- WEATHERHEAD, R. G., 1980, *FRP Technology – Fibre Reinforced Resin Systems*, London, UK, Applied Science Publishers Ltd.