

2 Reforço Estrutural com Compósitos de Fibra de Carbono

2.1. Introdução

Os materiais estruturais podem ser divididos em quatro grupos: metálicos, cerâmicos, poliméricos e compósitos (Gibson, 1993). Em termos macro-estruturais os compósitos são formados a partir da combinação de dois ou mais materiais pertencentes aos outros grupos, com o objetivo de obter um novo material com propriedades e comportamento mecânico superiores aos apresentados pelos materiais constituintes, quando estes atuam individualmente (Áviles, 2002).

Segundo Emmons *et al.* (1998a), os egípcios utilizavam materiais compósitos na forma de palha misturada à argila para fabricação de tijolos, buscando melhorar o seu desempenho estrutural.

Nos últimos anos os compósitos de fibra de carbono (CFC) têm despertado o interesse de pesquisadores no mundo inteiro para utilização no reforço de estruturas em substituição aos métodos tradicionais, pois apresentam maior resistência e menor massa específica que o aço.

O CFC faz parte de uma classe de materiais compósitos conhecidos por *Fibre Reinforced Polymers* (FRP), e são constituídos basicamente por duas fases: fibras e matriz polimérica.

2.2. Compósitos de Fibra de Carbono

As fibras de carbono começaram a ser comercializadas no princípio da década de 1960 após extenso programa de pesquisa desenvolvido nos Estados Unidos, Inglaterra e Japão (Emmons *et al.*, 1998b).

Este material foi utilizado durante muitos anos principalmente pelas indústrias aeroespacial e automobilística. Mais recentemente, também vem sendo utilizado em elementos estruturais, particularmente em ambientes agressivos sujeitos a ataques químicos.

A idéia de reforçar estruturas de concreto armado com CFC surgiu no início dos anos 80 no Japão. Os abalos sísmicos nessa região da Ásia, causando diversos danos às estruturas, mostraram a necessidade de recuperação e reforço em curto intervalo de tempo. Esses foram os principais aspectos considerados para utilização desse material no confinamento de pilares (Machado, 2004).

De acordo com Meier (1995) desde 1982 o *Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research* (EMPA) desenvolve pesquisas utilizando os compósitos de fibra de carbono para reforçar vigas de concreto armado.

No Brasil a primeira aplicação de CFC para reforço estrutural ocorreu em 1998 no viaduto Santa Tereza localizado em Belo Horizonte. O CFC foi escolhido principalmente por aspectos estéticos, pois se tratava de uma estrutura tombada pelo patrimônio histórico (Beber, 2003).

O CFC apresenta diversas vantagens quando comparado com os materiais usualmente utilizados para reforço, dentre as quais pode-se citar:

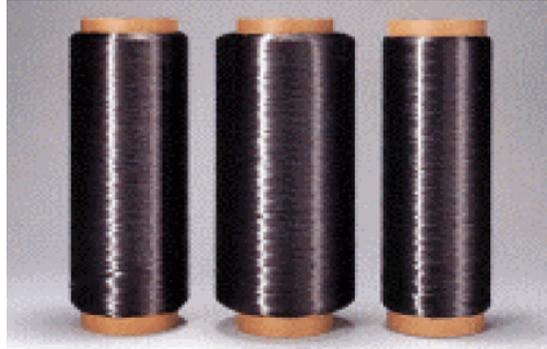
- alta resistência e rigidez;
- massa específica reduzida;
- alta resistência à fadiga;
- baixo coeficiente de dilatação térmica;
- ótima resistência contra ataques químicos e corrosão;
- rapidez e facilidade de instalação.

Como desvantagens, o sistema de reforço com CFC apresenta incompatibilidade com superfícies irregulares, baixa resistência ao fogo e à exposição a raios ultravioletas, e pode estar sujeito ao vandalismo. Estes problemas também são apresentados por outros sistemas de reforço, como as chapas de aço coladas com resina epóxi.

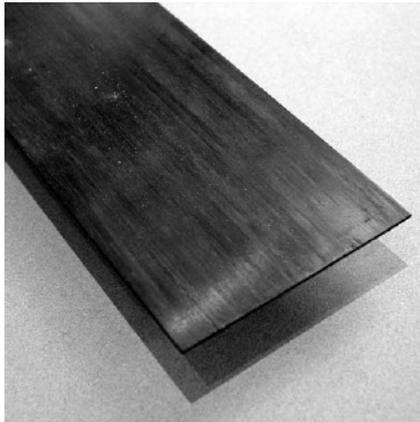
O sistema de reforço com CFC é composto por fibras de carbono envolvidas por uma matriz polimérica, e apresenta-se nas seguintes formas (Lima, 2001):

- **fios de fibra de carbono:** são enrolados sob tensão e colados sobre a superfície do concreto (Figura 2.1.a);
- **chapas pultrudadas:** são chapas de polímeros reforçados com fibras de carbono impregnadas com resina epóxi ou poliéster, que resultam em perfis contínuos com formatos diversos e complexos, que são colados sobre a superfície de concreto com adesivo (Figura 2.1.b);

- **tecidos de fibra de carbono:** são tecidos pré-impregnados (*prepreg*), colados sobre a superfície com resina epóxi, com espessura similar a do papel de parede. Este sistema segue exatamente a curvatura do elemento e permite a aplicação em cantos vivos (Figura 2.1.c).



(a)



(b)



(c)

Figura 2.1 – Sistemas de reforço com fibras de carbono: (a) fios de fibra de carbono; (b) chapas pultrudadas de fibra de carbono; (c) tecidos de fibra de carbono.

As fibras têm como funções principais fornecer resistência e rigidez ao compósito. Estas propriedades variam em função do tipo, tamanho, grau de concentração e disposição das mesmas na matriz (Araújo, 2002.a; Avilés 2002; Nordin, 2003). A escolha da fibra a ser empregada em determinada situação depende do tipo de estrutura, grau de solicitação e condições ambientais.

Em reforço estrutural além das fibras de carbono podem ser utilizadas também fibras de vidro e aramida. As fibras podem ser longas ou curtas, com comprimentos de 3 mm a 50 mm, e apresentam diâmetros entre 0,07 mm e 0,10 mm. O Quadro 2.1 apresenta um estudo comparativo entre as características das fibras.

Quadro 2.1 – Comparativo entre as características dos diversos tipos de fibra.

Consideração	Fibra de Carbono	Fibra de Vidro	Fibra de Aramida
Alcalidade / Exposição à meios ácidos	Alta resistência	Não tolera	Não tolera
Expansão térmica	Próximo de zero, pode causar altas tensões de aderência	Similar ao concreto	Próximo de zero, pode causar altas tensões de aderência
Condutividade elétrica	Alta	Excelente isolante	Excelente isolante
Tolerância ao impacto	Baixa	Alta	Alta
Fluência e fadiga	Alta resistência	Baixa resistência	Baixa resistência

Os compósitos com fibras de carbono (CFC) são os materiais mais indicados para o reforço de vigas de concreto armado, pois apresentam alto desempenho mecânico e o aumento na seção transversal original é praticamente desprezível. Na Tabela 2.1 estão as propriedades mecânicas de alguns tipos de fibras.

Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas das fibras (Technical Report n°55, 2000).

Tipo de Fibra	Tensão de Ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação Específica Última (%)	Densidade Específica
Carbono de alta resistência	4300 – 4900	230 – 240	1,9 – 2,1	1,8
Carbono de alto módulo	2740 – 5490	294 – 329	0,7 – 1,9	1,78 – 1,81
Carbono de alta resistência e alto módulo	2600 – 4020	540 – 640	0,4 – 0,8	1,91 – 2,12
Aramida de alta resistência e alto módulo	3200 – 3600	124 – 130	2,4	1,44
Vidro	2400 – 3500	70 – 85	3.5 – 4,7	2,6

A Figura 2.2 apresenta os diagramas tensão-deformação específica das fibras, aço de construção e cordoalhas de protensão.

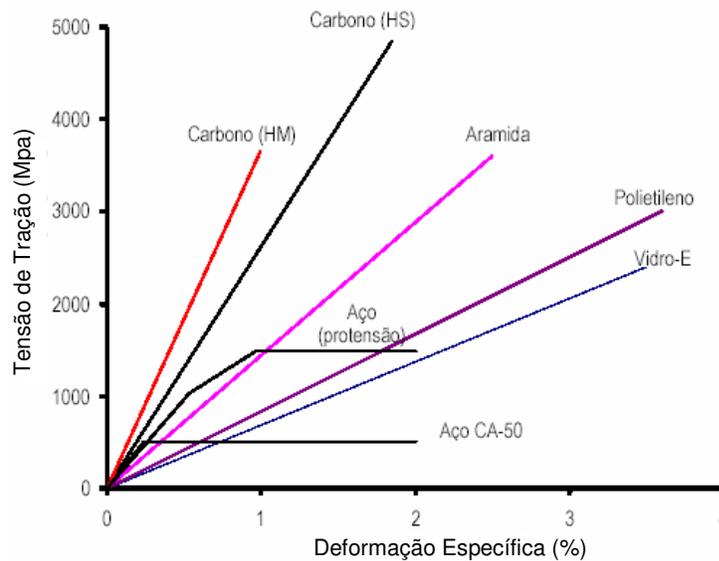


Figura 2.2 – Diagrama tensão-deformação específica das fibras, aço de construção e cordoalha de protensão (Beber, 2003).

A matriz é responsável por envolver completamente as fibras, proporcionando proteção mecânica e proteção contra agentes agressivos, além de garantir a transferência integral das tensões do elemento estrutural para as fibras por atrito ou adesão.

As matrizes utilizadas em polímeros reforçados com fibras são constituídas por resinas termoplásticas ou resinas termo-rígidas, as quais devem apresentar compatibilidade química e térmica com a fibra.

As resinas termo-rígidas ou termofixas são aquelas em que a cura é feita pela ação do calor, ou tratamento químico com catalisadores formando um produto final infusível e insolúvel (Fiorelli, 2002; Beber, 2003).

As resinas termoplásticas são aquelas em que o processo de cura é reversível, ou seja, podem ser fundidas por meio do aumento de temperatura tornando a se solidificar ao serem resfriadas (Fiorelli, 2002).

Em reforço estrutural utiliza-se resinas de origem termo-rígida, dentre as quais pode-se citar o poliéster, o éster-vinílico, o uretano metacrilato, o fenol e principalmente o epóxi.

Machado (2004) relata que as resinas epóxi são as mais utilizadas pois apresentam excelente aderência, durabilidade, compatibilidade com o concreto, boa resistência à tração, bom comportamento à fluência, boa resistência química e a solventes, forte adesão com as fibras e baixa retração durante a cura. A

qualidade do reforço com CFC depende da quantidade de fibras em contato com a resina epóxi (Figura 2.3).

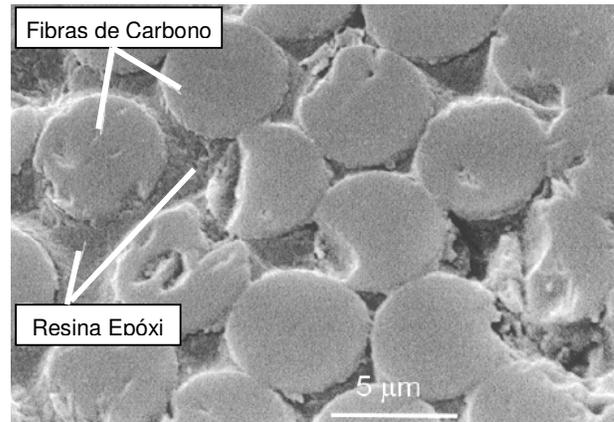


Figura 2.3 – Fibras de carbono envolvidas com resina epóxi (Basche *et al.*, 2000).

Atualmente os CFC são utilizados para reforçar vigas à flexão e à força cortante, lajes, chaminés, alvenaria estrutural, silos, reservatórios, túneis, pilares por meio de confinamento ou para redução de deformações. Alguns exemplos são ilustrados nas Figuras 2.4, 2.5, 2.6, 2.7 e 2.8.



Figura 2.4 – Confinamento de pilares com CFC.



Figura 2.5 – Reforço de chaminé com sistema de fio de fibra de carbono sob tensão (Karbhari, 1998).



Figura 2.6 – Reparo de túnel com CFC (Karbhari, 1998).



Figura 2.7 – Reforço de ponte à força cortante com CFC.



Figura 2.8 – Reforço de lajes à flexão e vigas à flexão e à força cortante com tecidos de CFC.