

2 Técnicas de Reforço com Materiais Compósitos em Estruturas de Concreto

2.1. Notas Iniciais

Este capítulo trata de algumas propriedades dos materiais compósitos, as características físico-químicas da resina e das fibras, e a sua aplicabilidade dentro da construção civil, especificamente no campo da reabilitação estrutural.

2.2. Polímeros Reforçado com Fibras

Os compósitos ou polímeros reforçado com fibras (FRP – *Fiber Reinforced Polymers*) são os materiais formados pela combinação de uma matriz polimérica, um material de reforço constituído por fibras contínuas e, geralmente, por alguns fillers e aditivos. As fibras são responsáveis pela resistência do compósito e a matriz é o produto que as une, sendo responsável pela transmissão das solicitações externas por meio de tensões tangenciais.

2.2.1. Matriz

A matriz polimérica pode ser uma resina termofixa, como o adesivo epoxídico, o poliéster e o fenol, ou termoplástica, como o polipropileno e o nylon. As resinas termofixas (termorígidas) após a cura produzem uma estrutura molecular de ligações cruzadas fortes que não se fundem a altas temperaturas. Já para as termoplásticas as cadeias moleculares não se cruzam, logo amolecem e se fundem a alta temperatura.

Entre as resinas mais utilizadas em reforço e recuperação de estruturas de concreto destaca-se a epoxídica, por apresentar excelentes propriedades de aderência e durabilidade, as quais são derivadas do petróleo (etoxileno), resultante da combinação da epícloridrina e do bisfenol “A”. Além disso, tem grande

resistência à tração, boa resistência à fluência e baixa retração durante a cura. Outra grande vantagem desse material é sua resistência a grandes variações de temperatura (-40°C a $+50^{\circ}\text{C}$). Por ser um produto bi-componente, é composto de um agente principal (a própria resina) e um catalisador (endurecedor). Dentre as principais propriedades físicas deste material destacam-se:

- Resistência à tração variando de 55 MPa a 130 MPa , e a compressão variando de 120 MPa a 210 MPa ;
- Módulo de elasticidade: $2,5\text{ GPa}$ a $4,1\text{ GPa}$;
- Deformação específica na ruptura: $1,0\%$ a $9,0\%$;
- Peso específico: $10,8\text{ kN/m}^3$ a $12,7\text{ kN/m}^3$;
- Excelente adesão ao concreto com resistência entre 30 MPa e 50 MPa ;
- Retração na cura: $1,0\%$ a $5,0\%$.

2.2.2. Fibras

Os principais tipos de fibras utilizados nas aplicações da engenharia civil são os seguintes: vidro (*Glass*), carbono (*Carbon*) e Kevlar (*aramida – ARomatic polyAMID*). O processo de fabricação é diferente para cada um destes materiais, resultando em microestruturas com propriedades distintas (Figura 2.1).

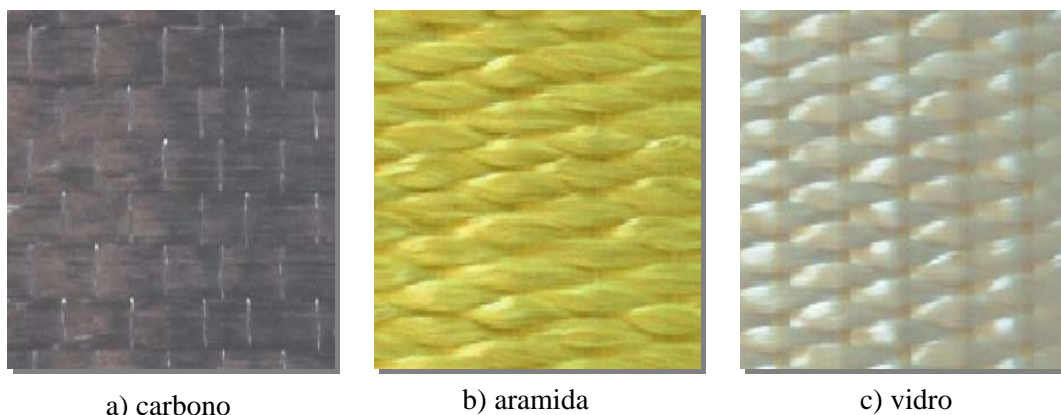


Figura 2.1 – Fibras utilizadas no reforço estrutural; www.sika.com, visitado em 2006.

O processo de fabricação das fibras de carbono ocorre por meio da carbonização de fibras de polímeros, como a poliacrilonitrila (PAN), sendo suas características mecânicas diretamente dependentes da estrutura molecular obtida. Dependendo do tipo de tratamento da fibra básica que inclui carbonização,

grafitização e oxidação, é possível fabricar fibras de carbono com diversos valores de resistência e módulo de elasticidade, sendo preta a sua cor natural.

As fibras de carbono são caracterizadas por uma combinação de baixo peso próprio, alta resistência, alta rigidez, facilidade de assumir diferentes formas e grande durabilidade. Este é um tipo de material baseado nas fortes ligações carbono-carbono e na leveza do átomo de carbono. A sua alta resistência e alto módulo de elasticidade se devem ao paralelismo entre os eixos das fibras e os seus diâmetros podem variar entre 0,07 mm e 0,10 mm, podendo ser fabricadas continuamente, sem limite de comprimento.

A Figura 2.2 e a Tabela 2.1 mostram algumas das principais propriedades mecânicas das fibras de carbono, vidro e aramida, e de outros materiais utilizados na construção civil como o aço.

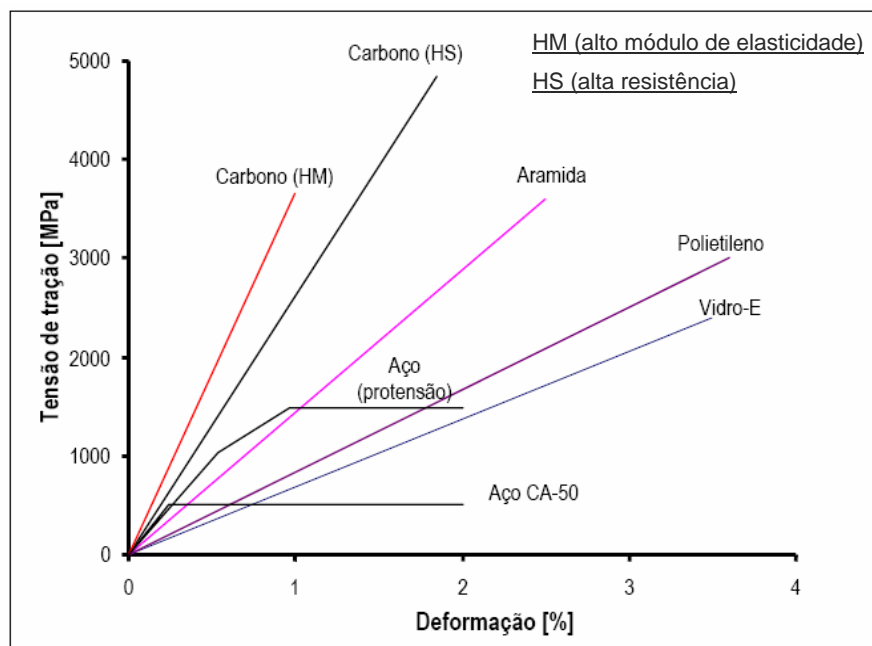


Figura 2.2 – Gráfico tensão x deformação específica de fibras e outros materiais, adaptada de Beber (2003).

Tabela 2.1 – Características mecânicas das fibras e do aço; adaptada de Beber (2003).

Propriedade	Vidro-E	Aramida	Carbono (HS)	Carbono (HM)	Aço CA-50
Resistência à tração (MPa)	2400	3600	3300 – 5000	1500 – 4700	500 (escoamento)
Módulo de elasticidade (GPa)	70	130	230 – 300	345 – 590	210
Deformação específica última (%)	3,5	2,5	1,5 – 2,2	0,6 – 1,4	0,2 (escoamento)
Peso específico (kg/m ³)	2560	1440	1800	1900	7850

2.2.3. Polímero Reforçado com Fibras de Carbono

O sistema resultante da resina polimérica e as fibras de carbono são denominados de Polímero Reforçado com Fibras de Carbono, ou *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP), ou simplesmente Compósitos de Fibras de Carbono (CFC). Os dois principais sistemas de reforço estrutural com CFC são: sistemas pré-fabricados e sistemas curados *in situ*.

Os sistemas pré-fabricados são sistemas laminados semi-rígidos de CFRP do tipo unidirecional, resultado da impregnação de um conjunto de feixes ou camadas contínuas de fibras por uma resina termofixa, consolidada por um processo de pultrusão. Esse processo é um método de fabricação contínuo, mecanizado, para produtos de seção uniforme, em resina poliéster, epóxi estervinílica ou fenólica reforçada com fibras, de desempenho superior aos materiais convencionais.

Para o sistema curado *in situ* a sua origem ocorre por meio de fibras contínuas, sob a forma de fios, mantas ou tecidos, em estado seco ou pré-impregnado, colados sobre a superfície de concreto a ser reforçado com resina epoxídica. As principais propriedades desses dois tipos de sistema são mostradas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Características e dados de instalação dos sistemas de reforço com CFRP; adaptada de Beber (2003).

Características	Sistemas Pré-Fabricados	Sistemas Curados <i>in situ</i>
Forma	laminados	mantas ou tecidos
Espessura	1,0 a 1,5 mm	0,1 a 0,5 mm
Utilização	Colagem dos elementos pré-fabricados com adesivo	Colagem e impregnação das mantas/tecidos com adesivo
Dados de instalação	<ul style="list-style-type: none"> – salvo condições especiais, aplicável somente em superfícies planas; – adesivo tixotrópico; – geralmente usa-se uma única camada; – rigidez do compósito e tixotropia do adesivo permitem a tolerância de algumas imperfeições na superfície reforçada. 	<ul style="list-style-type: none"> – independente da forma da superfície, necessidade de arredondamento dos cantos; – resina de baixa viscosidade para colagem e impregnação; – pode-se usar várias camadas.
	<ul style="list-style-type: none"> – má aplicação e mão-de-obra de baixa qualidade podem ocasionar perda de ação compósita entre o reforço e a estrutura. 	

Neste estudo será dado ênfase ao sistema curado *in situ*, e dentre os principais tipos de fibras de carbono deste sistema podem-se citar as seguintes mantas ou tecidos atualmente comercializados: o SIKAWRAP 230-C da empresa SIKA, o TEC-FIBER da empresa Rheotec, e o MBRACE da empresa Master Builders Technologies (MBT).

O reforço com CFC tem uma grande adaptabilidade à geometria dos elementos estruturais, o que torna suas aplicações rápidas, fáceis e eficazes. Porém, este sistema de reforço também apresenta algumas desvantagens como a sua baixa resistência ao fogo, risco de deterioração quando exposto aos raios ultravioletas e o risco de vandalismo. Na maioria das vezes apresentam custos iniciais mais elevados se comparado a outras técnicas de reforço, como as que empregam chapas de aço.

No aspecto do dimensionamento do reforço propriamente dito citam-se três principais objetivos para a aplicação do CFC nas estruturas de concreto armado:

- aumento do momento fletor resistente de lajes (Figura 2.3) e vigas (Figura 2.4) pela adição de camadas de compósito de fibras de carbono na face tracionada (flexão);
- aumento da capacidade resistente à força cortante de vigas pela colagem do material compósito nas laterais da viga (Figura 2.5);

- aumento da ductilidade e resistência de colunas ou pilares sujeitos a solicitações sísmicas por meio do envolvimento completo do elemento estrutural com material compósito (Figura 2.5).

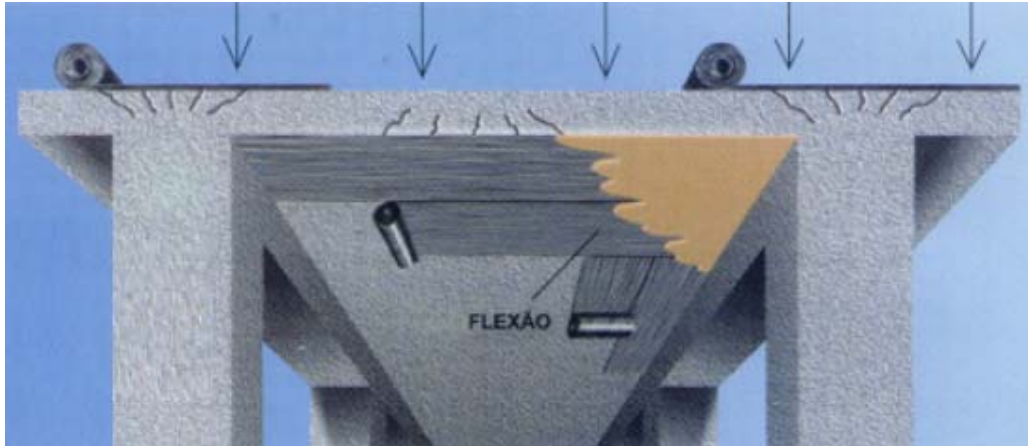


Figura 2.3 – Aplicação do CFC nas regiões tracionadas da laje; www.masterbuilders.com.br, visitado em 2006.

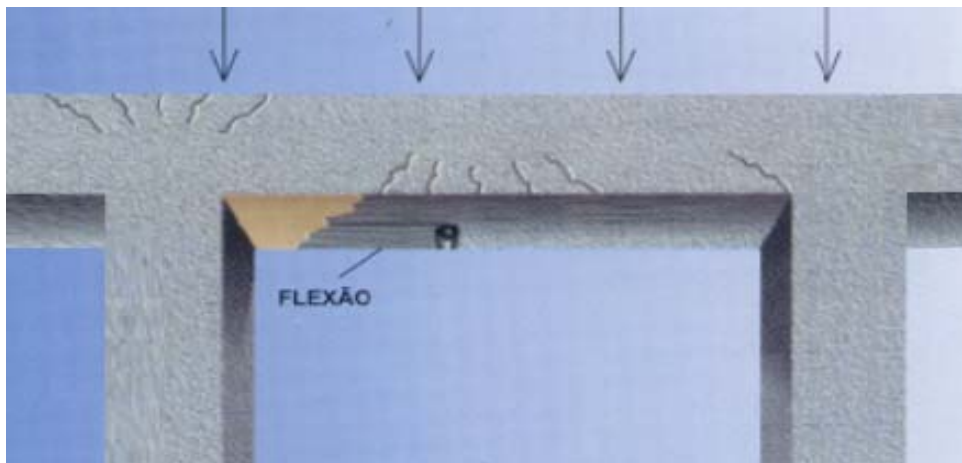


Figura 2.4 – Aplicação do CFC na região tracionada da viga; www.masterbuilders.com.br, visitado em 2006.

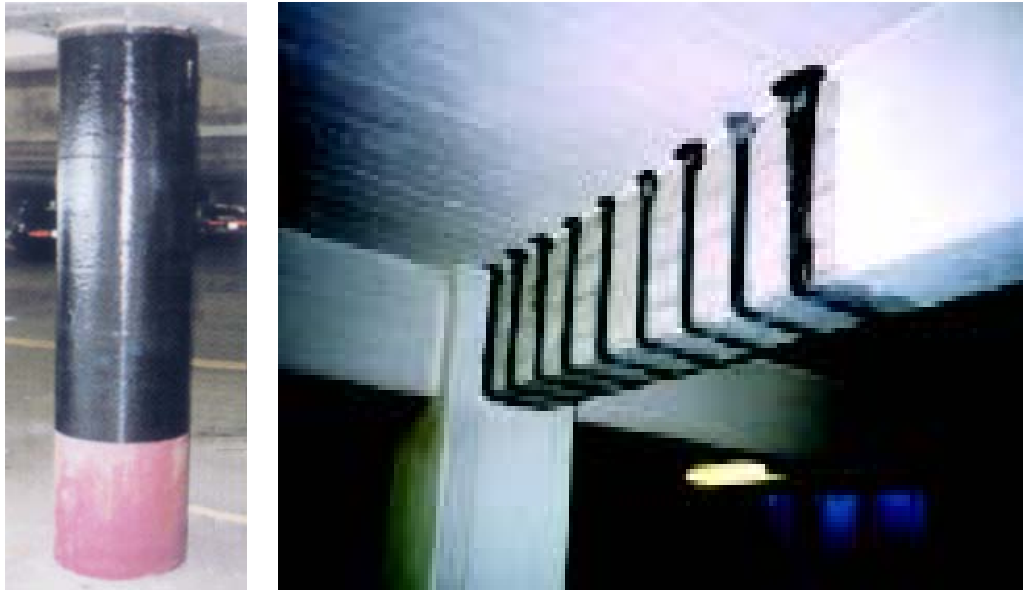


Figura 2.5 – Aplicação do CFC em colunas e nas regiões com força cortante em vigas; www.masterbuilders.com.br, visitado em 2006.

2.2.4. Reforço à Força Cortante com CFC

Com o objetivo de se aumentar a capacidade resistente à força cortante de vigas com o uso de compósitos de fibras de carbono (CFC), o reforço é colado na alma da viga utilizando-se três configurações típicas como mostrado na Figura 2.6.

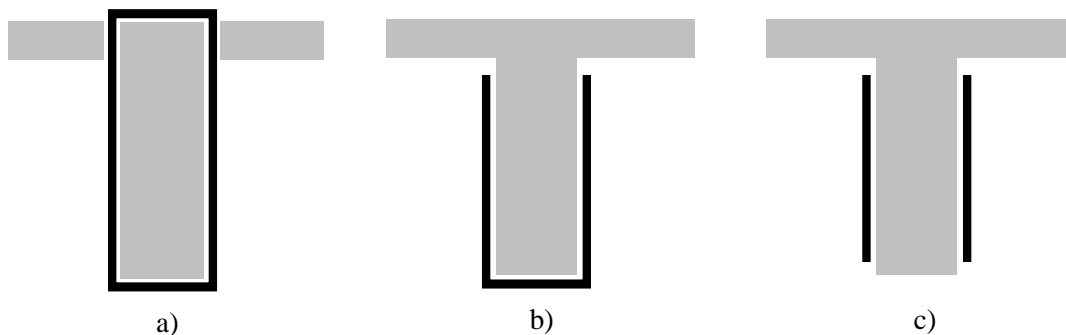


Figura 2.6 – Aplicação do CFC em seções de vigas solicitadas à força cortante.

De acordo com a literatura técnica, em geral, o envolvimento completo da alma tem se mostrado mais eficiente, seguido do envolvimento em U e por último a colagem do reforço somente nas laterais da viga (Figura 2.6). Porém, no caso do envolvimento completo a sua aplicação é mais difícil, pois há a necessidade de se

fazer uma pequena abertura na laje. Para os casos (b) e (c), pode ser utilizada uma ancoragem mecânica na extremidade do reforço para torná-lo mais eficiente.

O reforço com compósitos de fibra de carbono pode ser aplicado de modo contínuo na alma da viga na região a ser reforçada, ou em tiras (estribos) conforme é mostrado na Figura 2.7.

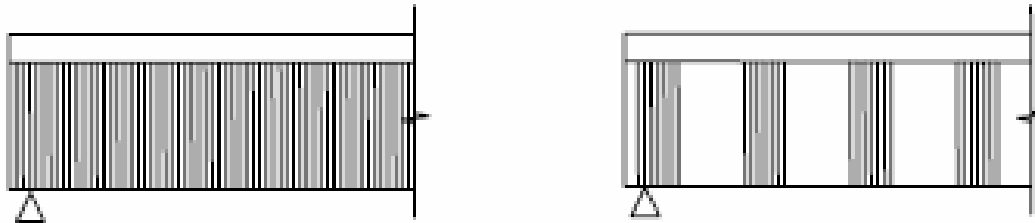


Figura 2.7 – Modo de aplicação do CFC nas regiões com força cortante em vigas.

As fibras do reforço podem ser unidirecionais, sendo aplicado verticalmente (caso mais usual) como mostrado na Figura 2.8, caso (a), ou normais à fissura diagonal, caso (b). As fibras também podem ser orientadas em múltiplas direções, criando-se uma pseudo-isotropia como nos casos (c) e (d).

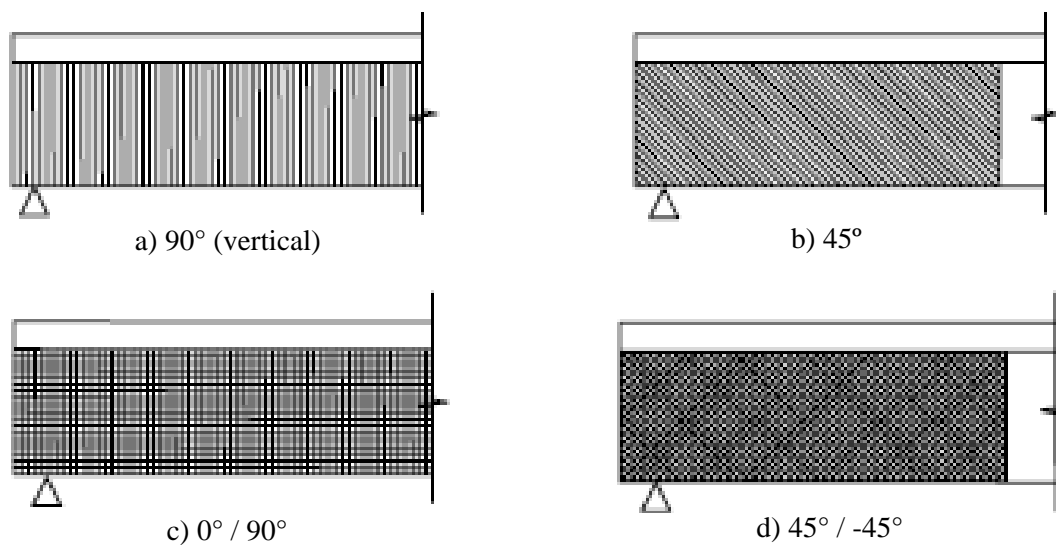


Figura 2.8 – Ângulo de direção do CFC nas regiões com força cortante em vigas.