

2

Reforço Estrutural com Tecido de Fibras de Carbono

2.1.

Introdução

As primeiras pesquisas relativas ao emprego de materiais compósitos na construção civil foram desenvolvidas no Japão, há aproximadamente 25 anos, face aos problemas e danos estruturais originados por abalos sísmicos, pois as estruturas necessitavam de recuperação e reforço num curto intervalo de tempo. Foram executados reforço de pilares com fibras de carbono, de modo a enrijecer os nós das estruturas, buscando-se sanar os danos causados pelos abalos sísmicos. Nos EUA esse tipo de material foi utilizado em projetos aeroespaciais da NASA. Posteriormente sua utilização estendeu-se à indústria automobilística, como revestimento dos carros de Fórmula 1, para a proteção contra esmagamento das pernas dos pilotos em caso de batidas.

O sistema de reforço com compósitos é indicado para aplicações em vigas, lajes, paredes, silos, reservatórios, túneis e demais elementos estruturais sujeitos à deterioração, ou para possibilitar o acréscimo de sua capacidade de carga ou para diminuir as flechas.

Devido ao conjunto de materiais empregados nessa técnica, em que são utilizados compósitos de fibras de carbono e resinas epoxídicas, a colagem externa do reforço possibilita um aumento significativo na resistência das estruturas, de modo a possibilitar uma mudança de uso das mesmas, corrigir erros de projeto ou de execução, recuperação estrutural face ao tempo de uso ou por algum acidente durante a vida útil da estrutura.

O reforço com compósitos de fibra de carbono além de possuir características semelhantes às encontradas em sistemas de reforços realizados com chapas de aço, tais como a enorme variedade de casos em que podem ser empregadas, é uma técnica rápida, fácil e de eficaz aplicação. O fato das dimensões das estruturas permanecerem praticamente inalteradas é um fator determinante na adoção desse tipo de reforço. O baixo peso específico do sistema

de reforço é uma grande vantagem em relação à adoção de chapas metálicas. BEBER (2000) afirma que para um mesmo incremento de resistência, 2 kg desse material compósito poderiam substituir 47 kg de aço. Outras características são a maleabilidade e o comprimento oferecido por certos tipos de compósito de fibra de carbono. Os tecidos, por exemplo, além de serem fabricados de forma contínua, permitem o uso em locais mais complexos, onde a utilização das chapas se torna impossível. Essas duas vantagens, juntamente com a sua leveza, facilitam a manipulação e aplicação do reforço com fibra de carbono, e uma execução rápida. A resistência à corrosão desse sistema também é importante, uma vez que elimina uma série de cuidados necessários quando o reforço é feito com chapas metálicas.

Contudo, esse sistema de reforço tem suas desvantagens. As principais são a incompatibilidade desses materiais com uma superfície irregular, a sua baixa resistência ao fogo e à exposição aos raios ultravioletas. Mas esses são problemas presentes também em outros sistemas de reforço, como os de chapas de aço coladas com epóxi. Além dessas desvantagens, quando esta técnica é comparada com outros sistemas de reforço, ela apresenta na maioria das vezes, custos mais elevados.

2.2. Compósitos de Fibras de Carbono

Os compósitos são constituídos de uma matriz termoplástica ou matriz com cura térmica (termofixos) e fibras contínuas dispostas aleatoriamente ou em direções definidas. A resistência da matriz é menor que a das fibras, sendo que essas devem resistir às cargas para obter-se um ganho maior na resistência do compósito, mas o inconveniente que deve ser realçado é a ruptura brusca das fibras. A função da matriz é colar as fibras e transmitir as ações externas para as mesmas por meio de tensões tangenciais.

O comportamento e as propriedades dos materiais compósitos dependem da natureza, da forma, do arranjo estrutural e da interação entre os componentes. As propriedades e características de cada componente determinam as propriedades gerais do compósito.

As fibras de carbono resultam do processo de carbonização de fibras de polímeros, como o poliacrilonitril, 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 diversas configurações de resistência e algumas delas podem chegar a ser várias vezes mais resistentes que o aço. A produção dessas fibras exige exposição ao ar das fibras base, seguida de processamento a altas temperaturas (da ordem de $1000^{\circ}C$ a $1500^{\circ}C$ para as fibras de carbono). Essa característica confere à fibra resistência à tração da ordem de $3500 MPa$ com uma deformação específica de 1,5% .

A fibra de carbono é um material baseado na força das ligações carbono-carbono, no grafite, e na leveza do átomo de carbono. As fibras de carbono são caracterizadas por uma combinação de baixo peso, alta resistência e grande rigidez. O seu alto módulo de elasticidade e alta resistência dependem do grau de orientação das fibras, ou seja, do paralelismo entre os eixos dessas.

As fibras têm diâmetros entre $0,07 mm$ e $0,10 mm$. Elas podem ser longas, quando forem contínuas, ou curtas, quando forem fios cortados (com comprimentos de $3 mm$ a $50 mm$). A relação entre o comprimento e o diâmetro médio das fibras curtas é chamada de fator de tamanho. As propriedades de um compósito com fibras curtas são muito dependentes dessa relação, pois quanto maior o fator de tamanho, maior será a resistência do compósito.

Os compósitos de fibras contínuas mais utilizadas atualmente são os de vidro, os de carbono e a aramida. As propriedades físicas e mecânicas variam consideravelmente para os diferentes tipos de compósitos e podem variar significativamente para o mesmo tipo de material. A Tabela 2.1 mostra a variação das propriedades físicas e mecânicas de diversas fibras e a Figura 2.1 ilustra uma comparação do diagrama tensão x deformação específica desses compósitos com o do aço.

Tabela 2.1- Propriedades típicas dos principais tipos de fibra; adaptada de Matthys-2000, apud ARAÚJO (2002b).

Tipo de Fibras		Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Deformação Específica Última (%)	Peso Específico (kg / m^3)	Diâmetro da Fibra (μm)
Carbono	tipo PAN* - com alta resistência (HS)	3500 - 5000	200 - 260	1,2 - 1,8	1700 - 1800	5 - 8
	tipo PAN* - com alto módulo de elasticidade (HM)	2500 - 4000	350 - 700	0,4 - 0,8	1800 - 2000	5 - 8
	tipo Pitch** com alto módulo de elasticidade (HM)	3000 - 3500	400 - 800	0,4 - 1,5	1900 - 2100	9 - 18
Aramida	com módulo de elasticidade intermediário (IM)	2700 - 4500	60 - 80	4,0 - 4,8	1400 - 1450	12 - 15
	com alto módulo de elasticidade (HM)	2700 - 4500	115 - 130	2,5 - 3,5	1400 - 1450	12 - 15
Vidro	aluminoborosilicato de cálcio (E)	1800 - 2700	70 - 75	3,0 - 4,5	2550 - 2600	5 - 25
	aluminossilicato de magnésio (S)	3400 - 4800	85 - 100	4,5 - 5,5	2550 - 2600	5 - 25

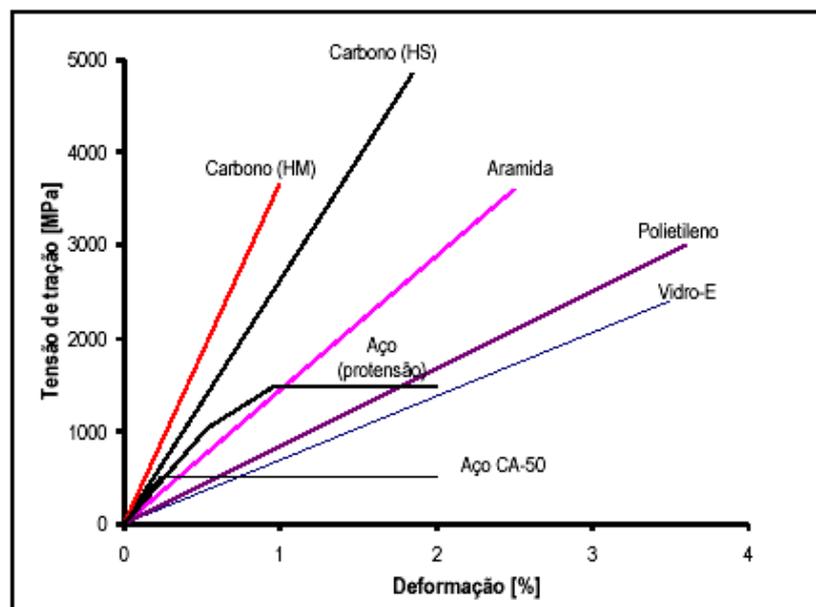


FIGURA 2.1 - Diagrama tensão-deformação específica de fibras e metais; adaptada de BEBER (2003).

Observa-se na Figura 2.1 que os compósitos de fibras de carbono são adequados para o reforço de vigas de concreto armado, devido ao alto desempenho mecânico dessas fibras. A Figura 2.2 mostra fotos de um material compósito com matriz epóxi (coloração escura) com fibras de carbono.

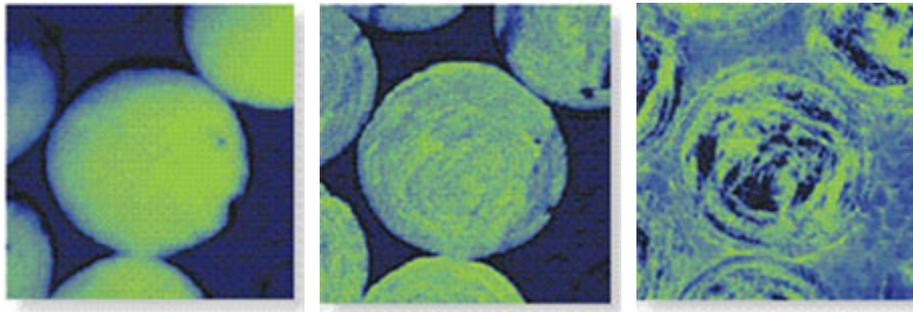


Figura 2.2 – Compósito de epóxi com fibras de carbono;(www.rheotec.com.br ,2002).

Os compósitos de fibra de carbono permitem uma significativa redução nas dimensões dos elementos de reforço, além de sua elevada resistência à tração e módulo de elasticidade da ordem de grandeza do módulo de elasticidade do aço.

As características dessa técnica de reforço incorporam algumas vantagens, como o acréscimo insignificante na carga permanente e uma espessura mínima do reforço. A boa flexibilidade do material permite adaptação a várias formas e a facilidade de aplicação reduz os custos e o tempo de paralisação do uso da estrutura, além de ser um material não corrosivo, o que garante maior durabilidade e menor manutenção.

Os polímeros são materiais compósitos não homogêneos, anisotrópicos e de comportamento perfeitamente elástico até a ruína. Os polímeros reforçados com fibras (PRF), ou *fiber reinforced polymers* (FRP), são constituídos por um componente estrutural (as fibras) e por uma componente matricial (a resina polimérica) e geralmente por alguns *fillers* e aditivos. O desempenho de um PRF é determinado pelas propriedades e características dos materiais que o constituem, pela interação entre esses materiais e pelas condições da execução do reforço, daí sua enorme versatilidade.

Os polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC), ou *carbon fiber reinforced polymers* (CFRP), são apropriados para o reforço de estruturas de concreto armado devido ao elevado desempenho mecânico das fibras de carbono. O PRFC é um subproduto de materiais com base em poliacrilonitril, oriundo da indústria de refinação, oxidado a $1500^{\circ}C$. O resultado é um material com base em carbono, em forma de fibra, na qual os átomos ficam perfeitamente alinhados ao longo da fibra.

Os compósitos de PRFC destacam-se principalmente porque:

- as fibras de carbono apresentam as maiores relações entre resistência e rigidez com seu peso próprio;
- as fibras de carbono mantêm a alta resistência e rigidez sob temperaturas elevadas;
- à temperatura ambiente as fibras de carbono não são afetadas pela umidade e ação de vários solventes, ácidos e bases;
- as fibras de carbono apresentam uma diversidade de características físicas e mecânicas, permitindo que os compósitos apresentem grande versatilidade para diversas aplicações em engenharia;
- os processos de fabricação de fibras e compósitos encontram-se altamente desenvolvidos, são relativamente baratos e apresentam uma excelente relação custo-benefício.

Inicialmente utilizados para o reforço de pilares submetidos a ações sísmicas, esses polímeros já se encontram em aplicações práticas no reforço de lajes, vigas, pilares e paredes, em estruturas de edifícios e de pontes. Uma vez garantida a boa qualidade do concreto e a ausência de corrosão nas armaduras, tais reforços possibilitam limitar a abertura das fissuras e reduzir as flechas, além de aumentar a resistência à flexão e à força cortante.

Os PRFC possuem baixa condutividade térmica transversal e a sua resistência ao fogo é limitada pela instabilidade da resina exposta a elevadas temperaturas.

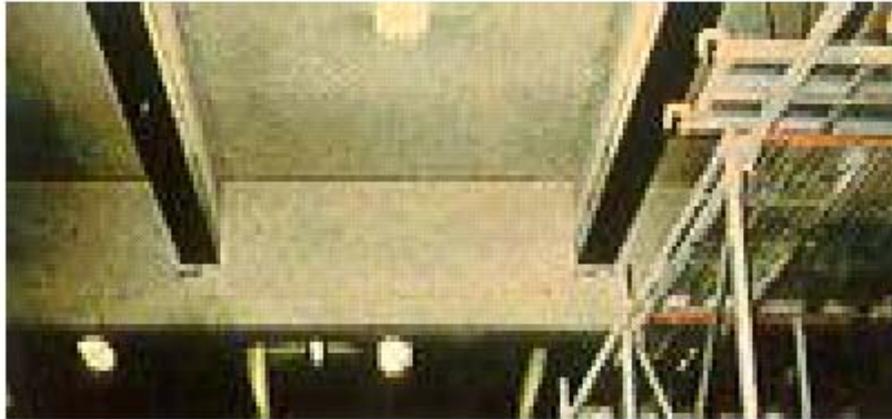


Figura 2.3 - Reforço em vigas de concreto armado utilizando os PRFC; (www. masterbuilders.com.br, 2003)

Os compósitos utilizados em reforço estrutural apresentam-se sob diversas formas, tais como tecidos unidirecionais, tecidos bidirecionais, lâminas, barras e perfis.

Os tecidos de fibras de carbono são pré-impregnados (*prepreg*), com espessura similar a do papel de parede, colados sobre a superfície do concreto com resina epóxi, seguindo exatamente a curvatura do elemento e permitindo a aplicação em arestas (Figura 2.4).



Figura 2.4 – Tecido de fibra de carbono; www.masterbuilders.com.br (2003).

A Figura 2.5 mostra curvas tensão-deformação de dois tipos de tecidos comercializados atualmente.

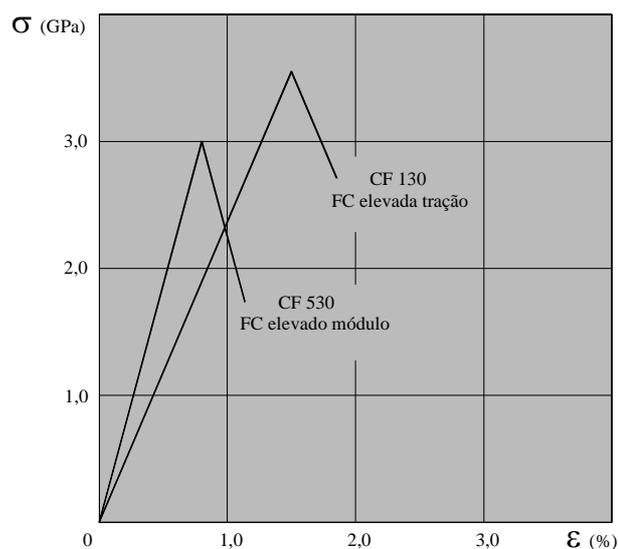


Figura 2.5 – Diagrama tensão-deformação específica de tecidos de fibras de carbono (MASTER BUILDERS TECHNOLOGIES, 1996).

As principais características e aspectos de instalação de sistemas de reforços com mantas e tecidos de fibra de carbono são apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Características e aspectos de instalação de mantas e tecidos de fibra de carbono, adaptada de ARAÚJO (2002b).

Características	Mantas e Tecidos
Sistema de reforço estrutural	Curados <i>in situ</i>
Espessura	0,1 a 0,5 mm
Utilização	Colagem e impregnação das mantas e tecidos com resina
Aspectos típicos da instalação	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Independente da forma da superfície, necessidade de arredondamento dos cantos ✓ resina de baixa viscosidade para colagem e impregnação ✓ usa-se freqüentemente várias camadas ✓ aplicação do putty é necessária para prevenir o descolamento por imperfeição da superfície ✓ versatilidade de aplicação, necessita de rigoroso controle de qualidade ✓ controle de qualidade (má aplicação e mão –de– obra de baixa qualidade = perda da ação compósita entre o reforço e a estrutura, problemas na integridade do reforço a longo prazo)

2.3. Resina Epoxídica

A matriz dos compósitos reforçados com fibras é responsável pela união das fibras que compõem o compósito, atuando como o meio pelo qual as solicitações externas são transmitidas e distribuídas para as fibras. Apenas uma parcela muito pequena desta solicitação é absorvida pela matriz.

As resinas sintéticas estão entre os materiais mais empregados na recuperação e no reforço de estruturas. Essas resinas são formadas por monômeros, que ao reagirem com catalisadores formam polímeros de cadeias de grande extensão. As características desses polímeros variam de acordo com o monômero e o catalisador utilizados, e com as proporções desses para a formação dos polímeros.

As resinas epóxi, dentre as resinas sintéticas utilizadas na construção, tais como as resinas acrílicas, as de poliéster, as poliuretânicas, são as mais utilizadas em reforços e recuperações de estruturas de concreto devido a uma série de vantagens que essas apresentam sobre as outras. Dentre as vantagens dessas resinas enfatiza-se as suas excelentes propriedades de aderência e durabilidade, além da compatibilidade entre esses materiais e o concreto. Possuem excelente resistência à tração, boa resistência à fluência, boa resistência química e a solventes, forte adesão com as fibras e baixa retração durante a cura. O preço e o longo período de cura são as desvantagens. As elevadas temperaturas comprometem a resina epóxica, que se torna elastomérica, o que acarreta reduções consideráveis de resistência.

As resinas epóxi (etoxileno) são derivadas do petróleo, resultante da combinação da epiclorigidrina e do bisfenol “A”. A primeira é proveniente de gases do petróleo, e a segunda da condensação de fenol com acetona. Essas resinas representam uma importante classe dos polímeros termorrígidos e têm sido comercializadas desde a década de 1940.

As resinas epóxi empregadas em aplicações da engenharia estrutural por si só não apresentam características físicas para utilização prática. Geralmente são formulações do tipo bi-componente, ou seja, compostas por um agente principal (a própria resina) e um catalisador (endurecedor). Dessa forma, o catalisador reage com a resinas gerando uma “formulação epóxi”.

Cada “formulação epóxi” possui propriedades físicas e químicas bem definidas, dentre elas destacam-se:

- Resistência à tração variando de 55 MPa a 130 MPa , e à 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% a 9%
- Peso Específico : $10,8\text{ kN/m}^3$ a $12,7\text{ kN/m}^3$
- Resistência à flexão : 131 MPa
- Excelente adesão ao concreto com resistência entre 30 MPa e 50 MPa ;
- Intervalo de tempo variando de 30 minutos a 10 horas para adquirir resistência, sendo que a resistência máxima é obtida aos sete dias;
- Retração inferior à do concreto.

A resina epóxi tem como finalidade atuar como adesivo, ou seja, fazer com que o material atinja sua resistência própria em uma hora, apresentando excelente resistência química, elevada capacidade de liga, resistência final muito elevada, e garantir a aderência do compósito ao substrato de concreto, transferindo as tensões tangenciais desse para o substrato, de modo a estabelecer a integridade do arranjo compósito-epóxi-concreto, ou atuar como selante, para uso com diversos materiais de construção, possuindo durabilidade e elasticidade muito maiores do que os materiais usuais.

O epóxi puro formado exclusivamente por resina e catalisador é o material utilizado no reforço e recuperação de estruturas de concreto. Por ser um material isolante, influencia na estrutura dando a ela uma maior resistência à ruptura do conjunto compósito-concreto, uma vez que esses dois materiais apresentam coeficientes de dilatação térmica diferentes. A camada de epóxi não deve exceder a 3 mm de espessura para que o seu endurecimento no interior da pasta não seja reduzido, prejudicando assim o reforço realizado. Na prática a sua espessura final fica em torno de $1,5\text{ mm}$. A escolha do tipo de adesivo é fundamental, pois o comportamento mecânico do reforço depende muito dele.

A temperatura que leva a passagem de um estado vítreo para um estado elástico e dúctil é chamada temperatura de transição vítrea e a aproximação desta

temperatura faz com que as propriedades mecânicas, como a resistência e a rigidez da resina, diminuam acentuadamente. Esse problema pode ser amenizado com o uso de *sprinklers*, e/ou de pintura especial no acabamento do reforço, buscando-se aumentar a resistência ao fogo.

O período em que a resina mantém suas características de aderência e pode ser manipulada sem dificuldade, é chamado de tempo de utilização (*pot life*). Quanto maior a temperatura e quantidade de material a ser preparado, menor o tempo de utilização. Isso ocorre em função da maior quantidade de calor e conseqüente aceleração das reações. O tempo de endurecimento (*open time*) é o tempo que a resina leva para endurecer, e é o intervalo no qual o compósito deve ser colado para que suas propriedades se desenvolvam satisfatoriamente. Esse tempo é influenciado pelas temperaturas do ambiente, do compósito e da superfície a ser reforçada.

Além da resina, *fillers* e aditivos comumente também compõem a matriz. Os *fillers* têm a função de diminuir o custo e melhorar as propriedades da matriz (controlar a retração, melhorar a capacidade de transferência de tensões e controlar a tixotropia da resina). Vários tipos de aditivos podem ser usados para aumentar a resistência da matriz e facilitar a fabricação do compósito. Os mais comuns são os inibidores da ação dos raios ultravioleta, os antioxidantes, os catalisadores e os desmoldantes.

2.4. Tipos de Ruptura de Vigas Reforçadas

A aplicação efetiva dos compósitos no reforço estrutural de elementos de concreto armado somente será válida quando o comportamento e os mecanismos de ruptura dos sistemas estruturais reforçados com compósitos de fibra de carbono forem conhecidos e entendidos satisfatoriamente.

Os incrementos na resistência à flexão, empregando-se compósitos de fibra de carbono, podem ser considerados bastante significativos. Entretanto os modos de ruptura podem limitar estes incrementos. Os modos de ruptura ocorrem geralmente de forma frágil, citando-se o destacamento do reforço, o arrancamento da camada longitudinal de concreto e o colapso da viga por força cortante, sendo

que essas rupturas podem ocorrer sob cargas significativamente menores que aquelas previstas pelos modelos teóricos.

As vigas de concreto armado solicitadas à flexão, reforçadas com compósitos de fibras de carbono, podem apresentar modos de ruptura variados. Quando as taxas de armadura e a quantidade de reforço forem significativamente reduzidas, o escoamento da armadura longitudinal poderá ser seguido da ruptura à tração do reforço. Se estes valores forem elevados, a ruptura poderá ocorrer por esmagamento do concreto no bordo comprimido, enquanto o aço poderá ou não ter atingido o escoamento, dependendo da taxa de armadura. Além disso, a ligação entre o compósito e o concreto pode falhar. O descolamento pode ocorrer em função da propagação rápida de fissuras no adesivo (as resinas apresentam ruptura frágil).

Muitos programas experimentais sobre a aplicação de tecido, mantas e laminados de fibras de carbono no reforço de peças fletidas de concreto armado, fazem referência a diversos modos de ruptura.

De forma geral, estes modos de ruptura podem ser divididos em três categorias, apresentadas na Tabela 2.3 e ilustradas na Figura 2.5.

Tabela 2.3 – Modos de ruptura possíveis, adaptado de BEBER (2003).

<p><i>Ruptura clássica de estrutura de concreto armado submetida à flexão</i></p>	<p>(1) Deformação plástica excessiva da armadura longitudinal (2) Esmagamento do concreto (3) Ruptura do reforço à tração (4) Colapso da viga por cisalhamento</p>
<p><i>Destacamento do reforço</i></p>	<p>(5a) Devido à irregularidade da superfície (5b) Devido a fissuras de cisalhamento (<i>sudden peelling off</i>) (5c) Devido a fissuras de flexão (<i>continuous peelling off</i>)</p>
<p><i>Efeitos de extremidade</i></p>	<p>(6) Peeling off (7) Arrancamento da camada de concreto junto à armadura longitudinal</p>

Existem ainda outros modos de ruptura possíveis, inerentes aos compósitos, do tipo:

- Ruptura do adesivo na interface adesivo / compósito (8);
- Ruptura do adesivo na interface adesivo / concreto (9);
- Cisalhamento interlaminar do compósito (10).

Os números entre parênteses existentes na Tabela 2.3 e nos tópicos acima indicam o modo de ruptura e são ilustrados na Figura 2.6.

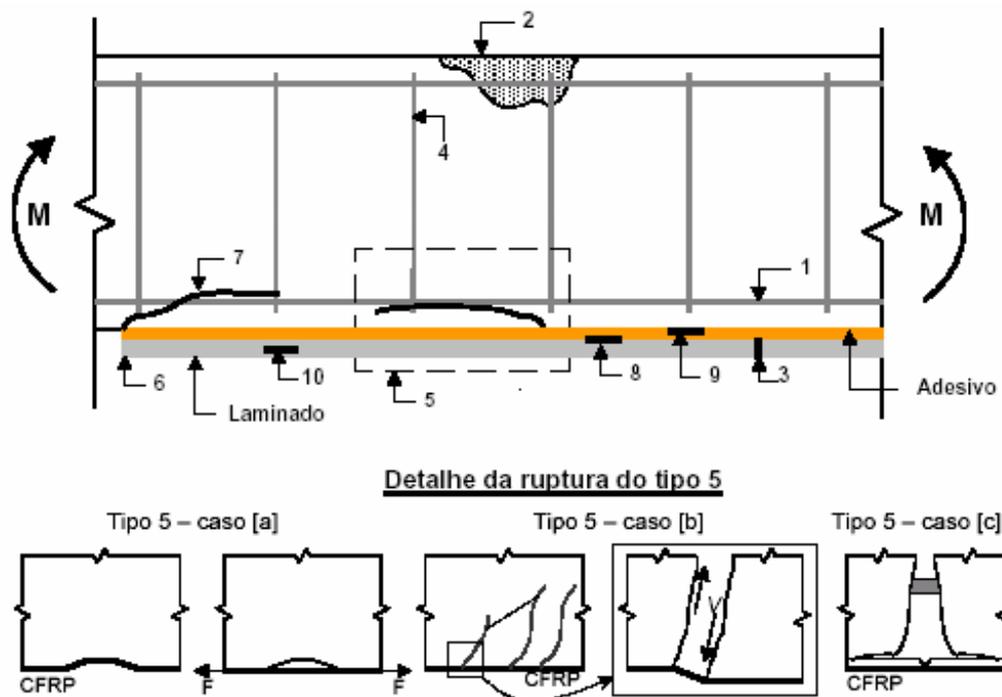


Figura 2.6 – Modos de Ruptura possíveis; adaptado de BEBER (2003).

As fissuras iniciais surgem na região de maior solicitação, originando uma concentração de tensões ao seu redor. Essas tensões devem ser transferidas pelo compósito de fibra de carbono a outras regiões do concreto, surgindo tensões tangenciais nas interfaces concreto-epóxi-compósito, que são transferidas da região fissurada para outras regiões capazes de absorvê-las. Alguns dos mecanismos citados acima estão descritos a seguir:

- **ruptura do compósito** : a área do reforço é insuficiente para absorver as tensões de tração na região mais solicitada;

- **ruptura por esmagamento do concreto:** a fissuração da peça se desenvolve diminuindo a zona comprimida, até o momento no qual a tensão de compressão no concreto atinge seu valor máximo, acarretando a ruptura brusca dessa região;
- **ruptura por força cortante:** a fissura ocorre no extremo do reforço e se desenvolve de forma inclinada, ao longo da altura da viga devido à transferência das tensões tangenciais para os extremos do compósito de fibra de carbono. Geralmente, ocorre em vigas com armadura transversal insuficiente;
- **ruptura por separação do substrato de concreto:** esse tipo de ruptura ocorre quando um valor excessivo para a espessura do reforço é adotado, gerando um acréscimo de tensões na extremidade e caso essas tensões ultrapassem a tensão de aderência admissível adesivo-concreto, o reforço separa inicialmente seu extremo, reduzindo seu comprimento efetivo, provocando uma ruptura horizontal devido ao aumento imediato da tensão de separação, representando uma ruptura brusca. Pode ocorrer também por falha na aplicação ou por escolha inadequada do adesivo;

Os mecanismos de ruptura da ligação são do tipo frágil e resultam no destacamento localizado do compósito (peeling off), a partir de sua zona de ancoragem ou de zonas com fissuração excessiva, como pode ser observado na Figura 2.7. Este tipo de ruptura pode ser dividido em três categorias, de acordo com a região e a sollicitação que a produz, isto é, descolamento no extremo do reforço proveniente da força cortante, descolamento na região de momento fletor máximo e descolamento iniciado por uma fissura de cortante numa região de momento fletor de magnitude média.

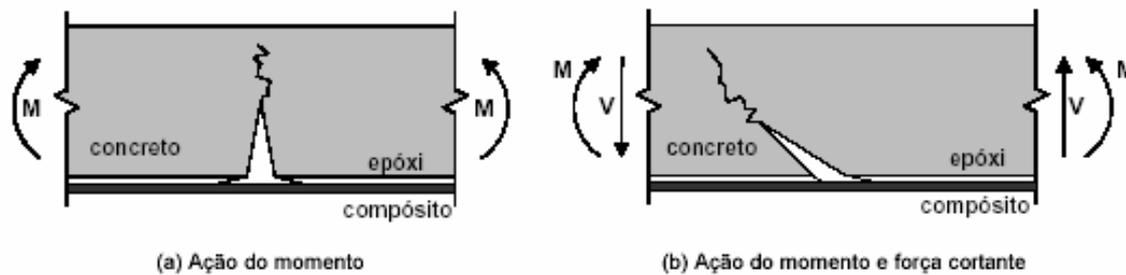


Figura 2.7 – Efeito de *peeling off* na interface concreto/compósito; adaptada de BEBER (2003).

2.5. Reforço à Flexão

A aplicação de compósitos de fibra de carbono no reforço à flexão de vigas de concreto armado constitui-se em uma técnica já consolidada. Porém, incrementos de resistência são somente alcançados se os modos de ruptura prematuros, falhas de aderência ou colapso por força cortante forem evitados.

A metodologia para o dimensionamento e verificação do comportamento de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono baseia-se nos princípios e hipóteses do Estado Limite Último.

A capacidade resistente à flexão correspondente aos modos de ruptura clássicos pode ser avaliada supondo-se que além das hipóteses básicas da flexão, seja adicionada a hipótese de aderência perfeita entre o concreto e o reforço.

Os procedimentos utilizados no dimensionamento consideram apenas a ruptura à flexão por falha do compósito à tração ou esmagamento do concreto, sem ruptura prematura por descolamento.

O modo de ruptura a ser considerado no dimensionamento deve ser o esmagamento do concreto após o escoamento da armadura longitudinal e a ruptura do compósito após o escoamento da armadura. Nos dois casos, o escoamento da armadura longitudinal precede a ruptura do compósito ou esmagamento do concreto, o que garante que o colapso ocorrerá após a formação de fissuras de flexão.

O elemento reforçado apresenta uma fissuração de flexão mais distribuída, e fissuras com menores aberturas, pois após o escoamento da armadura

longitudinal da peça, o crescimento da abertura da fissura fica controlado pelo reforço, ou seja, o reforço “costura” as fissuras.

Nas regiões extremas do material compósito tem-se concentrações de tensões, as quais dependem:

- dimensões do reforço, que são avaliadas por meio de um fator tamanho definido por $\lambda = \frac{b_f}{t_f}$, onde b_f é a largura do reforço e t_f sua espessura;
- propriedades físicas e químicas do epóxi;
- propriedades mecânicas do concreto, associada principalmente à resistência mínima à tração $f_{ct} \geq 1,5 \text{ MPa}$, obtida em ensaio de arrancamento do concreto.

A escolha do valor de λ deve-se ao fato que a ruptura do elemento reforçado ocorrerá quando esse atingir sua resistência máxima à flexão. Para baixos valores de λ tem-se ruptura brusca do reforço, e deve-se ter $\lambda > 50$ de modo a garantir que a ruptura ocorra por flexão. Esse parâmetro é fundamental no caso de uso de lâminas de compósito de fibra de carbono. No caso de tecidos tem-se um elevado λ .

O dimensionamento do reforço deve garantir a resistência e a ductilidade do elemento estrutural e perfeitas condições de transmissão dos esforços nos extremos do compósito, os quais devem ser bem ancorados.

O efeito do carregamento inicial, antes da aplicação de um reforço à flexão, deve ser considerado no cálculo do elemento reforçado. Na prática, a presença de algum tipo de carregamento sobre a estrutura, ou apenas a ação de seu peso próprio é o caso usual. Além disso, sem contar as situações em que todas as cargas são removidas (peso-próprio, forças de protensão, etc.), o substrato, no qual será aplicado o reforço, apresentará alguma deformação. Esta deformação inicial deve ser deduzida da deformação do compósito de reforço.

Deve-se ressaltar que, em função da consideração do carregamento existente, o modo de ruptura de uma viga reforçada pode modificar-se, de ruptura do reforço para esmagamento do concreto. Uma ruptura por esmagamento do concreto sem o escoamento da armadura longitudinal deve ser evitada.

As seguintes hipóteses básicas são consideradas:

- as seções transversais permanecem planas (hipótese de Bernoulli);
- a deformação específica máxima do concreto é 3,5‰;
- a deformação específica máxima para a armadura de tração é 10‰;
- é desprezada a resistência à tração do concreto;
- existe aderência perfeita entre o aço e o concreto;
- existe aderência perfeita entre o reforço e a superfície de concreto.

Com essas hipóteses, pode-se escrever as expressões que definem a posição da linha neutra, as deformações específicas e as equações de equilíbrio para a seção transversal do elemento reforçado. Por intermédio destas expressões determina-se a capacidade resistente à flexão da seção transversal reforçada, conforme apresentado no fluxograma ilustrado na Figura 2.10. No fluxograma estão mostrados os coeficientes de segurança, os quais serão considerados unitários neste trabalho.

Nesta metodologia é realizada a análise de uma seção normalmente armada, situação essa que permite um melhor aproveitamento dos materiais. Dessa forma estabelecem-se duas hipóteses para o comportamento mecânico da armadura de flexão existente na seção, sendo a primeira quando a armadura de compressão atinge o escoamento, e a segunda quando a armadura de compressão não atinge o escoamento (Figura 2.9).

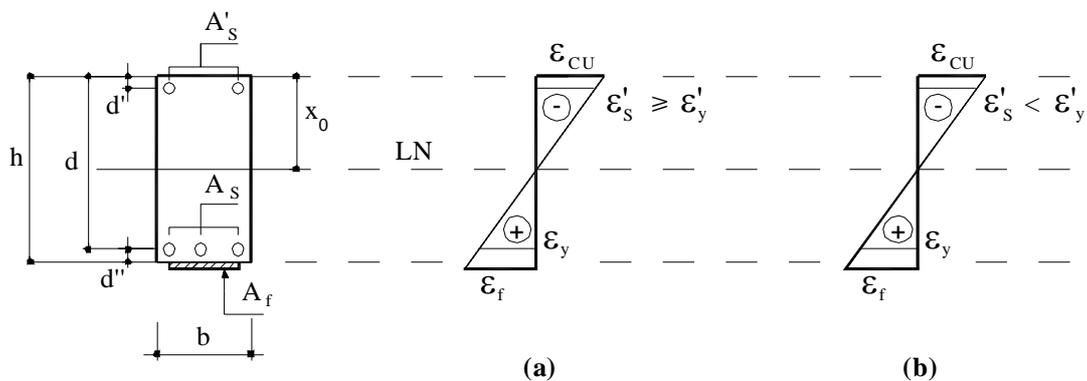


Figura 2.9. – Hipóteses para o comportamento mecânico da armadura de flexão consideradas no dimensionamento do reforço à flexão. a) quando a armadura negativa atinge o escoamento; b) quando a armadura negativa não atinge o escoamento.

$$d = h - d' \quad \rightarrow \quad \xi = \frac{d}{d'}$$

$$\rho'_s = \frac{A'_s}{bd} \quad \rightarrow \quad \rho_s = \frac{A_s}{bd}$$

$$\omega'_s = \rho'_s \frac{f'_{yd}}{\beta_1 \cdot 0,85 f_{cd}} \quad \rightarrow \quad \omega_s = \rho_s \frac{f_{yd}}{\beta_1 \cdot 0,85 f_{cd}} \quad \rightarrow \quad \mu_{Sd} = \frac{M_{Sd}}{\beta_1 \cdot 0,85 f_c \cdot bd^2}$$

$$k_x = 0,259$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{Cu} \left(\frac{1 + \xi - k_x}{k_x} \right)$$

$$f_f = E_f \cdot \varepsilon_f$$

$$\frac{f_{fu}}{f_f} \geq 1,3$$

$$\gamma_f = 1,3$$

$$f_f = \frac{f_{fu}}{\gamma_f}$$

$$\varepsilon_f = \frac{f_f}{E_f}$$

Não

$$k_x = \frac{1 + \xi}{\left(\frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_{Cu}} + 1 \right)}$$

$$\omega_f = \frac{\mu_{Sd} - \omega'_s \left(\frac{\beta_1 k_x}{2} - \xi \right) - \omega_s \left(1 - \frac{\beta_1 k_x}{2} \right)}{\left(1 + \xi - \frac{\beta_1 k_x}{2} \right)}$$

$$\rho_f = \omega_f \frac{\beta_1 \cdot 0,85 f_{cd}}{f_f} \quad \rightarrow \quad A_f = \rho_f \cdot b \cdot d \quad \rightarrow \quad \bar{A}_f \geq A_f$$

$$W = \frac{\rho_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_c}{\beta_1 \cdot 0,85 f_c} \quad \rightarrow \quad k_x^2 + (W - \omega_s) k_x - W(1 + \xi) = 0$$

$$\bar{\omega}_f = \frac{\bar{A}_f f_f}{\beta_1 \cdot b \cdot d \cdot 0,85 f_c} \quad \rightarrow \quad \bar{k}_x = \frac{A_s f_y - A'_s f'_y + \bar{A}_f f_f}{\beta_1 \cdot b \cdot d \cdot 0,85 f_c}$$

$$\mu_{Rd} = \omega'_s \left(\frac{\beta_1 \bar{k}_x}{2} - \xi \right) + \omega_s \left(1 - \frac{\beta_1 \bar{k}_x}{2} \right) + \bar{\omega}_f \left(1 + \xi - \frac{\beta_1 \bar{k}_x}{2} \right) \quad \rightarrow \quad \mu_{Rd} \geq \mu_{Sd}$$

Figura 2.10 – Fluxograma da metodologia de determinação da resistência à flexão; adaptada de ARAÚJO (2002a).

onde:

h – altura da seção transversal;

d – altura útil;

ρ_s – taxa geométrica de armadura do aço tracionado;

ρ'_s – taxa geométrica da armadura do aço comprimido;

ρ_f – taxa geométrica de armadura do compósito de fibra de carbono;

ω_s – taxa mecânica da armadura longitudinal de tração;

ω'_s – taxa mecânica da armadura longitudinal de compressão;

ω_f – taxa mecânica do reforço em compósito de fibra de carbono;

β_1 – coeficiente adimensional que depende da relação constitutiva do concreto (por exemplo $\beta_1 = 0,80$ para um diagrama retangular de tensões de compressão no concreto);

ξ – coeficiente adimensional.

Esta metodologia será aplicada na verificação do dimensionamento do reforço das vigas do programa experimental, buscando validar os dados obtidos nos ensaios com os valores teóricos esperados. Deve-se ressaltar que esta metodologia não leva em consideração a deformação inicial existente na viga.