

## 2 Materiais Compósitos Utilizados em Reforço Estrutural

### 2.1. Introdução

A técnica de reforço de elementos estruturais através da colagem de chapas de aço apresenta o inconveniente de apresentar corrosão na interface entre o adesivo e a chapa após longos períodos de exposição, comprometendo perigosamente a aderência do reforço, sendo esta patologia difícil de ser verificada.

A utilização de polímeros reforçados com fibras (PRF), ou *fibre reinforced polymers (FRP)* apresentam a vantagem de eliminar o problema da corrosão, além de outras vantagens como alta resistência aliada a um baixo peso próprio, grande durabilidade, capacidade de assumir formas complexas, dispensarem o uso de escoramento e facilidade de aplicação, o que reduz os custos e o tempo de paralisação do uso da estrutura.

Os PRF são materiais compósitos não homogêneos, anisotrópicos e de comportamento perfeitamente elástico até a ruptura, caracterizando um comportamento de ruptura frágil. Estes materiais são constituídos basicamente por um componente estrutural (as fibras) e por um componente matricial (a resina), conforme ilustrado na Figura 2.1.

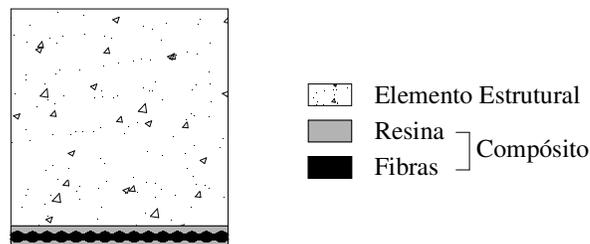


Figura 2.1 – Representação esquemática dos PRF.

A matriz é responsável pela união entre as fibras que formam o compósito e pela transmissão de esforços, além de garantir proteção contra o ataque de agentes

agressivos do meio ambiente e de danos causados pelo uso. Apenas uma parcela muito pequena desta solicitação é absorvida pela matriz. O componente estrutural que pode ser formado por fibras de vidro, aramida (conhecido também como kevlar, nome comercial) e carbono, é responsável pelas propriedades mecânicas do compósito. O comportamento tensão-deformação específica de cada tipo de fibra está ilustrado na Figura 2.2.

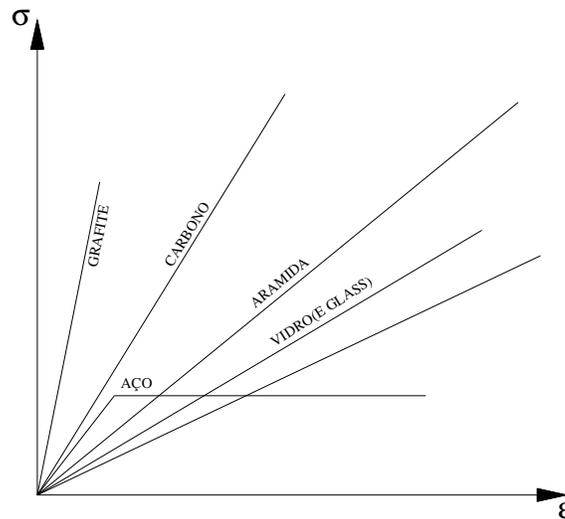


Figura 2.2 – Diagrama tensão-deformação de diversos tipos de fibras; adaptada de MACHADO (2006).

De acordo com RIBEIRO (2006), as propriedades mecânicas dos materiais compósitos devem ser determinadas em ensaios, por metodologias aplicáveis, afetadas por fatores estatísticos cabíveis, conforme sistema (placas ou mantas), entendendo-se de forma clara que o elemento a ser considerado no reforço não é a fibra e sim o compósito.

Segundo MENEGHETTI (2007), os elementos constituintes de um material compósito, apesar de atuarem conjuntamente, mantêm suas propriedades individuais, ou seja, não se dissolvem nem se transformam completamente em outros, e podem ser facilmente identificados.

O guia de dimensionamento ACI 440.2R (2002) recomenda o uso das propriedades mecânicas da fibra no dimensionamento do reforço. Neste caso utiliza-se a espessura da fibra, desprezando-se a matriz, pois em sistemas curados *in situ* as espessuras podem variar ao longo da camada de reforço. Outra

justificativa é o fato das características de desempenho conferidas pela matriz serem desprezíveis comparadas as características de desempenho das fibras.

Diferentes sistemas compósitos PRF podem ser encontrados, de acordo com o tipo e disposição das fibras, e da forma e técnica de fabricação empregada, podendo ser obtidos tanto através de sistemas de preparação *in situ* como com técnicas de pré-fabricação.

Dentre os compósitos mais utilizados e que apresentam melhores resultados, estão os compósitos de fibra de carbono (CFC), devido a suas ótimas propriedades mecânicas. A utilização de CFC é uma das melhores técnicas surgidas nos últimos anos como alternativa à substituição das tradicionais chapas de aço, empregadas com grande sucesso desde a década de 1960. Materiais compósitos de fibras de carbono têm sido usados extensivamente na indústria aeroespacial, automotiva, química, marítima, etc.

## **2.2. Reforço à Flexão em Vigas de Concreto Armado**

A utilização de materiais CFC é uma das técnicas mais atraentes de reforço em vigas de concreto armado com deficiência de aço na seção resistente à tração. A técnica consiste na colagem externa à viga, em sua face tracionada, de materiais CFC que irão atuar como uma armadura secundária, dimensionada de forma a aumentar a resistência da seção.

Dentre as razões para se reforçar uma estrutura pode-se citar: aumento da resistência para suportar maiores carregamentos ou carregamentos não considerados; aumento da rigidez da estrutura; restabelecer a capacidade de carga perdida devido a corrosão ou outros tipos de degradação.

### **2.2.1. Critérios de Dimensionamento**

O dimensionamento de vigas de concreto armado reforçadas com CFC baseia-se nos princípios e hipóteses do Estado Limite Último. Sendo assim, para o dimensionamento do reforço, as mesmas hipóteses consideradas no dimensionamento de seções de concreto armado sujeitas a flexão são adotadas:

- 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;

Em relação ao reforço, as seguintes considerações são adotadas:

- existe aderência perfeita entre o reforço e o substrato de concreto;
- o reforço tem relação tensão-deformação linear até a ruptura;

Os cálculos são realizados de acordo com dimensões, armadura e propriedades dos materiais existentes no elemento a ser reforçado. A resistência nominal à flexão de um elemento de concreto reforçado deve ser determinada baseada na compatibilidade de deformações e no equilíbrio de forças internas de acordo com a Figura 2.3.

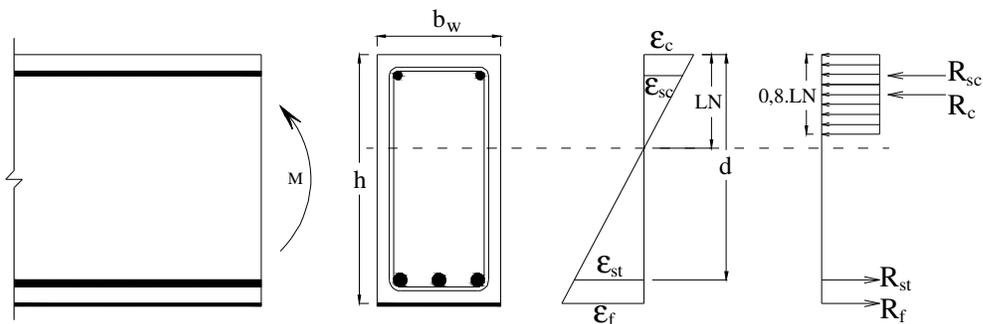


Figura 2.3 – Diagrama esquemático dos parâmetros da seção transversal reforçada.

A deformação específica do reforço deve obedecer a deformação específica máxima suportada pelo material empregado, que sofre alterações de acordo com o processo de fabricação adotado. Algumas recomendações baseadas em estudos experimentais são feitas com relação a máxima deformação específica adotada em projetos visando garantir um comportamento adequado dos elementos reforçados.

RIBEIRO (2006) recomenda que a deformação máxima específica do reforço seja menor que cerca de  $0,6‰$  visando evitar o descolamento do mesmo do substrato de concreto. Com o mesmo propósito, o ACI 440.2R (2002) estabelece o cálculo de um fator que deve ser multiplicado pela deformação específica de ruptura do CFC com o propósito de definir uma limitação da deformação específica, dado por:

$$k_m = \frac{1}{60 \cdot \varepsilon_{fu}} \cdot \left( 1 - \frac{n \cdot E_f \cdot t_f}{360.000} \right) \leq 0,90 \text{ para } n_f \cdot E_f \cdot t_f \leq 180.000 \quad (2.1)$$

$$k_m = \frac{1}{60 \cdot \varepsilon_{fu}} \cdot \left( \frac{90.000}{n \cdot E_f \cdot t_f} \right) \leq 0,90 \text{ para } n_f \cdot E_f \cdot t_f > 180.000 \quad (2.2)$$

onde,

$n_f$  - número de camadas de reforço com CFC;

$E_f$  - módulo de elasticidade do CFC (MPa);

$t_f$  - espessura de uma camada do sistema CFC (mm);

$\varepsilon_{fu}$  - deformação de ruptura do reforço com CFC (mm/mm).

O ACI 440.2R (2002) alerta para o fato de que a aplicação do reforço reduz a ductilidade do elemento, recomendando assim para garantir certa ductilidade, que a deformação específica do aço da armadura longitudinal seja no mínimo de 0,5%. Caso não seja possível, a baixa ductilidade deve ser compensada por maior reserva de resistência, aplicando um fator redutor de resistência. Este fator de redução varia linearmente de 0,90 para seções dúcteis ( $\varepsilon_{st} \geq 0,005$ ) até 0,70 para seções frágeis ( $\varepsilon_{st} \leq \varepsilon_{sy}$ ).

Na determinação da quantidade de reforço que um elemento fletido pode vir a receber (flexão ou cisalhamento), RIBEIRO (2006) alerta quanto às limitações impostas por critérios de ductilidade do elemento reforçado, assim como pelas deformações admissíveis dos materiais constituintes.

Em pesquisa sobre o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas à flexão, ARAÚJO (2002) verificou que não há uma correlação direta entre taxa de reforço aplicada e o aumento da resistência da viga, indicando que outros parâmetros, tais como a deformação específica do aço e do concreto, as flechas, a ductilidade energética e a rigidez, devem ser levados em consideração no dimensionamento de vigas reforçadas com CFC.

BEBER et al. (2000) em pesquisa do comportamento de vigas de concreto armado reforçadas externamente com lâminas de CFC verificaram o excelente desempenho desta técnica de reforço estrutural, com aumento de até 182% na carga de ruptura.

Pesquisa sobre o comportamento de vigas de concreto armado quando o reforço com tecidos de fibra de carbono é feito sob carregamento foi realizada por GARCEZ et al (2002). Os resultados dos ensaios indicam que não há grandes vantagens, para a resistência final da peça, em tentar aliviar a carga antes da aplicação do reforço, visto que ruptura das vigas ocorreu por descolamento da manta, com as vigas submetidas a carregamentos inferiores aos calculados teoricamente.

### **2.2.2. Modos de Ruptura**

Os possíveis modos de ruptura em vigas reforçadas com CFC são:

1. Esmagamento do concreto antes do escoamento do aço;
2. Escoamento do aço na tração seguido de ruptura do reforço;
3. Escoamento do aço na tração seguido de esmagamento do concreto;
4. Delaminação do cobrimento de concreto devido a tensões de tração e cisalhamento;
5. Descolamento do reforço do substrato de concreto.

Os modos de ruptura a serem considerados no dimensionamento do reforço devem ser os modos 2 e 3 pois, nestes casos, ocorre o escoamento da armadura longitudinal de tração precede o colapso da estrutura, o que garante certa ductilidade à viga.

Os modos de ruptura 4 e 5 podem ocorrer sob cargas significativamente menores que aquelas previstas, e sendo assim, atenção especial deve ser dada para que estes modos de ruptura não ocorram. A delaminação do cobrimento (Figura 2.4) ou o descolamento do reforço (Figura 2.5) pode ocorrer quando os esforços atuantes nas fibras não puderem ser absorvidos pelo substrato de concreto.

Segundo MACHADO (2004), o destacamento localizado do reforço ocorre a partir de sua zona de ancoragem ou de zonas com fissuração excessiva, sendo este tipo de ruptura classificada em três categorias conforme a região e a sollicitação que a produz: descolamento no extremo do reforço proveniente da força cisalhante, descolamento na região de momento fletor máximo e descolamento iniciado por uma fissura de cortante numa região de momento fletor de magnitude média.



Figura 2.4 – Delaminação do cobrimento de concreto (BEBER et al, 2000).

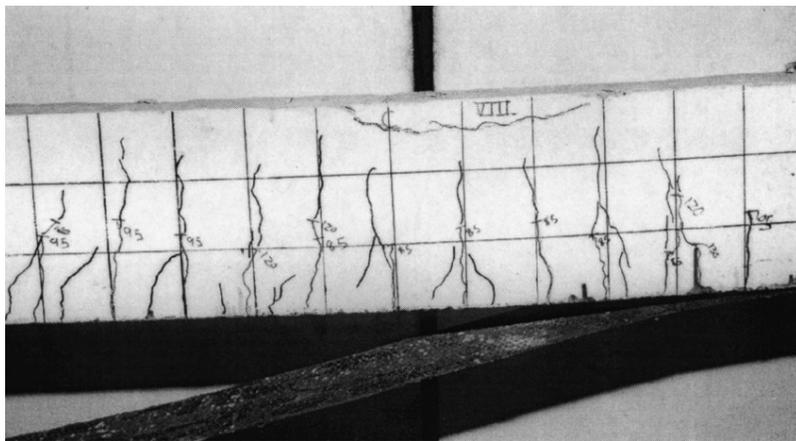


Figura 2.5 – Descolamento do reforço (WHITE et al., 2001).

Nos pontos de fissuração do concreto, o reforço fica submetido a altas tensões que devem ser transferidas a outras regiões, surgindo tensões de cisalhamento nas interfaces concreto-epóxi-compósito, que são transferidas da região fissurada para outras regiões capazes de absorvê-las (ver Figura 2.6). Ocorre então um acréscimo de tensões na extremidade do reforço, podendo levar o reforço a se destacar inicialmente pelo seu extremo, reduzindo seu comprimento efetivo, provocando uma ruptura horizontal devido ao aumento imediato da tensão de cisalhamento.

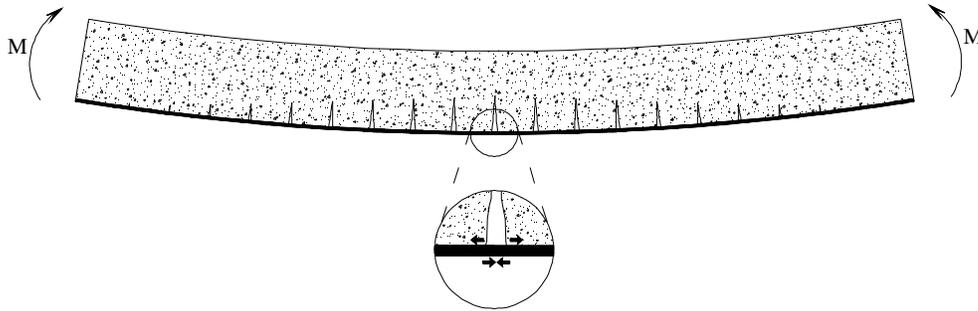


Figura 2.6 - Mecanismo de transferência de esforços entre concreto e reforço; adaptada de MENEGHETTI (2007).

De acordo com MENEGHETTI (2007), a falha por descolamento iniciada ao final do material de reforço pode ocorrer na camada de cobrimento do concreto ou do adesivo, sendo a ruptura na camada de cobrimento a mais comum destes, iniciando-se com a formação de uma fissura no final ou próximo ao final da camada de reforço. Uma vez formada a fissura no concreto, a mesma se propaga de forma vertical ou levemente inclinada até atingir o nível da armadura de tração, progredindo então horizontalmente ao longo da mesma resultando na separação do concreto de cobrimento do restante da peça, o que normalmente ocorre de forma súbita (Figura 2.7).

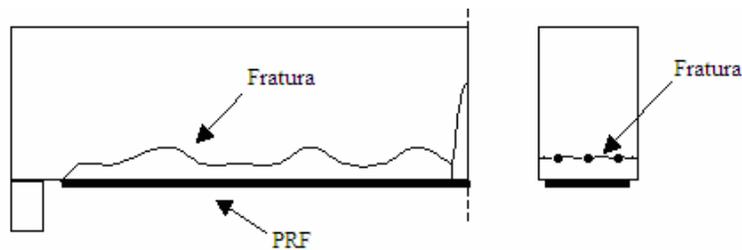


Figura 2.7 – Mecanismo de ruptura da camada de cobrimento; adaptada de ACI 440.2R (2002)

Por outro lado, as fissuras de flexão/cisalhamento podem induzir a propagação de fissuras no concreto, paralelas ao reforço e adjacentes à interface concreto-reforço, que se iniciam no ponto de tensão mais alto e se desenvolvem até o final do elemento de reforço. Este mecanismo ocorre quando a resistência à tração do concreto é superada pela resistência à tração do adesivo, caso contrário ocorre o descolamento do reforço. Este mecanismo pode levar à ruptura prematura do CFC devido ao desvio imposto ao CFC, conforme ilustrado na Figura 2.8.

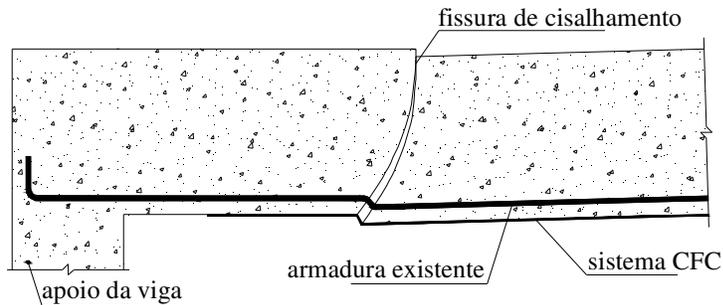


Figura 2.8 – Mecanismo de ruptura prematura devido à fissuras de cisalhamento; adaptada de MACHADO (2006).

MENEGHETTI (2007) explica que quando o momento de fissuração da viga é ultrapassado surgem fissuras de flexão, e caso haja esforços de cisalhamento agindo simultaneamente, as bordas das fissuras podem deslocar-se diferencialmente no plano vertical. Devido a este desvio vertical, surgem esforços de flexão no reforço e conseqüentemente esforços de tração no substrato. Sendo a resistência à tração do substrato excedida, uma fissura se desenvolverá paralela à face inferior da viga, e a camada de reforço separar-se-á do conjunto, levando consigo uma fina camada de concreto.

Segundo PESIC e PILAKOUTAS (2003), em projetos preliminares de reforço de vigas com PRF, a análise detalhada da concentração de tensões pode ser omitida desde que o esforço cortante atuante não exceda 80% da resistência característica ao esforço cortante da viga.

MENEGHETTI (2007) verificou que a resistência do substrato de concreto determina a interface de ocorrência da ruptura. Para resistência à compressão do concreto superior a 50 MPa, a falha ocorreu na resina. Em substratos menos resistentes, em torno de 20 MPa, o compósito descolou em fina camada de concreto, adjacente ao material de reforço.

Segundo o ACI 440.2R (2002), sistemas de reforço com PRF não devem ser usados quando o substrato tiver resistência à compressão inferior a 17 MPa e resistência à tração inferior a 1,4 MPa.

A resistência a fadiga de estruturas de concreto armado reforçadas com diferentes tipos de PRF foi pesquisada por MENEGHETTI (2007). Pôde-se comprovar a eficiência do reforço no aumento da vida útil à fadiga. A resistência a fadiga é tipicamente relacionada com a variação das tensões na armadura, sendo limitada pela ruptura das barras de aço.

TOUTANJI et al. (2006) verificaram em pesquisa experimental que a capacidade de carga e o número de ciclos das vigas de concreto armado foram significativamente aumentados com a aplicação de reforço de lâminas de fibras de carbono. A resistência à fadiga aumentou em torno de 55% quando comparado com as vigas de referência. O modo de ruptura de vigas reforçadas é iniciado pela ruptura da armadura longitudinal de tração.

### **2.2.3.**

#### **Aderência do Sistema de Reforço**

A técnica de reforço com CFC em estruturas de concreto armado adota a hipótese básica de aderência perfeita entre o substrato de concreto e o reforço, ou seja, é necessário garantir que ocorra uma efetiva transferência de esforços entre CFC e concreto. Desta forma, deve-se verificar a força resistente na ligação reforço-estrutura assim como adotar os procedimentos necessários para a correta preparação do substrato.

RIBEIRO (2006) salienta que o substrato ao qual o reforço será aderido deve estar são e íntegro, dispondo de suficiente resistência mecânica para resistir a transferência de esforços na interface concreto armado/reforço. Deve-se proceder a limpeza do substrato por meio de abrasivos ou jatos de areia ou limalhas metálicas, contemplando a remoção de poeira, pó, substâncias oleosas e graxas, partículas sólidas não aderidas totalmente, recobrimentos diversos como pinturas e argamassas.

A área necessária para a colagem do CFC deve ser calculada baseada no cisalhamento horizontal e na resistência à tração do substrato. Devido ao fato da delaminação ou ruptura da colagem serem ocorrências frágeis, a utilização de um fator de redução da resistência da cola é recomendado ACI 440.2R (2002).

O comprimento de ancoragem é um dos principais fatores na caracterização da resistência de aderência. Existe um comprimento de ancoragem efetivo a partir do qual a carga última de ruptura não aumenta, devido ao fato de que para grandes comprimentos de aderência a tensão máxima de aderência não é atingida.

Podem ser utilizados mecanismos especiais de ancoragem de modo a aumentar a eficiência na transferência de esforços entre concreto e reforço. A aplicação de CFC adicionais, em forma de U, com as fibras orientadas no sentido

transversal ao de atuação do reforço, é apontado como uma técnica muito eficiente de atrasar ou prevenir rupturas prematuras.

Para evitar a delaminação do cobrimento de concreto, o ACI 440.2R (2002) faz as seguintes recomendações (ver Figura 2.9):

- Para vigas contínuas o reforço deve ser estendido no mínimo até uma distância  $d/2$  ou 15 cm a partir do ponto de inflexão (ponto de momento nulo). No caso de várias camadas, o ponto de terminação de cada camada deve ser defasado de 15 cm. Esta recomendação se aplica tanto para momentos positivos quanto para momentos negativos.
- Para vigas simplesmente apoiadas o reforço deve ser estendido no mínimo a distância  $d$  a partir do ponto, no vão, correspondente ao momento de fissuração. Caso no ponto de terminação do reforço o esforço cortante atuante na viga for maior que  $2/3$  da parcela resistente ao cisalhamento do concreto, deve-se utilizar ancoragens transversais.

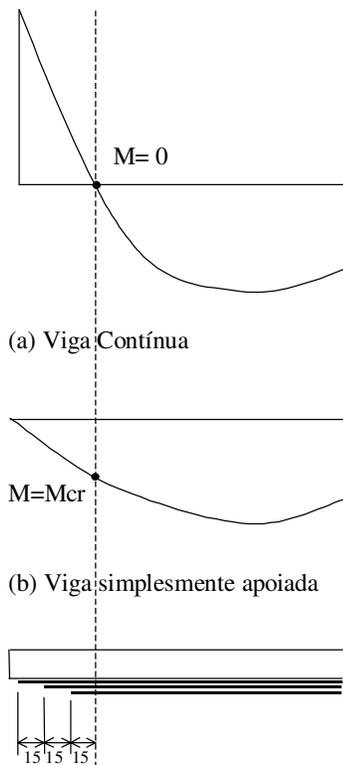


Figura 2.9 – Recomendações executivas para as lâminas de CFC; adaptada de ACI 440.2R (2002).

Para o dimensionamento das ancoragens transversais em CFC, segundo as recomendações do S&P (2006), duas situações devem ser consideradas:

**1º Caso** ( $V_{Sdf} > V_{Rd3}$ ): O esforço cortante no elemento após a aplicação do reforço à flexão é maior do que sua resistência da biela tracionada. Neste caso as ancoragens devem ser dimensionadas para o maior esforço obtido pelas equações:

$$\Delta V = V_{Sdf} - V_{Rd3} \quad (2.3)$$

$$\Delta V = \frac{(\eta - 1)}{\eta} \cdot V_{Sdf} \quad (2.4)$$

onde,

$\Delta V$  - esforço solicitante no reforço transversal;

$V_{Sdf}$  - esforço cortante solicitante após a aplicação do reforço à flexão;

$V_{Rd3}$  - resistência da biela tracionada do elemento;

$\eta$  - nível de reforço à flexão, calculado por:

$$\eta = \frac{M_{Rdf}}{M_{Rd}} \quad (2.5)$$

onde,

$M_{Rdf}$  - momento resistente da viga reforçada;

$M_{Rd}$  - momento resistente da viga não reforçada.

**2º Caso** ( $V_{Sdf} < V_{Rd3}$ ): O esforço cortante no elemento reforçado à flexão é menor do que sua resistência da biela tracionada. Neste caso as ancoragens devem ser dimensionadas para o esforço obtido pela Equação (2.4).

A área da seção de reforço transversal de CFC é calculada por:

$$A_{wf} = \frac{\Delta V}{d_f \cdot f_{fe}} \quad (2.6)$$

onde,

$d_f$  - distância entre a força resultante da seção comprimida de concreto e o reforço à flexão;

$f_{fe}$  - tensão efetiva no reforço transversal.

Para os casos de reforço adicional de CFC, em forma de U, o ACI 440.2R (2002) recomenda o cálculo da deformação efetiva conforme segue:

$$\varepsilon_{fe} = K_v \cdot \varepsilon_{fu} \leq 0,004 \quad (2.7)$$

onde,

$\varepsilon_{fe}$  - deformação específica efetiva;

$\varepsilon_{fu}$  - deformação específica de ruptura do CFC;

$K_v$  - coeficiente de redução.

O coeficiente de redução  $K_v$  é uma função da resistência do concreto, do esquema de reforço utilizado e da rigidez do CFC, e pode ser calculado por:

$$K_v = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot L_e}{11900 \cdot \varepsilon_{fu}} \leq 0,75 \quad (2.8)$$

onde,

$L_e$  - comprimento de aderência no qual a maior parte da tensão de aderência é mantida, dado pela Equação (2.9) em *mm*;

$k_1$  - coeficiente que relaciona a resistência do concreto, dado pela Equação (2.10);

$k_2$  - coeficiente que relaciona o esquema de reforço transversal adotado, dado pela Equação (2.11).

$$L_e = \frac{23300}{(n_f \cdot t_f \cdot E_f)^{0,58}} \quad (2.9)$$

onde,

$n_f$  - número de camadas de CFC;

$t_f$  - espessura das camadas de CFC em *mm*;

$E_f$  - módulo de elasticidade do CFC em *MPa*.

$$k_1 = \left( \frac{f_c}{27} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.10)$$

onde,

$f_c$  - resistência à compressão do concreto em *MPa*.

$$k_2 = \frac{d_f - L_e}{d_f} \quad (2.11)$$

MENEGHEL (2005) estudou a aderência entre os compósitos com tecido de fibras de carbono e o concreto, em ensaios de tração-compressão de corpos-de-prova compostos de dois blocos de concreto (móvel e fixo) colados por tiras de tecido de fibra de carbono nos lados opostos desses blocos. Os resultados evidenciaram que a resistência de aderência pode ser considerada independente da resistência do concreto e da largura do tecido, e que o comprimento de ancoragem efetivo no qual as tensões de aderência estão realmente distribuídas é de 120 mm. Foi obtido um valor característico de 1,45 MPa para a resistência de aderência.

Em continuidade à pesquisa de MENEGHEL (2005) no estudo da aderência entre CFC e o substrato de concreto, PACHECO (2006) verificou que os diferentes tipos de superfícies do concreto (superfície lisa e superfície rugosa), sobre os quais foram colados os CFC, pouco influenciaram as resistências últimas de aderência, sendo o acréscimo da ordem de 5%. Os diferentes modos de carregamentos estudados (monotônico crescente e carregamento em ciclos de carga e descarga) não influenciaram os valores das resistências últimas de aderência.

### **2.3. Análise da Ductilidade**

A aplicação de reforço externo de CFC em vigas de concreto armado altera suas características de comportamento. Dentre os vários parâmetros que interferem no comportamento de um elemento reforçado pode-se enfatizar a ductilidade. A ductilidade é definida como a capacidade do elemento estrutural de experimentar deformações inelásticas sem a perda de sua capacidade resistente.

As vigas de concreto armado são dimensionadas para terem comportamento dúctil. Tal comportamento é proveniente do escoamento, ou seja, deformação inelástica da armadura tracionada, permitindo a capacidade total de deformação do concreto na seção comprimida e, portanto, consumindo uma quantidade substancial de energia antes da ruptura.

Contudo a característica linear tensão-deformação até a ruptura e a ausência de patamar de escoamento dos materiais compósitos de fibras de carbono tem um impacto negativo na ductilidade dos elementos reforçados.

### 2.3.1. Ductilidade de Estruturas Reforçadas com CFC

Quando uma estrutura de concreto armado recebe reforço externo à flexão, obtém-se um conjunto com maior capacidade de carga, no entanto, as flechas continuam com a mesma ordem de grandeza. Sendo assim, as estruturas reforçadas possuirão energia total muito maior que estruturas sem reforço, e devido ao comportamento elástico do CFC até a ruptura, ocorre grande acréscimo da energia elástica acumulada conforme ilustrado na Figura 2.10.

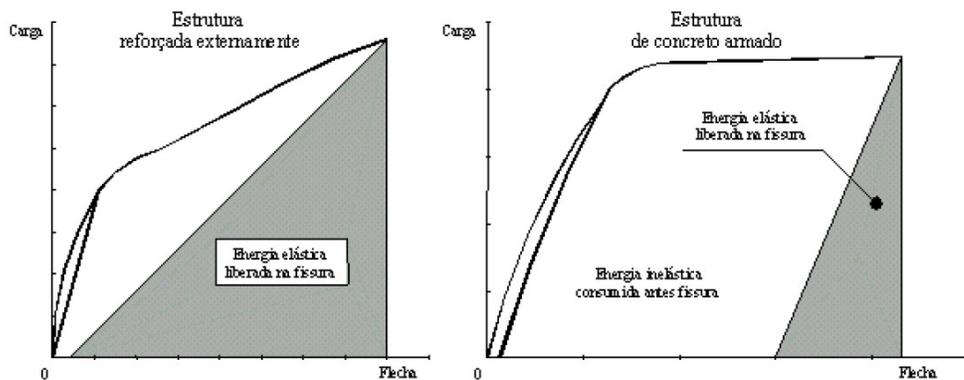


Figura 2.10 – Comparação das parcelas da energia elástica e energia inelástica para uma estrutura com reforço externo e outra sem reforço; adaptada de MACHADO (2004).

Uma nova definição do índice de ductilidade considerando a energia elástica e inelástica aplicada em vigas de concreto armado com reforço à flexão de CFC foi estudada por ARAÚJO (2002) e MACHADO (2004). Os termos de energia são obtidos conforme a Figura 2.11 e o índice de ductilidade energética é proposto como sendo:

$$\mu = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{E_{tot}}{E_{el}} + 1 \right) \quad (2.12)$$

onde,

$\mu$  - índice de ductilidade energética;

$E_{tot}$  - energia total;

$E_{el}$  - energia elástica.

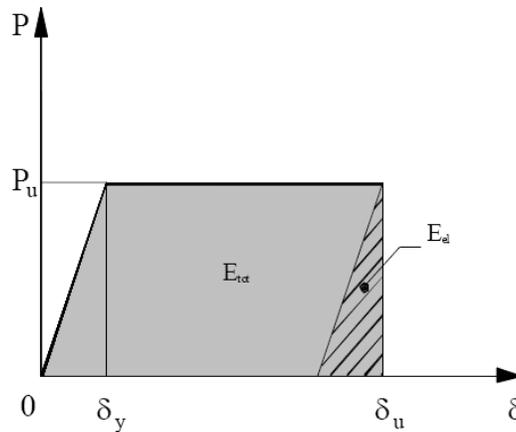


Figura 2.11 – Definição do índice de ductilidade em termos de energia; adaptada de MACHADO (2004).

A energia total é calculada como sendo a área sob o diagrama carga x deflexão para a carga última, esta podendo ser definida como sendo a carga máxima, ou a carga de ruptura, ou ainda como sendo a carga correspondente a 80% da carga máxima no ramo descendente da curva.

A energia elástica, que é uma parcela da energia total, pode ser estimada pelo teste carga-descarga, ou então calculada como sendo a área de um triângulo formado pela linha vertical que passa pela carga última e a linha tendo como inclinação o valor médio da inclinação das duas primeiras linhas do diagrama carga-deflexão, conforme ilustrado na Figura 2.12.

O mesmo raciocínio utilizado para calcular o índice de ductilidade de deflexão a partir do diagrama momento-deflexão pode ser empregado para a determinação dos índices de ductilidade para curvatura e rotação, empregando os diagramas momento-curvatura e momento-rotação, respectivamente.

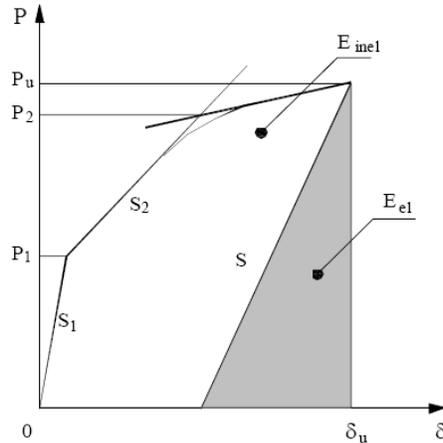


Figura 2.12 – Determinação da inclinação da linha de fechamento do triângulo que define a área da energia elástica; adaptada de MACHADO (2004).

Neste contexto, ARAÚJO (2002) estudou o comportamento e o desempenho de vigas de concreto armado reforçadas à flexão utilizando CFC. Os resultados mostraram um aumento significativo de resistência e rigidez das vigas reforçadas. Sugere-se neste trabalho o cálculo da ductilidade energética através da deformação na armadura, uma vez que seus resultados mostraram correlação com os obtidos para a ductilidade energética de deflexão.

Em continuidade ao estudo de ARAÚJO (2002) da ductilidade de vigas de concreto armado reforçadas à flexão utilizando CFC baseado em critérios energéticos, MACHADO (2004) concluiu que as vigas reforçadas apresentam ductilidade adequada e os índices energéticos propostos são adequados para este tipo de estudo. Observou-se também que as vigas reforçadas após um pré-carregamento inicial tiveram a carga última e a rigidez reduzida.