

## 2 Revisão Bibliográfica

### 2.1. Introdução

Nesse capítulo são apresentados alguns estudos sobre o comportamento do reforço com CFC em elementos estruturais, de modo a salientar a importância da aderência CFC-concreto no comportamento desses elementos.

São descritos alguns ensaios específicos sobre aderência CFC-concreto encontradas na literatura, de modo a realçar alguns tópicos ainda por serem melhor estudados.

### 2.2. Estudo de Mazen *et alii* (1998)

Esse estudo aborda experimentos e análises efetuadas por diversos autores com o objetivo de se avaliar o comportamento de vigas reforçadas com CFC. Esses autores observaram que dois tipos diferentes de rupturas ocorrem em vigas de concreto reforçado com CFC: a) ruptura por flexão da vigas de concreto; b) ruptura local, por concentração de tensões na extremidade do reforço. O modo de ruptura local é o mais comum. Foram desenvolvidos métodos analíticos para obtenção da tensão normal e tensão tangencial na interface CFC-concreto.

Verificou-se que a ruptura local ocorre principalmente devido à concentração de tensão tangencial e normal na extremidade do reforço, e devido às fissuras de flexão ao longo da viga. Esse modo de ruptura ocorre com o descolamento das placas de concreto-CFC no local de maior tensão tangencial na interface sendo a ruptura do concreto causada pela tensão tangencial.

Para o dimensionamento do reforço são admitidas as seguintes hipóteses:

- As seções permanecem planas após as deformações.
- Existe aderência completa entre o reforço e o concreto.
- Admite-se um comportamento isotrópico para o CFC, para a resina epóxi utilizada na colagem, para o concreto e para o aço.

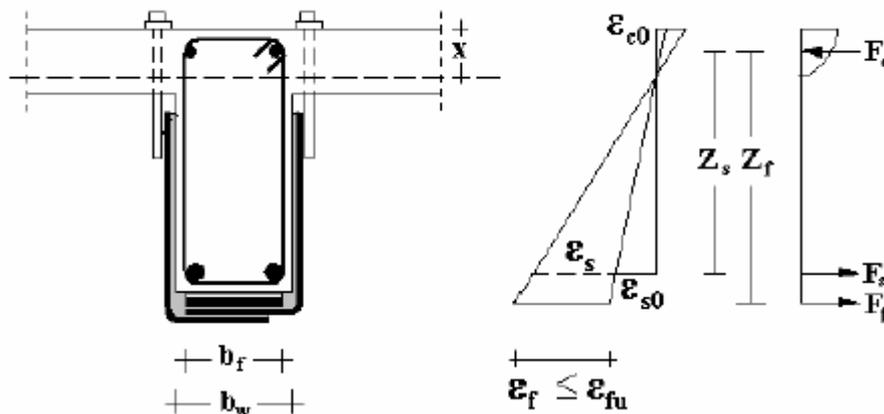


Figura 2.1 – Distribuição de tensões numa seção transversal de concreto armado reforçado com CFC (Neubauer e Rostásy, 1996).

Os resultados experimentais mostram que durante a flexão de vigas de concreto armado a distribuição das tensões tangenciais e normais ao longo da interface adesivo-concreto varia muito após a fase elástica. Na região em torno de cada fissura tem-se uma concentração de tensões devido à presença do reforço, que se opõe ao crescimento da fissura. As análises dessas tensões são importantes no estudo de vigas reforçadas com CFC.

Malek *et alli* (1998) desenvolveram um modelo para a análise dessas tensões e deduziram equações que fornecem valores máximos para a tensão normal e tangencial. Esses autores mostraram que os resultados obtidos com o modelo proposto apresentam concordância satisfatória com os resultados obtidos por meio da aplicação de uma discretização em elementos finitos.

Arduini e Nanni (1997) consideraram a interface adesivo-concreto para a análise das tensões tangencial e normal. A distribuição de tensões tangencial e normal foi considerada variando linearmente (forma triangular), de maneira a permitir que fossem obtidos os valores dessas tensões ao longo do reforço.

Täljsten (1997) aplicou conceitos da teoria da mecânica da fratura e desenvolveu equações para as solicitações na extremidade do reforço. Entretanto essas equações são muito complexas e não se aplicam ao projeto de reforço com CFC.

### 2.3. Estudo de Miller e Nanni (1999)

Esses autores estudaram alguns parâmetros que afetam a aderência entre os tecidos de CFC e o concreto, tais como: o comprimento de ancoragem, a resistência à compressão do concreto e a resistência dos tecidos de CFC. Os resultados experimentais obtidos foram comparados com trabalhos de outros autores, de modo a permitir a formulação de um método para se calcular a força última de aderência.

Nesse trabalho foram ensaiadas três séries de corpos-de-prova, cada uma com seis corpos-de-prova, com três diferentes comprimentos de aderência do reforço. Cada série variou a resistência à compressão do concreto ou o número de camadas de CFC. A Figura 2.2 ilustra o esquema de ensaio.

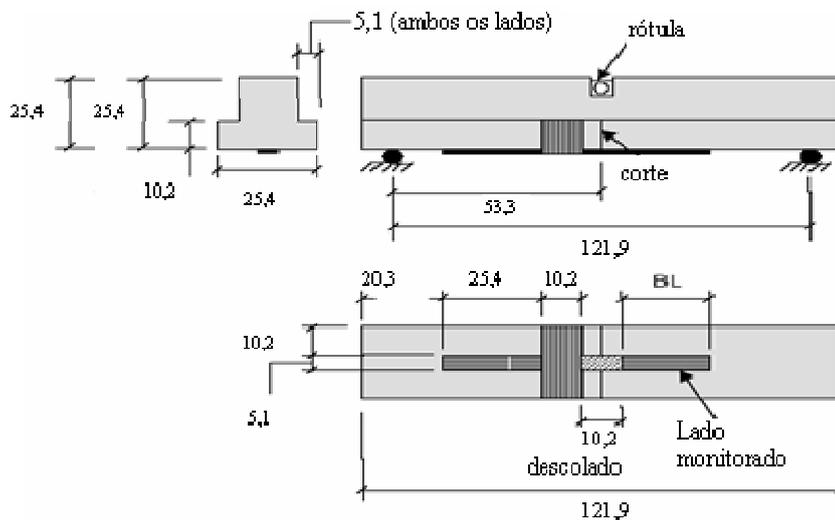


Figura 2.2 – Esquema de ensaio de Miller e Nanni (1999) cotas em mm.

As deformações específicas ao longo do tecido de CFC foram utilizadas para se obter a curva  $\tau \times s$ , (Figura 2.3), sendo cada curva para uma dada força aplicada. Observou-se a ocorrência de descolamento do tecido de CFC antes da ruptura. Um LVDT foi utilizado para monitorar a flecha durante os ensaios.

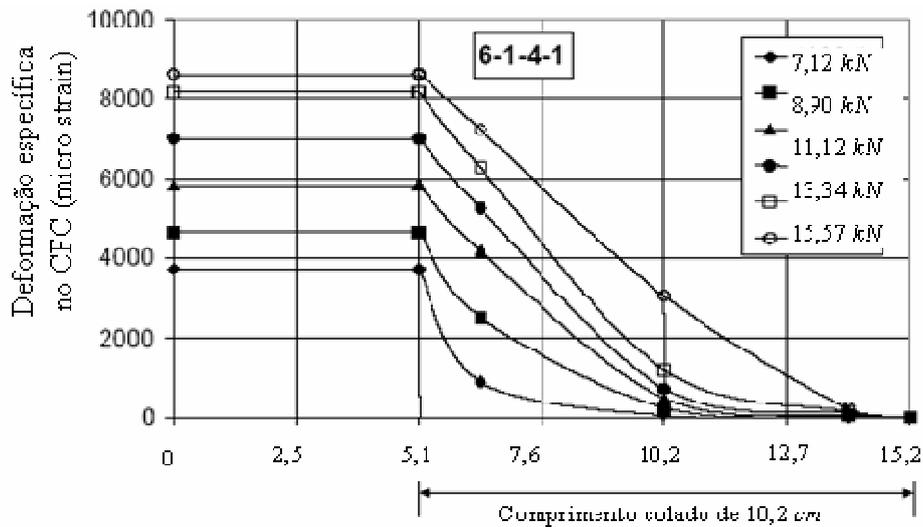


Figura 2.3 – Curva  $\tau \times s$  para os corpos-de-prova; adaptada de Miller e Nanni (1999).

O modo de ruptura foi por descolamento do CFC. Ao longo de comprimento efetivo de ancoragem, o CFC resiste à força aplicada. A partir desse comprimento não ocorre mais deformação.

Os resultados experimentais mostram que a partir de um certo comprimento a força aplicada não pode mais ser transferida ao tecido de CFC, logo não há acréscimo de resistência. Disto conclui-se que há um comprimento efetivo de ancoragem.

Esperava-se também que a resistência do concreto afetasse a resistência última de aderência, porém, isso não foi observado. A resistência do concreto influencia a força de início de fissuração, mas não a força última.

O número de camadas de CFC teve influência na resistência CFC-concreto. Para duas camadas de CFC a força média última obtida foi 1,5 vezes maior que para uma camada de CFC.

Foi efetuada uma aproximação linear dos resultados dos ensaios em conjunto com os resultados experimentais do método de Maeda *et al.* (1997), que utiliza um modelo analítico para estimar a força última e considera uma distribuição linear de tensão antes do descolamento ocorrer. Usando-se dados desta experiência e a de Maeda *et al.* (1997), observou-se que com o acréscimo da resistência do concreto houve um acréscimo da força última. Logo pode-se admitir a relação linear como razoável, embora sejam necessários novos estudos experimentais para validar essa relação.

## 2.4. Estudo de Harmon *et alii* (1999)

Este estudo aborda diversas pesquisas conduzidas em conjunto com o departamento de Engenharia Química da Universidade de Washington, para testar o sistema de resina de fibra obtidos no mercado e desenvolver um sistema de resina para a Zoltek Corporation .

Os materiais testados foram: tecidos produzidos pela Mbrace e tecidos da Zoltek Corporation, além de resinas experimentais desenvolvidas por essa Universidade. O objetivo da pesquisa foi o desenvolvimento de um sistema de resina comercial para a Zoltek Corporation, que pudesse competir com o sistema da Mbrace.

Para testar a ligação do sistema resina-fibra com o substrato de concreto, executaram-se vigas para serem ensaiadas à flexão. Os ensaios foram realizados por meio de um macaco hidráulico e um dispositivo de aplicação de força que transmitia as forças concentradas de forma simétrica. A força foi aplicada ao eixo viga, de forma que a tensão de tração estivesse distribuída uniformemente ao longo do tecido de CFC, situado na parte inferior da viga . Um lado da viga não foi monitorado e nesse local, colocou-se um acréscimo de reforço de CFC com 5'' por 5'' (127 cm x 127 cm) para assegurar que não ocorresse uma ruptura nessa parte (Figura 2.4).

O tecido de CFC foi instrumentado com extensômetros elétricos de resistência (EER). As deformações específicas lidas pelos EER foram colocadas sob a forma de gráficos representando a distribuição de tensão tangencial ao longo do tecido de CFC. A curva  $\tau \times s$  obtida representa a ligação efetiva do tecido de CFC com o concreto, de modo a permitir analisar a eficiência da ligação do tecido de CFC com o concreto para uma força aplicada.

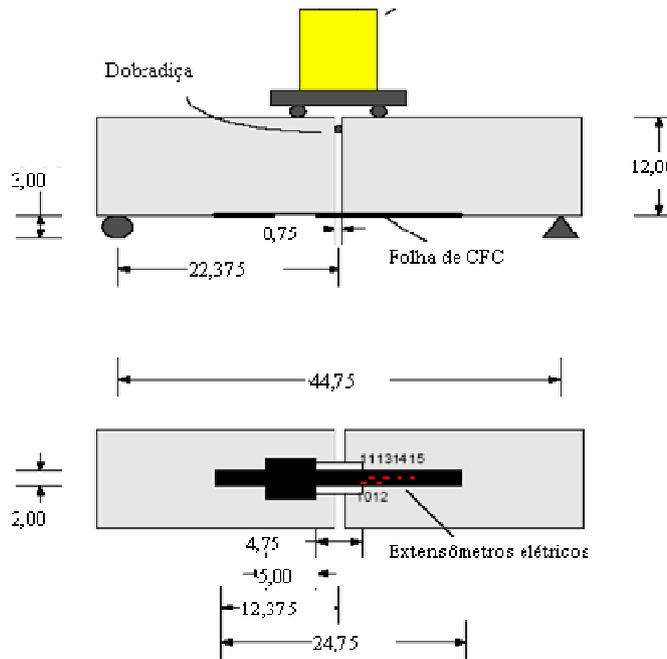


Figura 2.4 – Esquema das vigas ensaiadas por Harmon *et alii* (1999) cotas em cm.

Os resultados experimentais mostram que o sistema Mbrace se foi mais eficiente. No ensaio com o tecido Mbrace esse se destacou do substrato de concreto para uma força de 3000 libras (13,60 kN). Com o tecido da Zoltek Corporation o tecido se rompeu para uma força de 2.516 libras (11,41 kN). O rompimento do tecido não havia sido previsto, pois o objetivo era testar o elemento de ligação e não o tecido.

A análise dos resultados indica duas razões para a melhor eficiência do sistema Mbrace:

- a) integridade das fibras;
- b) o sistema de malha do tecido.

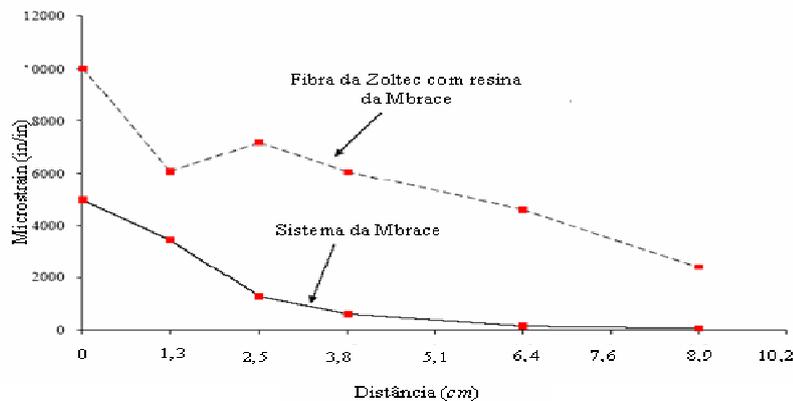


Figura 2.5 – Comparação das curva  $\tau \times s$  do tecido da Mbrace e da Zoltek Corporation; adaptada de Harmon *et alii* (1999).

A curva  $\tau \times s$ , (Figura 2.5) mostra que o tecido da Mbrace deformou de 4.000 a 5.000 microstrain menos que a fibra da Zoltek Corporation, o que indica maior resistência da fibra da Mbrace. Observou-se também que a curva  $\tau \times s$  do tecido da Zoltek Corporation indica que o tecido começou a se descolar do concreto. Ambos possuíam a mesma taxa de reforço.

O tecido da Zoltek Corporation se rompeu com menor força porque o sistema de malha usado na fabricação não é adequado. As fibras de carbono são extremamente resistentes, porém, as fibras devem ser paralelas. Se isto não ocorrer, as fibras não estarão alinhadas na direção da aplicação da força ao tecido de CFC, logo podem não contribuir para resistir à força aplicada na viga.

## 2.5. Estudo de Kallifa *et alii* (1999)

Esses autores realizaram ensaios para estudar a resistência de vigas reforçadas à força cortante com CFC. Foram testadas três vigas com carregamentos em quatro pontos. A viga com seção T foi armada com barras de aço na região longitudinal e sem estribos nos vãos de cisalhamento (região de teste, Figura 2.6).

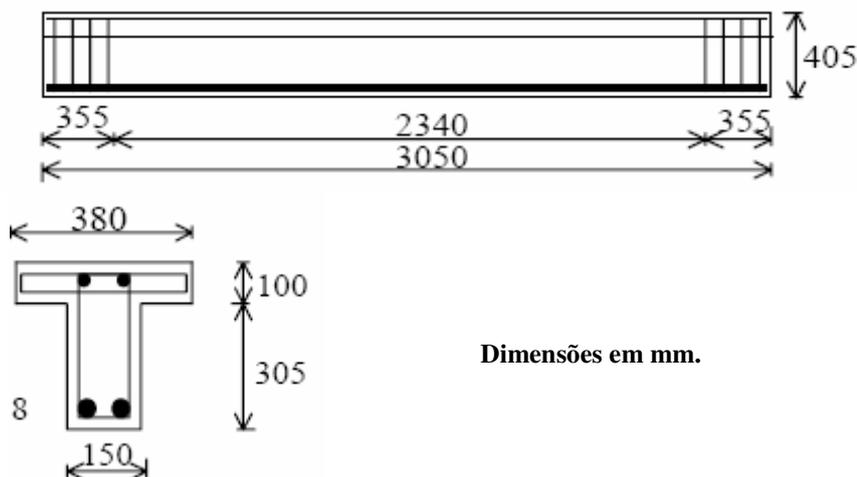


Figura 2.6 – Armação das viga ensaiada por Kalifa *et alii* (1999).

Uma viga denominada BT1 foi ensaiada como viga de referência, ou seja, sem o uso do reforço de CFC. Outra viga denominada BT2 teve um reforço em forma de U, sem nenhum tipo de ancoragem para o reforço. Uma terceira viga

BT3 foi reforçada de maneira semelhante à viga BT2, sendo que na viga BT3 o reforço em forma de U foi ancorado nas mesas em ambos os lados da seção. A Figura 2.7 mostra o esquema de reforço das vigas e as posições dos extensômetros elétricos de resistência.

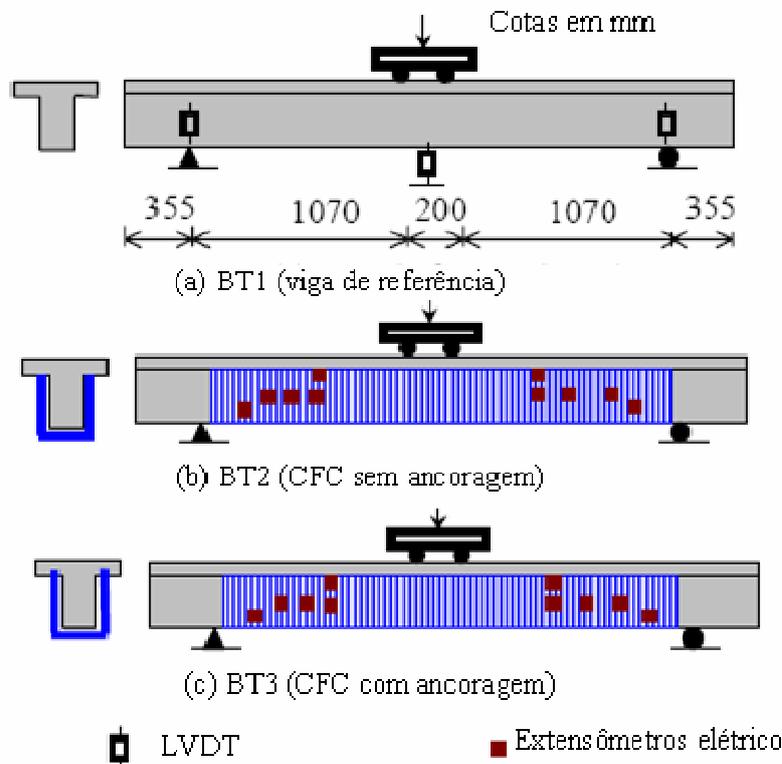


Figura 2.7 – Esquema das vigas ensaiadas por Kalifa *et alii* (1999).

A viga BT1 ao ser carregada apresentou fissuras para a força de 110 kN. A partir daí o carregamento cresceu e as fissuras se propagaram até o colapso, que ocorreu para a força de 180 kN.

A viga BT2 começou a se romper pelo descolamento do tecido de CFC, seguindo-se o esmagamento do concreto para a força de 310 kN. O reforço de CFC aumentou em 72% a resistência da viga. O descolamento poderia ter sido evitado com a melhor utilização do CFC, o que aumentaria a resistência da viga.

A viga BT3 não apresentou esmagamento do concreto nem descolamento do reforço. A ruptura se deu pela ruptura do CFC perto do apoio. O resultado da ancoragem em forma de U resultou num acréscimo significativo na sua capacidade resistente. A Figura 2.8 mostra os diagramas força vs. deformação específica obtidos por meio das leituras dos extensômetros elétricos de resistência 7, 8 e 10 colados nas vigas reforçadas. Em ambas as vigas as fissuras se iniciaram para o

mesmo valor da força aplicada, porém, a força última da viga BT3 foi muito superior. Essa força última foi de 442 kN, o que significou um acréscimo de 42% na resistência quando comparada com a viga BT2.

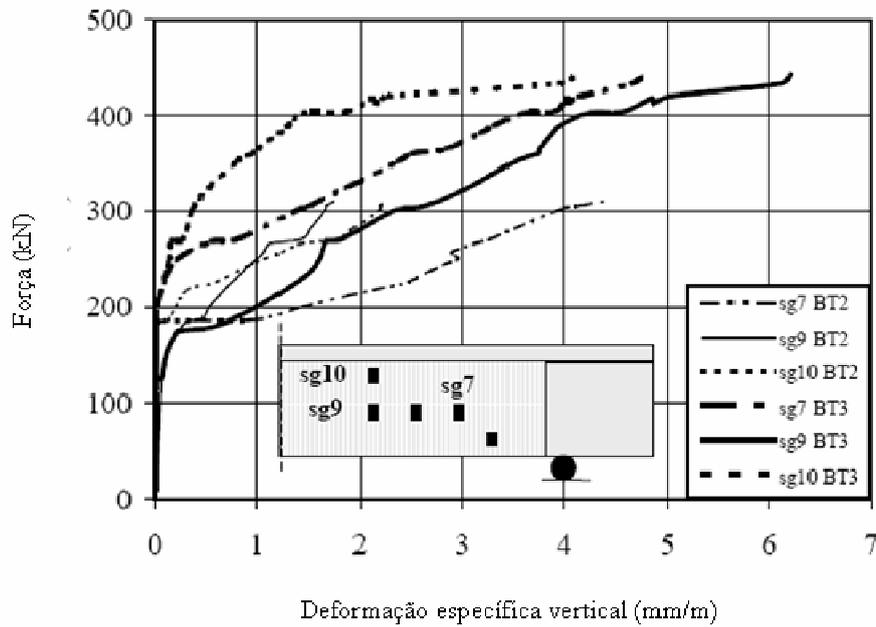


Figura 2.8 – Diagrama força x deformação específica vertical para as vigas BT2 e BT3; adaptada de Kalifa *et alii* (1999).

Os resultados experimentais das flechas das três vigas são apresentados na Figura 2.9. Esse gráfico mostra que viga BT3 teve maior ductilidade e mostrou mais rigidez.

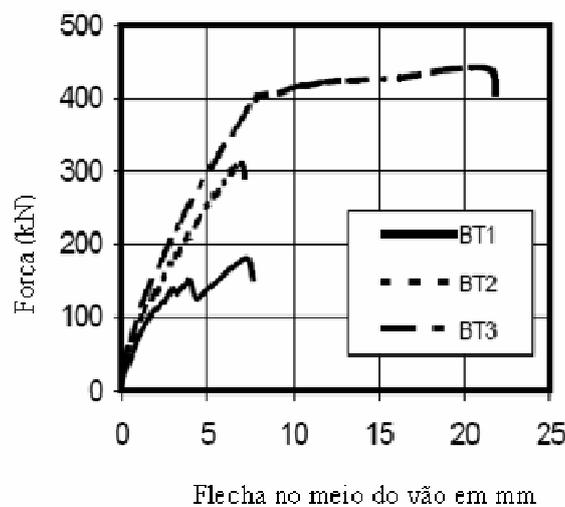


Figura 2.9 – Força vs flecha no meio do vão; adaptada de Kalifa *et alii* (1999).

## 2.6. Estudo de Neubauer e Rostásy (1999)

Os estudos sobre a aderência concreto-CFC são normalmente baseados nas leis de tensão de aderência x deslocamento. O que diferencia esses estudos está na adoção de um tipo específico de lei  $\tau \times s$  e o tipo de análise: elástica linear ou não linear.

Neubauer e Rostásy (1999) conceberam um modelo de aderência para reforço de estruturas de concreto com chapas metálicas, adotando uma análise energética da aderência entre o substrato de concreto e o reforço. Esse modelo mostra-se adequado para os reforços com chapas metálicas, sendo baseado nos mecanismos de fratura do concreto.

Nesse modelo são admitidas as seguintes hipóteses:

- a) a tensão de aderência é governada pela energia de fratura  $G_F$  ;
- b) a tensão de aderência do compósito  $\tau_\ell$  é dependente do deslocamento relativo  $s_\ell$  na direção da força atuante no reforço.

A energia de fratura  $G_F$  não depende do comprimento ancorado  $\ell_t$  e não deve exceder certo valor  $\ell_{t,máx}$ , sendo a expressão para  $G_F$  dada por:

$$G_F = K_b^2 C_F f_{ct} \quad (2.1)$$

onde

$f_{ct}$  – resistência à tração da superfície de concreto;

$C_F$  – fator que contém todos os efeitos secundários;

$K_b$  – fator que considera a influência da largura relativa do compósito sobre a largura do elemento de concreto, sendo  $K_b > 1$  e usualmente não excede a  $K_b = 1,3$ .

Os resultados dos ensaios de Neubauer e Rostásy (1999) mostram que  $\ell_{t,máx}$  não tem influência no acréscimo da força última  $T_u$ . A expressão para a força última  $T_{u,máx}$  é dada por:

$$T_{u,máx} = b_\ell K_b \sqrt{2G_F E_\ell t_\ell} = 0,64 K_b b_\ell \sqrt{E_\ell t_\ell f_{ctm}} \quad (2.2)$$

O comprimento de ancoragem  $\ell_{t,máx}$  obtido com  $T_{u,máx}$  é dado por:

$$\ell_{t,máx} = 2 \sqrt{\frac{2G_F E_\ell t_\ell}{\tau_{II}^2}} = \sqrt{\frac{E_\ell t_\ell}{2f_{ctm}}} \quad (mm) \quad (2.3)$$

onde

$E_\ell$  – módulo de elasticidade do reforço;

$t_\ell$  – espessura do reforço;

$b_\ell$  – largura do reforço;

$\tau_{II}$  – tensão máxima de aderência;

$f_{ctm}$  – resistência média à tração do concreto.

A energia de fratura de aderência no concreto é constituída de componentes do modo I (modo de fratura) e do modo II (Teoria da Fratura). O modo I é produzido pelo deslocamento transversal devido à rugosidade das faces da fissura. O modo II ocorre em decorrência da direção da força de tração no reforço. Os modelos simplificados para a aderência são admitidos como um modo II puro e  $G_F$  representa a energia de fratura total constituída pelos componentes do modo I e modo II.

## 2.7.

### Estudo de Cruz e Barros (2001)

Esses autores estudaram o comprimento crítico efetivo para a ancoragem do tecido de CFC e analisaram a relação entre a tensão e o deslocamento desse reforço.

Foram realizados ensaios de vigas bi-apoiadas sujeitas a um esquema de força em quatro pontos, de modo a se estudar esse problema (Figura 2.12). Nas vigas o CFC foi totalmente embutido no bloco B. No bloco A o CFC foi embutido em um comprimento  $l_b$ , que é um dos parâmetros dessa pesquisa. Os blocos A e B foram conectados na parte de baixo pelo CFC e em cima por meio de uma barra de aço (Figura 2.12).

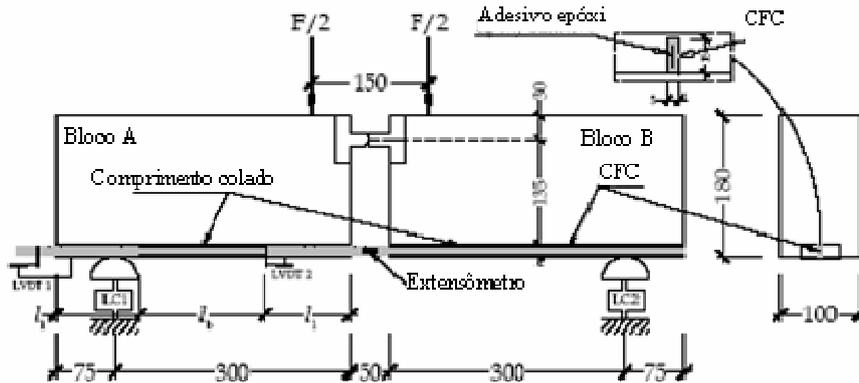


Figura 2.10 – Desenho esquemático das vigas ensaiadas (medidas em mm); adaptada de Cruz e Barros (2001).

Foram ensaiadas seis séries de três vigas e considerados três comprimentos de ancoragem  $k_1\emptyset$ ,  $k_2\emptyset$  e  $k_3\emptyset$ , sendo  $\emptyset$  o diâmetro equivalente de uma barra circular com a mesma área da seção transversal do tecido de CFC. Os valores de  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  foram de 20, 25 e 30, respectivamente.

Foram realizados nove ensaios com carregamentos monotônicos e nove ensaios com carregamento cíclicos.

Para medir o deslocamento foram usados dois LVDT e colados extensômetros de resistência elétrica ao tecido de CFC para se medir a deformação específica.

O primeiro ensaio com carregamento monôtonico foi realizado com um comprimento embutido de  $25\emptyset$ . Nesse ensaio a ruptura se deu pela força cortante, tendo o concreto a idade de 14 dias, o que não era almejado. Por esse motivo decidiu-se colar as partes rompidas e reforçar as laterais com CFC (Figura 2.13 e 2.14).

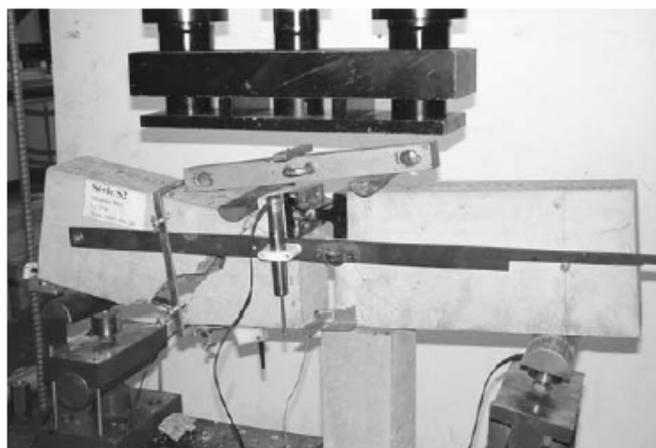


Figura 2.11 – Ruptura por força cortante; adaptada de Cruz e Barros (2001).



Figura 2.12 – Reforço de CFC para força cortante; adaptada de Cruz e Barros (2001).

A Figura 2.15 mostra a curva tensão vs. deformação específica obtida para o tecido de CFC. A curva é praticamente linear, e a tensão máxima no CFC é da ordem de grandeza da sua resistência à tração indicada pelo fabricante (2.000 *MPa*), o que significa que para esse comprimento embutido a resistência última da fibra é atingida. A Figura 2.15 ilustra o caso em que a resistência aumenta de acordo com o comprimento embutido. Para um comprimento embutido de  $20\phi$  a inclinação da curva  $\tau \times s$  é superior ao módulo de elasticidade especificado pelo fabricante das fibras, indicando que abaixo desse comprimento de ancoragem a tensão de tração última do tecido de CFC não será atingida.

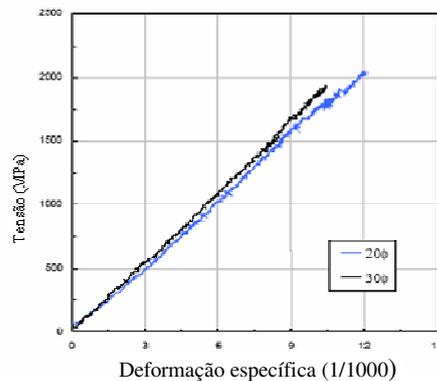


Figura 2.13 – Curva  $\tau \times \varepsilon$  obtida na lâmina de CFC depois do reforço lateral; adaptada de Cruz e Barros (2001).

A Figura 2.16 representa a relação entre tensão e o deslocamento no adesivo. A tensão no adesivo foi calculada pela relação entre a força no tecido de CFC e a área de contato e o deslocamento vertical foi obtido por meio da

diferença de valores obtidos com o LVDT1 e o LVDT2. Essa curva não é linear, o que mostra que o comportamento não segue a lei de Hooke sob força cortante.

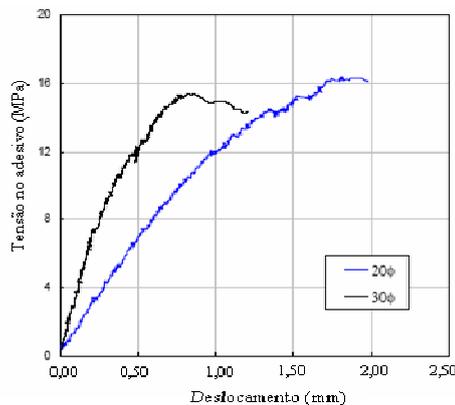


Figura 2.14 – Curva  $\tau \times s$  tensão do adesivo; adaptada de Cruz e Barros (2001).

## 2.8. Pesquisa de Leung e Yang (2002)

Esses autores modelaram o processo de descolamento em função da propagação de fissuras ao longo da interface CFC-concreto, admitindo uma tensão de cisalhamento atuando nas fissuras.

Segundo Täljsten (1996) a interface de CFC-concreto tem uma região com comportamento elástico, na qual não são observados danos (região A) e outra região onde, quando o descolamento ocorre, existem danos interfaciais, conduzindo à separação dos materiais. O comportamento dessa região descolada pode ser subdividido em dois tipos: um na qual a tensão cisalhante está diminuindo na região da interface (região B) e outro que é definido por zona de livre tensão onde as superfícies descoladas estão completamente separadas (região C). Logo o processo de descolamento pode ser analisado pelas propagações de fissuras, descrevendo-se o comportamento entre as interfaces dos materiais por uma curva  $\tau \times s$  (Figura 2.10).

Antes de ocorrer o descolamento a deformação cisalhante é resultado da deformação do adesivo e do deslocamento relativo entre as duas superfícies, ou da área descolada. A área sob a curva  $\tau \times s$  representa a energia de fratura necessária para o descolamento total da superfície.

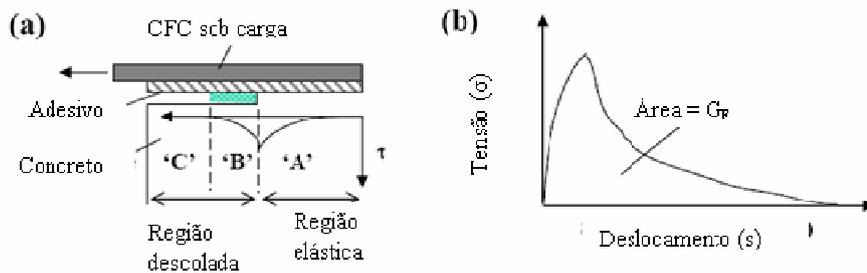


Figura 2.15 – Comportamento das interfaces dos materiais: (a) divisão em zonas ao longo da interface CFC/Concreto; (b) curva  $\tau \times s$ ; adaptada de Leung e Yang (2002).

Brosens e Van Gemert (1997) consideram o início do descolamento e da ruptura separadamente. Para se determinar a força de descolamento inicial emprega-se a área da curva  $\tau \times s$  em regime elástico. Para se determinar força última emprega-se a área total sob essa curva.

Yuan *et al.* (2001) e Leung e Tung (2001) estudaram a curva  $\tau \times s$  por meio de equações diferenciais para a zona elástica e zona descolada. Resolvendo-se essas equações e impondo-se as condições de contorno, tem-se o comprimento da zona descolada para uma dada força e a distribuição de tensões ao longo do tecido de CFC. Nesse caso assume-se que o descolamento ocorre para uma tensão cisalhante crítica. Os resultados experimentais de Bizindavyi e Neale (1999) indicaram que a tensão cisalhante ao longo da interface de CFC-concreto pode alcançar valores altos, acima da resistência ao cisalhamento do próprio concreto. Essa observação indica que o rompimento na interface pode não ocorrer quando uma porção pequena da interface está sob concentração de tensões.

Nesse estudo foi considerado um modelo simples para o descolamento do CFC do substrato de concreto, para o qual ao longo da interface na região descolada considera-se a tensão cisalhante  $\tau$  como uma função linear do deslocamento  $s$ . Para o comportamento elástico da interface, onde não ocorre descolamento, a distribuição de tensões pode ser obtida por meio de uma análise última de tensões. A Figura 2.11 ilustra a disposição desse modelo.

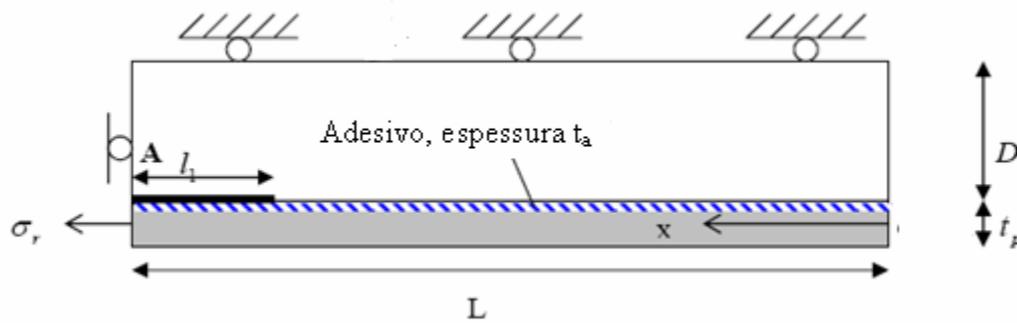


Figura 2.16 – Modelo para o descolamento do CFC do substrato de concreto; adaptada de Leung e Yang (2002).

Considerando-se as tensões atuantes no concreto, no adesivo e no CFC, a energia do sistema pode ser calculada como uma função do comprimento descolado  $l_1$ . Com o aumento de  $l_1$  a taxa de liberação de energia do sistema é comparada com a energia interfacial crítica, de modo a se obter a relação entre a força aplicada e o comprimento descolado. Com esses dados foram derivadas expressões analíticas para o comportamento das tensões ao longo da interface. Os resultados da análise indicaram que a tensão cisalhante efetiva dentro da região colada é uma função do atrito entre as interfaces, da resistência entre essas, do módulo de cisalhamento e da espessura do adesivo.

## 2.9. Estudo de Meneghel (2005)

Os ensaios de aderência concreto-CFC realizados por Meneghel (2005) foram realizados com um equipamento projetado especialmente para transmitir aos materiais força de tração ao CFC e compressão ao concreto. Este mesmo dispositivo de ensaio foi utilizado na presente pesquisa, que é uma ampliação desses estudos. Os detalhes de ensaio são apresentados no Capítulo 3.

Meneghel (2005) estudou parâmetros como resistência à compressão do concreto e largura do tecido, que afetam os resultados de ensaios de corpos-de-prova usados para o estudo da aderência entre o CFC e o substrato de concreto. Foram ensaiados nove corpos-de-prova de concreto com faixas de CFC colados as laterais, todos com as mesmas características geométricas, com três resistências à compressão dos blocos de concreto e duas larguras diferentes do tecido.

Como conclusões dos resultados experimentais de Meneghel (2005) tem-se:

- a) Existe um comprimento de ancoragem efetivo no qual as tensões de aderência são realmente distribuídas. O valor deste comprimento foi de 120 *mm*;
- b) a largura do tecido não influencia as tensões últimas de aderência;
- c) no intervalo estudado, as tensões últimas de aderência não dependem da resistência a compressão do concreto;
- d) o valor característico da tensão última de aderência obtida foi  $\tau_{bk} = 1,45 \text{ MPa}$ .

## 2.10. Outras Pesquisas

O uso de ancoragem entre o concreto e o CFC tem função importante em projetos de reforço pelo fato do CFC ser um material frágil que apresenta baixa ductilidade e ruptura brusca sem patamar de escoamento. (NAKABA *et al.*, 2001).

Pela análise das deformações específicas e forças de ruptura percebe-se que a aderência é totalmente alcançada para certo comprimento de ancoragem. Para comprimentos de ancoragem menores quando o comprimento de ancoragem aumenta a força de ruptura tende a ser maior e a tensão de aderência média diminui. Sendo necessário calcular um comprimento de aderência adequado para evitar a ruptura brusca do tipo frágil. (CHAJES *et al.*, 1996).

Para os comprimentos menores que o efetivo, observando-se os ensaios de tração pura, as tensões de aderência tendem a diminuir quando a área de aderência aumenta, isso ocorre porque as tensões estão concentradas na região da extremidade do reforço e não distribuídas ao longo da área do comprimento de ancoragem.

Quando o comprimento de aderência excede ao comprimento crítico (comprimento de aderência efetivo), a força última permanece constante. Como a força de tração do CFC é transferida ao concreto, não existe tensão de aderência entre as regiões descoladas. Segundo NAKABA *et al.* (2001) o comprimento de aderência efetivo está relacionado com a rigidez do CFC.

As Figuras 2.17 e 2.18 mostram o comportamento das tensões de aderência em função de comprimentos de aderência variáveis, obtidas de resultados experimentais de CHAJES *et al.* (1996).

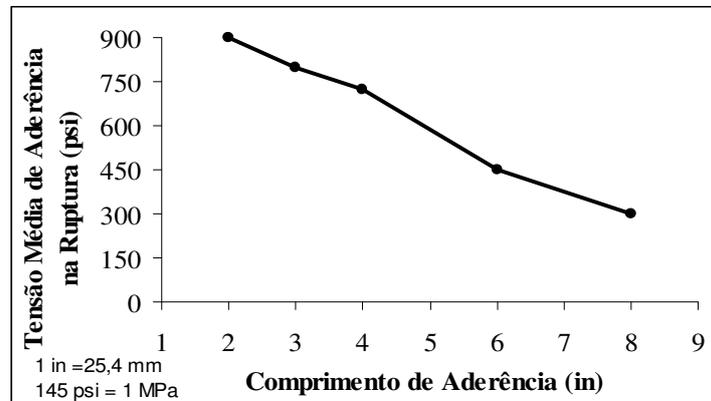


Figura 2.17 – Gráfico tensão média de aderência x comprimento de aderência; adaptada de CHAJES *et al.* (1996).

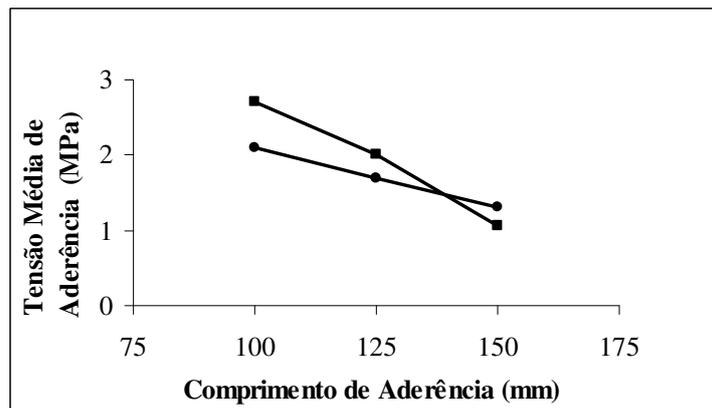


Figura 2.18 – Gráfico tensão média de aderência x comprimento de aderência para dois tipos de CFC; adaptada de ADHIKARY e MUTSUYOSHI (2001).

Percebe-se que as tensões médias de aderência diminuem quando os comprimentos de aderência aumentam, devido ao fato de que para grandes comprimentos de aderência a tensão máxima de aderência não é atingida.

A Figura 2.19 mostra que para comprimentos de aderência menores as forças de ruptura são menores, e a partir de um certo comprimento esta se torna constante.

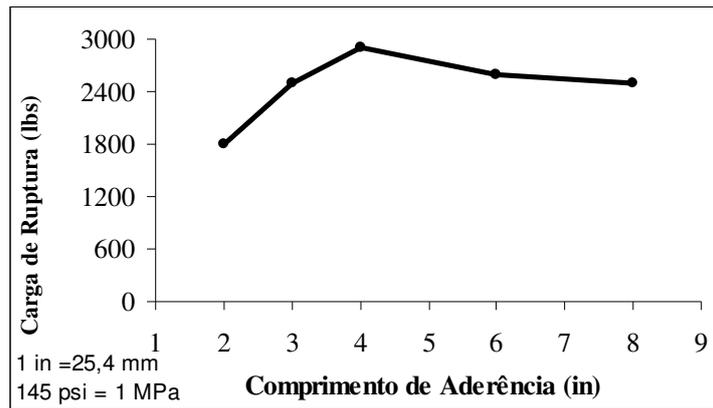


Figura 2.19 – Gráfico carga de ruptura x comprimento de aderência; adaptada de CHAJES *et al.* (1996).

➤ **CHAJES *et al.* (1996)**

Esses autores realizaram ensaios de aderência com corpos-de-prova cúbicos de concreto aos quais foram coladas chapas de material compósito. Foram analisados os efeitos da preparação da superfície de concreto, o tipo de adesivo, a resistência à compressão do concreto e os efeitos de diversos comprimentos de aderência da chapa.

Na maioria dos corpos-de-prova ensaiados por esses autores a ruptura ocorre no concreto ao longo da superfície de aderência.

Segundo CHAJES *et al.* (1996) algumas premissas são admitidas:

1. o mecanismo de ruptura está diretamente relacionado com a magnitude da deformação específica do concreto;
2. a deformação específica do concreto está diretamente relacionada com a deformação específica do compósito;
3. o comprimento de aderência do compósito é afetado pela largura, geometria e método de ensaio utilizado.

Segundo esses autores são necessários experimentos adicionais e novos trabalhos analíticos para o desenvolvimento de uma teoria de aderência entre o conjunto concreto-compósito, que considere a influência dos efeitos da resistência variável do concreto, da ductilidade do adesivo e das propriedades do compósito.

➤ **NAKABA *et al.* (2001)**

Esses autores realizaram experimentos com corpos-de-prova reforçados com CFC utilizados para se obter as tensões de aderência do sistema concreto-compósito.

O CFC é colado nos dois lados do corpo-de-prova, sendo que um dos lados foi reforçado para assegurar que a ruptura não ocorresse nesse lado (Figura 2.20).

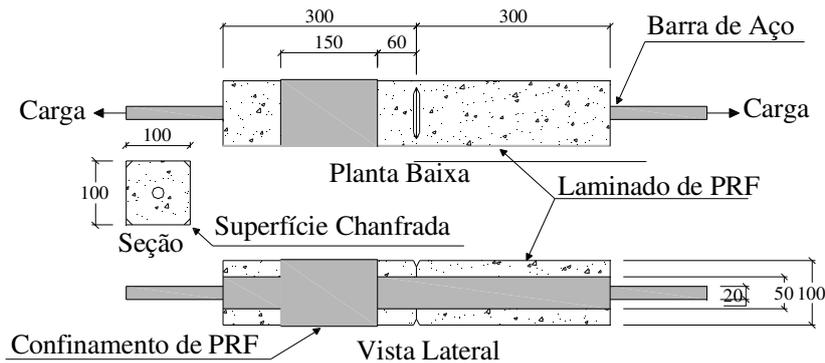


Figura 2.20 – Corpo-de-prova para o ensaio de aderência; adaptada de NAKABA *et al.* (2001).

Por meio dos resultados de análises algébricas NAKABA *et al.* (2001) formularam o estudo da aderência considerando uma lei da tensão de aderência local *vs* deslocamento, que permite determinar um comprimento de aderência efetivo para o CFC. A força de tração foi obtida por meio da diferença entre a deformação específica da seção *i*, e a deformação específica relativa a seção *i-1*. A média da tensão de aderência da seção *i*,  $\tau_{b,i}$  é calculada dividindo-se a diferença da força de tração pela área da superfície do laminado:

$$\tau_{b,i} = \frac{(\varepsilon_{f,i} - \varepsilon_{f,i-1})t_f E_f}{\Delta l_b} \quad (2.4)$$

onde

$\varepsilon_{f,i}, \varepsilon_{f,i-1}$  – deformação específica no tecido de PRF na seção “*i*” e na seção *i-1*, respectivamente;

$t_f$  – espessura do tecido de CFC;

$E_f$  – módulo de elasticidade do CFC;

$\Delta l_b$  – distância entre os pontos onde são obtidas as medidas.

O deslocamento  $s_i$  da seção  $i$  é a soma da diferença entre o alongamento da seção equivalente composta pelo concreto, resina epóxi e barra de aço da extremidade livre do CFC (ou da extremidade carregada do corpo-de-prova) para a seção  $i$ .

Com os resultados experimentais é desenhado um gráfico tensão de aderência local vs deslocamento para cada intervalo de medidas do extensômetro, para todos os corpos-de-prova. As curvas tendem para uma forma parabólica (Figura 2.21):

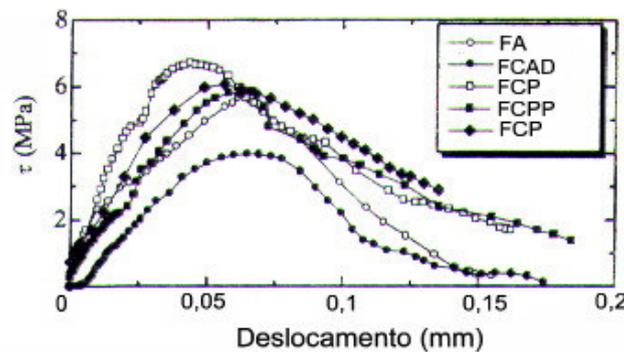


Figura 2.21 – Tensão de aderência vs deslocamento; adaptada de NAKABA *et al.* (2001).

Por meio da análise das curvas foi formulado um modelo que permite determinar a relação entre a tensão de aderência local vs. deslocamento (Figura 2.21),  $\tau_b \times s$ , donde:

$$\frac{\tau_b}{\tau_{b,máx}} = \frac{s}{s_{máx}} \cdot \frac{n}{(n-1) + \left(\frac{s}{s_{máx}}\right)^n} \quad (2.5)$$

$\tau_{b,máx}$  – tensão de aderência local máxima em *MPa* ;

$s_{máx}$  – deslocamento relativo a  $\tau_{b,máx}$  em *mm* .

### ➤ CHEN e TENG (2001)

Esses autores propuseram um modelo de aderência pela combinação da análise da mecânica da fratura com dados experimentais, e observaram que a relação tensão de aderência vs. deslocamento para reforços de CFC colados ao

concreto pode ser representada por uma relação triangular como mostra a Figura 2.22.

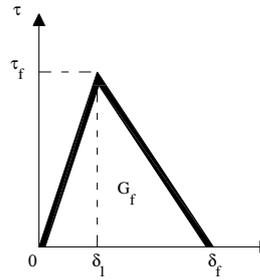


Figura 2.22 – Relação tensão de aderência – deslocamento triangular; adaptada de YUN e WU *apud* CHEN e TENG (2001).

As medidas das propriedades da tensão de aderência  $\tau_f$  e do deslocamento  $\delta_f$  são difíceis de serem determinadas na prática. É desejável que as propriedades da tensão de aderência e deslocamento sejam medidas simplesmente como a resistência do concreto.

Os modelos existentes para projetos práticos de reforço de estruturas de concreto armado não são conclusivos e indicam a necessidade do desenvolvimento de um novo, esse modelo deve ser capaz de avaliar a resistência última da aderência e do comprimento de aderência efetivo.

Os resultados experimentais (CHAJES *et al.*, 1996) mostraram que a resistência última da aderência é proporcional a  $\sqrt{f'_c}$ , e que possui comportamento similar à resistência da aderência do reforço interno de aço (armadura). CHEN e TENG (2001) aproximaram  $\tau_f$  pela resistência à tração do concreto que pode ser relacionada com a resistência à compressão sob uma expressão em termos de  $\sqrt{f'_c}$ . Usando-se a solução da Mecânica da Fratura Não Linear (MFNL) esses dois parâmetros foram calculados pelas seguintes equações:

:

$$L_e = \sqrt{\frac{E_p t_p}{\sqrt{f'_c}}}, \quad mm \quad (2.6)$$

onde  $E_p t_p$  é dado em  $MPa \cdot mm$  e  $f'_c$  é dado em  $MPa$ .

Esses autores propuseram um modelo simples para força última da aderência fundamentado em dados experimentais:

$$P_u = 0,427 \beta_p \beta_L \sqrt{f'_c} b_p L_e, \quad N \quad (2.7)$$

sendo

$$\beta_L = \begin{cases} 1 & \text{se } L \geq L_e \\ \text{sen} \left[ \frac{\pi L}{2L_e} \right] & \text{se } L < L_e \end{cases} \quad (2.8)$$

$$\beta_p = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_p}{b_c}}{1 + \frac{b_p}{b_c}}} \quad (2.9)$$

onde

$b_p$  – largura do compósito;

$b_c$  – largura do elemento de concreto.