

## **2. Revisão Bibliográfica**

### **2.1. Considerações Iniciais**

Este capítulo apresenta uma revisão da bibliografia sobre a aderência entre compósitos de fibras de carbono (CFC) e o substrato de concreto. Inicialmente é feita uma breve descrição dos materiais compósitos, seguindo-se um resumo de alguns trabalhos sobre aderência entre CFC e concreto sob cargas estáticas, e finalmente é feito um resumo dos poucos trabalhos sobre o comportamento de elementos de concreto reforçados com CFC sujeitos a cargas de impacto.

### **2.2. Materiais Compósitos**

Os materiais compósitos são constituídos por matrizes e elementos de reforço que, em geral, são formados por fibras. A matriz é contínua e envolve completamente o elemento de reforço. Os elementos de reforço são componentes estruturais que determinam a estrutura interna do compósito.

Os compósitos são normalmente desenvolvidos com o objetivo de obter melhorias nas propriedades mecânicas e na durabilidade do material resultante, especialmente em termos de aumento de resistência, rigidez, dureza e desempenho sob altas temperaturas.

#### **2.2.1. Fibras**

Os compósitos mais importantes utilizados em reforço estrutural são aqueles cujo elemento de reforço é constituído de fibras. As fibras apresentam-se sob a forma de filamentos de pequeno diâmetro, com elevado módulo de elasticidade, elevada resistência à tração, com diâmetros e superfícies uniformes, baixa densidade e um comportamento frágil.

As fibras utilizadas na fabricação de compósitos são produzidas nas formas contínuas ou descontínuas, podendo apresentar as seguintes orientações: unidirecional, bidirecional ou aleatória. Os compósitos de fibras contínuas mais utilizadas comercialmente em aplicações da engenharia civil são as de vidro, carbono e as de aramida. As propriedades físicas e mecânicas variam consideravelmente para os diferentes tipos de compósitos e podem variar para o mesmo tipo de material. Algumas propriedades das diversas fibras são fornecidas na Tabela 2.1 e ilustradas na Figura 2.1.

Dos três tipos de fibras, as de carbono são as que apresentam melhores propriedades mecânicas, as mais resistentes à ação de agentes químicos, são imunes a corrosão e não absorvem água. As inúmeras vantagens que as fibras de carbono apresentam em relação às outras justificam sua utilização na execução de reforços estruturais.

Tabela 2.1 – Propriedades típicas de algumas fibras (KENDALL, 1999).

<b>Propriedade</b>	<b>Vidro-E</b>	<b>Aramida (A) Kevlar 49™</b>	<b>Carbono de elevada resistência (HS)</b>	<b>Carbono de elevado módulo (HM)</b>	<b>Aço CA-50</b>
Resistência à tração (MPa)	2400	3600	3300 – 5000	1500 – 4700	500 (escoamento) 550 (ruptura)
Módulo de Elasticidade (GPa)	70	130	230 – 300	345 – 590	210
Deformação específica na ruptura %	3,5	2,5	1,5 – 2,2	0,6 – 1,4	0,2 (escoamento) 6 (ruptura)
Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	25,6	14,4	18	19	78,5
Coefficiente de dilatação térmica (10 <sup>-6</sup> /°C)	5,0	-2 (longitudinal) +59 (transversal)	-1 (longitudinal) +17 (transversal)	-1 (longitudinal)	12 (longitudinal)

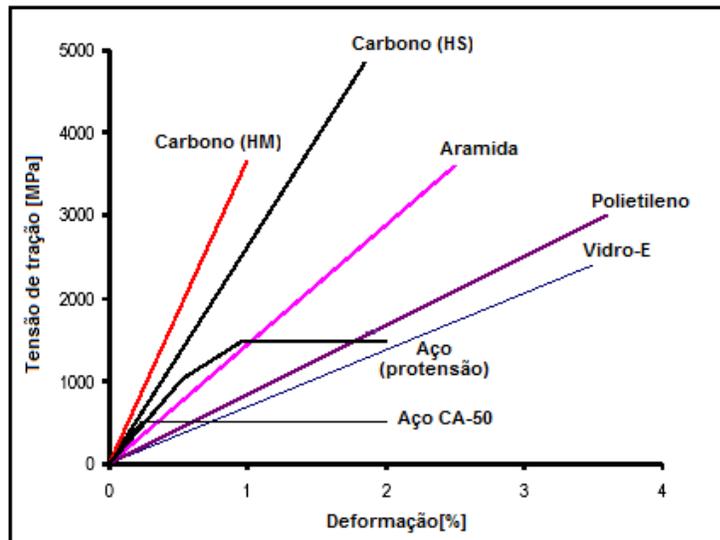


Figura 2.1 – Diagrama tensão-deformação específica de fibras e metais, adaptada de BEBER (2003).

### 2.2.2. Matriz

A matriz é responsável pela união entre as fibras que formam o compósito e pela transferência de solicitações, agindo como o meio pelo qual as ações externas são transmitidas e distribuídas para as fibras.

A matriz também tem a função de garantir que as fibras funcionem em conjunto, de proteger contra o ataque de agentes agressivos do meio ambiente e de proteger contra danos mecânicos. As propriedades químicas, térmicas e elétricas dos compósitos são afetadas pela escolha da resina que irá compor a matriz. Além disso, a matriz é responsável por manter as fibras posicionadas corretamente.

Para MACHADO (2002) as matrizes poliméricas devem apresentar as seguintes características fundamentais:

- baixa retração durante o processo de cura;
- deformação de ruptura compatível com as deformações dos elementos de reforço;
- permanência de sua estabilidade sob a atuação de agentes químicos;
- suficiente capacidade de aderência às fibras do sistema;
- módulo de elasticidade da ordem de 2.000 MPa;
- proteção das fibras contra efeitos do meio ambiente e da abrasão;
- garantir a orientação das fibras na matriz.

As matrizes podem ser formadas por resinas termorrígidas ou termoplásticas, sendo que para reforços estruturais, as resinas termorrígidas representam a matriz ideal para a composição de compósitos PRF. Segundo o ACI 440.2R (2002), as resinas termorrígidas proporcionam, dentre outras propriedades, boa estabilidade térmica, boa resistência química e baixa fluência.

As resinas poliméricas termorrígidas mais usadas são as de poliéster e as de epóxi. As de epóxi são mais utilizadas em aplicações da engenharia estrutural, geralmente sua formulação consiste do tipo bi-componente, ou seja, compostas por um agente principal (a própria resina) que reage com um catalisador (endurecedor). Essas resinas apresentam como principais vantagens a durabilidade e a excelente propriedade de aderência. Na Tabela 2.2 apresentam-se algumas das propriedades dos dois tipos de resinas poliméricas termorrígidas mais utilizadas nos materiais compósitos.

Tabela 2.2 – Propriedades das resinas utilizadas em materiais compósitos (CAROLIN, 2003).

Resina	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à Tração (MPa)	Extensão na Ruptura (%)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
Poliéster	2,10 – 4,10	20 – 100	1,0 – 6,5	1000 – 1450
Epóxi	2,5 – 4,10	55 – 130	1,5 – 9,0	1100 – 1300

Por outro lado, mesmo que o uso estrutural das resinas termoplásticas seja relativamente baixo, essas tem alta resistência ao impacto e à fratura. Muitos polímeros termoplásticos possuem deformação na ruptura superior aos polímeros termorrígidos. Apresentam como principais vantagens a cura rápida, possibilidade de reutilização, facilidade de manuseio, tolerância a danos e o prazo de armazenagem é ilimitado quando protegidos da umidade.

Uma das maiores limitações para o uso das resinas poliméricas termoplásticas segundo o ACI 440.2R (2002), é que essas apresentam alta viscosidade o que dificulta sua combinação com fibras contínuas tanto na produção como na operação.

### **2.3. Compósitos de Fibras de Carbono**

Os polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC) destacam-se como os mais apropriados para o reforço estrutural de elementos de concreto armado devido ao alto desempenho mecânico das fibras de carbono (resistência à tração) permitindo uma significativa redução nas dimensões dos elementos empregados para esse fim.

As características primordiais dos compósitos de fibras de carbono são:

- apresentam as maiores relações entre resistência e rigidez com seu peso próprio;
- são resistentes ao ataque químico e à corrosão;
- mantêm a alta resistência e rigidez sob temperaturas elevadas;
- em temperatura ambiente as fibras de carbono não são afetadas pela umidade, corrosão e ação de vários solventes, ácidos e bases;
- apresentam uma diversidade de características físicas e mecânicas, permitindo que os compósitos apresentem grande versatilidade para diversas aplicações em engenharia;
- apresentam boa flexibilidade para adaptação a várias formas, e a facilidade de aplicação traz economia de custos e redução nos tempos de paralisação.

### **2.4. Aderência entre o CFC e o Substrato de Concreto**

Para que o reforço externo com CFC seja capaz de aumentar a capacidade resistente de uma estrutura, de forma significativa e eficaz, é necessário que ocorra uma efetiva transferência de solicitações entre o CFC e o concreto.

O comportamento geral da interface da ligação concreto-resina-compósito é fundamental na prevenção dos vários modos de rupturas. Segundo ARAÚJO (2002), esse comportamento é condicionado pelo menor dos valores das resistências à tração e ao cisalhamento dos três materiais envolvidos: a camada superficial do concreto, a resina e o compósito. Nos casos mais comuns tem-se que a superfície do concreto é quem limita o desempenho da ligação.

Um aspecto importante no comportamento da ancoragem do compósito é que existe um comprimento de ancoragem efetivo a partir do qual a carga de ruptura não aumenta. Outros parâmetros também devem ser considerados, pois exercem uma forte influência no comportamento da ligação como a resistência do concreto, a resistência do adesivo e a relação da largura do CFC e o concreto. Conforme evidências apontadas por TENG *et al.* (2002), a ruptura da interface concreto reforço, para resistências à compressão em torno de 25 MPa, ocorre em uma fina camada de concreto adjacente ao compósito. Já para adesivos de baixa resistência ou substratos de resistências à compressão superiores a 50 MPa conduzem a uma ruptura interlaminar concreto-reforço.

A seguir são descritos alguns estudos sobre a resistência de aderência entre o compósito e o concreto.

#### 2.4.1. CHEN e TENG (2001)

CHEN e TENG (2001) desenvolveram um modelo para avaliar a resistência de aderência e o comprimento efetivo de ancoragem para polímeros reforçados com fibras e chapas de aço coladas na superfície do concreto. A Figura 2.2 mostra a representação esquemática do mecanismo para avaliação da resistência de aderência por meio de ensaios de cisalhamento simples e duplo.

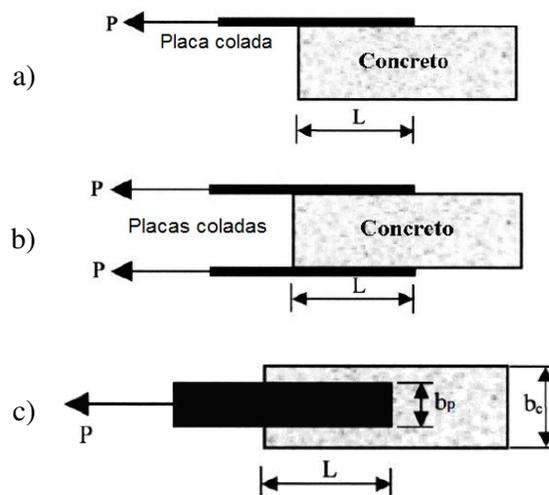


Figura 2.2 – a) Cisalhamento simples; b) Cisalhamento duplo; c) Vista superior; adaptada de CHEN e TENG (2001).

O modelo de cálculo da resistência de aderência proposto por esses autores foi baseado na combinação de análise da mecânica da fratura com dados experimentais.

Observa-se que as variáveis básicas do fenômeno são: o comprimento de ancoragem ( $L$ ), a largura do substrato ( $b_c$ ) e a largura do reforço ( $b_p$ ).

A relação entre a largura do reforço e a largura do elemento de concreto afeta significativamente a resistência de aderência. Se o reforço apresentar uma largura inferior à largura do elemento de concreto, a transferência de esforços do reforço para o concreto conduz a uma distribuição de tensões não uniforme ao longo da largura do elemento de concreto. Essa diferença pode resultar, ainda, em um aumento nas tensões de cisalhamento na interface por conta da contribuição do concreto que se encontra fora da área de aderência. A relação entre estas larguras, denominada de coeficiente de largura de reforço ( $\beta_p$ ), é determinada por meio da equação:

$$\beta_p = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_p}{b_c}}{1 + \frac{b_p}{b_c}}} \quad (2.1)$$

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{\sqrt{f'_c}}} \quad (2.2)$$

onde

$L_e$  – comprimento de ancoragem efetivo (mm);

$E_f$  – módulo de elasticidade do reforço (MPa);

$t_f$  – espessura do reforço (mm);

$f'_c$  – resistência à compressão do concreto (MPa).

Segundo os autores esse modelo é mais conveniente para a aplicação prática porque usa a resistência do concreto, obtida por meio de ensaios de corpos-de-prova cilíndricos à compressão simples.

A partir do valor do comprimento de ancoragem efetivo pode-se determinar a força máxima resistida pelo reforço, sem que ocorra o descolamento ou arrancamento do mesmo.

$$P_u = 0,427 \beta_p \beta_L \sqrt{f'_c} b_p L_e \quad (2.3)$$

$$\beta_L = \begin{cases} 1 & \text{se } L \geq L_e \\ \text{sen} \left[ \frac{\pi L}{2 L_e} \right] & \text{se } L \leq L_e \end{cases} \quad (2.4)$$

Para obter a máxima tensão de aderência no reforço divide-se o valor da força  $P_u$  pela área da seção transversal do reforço:

$$\sigma_{db} = \frac{P_u}{b_p t_f} \quad (2.5)$$

#### 2.4.2. NAKABA *et al.* (2001)

NAKABA *et al.* (2001) realizaram ensaios com corpos-de-prova reforçados com laminados de polímeros reforçados com fibras (PRF) utilizados para se obter diretamente as tensões de aderência do sistema concreto-compósito (Figura 2.3).

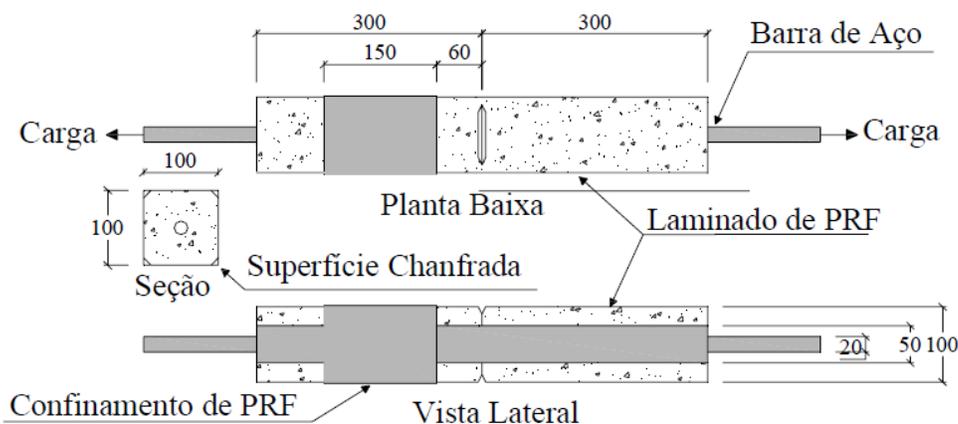


Figura 2.3 – Corpos-de-prova para o ensaio de aderência; adaptada de NAKABA *et al.* (2001).

Os corpos-de-prova consistem em um bloco de concreto de 100 mm x 100 mm x 60 mm com um chanfro no centro, duas barras de aço e laminados de PRF. As espessuras dos laminados variaram de 0,1 mm a 0,4 mm.

O reforço foi colado nos dois lados do corpo-de-prova, sendo que um dos lados foi reforçado com PRF confinado, admitindo-se que o descolamento ocorresse apenas do lado oposto, onde os extensômetros elétricos foram posicionados.

A força de tração foi obtida pela diferença entre a deformação específica da seção  $i$  e a deformação específica relativa à seção  $i-1$ . A média da tensão de aderência  $\tau_{b,i}$  é dada pela Equação 2.6:

$$\tau_{b,i} = \frac{(\varepsilon_{f,i} - \varepsilon_{f,i-1})t_f E_f}{\Delta l_b} \quad (2.6)$$

onde

$\varepsilon_{f,i}$   $\varepsilon_{f,i-1}$  – deformação específica no tecido de PRF;

$t_f$  – espessura do tecido de PRF;

$E_f$  – módulo de elasticidade do PRF;

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

A Figura 2.4 mostra as curvas de tensão de aderência local vs. deslocamento para cada intervalo de medidas dos extensômetros de todos os corpos-de-prova. As curvas tendem para uma forma parabólica.

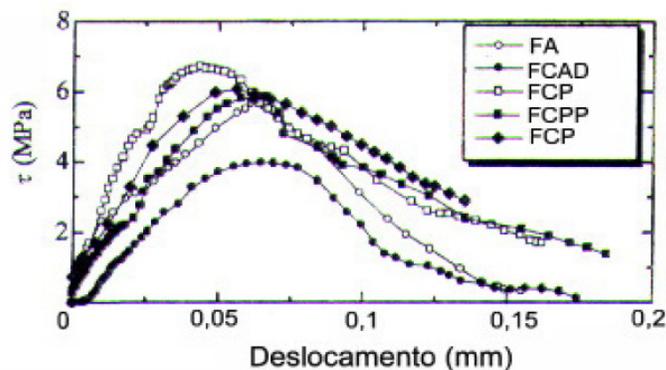


Figura 2.4 – Tensão de aderência vs. deslocamento; adaptada de NAKABA *et al.* (2001).

Esses autores concluíram que:

- a espessura do PRF influencia tanto a resistência de aderência quanto a forma de distribuição da tensão;

- a relação tensão/escorregamento na aderência local não é influenciada pelo tipo de fibra;
- a máxima tensão de aderência aumenta quando a resistência à compressão do concreto também aumenta.

### 2.4.3. MENEGHEL (2005)

MENEGHEL (2005) estudou a aderência entre tecidos de fibras de carbono e o concreto por meio de ensaios tração-compressão de corpos-de-prova compostos de dois blocos de concreto (móvel e fixo) de 200 mm x 200 mm x 200 mm, ligados por tiras de tecido de fibras de carbono coladas nos lados opostos desses blocos (Figura 2.5).

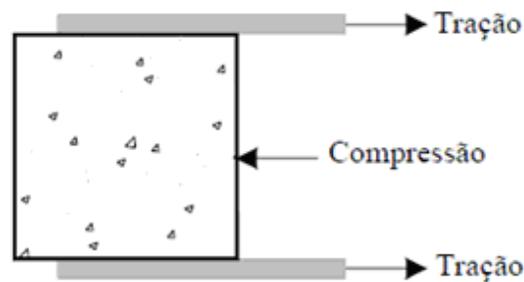


Figura 2.5 – Esquema simplificado do ensaio de tração-compressão; adaptada de MENEGHEL (2005).

As variáveis de estudo foram a resistência do concreto (25 MPa, 35 MPa e 45 MPa) e a largura do tecido de fibras de carbono (50 mm e 100 mm). Os resultados evidenciaram que tanto a resistência do concreto como a largura do tecido não influenciam a resistência de aderência. O valor característico da resistência de aderência obtido foi de  $\tau_{bk} = 1,45$  MPa.

MENEGHEL (2005) também observou que existe um comprimento de ancoragem efetivo no qual as tensões de aderência são realmente distribuídas. Esse valor é de 120 mm (Figura 2.6).

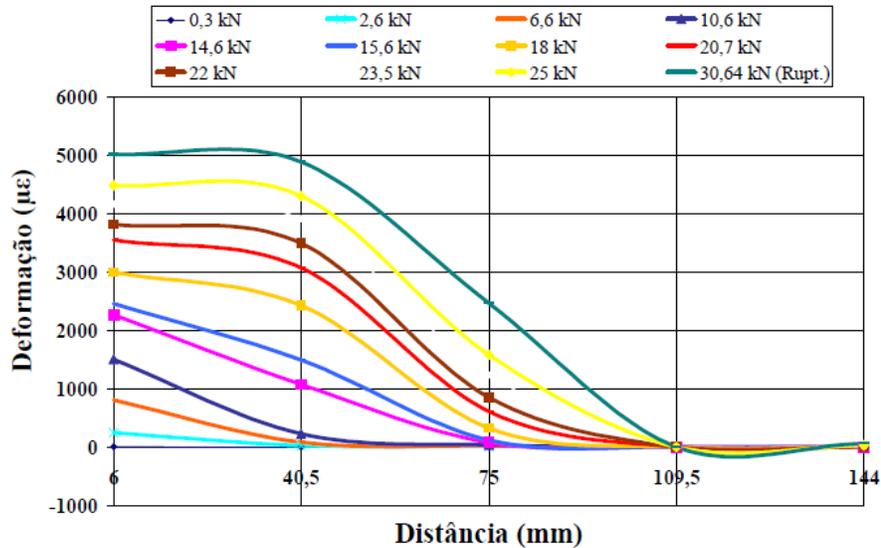


Figura 2.6 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem; adaptada de MENEGHEL (2005).

#### 2.4.4. PACHECO (2006)

PACHECO (2006) estudou a aderência entre CFC e o substrato de concreto em continuidade à pesquisa de MENEGHEL (2005). Os parâmetros estudados foram o tipo de carregamento atuante (carregamento monotônico crescente e carregamento em ciclos de carga e descarga), a resistência à compressão do concreto (23,3 MPa, 28,4 MPa e 37,1 MPa) e os diferentes tipos de superfícies de aderência do CFC ao substrato de concreto (face lisa e face rugosa).

Os resultados desse trabalho indicam que os diferentes modos de carregamentos não influenciam a resistência de aderência e os diferentes tipos de superfícies do concreto, sobre as quais foram colados os CFC, pouco influenciaram a resistência de aderência. Para as superfícies rugosas o acréscimo na resistência de aderência foi da ordem de 5% (Figura 2.7).

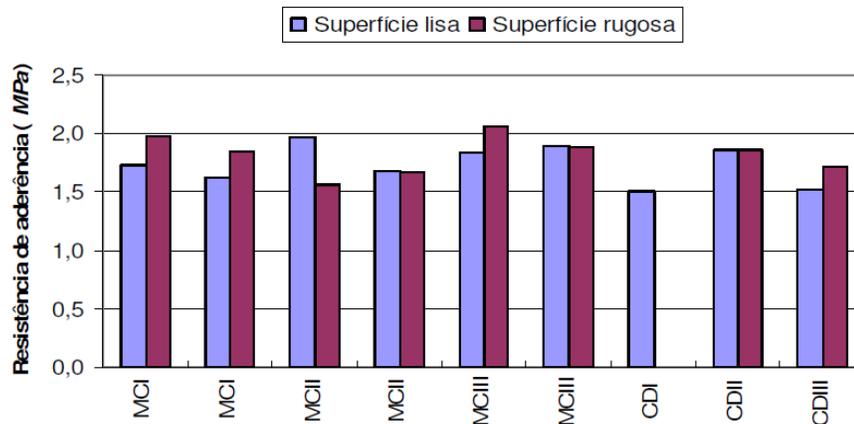


Figura 2.7 – Resistência de aderência ( $f_b$ ) vs. tipo de superfície do concreto; adaptada de PACHECO (2006).

PACHECO (2006) também afirma que a resistência à compressão do concreto não influencia a resistência de aderência. Porém, o módulo de elasticidade do concreto, que está associado à sua resistência à compressão, indica que existe essa dependência. A consideração do modelo de HOLZENKÄMPFER (1994) *apud* PACHECO (2006) adotado pela autora permite relacionar o parâmetro da energia de fratura ( $G_{F,teórico}$ ) com a resistência de aderência ( $f_b$ ).

$$G_{F,teórico} = \left( \frac{F_u}{b_f} \right)^2 \left( 1 + \frac{E_f A_f}{E_c A_c} \right) \left( \frac{1}{2E_f t_f} \right) \quad (2.7)$$

$$f_b = \frac{F_u}{l_{b,efet} b_f} \quad (2.8)$$

onde

$F_u$  – força última obtida no ensaio;

$l_{b,efet}$  – comprimento de ancoragem efetivo;

$b_f$  – largura do CFC;

$E_f$  – módulo de elasticidade do CFC;

$t_f$  – espessura do CFC;

$A_f$  – área do CFC;

$E_c$  – módulo de elasticidade do concreto;

$A_c$  – área do concreto do corpo-de-prova.



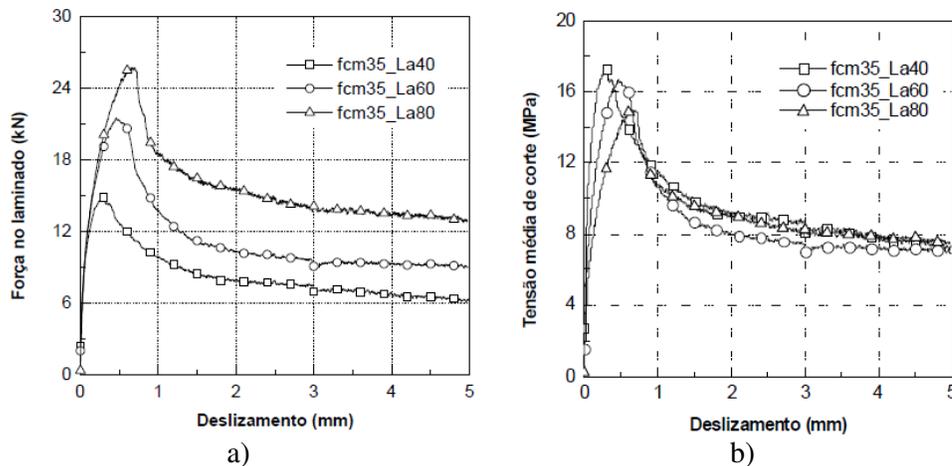


Figura 2.9 – a) Influência do comprimento de aderência ( $L_a$ ) na relação força de arrancamento vs deslizamento; b) Influência do comprimento de aderência ( $L_a$ ) na relação tensão média de corte vs deslizamento; adaptada de BARROS *et al.* (2007).

A Tabela 2.3 mostra os valores médios das principais propriedades avaliadas com base nos resultados obtidos nos ensaios, onde  $F_{máx}$  é a força máxima no laminado,  $\tau_{máx}$  é a tensão máxima de corte,  $G_f$  é a energia dissipada no ensaio,  $\varepsilon_{f,máx}$  é a deformação máxima registrada no extensômetro colado ao CFRP,  $\varepsilon_{f,u}$  é a deformação específica última, e  $S_{l,máx}$  é o deslizamento correspondente à força máxima aplicada no ensaio.

Tabela 2.3 – Valores das principais grandezas; adaptada de BARROS *et al.* (2007).

Grandeza	$L_a$ (40 mm)	$L_a$ (60 mm)	$L_a$ (80 mm)
$F_{max}$ (kN)	15	22,8	22,4
$\tau_{max}$ (MPa)	17,5	17,7	13,0
$G_f$ (MPa.mm)	48,3	43,9	38,4
$\varepsilon_{f,max}/\varepsilon_{f,u}$	42,1	64	62,1
$S_{l,Max}$	0,3	0,5	0,7

Da análise das Figuras 2.9 (a e b) e dos resultados incluídos na Tabela 2.3 esses autores constataram que:

- com o aumento do comprimento de aderência do CFRP a força na faixa do laminado aumenta;

- com o aumento do comprimento de aderência aumenta o deslizamento na fase pré-pico;
- a tensão ( $\tau_{m\acute{a}x}$ ) diminui com o aumento do comprimento de aderência;
- a energia de fratura tem uma tendência a diminuir com o comprimento de aderência, devido à diminuição da tensão máxima de corte com o comprimento.

## **2.5. Estudos sobre Cargas de Impacto Relacionadas aos Materiais Compósitos.**

O carregamento de impacto é caracterizado por uma grande quantidade de energia externa subitamente aplicada à estrutura. Devido ao complexo padrão da onda de tensão associada ao carregamento de impacto e aos complexos mecanismos de transferência e dissipação da energia, o processo de ruptura do concreto submetido a impacto ainda não é bem compreendido.

Neste item são apresentados resumos dos poucos estudos relacionados ao comportamento de materiais compósitos aplicados em elementos de concreto submetidos a carregamento dinâmico. Esses estudos propõem avaliar o desempenho ao impacto de estruturas de concreto às quais foram adicionados compósitos de fibras, com o intuito de melhorar o comportamento ao impacto.

### **2.5.1. ERKI e MEIER (1999)**

ERKI e MEIER (1999) estudaram o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas externamente com compósitos de fibras de carbono e chapas de aço, por meio de carregamento de impacto. A Figura 2.10 ilustra a configuração do carregamento de impacto, na qual uma das extremidades da viga simplesmente apoiada foi liberada de alturas pré-estabelecidas.

O dimensionamento do reforço de compósito de fibras de carbono foi realizado de forma a fornecer aproximadamente a mesma resistência total à tração dada pela tensão de escoamento das chapas de aço utilizadas no reforço das vigas de referência.

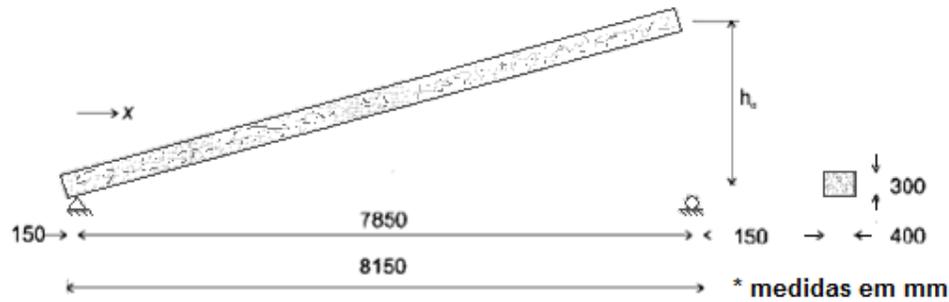


Figura 2.10 – Configuração das vigas; adaptada de ERKI e MEIER (1999).

Os resultados mostram que as vigas reforçadas com compósitos de fibras de carbono apresentaram bom desempenho ao impacto, porém, absorveram menos energia que as vigas reforçadas com chapas de aço.

Esses autores concluíram que:

- os modos de ruptura foram os mesmos para os dois tipos de reforço;
- a máxima capacidade de flexão das vigas reforçadas com compósitos de fibras de carbono aumenta com a taxa de carregamento;
- para as vigas reforçadas com chapas de aço a absorção é feita principalmente pelo escoamento do aço do reforço, e então pelo descolamento. Para as vigas reforçadas com compósitos de fibras de carbono a energia é absorvida através de fissuras longitudinais formadas no adesivo, e então na ruptura por tração das fibras;
- energia também é absorvida por do atrito, gerando calor entre as fissuras e as interfaces entre viga e reforço. Os compósitos de fibras de carbono armazenam energia quando são esticados devido às deformações da viga, sendo que a ruptura ocorre por tração e o descolamento do compósito ocorre devido à liberação da energia de deformação;
- com o aumento da taxa de carregamento aumenta também a resistência à compressão do concreto, a tensão de escoamento do aço, e a resistência à flexão de elementos de concreto armado.

## 2.5.2. WHITE *et al.* (2001)

WHITE *et al.* (2001) realizaram um estudo experimental para investigar os efeitos da taxa de deformação sobre o comportamento de vigas de concreto armado de 15 cm x 30 cm x 300 cm, reforçadas com polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP). A resistência à compressão do concreto aos 28 dias foi de 45 MPa e à tração foi de 3,3 MPa.

As vigas foram submetidas a quatro esquemas de carregamento:

- carregamento lento até a ruptura (taxa de deformação de  $10^{-6}$ /s);
- carregamento rápido até a ruptura (taxa de deformação de  $10^{-3}$ /s);
- carregamento lento até 150 kN, seguido de carregamento rápido até a ruptura;
- 12 ciclos de carregamento rápido até 120 kN, seguido de carregamento rápido até a ruptura.

Dois tipos de polímeros reforçados com fibras foram utilizados para reforçar as vigas (S e R). O tipo S consiste de chapas pultrudadas de 50 mm de largura e 1,2 mm de espessura, resistência máxima de 2400 MPa e módulo de elasticidade de 155 GPa. O tipo R consiste de reforço com tecidos pré-impregnados com 135 mm de largura e 0,11 mm de espessura, resistência máxima de 3000 MPa e módulo de elasticidade de 160 GPa. A Figura 2.11 mostra o esquema de ensaio e o detalhe da seção transversal da viga com o reforço e a Tabela 2.4 apresenta o resumo das vigas ensaiadas para os dois tipos de reforço, e os seus respectivos tipos de carregamento.

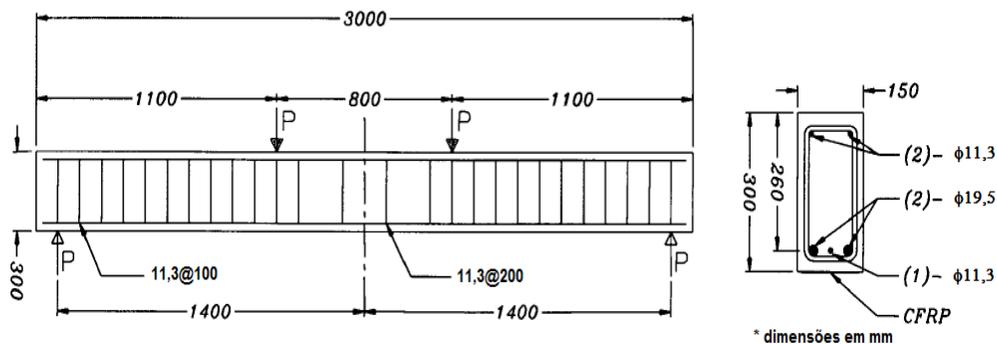


Figura 2.11 – Características das vigas; adaptada de WHITE *et al.* (2001).

Tabela 2.4 – Carregamento das vigas ensaiadas; adaptada de WHITE *et al.* (2001).

Vigas	Tipo de CFC	Tipo de Carregamento
C-B	Sem reforço	B
S-A	Lâmina	A
S-B	Lâmina	B
S-C	Lâmina	C
S-D	Lâmina	D
R-A	Tecido	A
R-B	Tecido	B
R-C	Tecido	C
R-D	Tecido	D

Nota: A – Carregamento lento até a ruptura; B – Carregamento rápido até a ruptura; C – Carregamento lento até 150 kN e rápido até a ruptura; D – Carregamento até 120 kN em 12 ciclos seguido de carregamento rápido até a ruptura.

Em geral, vigas de concreto armado com ou sem reforço de CFRP apresentam um gráfico tri linear de carregamento *vs.* flecha. A Figura 2.12 mostra as três fases típicas de ruptura. Na fase I não há fissuras na face tracionada do concreto, na fase II ocorre o surgimento e propagação das fissuras, e na fase III ocorre o escoamento até o colapso do elemento.

Os três modos de ruptura que ocorrem comumente são:

- escoamento da armadura seguido de esmagamento do concreto;
- escoamento da armadura seguido de ruptura da lâmina de CFC;
- destacamento da camada de concreto junto com a lâmina de CFC, ou descolamento da lâmina de CFC.

WHITE *et al.* (2001) obtiveram para as vigas S-A, S-B, S-D e R-D modos de ruptura do tipo destacamento do concreto, e para as demais vigas ocorreu o descolamento da lâmina de CFC.

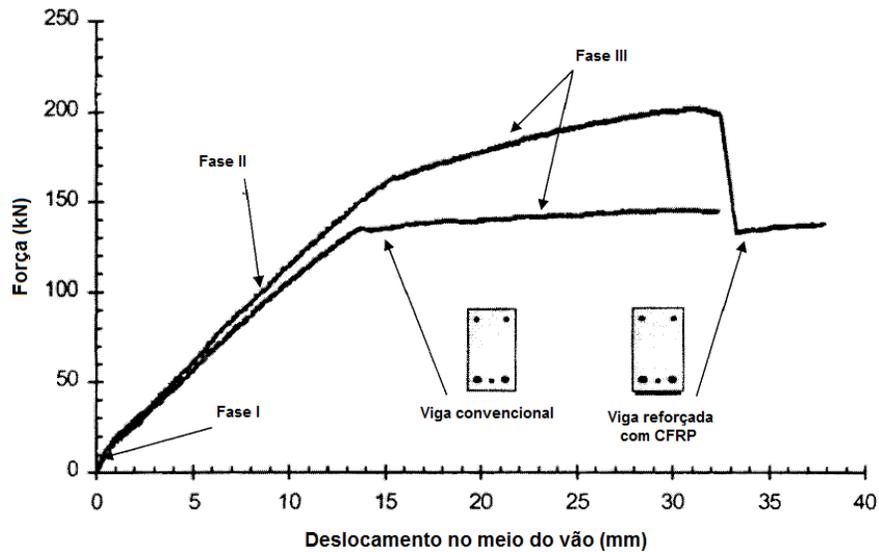


Figura 2.12 – Gráfico tri linear de carregamento vs. flexão; adaptada de HEFFERNAN (1997) apud.WHYTE *et al.* (2001).

WHITE *et al.* (2001) concluíram que o aumento da taxa de carregamento resulta em um aumento de quase 5% da resistência, rigidez e absorção de energia. A magnitude desse aumento depende da quantidade do reforço, da armadura e modo de ruptura. Porém, o modo de ruptura não foi afetado pela taxa de carregamento. As vigas submetidas a altas taxas de deformação ou pré-ciclos não tiveram a fissuração afetada.

### 2.5.3. TANG e SAADATMANESH (2003)

Esses autores realizaram uma investigação experimental com a finalidade de estudar os efeitos de cargas de impacto nas vigas de concreto armado reforçadas com fibras. Foram ensaiadas cinco vigas: duas reforçadas com compósitos de fibras de Kevlar, duas reforçadas com compósitos de fibras de carbono, e uma viga não reforçada. A carga de impacto foi aplicada deixando-se cair um cilindro de aço de uma altura conhecida na face superior da viga (Figura 2.13).

A orientação das fibras é paralela ao sentido longitudinal. Devido à vibração provocada pelo carregamento de impacto, as faces superiores e inferiores das vigas estão sujeitas a tensões cíclicas de tração e compressão, conseqüentemente as fibras foram coladas em ambas as faces.

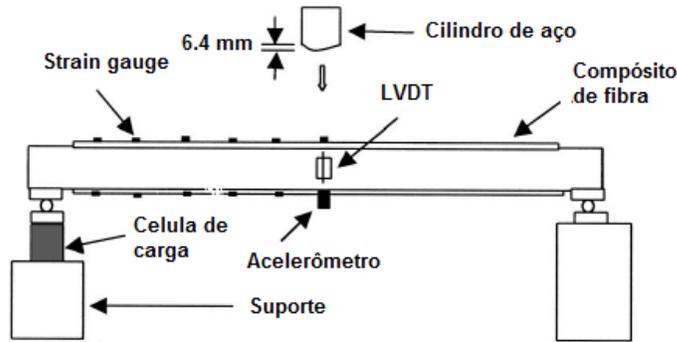


Figura 2.13 – Esquema de ensaio; adaptada de TANG e SAADATMANESH (2005).

Para diferentes alturas de queda a força de reação no primeiro meio-ciclo medido pela célula de carga consistiu em duas partes. Uma sendo a força de impacto produzida diretamente pela queda do cilindro e a outra a força de inércia produzida pela vibração da viga. Após o primeiro meio-ciclo a força de reação deve ser somente pela força de inércia. A força de reação foi aumentada com o aumento da altura de queda.

A Figura 2.14 mostra a comparação da força de reação das vigas da primeira queda até a ruptura da viga. Observa-se que as forças de impacto e de inércia dependem da rigidez estrutural. Quanto maior a rigidez, maiores são as forças de impacto e de inércia.

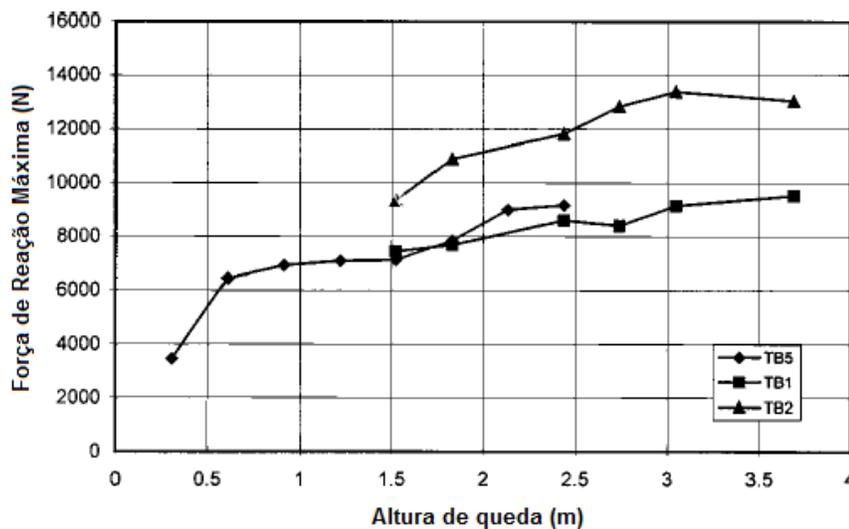


Figura 2.14 – Gráfico força de reação máxima vs. altura de queda do martelo; adaptada de TANG e SAADATMANESH (2003).

Com esse estudo, TANG e SAADATMANESH (2003) concluíram que:

- os compósitos de fibras aumentam significativamente a capacidade das vigas de resistirem a carregamentos de impacto e reduzem a flecha máxima. O aumento na capacidade resistente depende do tipo, da espessura, do peso e da resistência das fibras.
- a resposta dinâmica induzida pelo carregamento de impacto deve ser levada em consideração, desde que a deformação produzida pela força de impacto possa vir a fissurar o concreto.
- a força de reação da viga varia com o peso e as espessuras das fibras para a mesma energia de impacto.
- a rigidez da fibra de carbono reduziu a flecha. A flecha residual da viga foi reduzida com o aumento da rigidez.
- as fibras podem efetivamente diminuir a largura e o número de fissuras sob carregamento de impacto.
- compósitos podem aumentar a resistência ao cisalhamento das vigas por meio da redução da abertura das fissuras.

#### 2.5.4. PELLISSARI (2007)

PELLISSARI (2007) verificou os efeitos de cargas de impacto sobre a resistência de aderência entre o compósito de fibras de carbono e o concreto. Foram realizados ensaios a flexão de corpos-de-prova constituídos de dois blocos de concreto (400 mm x 200 mm x 150 mm) unidos por uma rótula na região superior e por tiras de CFC coladas nas faces inferiores dos blocos (Figura 2.15).

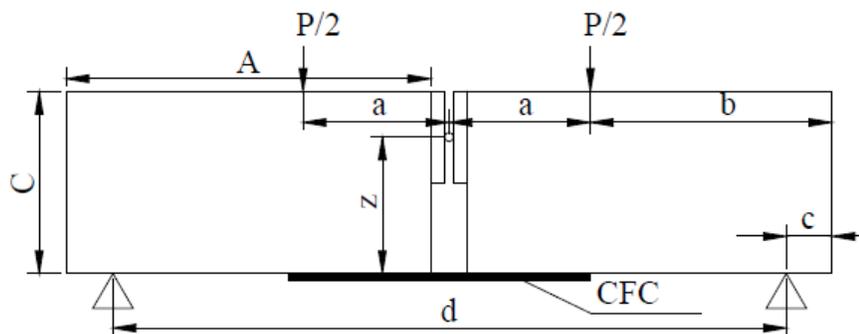


Figura 2.15 – Características geométricas dos corpos-de-prova estudados por PELLISSARI (2007).

O concreto empregado apresentou resistências à compressão entre 26 MPa e 42 MPa na ocasião do ensaio. A força de impacto amplificada foi alcançada por meio de um martelo de massa conhecida, solto de uma altura também conhecida, sobre a extremidade em balanço de um perfil metálico I.

Na face inferior do perfil metálico e no topo do elemento de viga foram montadas estruturas de aço reforçadas, fixadas por quatro barras. Assim a força gerada pelo martelo foi transferida à viga, sendo amplificada devido ao braço de alavanca (Figura 2.16).

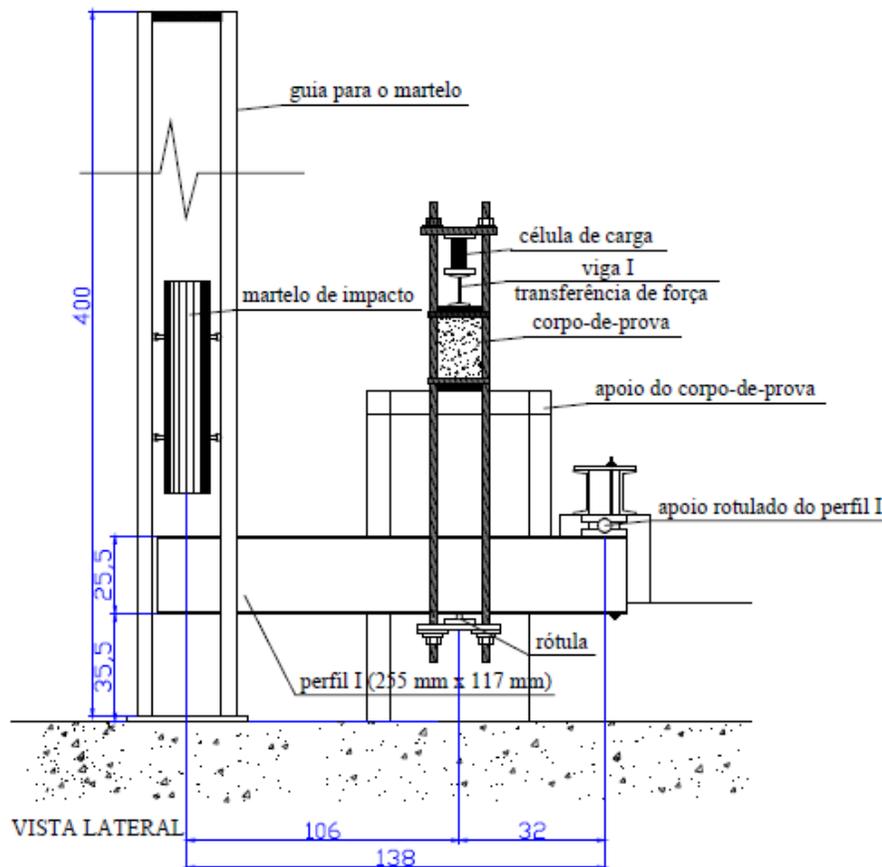


Figura 2.16 – Aparato de ensaio usado por PELLISSARI (2007).

Segundo esse autor, o aumento da taxa de carregamento proporciona um acréscimo na resistência de aderência entre o CFC e o concreto. A relação entre a taxa de tensão de aderência ( $T_T$ ) e a resistência de aderência ( $f_b$ ) é mostrada na Figura 2.17, onde se observa que essa relação pode ser considerada linear e representada pela Equação 2.9.

$$f_b = 0,0008T_\tau + 3,14 \quad (2.9)$$

$f_b$  em MPa e  $T_\tau$  em MPa/s.

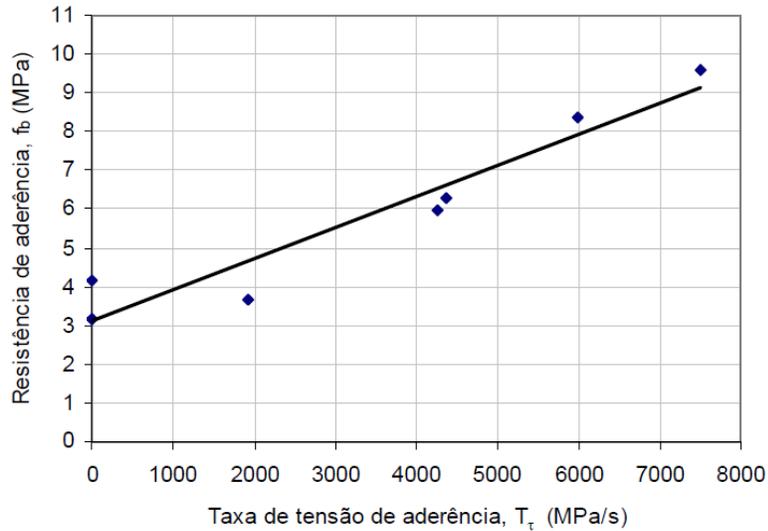


Figura 2.17 – Relação entre a taxa de tensão de aderência ( $T_\tau$ ) e a resistência de aderência ( $f_b$ ) para os corpos-de-prova que romperam por destacamento do concreto, adaptada de PELLISSARI (2007).

Os valores da taxa de carregamento, expressa em função da tensão normal  $\sigma$  nas fibras, variaram entre 6,06 MPa/s (ensaios estático) a 3.690.485 MPa/s (ensaios dinâmicos).