

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são apresentados trabalhos relacionados ao comprimento de ancoragem e a resistência de aderência do CFC-substrato de concreto. São mostradas de forma resumida as principais características dos materiais compósitos.

Os modos de ruptura em ensaios de aderência CFC-concreto são descritos em conjunto com as resistências últimas de aderência obtidas na bibliografia pesquisada.

2.1 Fibras

As fibras são as principais responsáveis pelas características de resistência e espessura do sistema de compósito, sendo que as fibras contínuas com maior uso em reforço estrutural são: a aramida, a fibra de vidro, a fibra de grafite e a fibra de carbono.

A fibra de aramida, comercialmente conhecida como Kevlar[®], é uma poliaramida de fibras contínuas. O módulo de elasticidade das fibras varia entre 70 a 200 GPa, com a deformação específica de ruptura variando entre 1,5% e 5%. As fibras de aramida são sensíveis às altas temperaturas, à umidade, à luz e apresentam problemas de relaxação e corrosão sob tensão.

Os compósitos de fibras de vidro têm módulo de elasticidade variando entre 70 GPa a 85 GPa, com deformação específica de ruptura entre 2% e 5%. São mais sensíveis à corrosão para tensões de grande magnitude e podem apresentar problemas de relaxação. As fibras de vidro são sensíveis à umidade, mas com a escolha certa da matriz ficam protegidas; apresentam um valor conveniente para as deformações específicas, e são mais baratas que as fibras de carbono (Escobar, 2003).

As fibras de carbono resultam do tratamento térmico com elevadas temperaturas, variando de 1000°C a 1500°C e cerca de 3000°C para fibras de grafite. Quanto maior a temperatura maior será o módulo de elasticidade da fibra, variando de 100 GPa a 300 GPa para as fibras de carbono e até 650 GPa para as fibras de grafite. As fibras de carbono apresentam como características básicas: boa resistência à corrosão, resistência a ataques químicos em geral, ótimo

comportamento quanto à fadiga sob atuação de cargas cíclicas, alta rigidez, peso específico da ordem de 1,8 g/cm³ e estabilidade térmica e reológica destacando-se das demais fibras (Machado, 2002).

A Figura 2.1 mostra as tensões e as deformações específicas dos diversos tipos de fibras, onde se verifica um comportamento elástico-linear para esses materiais, com a relação constitutiva indicando um comportamento frágil.

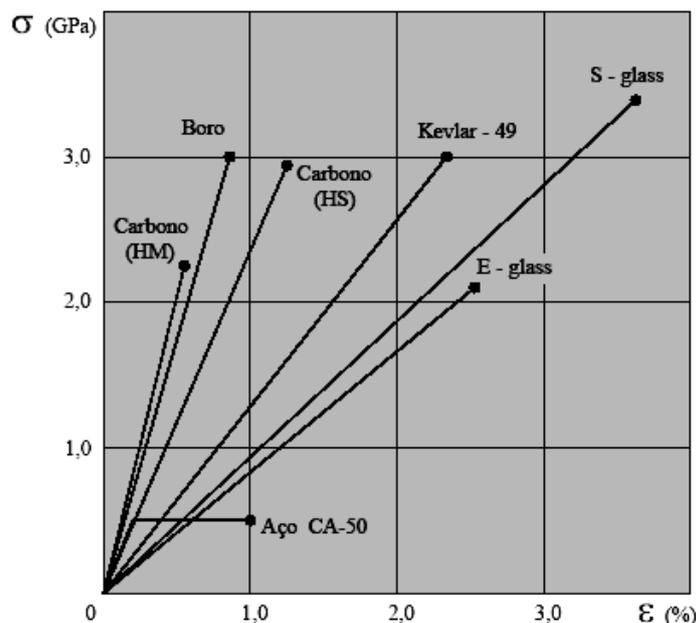


Figura 2.1 – Diagrama tensão-deformação específica, para diversos tipos fibras; adaptada de Souto (2003).

Souto (2003) relata que existe atualmente no mercado compósitos de fibras de carbono em três formas diferentes: chapas poliméricas reforçadas com fibras de carbono, que podem ser coladas para reforço de elementos estruturais em geral; tecidos em fibras de carbono, pré-impregnados para colagem em elementos estruturais por meio de resinas epoxídicas; e folhas flexíveis unidirecionais para colagem sobre o concreto, que podem ser utilizadas como elemento confinante.

2.2 Comprimento de Ancoragem e Tensão de Aderência

O comprimento de ancoragem efetivo l_e , é definido como sendo o comprimento ao longo do qual ocorre a transferência de tensão entre o compósito e o concreto. O parâmetro l_e varia de acordo com o tipo de sistema de reforço a ser

utilizado, com o carregamento aplicado e com as características dos materiais adotados no reforço.

Chen e Teng (2001) propuseram um modelo de cálculo para ancoragem baseado na combinação da análise da mecânica da fratura com dados experimentais. Esse modelo tem como objetivo calcular a resistência última de aderência e o comprimento de ancoragem efetivo. Esses dois parâmetros foram calculados usando um enfoque da Mecânica da Fratura Não Linear (MFNL) de acordo com as seguintes expressões:

$$P_u = 0,427\beta_p\beta_L\sqrt{f'_c b_p L_e}, \quad N \quad (2.1)$$

onde

$$\beta_L = \begin{cases} 1 & \text{se } L \geq L_e \\ \text{sen} \left[\frac{\pi L}{2L_e} \right] & \text{se } L < L_e \end{cases} \quad (2.2)$$

$$\beta_p = \frac{\sqrt{2 - \frac{b_p}{b_c}}}{\sqrt{1 + \frac{b_p}{b_c}}} \quad (2.3)$$

$$L_e = \sqrt{\frac{E_p t_p}{\sqrt{f'_c}}}, \quad \text{mm} \quad (2.4)$$

onde

$E_p t_p$ é dado em $MPa \cdot mm$;

f'_c é dado em MPa .

A razão entre a largura do compósito e a largura do elemento de concreto $\frac{b_p}{b_c}$ tem um efeito significativo sobre a resistência última de aderência. Se a largura do compósito for menor do que a do elemento de concreto, a transferência de forças do compósito para o concreto leva a uma distribuição de tensões não uniforme ao longo da largura do elemento de concreto. Uma pequena largura do compósito b_p , comparada com a largura do elemento de concreto b_c , pode

resultar em tensões tangenciais maiores no adesivo durante a ruptura, atribuídas à contribuição do concreto fora da área de aderência.

Substituindo-se a expressão 2.4 e

$$\sigma_{db} = \frac{P_u}{b_p t_p}$$

na expressão 2.1 tem-se a tensão de ruptura no compósito:

$$\sigma_{db} = 0,427 \beta_p \beta_L \sqrt{\frac{E_p \sqrt{f_c}}{t_p}} = 0,4 \beta_p \beta_L \sqrt{\frac{E_p \sqrt{f_{cu}}}{t_p}} \quad (2.5)$$

Miller *et al.* (1999) desenvolveram um modelo teórico para o cálculo do comprimento efetivo e da força última para a aderência do CFC ao concreto, baseando-se numa aproximação linear dos resultados dos ensaios em conjunto com os resultados experimentais do método de Maeda *et al.* (1997) (expressão 2.6), que utiliza um modelo analítico para estimar a força última e considera uma distribuição linear de tensão antes do descolamento ocorrer. Esses autores ensaiaram 18 vigas T invertido, simplesmente apoiadas (Figura 2.2). As características do compósito de fibras de carbono eram: largura de 51 mm, espessura de 0,165 mm, módulo de elasticidade de 228 GPa. O modo de ruptura foi por descolamento do CFC. Ao longo de comprimento efetivo de ancoragem o CFC resiste à força aplicada, e a partir desse comprimento não se obtém deformações específicas (Figura 2.3).

$$L_e = -0,432 t_f E_L + 94,3 \quad (2.6)$$

sendo

L_e – comprimento de ancoragem efetivo, mm;

t_f – espessura do compósito de fibras de carbono, mm;

E_L – modo de elasticidade, GPa;

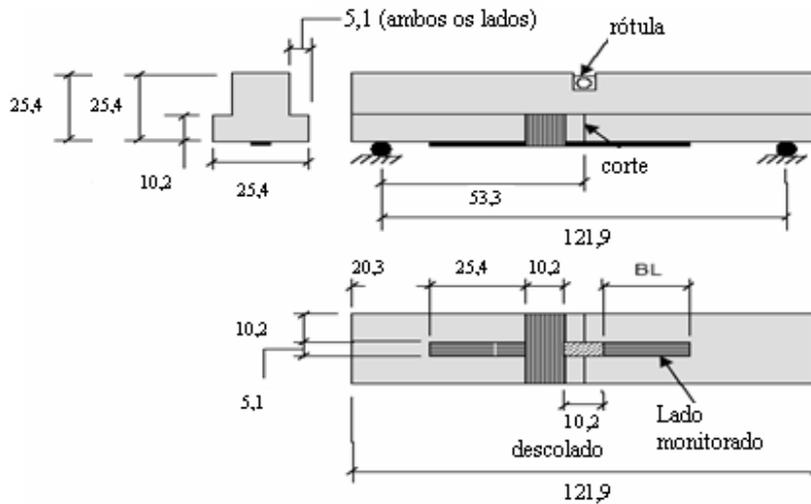


Figura 2.2 – Corpo-de-prova para o ensaio de aderência; adaptado de Miller (1999).

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 (Figura 2.3).

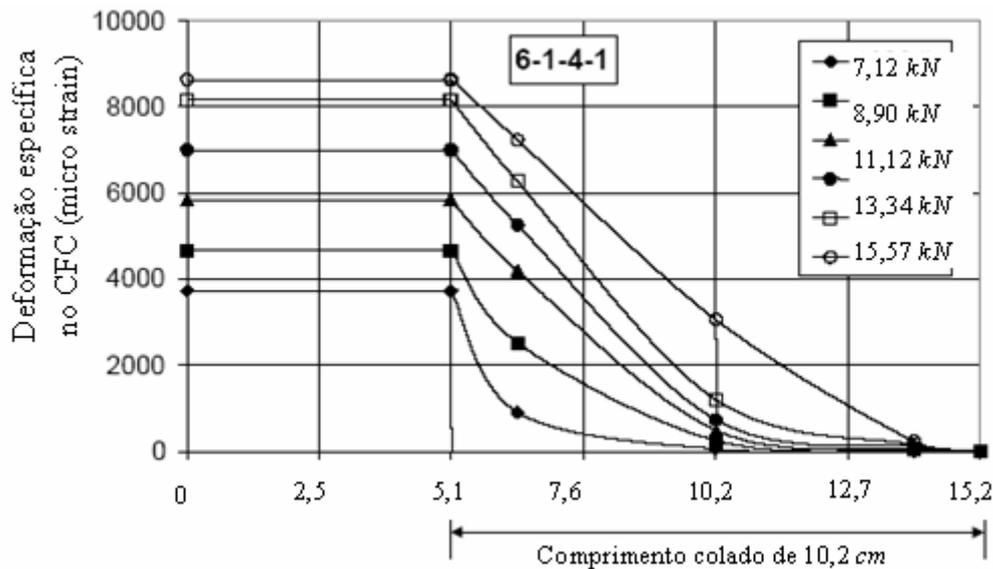


Figura 2.3 – Curva $\tau \times s$ para os corpos-de-prova; adaptada de Miller e Nanni (1999).

Meneghel (2005) e Pacheco (2006) estudaram o comportamento da aderência entre o concreto e o CFC por meio de ensaios tração-compressão de corpos-de-prova, compostos de dois cubos de concreto ligados por tiras de tecidos de CFC coladas em suas laterais opostas (Figura 2.4). O tecido utilizado apresentava as seguintes características: tecidos de fibras de carbono (Tec-Fiber) do tipo N-300, espessura = 0,165 mm, deformação específica na ruptura = 1,55 % ,

resistência à tração = $3.550 MPa$, módulo de elasticidade = $235 GPa$ e gramatura (folha) = $300 g/m^2$.

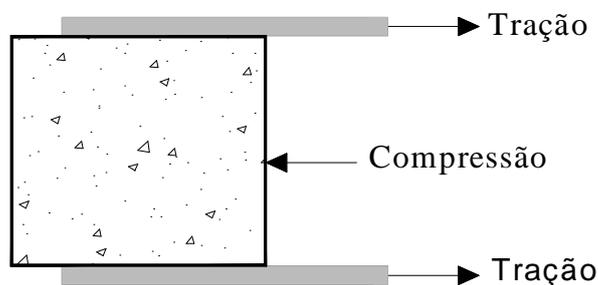


Figura 2.4 – Esquema do ensaio de tração-compressão; adaptada de Pacheco (2006).

Os trabalhos de Meneghel (2005) e de Pacheco (2006) tiveram como variáveis a largura do reforço de CFC, o carregamento atuante (carregamento monotônico crescente e carregamento em ciclos de carga e descarga), a resistência à compressão do concreto variando de 25 MPa até 45 MPa e diferentes tipos de superfícies de aderência do CFC ao substrato de concreto (face lisa e face rugosa).

Os resultados dos trabalhos de Meneghel (2005) e de Pacheco (2006) mostraram que: a largura do tecido não influencia as tensões últimas de aderência; 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 obtidas; para as diferentes resistências à compressão do concreto, as tensões de aderência não apresentaram grandes variações (Figura 2.5); com concreto com resistência $f_c < 23 MPa$ a resistência última pode ser inferior a $1,44 MPa$; os diferentes tipos de superfícies do concreto pouco influenciaram as resistências últimas de aderência tendo um acréscimo nas resistências últimas de aderência da ordem de 5% nas superfícies rugosas.

Essas autoras também concluíram que existe um comprimento de ancoragem efetivo, no qual as tensões de aderência são realmente distribuídas. Sendo esse valor igual a 120 mm (Figura 2.6). O valor característico (associado ao quantil de 5%) da tensão última de aderência obtida nesses trabalhos foi de $\tau_{bk} = 1,45 MPa$.

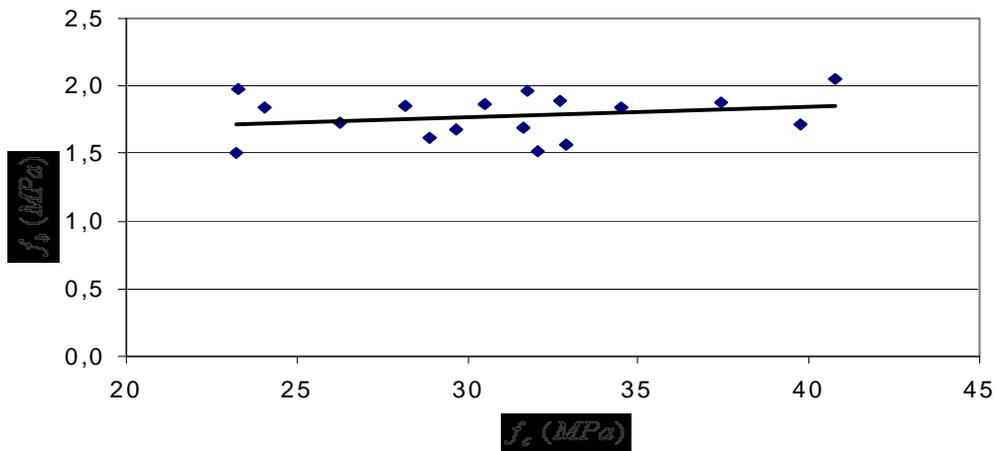


Figura 2.5 – Resistência aderência f_b vs. resistência do concreto f_c ; adaptada de Pacheco (2006).

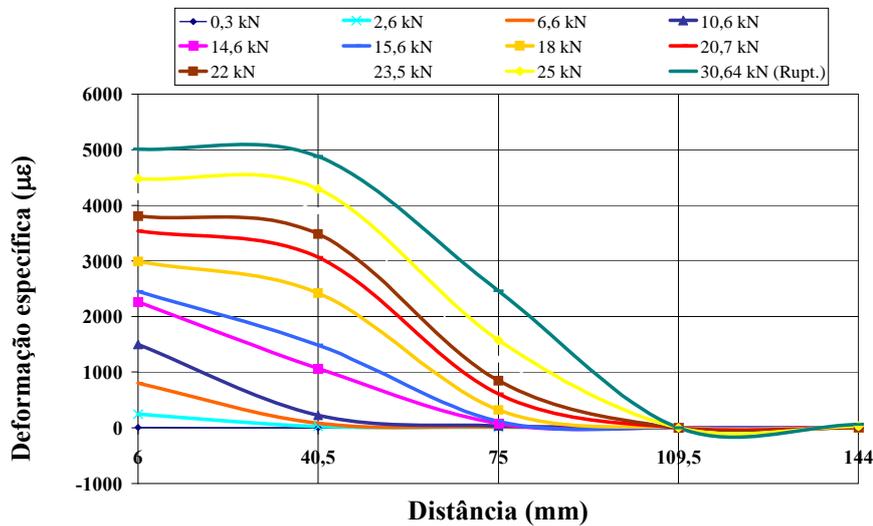


Figura 2.6 – Deformação específica x distância ao longo do comprimento de ancoragem; adaptada de Meneghel (2005).

Nakaba *et al.* (2001) desenvolveram ensaios de tração-tração para reforços externos em peças de concreto com o intuito de determinar o comprimento efetivo de ancoragem. As variáveis analisadas foram os tipos de fibras e a base de aplicação do reforço (Tabela 2.1 e Tabela 2.2). Estudos prévios feitos ainda por Nakaba *et al.* (2001) mostraram que o comprimento efetivo de ancoragem é inferior a 100 mm.

Tabela 2.1 – Tipos e características das fibras; adaptada de Nakaba *et al.* (2005).

<i>Tipo de Fibra</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Massa Específica (g/m²)</i>	<i>Resistência a Tração (MPa)</i>	<i>Módulo de Elasticidade (GPa)</i>
Fibra de carbono padrão	0,167	150/300	4200	261
Fibra de carbono menos espessa	0,165	300	4400	425
Aramida	0,193	285	2800	124

Tabela 2.2 – Tipos e características de base; adaptada de Nakaba *et al.* (2005).

<i>Tipo de Base</i>	<i>Resistência à compressão (MPa)</i>	<i>Resistência à Tração (MPa)</i>	<i>1/3 Módulo Secante E_c (GPa)</i>
Concreto C-5	57,60	3,25	29,00
Argamassa M5 - 1	47,10	4,65	24,50
Argamassa M5 - 2	50,90	4,08	25,50
Concreto C-2	23,80	1,98	22,00

Esses autores concluíram que: a espessura do compósito influencia tanto a resistência de ancoragem quanto a forma de distribuição de tensão, e que a relação tensão/deslocamento na aderência local não é influenciada pelo tipo de compósito; a tensão máxima de aderência aumenta quando a resistência do concreto também aumenta.

Confirmando o conceito sobre comprimento efetivo de CFC para o reforço em estrutura de concreto, Bizindavyi (1999) afirma que o comprimento de ancoragem de 80 mm e 220 mm é suficiente para desenvolver a capacidade máxima de reforço dos CFC com uma e duas camadas de tecido, respectivamente. Todavia, esses comprimentos são válidos somente para o sistema de reforço estudado por esse autor.

2.3 Modos de Ruptura

Em geral, as vigas de concreto armado com ou sem reforço de CFC, exibem um gráfico tri linear de força x flecha (Figura 2.7). Na fase 1 não há fissuras na face tracionada do concreto, na fase 2 ocorre o surgimento e propagação das

fissuras, e na fase 3 ocorre o escoamento da armadura de aço até o colapso do elemento. Os três modos de ruptura que ocorrem comumente são: escoamento da armadura seguido do esmagamento do concreto; escoamento da armadura de aço seguido da ruptura da lâmina de CFC, e escoamento da armadura de aço seguido do destacamento da lâmina de CFC. O último modo de ruptura pode ocorrer de duas maneiras: destacamento da camada de concreto junto com a lâmina de CFC (*bond splitting failure*) e deslocamento (descolamento) da lâmina de CFC (*laminate peeling failure*) de acordo com WHITE *et al.* (2001).

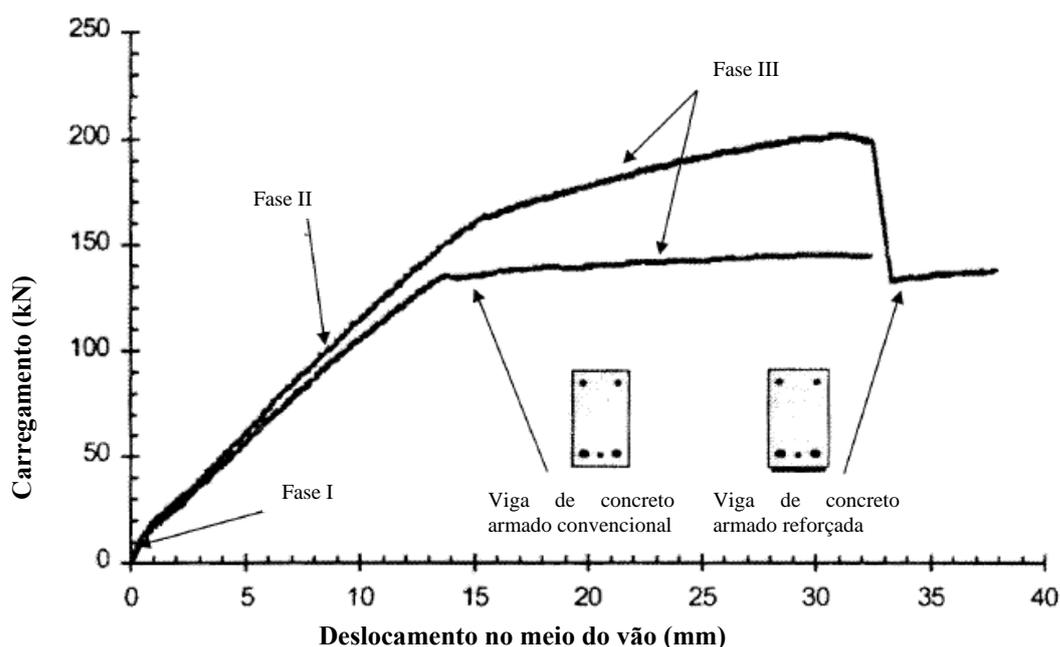


Figura 2.7 – Gráfico tri linear de carregamento x deslocamento; adaptada de White *et al.* (2001).

White *et al.* (2001) avaliaram vigas de concreto armado reforçadas com CFC. As variáveis adotadas foram: tipo de CFC e taxa de carregamento (Tabela 2.3). As vigas S-A, S-B, S-D e R-D ensaiadas por esses autores tiveram modos de ruptura do tipo destacamento do concreto (*splitting*) e as demais vigas romperam por deslocamento da lâmina de CFC (*peeling*).

Tabela 2.3 – Variáveis adotadas; 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, rápido até a ruptura; D – carregamento rápido até 120 kN em 12 ciclos, seguido de carregamento rápido até a ruptura.

2.4 Vigas Reforçadas com CFC sob Forças de Impacto

As vigas de concreto armado reforçadas externamente com CFC sob carregamento dinâmico apresentam aumento em sua capacidade de resistência. Com o aumento da taxa de carregamento há um aumento da capacidade de resistência das vigas.

As flechas máximas, o número e a abertura das fissuras são menores nas vigas reforçadas com CFC. Tang *et al.* (2005) constataram uma redução da flecha máxima na ordem de 30 % a 40 %.

A absorção de energia de vigas solicitadas por carga dinâmica depende das características elásticas dos materiais (concreto, aço, CFC, etc.). Jerome *et al.* (1997) verificaram que para uma dada taxa de deformação a viga tem uma absorção de energia fixa, correlacionada com o comportamento dinâmico do concreto. Erki *et al.* (1999) compararam em seu trabalho vigas reforçadas com CFC e aço, concluindo que as vigas reforçadas com aço absorviam mais energia que as vigas reforçadas com CFC, mas ambas tiveram ganho de resistência.

Os modos de ruptura das vigas solicitadas dinamicamente foram os mesmos modos de ruptura das vigas com forças estáticas.

Esses fatos são consensos entre os estudos feitos pelos autores White *et al.* (2001), Erki *et al.* (1999), Jerome *et al.* (1997) e Tang *et al.* (2005).

Não foram encontrados estudos referentes ao comportamento da resistência de aderência entre o CFC e o concreto sob carregamento com impacto.