

### 3 VIGAS DE CONCRETO REFORÇADAS COM CFC

#### 3.1. Introdução

Os compósitos de fibras de carbono surgiram como uma alternativa para a recuperação de estruturas no final da década de 1970, no Japão. O método foi largamente utilizado em confinamento de pilares danificados pela intensa atividade sísmica local, os quais precisavam de intervenções em curto intervalo de tempo (Joaquim, 2004).

O primeiro projeto de reabilitação estrutural com utilização de CFC no Brasil ocorreu em 1998 no viaduto Santa Tereza, localizado no município de Belo Horizonte, Minas Gerais (Figura 3.1). A estrutura era tombada como patrimônio histórico e a adoção deveu-se a aspectos estéticos (Beber, 2003).

O emprego do sistema de reforço com compósito de fibras de carbono possibilita acréscimo da capacidade de carga ou minimização das deformações de diferentes tipos de estruturas, podendo-se citar vigas solicitadas à flexão, torção e força cortante, lajes, pilares, paredes de alvenaria estrutural, silos, reservatórios, túneis e chaminés (Figura 3.2 e Figura 3.3).



Figura 3.1 – Reforço de lajes à flexão e de vigas à flexão e à força cortante (Silva Filho, 2007).



Figura 3.2 – Confinamento de pilares com CFC (Silva Filho, 2007).



Figura 3.3 – Reforço de vigas à flexão e à força cortante com CFC (Spagnolo, 2008).

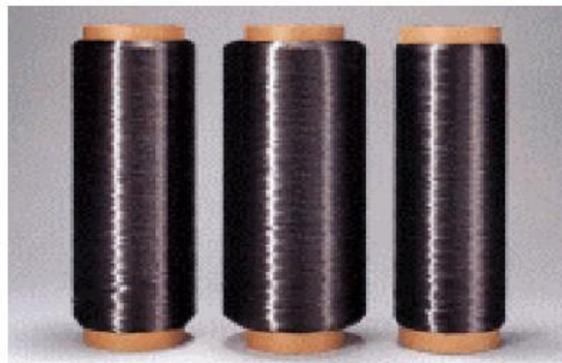
O CFC também pode ser incorporado no início da vida útil da estrutura como medida preventiva visando limitar a abertura de fissuras e reduzir as flechas. Essa alternativa é usual em regiões sujeitas a ações sísmicas.

### 3.2. Compósitos de Fibras de Carbono

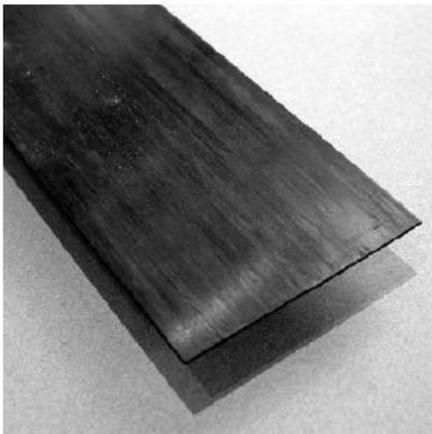
Os compósitos ou polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC) são materiais formados pela combinação de uma matriz polimérica e fibras de carbono. Uma das principais características desse sistema é um desempenho

mecânico superior ao apresentado pelos materiais constituintes atuando individualmente.

A fibra de carbono pode apresentar-se nas formas de fios, tecidos unidirecionais, tecidos bidirecionais, lâminas, barras e perfis (Figura 3.4); cada configuração remete a um diferente método de utilização e depende do tipo de estrutura, do grau da solicitação e das condições ambientais. Os dois principais sistemas de reforço estrutural com CFC são os pré-fabricados e os curados *in situ*. A Tabela 3.1 resume as características desses sistemas. Devido à versatilidade na aplicação desse compósito, faz-se necessário um rigoroso controle de qualidade, visto que a aplicação incorreta minora seu desempenho, podendo ocasionar perda da integridade.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.4 – Sistemas de reforço com fibras de carbono: (a) fios de fibra de carbono; (b) chapas pultrudadas de fibra de carbono; (c) tecidos de fibra de carbono. (Silva Filho, 2007).

Tabela 3.1 – Características e dados de instalação dos sistemas de reforço com CFC.

Características	Sistemas Pré-fabricados	Sistemas Curados <i>in situ</i>
Forma	Laminados	Mantas ou tecidos
Espessura	1,0 a 1,5 mm	0,1 a 0,5 mm
Utilização	Colagem dos elementos pré-fabricados com adesivo;	Colagem e impregnação das mantas/tecidos com resina;
Dados da Instalação	Indicado a superfícies planas, tolera pequenas imperfeições superficiais devido a rigidez do compósito associada à tixotropia do adesivo;	Independente da forma da superfície, desde que as arestas sejam chanfradas;
		Resina de baixa viscosidade;

O tecido de CFC usualmente é pré-impregnado com uma resina epoxídica e deve ser colado com a mesma à estrutura (Figura 3.5). A adoção da resina epóxi como matriz é a mais usual, pois essa apresenta melhor aderência ao concreto, principalmente os com resistências entre 30 *MPa* e 50 *MPa*, conferindo maior durabilidade e confiabilidade ao reforço. A resina garante a transferência das tensões do elemento estrutural para as fibras por meio de atrito e/ou adesão.

A resina epoxídica apresenta boa resistência à tração, boa resistência a agentes químicos e solventes, baixa retração durante a cura e bom comportamento à fluência. Ela também proporciona proteção mecânica e contra agentes agressivos às fibras. Estas têm como funções principais fornecer resistência e rigidez ao compósito, propriedades que variam de acordo com o tipo, tamanho, grau de concentração e disposição das fibras na matriz. A qualidade do reforço com CFC depende da quantidade de fibras em contato com a matriz, por isso é importante garantir a impregnação total do tecido.

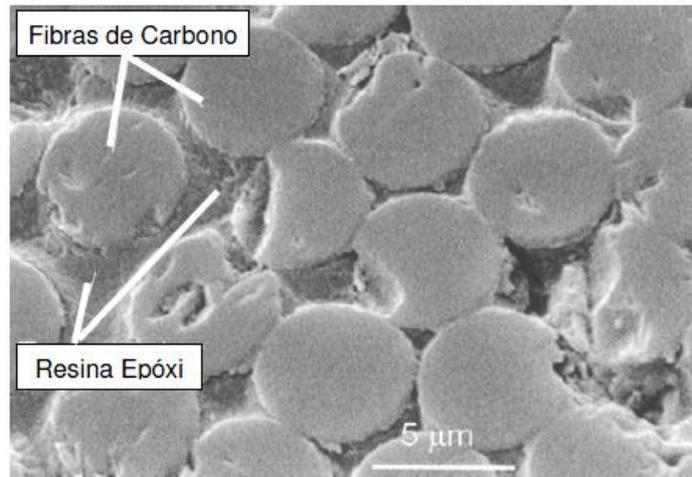


Figura 3.5 – Fibras de carbono envolvidas com resina epóxi (Basche *et al.* apud Silva Filho, 2007).

O sistema formado pela resina epoxídica e o tecido de fibras de carbono é bastante apropriado para reforços em estruturas de concreto armado, pois permite a aplicação de acordo com a curvatura do elemento, inclusive em arestas, desde que tratadas. Sua alta resistência e rigidez associadas a uma massa específica reduzida promovem aumento do desempenho mecânico sem acréscimo relevante da seção transversal, visto que a espessura é similar a de um papel de parede. Ainda é mais vantajoso que outros materiais utilizados em reforços se comparado a sua alta resistência à fadiga, baixo coeficiente de dilatação térmica, rapidez e facilidade de aplicação, além de ótima resistência a ataques químicos e corrosão, tornando os CFC particularmente indicados para intervenções em ambientes agressivos.

Mesmo com a necessidade de um investimento inicial superior apresentam uma boa relação custo-benefício, sendo uma boa alternativa a outros tipos de reforços externos, como chapas de aço associadas a adesivos estruturais. A aplicação e aderência do compósito ao substrato ocorrem sem necessidade de cimbramentos devido à sua reduzida massa específica.

Dentre as desvantagens pode-se citar a incompatibilidade com superfícies irregulares, baixa resistência a exposição de raios ultravioletas, o fato de estar mais sujeito ao vandalismo, pois pode ser facilmente rompido ao danificar-se as fibras, além de baixa resistência ao fogo devido a instabilidade da resina a altas temperaturas. A temperatura crítica é a que leva à transformação do estado físico

da resina de vítrea para elástica e dúctil, fazendo com que suas propriedades mecânicas, como resistência e rigidez, diminuam acentuadamente. A baixa resistência ao fogo não pode ser considerado obstáculo para aplicação do CFC porque o comprometimento em incêndios existe também em outras técnicas de reforço estrutural externo, e como nesses, o problema pode ser minorado com o uso de *sprinklers* e/ou pintura especial de resistência ao fogo no acabamento do reforço.

### 3.3. Modos de Ruptura

A importância do conhecimento e entendimento dos modos de ruptura torna-se importante na prática do reforço estrutural, pois limitam o acréscimo de resistência.

As vigas de concreto armado solicitadas à torção podem apresentar seis modos de ruptura principais:

- 1) ruptura por tração do concreto;
- 2) ruptura por esmagamento do concreto;
- 3) ruptura dos cantos;
- 4) ruptura devido ao escoamento das armaduras;
- 5) ruptura devido a problemas de ancoragem;
- 6) ruptura do reforço.

Os tipos (1) a (4) ocorrem em elementos não reforçados externamente com CFC, os tipos (2) e (5) podem ocorrer em vigas reforçadas, e o tipo (6) pode ocorrer nos dois casos. Todos os modos serão detalhados a seguir.

#### 3.3.1. Ruptura por Tração do Concreto

Trata-se de ruptura brusca causada pela componente de tração gerada por solicitações de torção, e está associada à falha do concreto. Ocorre em elementos com pouca ou sem armadura longitudinal e/ou transversal, sendo a última mais determinante para resistir à tração (Figura 2.11). Esse modo de ruptura deve ser evitado por ocorrer sem aviso prévio, tornando mais difícil uma redistribuição de tensões na estrutura.

### 3.3.2. Ruptura por Esmagamento do Concreto

É uma ruptura brusca característica de elementos superarmados. Como descrito na Seção 2.3.3, a componente de flexão gerada por solicitações de torção ocasiona um empenamento excessivo das faces laterais, ocasionando tensões adicionais nas diagonais, ultrapassando seu limite de resistência e provocando o esmagamento do concreto na face comprimida (Figura 3.6).

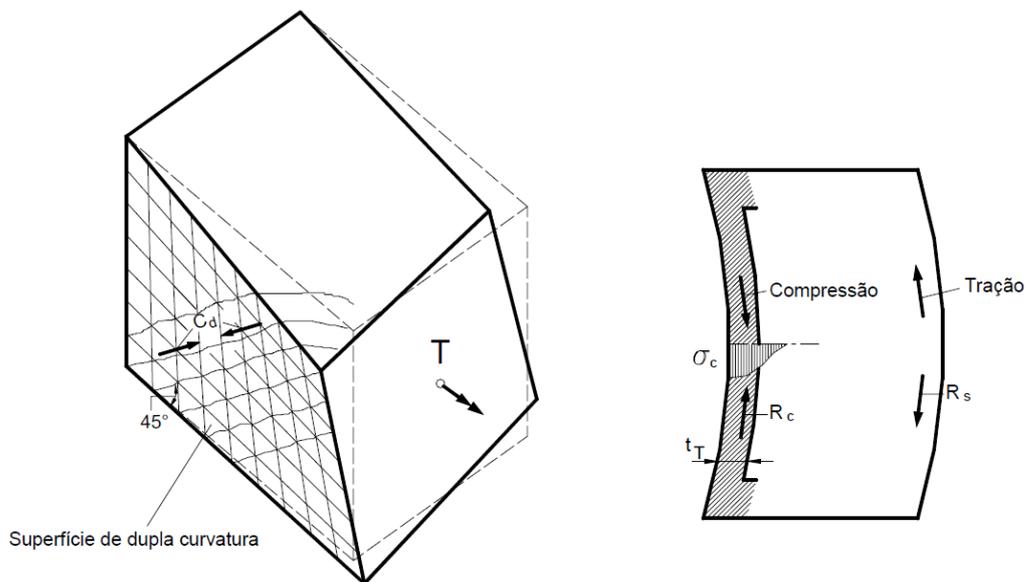


Figura 3.6 – Empenamento da viga gerado pela componente de flexão (Leonhardt e Mönnig, 1977).

### 3.3.3. Ruptura dos Cantos

Nos cantos de vigas de seção retangular ocorre a mudança de direção das bielas inclinadas gerando forças resultantes  $U$  (Figura 3.7). Se o valor dessas forças ultrapassar a componente de resistência à tração do concreto pode ocorrer o destacamento das quinas.

Os estribos e as barras longitudinais dos cantos contribuem para evitar essa forma de ruptura. Devem-se adotar diâmetros elevados para as barras longitudinais posicionadas nos cantos e um espaçamento máximo de  $10\text{ cm}$  para os estribos.

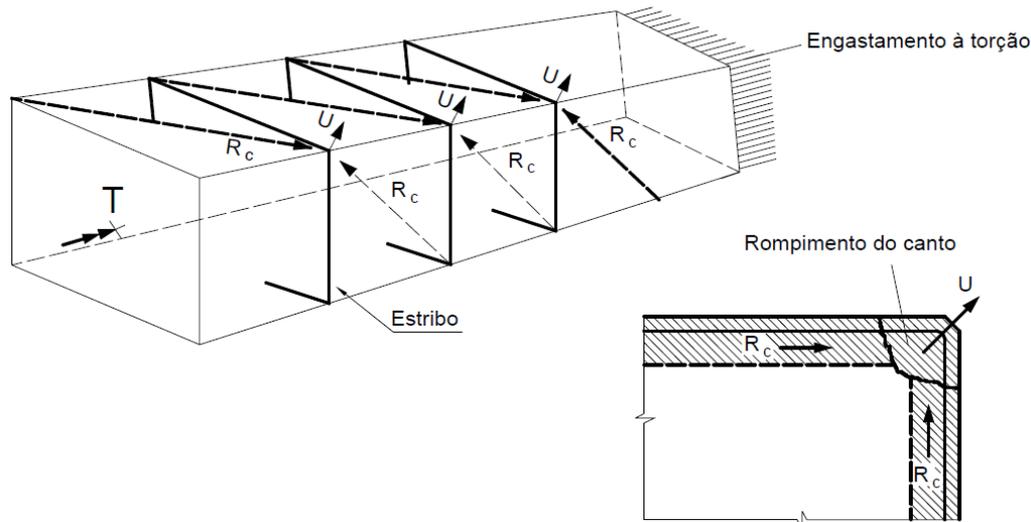


Figura 3.7 – Força resultante da mudança de direção das diagonais comprimidas (Leonhardt e Mönnig, 1977).

### 3.3.4. Ruptura Devido ao Escoamento das Armaduras

Tipo de ruptura ideal para vigas de concreto armado não reforçadas. A viga rompe lentamente, apresentando inicialmente fissuras de pequena abertura que se alargam até a ruína. A ruptura lenta permite uma avaliação da estrutura, possibilitando a adoção de medidas de proteção se observada precocemente, ou permitindo a evacuação de usuários em casos avançados.

### 3.3.5. Ruptura Devido a Problemas de Ancoragem

Em vigas de concreto armado a ruptura ocorre por mau funcionamento da ancoragem das armaduras longitudinal e transversal, havendo deslizamento das barras de aço. Esse tipo de ruptura pode ser evitado observando-se atentamente as recomendações sobre ancoragem e emenda de barras longitudinais, e adotando-se dobras a 45° no fechamento dos estribos. O uso de barras nervuradas também contribui, pois melhora a aderência das armaduras com o concreto.

Os elementos reforçados com CFC podem apresentar problemas de ancoragem do reforço. No caso de vigas reforçadas com CFC pode ocorrer o descolamento do reforço. Em geral ocorre devido à adoção de uma espessura

muito elevada para o CFC, gerando um acréscimo de tensões na interface entre o reforço e o concreto. Caso essas tensões ultrapassem a tensão de aderência admissível inicia-se um descolamento, em geral na região da emenda. Nesse processo a resina epoxídica se deteriora até cessar a transferência das tensões do elemento estrutural para as fibras, gerando um gradiente crescente de deformação específica entre o substrato e o compósito, até ser impossível manter a ligação e ocorrer o descolamento.

### 3.3.6. Ruptura do Reforço

É a ruptura desejável para vigas de concreto armado reforçadas, desde que o reforço atinja seu limite de resistência. No caso do reforço externo com compósitos de fibra de carbono, ocorre a ruptura do CFC sem destacamento da interface com o elemento estrutural (Figura 3.8). Esse mecanismo de ruptura indica que a área da seção transversal do reforço é insuficiente para resistir às componentes de tensão de tração.



Figura 3.8 – Ruptura do reforço em viga solicitada à torção (Silva Filho, 2007).

## 3.4. Revisão Bibliográfica

Apresenta-se as principais características, metodologias e conclusões de trabalhos recentes encontrados na literatura sobre reforços de vigas de concreto armado solicitadas à torção utilizando-se compósitos de fibra de carbono.

### 3.4.1. AMELI *et al.* (2007)

A pesquisa desenvolvida por Ameli *et al.* (2007) avaliou experimental e numericamente o acréscimo de resistência devido à aplicação de compósitos de fibras de carbono (CFRP) e compósitos de fibras de vidro (GFRP), em vigas de concreto armado submetidas à torção pura. Foram avaliados o momento de torção último, os modos de ruptura, a configuração das fissuras e a ductilidade do sistema.

Foram ensaiadas 12 vigas de concreto armado com diferentes configurações de reforço. Todas as vigas tinham seção  $15\text{ cm} \times 35\text{ cm}$  e  $1,90\text{ m}$  de comprimento e armadura interna composta de quatro barras longitudinais de N16 nos cantos e estribos de R6 a cada  $8\text{ cm}$ . Foram adotadas duas vigas de referência e as demais foram reforçadas com CFRP e GFRP segundo as configurações mostradas na Figura 3.9. A análise numérica foi realizada no programa ANSYS e procurou reproduzir as vigas ensaiadas utilizando para o concreto os elementos *Solid65*, para a armadura o *Link8* e para os FRP o *Shell99*.

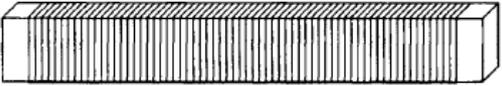
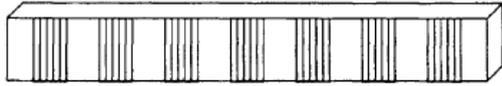
	<p>Vigas <b>CFE</b> e <b>GFE</b>: Uma camada de compósito, encamisadas em todo comprimento.</p>
	<p>Vigas <b>CFE2</b> e <b>GFE2</b>: Duas camadas de compósito, encamisadas em todo comprimento.</p>
	<p>Vigas <b>CFS</b> e <b>GFS</b>: Uma camada de compósito em 7 estribos de <math>10\text{ cm}</math> de largura espaçados <math>10\text{ cm}</math> entre si.</p>
	<p>Vigas <b>CJS</b> e <b>GJS</b>: Uma camada de compósito em 7 estribos em <b>U</b> de <math>10\text{ cm}</math> de largura espaçados <math>10\text{ cm}</math> entre si.</p>
	<p>Vigas <b>CJE</b> e <b>GJE</b>: Uma camada de compósito, encamisadas em todo comprimento em apenas três faces (estribo <b>U</b>).</p>

Figura 3.9 – Configurações de reforço adotadas por Ameli *et al.* (2007).

O esquema de ensaio é apresentado na Figura 3.10. Uma das extremidades foi fixada para impedir a rotação e os deslocamentos verticais e transversais. A solicitação foi simulada por um binário gerado pela aplicação de cargas opostas na extremidade livre, feita com ajuda de dois macacos hidráulicos equidistantes 50 cm do eixo da peça.



Figura 3.10 – Esquema de ensaio das vigas de Ameli *et al.* (2007).

Os experimentos permitiram observar que o compósito de fibras de carbono produz um acréscimo de resistência maior que o compósito de fibras de vidro. Os resultados experimentais mostram um aumento de 16 a 143% na resistência das vigas reforçadas com CFRP, e uma elevação de 18 a 110% nas vigas reforçadas com GFRP.

As curvas apresentados na Figura 3.11 mostram um crescimento expressivo do ângulo de torção desde o momento de fissuração até o momento de torção de ruptura. Esse fato está associado à ductilidade das vigas ensaiadas. Na maioria dos casos a ductilidade foi a mesma para os reforços com CFRP e GFRP de uma mesma configuração.

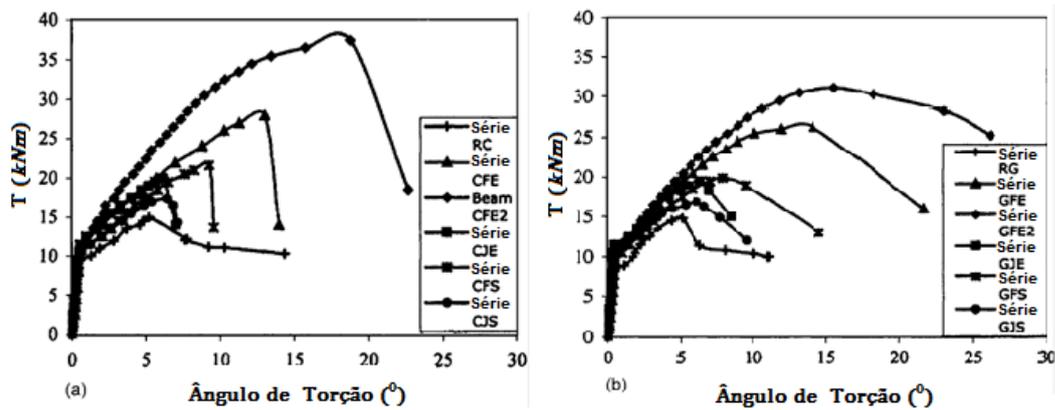


Figura 3.11 – Momento de torção versus ângulo de torção obtidos experimentalmente por Ameli et al. (2007): (a) vigas reforçadas com CFRP; (b) vigas reforçadas com GFRP.

Enquanto as vigas reforçadas com compósitos de fibras de carbono têm ruptura abrupta, as reforçadas com compósitos de fibras de vidro têm uma resposta progressiva. Essa característica levou Ameli *et al.* (2007) a sugerir que os reforços com GFRP seriam mais adequados a regiões com elevada atividade sísmica, por fornecerem maior energia de deformação.

O padrão das fissuras das vigas ensaiadas estava de acordo com os padrões encontrados na literatura. Nas vigas reforçadas a fissuração é mais uniforme e com aberturas de menor dimensão do que nas vigas sem reforço. Nas últimas é comum a ocorrência de uma fissura helicoidal individual de grande abertura ao longo de todo o comprimento. Todas as fissuras tinham inclinações próximas ou iguais a 45° (Figura 3.12).

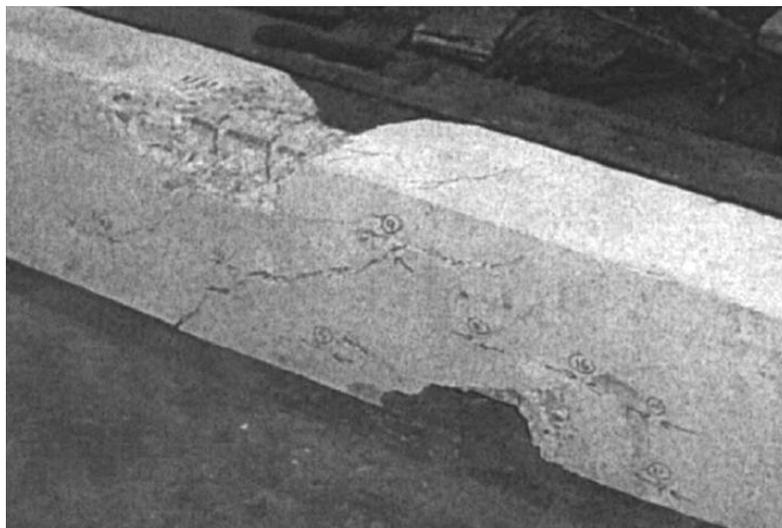


Figura 3.12 – Padrão das fissuras em uma das vigas de referência Ameli *et al.* (2007).

A implementação de um modelo que reproduzisse o comportamento não-linear do concreto armado associado ao comportamento linear do FRP apresentou várias dificuldades. A necessidade de utilizar elementos de pequenas dimensões para simular os compósitos e a limitação da razão de aspecto gerou um elevado número de elementos e nós.

Em quase todos os casos obteve-se resultados na ruptura muito próximos nos modelos experimentais e numéricos. Comparando-se as curvas de momento de torção *versus* ângulo de torção, obtidas experimental e numericamente para cada modelo, observou-se discrepâncias após a fissuração do concreto, havendo uma convergência novamente próximo à ruptura (Figura 3.13).

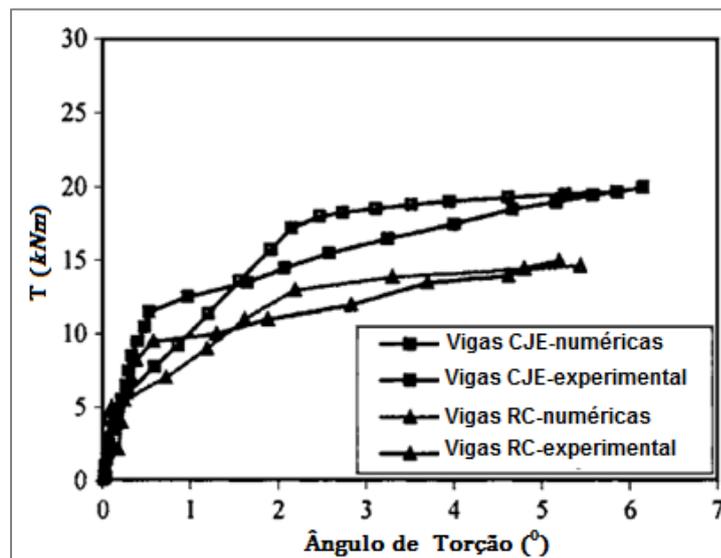


Figura 3.13 – Relação entre o momento de torção e ângulo de torção para as curvas obtidas numericamente e experimentalmente. Adaptado de Ameli *et al.* (2007).

### 3.4.2. CHIU *et al.* (2007)

A pesquisa desenvolvida por Chiu *et al.* (2007) avaliou experimentalmente o comportamento de vigas de concreto armado com baixa taxa de armadura submetidas à torção pura. Foram avaliados o padrão das fissuras, os momentos de torção relacionados à fissuração e à ruptura, e a ductilidade de cada viga.

Foram ensaiadas 13 vigas de concreto armado, quatro com  $f_{ck} = 40 \text{ MPa}$  e nove com  $f_{ck} = 70 \text{ MPa}$ , com três diferentes geometrias, visando avaliar a razão  $y/x$  entre os lados da seção da viga (Figura 3.14). A série A era composta de

elementos de seção transversal  $42\text{ cm} \times 42\text{ cm}$  podendo conter furos, gerando a razão  $y/x = 1,0$ ; a série **B** era composta de elementos de seção transversal cheia de  $35\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ , gerando a razão  $y/x = 1,43$ , e a série **C** era composta de elementos de seção transversal  $25\text{ cm} \times 70\text{ cm}$  podendo conter furos, gerando a razão  $y/x = 2,8$ .

\*COTAS EM mm

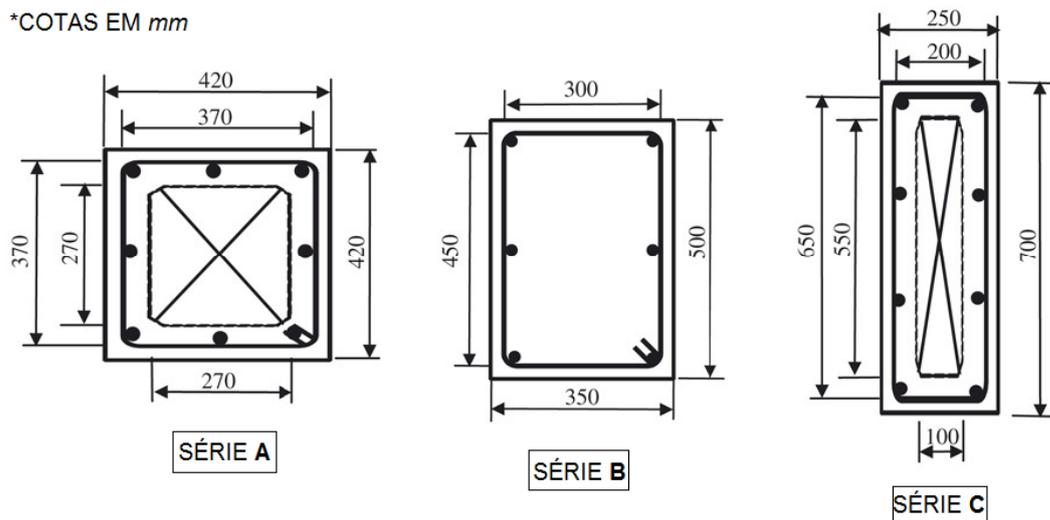


Figura 3.14 – Seções transversais. Adaptado de Chiu *et al.* (2007).

Todas as vigas tinham  $3,10\text{ m}$  de comprimento, cobrimento de  $2\text{ cm}$  e armadura interna variável. A armadura interna foi dimensionada com as recomendações do ACI318-05, visando menor taxa e maior espaçamento possível em cada caso, considerando a inclinação das fissuras igual a  $45^\circ$ . O valor da taxa total  $\rho_{total}$  variou entre  $0,87\%$  e  $1,41\%$  para todas as vigas. A armadura transversal adicional foi colocada aos extremos das vigas para forçar a ruptura a ocorrer na zona central (Figura 3.15).

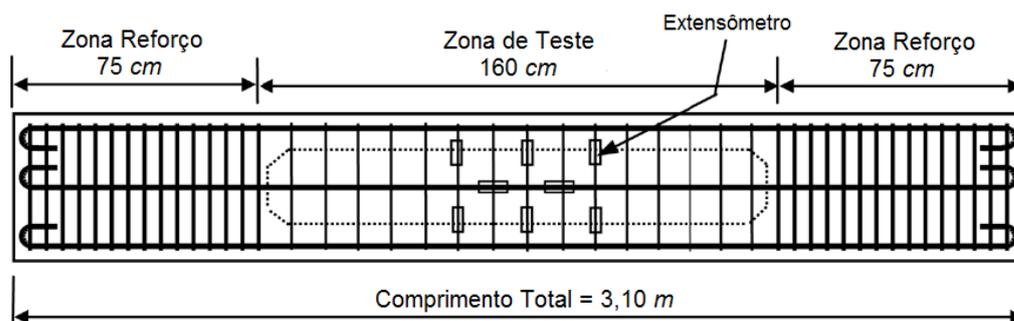


Figura 3.15 – Esquema de armadura e instrumentação interna. Adaptado de Chiu *et al.* (2007).

O esquema de ensaio é apresentado na Figura 3.16. As extremidades foram fixadas em braços de aço que foram utilizados para transferir a carga aplicada no perfil metálico por meio de apoios esféricos. A viga se apoiava em aparelhos circulares associados a roletes, que permitiram a livre rotação e deslocamentos longitudinais.

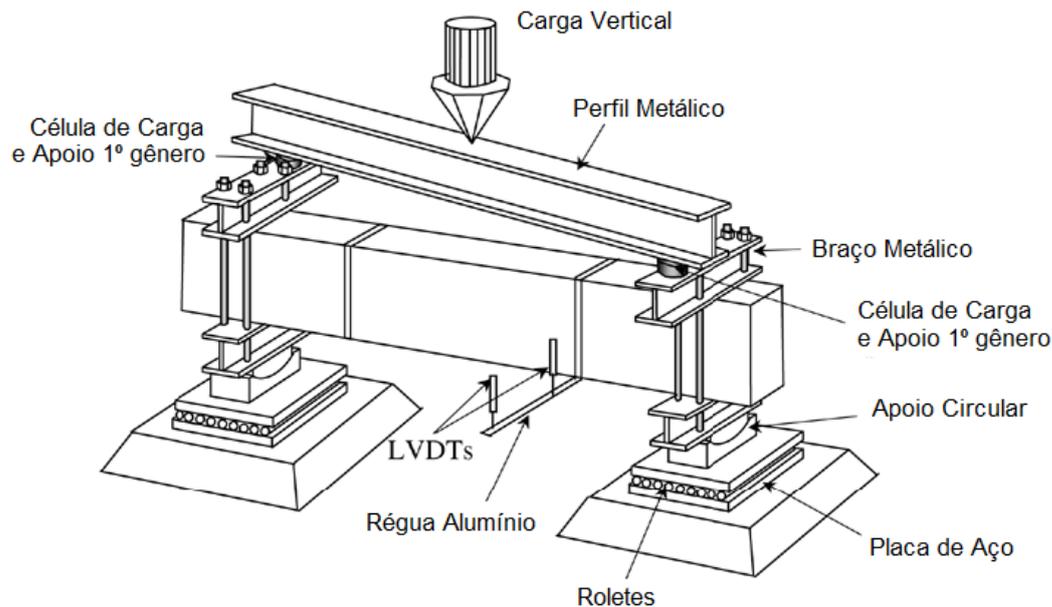


Figura 3.16 – Esquema de ensaio. Adaptado de Chiu *et al.* (2007).

As vigas foram instrumentadas com extensômetros elétricos de resistência colocados nas armaduras internas (Figura 3.15), dois pares de transdutores lineares para obtenção do ângulo de torção (Figura 3.16), e pontos de cobre que foram colados nas superfícies das vigas para monitorar as deformações no concreto (Figura 3.17).

As vigas com menores taxas de armadura apresentaram uma única fissura, seguida quase imediatamente pelo esmagamento do concreto na face oposta (

Figura 3.18), semelhante ao modelo proposto pela teoria da Flexão-Esconsa. As vigas com maiores taxas de armadura apresentaram padrões de fissuras helicoidais, remetendo ao modelo da Treliça Espacial Generalizada (Figura 3.19).

A ruptura brusca limitou-se às vigas executadas com concreto de alta resistência e baixa taxa de armadura. As vigas executadas com concreto de  $f_{ck} = 40 \text{ MPa}$ , com taxa de armadura total superior a 0,87%, e as executadas com  $f_{ck} = 70 \text{ MPa}$ , com taxa de armadura total superior a 0,95% apresentaram maior ductilidade.

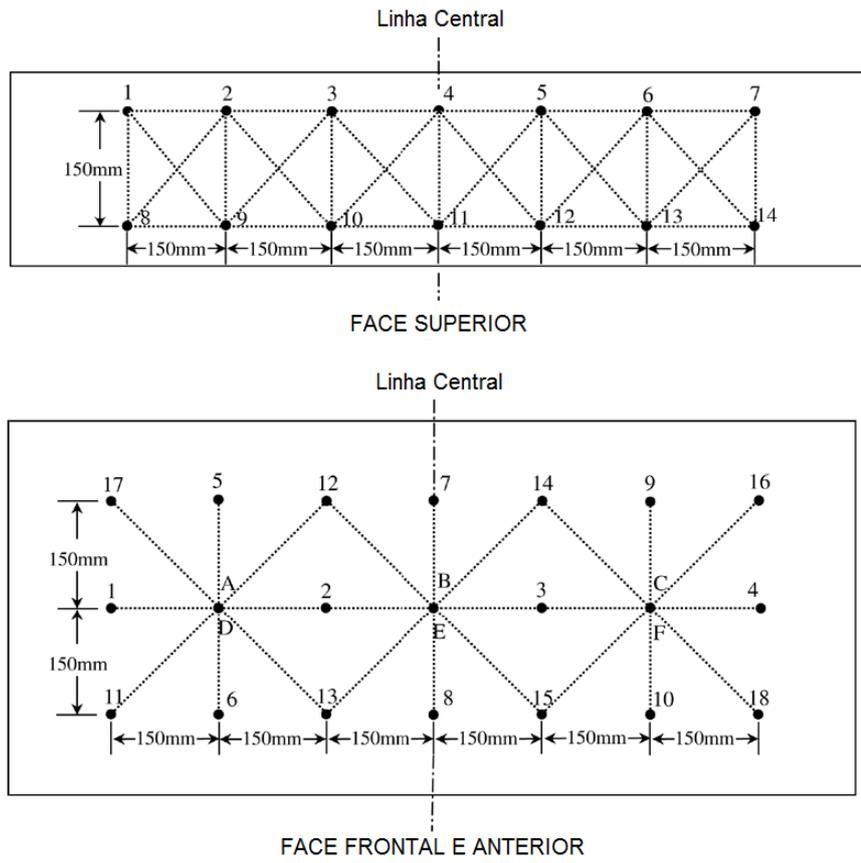


Figura 3.17 – Localização dos pontos de cobre para avaliação das deformações do concreto. Adaptado de Chiu *et al.* (2007).

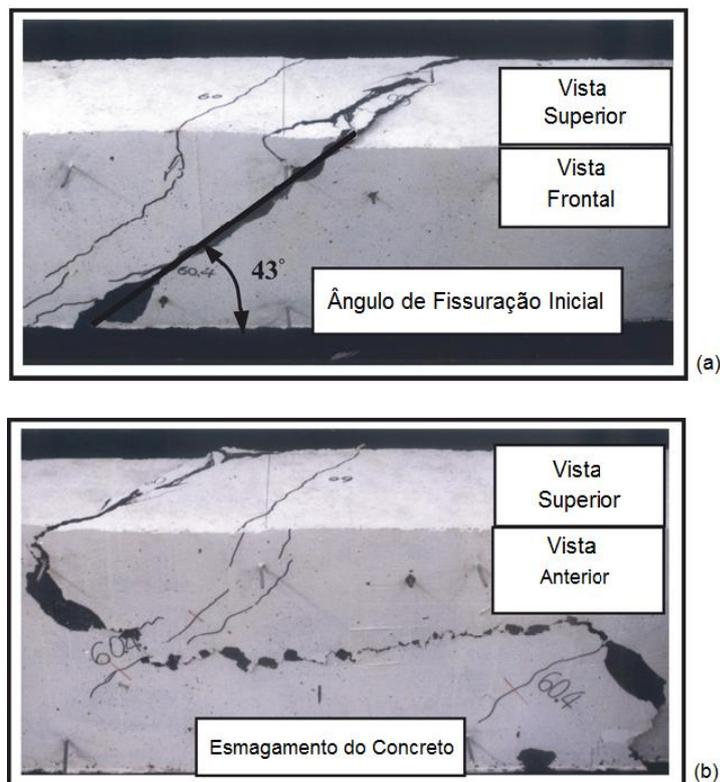


Figura 3.18 – Padrão das fissuras para viga HBS-74-17: concreto de alta resistência, seção B e baixa taxa de armadura. (a) tração; (b) compressão. Adaptado de Chiu *et al.* (2007).

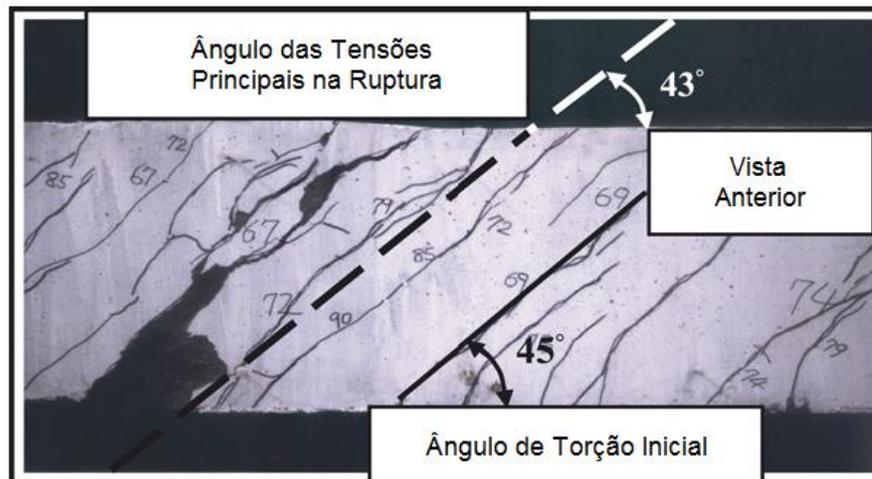


Figura 3.19 – Padrão das fissuras para viga HBS-60-61: concreto de alta resistência, seção B e alta taxa de armadura. Adaptado de Chiu *et al.* (2007).

Observou-se que o momento de torção de fissuração das vigas com seção transversal vazada é consideravelmente menor do que os das vigas de seção cheia. O aumento da razão  $y/x$  contribuiu para minorar os momentos de torção de fissuração e ruptura, e para aumentar a quantidade de fissuras em vigas com a mesma taxa de armadura.

### 3.4.3. HII E AL-MAHAIDI (2007)

A pesquisa desenvolvida por Hii e Al-Mahaidi (2007) avaliou experimentalmente o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibras de carbono submetidas à torção pura. Foram avaliados os momentos de torção de fissuração, de ruptura e os ângulos de torção associados, visando avaliar a contribuição do reforço na resistência do sistema. Resultados da bibliografia recente foram coletados e utilizados para avaliar as prescrições da *fib Bulletin 14*.

Foram ensaiadas seis vigas de concreto armado com seção  $35\text{ cm} \times 50\text{ cm}$  e  $2,50\text{ m}$  de comprimento, sendo duas com seção cheia (vigas 1 e 2) e quatro com seção transversal vazada com parede de  $5\text{ cm}$  de espessura (vigas 3 a 6). Todas as vigas foram dimensionadas para estarem abaixo do limite mínimo indicado pelo pelas normas americanas vigentes. Adotaram-se barras longitudinais de  $\varnothing 10.0$  e

estribos de  $\varnothing 6.0$  a cada  $12,5\text{ cm}$ . A Figura 3.20 apresenta os detalhes de geometria e de armadura.

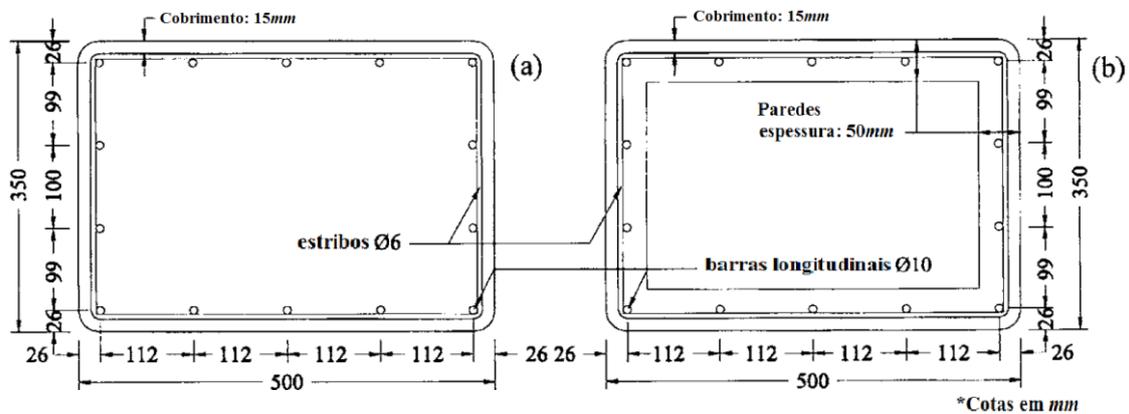


Figura 3.20 – Geometria e detalhes da armadura. (a) vigas seção sólida; (b) vigas seção vazada. Adaptado de Hii e Al-Mahaidi (2007).

Foram adotadas duas vigas de referência (vigas 1 e 5). As demais foram reforçadas externamente com compósitos de fibras de carbono em estribos de  $5\text{ cm}$  de largura, variando o espaçamento e o número de camadas.

O esquema de ensaio é apresentado na Figura 3.21. Um dos extremos de cada viga foi engastado em uma estrutura auxiliar que impediu deslocamentos e rotações nas três direções. O outro foi apoiado em um berço esférico associado a roletas que possibilitava a rotação e a deformação longitudinal da viga. O momento de torção foi gerado pela aplicação de carga proveniente de um macaco hidráulico em um braço de alavanca distante  $1,80\text{ m}$  do eixo da viga.

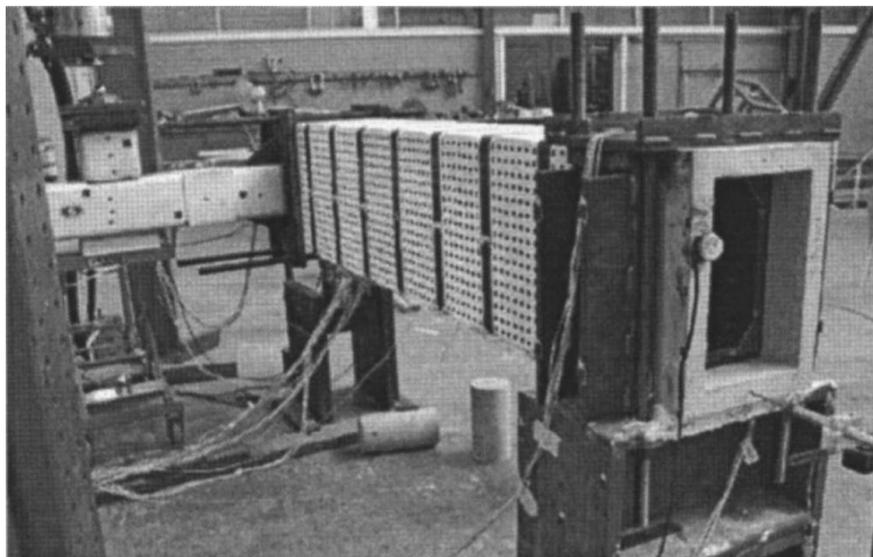


Figura 3.21 – Esquema de ensaio. Hii e Al-Mahaidi (2007).

Foram utilizadas duas células de carga, uma no ponto de aplicação da carga e outra no contato da viga com o apoio esférico. Também foram utilizados transdutores lineares de deslocamento para obtenção do ângulo de torção, extensômetros elétricos de resistência nas armaduras internas e sobre o CFC, além da fotogrametria para obtenção das deformações.

Observou-se um acréscimo de resistência na fissuração e na ruptura das vigas reforçadas com relação às de referência. Obteve-se uma distribuição de tensões não uniforme entre os estribos de CFC, a qual foi atribuída à baixa ductilidade desse material. A média da resistências à fissuração das vigas vazadas foi inferior à média das vigas de seção cheia. O acréscimo de resistência até a ruptura foi proporcional à taxa de reforço aplicada nas vigas, independente da forma de sua seção transversal.

A análise dos resultados experimentais disponíveis na bibliografia recente provou que as prescrições da *fib Bulletin 14* estão abaixo do limite de segurança. Foi proposta uma nova ferramenta para dimensionamento de vigas solicitadas à torção reforçadas com CFC que melhora a previsão da parcela contribuinte do reforço. Esse novo critério foi validado pelos resultados experimentais executados nessa pesquisa.

#### **3.4.4. SILVA FILHO (2007)**

A pesquisa teórico-experimental desenvolvida por Silva Filho (2007) avaliou o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas externamente com compósito de fibras de carbono submetidas à torção pura. Validou-se um modelo de cálculo para determinação do momento de torção último e para o traçado do diagrama de momento de torção *versus* ângulo de torção por unidade de comprimento. Também foi proposta uma sistemática para cálculo e dimensionamento de reforço de CFC em vigas de concreto armado submetidas à torção, fundamentada no modelo da treliça espacial do *Eurocode 2* e num modelo de aderência.

Foram ensaiadas sete vigas de seção transversal  $20\text{ cm} \times 40\text{ cm}$  com  $4,20\text{ m}$  de comprimento. Os detalhes da geometria e armadura interna são apresentados na Figura 3.22.

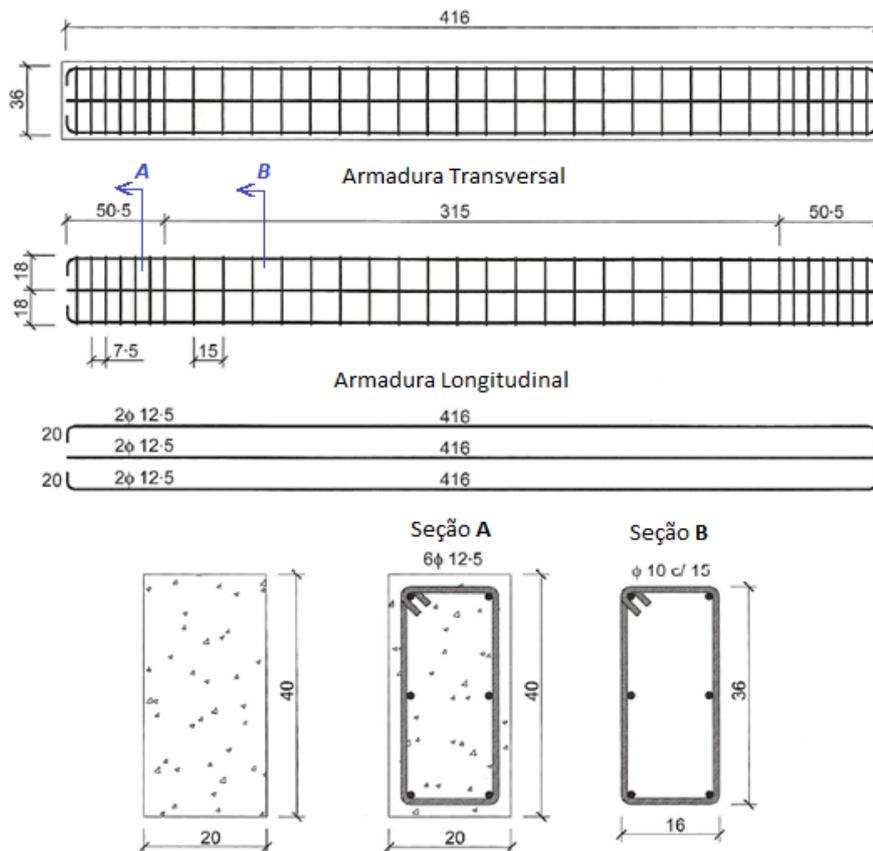


Figura 3.22 – Geometria e armadura interna. Adaptado de Silva Filho (2007).

Adotou-se uma viga de referência e as demais foram reforçadas externamente com CFC formando duas séries de três vigas cada. Na primeira, chamada **VT**, as vigas foram reforçadas transversalmente (Figura 3.23) e na segunda, **VTL**, com reforço longitudinal e transversal (Figura 3.24).

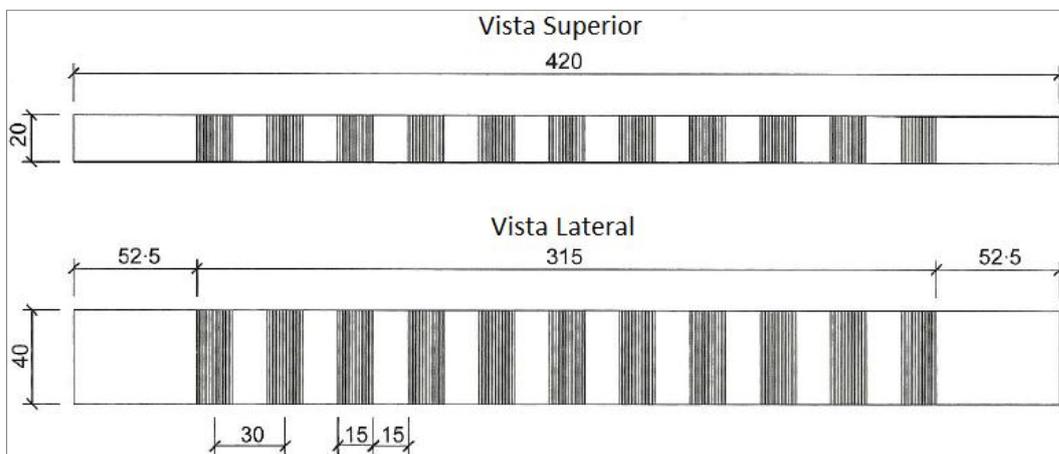


Figura 3.23 – Configuração do reforço das vigas da série VT. Adaptado de Silva Filho (2007).

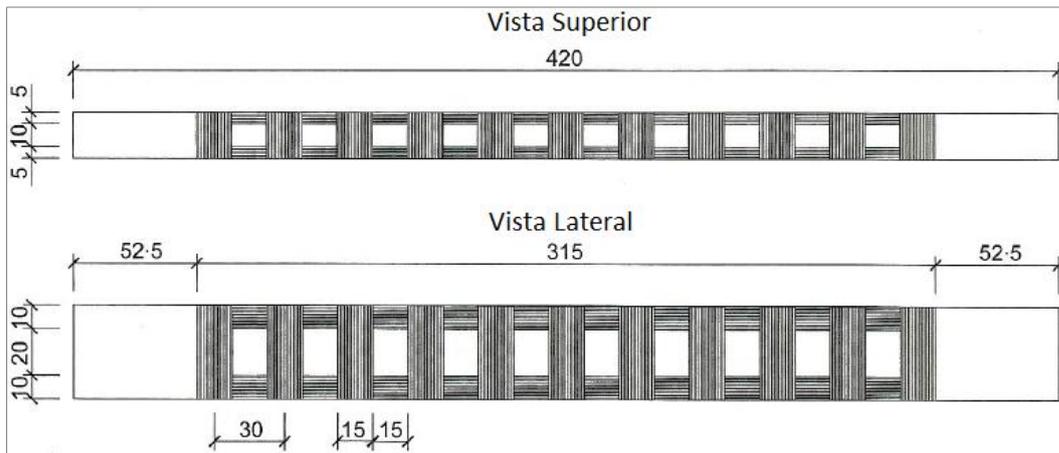


Figura 3.24 – Configuração do reforço das vigas da série **VTL**. Adaptado de Silva Filho (2007).

Para realização dos ensaios foi montada uma estrutura auxiliar de aço capaz de transferir às vigas a solicitação de torção pura (Figura 3.25). Engastava-se um dos extremos da viga e no outro se liberava apenas a rotação em torno do eixo longitudinal. O momento de torção foi simulado por um macaco hidráulico aplicado a 0,95 m do eixo da viga com auxílio de um braço auxiliar.

Foram utilizados extensômetros elétricos de resistência nas armaduras internas e na superfície do concreto e do CFC para observação das deformações, e cinco transdutores lineares ao longo de uma das faces laterais para obtenção do ângulo de torção em cada estágio de carga.

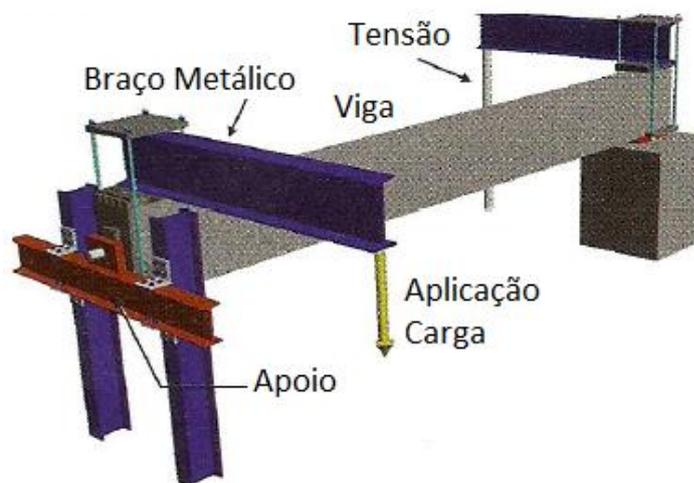


Figura 3.25 – Esquema de ensaio. Adaptado de Silva Filho (2007).

Os resultados experimentais apresentaram boa aproximação quando comparados com os obtidos pelos modelos propostos. Verificou-se que todas as vigas reforçadas apresentaram acréscimo de resistência à torção em relação à viga de referência, sendo de 44% para as vigas da série **VT** e de 38% para as da série **VTL**. Concluiu-se que a configuração de reforço da série **VT** é a melhor dentre as duas alternativas, fornecendo resistência à torção superior com uma taxa total geométrica de armadura de CFC menor. Após a fissuração todas as vigas reforçadas tiveram perda de rigidez inferior à viga de referência.

O ângulo da fissura obtido experimentalmente e os calculados pelo estado de deformação e pelo estado de tensão apresentaram valores próximos para cada viga. O momento de torção de ruptura calculado por meio do modelo da treliça espacial generalizada do *Eurocode 2* e o obtido experimentalmente também foram bastante próximos. A Figura 3.26 e Figura 3.27 mostram que as curvas de momento de torção *versus* ângulo de torção por unidade de comprimento, obtidas pelo modelo proposto e experimentalmente são bastante próximas para as duas configurações de reforço.

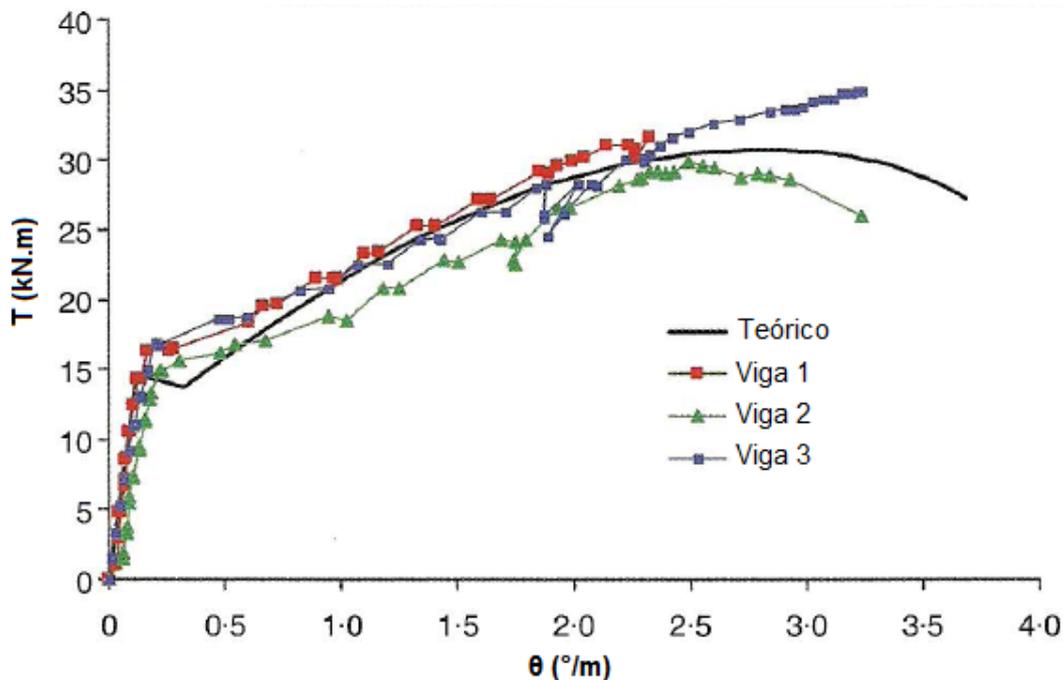


Figura 3.26 – Momento de torção *versus* ângulo de torção por unidade de comprimento da série VT. Adaptado de Silva Filho (2007).

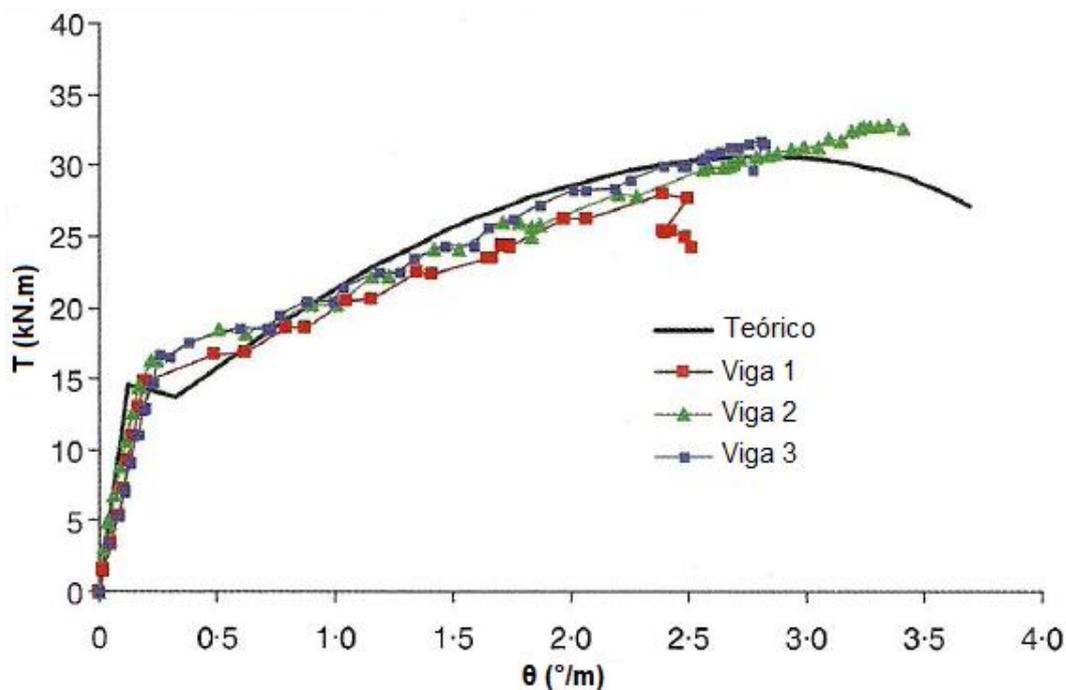


Figura 3.27 – Momento de torção *versus* ângulo de torção por unidade de comprimento da série VTL. Adaptado de Silva Filho (2007).

### 3.4.5. BERNARDO E LOPEZ (2008)

A pesquisa desenvolvida por Bernardo e Lopez (2008) avaliou numericamente o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas externamente com tecidos unidirecionais de CFC e submetidas à torção pura. A implementação foi validada pela comparação dos resultados obtidos numericamente com os disponíveis na bibliografia recente. Foram avaliados os momentos de torção relacionados à fissuração e a ruptura, os ângulos de torção correspondentes e as deformações.

A principal conclusão do trabalho é validação da análise devido à boa aproximação entre os resultados fornecidos pelo programa e os obtidos experimentalmente. Outras conclusões são enumeradas a seguir:

- i. a Teoria da Elasticidade e a Teoria da Flexão-Esconsa fornecem valores para o momento de torção de fissuração próximos aos obtidos experimentalmente em vigas de seção cheia. Em vigas com seção transversal vazada, a Teoria de Bredt fornece previsões com maior precisão;

- ii. um fator de redução  $k = 0,7$  pode ser utilizado para minorar a rigidez à torção  $CG$  das vigas antes de alcançarem o momento de torção de fissuração para simular a microfissuração existente no concreto;
- iii. após a fissuração o modelo da Treliça Espacial Generalizada com bielas de concreto inclinadas a  $45^\circ$  fornece boas aproximações para obtenção da rigidez à torção para vigas de seção cheia e vazada. Isso mostra que a resistência proveniente do concreto próximo ao eixo da viga pode ser desconsiderada;
- iv. o modelo da Treliça Espacial de ângulos variáveis associado ao abrandamento de tensões (*Softening Effect*) fornece boas previsões para os valores do momento de torção de ruptura e para o modo de falha (dúctil ou frágil), para seções cheias e vazadas. Foram obtidos valores semelhantes de momento de torção de ruptura para vigas semelhantes com seção transversal cheia ou vazada, associados a diferentes deformações, o que leva a conclusão de que as vigas de seção cheia, que suportaram maiores deformações, têm maior capacidade para redistribuir as tensões.

#### 3.4.6. CHALIORIS (2008)

A pesquisa desenvolvida por Chalioris (2008) avaliou experimentalmente o comportamento de vigas de concreto armado com taxa baixa e nula de armadura transversal, reforçadas externamente com tecidos unidirecionais de CFC e submetidas à torção pura. Foram avaliados os momentos de torção relacionados à fissuração e a ruptura, os ângulos de torção correspondentes e os modos de falha.

Foram ensaiadas doze vigas de concreto armado de  $1,60\text{ m}$  de comprimento, divididas em duas séries: a série **a** composta de vigas com seção transversal medindo  $10\text{ cm} \times 20\text{ cm}$  e a série **b** com seção  $15\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ . Cada série continha duas vigas de referência, uma com apenas dois estribos de  $\varnothing 5,5$  para montagem e posicionamento da armadura longitudinal de barras corridas de  $\varnothing 8,0$ , e outra com baixa taxa de armadura transversal, tendo-se adotado  $\varnothing 5,5$  a cada  $15\text{ cm}$  e barras corridas de  $\varnothing 8,0$ . As vigas reforçadas utilizaram o compósito

produzido pela SIKA®. As geometrias das vigas, os detalhes das armaduras e do reforço são apresentados na Figura 3.28 e na Figura 3.29.

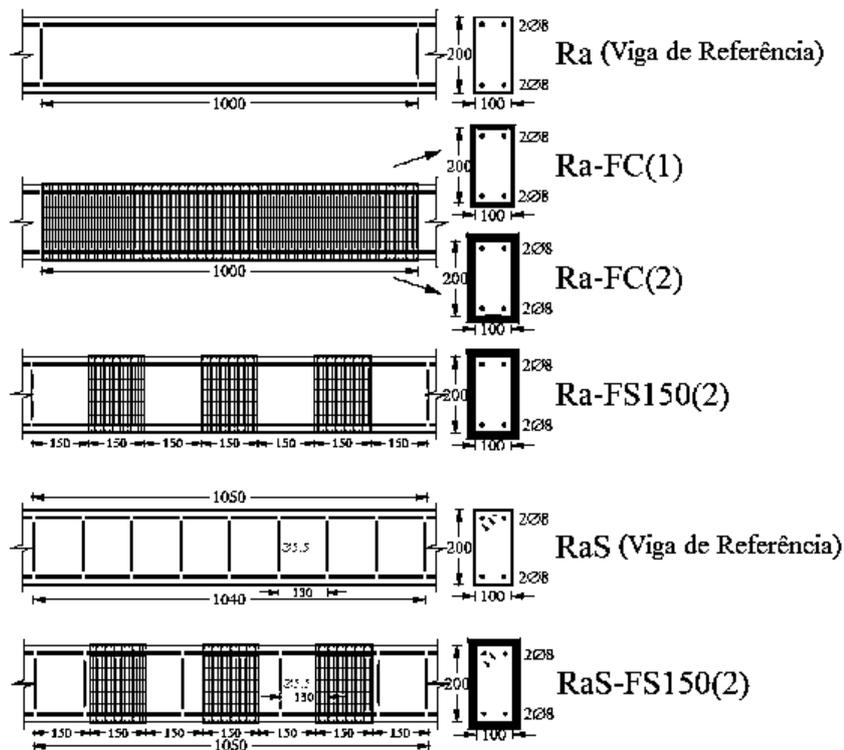


Figura 3.28 – Características das vigas da série **a**. Dimensões em *mm*. Adaptado de Chalioris (2008).

O esquema de ensaio é apresentado na Figura 3.30. As extremidades foram fixadas em braços de aço, que foram utilizados para transferir a carga aplicada no perfil metálico colocado na diagonal por meio de apoios esféricos. As vigas apoiaram-se em aparelhos circulares associados a roletes que permitiram a livre rotação e deslocamentos longitudinais. A instrumentação consistiu em dois transdutores lineares para medição do ângulo de torção e extensômetros elétricos de resistência nas armaduras para medir as deformações.

Foi desenvolvido um modelo para prever o comportamento das vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibras de carbono, e mensurar a contribuição efetiva do reforço face às solicitações de torção. O modelo baseou-se na Teoria da Treliça Generalizada e nas relações existentes para caracterizar o concreto confinado por polímeros reforçados com fibras (FRP). O modelo conseguiu prever com bastante precisão os momentos de torção de fissuração e ruptura para as vigas ensaiadas.

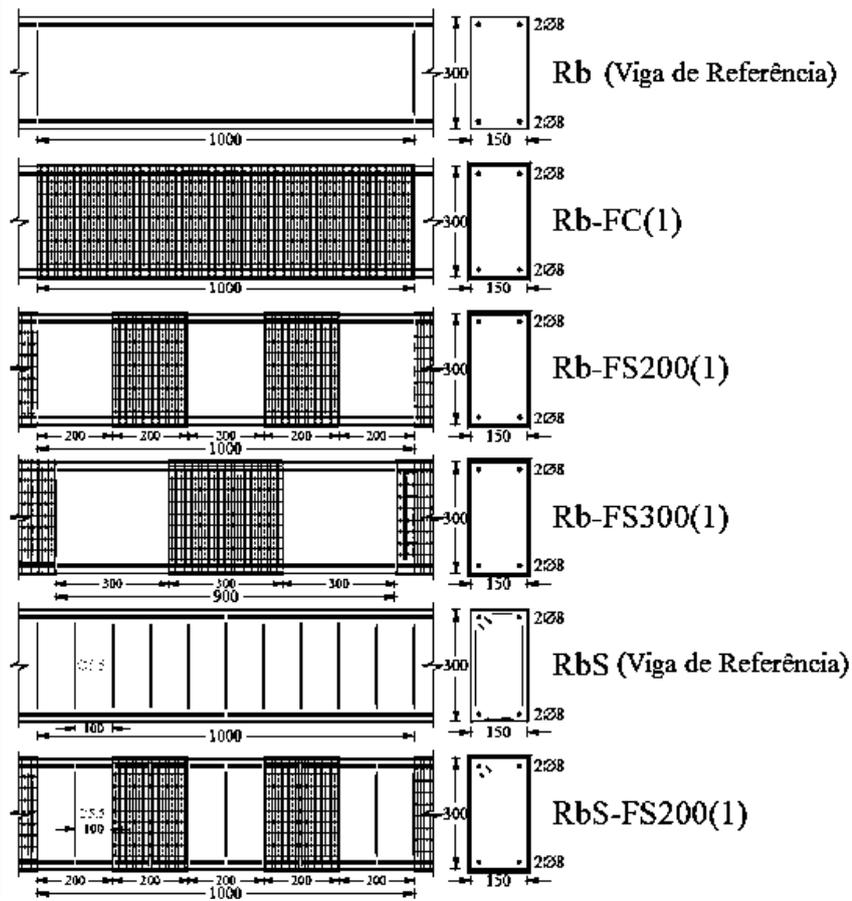


Figura 3.29 - Características das vigas da série *b*. Dimensões em *mm*. Adaptado de Chalioris (2007).

Observou-se que o comportamento das vigas envelopadas com CFC foi melhor do que das reforçadas com estribos do compósito. A pesquisa permitiu concluir que o compósito de fibras de carbono é efetivo no reforço de vigas de concreto armado com carência de armadura quando solicitadas à torção pura.

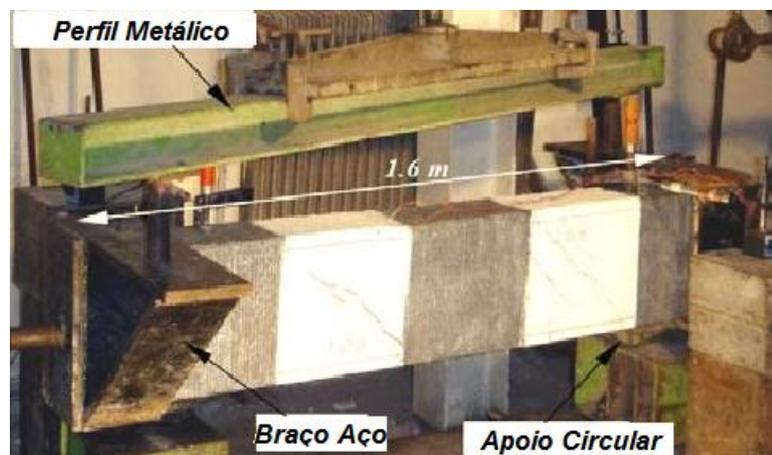


Figura 3.30 – Esquema de ensaio. Adaptado de Chalioris (2008).



A Figura 3.33 apresenta a comparação das curvas que relacionam o momento de torção e o ângulo de torção por unidade de comprimento, obtidas numérica e experimentalmente para a viga C1. Observa-se grande concordância até a fissuração, havendo uma divergência de 16,6% entre os momentos de torção na ruptura.

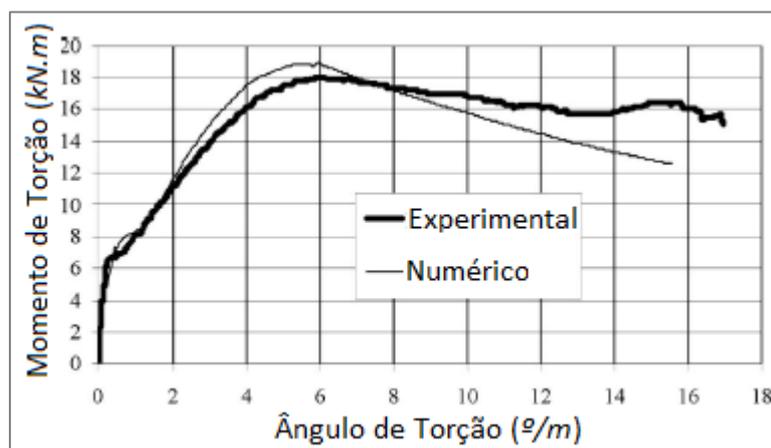


Figura 3.33 – Comportamento da viga C1. Adaptado de Deifalla e Ghobarah (2010).

O modelo numérico foi validado por ter apresentado valores bastante próximos dos obtidos experimentalmente, tendo o erro variado entre 1% e 25%. O modelo desenvolvido forneceu resultados mais precisos que o descrito na *fib Bulletin 14*.

### 3.5. Modelo de Hsu Modificado

O Capítulo 2 apresentou o modelo de Hsu (1984) para análise de vigas retangulares de concreto armado solicitadas à torção pura. Adaptando o modelo descrito para a presente pesquisa, para as vigas de concreto reforçadas externamente com estribos de CFC tem-se:

$$T_{CR}^* = (1 + 4 \rho_f) T_n \quad (3.1)$$

onde  $\rho_f$  é a taxa geométrica transversal de reforço de CFC.

Antes da fissuração a rigidez à torção  $GC$  é determinada pela análise elástica, como no caso das vigas sem armaduras. Após a fissuração adota-se a expressão ( 3.2 ):

$$C_{cr}G_{cr} = \frac{E_f A_c^3}{\frac{u^2}{4} \left( \frac{4 n A_c}{u h} + \frac{1}{\rho_f} \right)} \quad ( 3.2 )$$

onde

$C_{cr}$  – constante de Bredt após a fissuração;

$G_{cr}$  – módulo de deformação transversal após a fissuração;

$E_f$  – módulo de elasticidade do compósito de fibras de carbono;

$A_c$  – área da seção transversal da viga de concreto;

$u$  – perímetro da viga de concreto;

$n$  – razão entre o módulo de elasticidade do CFC e do concreto;

$h$  – espessura da parede do tubo de Bredt.