

5

Reforço de Vigas à Torção com Compósitos de Tecidos de Fibras de Carbono

Desde o princípio da utilização de compósitos de fibras de carbono como técnica para reforçar estruturas, as pesquisas concentraram-se principalmente em estudar vigas reforçadas à flexão ou à força cortante. Atualmente o número de trabalhos publicados sobre o reforço de estruturas à torção é bastante reduzido. Nesse capítulo são apresentados de forma sucinta os principais aspectos, características, metodologia de dimensionamento do reforço, e as conclusões obtidas nesses trabalhos.

5.1.

Ghobarah *et al.* (2002)

A pesquisa desenvolvida por Ghobarah *et al.* (2002) buscou avaliar o aumento de resistência por meio da aplicação de compósitos de tecidos de fibras de carbono e fibras de vidro em vigas ensaiadas à torção pura. No total foram ensaiadas 11 vigas com diferentes configurações de reforço. Foram monitoradas a variação do carregamento, o ângulo de rotação e as deformações.

As vigas tinham seção transversal de 150mm×350mm e 2440mm de comprimento. O cobrimento lateral era de 25mm e o superior e inferior de 35mm. A armadura longitudinal superior era composta por 2 ϕ 10mm, e a inferior de 2 ϕ 15mm, com exceção da viga N3 cuja armadura inferior era constituída de 2 ϕ 20mm. A armadura transversal foi construída com estribos com diâmetro de 6,3mm, com espaçamento variando para cada viga (Figura 5.1).

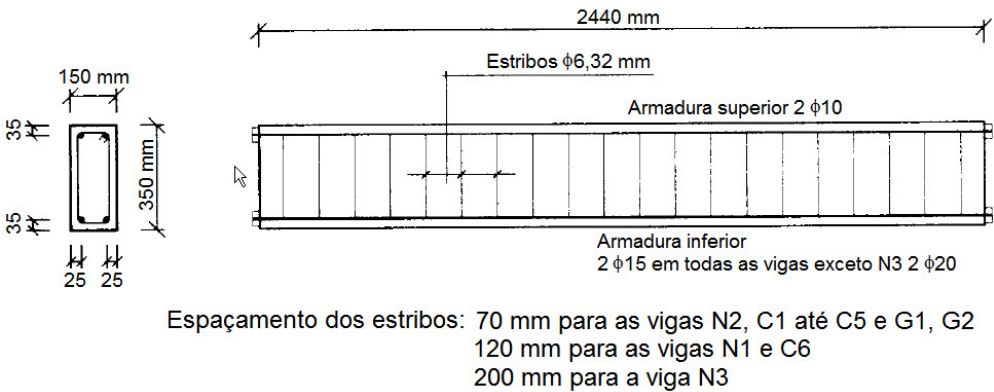


Figura 5.1 – Detalhe das vigas ensaiadas (Ghobarah *et al.*, 2002).

As vigas da série N tinham apenas armadura interna de aço. As vigas da série C tinham, além dessa armadura, uma armadura de reforço com fibras de carbono, e as da série G tinham armadura interna de aço e armadura de reforço com fibras de vidro. As configurações de reforço aplicado nas vigas são mostradas na Tabela 5.1 e na Figura 5.2.

Tabela 5.1 – Características das vigas ensaiadas (Ghobarah *et al.*, 2002).

Viga	Configurações do reforço	Armadura superior	Espaçamento dos estribos (mm)
N1	–	2 $\phi 15$	120
N2	–	2 $\phi 15$	70
N3	–	2 $\phi 20$	200
C1	Envolvimento completo	2 $\phi 15$	70
C2	5 estribos verticais de 100 mm com espaçamento de 100 mm	2 $\phi 15$	70
C3	3 estribos verticais de 100 mm com inclinação de 45°, em um lados da viga	2 $\phi 15$	70
C4	3 estribos verticais de 200 mm com espaçamento de 100 mm	2 $\phi 15$	70
C5	4 estribos verticais de 100 mm com espaçamento de 150 mm	2 $\phi 15$	70
C6	3 estribos verticais de 100 mm com inclinação de 45°, em forma de espiral em volta da viga	2 $\phi 15$	120
G1	Envolvimento completo	2 $\phi 15$	70
G2	5 estribos verticais de 100 mm com espaçamento de 100 mm	2 $\phi 15$	70

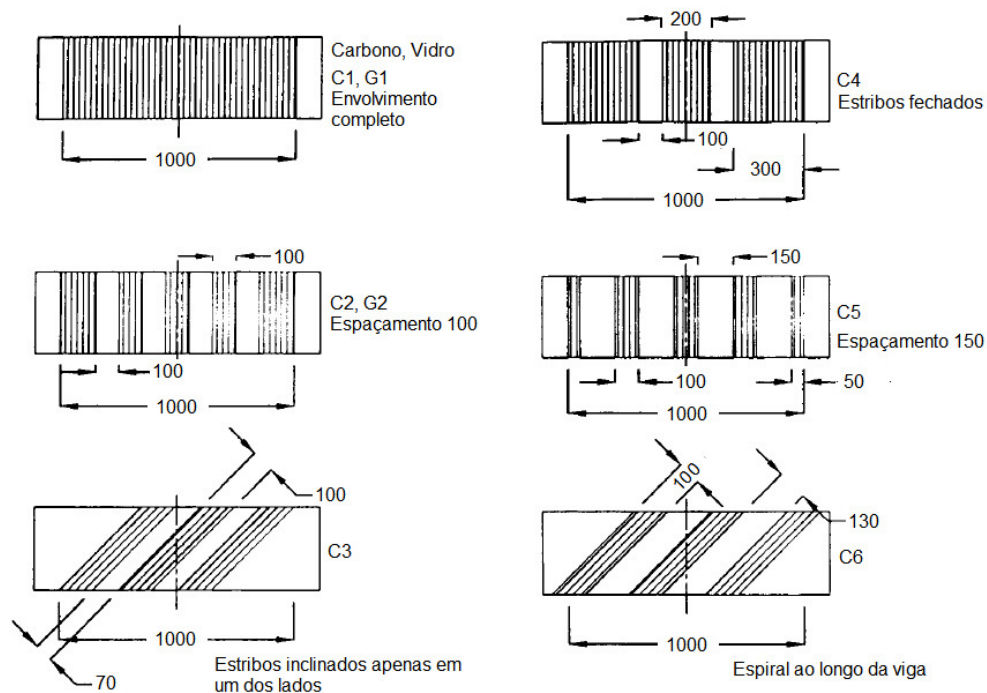


Figura 5.2 – Configuração de reforço (Ghobarah *et al.*, 2002).

Metodologia empregada

Para determinação da resistência à torção das vigas de referência, Ghobarah *et al.* (2002) utilizam a metodologia apresentada por Rahal (2000), que pressupõe que a relação entre o momento último à torção T_u e a máxima tensão de cisalhamento no concreto v_u é dada pela expressão 5.1:

$$T_u = 0,67 \left(\frac{A_c^2}{P_c} \right) v_u \quad (5.1)$$

onde

A_c – área bruta da seção transversal de concreto;

P_c – perímetro externo da seção de concreto.

A resistência do concreto ao cisalhamento é calculada como uma fração da resistência à compressão do concreto f'_c , considerando-se as taxas das armaduras transversal e longitudinal.

A relação entre v_u/f'_c é obtida por meio do ábaco ilustrado na Figura 5.3, sendo necessária a determinação dos parâmetros ω_ℓ e ω_t , dados pelas expressões 5.2 e 5.3:

$$\omega_\ell = \frac{\rho_\ell f_{y\ell}}{f'_c} \quad (5.2)$$

$$\omega_t = \frac{\rho_t f_{yt}}{f'_c} \quad (5.3)$$

sendo ρ_ℓ e ρ_t

$$\rho_\ell = \frac{A_\ell}{p_o a_o} \quad (5.4)$$

$$\rho_t = \frac{A_t}{s a_o} \quad (5.5)$$

onde

ω_ℓ – taxa mecânica de armadura longitudinal;

ω_t – taxa mecânica de armadura transversal;

ρ_ℓ – taxa geométrica de armadura longitudinal;

ρ_t – taxa geométrica de armadura transversal;

s – espaçamento dos estribos;

A_ℓ – área total da armadura longitudinal;

A_t – área dos estribos ao longo do comprimento s ;

p_o – perímetro da linha central do fluxo de cisalhamento;

a_o – espessura do fluxo de cisalhamento;

$f_{y\ell}$ – tensão de escoamento do aço longitudinal;

f_{yt} – tensão de escoamento do aço transversal.

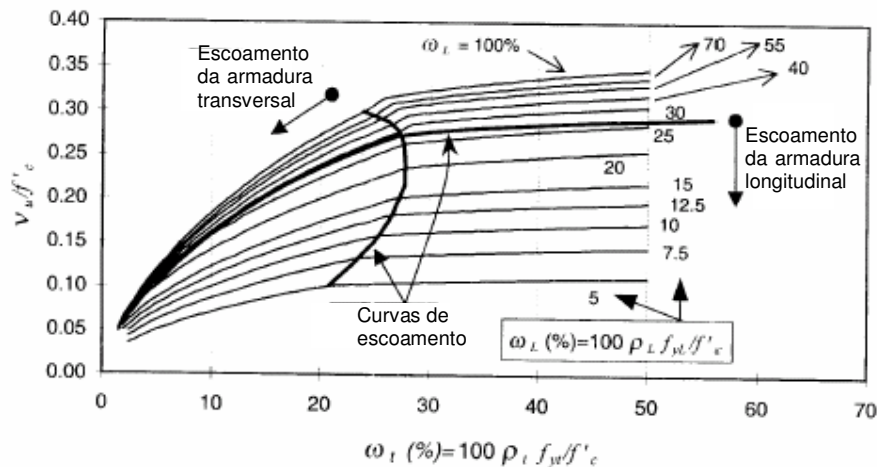


Figura 5.3 – Curvas normalizadas de resistência ao cisalhamento para painéis de concreto armado (Rahal, 2000).

O acréscimo de resistência devido ao reforço é a diferença entre o momento torçor último, obtido nos ensaios das vigas reforçadas com materiais compósitos e o torçor último das respectivas vigas de referência. Com esse acréscimo de resistência à torção determina-se a deformação específica na fibra por meio da seguinte expressão:

$$\varepsilon_f = \frac{T_f \left(\frac{A_f}{s} \right)^{-1}}{2A_c E_f} \quad (5.6)$$

onde

ε_f – deformação específica do reforço;

T_f – parcela do momento torçor resistido pelo reforço;

A_f – área do reforço;

s – comprimento ao longo da viga sobre o qual o reforço está distribuído;

E_f – módulo de elasticidade do material compósito.

No caso de envolvimento por espiral ou estribos a 45°, a deformação específica na direção das fibras é calculada por:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_f}{\cos 45^\circ} \quad (5.7)$$

A Tabela 5.2 apresenta de forma resumida os resultados dos ensaios e as deformações específicas experimentais e teóricas.

Tabela 5.2 – Resultados dos ensaios e deformações teóricas (Ghobarah *et al.*, 2002).

Viga	Força de fissuração (kN)	Força de ruptura (kN)	Ângulo de rotação (°)	Rotação máxima (°)	$\varepsilon_f (\times 10^{-3})$	
					Exp.	Teórico
N1	8,04	19,45	4,63	13,66	–	–
N2	8,88	19,67	4,07	11,90	–	–
N3	9,96	19,02	9,16	14,57	–	–
C1	12,01	32,10	5,88	16,94	3,25	3,11
C2	9,88	24,93	6,34	13,30	3,17	2,63
C3	16,75	21,95	3,87	13,37	3,14	3,07
C4	11,74	28,27	5,02	13,47	2,61	2,64
C5	10,49	23,96	4,40	13,61	2,90	2,69
C6	–	30,05	6,47	13,30	6,34	6,13
G1	12,81	33,81	6,41	16,11	3,20	3,14
G2	11,23	23,48	4,76	12,46	2,79	2,96

Observa-se que as deformações específicas do reforço, com exceção da viga C6, não ultrapassam 0,35%. Desta forma, o momento torçor acrescido pelo reforço T_f , é estimado por meio da deformação específica média, que é de

aproximadamente 0,30%. A parcela do momento torçor resistido pelo reforço é dada por:

$$T_f = \frac{0,006 A_f A_c E_f}{s} \quad (5.8)$$

O momento torçor total resistido pela viga é dado por:

$$T = T_u + T_f \quad (5.9)$$

As principais conclusões deste trabalho foram:

- O completo envolvimento da zona de torção é muito mais efetivo no aumento da resistência à torção do que o reforço na forma de estribos, seja inclinado ou não. Quando a viga é reforçada usando-se estribos de compósitos de fibras, a ruptura é retardada, mas inevitavelmente ocorre nos espaços com ausência de reforço entre os estribos.
- O envolvimento com espirais inclinados a 45° é muito mais eficiente no aumento da resistência à torção das vigas de concreto armado do que os estribos. Isto se deve ao fato das fibras inclinadas estarem tracionadas durante a ruptura, enquanto o reforço vertical está submetido a forças que não estão ao longo da direção das fibras.
- Os estribos de materiais compósitos inclinados a 45° apenas em um lado da viga não é uma configuração de reforço eficiente, devido à descontinuidade no envolvimento do reforço. Para um reforço efetivo, este deve ser aplicado de forma a envolver completamente a seção, e ao longo de toda a viga em forma de espiral com inclinação de 45°. Conclui-se que a continuidade do reforço é importante para uma resistência à torção efetiva. Colando-se o reforço nos lados da viga, sem envolver as outras faces da mesma, não há aumento significativo na resistência à torção.
- Há uma pequena diferença no comportamento após a fissuração das vigas reforçadas usando-se envolvimento com estribos apenas com tramos verticais. Isto porque o reforço proporciona um pequeno confinamento devido a seção transversal ter geometria retangular. Ocorre uma fissuração significativa do concreto, causando o descolamento prematuro das camadas de compósitos, ocasionando a ruptura do concreto. A deformação específica média encontrada para o reforço com compósito de fibras de vidro ou fibras de carbono durante a ruptura do concreto foi de aproximadamente 0,30%. Esta observação levou à adoção da expressão 5.8 para calcular a contribuição do reforço

transversal com material compósito de fibras de vidro ou de fibras de carbono, para o aumento da capacidade resistente ao momento torçor da vigas de concreto armado.

5.2. Panchacharam e Belarbi (2002)

A pesquisa desenvolvida por Panchacharam e Belarbi (2002) estudou o comportamento e o desempenho de vigas de concreto armado reforçados externamente com tecidos compósitos de fibras de do vidro (GFRP) sujeitas à torção pura. No total foram ensaiadas oito vigas de concreto armado, sendo uma viga de referência e sete vigas com diferentes configurações de reforço.

As variáveis consideradas neste estudo experimental incluem a orientação das fibras, o número de faces reforçadas (três ou quatro), o efeito do número de faces reforçadas, e a influência da ancoragem dos estribos em forma de **U**.

Modelo analítico empregado

O aumento no momento torçor de fissuração das vigas reforçadas foi calculado como vigas de concreto armado submetidas à protensão. A deformação específica do reforço varia gradualmente devido à tensão de tração na superfície da viga. Durante a variação gradual da deformação específica no reforço, a protensão efetiva foi determinada considerando-se a deformação específica média do reforço no instante da fissuração, por meio da expressão 5.10. O cálculo da deformação específica do reforço foi obtido por meio do círculo de Mohr, logo:

$$PE = \frac{\varepsilon_f E_f}{2} \quad (5.10)$$

onde

PE – protensão efetiva;

ε_f – deformação específica do reforço;

E_f – módulo de elasticidade do reforço.

O momento de fissuração é determinado usando-se a protensão efetiva dada pela seguinte expressão:

$$T_{cr} = c_1 b^2 h f_t \sqrt{1 + \frac{PE}{f_t}} \quad (5.11)$$

onde

c_1 – constante de Saint Venant (baseada em teorias elásticas);

h – altura da viga;

b – base da viga;

f_t – resistência à tração do concreto.

O momento de ruptura obtido considera a orientação das fibras e o modo de ruptura. Quando a ruína da viga for controlada pela ruptura das fibras, e se essas são orientadas na direção de 90°, a contribuição do reforço é determinada usando-se a deformação específica desse reforço.

A deformação específica efetiva no reforço é determinada usando-se as equações empíricas propostas pela FIB (2001). Se a ruptura do reforço não governar o modo de ruína da viga, deve-se utilizar um modelo baseado no comprimento de aderência efetiva para o cálculo do momento torçor último da viga. Quando as fibras são orientadas na direção de 0°, o torçor último é pouco superior ao momento torçor de fissuração.

Para envolvimento completo e estribos tem-se:

$$T_{u,frp} = 2\varepsilon_{ke,f} E_f \frac{t_f b_f}{s_f} b h \cotg \alpha \quad (5.12)$$

Para estribos em **U** com ancoragem:

$$T_{u,frp} = \varepsilon_{ke,f} E_f \frac{t_f b_f}{s_f} b h \cotg \alpha \quad (5.13)$$

onde

$\varepsilon_{ke,f}$ – deformação específica efetiva característica do compósito de fibras;

E_f – módulo de elasticidade do reforço na direção das fibras;

t_f – espessura do reforço;

s_f – espaçamento do reforço;

b_f – largura do reforço;

α – ângulo da fissura o qual assume-se 45°.

O cálculo da resistência última à torção das vigas de concreto armado recomendado pelo ACI 318-99 (1999) é dado por:

$$T_{u,RC} = \frac{2A_0 A_t f_{yv}}{s} \cotg \alpha \quad (5.14)$$

onde

A_0 – área da seção transversal limitada pela linha central do fluxo de tensões tangenciais;

A_t – área da armadura transversal (estribos);

f_{yv} – tensão de escoamento da armadura transversal;

s – espaçamento dos estribos

α – inclinação da fissura.

A resistência última à torção das vigas reforçadas com material compósito de fibras foi obtida por meio da seguinte forma aditiva:

$$T_u = T_{u,RC} + T_{u,frp} \quad (5.15)$$

onde

$T_{u,RC}$ – torçor resistido pela viga de concreto armado;

$T_{u,frp}$ – torçor resistido pelo reforço.

Programa experimental

As vigas ensaiadas tinham comprimento total de 3960 mm e seção transversal quadrada com lado de 279,4 mm. O cobrimento da armadura era de aproximadamente 50 mm.

A armadura longitudinal era composta por 4 ϕ 12,7 mm e por 4 ϕ 9,53 mm. Os estribos eram de barras com diâmetro de 9,53 mm e o seu espaçamento dependia da zona da viga. Nas regiões dos apoios os estribos tinham espaçamento de 38,1 mm, e na região central o espaçamento era de 152,4 mm (Figura 5.4).

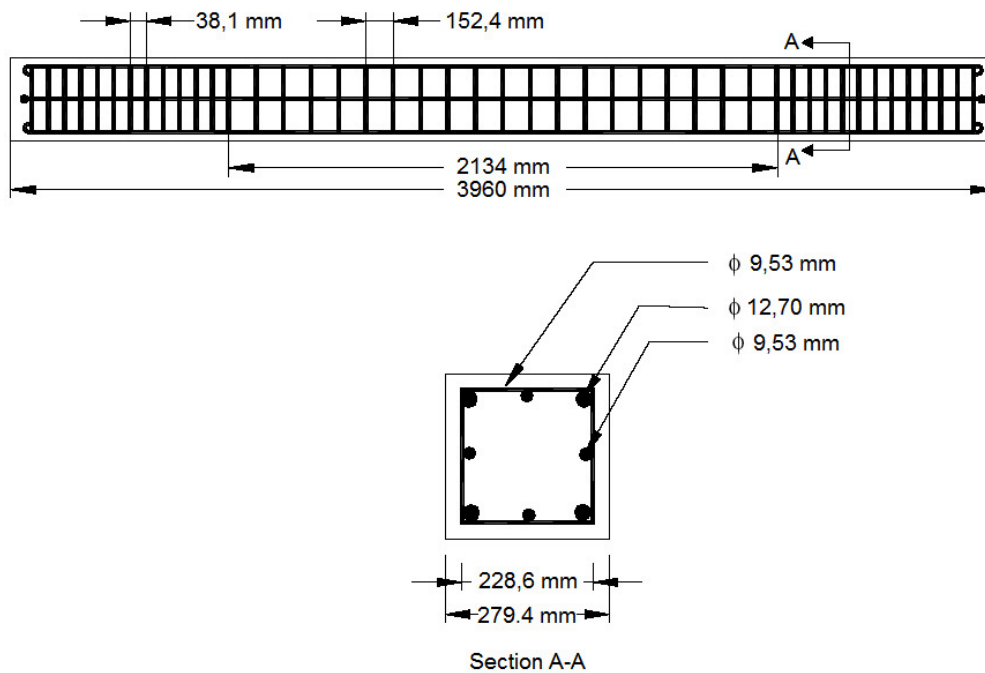


Figura 5.4 – Detalhamento das vigas ensaiadas por Panchacharam e Belarbi (2002).

Para cada viga adotou-se uma configuração de reforço que variava de acordo com a orientação das fibras, tipo de envolvimento, número de faces reforçadas, etc. (Figura 5.5).

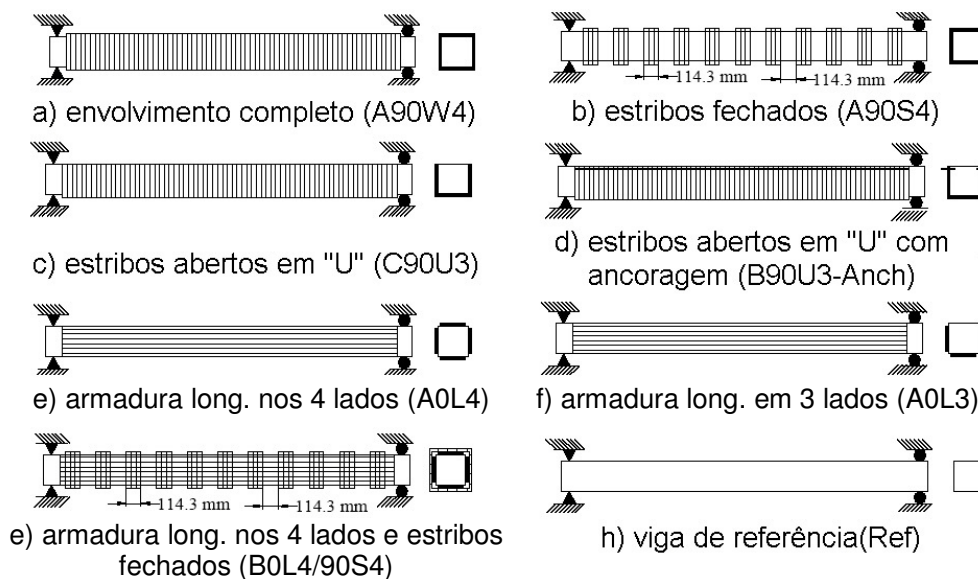


Figura 5.5 – Representação esquemática das configurações do reforço aplicado (Panchacharam e Belarbi, 2002).

Os resultados obtidos para os momentos torçores de fissuração e de ruptura, usando-se o modelo analítico descrito anteriormente, são apresentados e comparados com os resultados experimentais na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Resultado dos ensaios de Panchacharam e Belarbi (2002).

Viga	Momento de fissuração ($kN\ m$)			Momento de ruptura ($kN\ m$)		
	Exp.	An.	Ex/An.	Exp.	An.	Ex/An
A90W4	17,1	15,7	1,09	18,2	16,9	1,07
A90S4	22,9	20,8	1,10	47,1	45,4	1,04
A0L4	22,1	17,7	1,25	36	36,4	0,99
A0L3	27,0	29,9	0,90	30,7	29,9	1,03
B0L4 / 90S4	26,3	28,8	0,91	27,8	28,8	0,97
B90U3* – Anch	20,1	24,4	0,82	32,6	35,9	0,91
C90U3	22,0	18,2	1,20	26,3	28,1	0,94
Ref	20,6	19,1	1,08	24,6	26,4	0,93
Média			1,04			0,98
C. Var.			0,14			0,06

As principais conclusões deste estudo foram:

- As vigas de concreto armado reforçadas à torção com tecidos compósitos de fibras de vidro apresentaram um aumento significativo no momento torçor de fissuração e no momento torçor de ruptura, assim como nas deformações angulares últimas.
- As vigas reforçadas com envolvimento completo e com orientação das fibras a 90° em relação ao eixo da viga tiveram um confinamento efetivo, que resultou num aumento superior a 150 % na resistência última à torção.
- Observou-se um aumento substancial na resistência à fissuração quando as vigas são reforçadas com as fibras orientadas na sua direção longitudinal, onde o compósito de fibra de vidro promove forças de protensão passivas.
- O reforço com compósitos de fibras de vidro na direção longitudinal da viga, em três ou quatro faces da seção transversal, promove comportamento similar.
- O reforço com estribos em forma de **U** leva a uma menor capacidade de rotação, devido ao descolamento do compósito de fibras de vidro ao longo dos lados da viga.

- A combinação de reforço com fibras na direção longitudinal da viga com estribos de envolvimento completo resulta no aumento da resistência última, da capacidade de rotação pós-fissuração e da ductilidade da viga.
- As expressões propostas para o cálculo do momento torçor de fissuração e do momento torçor de ruptura, fornecem resultados muito próximos aos resultados experimentais obtidos.

5.3.

Täljsten (2003)

A pesquisa desenvolvida por Täljsten (2003) apresenta os resultados de ensaios realizados em cinco vigas de concreto submetidas à torção. Dessas cinco vigas ensaiadas uma era de referência, uma reforçada com compósitos de fibras de vidro, e três com diferentes configurações de reforço com compósitos de fibras de carbono. Neste trabalho também é mostrada uma metodologia para o dimensionamento de reforço de FRP à torção em vigas de concreto armado.

Metodologia de análise

Para o desenvolvimento das equações é necessária a consideração das seguintes hipóteses:

- O material compósito tem resistência apenas no sentido das fibras.
- Supõe-se que o ângulo das fissuras é de 45° , e que as tensões de tração principais são perpendiculares ao plano de fissuração.

Considera-se a possibilidade de dois tipos de reforço: com estribos ou envolvimento completo.

Formulando-se o equilíbrio das forças verticais atuantes em uma viga de concreto armado reforçada com material compósito (Figura 5.6) tem-se:

$$V + qh - F_f \frac{h \cotg \alpha + h \cotg \beta}{s_f} \sen \beta = 0 \quad (5.16)$$

seguindo-se

$$\frac{F_t}{s_f} = q \frac{1}{(\cotg \alpha + \cotg \beta) \sen \beta} + \frac{V}{h} \frac{1}{(\cotg \alpha + \cotg \beta) \sen \beta} \quad (5.17)$$

No caso de torção pura tem-se:

$$\frac{F_t}{s_f} = \frac{\sigma_{f,e} A_f}{s_f} = q \frac{1}{(\cotg \alpha + \cotg \beta) \sen \beta} \quad (5.18)$$

Com a 1ª fórmula de Bredt tem-se:

$$q = \frac{T}{2bh} \quad (5.19)$$

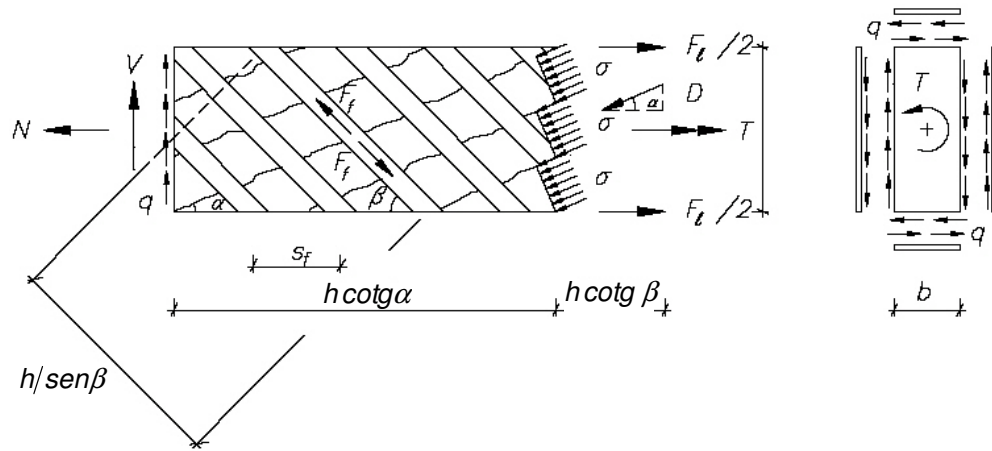


Figura 5.6 – Reforço por meio de estribos inclinados (Täljsten, 2003).

Substituindo-se a expressão 5.19 na expressão 5.18, considerando-se $\alpha = 45^\circ$ e sendo:

$$A_f = 2t_f b_f \quad (5.20)$$

tem-se

$$\sigma_{f,e} = \sigma_f \cos^2(\theta) = \varepsilon_f E_f \cos^2(\theta) \quad (5.21)$$

$$\theta = \alpha + \beta - 90^\circ \quad (5.22)$$

onde

$$45^\circ < \beta < 90^\circ;$$

V – força cortante;

q – fluxo de tensões tangenciais;

b – base da viga;

h – altura da viga;

F_f – força nas fibras;

α – ângulo da fissura;

β – ângulo do reforço;

s_f – espaçamentos dos estribos de reforço.

$\sigma_{f,e}$ – tensão efetiva no reforço;

A_f – área de reforço;

t_f – espessura do reforço;

b_f – largura do reforço.

ε_f – deformação específica das fibras.

Reescrevendo-se a expressão 5.18:

$$\frac{2t_f b_f \varepsilon_f E_f}{s_f} = \frac{T}{2bh [\cotg \alpha + \cotg \beta] \sen \beta} \quad (5.23)$$

Como a distribuição de tensões não é uniforme ao longo da seção transversal, a deformação específica última deve ser multiplicada por um fator redutor igual a 0,6 . Reescrevendo-se a expressão 5.23, tem-se:

$$\frac{1,2t_f b_f \varepsilon_{fu} E_f}{s_f} = \frac{T}{2bh [\cotg \alpha + \cotg \beta] \sen \beta} \quad (5.24)$$

Estudo experimental

A Figura 5.7 mostra os detalhes das vigas ensaiadas, com seção transversal de 150 mm×600 mm e comprimento total de 6000 mm, que foram armadas com 8φ 12 mm como armadura longitudinal e estribos de 8 mm cada 50 mm. Esses estribos foram posicionados apenas nas regiões de introdução de carga, ou seja, apenas nas extremidades das vigas cobrindo um trecho de 1000 mm. O concreto utilizado na fabricação das vigas apresentou resistência média à compressão de 72,1 MPa e resistência média à tração de 4,5 MPa . Os ensaios foram realizados em corpos-de-prova cúbicos. O material compósito com fibras de vidro apresentou módulo de elasticidade de 20 GPa e deformação específica máxima de 1,6%. O compósito com fibras de carbono apresentou módulo de elasticidade de 65 GPa, e deformação específica máxima de 2,5% .

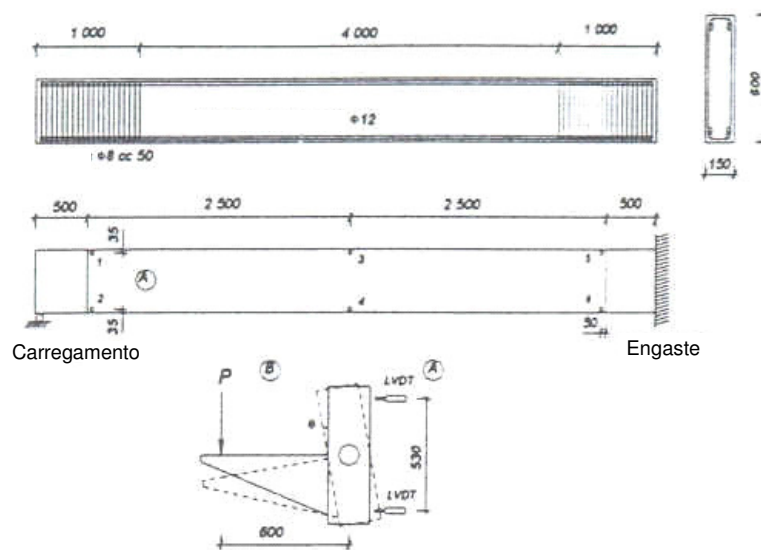


Figura 5.7 – Detalhamento das vigas ensaiadas por Täljsten (2003).

A Figura 5.8 ilustra as cinco vigas ensaiadas com suas respectivas curvas $T \times \theta$. Mostra também o tipo de material e configuração de reforço adotados, com exceção da viga de referência.

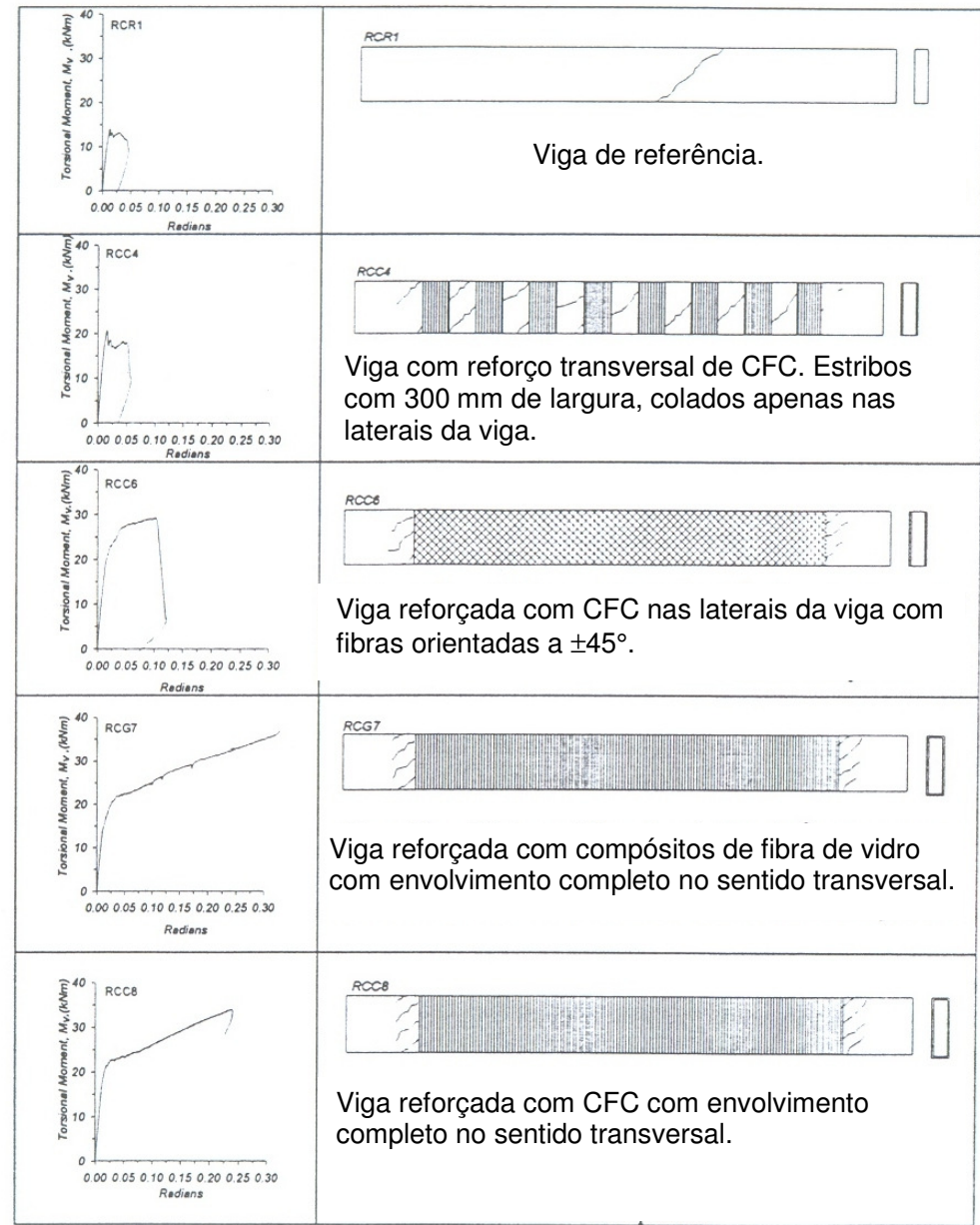


Figura 5.8 – Curvas $T \times \theta$ e configurações de reforço adotadas por Täljsten (2003).

O comparação entre os resultados experimentais e teóricos são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Resultados experimentais e teóricos (Täljsten, 2003).

Viga	T_{max} (kNm)	θ_{max} (rad)	$\frac{T_{max}}{T_{ref}}$	T_c (kNm)	$\frac{T_{max}}{T_c + T_{ref}}$
RCR1	14,2	0,05	1,0	—	—
RCC4	20,8	0,06	1,5	3,5	1,2
RCC6	29,2	0,12	2,1	6,8	1,4
RCG7	>38,4	>0,33	>2,7	13,0	1,4
RCC8	>34,1	>0,24	>2,4	13,5	1,2

Os resultados dos ensaios mostraram que é possível reforçar vigas à torção. As equações de projeto são de fácil utilização, porém, o modelo teórico apresentado subestima a contribuição proveniente do material compósito.

5.4. Salom *et al.* (2004a, b)

A pesquisa conduzida por Salom *et al.* (2004a, b) teve como enfoque principal a análise de vigas localizadas no perímetro das estruturas, ou seja, vigas de extremidade. Estas vigas devido a sua disposição e concepção estrutural, podem ter suas solicitações dependentes das solicitações de vigas e lajes que nela se apóiam, surgindo um momento torçor de compatibilidade. No total foram ensaiadas seis vigas, sendo duas de referência e quatro com diferentes disposições de reforço com lâminas de fibras de carbono. As variáveis consideradas neste estudo foram a orientação das fibras, o uso de lâminas compósitas, e os efeitos do sistema de ancoragem dessas lâminas.

Modelo analítico empregado

Neste trabalho também foi adotada a metodologia do ACI 318-99 (1999) para o cálculo do momento torçor nominal, dado pela expressão 5.14.

Para o cálculo da resistência nas vigas reforçadas assumiu-se que o reforço foi aplicado ao longo de todo o perímetro da viga, por meio de estribos fechados. Combinando-se a expressão 5.14 com a expressão do ACI 440-01 (2001), usada para estimar a resistência à força cortante de vigas reforçadas com material compósito tem-se:

$$T_f = \frac{2A_0 A_f f_{fe}}{s} (\cos \alpha + \operatorname{sen} \alpha) \quad (5.25)$$

sendo

$$A_f = n w_f t_f \quad (5.26)$$

onde

T_f – resistência à torção proveniente do reforço;

A_0 – área bruta da seção transversal;

A_f – área do reforço;

f_{fe} – resistência à tração do material compósito;

s – espaçamento dos estribos de reforço;

n – número de camadas de reforço;

w_f – largura dos estribos;

t_f – espessura do reforço aplicado;

α – ângulo entre a orientação das fibras e o eixo longitudinal da viga.

A resistência à tração do material compósito é dada por:

$$f_{fe} = \varepsilon_{fe} E_f \quad (5.27)$$

onde:

ε_{fe} – deformação específica efetiva do reforço;

E_f – módulo de elasticidade do reforço.

Substituindo-se a expressão 5.27 na expressão 5.26, e isolando-se o termo ε_{fe} , tem-se para a deformação específica do reforço:

$$\varepsilon_{fe} = \frac{T_f s}{2A_0 A_f E_f (\cos \alpha + \sin \alpha)} \quad (5.28)$$

Programa Experimental

As seis vigas tinham as mesmas dimensões e armaduras internas. O comprimento das vigas era de 2438mm, e sua seção transversal era em **L**. A mesa tinha dimensões de 102mm×203mm. As vigas foram armadas com 6φ16mm e 2φ13mm no sentido longitudinal, localizadas ao longo do perímetro das vigas. Os estribos eram constituídos de φ13mm de diâmetro com espaçamento de 152mm. Foram adicionados ganchos com φ13mm localizados nas mesas das vigas, representando a armadura negativa relativa à conexão da laje-viga. A Figura 5.9 apresenta o detalhamento do esquema de ensaio e instrumentação das vigas. Os resultados dos ensaios são apresentados na Tabela 5.5.

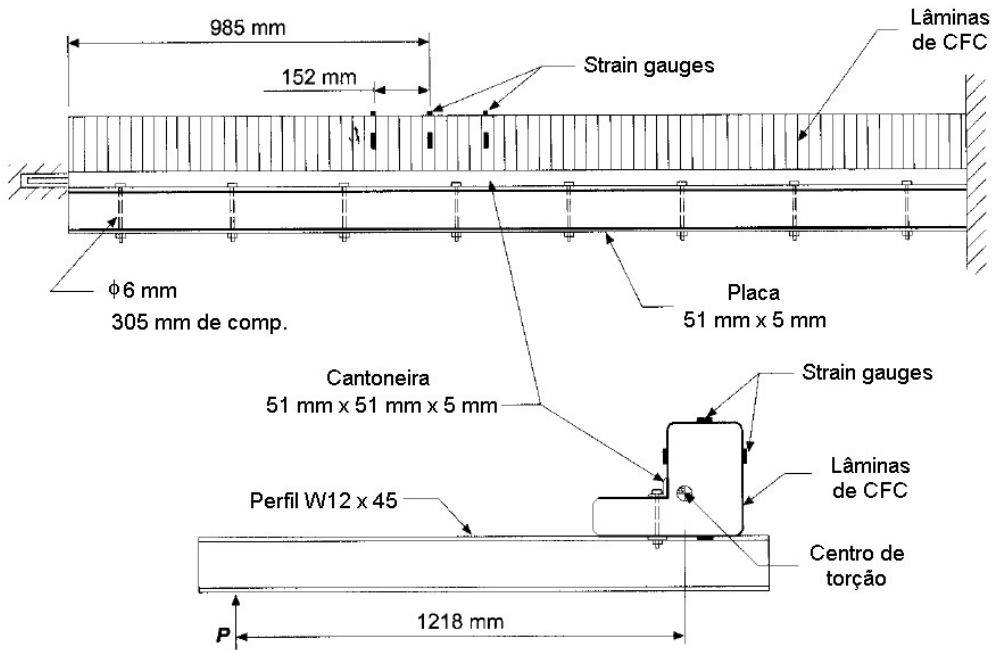


Figura 5.9 – Detalhamento das vigas ensaiadas (Salom *et al.*, 2004).

Tabela 5.5 – Resultados experimentais e analíticos (Salom *et al.*, 2004).

Viga	Orient. das fibras	Ancor.	Torçor Máximo	Incremento Torçor		Deformação específica nas fibras	
				<i>kNm</i>	(%)	Exp.	An.
TB1	Ref.	–	20,3	–	–	–	–
TB2	[0 / 90]	não	33,0	8,6	35	0,12 – 0,14	0,12
TB3	[± 45]	sim	43,4	19,0	77	0,18 – 0,28	0,18
TB4	[0 / 90]	sim	37,3	12,9	53	0,12 – 0,13	0,17
TB5	[90]	sim	35,7	11,3	46	0,14 – 0,23	0,15
TB6	Ref.	–	24,4	–	–	–	–

Conclusões

- a resistência à torção das vigas reforçadas apresentou aumento de até 77% quando comparadas com as vigas de referência. Contudo, mais experimentos e um desenvolvimento analítico mais apurado são necessários. Os resultados provam que o material compósito aumenta a resistência à torção de vigas de concreto armado;
- a adição de ancoragem aumenta a contribuição do reforço na resistência a torção da viga em 50%. Este aumento deve-se ao fluxo de tensões tangenciais na ancoragem, que também retarda o descolamento do compósito;
- as vigas com ancoragem das lâminas de reforço à 45º foram as mais eficientes;

É necessário reconhecer a limitação destes resultados, por não considerarem a influência do número de camadas de reforço, tipos de fibras, tipo e geometria do sistema de ancoragem, e o fator de escala das vigas ensaiadas.

5.5.

Ameli *et al.* (2005)

Ameli *et al.* (2005) apresentam um programa experimental composto pelo ensaio de doze vigas de concreto armado solicitadas à torção reforçadas com compósitos de fibras de carbono e compósitos de fibras de vidro, usando diferentes configurações de reforço. Nessa pesquisa foram estudados os modos de ruptura e o aumento de resistência à torção devido ao reforço, e foram comparadas as vantagens e desvantagens entre os dois tipos de reforços utilizados.

O programa experimental foi composto por doze vigas de concreto armado com seção transversal de 150 mm x 350 mm e 1900 mm de comprimento, sendo duas vigas de referência, cinco vigas reforçadas com compósitos de fibras de carbono e cinco vigas reforçadas com compósitos de fibras de vidro. As diferentes configurações de reforço utilizadas são mostradas na Figura 5.10. A armadura de aço longitudinal foi composta por quatro barras de N16 e estribos de R6 com espaçamento de 80 mm. A resistência à compressão do concreto aos 28 dias foi de 39 MPa para as vigas reforçadas com CFC e de 36 MPa para as vigas reforçadas com compósitos de fibra de vidro. As propriedades das fibras utilizadas são apresentadas na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Propriedades das fibras (Ameli *et al.*, 2005).

Fibra	Espessura (mm)	E_f (MPa)	f_{tu} (MPa)
CF130	0,165	240000	3900
EG900	0,154	73000	3400

As vigas foram solicitadas à torção pura e o carregamento foi aplicado por meio de dois macacos hidráulico, com capacidade de carga de 100 kN cada, localizados na extremidade livre da viga, a 500 mm do seu eixo.

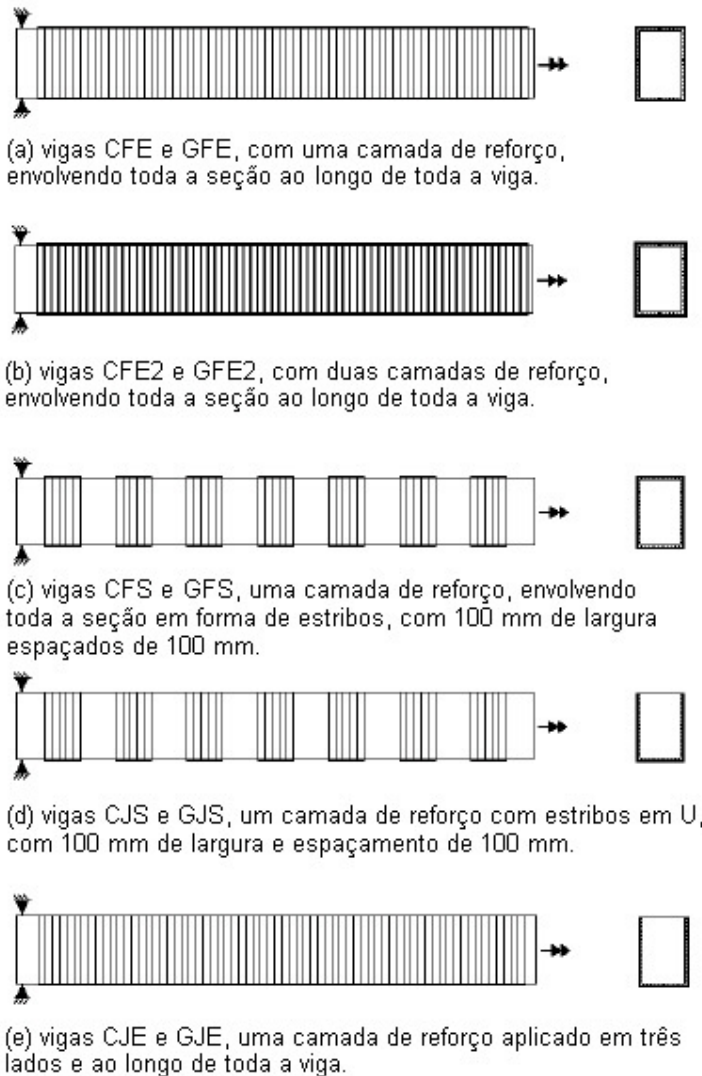


Figura 5.10 – Configurações de reforço (Ameli *et al.*, 2005).

A Tabela 5.7 apresenta os momentos torçores de ruptura das vigas ensaiadas e o aumento de resistência em relação a viga de referência.

Para o cálculo do momento torçor de ruptura das vigas de referência foram empregadas a metodologia proposta pela AS3600-2001 *apud* Ameli *et al.* (2005) e a teoria do campo de compressão diagonal (Mitchell e Collins, 1974 e Collins e Mitchell, 1980). Para o cálculo do acréscimo de resistência à torção promovido pelo reforço foi utilizada a formulação proposta pelo Bulletin 14 da FIB.

Os valores dos momentos torçores de ruptura teóricos são mostrados na Tabela 5.8.

Tabela 5.7 – Resultados experimentais (Ameli *et al.*, 2005).

Viga	$T_{u,Exp}$	(%)	Viga	$T_{u,Exp}$	(%)
RC	15	–	RG	14,8	–
CFE	28	87	GFE	26,3	78
CFE2	36,5	143	GFE2	31,1	110
CJE	20	33	GJE	19,5	32
CFS	21,7	45	GFS	19,9	34
CJS	17,4	16	GJS	16,9	14

Tabela 5.8 – Momento torçor de ruptura teórico (Ameli *et al.*, 2005).

Viga	T_u	$\Delta T, FRP$	$T_{Teó,1}$	$T_{Teó,2}$	$\frac{T_{Teó,1}}{T_u}$ (%)	$\frac{T_{Teó,2}}{T_u}$ (%)
RC	15	–	4,9	16,4	67	9
CFE	28	17,1	22,0	33,5	22	19
CFE2	36,5	27,4	32,3	43,9	11	20
CJE	20	4,6	9,5	21,0	53	5
CFS	21,7	10,4	15,3	27,0	29	24
CJS	17,4	3,4	8,3	19,8	52	14
RG	14,8	–	4,9	15,8	67	7
GFE	26,3	7,1	12,0	22,9	54	14
GFE2	31,1	14,2	19,1	30,0	39	4
GJE	19,5	2,6	7,5	18,4	62	6
GFS	19,9	3,5	8,4	19,3	58	3
GJS	16,9	1,8	6,7	17,6	61	4

Para as diferentes configurações de reforço o aumento da resistência à torção das vigas variou de 16% a 143% para as vigas reforçadas com compósitos de fibras de carbono, e 14% a 110% para as vigas reforçadas com compósitos de fibras de vidro.

O maior aumento da resistência à torção ocorreu nas vigas totalmente envolvidas com duas camadas de reforço, e o menor aumento foi nas vigas reforçadas com estribos em U;

Os dois métodos analíticos empregados para avaliar a contribuição do reforço na resistência à torção das vigas mostraram resultados muito diferentes

entre eles, sendo que o método da teoria do campo de compressão diagonal apresentou resultados mais próximos dos resultados experimentais;

Dois tipos de ruptura foram observados: o descolamento do reforço e o a ruptura do reforço.

5.6.

Hii e Al-Mahaidi (2006a)

O estudo de Hii e Al-Mahaidi (2006a) é composto por um programa experimental de vigas de concreto armado de seção cheia e vazada reforçadas com compósitos de fibras de carbono solicitadas à torção, complementado por uma análise numérica por meio do método dos elementos finitos.

Foram ensaiadas seis vigas de concreto armado com seção transversal de $500\text{ mm} \times 350\text{ mm}$ e 2500 mm de comprimento. Duas vigas tinham seção maciça, sendo que uma era de referência e a outra foi reforçada com compósitos de fibras de carbono. As outras quatro vigas tinham seção vazada, sendo uma viga de referência e três vigas reforçadas com compósitos de fibras de carbono.

As armaduras de aço longitudinal e transversal e as outras características das vigas são mostradas na Figura 5.11.

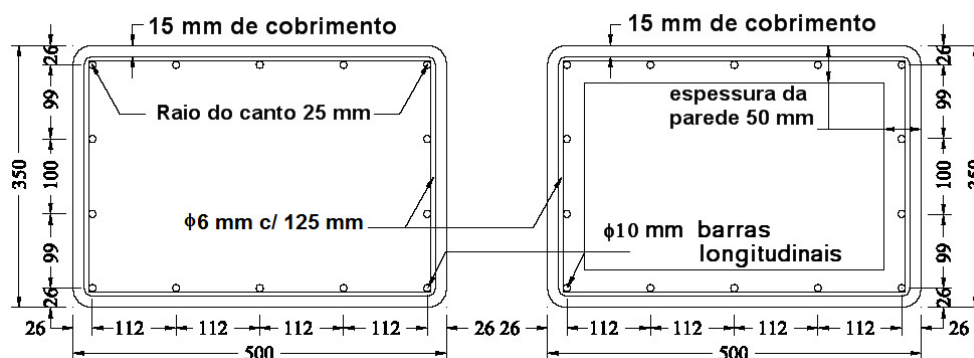


Figura 5.11 – Características geométricas e armaduras de aço (Hii e Al-Mahaidi, 2006).

As Tabelas 5.9, 5.10 e 5.11 apresentam as configurações do reforço adotado, as propriedades das armaduras de aço e as propriedades do compósito de fibras de carbono utilizados na pesquisa.

Tabela 5.9 – Configurações de reforço (Hii e Al-Mahaidi, 2006).

Viga	Esquema de reforço			f_c (MPa)
	Tipo seção	Nº. camadas	Espaçamento	
CS1	Referência seção maciça	–	–	52,5
FS050D2	Estribos seção maciça	2	0,50D	56,4
CH1	Referência seção vazada	–	–	48,9
FH075D1	Estribos seção vazada	1	0,75D	48,9
FH050D1	Estribos seção vazada	1	0,50D	56,4
FH050D2	Estribos seção vazada	2	0,50D	52,8

Tabela 5.10 – Propriedades das armaduras de aço (Hii e Al-Mahaidi, 2006).

Propriedades do aço	Estribos $\phi 6 \text{ mm}$	Arm. longitudinal $\phi 10 \text{ mm}$
Área, $A_s \text{ (mm}^2\text{)}$	28,27	78,54
Módulo de Elasticidade $E_s \text{ (GPa)}$	213	207
Tensão de escoamento $f'_y \text{ (MPa)}$	426,5	398,2
Coeficiente de Poisson ν	0,3	0,3

Tabela 5.11 – Propriedades do compósito de fibras de carbono (Hii e Al-Mahaidi, 2006).

MBrace CF 130 (S&P C-sheet 240)	
Fibra	Carbono alta resistência
Densidade (g/cm^3)	1,7
Módulo de Elasticidade, $E_f \text{ (GPa)}$	240
Peso (g/m^2)	426,5
Espessura (mm)	0,176
Tensão de ruptura (MPa)	3800
Deformação específica última (%)	1,55

O momento torçor foi aplicado por meio de um macaco hidráulico com capacidade de carga de 25 kN, posicionado sobre um braço fixado na viga, distante de 1,8 m do centro de torção (Figura 5.12).



Figura 5.12 – Configuração inicial da viga (Hii e Al-Mahaidi, 2006).

A Figura 5.13 mostra uma viga ensaiada e a Tabela 5.12 e a Figura 5.14 apresentam os resultados experimentais obtidos.

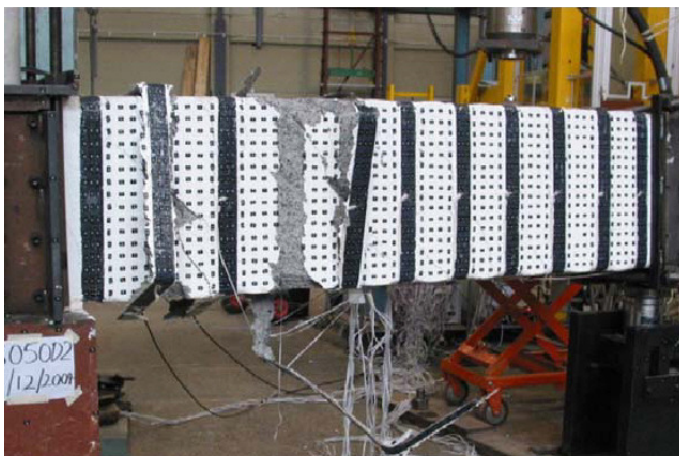


Figura 5.13 – Configurações do reforço (Hii e Al-Mahaidi, 2006).

Tabela 5.12 – Propriedades do compósito de fibras de carbono (Hii e Al-Mahaidi, 2006).

Viga	T_{cr} (kNm)	ϕ_{cr} (°)	T_u (kNm)	ϕ_u (°)
CS1	68,4	0,15	62,9	1,79
FS050D2	73,7 (7,7%)	0,16	93,8 (49,2%)	7,54
CH1	15,8	0,03	49,4	5,29
FH075D1	19,6	0,00	67,5 (36,7%)	4,60
FH050D1	21,3	0,04	78,4 (51,5%)	5,43
FH050D2	22,2	0,02	87,7 (77,6%)	5,52

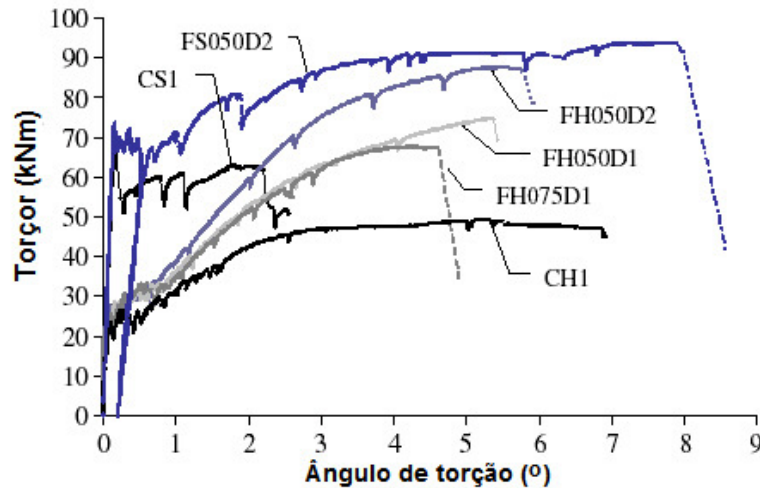


Figura 5.14 – Curvas experimentais momento torçor x ângulo de rotação por unidade de comprimento (Hii e Al-Mahaidi, 2006).

A Figura 5.15 apresenta a comparação entre as curvas experimentais e numérica da variação momento torçor *versus* ângulo de torção por unidade de comprimento. As curva teórica forma obtidas por meio de modelagem com método dos elementos finitos.

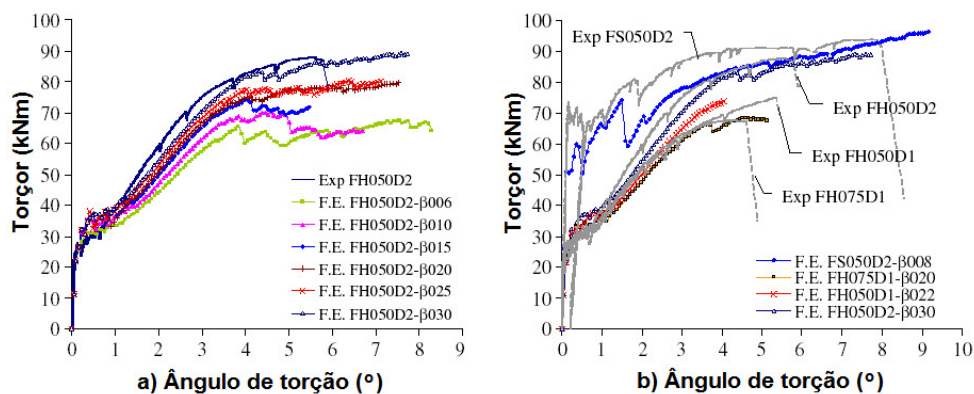


Figura 5.15 – Comparação entre curvas experimentais e numéricas (Hii e Al-Mahaidi, 2006).

Com o programa experimental comprovou-se a viabilidade da utilização de compósitos de fibras de carbono para aumentar a resistência à torção de vigas de concreto armado com seção retangular maciça e vazada.

Verificou-se um aumento no momento torçor de fissuração e de ruptura superior a 40% e 78%, respectivamente, quando comparadas com as vigas de referência.

As medidas efetuadas comprovaram que a distribuição de tensão é não-uniforme entre e através dos estribos de compósitos de fibras de carbono;

A análise numérica com método dos elementos finitos não-lineares apresentou boa concordância com os resultados experimentais para o comportamento da curva momento torçor *versus* ângulo de torção por unidade de comprimento, do aço, do CFC e para o padrão de fissuração obtido.

5.7.

Hii e Al-Mahaidi (2006b)

Este estudo dá continuidade ao trabalho de Hii e Al-Mahaidi (2006a) descrito anteriormente. Em Hii e Al-Mahaidi (2006b) foi utilizada a fotogrametria para medir as distorções causadas pelo momento torçor atuante nas vigas. Essas medições são difíceis de serem realizadas devido aos deslocamentos tridimensionais e deformações fora do plano devido ao empenamento da seção.

A fotogrametria também tem sido utilizada para estudar o engrenamento dos agregados em vigas de concreto armado.

Foram marcados aproximadamente três mil pontos refletivos posicionados nas superfícies de concreto e nas faixas de reforço (Figura 5.12 e 5.13). Ao se fotografar diferentes posições da viga os dados podem ser automaticamente processados num computador para se obter a posição precisa de cada ponto refletivo. Durante a realização de cada ensaio foram feitas pausas para que novas fotografias fossem tiradas.

O uso da fotogrametria mostrou de forma conclusiva que o mecanismo básico de deformação de vigas reforçadas permanecem inalteradas quando comparadas com as vigas de referência.

Verifica-se que o reforço de vigas de concreto armado solicitadas à torção reforçadas externamente com compósitos de fibras de carbono limita efetivamente a abertura das fissuras. Isto propicia indiretamente uma melhor contribuição do concreto na resistência à torção devido a ação mais significativa do engrenamento dos agregados.

5.8.

Hii e Al-Mahaidi (2006c, 2007)

Nestes trabalhos os autores reuniram os resultados experimentais de vigas de concreto armado solicitadas à torção reforçadas com compósitos de fibras de carbono e comparando-os os resultados obtido usando-se modelos teóricos encontrados na literatura.

No gráfico da Figura 5.16a verifica-se que a contribuição teórica do CFC na resistência à torção da viga foi calcula pela expressão 5.12 do Bulletin 14 da FIB. Os valores calculados foram conservativos, em média 52% maiores do que os experimentais.

Para o cálculo mais eficaz da contribuição do CFC na resistência à torção das vigas, a área de concreto utilizada na expressão 5.12 foi substituída pela área do polígono limitado pelo centro das barras de aço longitudinais localizadas nas quinas da seção transversal. Dessa forma a expressão ficou consistente com as prescrições da AS3600 *apud* Hii e Al-Mahaidi (2006c, 2007). Com essa modificação os valores teóricos calculados ficaram mais conservadores, mantendo uma razão média de 1,07 entre os valores experimentais e teóricos, ficando a favor da segurança (Figura 5.16b).

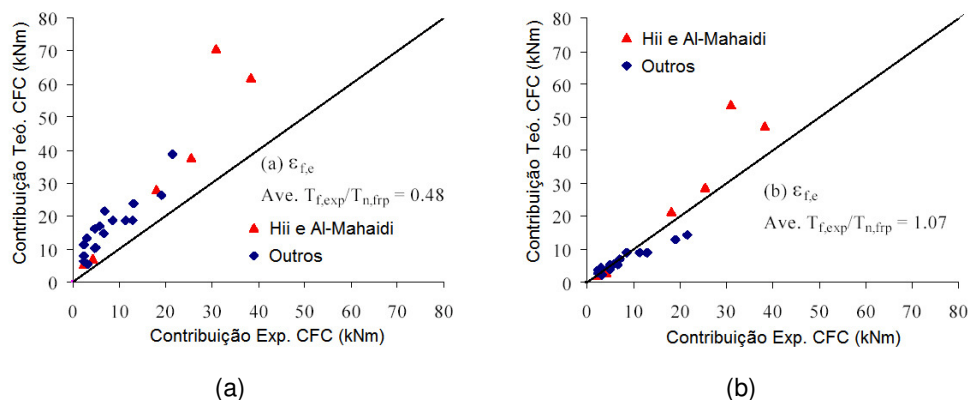


Figura 5.16 – Contribuição do CFC na resistência à torção: a) Bulletin 14 da FIB; b) modificação para a AS3600 de 2001 (Hii e Al-Mahaidi, 2006c, 2007).

A resistência total à torção T_n de vigas reforçadas com CFC, pode ser calculada usando-se o princípio da superposição da parcela referente ao aço $T_{n,s}$ e da parcela referente ao reforço $T_{n,frp}$:

$$T_n = T_{n,s} + T_{n,frp} \quad (5.26)$$

que pode ser reescrita da seguinte maneira

$$T_n = \phi 2A_n (\cotg \theta + \cotg \alpha) \text{sen} \alpha (f_{sy,f} A_{sw} s_t^{-1} + \varepsilon_{fd,e} E_f A_f s_f^{-1}) \quad (5.27)$$

O ângulo de inclinação das fissuras considerado é o proposto pela AS3600 *apud* Hii e Al-Mahaidi (2006c, 2007):

$$\theta = 30^\circ + 15^\circ \left[\frac{T_n - \phi T_{uc}}{\phi T_{u,m\acute{a}x} - \phi T_{uc}} \right] \quad (5.28)$$

onde

A_{sw} – área de um tramo do estribo de aço;

$f_{sy,f}$ – tensão de escoamento do aço do estribo;

s_t – espaçamento dos estribos de aço;

ϕ – fator de resistência à torção;

T_{uc} – momento torçor de fissuração;

$T_{u,m\acute{a}x}$ – momento torçor último.

A Figura 5.17a mostra a razão entre o momento torçor de ruptura experimental e o momento torçor teórico calculado pela expressão 5.27. A razão média da T_{exp}/T_n foi 1,24.

Adaptando-se a expressão 5.12 do Bulletin 14 da FIB ao ACI 318-05 tem-se uma expressão similar à expressão 5.27, porém, o parâmetro A_n é equivalente a 85% da área limitada pela linha central dos estribos. A média da razão T_{exp}/T_n , sendo T_n calculado pela expressão adaptada do ACI 318-05, foi 1,72.

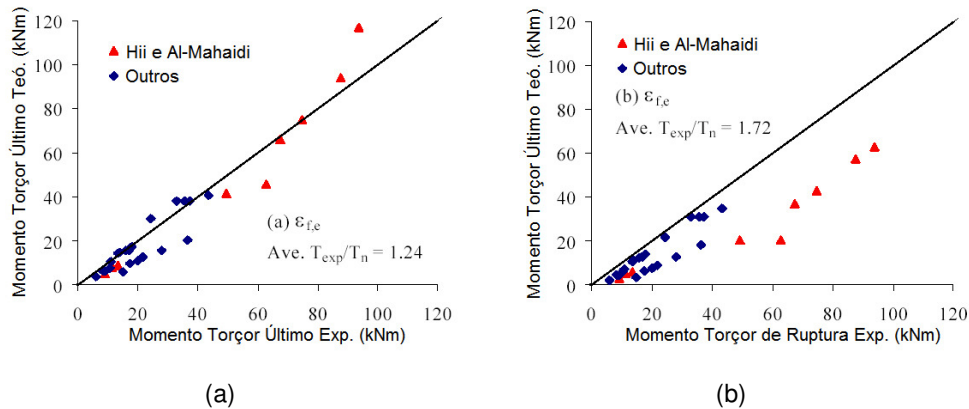


Figura 5.17 – Contribuição do CFC na resistência à torção: a) AS3600 de 2001; b) ACI 318-2005 (Hii e Al-Mahaidi, 2006c, 2007).

Os resultados obtidos usando-se as prescrições do Bulletin 14 da FIB foram contra a segurança, porque esse Bulletin considera que o fluxo de cisalhamento resultante do CFC localiza-se na superfície de concreto, o que contradiz a premissa do modelo da treliça espacial.

A contribuição do reforço foi mais precisa quando a posição do fluxo de cisalhamento foi modificada para ficar consistente com as prescrições da AS3600 *apud* Hii e Al-Mahaidi (2006c, 2007).

Para o cálculo do momento torçor resistente total o método do Bulletin 14 da FIB adaptado para a AS3600 *apud* Hii e Al-Mahaidi (2006c, 2007) apresentou melhores resultados do que quando adaptado ao ACI 318-05, que forneceu resultados muito conservativos.

5.9.

Deifalla e Ghobarah (2006)

O objetivo desse estudo foi determinar a espessura de CFC necessária para reforçar vigas **T** solicitadas à combinação de momento torçor e força cortante.

A espessura t_t de CFC necessária para resistir a um momento torçor é calculada usando-se a analogia da treliça espacial, sendo:

$$t_t = \frac{T - T_0}{2E_f \varepsilon_f A_0 (\cos \beta + \sin \beta)} \quad (5.28)$$

Baseados nas prescrições da CSA-S806-02 *apud* Deifalla e Ghobarah (2006), calcularam a espessura t_v de CFC necessária para resistir à força cortante:

$$t_v = \frac{V - V_0}{2E_f \varepsilon_f d (\cos \beta + \sin \beta)} \quad (5.28)$$

A espessura t_f de CFC necessária para resistir à combinação de momento torçor e força cortante é expressa por:

$$t_f = t_v + t_t \quad (5.28)$$

A deformação específica da fibra ε_f é calculada pela seguinte expressão:

$$\varepsilon_f = \frac{0,33w_f}{L_e s_f} \quad (5.28)$$

Sendo L_e dado por:

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{\sqrt{f_c}}} \quad (5.28)$$

onde

- T – momento torçor resistente da viga **T** reforçada com CFC;
 T_0 – momento torçor resistente da viga **T** sem reforço;
 V – força cortante resistente da viga **T** reforçada com CFC;
 V_0 – força cortante resistente da viga **T** sem reforço.

O programa experimental foi composto pelo ensaio de quatro vigas de concreto armado com seção **T**, sendo TG1 a viga de referência e TG2, TG3 e TG4 as vigas reforçadas com CFC.

O concreto apresentou resistência à compressão de 25,6 *MPa* aos 28 dias.

As propriedades mecânicas do CFC foram: tensão de ruptura de 609 *MPa*, módulo de elasticidade de 63,3 *GPa*, deformação específica máxima de 0,96% e espessura de 0,86 *mm*.

As vigas **T** foram solicitadas por momento torçor e força cortante na razão de 0,5 *m*, e por um momento fletor de baixa magnitude. A seção transversal e as armaduras de aço utilizadas são mostradas na Figura 5.18.

As vigas foram fortemente armadas na direção longitudinal, minimizando o efeito da flexão, focando a ação do momento torçor e da força cortante.

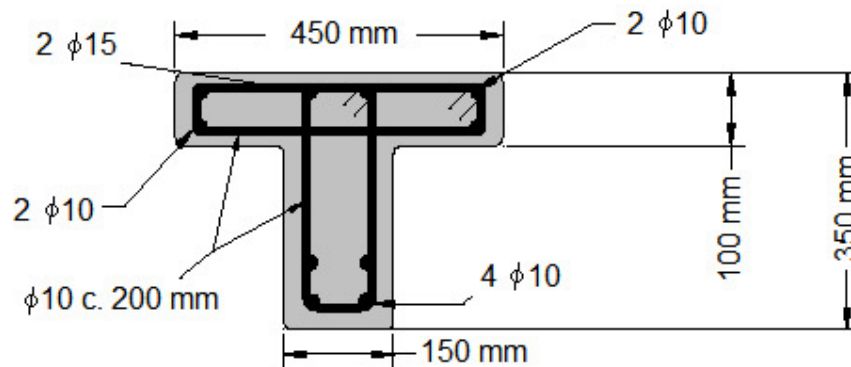


Figura 5.18 – Seção transversal das vigas **T** (Deifalla e Ghobarah, 2006).

O esquema de ensaio e as configurações de reforço e ancoragem são apresentados nas Figuras 5.19 e 5.20, respectivamente.

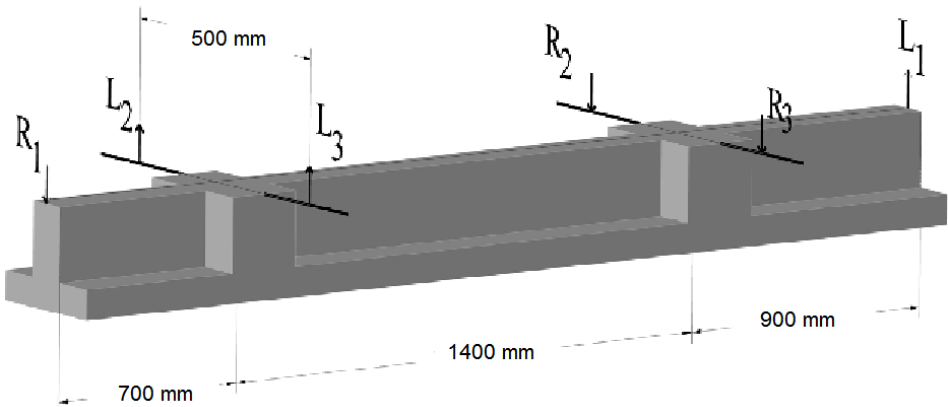


Figura 5.19 – Esquema de ensaio (Deifalla e Ghobarah, 2006).

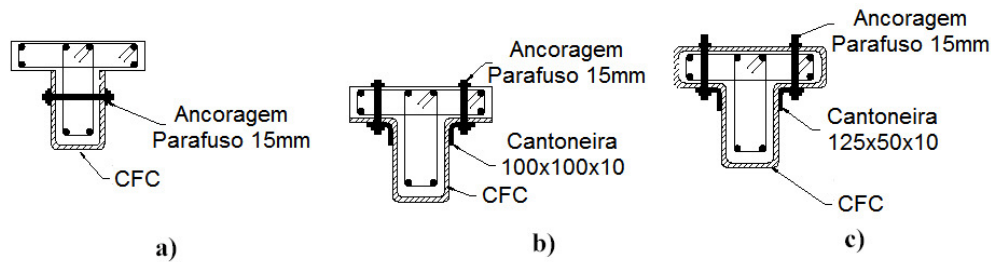


Figura 5.20 – Esquemas de reforço e ancoragens utilizados: a) TG2; b) TG3; c) TG4 (Deifalla e Ghobarah, 2006).

A Tabela 5.14 mostra os resultados dos ensaios e os modos de ruptura das vigas ensaiadas.

Tabela 5.14 – Resultados dos ensaios e modos de ruptura (Deifalla e Ghobarah, 2006).

Viga	Força Cortante* (kN)	Modo de Ruptura
TG1	46,0	escoamento do aço dos estribos seguido do esmagamento do concreto
TG2	68,0	descolamento do CFC seguido do esmagamento do concreto
TG3	76,0	descolamento do CFC
TG4	80,0	descolamento do CFC

* A razão entre o momento torçor e a força cortante foi de 0,5 m.

A Tabela 5.15 apresenta o comparativo entre a espessura de CFC utilizada e a espessura de CFC calculada pela formulação apresentada:

Tabela 5.15 – Resultados dos ensaios e modos de ruptura (Deifalla e Ghobarah, 2006).

Viga	Técnica de Reforço	Razão entre a espessura calculada e a utilizada
TG2	Estribos em U ancorados	0,74
TG3	Estribos em U com ancoragem estendida	0,85
TG4	Envolvimento completo com ancoragem	0,91
Média		0,83
Desvio Padrão		0,09

A formulação apresentada para o cálculo da espessura do reforço para a força cortante e o momento torçor de vigas **T** forneceu resultados conservativos para a espessura requerida.