

COMPARATIVO DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DE 24 VIGAS “T” DE CONCRETO ARMADO COM COMPÓSITOS DE PRFC E AS NORMAS ACI 318, EUROCODE 2 E CEB-FIP MC90

COMPARISON OF SHEAR 24 "T" BEAMS OF REINFORCED CONCRETE TESTS WITH CFRP COMPOSITES AND ACI 318 STANDARDS, EUROCODE 2 AND CEB-FIP MC90.

MARCIO ALVES DE OLIVEIRA FILHO

Engenheiro Civil (UEG - CCET, Campus Henrique Santillo, Anápolis / GO)
marcio_alves5@hotmail.com

FRANCIELLY DJANIRA DE OLIVEIRA

Engenheira Civil (UEG - CCET, Campus Henrique Santillo, Anápolis / GO)
franciellyolive1ra@hotmail.com

NAYANE FERREIRA DE MELO

Engenheira Civil (UEG - CCET, Campus Henrique Santillo, Anápolis / GO)
nayanefmelo@gmail.com

JULIANO RODRIGUES DA SILVA

Doutor em Engenharia Civil (UnB, Brasília - DF) e Docente do Curso de Engenharia Civil (UEG - CCET, Campus Henrique Santillo, Anápolis / GO)
julianorodriguessilva@gmail.com

Resumo: São analisadas experimentalmente 24 (vinte e quatro) vigas “T” de concreto armado, simplesmente apoiadas, submetidas a duas cargas concentradas, sendo todas reforçadas na alma ao cisalhamento com compósitos de fibra de carbono (Polímero Reforçado com Fibras de Carbono - PRFC) com o objetivo de se investigar e comparar, com as normas técnicas, a eficácia desse tipo de reforço nas estruturas em concreto armado e que já foram submetidas às cargas de serviço. Os resultados comprovam o potencial dos compósitos de fibra de carbono (PRFC) como material utilizado para o reforço estrutural. Os resultados são comparados com as cargas últimas estimadas pelas normas técnicas (ACI 318, Eurocode 2, CEB-FIP MC 90) e por Zsutty (1971) para as vigas com e sem reforço ao cisalhamento, verifica-se convergências e divergências em pontos específicos dos ensaios, em virtude do processo de impregnação das fibras de carbono (PRFC), porém os resultados mostram-se satisfatórios, assegurando a segurança dos cálculos estruturais.

Palavras-Chave: Reforço. Concreto. Vigas T. Cisalhamento. Compósito.

Abstract: They are analyzed experimentally 24 (twenty-four) "T" beams of reinforced concrete simply supported, subjected to two concentrated loads, all of which strengthened soul shear with carbon fiber composites (Carbon Fiber Reinforced Polymer - CFRP) with in order to investigate and compare with the technical standards, the effectiveness of this type of reinforcement in concrete structures that have already been subject to service charges. The results show the potential of carbon fiber composites (CFRP) as the material used for structural reinforcement. The results are compared with the estimated ultimate load by the technical standards (ACI 318, Eurocode 2, CEB-FIP MC 90) and Zsutty (1971) to the beams with and without reinforcement shear, there is convergence and divergence at specific points the tests, because the process of impregnating the carbon fibers (CFRP), but show the results were satisfactory, ensuring the safety of structural calculations.

Keywords: Reinforcement. Concrete. Beams T. Shearing. Composite.

INTRODUÇÃO

As estruturas podem apresentar danos ou patologias originadas nas fases de concepção e projeto, execução ou utilização, podendo-se citar como causas desses danos a utilização de modelos de análise inadequadas, a utilização de hipóteses de cálculo incorretas, o detalhamento de armadura inadequado, a desconsideração de ações relevantes, a sub-quantificação das ações na estrutura, a má especificação dos materiais empregados, a deficiência no controle de qualidade dos materiais e da execução, e a alta agressividade do ambiente, em conjunto com a inexistência de manutenção. Há grandes esforços que são dedicados à recuperação e a conservação das obras existentes, utilizando para isso, atividades de recuperação e (ou) reforços, na tentativa de se restabelecer as condições de uso para as quais foram projetadas ou adaptá-las às novas condições.

Os compósitos, principalmente os de fibra de carbono e de vidro, tanto pelas suas elevadas resistências, quanto pela relativa facilidade de execução e versatilidade proporcionada pelo sistema (utilização em áreas de difícil acesso), tem sido muito utilizados e a tendência é serem utilizados cada vez mais, apesar do custo dos materiais empregados ACI 440(3).

O objetivo principal desta pesquisa é investigar o comportamento de vigas de seção transversal “T”, reforçadas ao cisalhamento com faixas de mantas de fibra de carbono (CFRP), sendo confeccionadas vinte e quatro vigas subarmadas ao cisalhamento, que são reforçadas externamente com faixas de mantas de fibra de carbono, com ancoragem na alma e com o envolvimento da alma e mesa da viga.

Os resultados experimentais são comparados com as normas técnicas ACI 318(4), CEB-FIP MC90(5), Eurocode 2(6) e as recomendações do pesquisador Zsutty(1,2).

Este trabalho prossegue as investigações experimentais em vigas de concreto com seção transversal “T”, realizadas na Universidade de Brasília desde 1999, dentro das linhas de pesquisa “Análise Experimental de Estruturas” e “Reforço, Patologia e Recuperação de Estruturas de Concreto”.

CÓDIGOS E OUTRAS RECOMENDAÇÕES

Disposições Gerais

Serão apresentadas a seguir as prescrições relativas ao dimensionamento da armadura de cisalhamento das normas ACI 318⁽⁴⁾, CEB-FIP MC90⁽⁵⁾, Eurocode 2⁽⁶⁾ e as recomendações do pesquisador Zsutty^(1,2). Cabe salientar que estas prescrições e observações tiveram, como

principal fundamento para o cálculo da armadura transversal, para resistir ao esforço cortante em uma viga de concreto armado, a teoria da treliça de Mörsch.

Disposições do ACI 318M(4)

O dimensionamento ao cisalhamento de estruturas de concreto armado baseia-se na equação 01, sendo adotado o fator de redução da capacidade resistente de viga ao cisalhamento de 0,85 conforme recomendação do ACI 318M⁽⁴⁾ **equação 01**.

$$V_u \leq \phi \cdot V_n \quad (01)$$

A resistência nominal ao cisalhamento, V_n , é dada pela **equação 02**:

$$V_n = V_c + V_s \quad (02)$$

Onde:

V_c – Resistência ao cisalhamento oriunda do concreto;

V_s – Resistência ao cisalhamento proveniente da armadura de cisalhamento.

- **Resistência ao cisalhamento V_c oriunda do concreto**

A resistência ao cisalhamento V_c pode ser computada pela **equação 03** abaixo:

$$V_c = \left(0.16 \cdot \sqrt{f_{ck}} + 17 \cdot \rho \cdot \frac{V_u \cdot d}{M_u} \right) \cdot b_w \cdot d \leq 0.29 \cdot b_w \cdot d \cdot \sqrt{f_c} \quad (03)$$

Onde:

V_c e V_u – são expressos em (N)

f_c – expresso em (MPa)

b_w e d – expresso em (mm)

r – taxa geométrica de armadura longitudinal igual a $\frac{A_s}{b_w \cdot d}$

M_u – momento fletor último expresso em (N.mm)

A norma sugere uma forma simplificada de calcular a contribuição do concreto para a resistência ao cisalhamento, V_c . Para isso, assume o valor de $0,01\sqrt{f_c}$ para a segunda parcela da equação AA, a qual está relacionada com o efeito pino e relação a/d . a **equação 04** apresenta este cálculo simplificado:

$$V_c = 0.17 \cdot b_w \cdot d \cdot \sqrt{f_c} \quad (04)$$

Onde:

V_c – é expresso em (N)

f_c – expresso em (MPa)

b_w e d – expresso em (mm)

- **Parcela resistida pela armadura de cisalhamento**

A **equação 05** fornece o valor de V_s para estribos perpendiculares ao eixo da peça, assumindo as condições de que todos os estribos que atravessam a fissura de cisalhamento encontram-se escoados e que z é aproximadamente igual a d .

$$V_s = \frac{A_{sw} \cdot f_{yd} \cdot d}{s} \leq 0.68 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot b_w \cdot d \quad (05)$$

Onde:

V_s – é expresso em (N);

A_{sw} – expresso em (mm²);

s – espaçamento entre estribos em (mm);

f_{yd} – expresso em (MPa);

b_w e d – expresso em (mm).

- **Aspectos construtivos**

A resistência de escoamento de cálculo da armadura de cisalhamento à tração, não deve exceder 400 MPa, e o espaçamento entre estribos não deve ser superior a $d/2$ ou 600 mm. Quanto à área mínima da armadura de cisalhamento, esta deve ser fornecida pela **equação 06**.

$$A_{sw} = \frac{b_w \cdot s}{3 \cdot f_y} \quad (06)$$

A tensão nominal última de cisalhamento, t_{wu} , para vigas com armadura transversal, é expressa pela **equação 07**.

$$\tau_{wu} = \phi \cdot \left[\frac{V_c}{b_w \cdot d} + \rho_w \cdot f_{yd} \right] \quad (07)$$

Disposições do CEB-FIP MC90(5)

A norma CEB-FIP MC90⁽⁵⁾ baseia-se, para o dimensionamento de peças de concreto

armado ao cisalhamento, no modelo de treliça generalizada. Segundo a norma, o ângulo, entre a horizontal e a biela de compressão do concreto, ao nível da linha neutra pode ser livremente escolhido dentro do intervalo de $18,4^\circ$ ($\text{arc cot } 3$) e 45° ($\text{arc cot } 1$). Nesse modelo, são determinadas as forças solicitantes F_s , as quais deverão ser inferior às forças resistentes F_r .

- **Banzo tracionado**

A força atuante no banzo tracionado é expressa pela **equação 08**:

$$F_{st} = \frac{|M_{sd}|}{z} + \frac{N_{sd}}{z} \cdot (z - z_s) + \frac{V_{sd}}{2} \cdot (\cot \theta - \cot \alpha) \quad (08)$$

Onde:

M_{sd} – momento fletor solicitante de cálculo;

N_{sd} – esforço axial, considerado positivo na tração e negativo na compressão;

V_{sd} – esforço cortante de cálculo;

z – braço de alavanca;

z_s – distância entre a linha de ação do esforço axial, N_{sd} e o centroide da armadura principal de tração;

θ – ângulo de inclinação da diagonal de concreto comprimido com o eixo da viga;

α – ângulo de inclinação da armadura transversal com a horizontal.

Nos casos em que as reações e carregamento são aplicados de modo a criarem esforços de compressão transversais através da altura da peça, a força atuante, F_{st} deverá ser dado pela **equação 09**:

$$F_{st} \leq \frac{|M_{sd \max}|}{z} + \frac{N_{sd}}{z} (z - z_s) \quad (09)$$

A força resistente do banzo tracionado será dado pela **equação 10**.

$$F_{rt} = A_s \cdot f_{yd} \quad (10)$$

Onde:

A_s – área da seção transversal da armadura longitudinal tracionada;

A_{sw} – resistência à tração de cálculo do aço.

- **Banzo comprimido**

A força atuante no banzo comprimido é dado pela **equação 11**:

$$F_{sc} = \frac{|M_{sd}|}{z} - N_{sd} \cdot \frac{z_s}{z} - \frac{V_{sd}}{2} \cdot (\cot \theta - \cot \alpha) \quad (11)$$

Exceto para a seção de momento máximo $M_{\text{máx}}$ onde, para carregamento direto, é utilizada a **equação 12**:

$$F_{sc} = \frac{|M_{sd, \text{máx}}|}{Z} - N_s \cdot \frac{Z_s}{Z} \quad (12)$$

A força resistente no banzo comprimido é dada pela **equação 13**:

$$F_{rc} = f_{cdi} \cdot A_c + f_{ycd} \cdot A_{sc} \quad (13)$$

Onde:

A_c – área da seção transversal do banzo comprimido;

A_{sc} – área de armadura longitudinal comprimida;

f_{cdi} – tensão média considerada para zonas submetidas, essencialmente, ao esforço uniaxial de compressão, sendo para regiões não-fissuradas em que $f_{cdi} = f_{cd1}$ conforme **equação 14** abaixo:

$$f_{cd1} = 0.85 \cdot \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] \cdot f_{cd} \quad (14)$$

Para regiões fissuradas, onde há uma redução da resistência à compressão devido ao efeito da tensão transversal oriunda da armadura e pela necessidade de transmitir forças através das fissuras, f_{cdi} , passa a ser igual a f_{cd2} mostrado pela **equação 15**. Com f_{ck} e f_{cd} dados em MPa.

$$f_{cd2} = 0.60 \cdot \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] \cdot f_{cd} \quad (15)$$

Esses valores, no entanto, somente são válidos se a máxima deformação específica à compressão do concreto (**equação 16**):

$$\varepsilon_{cu} = 0.004 - 0.002 \cdot \frac{f_{ck}}{100} \quad (16)$$

- **Diagonal de concreto comprimida**

A força atuante na diagonal comprimida da treliça generalizada é dada pela **equação 17**:

$$F_{scw} = \frac{V_{sd}}{\sin \theta} \left(\frac{\cot \theta}{\cot \theta + \cot \alpha} \right) \quad (17)$$

A força resistente à compressão na biela de concreto da treliça generalizada vale (**equação 18**):

$$F_{rcw} = f_{cd2} \cdot b_w \cdot z \cdot \cos \theta \quad (18)$$

- **Diagonal tracionada**

A força atuante na diagonal tracionada, representada pela armadura transversal, é dada pela **equação 19**:

$$F_{stw} = \frac{V_d}{\sin \alpha} \quad (19)$$

Na **equação 20** a força de tração resistente é calculada por:

$$F_{rtw} = \left[\frac{A_{sw} \cdot f_{yd}}{s} \right] \cdot z \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \quad (20)$$

- **Aspectos construtivos**

Segundo o CEB-FIP MC 90⁽⁵⁾, a taxa mecânica mínima de cisalhamento não poderá ser menor que 0.2, conforme **equação 21**:

$$W_{sw} = \frac{A_{sw} \cdot f_{yk}}{b_w \cdot s \cdot f_{ctm} \cdot \sin \alpha} \geq 0.2 \quad (21)$$

Onde:

$\frac{A_{sw}}{s}$ – área da armadura transversal;

b_w – largura das vigas de seção retangular;

f_{yk} – resistência à tração característica do aço;

f_{ctm} – resistência média de tração do concreto, expressa pela equação 22:

$$f_{ctm} = f_{ctko,m} \sqrt[3]{\left(\frac{f_{ck}}{f_{cko}} \right)^2} \quad (22)$$

Onde:

$f_{ctko,m}$ – 1,4 MPa;

f_{cko} – 10 MPa.

Se o concreto tiver resistência à compressão superior a 50 MPa, a equação AA sofrerá uma alteração de um fator $Df = 8$ MPa que será somado ao numerador e denominador da equação e também do valor de $f_{ctk,m} = 1,8$ MPa, conforme prescreve recomendação do CEB-FIP MC90⁽⁵⁾. A taxa de armadura é dada pela **equação 23**.

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s \cdot b_w \cdot \sin \alpha} \quad (23)$$

Disposições do Eurocode 2(6)

O Eurocode 2⁽⁶⁾ baseia-se em três valores resistentes:

V_{Rd1} – valor de cálculo do esforço cortante resistente do elemento sem armadura de cisalhamento;

V_{Rd2} – valor máximo do esforço cortante suportado sem ocorrência de esmagamento das bielas de compressão do concreto;

V_{Rd3} – valor de cálculo do esforço cortante suportado por um elemento com armadura de cisalhamento.

• Valor de cálculo do esforço cortante resistente do elemento sem armadura de cisalhamento

O valor é calculado de acordo com a **equação 24** abaixo:

$$V_{Rd1} = (\tau_{Rd} \cdot k \cdot (1.2 + 40\rho_1) + 0.15 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d \quad (24)$$

O valor de referência para o cálculo do esforço cortante resistente (**equação 25**) vale:

$$\tau_{Rd} = \frac{0.25 \cdot f_{ctk0.05}}{\gamma_c} \quad (25)$$

Onde:

γ_c - deve ser igual a 1,5 e $f_{ctk0.05}$ o valor característico da tensão de ruptura do concreto à tração simples;

K - coeficiente cujo valor vale 1 para elementos em que mais de 50% da armadura inferior é interrompida no vão. Caso contrário, $K = 1,6 - d \leq 1$;

r_1 - menor taxa de armadura longitudinal de tração no trecho de comprimento $2h$ a partir da face do apoio igual a $\frac{A_s}{b_w \cdot d} \geq 0.02$;

b_w - largura mínima da seção ao longo da altura útil;

s_{cp} - a razão entre o esforço normal, N_{sd2} , e a área total, A_{cT} , na seção de concreto.

• Valor de cálculo do esforço cortante suportado sem a ocorrência de esmagamento das bielas de compressão do concreto

A **equação 26** apresenta o valor de cálculo do esforço cortante resistente máximo, V_{Rd2} , para verificação do esmagamento da escora comprimida.

$$V_{Rd2} = 0.45 \cdot v \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d \cdot (1 + \cot g\alpha) \quad (26)$$

Onde:

n – fator de eficácia, calculado por $v = 0.7 \cdot \frac{f_{ck}}{200} \geq 0.5$;

α – ângulo de inclinação das barras inclinadas com relação à horizontal.

Na ausência de uma análise mais rigorosa, o valor de cálculo do esforço cortante nunca deve ser superior a V_{Rd2} em qualquer seção do elemento. Caso o elemento esteja submetido a esforços normais de compressão, o valor de V_{Rd2} deve ser reduzido, de acordo com a **equação 27**:

$$V_{Rd2,red} = 1.67 \cdot V_{Rd2} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{cp,eff}}{f_{cd}} \right) \leq V_{Rd2} \quad (27)$$

Onde:

$\sigma_{cp,eff}$ – tensão média efetiva no concreto devido ao esforço normal calculado por

$$\sigma_{cp,eff} = \frac{N_{sd} - f_{yk} \cdot \frac{A_{s2}}{\gamma_s}}{A_{cT}} \text{ e } \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \text{ não superior a 400 MPa; sendo:}$$

N_{sd} – esforço axial, considerado positivo na tração e negativo na compressão;

f_{yk} – valor característico da tensão de escoamento à tração da armadura de compressão;

A_{s2} – área da armadura longitudinal comprimida;

A_{cT} – área total da seção de concreto.

• Valor de cálculo do esforço cortante suportado por um elemento com armadura de cisalhamento

A **equação 28** apresenta o cálculo da resistência ao esforço cortante, V_{Rd3} , de uma seção com armadura de cisalhamento:

$$V_{Rd3} = V_{cd} + V_{wd} \quad (28)$$

Onde:

V_{cd} – capacidade resistente de cálculo ao esforço cortante do concreto, cujo valor é igual a: V_{Rd1} (calculado conforme equação 24);

V_{wd} – capacidade resistente de cálculo da armadura de cisalhamento.

• Aspectos construtivos

Caso sejam utilizados estribos verticais, a contribuição da armadura de cisalhamento é obtida de acordo com a **equação 29**, no caso de barras inclinadas, conforme a **equação 30** respectivamente:

$$V_{wd} = 0.9 \frac{A_{sw} \cdot f_{ydw} \cdot d}{s} \quad (29)$$

$$V_{wd} = 0.9 \frac{A_{sw} \cdot f_{ydw} \cdot d}{s} \cdot (1 + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha \quad (30)$$

186

Onde:

A_{sw} – área da seção transversal da armadura de cisalhamento;

f_{ydw} – resistência de cálculo de escoamento do aço da armadura de cisalhamento;

α – ângulo entre a armadura transversal inclinada e o eixo longitudinal da peça.

A armadura de cisalhamento deve formar ângulo de 45° a 90° com o plano médio do elemento estrutural, podendo ser constituída por combinações de cintas e estribos, barras inclinadas e armaduras sob a forma de “gaiolas”.

Em vigas, somente é possível utilizar barras inclinadas como armadura de cisalhamento quando combinadas com estribos, entretanto estas não devem ultrapassar 50% das armaduras de combate ao esforço cortante.

Disposições do Zsutty^(1,2)

Segundo Zsutty^(1,2) a capacidade resistente ao esforço cortante último de vigas de concreto armado deve ser determinado segundo a **equação 31**.

$$V_u = \phi \cdot (V_c + V_s) \quad (31)$$

Sendo: ϕ o coeficiente de minoração da capacidade resistente da viga ao cisalhamento. É recomendado o valor de 0,85 para o ϕ coeficiente, de acordo com o ACI 318⁽⁴⁾.

A resistência nominal ao cisalhamento proveniente “do concreto” é determinada de acordo com a relação a/d apresentada pela viga, seguindo a **equação 32** para $a/d \geq 2,5$ (Vigas esbeltas), ou a **equação 33** para $a/d < 2,5$ (vigas curtas).

$$V_c = 2.3 \cdot b_w \cdot d \cdot \sqrt[3]{\left(f_{ck} \cdot \rho \cdot \frac{d}{a} \right)} \quad (32)$$

Sendo: V_c - é expresso em (N);

b_w, d – são expressos em (mm);

f_{ck} – expresso em (MPa);

r a taxa geométrica de armadura longitudinal, igual a $\frac{A_s}{b_w \cdot d}$.

$$V_c = \left(\frac{2.5}{\frac{a}{d}} \right) \cdot \left(2.3 \cdot b_w \cdot d \cdot \sqrt[3]{f_{ck} \cdot \rho \cdot \left(\frac{d}{a} \right)} \right) \quad (33)$$

Onde: V_c em N;

b_w , d , a em mm;

f_{ck} em MPA

A parcela responsável pela força de tração nos estribos pode ser calculada de acordo com a **equação 34**.

$$V_s = \frac{A_{sw} \cdot f_{ykw} \cdot d}{s} \quad (34)$$

Onde: f_{ykw} a resistência característica de escoamento do aço da armadura transversal de cisalhamento;

s o espaço entre estribos.

A tensão nominal última de cisalhamento, para vigas com armadura transversal, é dada pela **equação 35**.

$$\tau_{wu} = \varphi \cdot \left(\frac{V_c}{b_w \cdot d} + \rho \cdot f_{ykw} \right) \quad (35)$$

Sendo: τ_{wu} a tensão nominal última de cisalhamento.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Disposição das fibras

A tabela 1 e 2 apresentam as disposições das fibras das 24 vigas de concreto armado, contendo tipo de ancoragem, ângulo e informações necessárias para o cálculo do reforço.

Tabela 1 – Configuração das fibras de reforço

Viga	Fibras	Tipo de Ancoragem	CFRP Tiras de reforço
A1	Não	---	---
A2	Não	Revestimento U	Vertical / camada de uma folha
A3	Não	Revestimento U	45° inclinada / Camada de uma folha
A4	Não	---	---
A5	Sim	Revestimento U	Vertical / Camada de uma folha

A6	Sim	Revestimento U	Vertical / Camada de duas folhas
A7	Sim	Revestimento U	45° inclinada / Camada de uma folha
A8	Sim	Revestimento U	45° inclinada / Camada de uma folha
B1	Não	---	---
B2	Sim	Envoltório*	Vertical / Camada de uma folha
B3	Sim	Envoltório*	Vertical / Camada de duas folhas
B4	Sim	Revestimento U **	Vertical / Camada de três folhas
B5	Sim	Envoltório*	45° inclinada / Camada de uma folha
B6	Sim	Envoltório*	45° inclinada / Camada de uma folha
B7	Sim	Revestimento U **	Vertical / Camada de uma folha
B8	Sim	Revestimento U **	Vertical / Camada de duas folhas
C1	Não	---	---
C2	Sim	Revestimento U ***	Vertical / Camada de uma folha
C3	Sim	Revestimento U ****	Vertical / Camada de uma folha
C4	Sim	Revestimento U ****	Vertical / Camada de duas folhas
C5	Não	---	---
C6	Sim	Envoltório*	Vertical / Camada de uma folha
C7	Sim	Envoltório*	Vertical / Camada de duas folhas
C8	Sim	Envoltório*	45° inclinada / Camada de uma folha

Fonte: AUTORES, 2015

* Envoltória através de furos no flange da viga;

** 2 camadas de 8,0 mm em ranhuras;

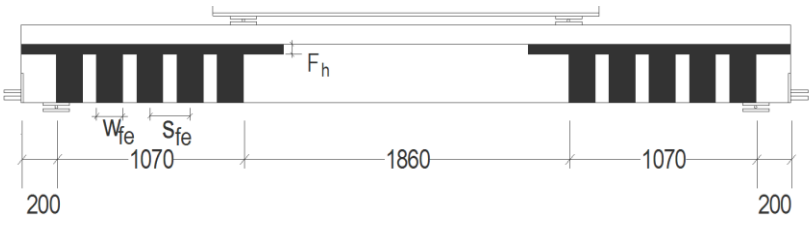
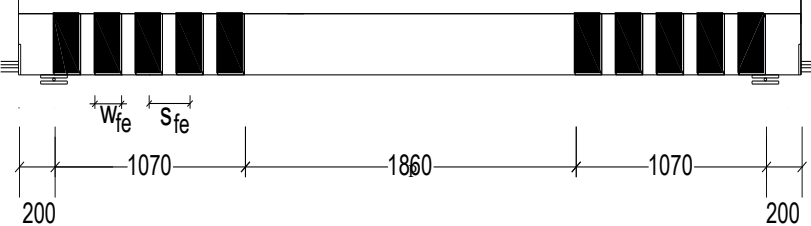
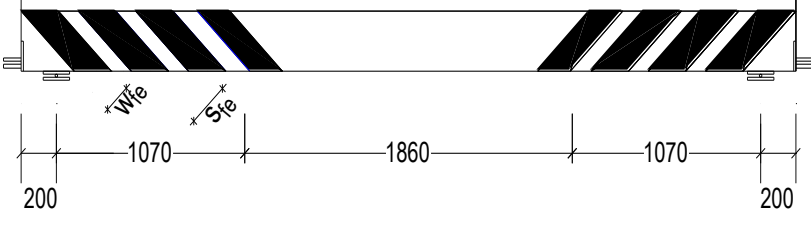
*** Mais 50 mm de largura nas tiras horizontais;

**** Mais 100 mm de largura nas tiras horizontais.

Tabela 2 – Disposições dos reforços sobre as vigas

Beams	Strengthening Arrangements	
A2 / A5		$W_{fe} = 150 \text{ mm}$ $S_{fe} = 230 \text{ mm}$ 1 camada/90°
A3 / A7		$W_{fe} = 150 \text{ mm}$ $S_{fe} = 230 \text{ mm}$ 1 camada/45°

A6		$W_{fe} = 150 \text{ mm}$ $S_{fe} = 200 \text{ mm}$ 2 camadas/90°
A8		$W_{fe} = 150 \text{ mm}$ $S_{fe} = 180 \text{ mm}$ 1 camada/45°
B2 / B3		$W_{fe} = 150 \text{ mm}$ $S_{fe} = 230 \text{ mm}$ B2: 1 camada/90° $W_{fe} = 150 \text{ mm}$ $S_{fe} = 200 \text{ mm}$ B3: 2 camadas/90°
B4		$W_{fe} = 150 \text{ mm}$ $S_{fe} = 200 \text{ mm}$ 3 camadas/90°
B5		$W_{fe} = 150 \text{ mm}$ $S_{fe} = 230 \text{ mm}$ 1 camada/45°
B6		$W_{fe} = 150 \text{ mm}$ $S_{fe} = 200 \text{ mm}$ 1 camada/45°
B7		$W_{fe} = 150 \text{ mm}$ $S_{fe} = 230 \text{ mm}$ 1 camada/90°
B8		$W_{fe} = 150 \text{ mm}$ $S_{fe} = 200 \text{ mm}$ 2 camadas/90°

C2 / C3 / C4		$W_{fe} = 150 \text{ mm}$ $S_{fe} = 230 \text{ mm}$ C2: 1 layer/90° $F_h = 50 \text{ mm}$ (1 camada) C3: 1 camada/90° $F_h = 100 \text{ mm}$ (1 layer) $W_{fe} = 150 \text{ mm}$ $S_{fe} = 200 \text{ mm}$ C4: 2 camadas/90° $F_h = 100 \text{ mm}$ (2 camadas)
C6 / C7		$W_{fe} = 150 \text{ mm}$ $S_{fe} = 230 \text{ mm}$ C6: 1 camada/90° $W_{fe} = 150 \text{ mm}$ $S_{fe} = 200 \text{ mm}$ C7: 2 camadas/90°
C8		$W_{fe} = 150 \text{ mm}$ $S_{fe} = 230 \text{ mm}$ 1 camada/45°

Fonte: AUTORES, 2015

Resultados

A tabela 3 apresenta a análise comparativa dos esforços cortantes pelos métodos apresentados anteriormente com os valores experimentais, visando obter uma melhor relação e análise dos dados.

Tabela 3 – Comparativo

Beam	Experimental (V_u)	$V_{ACI\ 318}$	$V_{MC\ 90}$	$V_{EC\ 2}$	V_{Zsutty}	V_u / $V_{ACI\ 318}$	V_u/V_{MC} 90	V_u / $V_{EC\ 02}$	V_u / V_{Zsutty}
A1	251	211,84	211,15	223,62	158,00	1,18	1,19	1,12	1,59
A2	276	322,30	311,55	440,26	343,00	0,86	0,89	0,63	0,80
A3	320	322,30	311,55	440,26	422,00	0,99	1,03	0,73	0,76

A4	368	211,84	211,15	223,62	249,00	1,74	1,74	1,65	1,48
A5	403	292,39	284,85	373,01	486,00	1,38	1,41	1,08	0,83
A6	403	366,09	358,55	446,71	569,00	1,10	1,12	0,90	0,71
A7	403	292,39	284,85	373,01	532,00	1,38	1,41	1,08	0,76
A8	395	366,09	358,55	446,71	575,00	1,08	1,10	0,88	0,69
B1	360	222,03	211,15	341,65	277,00	1,62	1,70	1,05	1,30
B2	589	346,04	337,15	441,91	505,00	1,70	1,75	1,33	1,17
B3	570	508,25	499,15	606,55	667,00	1,12	1,14	0,94	0,85
B4	579	650,37	639,15	774,15	561,00	0,89	0,91	0,75	1,03
B5	573	399,11	387,15	532,08	568,00	1,44	1,48	1,08	1,01
B6	420	401,35	391,15	512,72	643,00	1,05	1,07	0,82	0,65
B7	491	316,37	305,15	440,15	506,00	1,55	1,61	1,12	0,97
B8	510	386,37	375,15	510,15	593,00	1,32	1,36	1,00	0,86
C1	260	205,13	211,15	162,71	235,00	1,27	1,23	1,60	1,11
C2	295	294,97	301,75	247,19	324,00	1,00	0,98	1,19	0,91
C3	315	294,97	301,75	247,19	324,00	1,07	1,04	1,27	0,97
C4	300	338,97	345,75	291,19	368,00	0,89	0,87	1,03	0,82
C5	372	299,69	311,60	421,13	291,00	1,24	1,19	0,88	1,28
C6	650	511,42	523,60	628,93	502,00	1,27	1,24	1,03	1,29
C7	788	681,29	693,40	799,78	672,00	1,16	1,14	0,99	1,17
C8	612	511,02	522,60	637,39	502,00	1,20	1,17	0,96	1,22

Fonte: AUTORES, 2016

Conclusão

Os ensaios realizados mostraram que vigas “T” de concreto armado podem ser reforçadas com a utilização de mantas de fibra de carbono, e que, para os casos analisados o fator limitante da eficácia deste tipo de reforço foi a ancoragem do material à peça de concreto, cuja falha induz a ruptura precoce após a formação da fissura principal de cisalhamento, em confronto com o estimado com a utilização das expressões de dimensionamento usuais.

A ruptura das vigas reforçadas, causada pelos problemas de ancoragem do material à peça de concreto, cuja falha induz a ruptura precoce após a formação da fissura principal de cisalhamento, em confronto com o estimado com a utilização das expressões de dimensionamento usuais.

A execução do reforço com fibras inclinadas a 45° é muito mais trabalhosa que a execução com fibras verticais, necessitando também de maior quantidade de material. Para as

cargas últimas alcançadas, a eficiência medida com carga última P_u dividida pela área de fibra aplicada, indicou que, no caso de uma camada de reforço o reforço vertical foi mais eficiente que o inclinado a 45°.

Apesar de ter-se utilizado o procedimento recomendado para o reforço, e este ter sido realizado por uma equipe especializada, observou-se que os problemas de ancoragem, com o deslocamento apresentado pelas mantas de fibra de carbono, para uma carga menor do que a prevista deveu-se principalmente à ancoragem insuficiente da fibra nas proximidades da junção entre a alma e a mesa das vigas. Uma ancoragem menos eficiente nesta região é também previsível, pois a colagem das fibras é dificultada pelo acesso da lixadeira utilizada para remover as sujeiras e a fina camada de nata de cimento que reveste a vigas.

As resistências ao cisalhamento calculadas através das prescrições de Zsutty(1,2), acrescidas de 42%, aproximaram-se, com considerável precisão, das cargas últimas de vigas “T” de concreto armado sem e com armadura transversal no vão de cisalhamento.

Para o reforço e ancoragem, utilizando o ACI 440(4), para este tipo de reforço e ancoragem, indica que o método deve ser analisado com cuidado, para eventualmente levar em consideração o tipo de ancoragem adicional utilizada. Deve ser ressaltado que o número de ensaios realizado foi pequeno e para resistência do concreto diferente (40 MPa para as vigas de Sales Neto(7); 45,3 MPa para as vigas de Silva Filho(8) e 22,5 MPa para as vigas de Araújo(9)). As prescrições das normas ACI 318(4) e as demais apresentaram valores mais conservadores.

Referências

ZSUTTY, T. C., “**Beam shear strength prediction by analysis of existing data**”. ACI Structural Journal, Vol. 65 No 8, November, 1968.

ZSUTTY, T. C., “**Shear strength prediction for separate categories of simple beam tests**”. ACI Structural Journal, Vol. 68 No 2, February, 1971.

ACI Committee 440, **Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars**, American Concrete Institute, 2001.

ACI-318 – **Building Code Requirements for Structural Concrete** (2011).

CEB – FIP MC 90. **Externally bonded FR1} reinforcement for RC structures, bulletin 14**, Julho. 2001.

EUROCODE 2. **Design of Concrete Structures -Part 1: General Rules and Rules for buildings**. December. 1991.

SALLES NETO, M., "**Behaviour of "T" beams strengthened in shear with carbon sheet laminates (CFRP)**", M.Sc. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Brasília, 2000 (in Portuguese).

SILVA FILHO J. N., "**Additional tests in "T" beams strengthened in shear with CFRP laminates**", M.Sc. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Brasília, 2001 (in Portuguese).

ARAÚJO, A. S., "**T" beams strengthened in shear with CFRP laminates**", M.Sc. Thesis, Dept Civil & Environ. Eng., University of Brasília, 2002. (in Portuguese).