

## R/C Structures Strengthened With CFRP Part II: Analysis of Shear Models

### *Estruturas de Concreto Reforçadas com PRFC Parte II: Análise dos Modelos de Cisalhamento*



**A. L. GAMINO**<sup>a</sup>  
andre.gamino@gmail.com

**J. L. A. O. SOUSA**<sup>b</sup>  
jls@fec.unicamp.br

**O. L. MANZOLI**<sup>c</sup>  
omanzoli@feb.unesp.br

**T. N. BITTENCOURT**<sup>d</sup>  
tulio.bittencourt@poli.usp.br

#### Abstract

This paper corresponds to the second part of a work intended to evaluate the design models of reinforced concrete structures strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP). The shear models analyzed correspond to the guidelines ACI 440 and fib-14, as well as more recent formulations, available in the literature. Such models were applied to eight "T" beams strengthened to shear with CFRP composites strips. Different types of carbon fiber composites (sheets and laminates), from different manufacturers, available in the Brazilian market, were applied. The analyses indicate that anchorage mechanism helps increasing load capacity and ductility and that none of the tested analytical models were capable of reproducing satisfactorily the observed behavior of the tested beams.

**Keywords:** carbon fiber reinforced polymers, shear strengthening, experimental tests, analytical models.

#### Resumo

Este artigo corresponde à segunda parte de trabalho visando à avaliação de modelos de projeto de estruturas de concreto armado reforçadas com Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono (PRFC). São avaliados modelos de cisalhamento correspondentes às recomendações ACI-440 e fib-14, além de outros modelos mais recentes, disponíveis na literatura. Esses modelos foram aplicados na análise de oito vigas "T" reforçadas ao cisalhamento com tiras de PRFC. Diferentes tipos de compósitos de fibras de carbono (tecidos e laminados) disponíveis no mercado brasileiro, de diferentes fabricantes, foram aplicados neste estudo. Os resultados obtidos indicam um ganho de capacidade resistente e ductilidade das vigas reforçadas, a partir do mecanismo de ancoragem usado nas tiras de PRFC, e que nenhum dos modelos analíticos testados foi capaz de reproduzir satisfatoriamente o comportamento estrutural observado nos experimentos.

**Palavras-chave:** polímeros reforçados com fibras de carbono, reforço ao cisalhamento, ensaios experimentais, modelos analíticos.

<sup>a</sup> Post-Doctoral Researcher, School of Civil Engineering, Architecture and Urbanism, University of Campinas, andre.gamino@gmail.com, Av. Albert Einstein 951, Campinas-SP, CEP 13083-852.

<sup>b</sup> Professor, School of Civil Engineering, Architecture and Urbanism, University of Campinas, jls@fec.unicamp.br, Av. Albert Einstein 951, Campinas-SP, CEP 13083-852.

<sup>c</sup> Associate Professor, São Paulo State University, omanzoli@feb.unesp.br, Av. Luiz Edmundo Carrijo, s/n, Bauru-SP, CEP 17033-360.

<sup>d</sup> Associate Professor, Polytechnical School, University of São Paulo, tulio.bittencourt@poli.usp.br, Av. Prof. Almeida Prado, 271, São Paulo-SP, CEP 05508-900.

## 1. Introdução

O concreto armado tem se constituído, a partir da década de 1950, como o material estrutural mais utilizado no mundo. Desde então, ele tem sido objeto de inúmeras pesquisas focadas em tecnologia do concreto, técnicas construtivas e ferramentas analíticas e computacionais capazes de proporcionar projetos eficientes e confiáveis. Com isso, conseguiu-se produzir estruturas mais esbeltas e otimizadas do ponto de vista econômico e de segurança. Contudo, essas estruturas estão mais sujeitas aos processos de deterioração (Cánovas [1]).

Nos últimos anos, pesquisas referentes a estruturas em concreto armado direcionam-se ao aprimoramento de conhecimentos e técnicas executivas acerca de reparo e reforço deste tipo de estrutura. Segundo Figueiras; Juvandes [2], a deterioração de edifícios, pontes e viadutos, resultante do envelhecimento da obra e/ou construção deficiente, da falta de manutenção e de causas acidentais (por exemplo, sismos), tem levado a uma degradação crescente das estruturas.

A incorporação de novos materiais ao concreto armado, como por exemplo materiais compósitos, pode melhorar o desempenho esperado das peças estruturais. Esses materiais já vêm sendo utilizados há milhares de anos: os egípcios já usavam palha misturada à argila para fabricar tijolos com o objetivo de melhorar seu desempenho estrutural e, há sete mil anos, artesãos utilizavam piche para colar o junco e fabricar barcos.

Dentre todos os compósitos, aqueles construídos com fibras têm atraído a atenção de muitos pesquisadores envolvidos em aplicações estruturais. Diversas fibras podem ser utilizadas: as de vidro, as de carbono e as de boro, além de fibras produzidas a partir de polímeros sintéticos. Construir fibras envolve a necessidade de alinhar as moléculas do material. A principal razão para reforçar polímeros é aumentar sua rigidez e suas resistências à tração, à compressão, à fadiga e ao impacto (Meier [3]).

A fibra de carbono é um material novo e altamente promissor, baseado nas grandes forças de ligação Carbono-Carbono e na leveza do átomo desse elemento (Meier [3]). Elas já vêm sendo utilizadas para recuperação de estruturas danificadas há mais de quinze anos. As primeiras pesquisas foram desenvolvidas no Japão, há aproximadamente 25 anos, motivadas pela necessidade de recuperação de estruturas danificadas por abalos sísmicos, problema frequente naquele país.

Os PRFC são os mais indicados para reforçar estruturas de concreto armado pois apresentam características que melhor se ajustam às necessidades de um reforço de estruturas de concreto com a técnica de colagem. Ressalta-se o melhor desempenho mecânico quando comparado a outras fibras, o que pode ser evidenciado através das maiores resistências à tração, à compressão, ao valor do módulo de elasticidade próximo ou superior ao do aço e ao bom comportamento à fadiga e à resistência alcalina (Toutanji; Gómez [4]). Em termos gerais os compósitos são mais duráveis que os materiais tradicionais, além de poderem ser utilizados em condições operacionais desfavoráveis, visto que são de fácil manuseio e não necessitam de escoramentos pesados e caros para sua aplicação. Ainda, segundo Figueiras; Juvandes [2], embora as fibras e as resinas usadas nos sistemas de compósitos sejam relativamente caras quando comparadas com os materiais de reforço tradicionais (concreto e aço), os custos de mão-de-obra e

equipamento utilizados na instalação de sistemas PRF são sempre mais baixos.

Diante do exposto, o presente trabalho visa averiguar, a partir de resultados experimentais próprios produzidos em laboratório, a capacidade de previsão do comportamento de vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC). Este trabalho é complementar a outra publicação apresentada em tema equivalente intitulada “Estruturas de Concreto Reforçadas com PRFC I. Parte I: Análise dos Modelos de Flexão” (Gamino; Bittencourt; Sousa [5]). Maiores detalhes sobre o conjunto do trabalho estão apresentados em Gamino [6].

## 2. Investigação Analítica

### 2.1 Reforço ao Cisalhamento com PRFC: Normas Internacionais

#### 2.1.1 ACI-440 [7]

A contribuição dos PRF na resistência ao cisalhamento é dada por:

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_f}{S_f} \quad (1)$$

onde:

$\alpha$  = ângulo de inclinação do reforço com PRF;

$S_f$  = espaçamento entre tiras de PRF;

$d_f$  = altura útil do PRF;

$A_{fv}$  = área total dos PRF dada por:

$$A_{fv} = 2 n t_f w_f \quad (2)$$

onde:

$n$  = número total de tiras de PRF;

$w_f$  = largura das tiras de PRF;

$t_f$  = espessura das tiras de PRF;

A tensão efetiva nas tiras de PRF é dada por:

$$f_{fe} = \epsilon_{fe} E_f \quad (3)$$

onde  $E_f$  é o módulo de elasticidade e  $\epsilon_{fe}$  é a deformação efetiva, dada por:

$$\epsilon_{fe} = k_v \epsilon_{fu} \leq 0,004 \quad (4)$$

onde:

$\epsilon_{fu}$  = deformação última do PRF;

$k_v$  = fator de redução na deformação dos PRF;

Este fator é dependente do arranjo do reforço:

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{468 \epsilon_{fu}} \leq 0,75 \text{ (reforço em "U")} \quad (5)$$

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{1190 \epsilon_{fu}} \leq 0,75 \text{ (reforço em dois lados)} \quad (6)$$

onde:

$L_e$  = comprimento efetivo do PRF dado por:

$$L_e = \frac{2500}{(n t_f E_f)^{0,58}} \text{ (reforço em "U")} \quad (7)$$

$$L_e = \frac{23,30}{(n t_f E_f)^{0,58}} \text{ (reforço em dois lados)} \quad (8)$$

Finalmente os demais fatores são assim obtidos:

$$k_1 = \left( \frac{f_c}{4000} \right)^{\frac{2}{3}} \text{ (reforço em "U")} \quad (9)$$

$$k_1 = \left( \frac{f_c}{27} \right)^{\frac{2}{3}} \text{ (reforço em dois lados)} \quad (10)$$

$$k_2 = \begin{cases} \frac{d_f - L_e}{d_f} \text{ (reforço em "U")} \\ \frac{d_f - 2 L_e}{d_f} \text{ (reforço em dois lados)} \end{cases} \quad (11)$$

### 2.1.2 fib-14 [8]

A contribuição dos PRF na resistência ao cisalhamento é dada por:

$$V_{fd} = 0,9 \epsilon_{fd,e} E_{fu} \rho_f b_w d (\cot g \theta + \cot \alpha) \sin \alpha \quad (12)$$

onde:

$\alpha$  = ângulo de inclinação do reforço com PRF;

$\theta$  = ângulo da fissura de cisalhamento;

$\rho_f$  = taxa geométrica do reforço com PRF dada por:

$$\frac{2 t_f \sin \alpha}{b_w} \text{ (reforço contínuo)} \quad (13)$$

$$\frac{2 t_f b_f}{b_w s_f} \quad (14)$$

A deformação efetiva por ser obtida por:

$$\epsilon_{f,e} = 0,67 \left( \frac{f_{cm}^{\frac{2}{3}}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0,30} \epsilon_{fu} \text{ (reforço em quatro lados)} \quad (15)$$

$$\epsilon_{f,e} = 0,65 \left( \frac{f_{cm}^{\frac{2}{3}}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0,56} \epsilon_{fu} \text{ (reforço em "U")} \quad (16)$$

## 2.2 Reforço ao Cisalhamento com PRFC: Outros Modelos

### 2.2.1 Khalifa et al. [9]

A contribuição dos PRF na resistência ao cisalhamento utiliza as expressões do ACI-440 [7], porém estabelece uma outra forma de avaliação da tensão efetiva:

$$f_{fe} = R f_{fu} \quad (17)$$

O fator de redução  $R$  será o menor dentre as três expressões abaixo:

$$R \leq \begin{cases} 0,50 \\ 0,5622 (\rho_f E_f)^2 - 1,2188 (\rho_f E_f) + 0,778 \\ \frac{0,0042 (f_c)^{\frac{2}{3}} W_{fe}}{(E_f t_f)^{0,58} \epsilon_{fu} d_f} \end{cases} \quad (18)$$

onde:

$W_{fe}$  = largura efetiva dos PRF;

$\rho_f$  = taxa geométrica de reforço calculada por:

$$\rho_f = 2 t_f / b_w \quad (19)$$

A largura efetiva é calculada por:

$$w_{fe} = d_f - L_e \text{ (reforço em "U")} \quad (20)$$

$$w_{fe} = d_f - 2 L_e \text{ (reforço em dois lados)} \quad (21)$$

Finalmente o comprimento efetivo é dado por:

$$L_e = e^{6,134 - 0,58 \ln(t_f E_f)} \quad (22)$$

### 2.2.2 Chen; Teng [10]

A contribuição na resistência ao cisalhamento dos PRF é dada por:

$$V_f = 2 f_{fe} t_f w_f \frac{h_{fe} (\cot \theta + \cot \beta) \sin \beta}{s_f} \quad (23)$$

onde:

$\beta$  = ângulo de inclinação dos PRF;

A tensão efetiva é dada por:

$$f_{fe} = D_f \sigma_{f, \max} \quad (24)$$

onde:

$D_f$  = fator de distribuição dos PRF;

$\sigma_{f, \max}$  = tensão de tração máxima nos PRF;

As equações para a determinação da tensão máxima de tração são:

$$\sigma_{f, \max} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{fu} \\ 0,427 \beta_L \beta_w \sqrt{\frac{E_f \sqrt{f_c}}{t_f}} \end{array} \right. ; \beta_L = \begin{cases} 1 & \text{se } \lambda \geq 1 \\ \frac{\pi \lambda}{2} & \text{se } \lambda < 1 \end{cases} ; \lambda = \frac{L_{\max}}{L_e} \quad (25)$$

O comprimento de ancoragem máximo é dado por:

$$L_{\max} = \frac{h_{fe}}{\sin \beta} \text{ (reforço em "U")} \quad (26)$$

$$L_{\max} = \frac{h_{fe}}{2 \sin \beta} \text{ (reforço em dois lados)} \quad (27)$$

Os outros fatores são obtidos por:

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{\sqrt{f_c}}}, \beta_w = \sqrt{\frac{2 - w_f / s_f \sin \beta}{1 + w_f / s_f \sin \beta}} \quad (28)$$

Finalmente o fator de distribuição é obtido por:

$$D_f = \begin{cases} \frac{2}{\pi \lambda} \frac{1 - \cos(\pi \lambda / 2)}{\sin(\pi \lambda / 2)} & \text{if } \lambda \leq 1 \\ 1 - \frac{\pi - 2}{\pi \lambda} & \text{if } \lambda > 1 \end{cases} \quad (29)$$

### 2.2.3 Nollet; Chaallal; Perraton [11]

A contribuição dos compósitos reforçados com fibras na resistência ao cisalhamento é dada por:

$$V_f = \frac{A_f f_{fu} d_f (\sin \alpha + \cos \alpha)}{s_f} \quad (30)$$

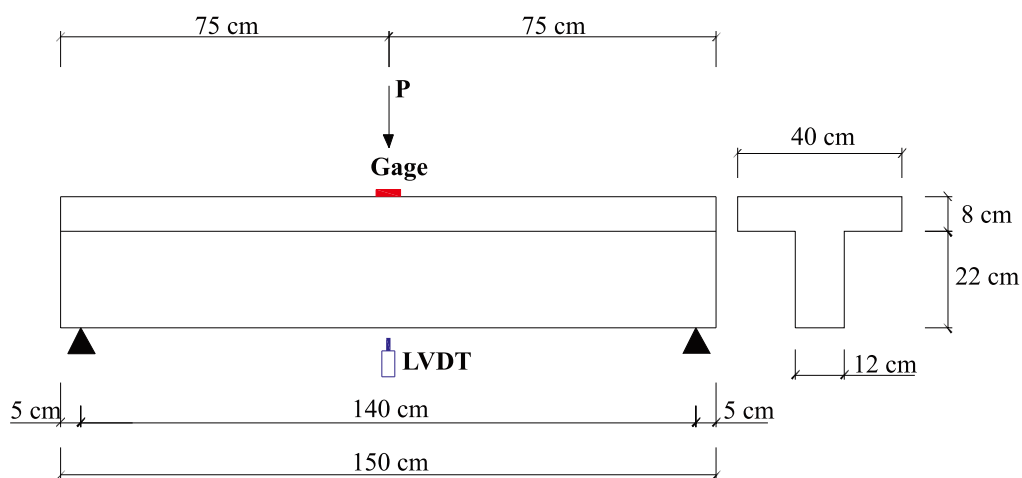
A máxima tensão de cisalhamento na camada de adesivo epóxi:

$$\tau_{ult} = \frac{5,4}{1 + k_1 \operatorname{tg} 33^\circ} \quad (31)$$

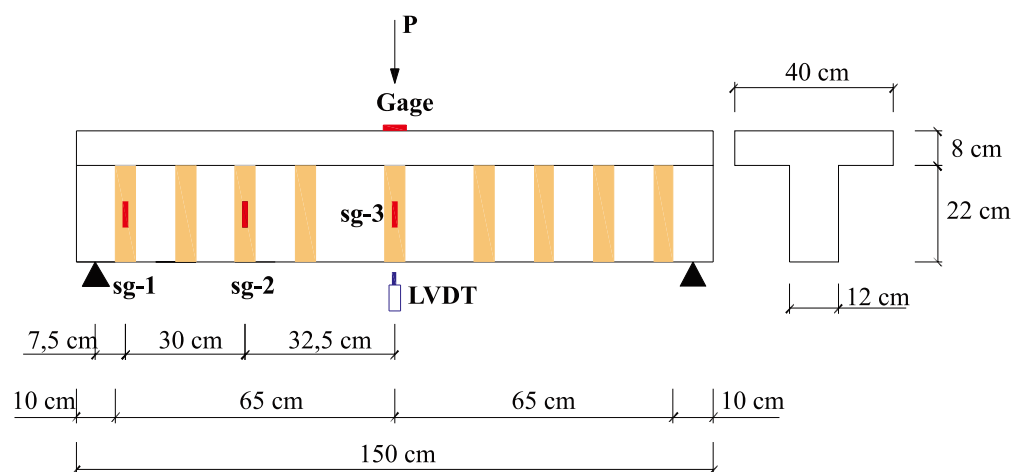
O fator  $k_1$  pode ser obtido por:

$$k_1 = t_f \left( \frac{k_n}{4 E_f I_f} \right)^{0,25} \quad (32)$$

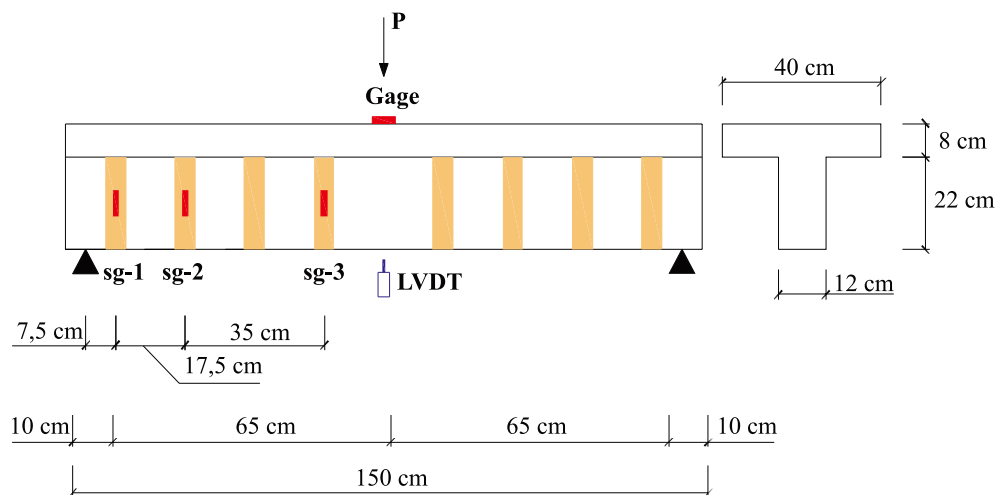
Figura 1 - Detalhe de ensaio das vigas "T" reforçadas ao cisalhamento com PRFC



a) Vigas de controle não reforçadas com PRFC (Vigas RTC1 e RTC2)



b) Vigas reforçadas ao cisalhamento com espaçamento de 15cm entre as tiras de PRFC



c) Vigas reforçadas ao cisalhamento com espaçamento de 17,5cm entre as tiras de PRFC

O fator  $k_n$  pode ser obtido por:

$$k_n = \frac{E_a b_a}{t_a} \quad (33)$$

A tensão média de cisalhamento na camada de PRF é calculada como:

$$\tau_{ave} = \frac{\tau_{ult}}{2} \quad (34)$$

A contribuição dos PRF na resistência ao cisalhamento será:

$$V_f = 2 \left( \tau_{ave} \left( \frac{w_f h_f}{2} \right) \frac{d_f}{s_f} (\sin \alpha + \cos \alpha) \right) \quad (35)$$

A contribuição final na resistência ao cisalhamento dos PRF será o menor valor de  $V_f$  obtido entre a Equação (30) e Equação (35).

### 2.2.4 Täljsten [12]

Uma forma simples para a determinação de  $V_f$  é dada por:

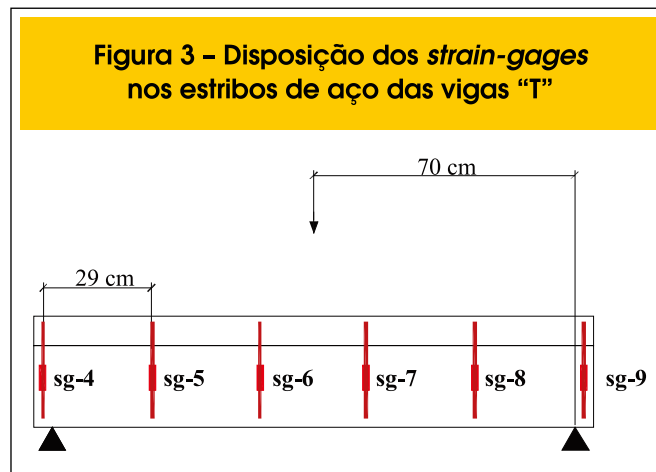
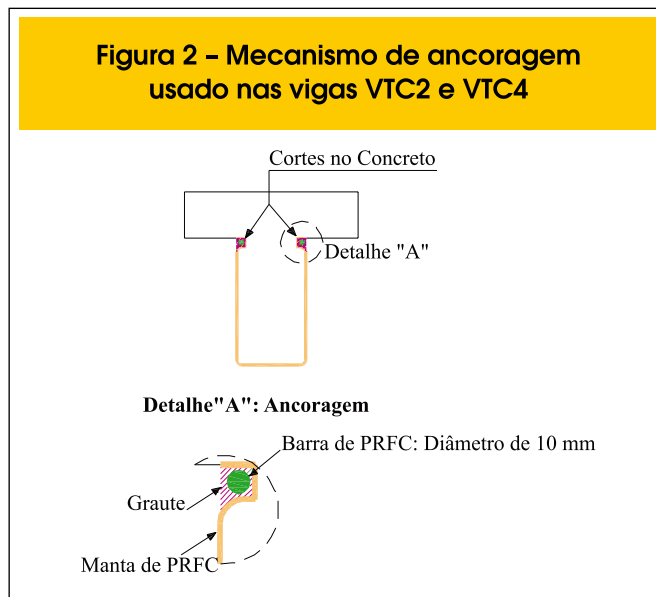
$$V_f = 2 t_f \varepsilon_f E_f 0,9 d (\cot g \beta + \cot g \alpha) \sin^2 \alpha \cos^2 \theta \quad (36)$$

onde:

$\beta$  = ângulo entre o eixo da viga e a orientação dos PRF;

## 3. Procedimento Experimental

O programa experimental envolveu oito vigas de concreto armado



reforçadas ao cisalhamento com polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC), divididas em grupos que possuíam espaça-

**Tabela 1 – Detalhes das vigas usadas no programa experimental**

Viga	$A_s$	Estribos (cm)	Reforço	PRFC	$w_f$ (mm)	$s_f$ (mm)
RTC1	2 n° 6	n°1 c/ 29	---	---	---	---
RTC2	2 n° 6	n°1 c/ 29	---	---	---	---
VTC1	2 n° 6	n°1 c/ 29	cortante	CFRP2	50	150
VTC2	2 n° 6	n°1 c/ 29	cortante	CFRP3	60	150
VTC3	2 n° 6	n°1 c/ 29	cortante	CFRP4	50	175
VTC4	2 n° 6	n°1 c/ 29	cortante	CFRP4	50	175
VTC5	2 n° 6	n°1 c/ 29	cortante	CFRP5	50	150

CFRP2 usa adesivo epóxi Triepox, CFRP3 com adesivo MBrace Saturant e CFRP4 com adesivo Nitobond CF 55 e CFRP5 com adesivo Sikadur 30.

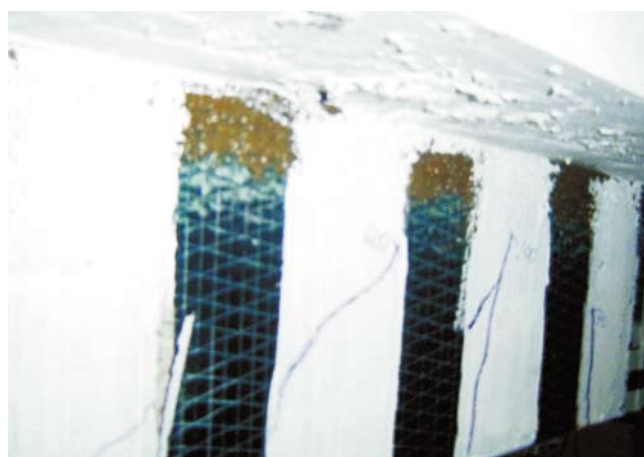
Figura 4 - Mecanismos de ruptura encontrados para as vigas reforçadas ao cisalhamento com PRFC



Cisalhamento - VTC1



Descolamento - VTC3



Ruptura no PRFC - VTC4



Cisalhamento - VTC5

Tabela 2 - Propriedades dos materiais aço e concreto usados nas vigas

## Armaduras de Aço

Tamanho da Barra	Diâmetro (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	$E_s$ (GPa)
n° 6	20	314	555	734	198
n° 3	10	78,5	525	756	199
n° 2	6,3	31,2	640	800	180
n° 1	5,0	19,6	517	764	188

## Concreto

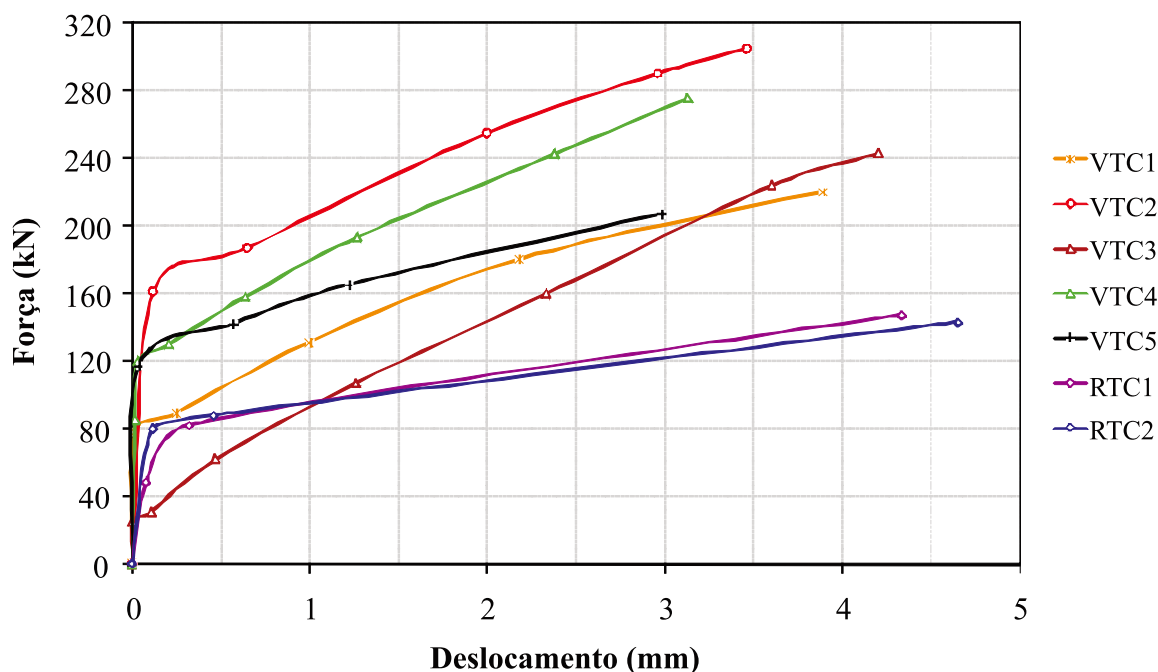
Viga	$f_c$ (MPa)	$f_t$ (MPa)
RTC1	59	5,3
RTC2	60	5,3
VTC1	60	5,4
VTC2	59	5,3
VTC3	60	5,2
VTC4	57	5,5
VTC5	55	5,1

mento entre tiras de 15 cm (Figura 1-b) e 17,5 cm (Figura 1-c). Os deslocamentos no meio do vão foram medidos através de um LVDT; as deformações no concreto, armaduras de aço e PRFC foram medidas usando-se *strain-gages* elétricos, modelo (KYO-WA KFG-5-120-C1-11). As vigas RTC1 e RTC2 (Figura 1-a) foram usadas como referência (não reforçadas com os PRFC) para as vigas reforçadas ao cisalhamento com tiras de PRFC. Todas as vigas reforçadas possuíram uma camada de reforço de PRFC.

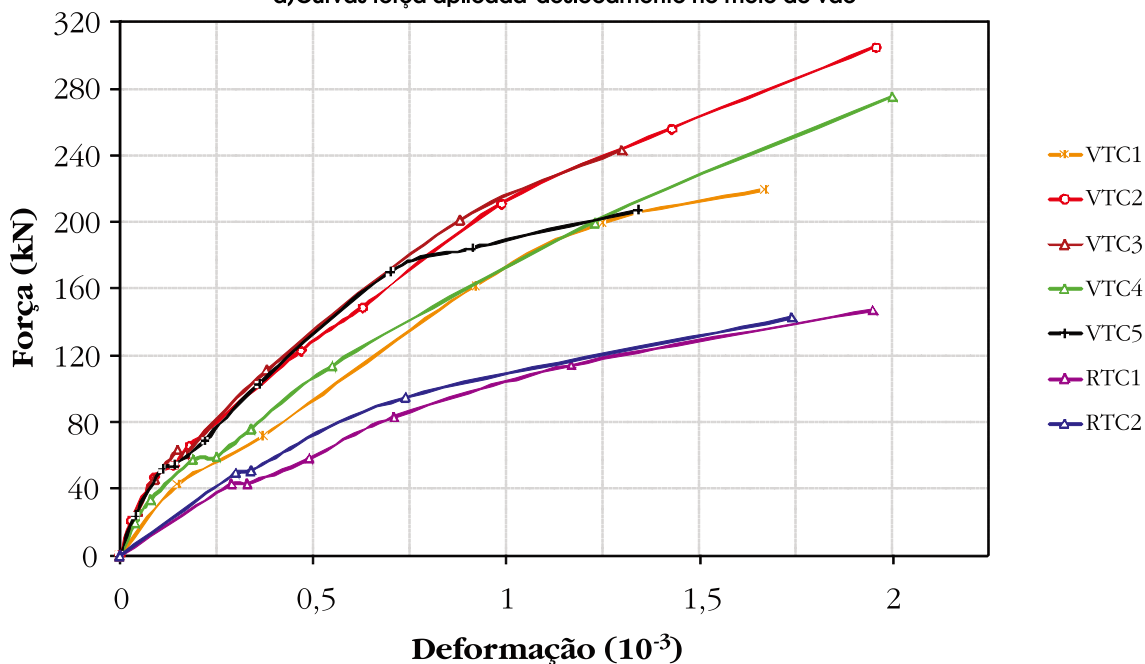
As vigas VTC1 e VTC3 foram reforçadas com tiras dispostas em “U” sem ancoragem na junção mesa-talão, as vigas VTC2 e VTC4 foram reforçadas com tiras em “U” com sistema de ancoragem na junção mesa-talão (Figura 2) e a viga VTC5 recebeu reforço em tiras dispostas em dois lados (laminados de fibra de carbono) sem sistema de ancoragem.

A disposição dos *strain-gages* nos estribos pode ser observada na Figura 3. Empregou-se o sistema de aquisição ADS 2000 da Lynx

**Figura 5 – Ganhos de capacidade resistente e de ductilidade das vigas “T” reforçadas ao cisalhamento com tiras de PRFC**



a) Curvas força aplicada-deslocamento no meio do vão



b) Curvas força aplicada-deformação no concreto comprimido



[13], em conjunto com os softwares de aquisição e tratamento de sinais AqDados [14] e AqDAnalysis [15], responsáveis pelo controle e configuração dos equipamentos, gravação, leitura, visualização e processamento dos dados.

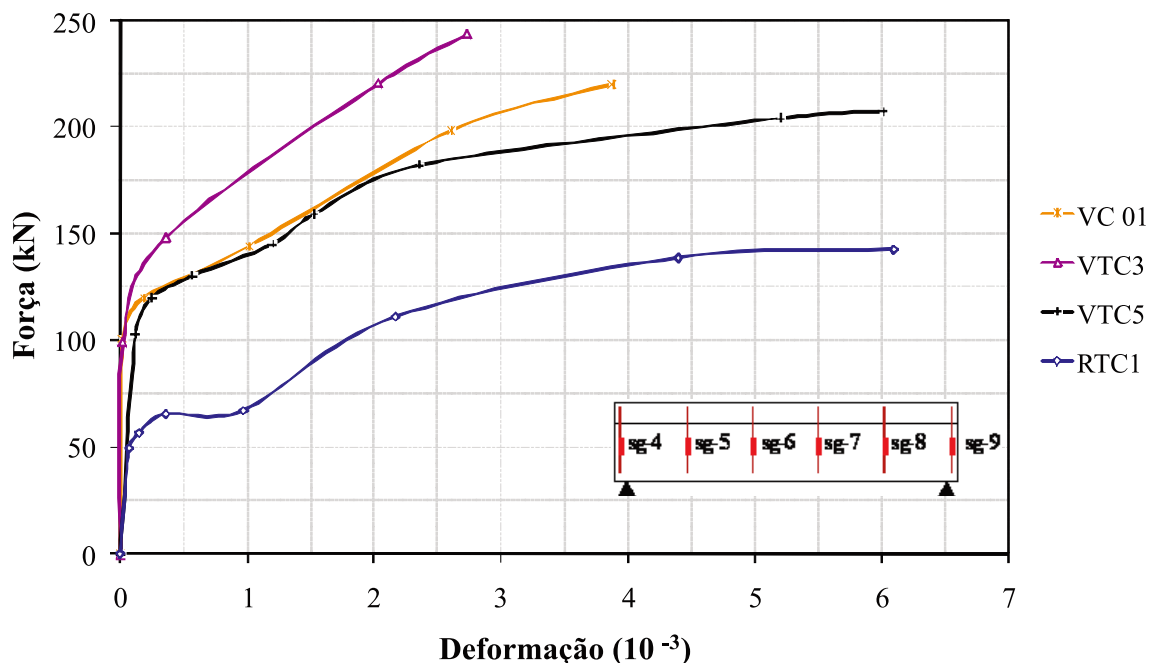
### 3.1 Materiais

Detalhes das vigas utilizadas no programa experimental estão

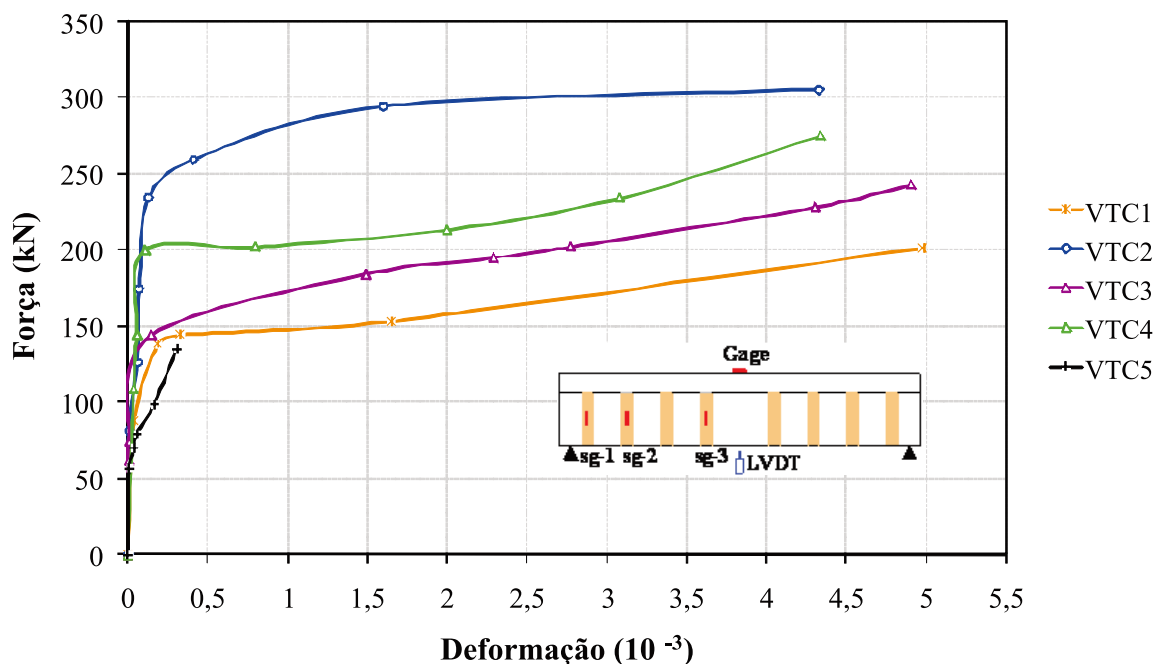
apresentados na Tabela 1, as propriedades dos materiais aço e concreto usados estão na Tabela 2 e as propriedades dos PRFC e dos adesivos epóxi estão indicadas respectivamente nas Tabelas 3 e 4.

Os ensaios de caracterização dos PRFC foram realizados de acordo com os procedimentos da norma ASTM D3039-95 [16] e os ensaios dos adesivos epóxi de acordo com os procedimentos descritos na norma ASTM D638-96 [17].

Figura 6 – Evolução das deformações nos estribos e nos PRFC mais solicitados



a) Curvas força-deformação no estribo mais solicitado (strain-gage sg-4)



b) Curvas força-deformação na tira mais solicitada de PRFC (strain-gage sg-2)

Tabela 3 – Propriedades mecânicas dos PRFC

Tipo	Espessura (mm)	$E_r$ (GPa)	$f_{ru}$ (MPa)	$\varepsilon_{ru}$ (‰)
CFRP1 <sup>i</sup>	0,13	230	3500	15,00
CFRP2 <sup>ii</sup>	0,11	221	2728	12,44
CFRP3 <sup>iii</sup>	0,165	218	2730	12,40
CFRP4 <sup>iv</sup>	0,11	235	3550	15,00
CFRP5 <sup>v</sup>	1,4	310	1250	4,0

<sup>i</sup>Sika Wrap Hex, <sup>ii</sup>TEI 300, <sup>iii</sup>MBrace, <sup>iv</sup>Fosfiber C e <sup>v</sup>Sika Carbodur H514.

Tabela 4 – Propriedades mecânicas dos adesivos epóxi

Tipo	$f_{pu}$ (MPa)
Triepox	58,9
MBrace Saturant	55,8
Nitobond CF 55	62,2
Sikadur 30	28,4

#### 4. Resultados Experimentais e Discussões

Os resultados obtidos nos ensaios experimentais estão dispostos na Tabela 5 (vigas de referência) e Tabela 6 (vigas reforçadas com

tiras de PRFC). Os mecanismos de ruptura encontrados podem ser observados na Figura 4.

A partir dos resultados obtidos nos ensaios, as seguintes observações podem ser colocadas: a menor taxa de ganho de carga de ruptura foi obtida para a viga VTC5 (laminado de fibra de carbono sem ancoragem), conforme indicado na Figura 5-a, e a maior taxa foi a obtida usando-se o mecanismo de ancoragem na junção mesa-talão descrito na Figura 2, VTC2 (110,3%) e VTC4 (89,6%) – nessas vigas o mecanismo de colapso encontrado se deu por ruptura dos PRFC; as vigas reforçadas sem ancoragem possuíram um comportamento mais frágil em comparação com as vigas de referência (RTC1 e RTC2), conforme evidenciado na Figura 5-b; as vigas reforçadas com sistema de ancoragem apresentaram um comportamento mais dúctil quando comparadas às vigas reforçadas sem o sistema de ancoragem adotado, ou mesmo em relação às vigas de referência; as deformações nos estribos foram maiores nas vigas VTC5 e VTC1, segundo ilustra a Figura 6-a – nessas vigas o mecanismo de colapso corresponde ao esgotamento da capacidade resistente ao cisalhamento.

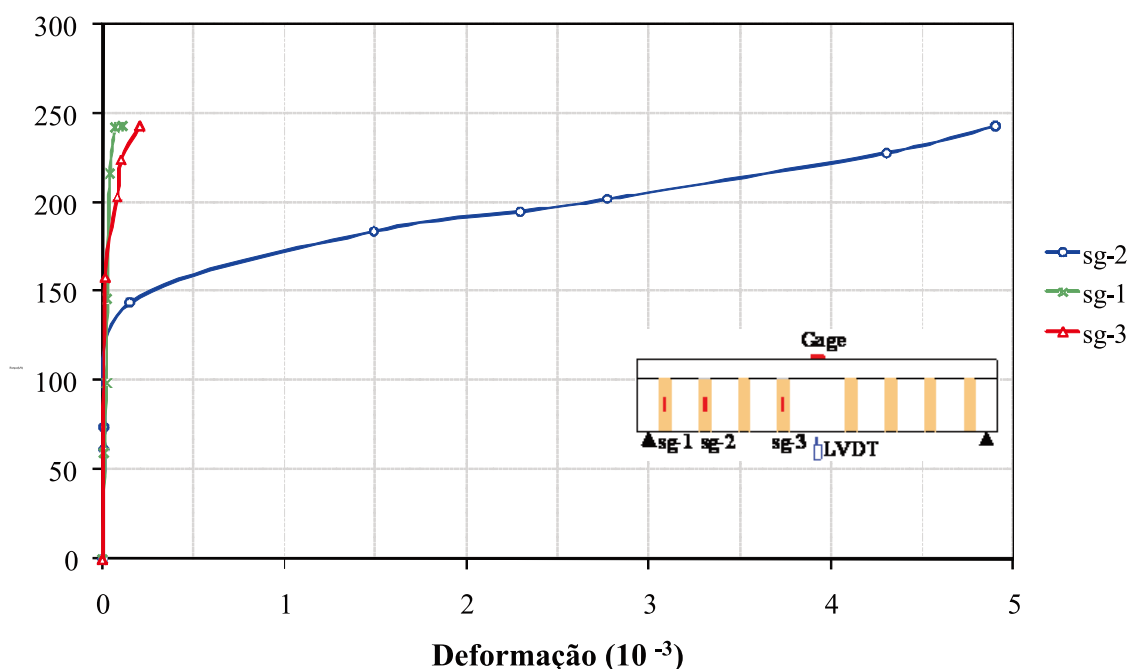
Tabela 5 – Resultados das vigas de controle para os reforços ao cisalhamento com PRFC

Viga	$f_c$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	$P_{ref}$ (kN)	$\varepsilon_s$ sg-4 (‰)	$\varepsilon_c$ (‰)	Tipo de Ruptura
RTC1	59,9	5,3	147	---	1,95	Cisalhamento
RTC2	60,1	5,3	143	6,1	1,74	Cisalhamento
Médias	60,0	5,3	145	6,1	1,84	---

Tabela 6 – Resultados obtidos para as vigas reforçadas ao cisalhamento

Viga	$P_{max}$ (kN)	Meio do Vão			Área de Ancoragem			$\Delta\%$	Ruína
		$\varepsilon_s$ (sg-4) (‰)	$\varepsilon_c$ (‰)	$\varepsilon_t$ (sg-2) (‰)	$\varepsilon_t$ (sg-1) (‰)	$\varepsilon_t$ (sg-3) (‰)			
VTC1	220	3,88	1,67	4,98	---	---	51,7	C	
VTC2	305	---	1,96	4,33	---	---	110,3	P	
VTC3	243	2,73	1,30	4,90	0,11	0,20	67,6	D	
VTC4	275	---	2,00	4,34	0,35	---	89,6	P	
VTC5	207	6,01	1,34	0,31	0,08	---	42,8	C	

Figura 7 – Evolução das deformações nas tiras de PRFC em três strain-gages para a viga VTC3



Resultados similares quanto ao ganho de capacidade resistente e ductilidade podem ser obtidos usando-se um sistema de ancoragem mais viável economicamente, substituindo a barra de PRFC por uma barra de aço convencional CA-50 e fazendo-se uso de um graute de base cimentícia ao invés de um graute de base polimérica.

É importante também comentar que na Figura 5-a, tratando-se especificamente da curva força-deslocamento obtida para a viga VTC3, o término do regime elástico desta viga reforçada com PRFC deveria corresponder a uma carga acima da obtida para as vigas de controle, e não abaixo como ilustra a figura. Neste sentido, é provável que tenha ocorrido algum problema técnico com o LVDT usado durante o ensaio.

A Figura 7 apresenta a evolução das deformações nas tiras de PRFC para a viga VTC3. Cabe observar que as deformações nas tiras de PRFC que interceptam a fissura crítica de cisalhamento são ligeiramente superiores às obtidas para as tiras situadas fora da região de formação dessa fissura. Na Figura 7 observa-se que a tira de PRFC na qual encontrava-se colado o *strain-gage* sg-2

foi justamente a que interceptou a fissura crítica, descolando-se do substrato antes das demais.

Tais resultados serviram também de base comparativa para simulações computacionais efetuadas pelos autores usando-se o programa DIANA, conforme pode ser visto em Gamino; Sousa; Bittencourt [18].

## 5. Comparação entre os Resultados Teóricos e Experimentais

A comparação entre os resultados teóricos obtidos a partir dos modelos analíticos apresentados neste artigo e os resultados experimentais são mostrados nas Tabela 7 e 8. Os resultados apresentados nestas tabelas estão graficamente representados na Figura 8.

Cabem neste momento algumas ressalvas: as propriedades mecânicas dos CFRP utilizados nestes cálculos foram as encontradas nos ensaios de caracterização (valores médios); os valores de " $V_f$ " experimentais foram obtidos a partir do quinhão de ganho

Tabela 7 – Comparação entre os resultados teóricos e experimentais

Vigas	$V_f$ (kN)					$\Delta$ (%)			
	Exp.	ACI	fib	Chen; Teng (10)	Khalifa <i>et al.</i> (9)	ACI	fib	Chen; Teng (10)	Khalifa <i>et al.</i> (9)
VTC1	37,5	30,5	10,04	29,76	19,93	+22,95	+273,5	+26,0	+88,15
VTC2	80	36,4	21,33	33,97	23,68	+119,8	+275,1	+135,5	+237,8
VTC3	49	22,1	9,45	24,42	18,30	+121,7	+418,5	+100,6	+167,76
VTC4	65	22,1	16,42	24,42	18,30	+194,1	+295,8	+166,2	+255,2
VTC5	31	12,6	10,66	44,83	154,6	+146,1	+190,8	-44,61	-398,71

Tabela 8 – Demais resultados comparativos entre teóricos e experimentais

Vigas	V <sub>f</sub> (kN)			Δ (%)	
	Experimental	Nollet; Chaallal; Perraton (11)	Täljsten (12)	Nollet; Chaallal; Perraton (11)	Täljsten (12)
VTC1	37,5	34,62	31,02	+8,32	+20,89
VTC2	80	41,55	29,58	+92,54	+170,5
VTC3	49	29,68	28,41	+65,09	+72,47
VTC4	65	29,68	28,41	+119,00	+128,8
VTC5	31	33,94	---	-9,48	---

de capacidade resistente ao cisalhamento das vigas reforçadas com os PRFC; os modelos de Khalifa *et al.* [9], Chen; Teng [10] e Täljsten [12] são aplicáveis somente para vigas reforçadas ao cisalhamento em “U” ou em dois lados; os cálculos dos valores de “V<sub>f</sub>” para as vigas VTC2 e VTC4 foram efetuados considerando-se o reforço executado com encamisamento de toda a seção, a fim de simular o sistema de ancoragem na junção mesa/alma adotado neste trabalho.

Quanto aos resultados teóricos comparados aos experimentais, é possível dizer que:

a) para a viga VC 01, reforçada com mantas de PRFC, o valor de “V<sub>f</sub>” encontrado com o uso da formulação proposta por Nollet; Chaallal; Perraton [11] ficou próximo do valor experimental; para todas as vigas, os valores teóricos obtidos com o ACI-440 [7] e fib-14 [8] ficaram abaixo dos valores experimentais, conforme se espera de recomendações para projeto;

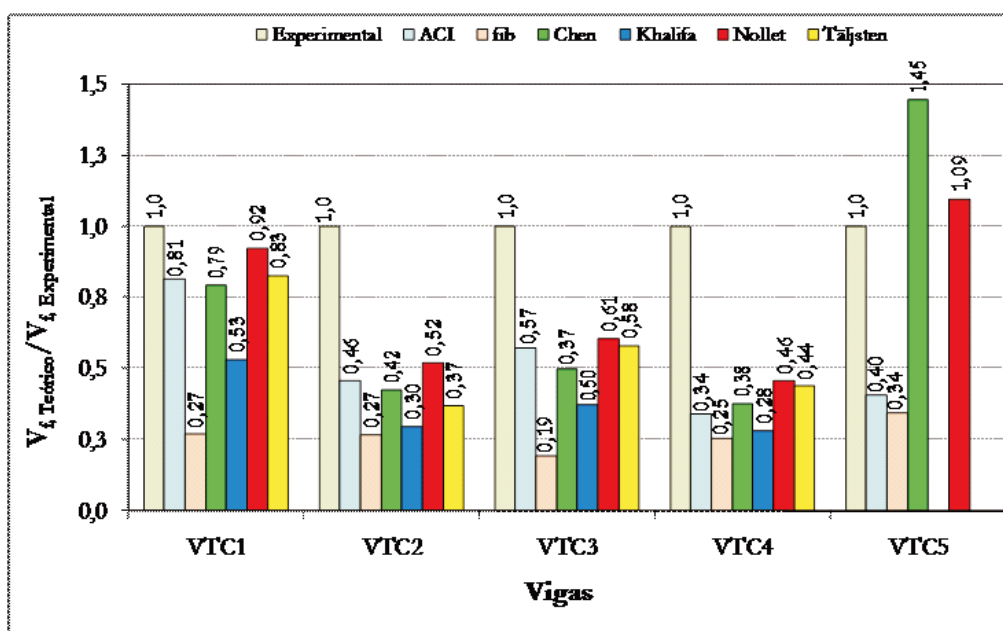
b) para as vigas reforçadas com mantas de PRFC e com ancoragem na junção mesa/alma (VTC2 e VTC4), os valores encontrados pelo ACI-440 [7] ficaram mais próximos dos valores de “V<sub>f</sub>”

experimentais, em comparação com os resultantes do fib-14 [8]; c) para a viga VTC5 reforçada com laminado colado externamente, os valores de “V<sub>f</sub>” calculados pelas propostas de Chen; Teng [10] e Khalifa *et al.* [9] foram muito superiores ao valor experimental, devido à taxa superior de área de fibra; em outras palavras, tais modelos aparentam não serem aplicáveis às estruturas reforçadas com laminados colados externamente por majorar muito os valores de “V<sub>f</sub>”, cuja tendência deve ser verificada em um número maior de ensaios; nesta viga os valores obtidos a partir do fib-14 [8] e do ACI-440 [7] mostraram-se muito abaixo do valor experimental, enquanto que o valor obtido com o modelo de Nollet; Chaallal; Perraton [11] apresentou-se mais apropriado; os modelos de Khalifa *et al.* [9] e Täljsten [12] não se aplicam para vigas reforçadas com laminados;

d) dentre todas as formulações testadas, o modelo do fib-14 [8] foi o mais conservador, seguido pelo critério de Khalifa *et al.* [9];

e) nenhum modelo apresentado neste trabalho foi capaz de prever o comportamento de todas as vigas ensaiadas no programa experimental.

Figura 8 – Comparação entre os resultados teóricos e experimentais obtidos para as vigas “T” reforçadas ao cisalhamento com tiras de PRFC



## 6. Conclusões

A partir dos resultados obtidos nesta investigação analítica e experimental, relacionadas às estruturas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com tiras de PRFC, as seguintes conclusões podem ser colocadas:

- A técnica de reforço ao cisalhamento com compósitos de fibras de carbono mostrou-se muito satisfatória, sobretudo quanto aos resultados obtidos usando-se um sistema de ancoragem das tiras de PRFC na junção entre a alma e a mesa das vigas. Nesses casos conseguiu-se uma ampliação substancial da capacidade resistente ao cisalhamento do elemento reforçado, mantendo-se praticamente as mesmas condições de ductilidade em relação às vigas originais, não reforçadas com PRFC;
- Quanto ao uso de modelos analíticos, tratando-se especificamente das recomendações e normas internacionais, sugere-se o uso das prescrições do ACI-440 [7] em detrimento das do fib-14 [8], uma vez que os resultados obtidos pelo fib mostraram-se muito conservadores quanto comparados às respostas experimentais das vigas ensaiadas;
- De uma forma geral, embora tenham se mostrado conservadores na maior parte das análises, os modelos, inclusive aqueles de recomendações e normas internacionais, não foram capazes de prever acuradamente o comportamento de todas as vigas ensaiadas no programa experimental.

## 7. Agradecimentos

Os autores agradecem a Fapesp – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Processos 06/05843-2, 04/03049-1 e 03/01608-0) e ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Processos 307051/2006-4, 303735/2008-2 e 306678/2006-3) pelo apoio financeiro.

## 8. Referências bibliográficas

- [01] CÁNOVAS, M.F. "Patologia e Terapia do Concreto Armado". Trad. Maria Celeste Marcondes, Carlos Wagner F. dos Santos e Beatriz Cannabrava. São Paulo, PINI, 1998.
- [02] FIGUEIRAS, J.A., JUVANDES, L.F.P., Reforço de estruturas de betão por colagem de sistemas FRP. In: REPAR, Lisboa, 2000. Anais. Lisboa: 2000.
- [03] MEIER, U., Carbon Fiber – Reinforced Polymers: Modern Materials in Bridge Engineering. Structural Engineering International, V. 1, 1992.
- [04] TOUTANJI, H.A., GÓMEZ, W. Durability Characteristics of Concrete Beams Externally Bonded with FRP Composites Sheets. Cement and Concrete Composites, V. 19, No. 4, pp. 315-358, 1997.
- [05] GAMINO, A.L., BITTENCOURT, T.N., SOUSA, J.L.A.O. Estruturas de Concreto Reforçadas com PRFC I. Parte I: Análise dos Modelos de Flexão. IBRACON Structures and Materials Journal, V. 2, No. 4, pp. 326-355, 2009.
- [06] GAMINO, A.L., Modelagem física e computacional de estruturas de concreto reforçadas com CFRP. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 259p., 2007.
- [07] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. State of the art report on fiber reinforced plastic reinforcement for concrete structures - ACI 440R-02, 2002.
- [08] FEDERATION INTERNATIONALE DU BETON – "BULLETIN 14: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures". Lausanne, October, 2001.
- [09] KHALIFA, A., GOLD, W.J., NANNI, A., AZIZ, A., Contribution of externally bonded FRP to shear capacity of RC flexural members. Journal of Composites for Construction, V. 2, No. 4, pp. 195-203, 1998.
- [10] CHEN, J.F., TENG, J.G., A shear strength model for FRP strengthened RC beams. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FIBER REINFORCED PLASTICS FOR REINFORCED CONCRETE STRUCTURES (FRPRCS 5), Cambridge, pp. 205-214, 2001.
- [11] NOLLET, M.J., CHAALLAL, O., PERRATON, D., Strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded fiber reinforced plastic plates: Design guidelines for shear and flexure, École de Technologie Supérieure, Montreal, Canada, pp. 692-703, 1998.
- [12] TÄLJSTEN, B., Strengthening concrete beams for shear with CFRP sheets. Construction and Building Materials, V. 17, No. 1, pp. 15-26, 2003.
- [13] LYNX TECNOLOGIA ELETRÔNICA LTDA. ADS 2000. Manual de usuário. São Paulo. LYNX, 2003.
- [14] LYNX TECNOLOGIA ELETRÔNICA LTDA. AqDados 7.0 - Programa de aquisição de dados. Manual de usuário. São Paulo. LYNX, 2003.
- [15] LYNX TECNOLOGIA ELETRÔNICA LTDA. AqDAnalysis 7.0 - Programa de tratamento de sinais. Manual de usuário. São Paulo. LYNX, 2005.
- [16] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. ASTM D3039, 1995.
- [17] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standard test method for tensile properties of plastics. ASTM D638, 1996.
- [18] GAMINO, A.L., SOUSA, J.L.A.O., BITTENCOURT, T.N., Application of Carbon Fiber Reinforced Polymer in Strengthening to Shear R/C T Beams. In: 9TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FIBER-REINFORCED POLYMERS REINFORCEMENT FOR CONCRETE STRUCTURES (FRPRCS-9), Sidney, CD (4 pages), 2009.