

R/C structures strengthened with CFRP Part I: analysis of flexural models

Estruturas de concreto reforçadas com PRFC Parte I: análise dos modelos de flexão



A. L. GAMINO ^a
andre.gamino@gmail.com

T. N. BITTENCOURT ^b
tulio.bittencourt@poli.usp.br

J. L. A. DE OLIVEIRA E SOUSA ^c
jls@fec.unicamp.br

Abstract

This work, presented in two parts, deals with the evaluation of design models for reinforced concrete structures strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP). In this first part, flexural models from ACI 440 and fib-14 guidelines, and recent models available in the literature, are evaluated. These criteria were applied to a total of twenty five beams strengthened in flexure with CFRP composites and tested by the authors: sixteen with rectangular cross section and nine with "T" cross section. Different types of carbon fiber composites (sheets and laminates) were applied, from different manufacturers available in the Brazilian market. Results show a good match among the rupture loads calculated using the ACI-440 guidelines for flexural strengthening and the corresponding values observed in the tests.

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

Resumo

Este trabalho, apresentado em duas partes, trata da avaliação dos modelos de projeto de estruturas de concreto armado reforçadas com Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono (PRFC). Nesta primeira parte são avaliados modelos de flexão originados das recomendações ACI-440 e fib-14, assim como outros modelos mais recentes, disponíveis na literatura. Esses critérios foram aplicados a um total de vinte e cinco vigas reforçadas à flexão, ensaiadas pelos autores, das quais dezesseis com seção retangular e nove com seção "T". Foram aplicados diferentes tipos de compósitos de fibras de carbono (tecidos e laminados), de diferentes fabricantes, encontrados no mercado brasileiro. Os resultados obtidos mostram uma boa proximidade entre as cargas de ruptura calculadas de acordo com as recomendações ACI-440 para reforços à flexão e os valores observados nos ensaios.

Palavras-chave: polímeros reforçados com fibras de carbono, reforço à flexão, ensaios experimentais, modelos analíticos.

^a 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.

^b Associate Professor, Polytechnical School, University of São Paulo, tulio.bittencourt@poli.usp.br, Av. Prof. Almeida Prado, 271, São Paulo-SP, CEP 05508-900.

^c Associate Professor, School of Civil Engineering, Architecture and Urbanism, University of Campinas, jls@fec.unicamp.br, Av. Albert Einstein 951, Campinas-SP, CEP 13083-852.

1. Introdução

Nos últimos anos tem-se observado um aumento no emprego de Polímeros Reforçados com Fibras (PRF) para o reforço de estruturas de concreto. Esses materiais apresentam propriedades mecânicas adequadas e são de fácil aplicação, o que favoreceu sua popularização no mercado de reforço estrutural.

No Brasil ainda não há uma norma específica para projetos de reforço para o uso de materiais compósitos. Os reforços são realizados com base em normas e recomendações internacionais e em especificações de fabricantes. As principais recomendações de projeto para reforço com PRF são: ACI - Committee 440 [1], o Bulletin no. 14 da fib [2] e a recomendação no. 23 da JSCE [3] – Sociedade Japonesa de Engenheiros Civis.

Com relação ao reforço à flexão, os principais modelos de ruptura disponíveis na literatura têm sido desenvolvidos com base em três premissas diferentes: modelos de capacidade resistente ao cisalhamento, modelos de concreto colaborante entre fissuras e modelos de tensão na interface concreto-PRF. Esses modelos orientaram o desenvolvimento de trabalho experimental conduzido por Gamino [4], cujos resultados, principalmente aqueles relacionados à modelagem computacional das vigas reforçadas com PRF à flexão, usando-se o Método dos Elementos Finitos, são apresentados em (Gamino; Bittencourt [5]). Diferentes programas computacionais têm sido usados, como o programa DIANA®, sobretudo em modelagens computacionais tridimensionais de vigas reforçadas com PRF ao cisalhamento (Gamino; Sousa; Bittencourt [6]), ou plataformas próprias de desenvolvimento computacional onde foram implementados modelos constitutivos e elementos finitos específicos para a modelagem numérica do concreto fissurado, das armaduras de aço e dos reforços de PRF (Gamino; Bittencourt; Sousa [7]).

2. Investigação Analítica

Nesta seção são discutidos alguns modelos analíticos aplicados ao projeto de reforços à flexão com PRF em vigas de concreto armado, com base na capacidade resistente ao cisalhamento, no concreto colaborante entre fissuras e na tensão na interface concreto-PRF.

2.1 Modelos Baseados na Capacidade Resistente ao Cisalhamento para o Reforço à Flexão

2.1.1 Modelo de Oehlers [8]

Este modelo foi desenvolvido com base em uma viga biapoiada submetida a um carregamento em quatro ou três pontos. Considerando-se que o reforço termina em uma região de momento constante, o momento fletor de descolamento, M_{db} , pode ser calculado como:

$$M_{db} = \frac{E_c I_{tr,c} f_{ct}}{0.901 E_f t_f} \quad (1)$$

onde:
 E_c = módulo de elasticidade do concreto;

$I_{tr,c}$ = momento de inércia no Estádio II;
 f_{ct} = resistência à tração do concreto;
 t_f = espessura do PRF;

Para a situação em que o reforço termina próximo do apoio, supõe-se que o descolamento ocorre quando a força cortante atuante no final da camada de reforço, V_{db} , atinge a capacidade resistente da viga não reforçada com PRF e sem a contribuição dos estribos de aço, V_c :

$$V_{db} = V_c = (1.4 - (d / 2000)) b d (\rho_s f_c)^{1/3} \quad (2)$$

onde:

b = largura da viga;

ρ_s = taxa geométrica de armadura de tração;

f_c = resistência à compressão do concreto;

Em relação ao esforço cortante no final da camada de reforço:

$$V_{db,end} = \left(\frac{1.17}{\frac{a}{M_{db}} + \frac{1}{V_{db}}} \right) \quad (3)$$

onde:

a = distância do apoio ao final da camada de reforço;

2.1.2 Modelo de Jansze [9]

O esforço crítico de cisalhamento na viga no final da camada de PRF que causa o descolamento é dado por:

$$V_{db,end} = \tau_{PES} b d \quad (4)$$

onde:

τ_{PES} = tensão de cisalhamento de descolamento;

A tensão de cisalhamento de descolamento é dada por:

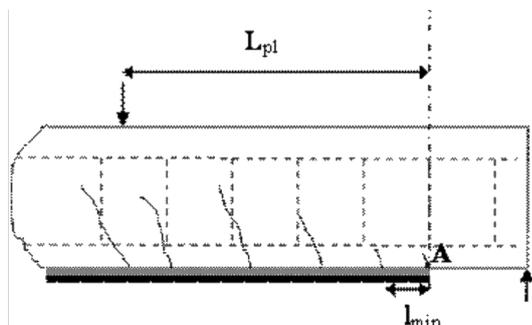
$$\tau_{PES} = 0.18 \sqrt[3]{3 \frac{d}{B_{mod}}} \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) \sqrt[3]{100 \rho_s f_c} \quad (5)$$

onde:

B_{mod} = vão modificado de cisalhamento, dado por:

$$B_{mod} = 4 \sqrt{\frac{(1 - \sqrt{\rho_s})^2}{\rho_s}} d a^3 \quad (6)$$

Figura 1 - Modelo do concreto colaborante entre fissuras



2.2 Modelos Baseados no Concreto Contribuinte entre Fissuras para o Reforço à Flexão

Os modelos de concreto contribuinte entre fissuras usam o conceito do concreto entre duas fissuras adjacentes deformando-se a partir da ação de tensões de cisalhamento na base da viga (Figura 1). O conceito do concreto contribuinte entre fissuras foi primeiramente descrito por Zang; Raof; Wood [10].

O descolamento ocorre quando as tensões de cisalhamento se somam às tensões de tração no topo do bloco de concreto entre fissuras que excedem a resistência à tração do concreto. As tensões de descolamento no PRF podem ser determinadas pela definição de um comprimento efetivo de ancoragem onde uma distribuição uniforme de tensões de cisalhamento é admitida.

2.2.1 Modelo de Zang; Raof; Wood [10]

O espaçamento mínimo e máximo (o máximo é definido como duas vezes o mínimo) pode ser obtido por:

$$l_{min} = \frac{A_e f_{ct}}{0.28 \sqrt{f_c} (\sum O_{rebars} + b_f)} \tag{7}$$

onde:

A_e = área do concreto sob tração;
 $\sum O_{rebars}$ = perímetro total das armaduras tracionadas (notação usado em [10]);

b_f = largura da camada de PRF;

A tensão de tração no ponto "A" (Figura 1) é dada por:

$$\sigma_A = \frac{M_A}{I_A} \left(\frac{l_{cr}}{2} \right) \tag{8}$$

onde:

l_{cr} = espaçamento entre fissuras, mínimo ou máximo;

M_A = momento fletor no ponto "A" (ver Figura 1);

I_A = momento de inércia da seção correspondente ao ponto "A";

Admitindo que $\sigma_A = f_{ct}$ no instante do descolamento do reforço, as tensões de cisalhamento entre o concreto e a camada de PRF devem ser determinadas para um espaçamento mínimo entre fissuras estabilizadas. Nesta teoria, admite-se que todos os blocos de concreto entre fissuras na região de ancoragem produzem uma ruptura simultânea por descolamento:

$$\tau_{min} = \frac{f_{ct} l_{min}}{6 h'} \frac{b}{b_f} \tag{9}$$

onde:

h' = cobrimento da viga;

Finalmente a tensão normal de descolamento é:

$$\sigma_{min} = 0.154 \frac{L_p h_1 b^2 \sqrt{f_c}}{h' b_f t_f (\sum O_{rebars} + b_f)} \tag{10}$$

onde:

L_p = comprimento efetivo de ancoragem;

h_1 = distância entre o centróide das armaduras de tração e a base da viga;

O comprimento de ancoragem efetivo é dado pelo menor valor entre o vão de cisalhamento e o comprimento de ancoragem efetivo, dado por:

$$L_{p2} = l_{min} (21 - 0.25 l_{min}), \quad l_{min} \leq 72 \text{ mm} \tag{11}$$

$$L_{p2} = 3 l_{min}, \quad l_{min} > 72 \text{ mm} \tag{12}$$

2.2.2 Modelo de Raof; Hassanen [11]

Modificações na Equação (11) e na Equação (12) foram propostas por esses autores a partir de calibrações feitas em ensaios de flexão usando-se compósitos de fibras de carbono. As novas expressões são:

$$L_{p2} = l_{min} (11.6 - 0.17 l_{min}), \quad l_{min} \leq 56.5 \text{ mm} \tag{13}$$

$$L_{p2} = 2 l_{min}, \quad l_{min} > 56.5 \text{ mm} \tag{14}$$

2.3 Modelos Baseados na Tensão na Interface Concreto-PRF para o Reforço à Flexão

2.3.1 Modelo de Varastehpour; Hamelin [12]

Varastehpour; Hamelin [12] desenvolveram um modelo de tensão na interface concreto-PRF com base no critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Neste modelo, o coeficiente de coesão c foi calibrado em ensaios de cisalhamento e o ângulo interno de fricção φ determinado para ensaios de vigas reforçadas com os PRF com modo de ruptura por descolamento. Com base em tais ensaios, encontrou-se um valor médio de 5,4 MPa para c e um valor de 33° para φ .

As tensões de cisalhamento requeridas na equação de Mohr-Coulomb são dadas por:

$$\tau = \frac{1}{2} \sqrt{\beta} (\lambda V_o)^{3/2} \quad (15)$$

onde:

V_o = esforço cortante no final da camada de PRF;

λ = rigidez da seção;

β = fator dado por:

$$\beta = \frac{1.26 \cdot 10^5 \cdot B}{h^{0.7} \cdot t_f \cdot E_f} \quad (16)$$

onde:

B = vão de cisalhamento (comprimento compreendido entre o ponto de aplicação da carga e o apoio);

A rigidez da seção é dada por:

$$\lambda = \frac{t_f \cdot E_f}{I_{tr,c} \cdot E_c} (d_f - x) \quad (17)$$

onde:

d_f = altura útil das tiras de PRF;

A força crítica de cisalhamento no final da camada de PRF que causa o descolamento é dada por:

$$V_{db,end} = \frac{1.6 \tau_{max}^{2/3}}{\lambda \beta^{1/3}} \quad (18)$$

onde:

$$\tau_{max} = \frac{5.4}{1 + C_{R2}} \tan 33^\circ \quad (19)$$

O cálculo da coesão C_{R2} é dada pela expressão de Roberts [13]:

$$C_{R2} = t_f \left(\frac{K_n}{4 E_f I_f} \right)^{1/4} \quad (20)$$

onde:

I_f = momento de inércia dos PRF;

K_n = rigidez do adesivo epóxi dada por:

$$K_n = \frac{E_a \cdot b_a}{t_a} \quad (21)$$

onde:

E_a = módulo de elasticidade do adesivo epóxi;

b_a = largura da camada de adesivo epóxi;

t_a = espessura da camada de adesivo epóxi

2.3.2 Modelo de Tumialan; Belarbi; Nanni [14]

Esses autores desenvolveram um modelo de descolamento na interface concreto-PRF para vigas reforçadas à flexão. O modelo baseia-se na aplicação de um critério de ruptura às tensões que agem sobre o concreto no final da camada de reforço. Esse critério de ruptura baseia-se na ruptura do cobrimento do concreto.

As tensões de cisalhamento na interface concreto-PRF são obtidas por:

$$\tau = C_{R1} \frac{E_f}{E_c} V_o \quad (22)$$

A coesão C_{R1} é obtida pela expressão de Roberts [13]:

$$C_{R1} = \left(1 + \left(\frac{K_s}{E_f \cdot b_f \cdot t_f} \right)^{1/2} \frac{M_o}{V_o} \right) \frac{b_t \cdot t_f}{I_{tr,c} \cdot b_a} (d_f - x) \quad (23)$$

onde:

M_o = momento fletor no final da camada de PRF;

$I_{tr,c}$ = momento de inércia da seção de concreto;

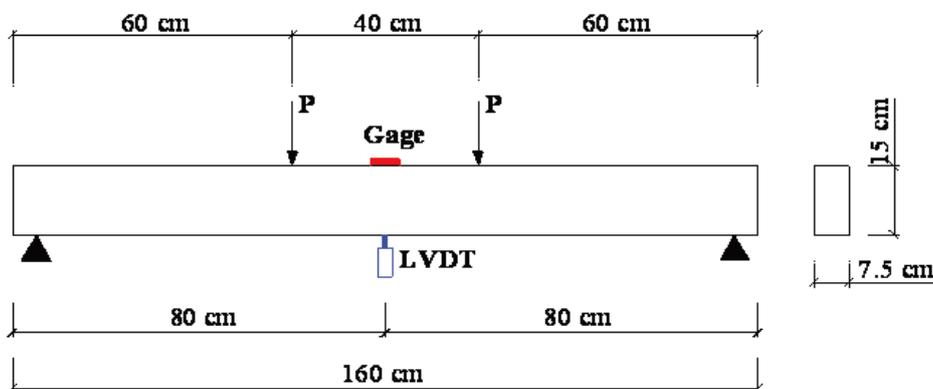
K_s = rigidez ao cisalhamento da camada de adesivo epóxi dada por:

$$K_s = \frac{G_a \cdot b_a}{t_a} \quad (24)$$

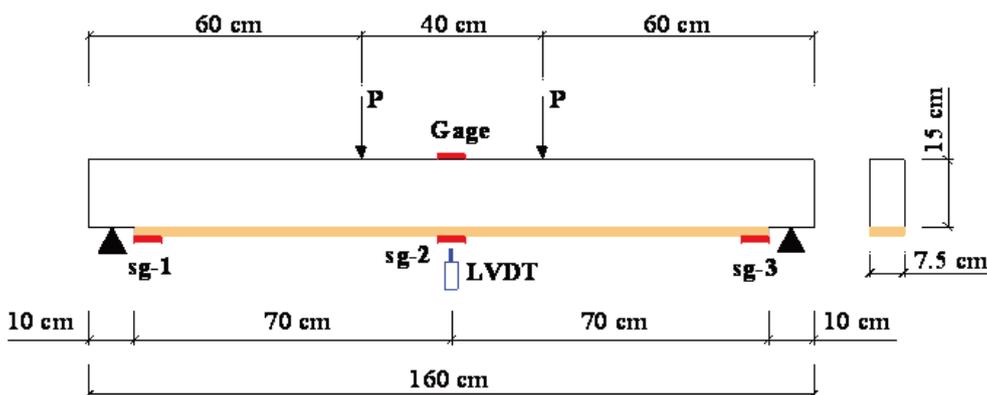
onde:

G_a = módulo de cisalhamento da camada de adesivo epóxi;

Figura 2 - Detalhe de ensaio das vigas retangulares reforçadas à flexão com PRFC



a) Vigas de Controle Não Reforçadas com PRFC (Vigas RR1 e RR2)



b) Vigas Reforçadas com PRFC (Vigas VR 01 a VR 14)

As tensões normais σ_y estão relacionadas às tensões de cisalhamento da seguinte forma:

$$\sigma_y = C_{R2}\tau \tag{25}$$

A máxima tensão principal é dada por:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2} \tag{26}$$

A ruptura do cobrimento do concreto ocorre quando a máxima tensão principal σ_1 iguala ou supera o valor do módulo de ruptura do concreto f determinado por $0,689 \sqrt{f_c}$ (MPa) de acordo com Mirza; Hatzinikolas; Macgregor [15].

De acordo com ensaios de Smith; Teng [16], as respostas produzidas pelo modelo de Tumialan; Belarbi; Nanni [14] levam ao mesmo erro observado na aplicação da proposta de Saadatmanesh; Malek [17] cuja solução envolve cálculos mais complexos.

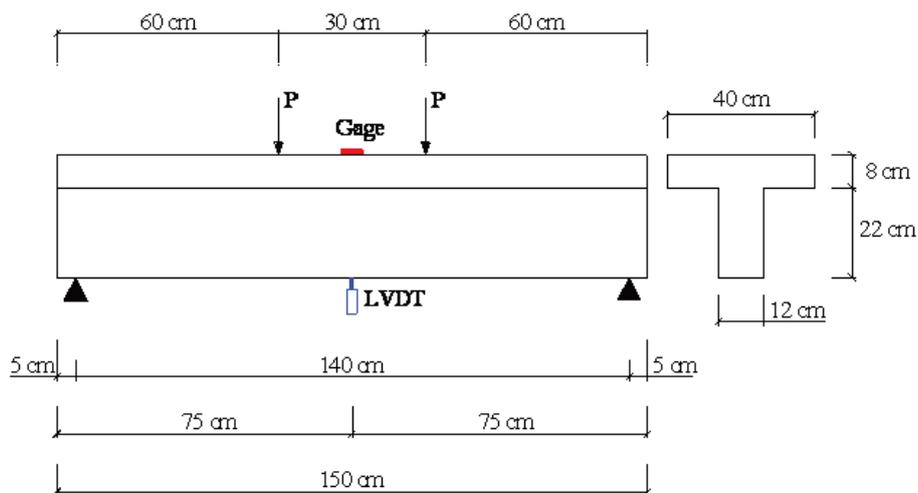
3. Procedimento Experimental

O programa experimental envolveu vinte e cinco vigas de concreto armado reforçadas com polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC), sendo dezesseis com seção transversal retangular (Figura 2) e nove com seção "T" (Figura 3).

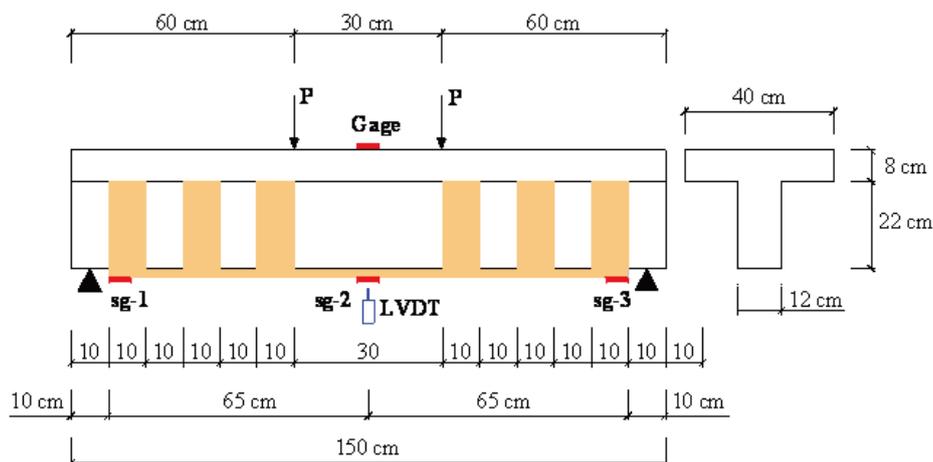
Os deslocamentos no meio do vão foram medidos através de um LVDT; as deformações no concreto, armaduras de aço e PRFC foram medidas usando-se extensômetros elétricos (strain-gages), modelo (KYOWA KFG-5-120-C1-11). As vigas RR1 e RR2 foram usadas como referência (não reforçadas com os PRFC) para as vigas retangulares reforçadas à flexão com PRFC. Da mesma maneira, as vigas RTF1 e RTF2 foram usadas como referência das vigas "T" reforçadas à flexão com PRFC.

A viga VF11 foi reforçada com duas camadas de PRFC enquanto as

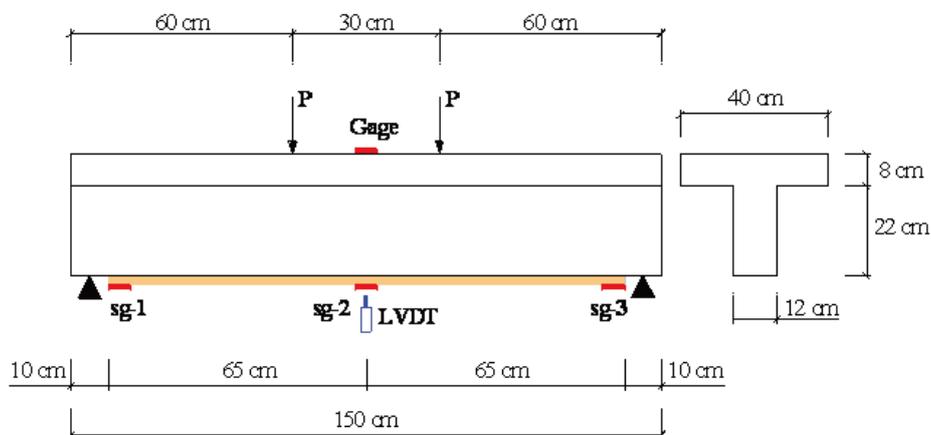
Figura 3 – Detalhe de ensaio das vigas “T” reforçadas à flexão com PRFC



a) Vigas de Controle Não Reforçadas com PRFC (Vigas RTF1 e RTF2)

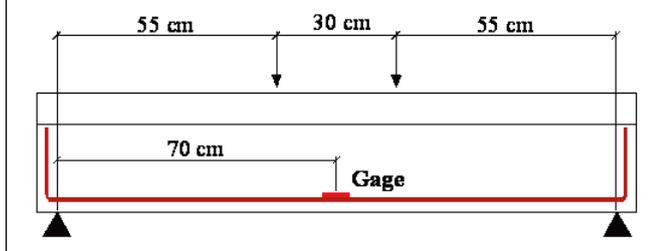


b) Vigas Reforçadas com PRFC (Vigas VTF1 a VTF6)



c) Vigas Reforçadas com PRFC (Viga VTF7)

Figura 4 – Disposição dos *strain-gages* nas armaduras de aço das vigas “T”



outras vigas retangulares receberam uma camada de reforço. Nas vigas VF12, VF13 e VF14, uma camada não contínua de reforço foi usada, sendo que no meio do vão os comprimentos de ancoragem usados foram, respectivamente, de 10 cm, 15 cm e 20 cm. Todas as vigas “T” reforçadas à flexão receberam duas camadas de reforço de PRFC. A disposição dos extensômetros elétricos (*strain-gages*) nas armaduras longitudinais de tração nas vigas “T” pode ser observada na Figura 4. O arranjo do ensaio pode ser visualizado na Figura 5. Foi usado o sistema de aquisição ADS 2000 da Lynx [18], em conjunto com os programas de aquisição e tratamento de sinais AqDados [19] e AqDAnalysis [20], responsáveis por controle e configuração dos equipamentos, leitura dos dados, gravação, leitura, visualização e processamento dos dados.

3.1 Materiais

Detalhes das vigas utilizadas no programa experimental são apresentados na Tabela 1, as propriedades dos materiais aço e con-

creto 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 (ver Figura 6) foram realizados de acordo com os procedimentos da norma ASTM D3039-95 [21] e os ensaios dos adesivos epóxi de acordo com os procedimentos descritos na norma ASTM D638-96 [22]. A Figura 7 apresenta as curvas tensão-deformação obtidas para os PRFC em ensaios de tração uniaxial.

4. Resultados Experimentais e Discussões

Os resultados obtidos nos ensaios experimentais estão dispostos na Tabela 5 (vigas de referência), Tabela 6 (vigas retangulares reforçadas com PRFC) e Tabela 7 (vigas “T” reforçadas com PRFC). Os mecanismos de ruptura encontrados podem ser observados na Figura 8. Cabe observação que para as vigas VR 01 a VR 05 o modo de ruptura encontrado se deu por ruptura do PRFC por tração. Este fato pode ser evidenciado tomando-se como base as deformações no PRFC medidas no meio do vão (Tabela 6).

Com relação aos resultados experimentais das vigas retangulares reforçadas à flexão com os PRFC foram observados os seguintes comportamentos: Para as vigas VF1 a VF8 a capacidade resistente à flexão aumentou em 40% (em média); para as vigas VF9 e VF10 a capacidade resistente à flexão ampliou cerca de 21% em média; o comportamento mais frágil das vigas reforçadas não foi detectado nesses ensaios; para as vigas VF1 a VF8 as deformações médias nos PRFC foram de 1,22%; para a viga VF11 a carga de ruptura cresceu em 53% (devido às duas camadas de PRFC usadas); um comportamento similar foi obtido para as vigas VF12, VF13 e VF14 (neste caso um comprimento de ancoragem de 10

Figura 5 – Detalhe dos Ensaios das Vigas

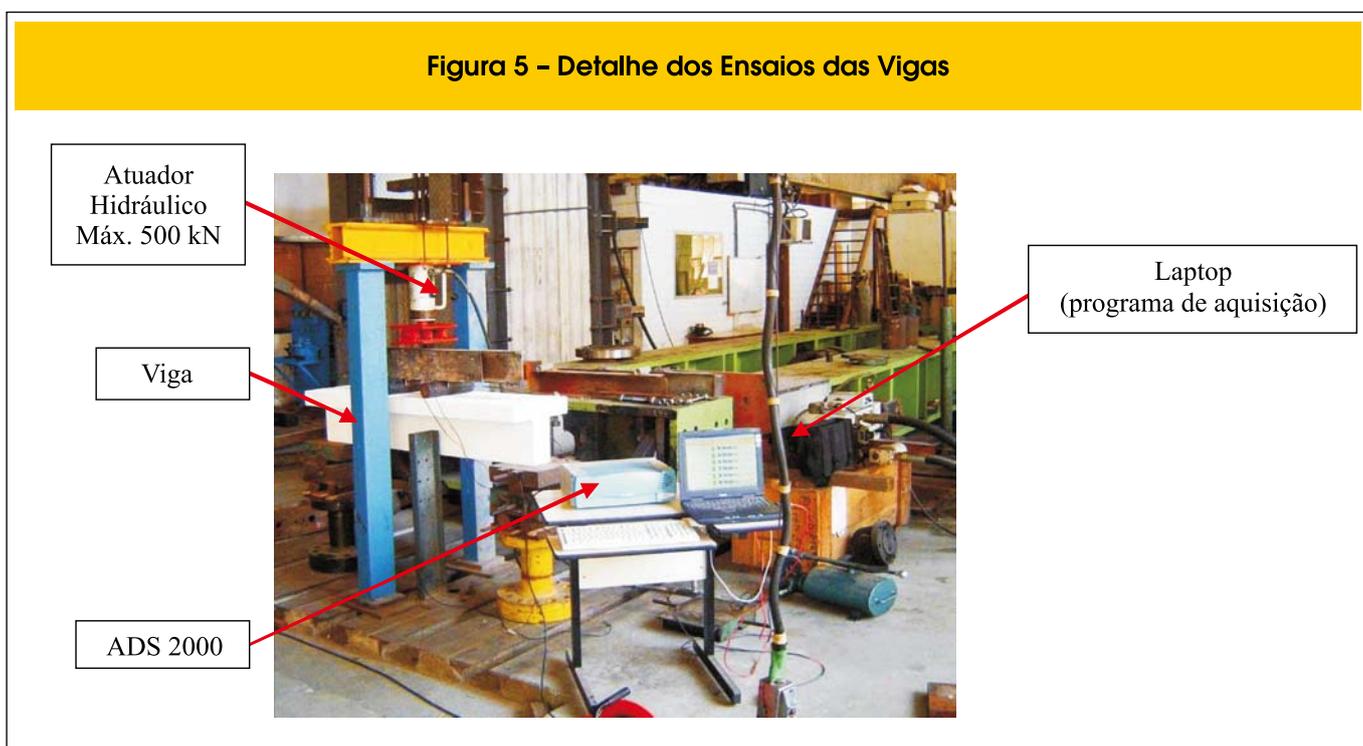


Tabela 1 – Detalhes das vigas usadas no programa experimental

Viga	A_s	Estribos	Reforço	PRFC	Camadas	Largura do PRFC (cm)	A_f (mm ²)	Traspasse (cm)
RR1	2 n° 2	n° 2 at 6,0cm	---	---	---	---	---	---
RR2	2 n° 2	n° 2 at 6,0cm	---	---	---	---	---	---
VR 01	2 n° 2	n° 2 at 6,0cm	flexão	CFRP 1	1	7,5	9,75	NÃO
VR 02	2 n° 2	n° 2 at 6,0cm	flexão	CFRP 1	1	7,5	9,75	NÃO
VR 03	2 n° 2	n° 2 at 6,0cm	flexão	CFRP 1	1	7,5	9,75	NÃO
VR 04	2 n° 2	n° 2 at 6,0cm	flexão	CFRP 1	1	7,5	9,75	NÃO
VR 05	2 n° 2	n° 2 at 6,0cm	flexão	CFRP 1	1	7,5	9,75	NÃO
VR 06	2 n° 2	n° 2 at 6,0cm	flexão	CFRP 1	1	7,5	9,75	NÃO
VR 07	2 n° 2	n° 2 at 6,0cm	flexão	CFRP 1	1	7,5	9,75	NÃO
VR 08	2 n° 2	n° 2 at 6,0cm	flexão	CFRP 1	1	7,5	9,75	NÃO
VR 09	2 n° 2	n° 2 at 6,0cm	flexão	CFRP 4	1	7,5	8,25	NÃO
VR 10	2 n° 2	n° 2 at 6,0cm	flexão	CFRP 4	1	7,5	8,25	NÃO
VR 11	2 n° 2	n° 2 at 6,0cm	flexão	CFRP 4	2	7,5	16,5	NÃO
VR 12	2 n° 2	n° 2 at 6,0cm	flexão	CFRP 4	1	7,5	8,25	10
VR 13	2 n° 2	n° 2 at 6,0cm	flexão	CFRP 4	1	7,5	8,25	15
VR 14	2 n° 2	n° 2 at 6,0cm	flexão	CFRP 4	1	7,5	8,25	20
RTF1	2 n° 3	n° 1 at 8,0cm	---	---	---	---	---	---
RTF2	2 n° 3	n° 1 at 8,0cm	---	---	---	---	---	---
VTF1	2 n° 3	n° 1 at 8,0cm	flexão	CFRP 2	2	11,5	25	NÃO
VTF2	2 n° 3	n° 1 at 8,0cm	flexão	CFRP 2	2	11,5	25	NÃO
VTF3	2 n° 3	n° 1 at 8,0cm	flexão	CFRP 3	2	12	31	NÃO
VTF4	2 n° 3	n° 1 at 8,0cm	flexão	CFRP 3	2	12	31	NÃO
VTF5	2 n° 3	n° 1 at 8,0cm	flexão	CFRP 4	2	9	20	NÃO
VTF6	2 n° 3	n° 1 at 8,0cm	flexão	CFRP 4	2	9	20	NÃO
VTF7	2 n° 3	n° 1 at 8,0cm	flexão	CFRP 5	1	5	70	NÃO

CFRP1 e CFRP5 usam adesivo epóxi Sikadur 30, CFRP2 com adesivo Triepox, CFRP3 com adesivo MBrace Saturant e CFRP4 com adesivo Nitobond CF 55.

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

Armaduras de Aço					
Tamanho da Barra	Diâmetro (mm)	Área (mm ²)	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)
All Rectangular	45	3,6
RTF1	59	4,2
RTF2	57	4,7
VTF1	62	5,0
VTF2	60	5,0
VTF3	60	5,2
VTF4	61	5,6
VTF5	57	5,6
VTF6	59	5,7
VTF7	60	5,8

Tabela 3 – Propriedades mecânicas dos PRFC

Tipo	Espessura (mm)	E _i (GPa)	f _{tu} (MPa)	e _{tu} (‰)
CFRP1 ⁱ	0,13	230	3500	15,00
CFRP2 ⁱⁱ	0,11	221	2728	12,44
CFRP3 ⁱⁱⁱ	0,165	218	2730	12,40
CFRP4 ^{iv}	0,11	235	3550	15,00
CFRP5 ^v	1,4	310	1250	4,0

ⁱSika Wrap Hex, ⁱⁱTEI 300, ⁱⁱⁱMBrace, ^{iv}Fosfiber C and ^vSika Carbodur H514.

cm aparenta ser suficiente-mente capaz de reproduzir o comportamento de uma tira de PRFC em comum acordo com as recomendações das normas internacionais).

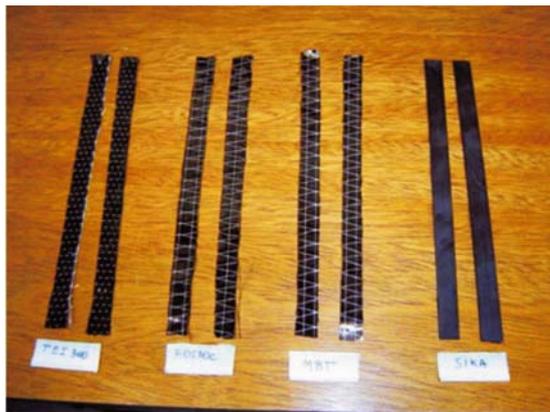
Para os resultados experimentais obtidos para as vigas em "T" reforçadas à flexão com PRFC, cabem as seguintes observações: o menor ganho de capacidade resistente à flexão foi obtido na viga VTF7 (laminado de fibra de carbono sem ancoragem) e o maior aumento médio de capacidade de carga foi obtido entre as vigas VTF3 e VTF4 (82,1%) conforme mostra a Figura 9-a. Este comportamento não representa necessariamente uma melhor performance do tipo de compósito empregado, mas sim uma maior área de fibras usada

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

nestas vigas. Nas vigas VTF1 e VTF2 (material CFRP2), as deformações encontradas nas armaduras de tração foram maiores que as obtidas nas outras vigas, conforme a Figura 10. O comportamento das vigas reforçadas com PRFC foi mais frágil em comparação com as vigas de referência RTF1 e RTF2, conforme esperado, já que nas vigas de referência as deformações no concreto comprimido no instante da ruptura foram maiores que as obtidas para as vigas reforçadas com PRFC (Figura 9-b). A viga VTF7 reforçada com laminados de PRFC foi a que apresentou um comportamento dúctil mais próximo ao das vigas de referência, provavelmente em função do menor ganho de resistência obtido para esta viga em relação às demais.

Figura 6 – Ensaio de caracterização dos PRFC



Corpos-de-prova de PRFC



Ruptura nos PRFC durante ensaio de tração

A regra geral observada é que os ganhos de resistência são inversamente proporcionais à ductilidade do elemento estrutural, sugerindo que seja estabelecida em projeto uma limitação do ganho de capacidade resistente em função de uma ductilidade mínima exigida.

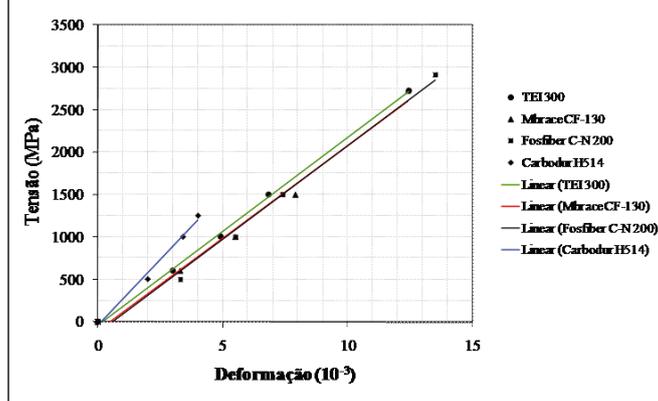
5. Comparação entre os Resultados Teóricos e Experimentais

A comparação entre os resultados teóricos obtidos a partir dos modelos analíticos expostos neste artigo e os resultados experimentais são apresenta-

dos na Tabela 8. Esses resultados graficamente representados na Figura 11 para as vigas retangulares e na Figura 12 para as vigas com seção “T”.

Os resultados obtidos com as expressões do ACI-440 [1] ficaram muito próximos dos valores encontrados nos ensaios experimentais das vigas retangulares. Nas vigas “T” reforçadas à flexão com PRFC as melhores correlações entre modelo analítico e resulta-

Figura 7 – Curvas tensão-deformação obtidas para os PRFC



do experimental foram obtidas com o fib-14 [2]. Em todas estas vigas os resultados de carga de ruptura calculados pelo ACI-440 [1] foram menores que os valores obtidos com o fib-14 [2].

Outros modelos analíticos apresentados não reproduziram satisfatoriamente o comportamento encontrado nos ensaios experimentais e alguns deles apresentaram limitações que impossibilitaram sua análise neste trabalho, tais como: as expressões de Oehlers [8] são válidas quando o momento fletor e o esforço cortante são altos perto da região onde a camada de PRFC termina (nos ensaios efetuados o momento fletor ti-

nha um valor muito pequeno na região em que a camada de PRFC terminava). O mesmo ocorre com as expressões de Jansze [9] (tais expressões não são válidas para seções próximas do apoio). Os resultados obtidos com o modelo de Zhang; Raoof; Wood [10] ficaram próximos aos resultados experimentais ao contrário da modificação no comprimento de ancoragem efetivo proposto por Raoof; Hassanen [11], que produziu um resultado muito aquém do verifi-

Tabela 5 – Valores experimentais encontrados para as vigas de referência

Viga	P_{ref} (kN)	$\epsilon_{concreto}$ (%)	Modo de Ruptura
RR1	21,3	1,67	flexão
RR2	20,7	2,15	flexão
Média	21,0	1,91	---
RTF1	120	2,20	flexão
RTF2	116	1,98	flexão
Média	118	2,09	---

cado experimentalmente. Com modelo de Tumialan; Belarbi; Nanni [14] para as vigas retangulares, o valor obtido para σ_1 foi 5,6 MPa, maior que o módulo de ruptura do concreto calculado (4,4MPa), sugerindo desta forma uma ruptura no cobrimento do concreto em conjunto com o destacamento da camada de reforço, fato constatado experimentalmente para as vigas VR 06, VR 07 e VR 08. Tais modelos não foram aplicados sobre as vigas com seção "T" em função de o mecanismo de ancoragem usado no reforço à fle-

xão com PRFC (Figura 3) dificultar a previsão de descolamento do reforço por qualquer modelo analítico aqui apresentado.

6. Conclusões

A partir dos resultados obtidos, as seguintes conclusões podem ser colocadas:

- Nas vigas retangulares reforçadas com PRFC a carga de

Tabela 6 – Valores experimentais encontrados para as vigas retangulares reforçadas com PRFC

Viga	P_{max} (kN)	Meio do Vão		Zona de Ancoragem		Δ (%)	Modo de Ruptura
		$\epsilon_{concreto}$ (‰)	ϵ_f (sg-2) (‰)	ϵ_f (sg-1) (‰)	ϵ_f (sg-3) (‰)		
VR 01	30,77	3,93	13,28	0,89	1,38	47	Ruptura do PRFC
VR 02	28,96	3,12	---	1,65	1,50	38	Ruptura do PRFC
VR 03	30,30	2,26	11,78	0,45	0,78	44	Ruptura do PRFC
VR 04	29,15	2,95	12,56	2,21	1,83	39	Ruptura do PRFC
VR 05	30,39	2,72	11,37	1,90	---	45	Ruptura do PRFC
VR 06	28,77	3,11	---	1,65	1,97	37	Descolamento
VR 07	30,55	3,51	---	1,92	1,83	46	Descolamento
VR 08	26,35	2,28	---	---	1,12	25	Descolamento
Média	29,40	2,98	12,24	1,46	1,45	40	---
VR 9	25,45	1,70	5,33	3,96	3,98	21	Ruptura do PRFC
VR 10	25,35	2,61	6,39	2,88	4,45	21	Ruptura do PRFC
Média	25,40	2,15	5,86	3,42	4,21	21	---
VR 11	32,07	1,33	6,55	---	---	53	Ruptura do PRFC
VR 12	27,40	1,65	4,34	---	---	31	Ruptura do PRFC
VR 13	26,50	2,02	4,42	---	---	26	Ruptura do PRFC
VR 14	28,50	1,46	3,86	---	---	36	Ruptura do PRFC

Tabela 7 – Valores experimentais encontrados para as vigas "T" reforçadas com PRFC

Viga	P_{max} (kN)	Meio do Vão			Zona de Ancoragem		Δ (%)	Modo de Ruptura
		ϵ_s (‰)	$\epsilon_{concreto}$ (‰)	ϵ_f (sg-2) (‰)	ϵ_f (sg-1) (‰)	ϵ_f (sg-3) (‰)		
VTF1	191	24,3	1,29	6,6	4,9	5,0	61,8	Descolamento
VTF2	181	17,2	0,85	5,9	3v1	5,1	53,4	Descolamento
Média	186	20,7	1,07	6,2	4,0	5,0	57,6	---
VTF3	210	17,2	1,10	10,1	5,5	6,2	77,9	Descolamento
VTF4	220	18,0	1,20	9,9	3,5	6,8	86,4	Descolamento
Média	215	17,6	1,15	10,0	4,5	6,5	82,1	---
VTF5	198	10,0	0,99	10,1	4,5	---	67,8	Ruptura do PRFC
VTF6	182	10,5	1,07	10,9	---	4,5	54,2	Descolamento
Média	190	10,2	1,03	10,5	4,5	4,5	61,0	---
VTF7	145	9,7	1,66	3,5	1,88	1,98	22,9	Descolamento

Figura 8 – Mecanismos de ruptura encontrados para as vigas reforçadas com PRFC



Ruptura do PRFC – VR 01



Descolamento do PRFC – VR 07



Ruptura do PRFC – VR 09



Ruptura do PRFC – VR 10

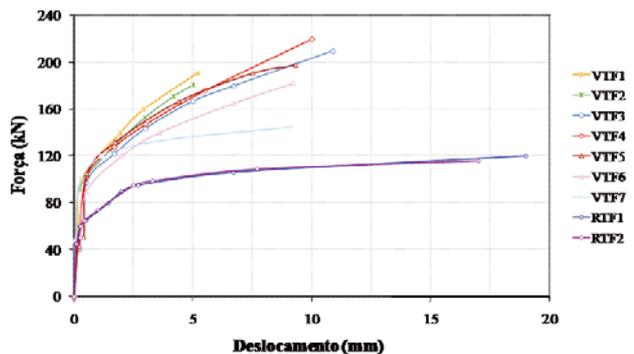


Descolamento do PRFC – VTF2

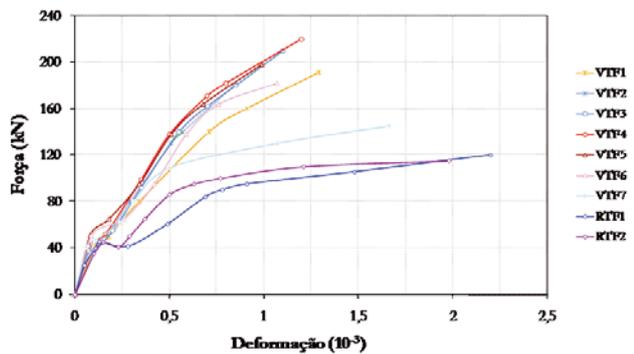


Ruptura do PRFC – VTF5

Figura 9 - Verificação do ganho de capacidade resistente e verificação da ductilidade das vigas "T" reforçadas à flexão com PRFC

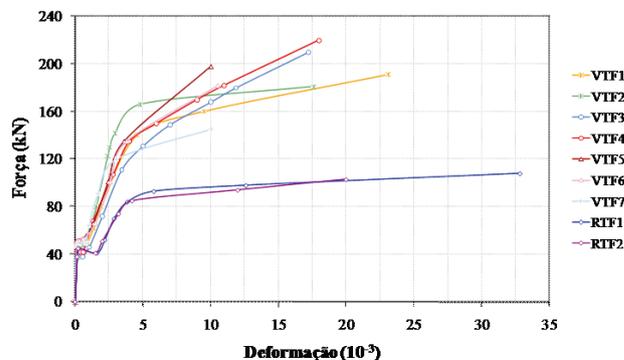


a) Curvas de equilíbrio

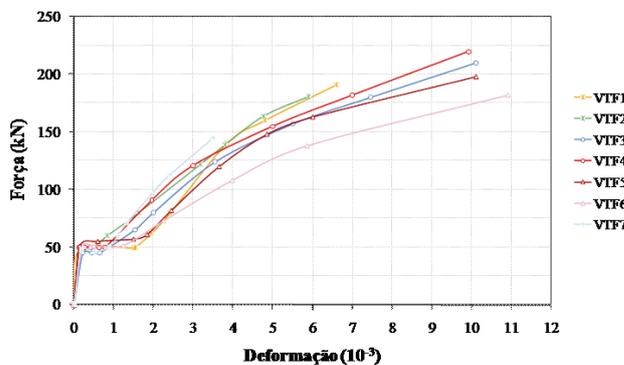


b) Curvas força-deformação no concreto comprimido

Figura 10 - Evolução das deformações nas armaduras de tração e nos PRFC



a) Curvas força-deformação no aço tracionado



b) Curvas força-deformação no PRFC (strain-gage sg-2)

Tabela 8 - Comparação entre os resultados teóricos e experimentais

Viga	P _{max} (kN)			σ _{min} (MPa)		
	Ensaio	ACI-440	fib-14	Ensaio	Zhang; Raouf; Wood (10)	Raouf; Hassanen (11)
VR 01 até VR 08	29,4	26,5	32	2820	2860	590
VR 09/VR 10 e VR 12 até VR 14	26,6	26,9	31,6	---	---	---
VR 11	32,1	31,6	41,8	---	---	---
VTF1/VTF2	186	162	170	---	---	---
VTF3/VTF4	215	190	198	---	---	---
VTF5/VTF6	190	144	154	---	---	---
VTF7	145	159	166	---	---	---

ruptura foi ampliada em 21% com uma camada de PRFC e em 53% usando-se duas camadas de PRFC; um comportamento estrutural similar foi obtido entre as vigas VF12 e VF14 (o comprimento de ancoragem usado de 10 cm foi suficiente para reproduzir o comportamento de um reforço de PRFC contínuo);

- Nas vigas em “T” um pequeno incremento da capacidade resistente à flexão foi alcançado usando-se o laminado de PRFC (material CFRP5) colado externamente; a ausência de um mecanismo de ancoragem provocou uma ruptura precoce por descolamento do reforço; usando-se o material CFRP2 as deformações encontradas nas armaduras de tração foram maiores que as medidas nas outras vigas reforçadas; o comportamento de todas as vigas “T” reforçadas com PRFC foi mais frágil que nas vigas de referência;
- Ganhos de resistência são inversamente proporcionais à ductilidade do elemento estrutural, sugerindo que seja estabelecida em projeto uma limitação do ganho de capacidade resistente em função de uma ductilidade mínima exigida para as vigas;
- Usando-se as expressões da norma ACI-440 [1] os resultados teóricos ficaram próximos dos valores experimentais; por outro lado, para as vigas “T” reforçadas à flexão, os valores teóricos encontrados com o uso da norma fib-14 [2] ficaram mais próximos dos valores encontrados nos ensaios físicos; em todas as vigas as cargas de ruptura teóricas obtidas com o ACI-440 [1] ficaram abaixo dos valores do fib-14 [2];
- Os modelos de Zhang; Raof; Wood [10] e Tumialan; Belarbi; Nanni [14], referentes, respectivamente, aos modelos de concreto contribuinte entre fissuras e aos modelos baseados na tensão na interface concreto-PRFC, produziram bons resultados quando aplicados às vigas retangulares reforçadas com PRFC;

7. Agradecimentos

Os autores agradecem a Fapesp – Fundação de Amparo à Pes-

quisa 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 e 303735/2008-2) pelo suporte financeiro.

8. Referências bibliográficas

- [01] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. State of the art report on fiber reinforced plastic reinforcement for concrete structures - ACI 440R-02, 2002.
- [02] FEDERATION INTERNATIONALE DU BETON – “BULLETIN 14: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures”. Lausanne, October, 2001.
- [03] JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. Recommendations for upgrading of concrete structures with use of continuous fiber sheets, JSCE, Concrete Engineering Series, No. 23, 325p., October, 1997.
- [04] 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.
- [05] GAMINO, A.L., BITTENCOURT, T.N., Reinforced Concrete Beams Strengthened with CFRP: Experimental, Analytical and Numerical Approaches. In: 8th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures - FRPRCS-8, Patras, pp.130-131, CD (10 pages), 2007.
- [06] 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 Polymer Reinforcement for Concrete Structures - FRPRCS-9, Sydney, CD (4 pages), 2009.
- [07] GAMINO, A.L., BITTENCOURT, T.N., SOUSA,

Figura 11 – Comparação entre os resultados teóricos e experimentais obtidos para as vigas retangulares reforçadas à flexão com PRFC

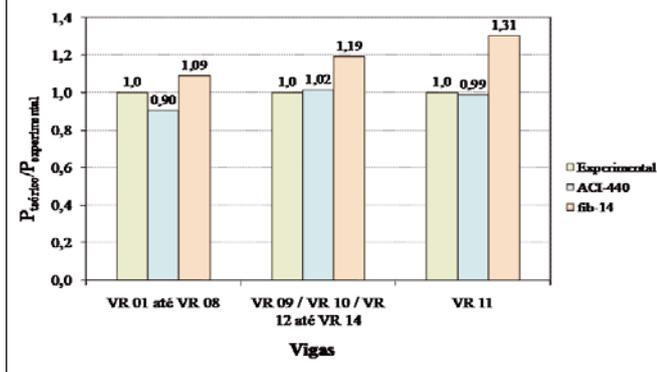
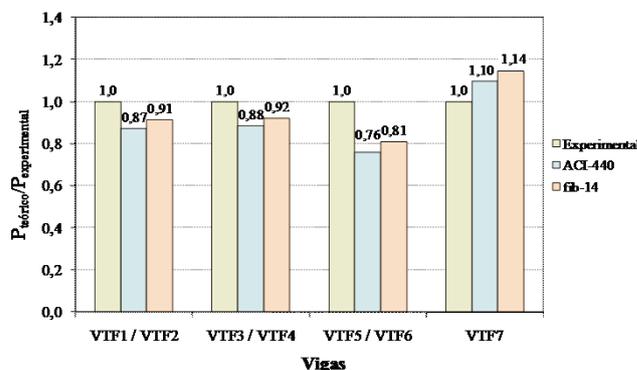


Figura 12 – Comparação entre os resultados teóricos e experimentais obtidos para as vigas “T” reforçadas à flexão com PRFC



- J.L.A.O., Finite element computational modeling of externally bonded CFRP composites flexural behavior in RC beams. *Computers & Concrete, An International Journal*, V. 6, No. 3, pp. 187-202, 2009.
- [08] OEHLERS, D.J., Reinforced concrete beams with plates glued to their soffits. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, V. 118, No. 8, pp. 2023-2038, 1992.
- [09] JANSZE, W., Strengthening of RC members in bending by externally bonded steel plates. PhD Thesis, Delft University of Technology, 1997.
- [10] ZHANG, S., RAOOF, M., WOOD, L.A., Prediction of peeling failure of reinforced concrete beams with externally bonded steel plates. *Structures and Buildings*, V. 110, pp. 257-268, 1995.
- [11] RAOOF, M., HASSANEN, M.A.H., Peeling failure of reinforced concrete beams with fibre reinforced plastic or steel plates glued to their soffits. *Structures and Buildings*, V. 140, pp. 291-305, 2000.
- [12] VARASTEHPOUR, H., HAMELIN, P. Strengthening of concrete beams using fiber-reinforced plastics. *Materials and Structures*, V. 30, pp. 160-166, 1997.
- [13] ROBERTS, T.M., Approximate analysis of shear and normal stress concentrations in the adhesive layer of plated RC beams. *Structural Engineer*, V. 67, No. 12, pp. 229-233, 1989.
- [14] TUMIALAN, G., BELARBI, A., NANNI, A., Reinforced concrete beams strengthened with CFRP composites: failure due to concrete cover delamination. Report CIES-99/01, University of Missouri-Rolla, 1999.
- [15] MIRZA, S., HATZINIKOLAS, M., MACGREGOR, J., Statistical descriptions of the strength of concrete. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, V. 105, pp. 1021-1037, 1979.
- [16] SMITH, S.T., TENG, J.G., FRP-Strengthened RC beams II: assessment of debonding strength models. *Engineering Structures*, V. 24, No. 4, pp. 397-417, 2002.
- [17] SAADATMANESH, H., MALEK, A.M., Design guidelines for flexural strengthening of RC beams with FRP plates. *Journal of Composites for Construction, ASCE*, V. 2, No. 4, pp. 158-164, 1998.
- [18] LYNX TECNOLOGIA ELETRÔNICA LTDA. ADS 2000. Manual de usuário. São Paulo. LYNX, 2003.
- [19] LYNX TECNOLOGIA ELETRÔNICA LTDA. AqDados 7.0 - Programa de aquisição de dados. Manual de usuário. São Paulo. LYNX, 2003.
- [20] LYNX TECNOLOGIA ELETRÔNICA LTDA. AqDAnalysis 7.0 - Programa de tratamento de sinais. Manual de usuário. São Paulo. LYNX, 2005.
- [21] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standart test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. ASTM D3039, 1995.
- [22] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standart test method for tensile properties of plastics. ASTM D638, 1996.