

Influence of steel fibers on structural behavior of beams strengthened with CFRP

Influência de fibras de aço no comportamento estrutural de vigotas reforçadas com PRFC

V. J. FERRARI ^a
vladimirjf@hotmail.com

J. B. DE HANAI ^b
jbhanai@sc.usp.br

Abstract

In this study we present the methodology and the results from the analysis of behavior of reinforced beams and externally strengthened until the flexural with sheet of CFRP (carbon fiber reinforced polymer). The strengthening behavior of common concrete beams is analyzed and compared with the strengthening of beams molded with mortar cement composite and short steel fibers. The main objective was to investigate the influence of cement composite (chosen without major criteria) on the behavior and failure mode of the strengthened beams. Flexural tests in three points of six beams and characterization tests of materials (flexural tests in three points in engraved prismatic bodies-of-proof, strain tests in steel bars and axial compression tests in cylindrical bodies-of-proof) were carried out. In addition, a finite element analysis has been performed to compare to experimental results. The increase of toughness and crack strength lead to significant changes in the structural behavior of beams with fibers and strengthened when compared to strengthened common concrete beams.

Keywords: cement composite; strengthened beams; bending; toughness.

Resumo

Neste trabalho, apresenta-se a metodologia utilizada e os resultados da análise do comportamento de vigotas armadas e reforçadas externamente à flexão com manta de PRFC (polímeros reforçados com fibras de carbono). Avalia-se o comportamento do reforço de vigotas de concreto comum e compara-o com o do reforço de vigotas moldadas com um compósito cimentício à base de argamassa e fibras curtas de aço. O objetivo principal foi investigar a influência do compósito cimentício (escolhido sem maiores critérios) sobre o comportamento e o modo de ruína das vigotas reforçadas. Para tanto, uma série de ensaios de flexão em três pontos em seis vigotas foi conduzida, além dos ensaios de caracterização dos materiais: ensaios de flexão em três pontos em corpos-de-prova prismáticos entalhados, ensaios de tração em barras de aço e ensaios de compressão axial em corpos-de-prova cilíndricos. Adicionalmente, uma análise de elementos finitos foi desenvolvida com objetivo de comparar os resultados obtidos com os experimentais. O ganho de tenacidade e de resistência à fissuração provocou mudanças significativas no desempenho da vigota moldada com fibras e reforçada quando comparada com a vigota reforçada de concreto comum.

Palavras-chave: compósito cimentício, vigotas reforçadas, flexão, tenacidade.

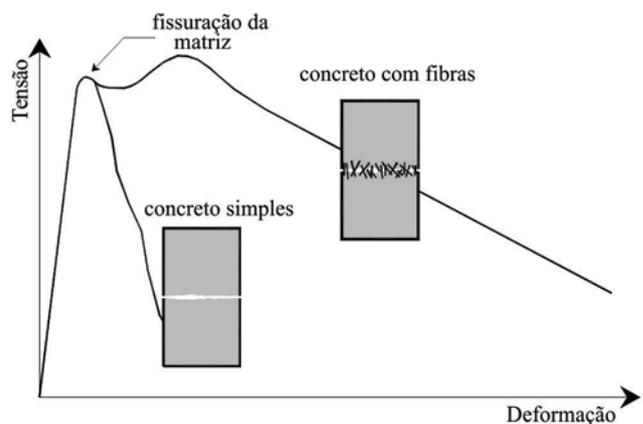
^a Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Agrícola, vladimirjf@hotmail.com, Rodovia PR-182, Cidade Gaúcha-PR, Brasil;

^b Universidade de São Paulo, Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, jbhanai@sc.usp.br, São Carlos, Brasil.

Figura 1 – Ruína de viga reforçada por descolamento (Ferrari (1))



Figura 2 – Comportamento de matrizes cimentícias (Ferrari (1))



1. Introdução

Sabe-se que o uso de PRFC (Polímero Reforçado com Fibras de Carbono) tem experimentado um aumento contínuo em casos de reforço estrutural em todo o mundo na última década. No entanto, a sua utilização, do ponto de vista da mecânica estrutural, apresenta um incômodo relacionado à sua eficácia e segurança, que é o seu descolamento frágil e prematuro na região da ligação reforço-concreto. Tal modo de falha, se não considerado no projeto, pode significativamente diminuir a eficácia do reforço (Ferrari [1], Buyukozturk [2], Wu [3]).

Como exposto em Ferrari [1], o descolamento do reforço, de forma geral, origina-se em regiões onde existe a concentração de altas tensões, como a descontinuidade do material (extremidade do reforço) e a presença de fissuras (Figura [1]). Conforme Buyukozturk

[2], a maioria das falhas por descolamento relatadas na literatura, tem origem no substrato de concreto.

Por outro lado, é de conhecimento que a incorporação de fibras curtas de aço (com elevada resistência e ductilidade) na matriz cimentícia do concreto pode melhorar a sua capacidade de carga e de deformação. A presença dessas fibras não melhora a resistência da matriz, porém, mantém uma capacidade portante pós-fissuração e suporta deformações bem maiores do que a matriz sozinha, conforme ilustrado na Figura [2].

Neste sentido investiga-se com este trabalho a influência de um compósito cimentício à base de argamassa e fibras curtas de aço sobre o comportamento e o modo de ruína de vigotas reforçadas. Para isso, apresenta-se a metodologia utilizada e os resultados da análise do comportamento de vigotas armadas e reforçadas externamente à flexão com manta de PRFC. O comportamento do re-

Tabela 1 – Nomenclatura e características das vigotas

Grupo	Vigotas	Características	Idade (dias)	
			Reforço	Ensaio
A	VRE-1 VRE-2	Vigotas de concreto sem reforço externo. Referência de comparação com os demais grupos.	-	25
B	VR1-1 VR1-2	Vigotas de concreto com reforço externo em seu banzo inferior formado por uma camada de manta de PRFC.	7	25
C	VR2-1 VR2-2	Vigotas moldadas com compósito cimentício de argamassa com adição de fibras curtas de aço. Reforço externo com uma camada de manta de PRFC	7	26

forço de vigotas de concreto comum é avaliado e comparado com o do reforço de vigotas moldadas com o compósito cimentício. Espera-se que o ganho de tenacidade e de resistência ao avanço de fissuras proporcionados pelo compósito cimentício possa provocar mudanças significativas no desempenho estrutural do reforço quando comparado com a vigota reforçada moldada com concreto comum.

2. Programa experimental

2.1 Configuração do ensaio e instrumentação

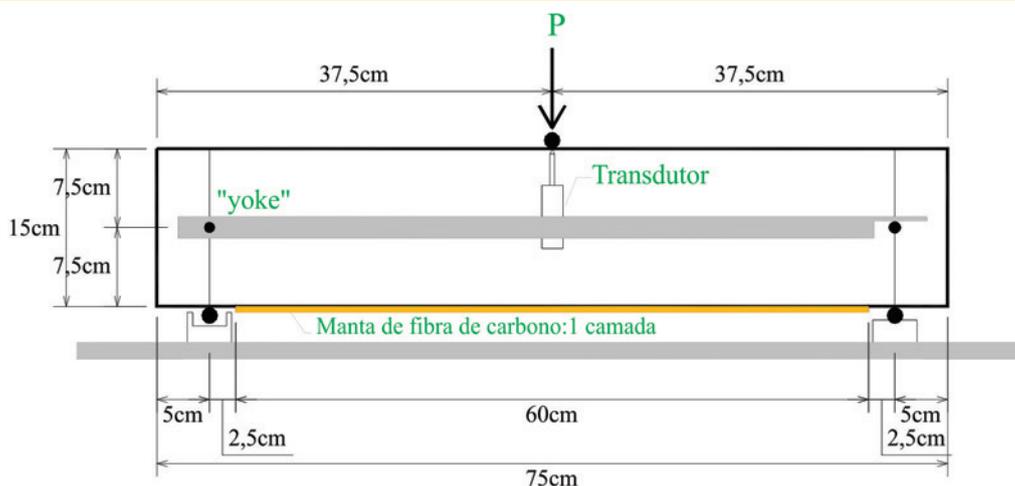
As dimensões das vigotas e o aspecto geral do ensaio são apresentadas na Figura [3]. Foram analisadas seis vigotas armadas

com dimensões de 15 cm x 15 cm x 75 cm e um vão livre de 65 cm, que foram divididas em três grupos conforme Tabela [1].

A armadura longitudinal das vigotas, inferior e superior, foi constituída por duas barras de aço CA-60 de 6,0 mm de diâmetro, correspondendo a uma taxa de armadura de $r=0,25\%$. Essa armadura foi dimensionada no Domínio 2 de deformação. A armadura transversal, constituída por fios de aço CA-60 de 5,0 mm com espaçamento de 8 cm, foi dimensionada para evitar ruína da vigota por cisalhamento.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos (LE-EESC), por meio de um equipamento servo-hidráulico da marca Instron modelo 8506, que possibilitou a aplicação do carregamento por meio do controle de deslocamento do pistão a uma taxa de 0,005 mm/s.

Figura 3 – Dimensões das vigotas e aspecto geral do ensaio

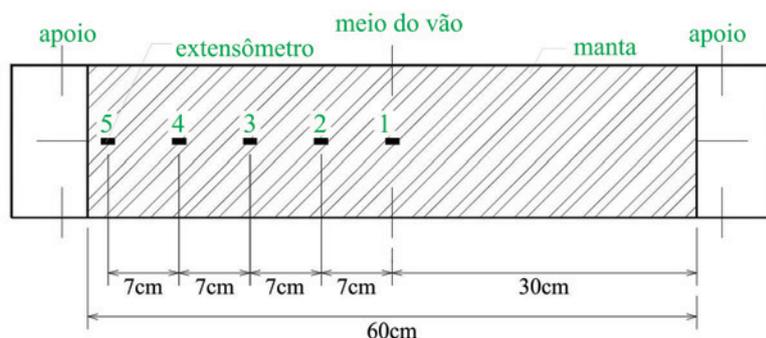


a) Dimensões das vigotas

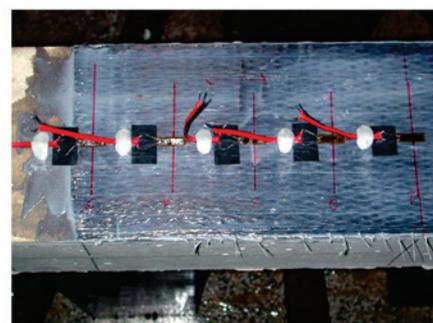


b) Aspecto geral do ensaio de flexão em três pontos

Figura 4 – Disposição dos extensômetros no reforço



a) disposição dos extensômetros



b) extensômetros colados

Durante a realização dos ensaios, foi realizado o monitoramento da força, deslocamentos e deformações específicas por meio de um sistema automático de aquisição de dados. Para a medida dos deslocamentos verticais no meio do vão foi utilizado um transdutor de deslocamentos que se encontrava apoiado num suporte “yoke”. Extensômetros elétricos de resistência (*strain gauges*) foram colados ao concreto, armadura e ao longo do reforço para obtenção de valores de deformações. Tanto as barras de aço da armadura, quanto a região comprimida de concreto foram instrumentadas na seção central da vigota. Já a disposição dos extensômetros no reforço, encontra-se ilustrada na Figura [4].

O grupo A foi formado por duas vigotas de concreto armado sem reforço externo e designadas por VRE. São vigotas de referência para comparação com as demais. O grupo B foi constituído por outras duas vigotas, designadas por VR1, de concreto armado reforçadas em seu banzo inferior por meio da colagem de uma camada de manta de PRFC. Já o grupo C foi formado por duas

vigotas reforçadas designadas por VR2. Essas vigotas foram moldadas utilizando-se um compósito cimentício de argamassa com adição de fibras curtas de aço. A idéia do compósito cimentício é o de conferir às vigotas desse grupo melhores condições de resistência à propagação de fissuras com vistas ao alcance de um melhor desempenho do reforço.

2.2 Moldagem das vigotas e colagem do reforço

Para moldagem das vigotas dos grupos A e B produziu-se um concreto convencional sem a incorporação de aditivo. Já as vigotas do grupo C foram moldadas produzindo-se um compósito cimentício com adição de fibras curtas de aço. As composições utilizadas estão descritas na Tabela [2].

Para caracterização do concreto e do compósito de argamassa foram moldados para cada vigota, cinco corpos-de-prova cilíndricos de 10x20 cm e três corpos-de-prova prismáticos de 15x15x50 cm. O reforço com manta de fibra de carbono foi aplicado no banzo

Tabela 2 – Composição da mistura de materiais para moldagem das vigotas

Material	Concreto		Compósito	
	Traço em massa	Massa específica	Traço em massa	Massa específica
Cimento CP-V ARI PLUS	1,0	3,15 kg/dm ³	1,0	3,15 kg/dm ³
Areia	2,3	2,65 kg/dm ³	3,0	2,65 kg/dm ³
Brita 1	2,3	2,70 kg/dm ³	-	-
a/c	0,5	-	0,5	-
Consumo de cimento (kg/m ³)	400	-	512	-
Teor de fibra de aço*	-	-	2%	7,80 kg/dm ³
Aditivo - Superplastificante Glênium 51	-	-	0,4%	1,09 kg/dm ³

*fibra curta de aço com 25 mm de comprimento e 0,75 mm de diâmetro

Tabela 3 – Propriedades do sistema de reforço

Propriedades	Fibras de carbono*	Resina epóxi**
Espessura efetiva	0,17mm	-
Resistência à tração	2.603 MPa	30 MPa
Módulo de elasticidade	209.000 MPa	3.800 MPa
Deformação última	13‰	9‰
Proporção da mistura	-	4:1 em massa
Consumo	-	0,7 a 1,2 kg/m ²

* conforme caracterização realizada por Carrzedo (4);

** conforme informações do fabricante

Tabela 4 – Resultados dos ensaios de compressão

Grupo	f_{cm} (MPa)	$f_{ctm,sp}$ (MPa)	E_{cs} (MPa)
A	49,86	3,90	32.403
B	49,86	3,90	32.403
C	43,11	3,95	24.955

f_{cm} : resistência média à compressão do concreto;

$f_{ctm,sp}$: resistência média à tração indireta do concreto;

E_{cs} : módulo secante de deformação.

tracionado das vigotas seguindo-se os seguintes procedimentos técnicos:

- Retirada de uma finíssima camada superficial de nata de cimento até exposição parcial dos agregados graúdos;
- Corte da manta nas dimensões necessárias e mistura do adesivo epóxi bi-componente e tixotrópico numa proporção em massa seguindo as recomendações do fabricante;
- Aplicação de uma fina camada de adesivo ao longo do substrato da vigota com auxílio de espátula metálica;
- Colocação da manta sobre o adesivo, pressionando-a com as próprias mãos e em seguida com um pequeno rolo metálico, obrigando o refluxo do adesivo por entre as fibras de carbono.

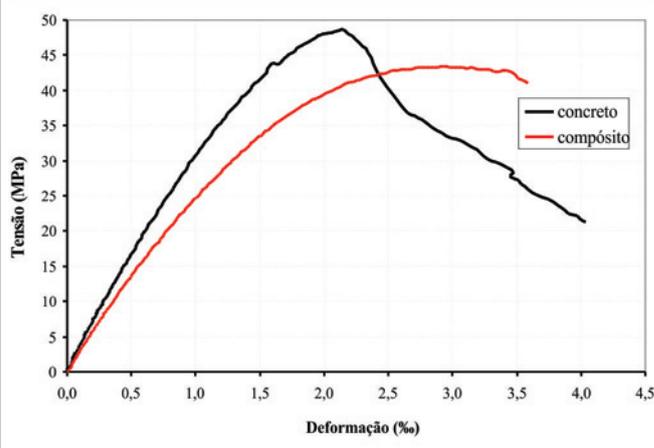
As propriedades mecânicas da manta de fibra de carbono e da resina epóxi estão indicadas na Tabela [3].

3. Caracterização dos materiais

3.1. Ensaios de compressão em corpos-de-prova cilíndricos

Os corpos-de-prova cilíndricos foram submetidos a ensaios de compressão axial – NBR 5739 [5] – e ensaios de tração por compressão

Figura 5 – Curvas tensão-deformação do concreto comum e do compósito



diametral – NBR 7222 [6] – na mesma data em que cada uma das vigotas correspondentes foram ensaiadas. Os valores médios dos resultados individuais estão apresentados na Tabela [4].

Na Figura [5] apresentam-se as curvas tensão-deformação obtidas para o concreto e para o compósito cimentício.

3.2. Ensaios de tração em barras de aço

Foram ensaiadas três amostras das barras de aço conforme prescrições estabelecidas na NBRISO 6892 [7]. Os resultados estão apresentados na Tabela [5] e na Figura [6] ilustra-se a realização do ensaio e o diagrama tensão deformação obtido.

3.3. Ensaios de flexão em corpos-de-prova entalhados

Para avaliar o comportamento à tração na flexão do concreto e do compósito cimentício de argamassa com fibras realizaram-se ensaios de flexão em três pontos em corpos-de-prova prismáticos

Tabela 5 – Resultados do ensaio de tração nas barras de aço

Amostra	f_y (MPa)	e_y^* (‰)	e_y (‰)	E_s (MPa)	f_{st} (MPa)
1 5 mm	629,54	3,12	5,05	198.392	672,27
2 5 mm	637,28	3,02	4,86	190.614	672,27
Média	633,41	3,07	4,96	194.503	672,27
1 6 mm	658,43	3,01	5,12	205.799	-
2 6 mm	660,87	2,88	4,90	210.578	822,42
3 6 mm	656,00	-	-	-	844,46
Média	658,43	2,95	5,01	208.189	833,44

ε_y^* deformação de escoamento correspondente ao diagrama bilinear.

entalhados. Seguiram-se as recomendações da RILEM TC 162-TDF [8] para realização dos ensaios.

Na Figura [7] reúnem-se as curvas “médias” P-CMOD (*crack mouth opening displacement*) representativas do comportamento dos materiais na flexão e na Tabela [6] os resultados são apresentados.

O concreto apesar de possuir resistência maior do que o compósito de argamassa perde sua capacidade de carga quase que imediatamente após atingir a força máxima. Já o compósito de argamassa mantém sua capacidade resistente mesmo após a fissuração da matriz. Essa característica pode ser de fundamental importância para melhor desempenho do reforço após a fissuração do material que constitui o banzo tracionado da vigota.

Com base na resposta P-CMOD dos materiais, verificou-se um com-

portamento quase-frágil para o concreto, enquanto que, o compósito cimentício exibiu uma característica de pseudo-encruamento. O aumento nos valores da resistência flexional equivalente e residual, em relação à tensão $f_{ct,L}$, indicam aumento na tenacidade flexional desse material devido à contribuição das fibras de aço.

A energia de fratura obtida para o concreto foi de 154,92 N/m, calculada segundo a RILEM [9]. Esse valor é superior ao estimado teoricamente (103,87 N/m) por meio da eq. [1], recomendada pelo código modelo FIB [10].

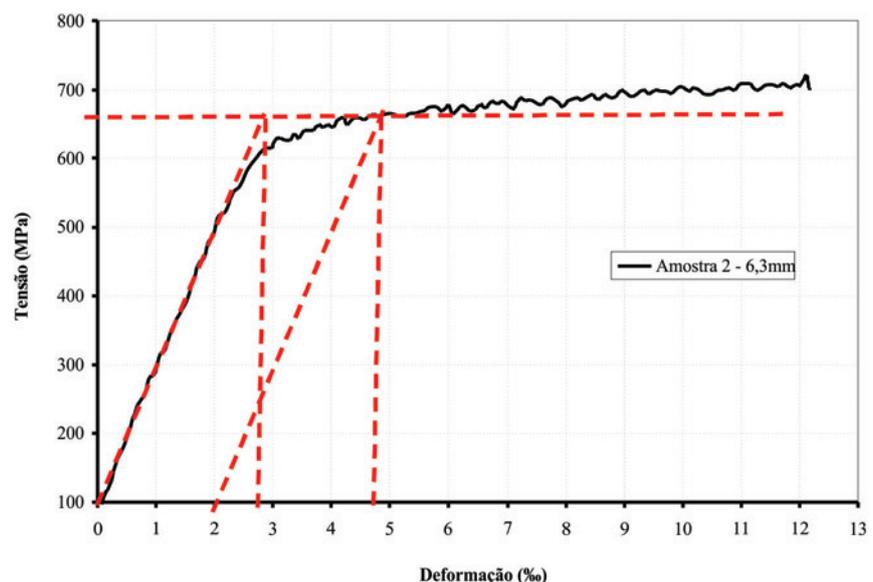
$$G_F = G_{F0} \left(\frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right)^{0,7} \text{ para } f_{cm} \leq 80 \text{ MPa [1]}$$

sendo G_{F0} estimado em função do diâmetro máximo do agregado graúdo ($d_{m\acute{a}x}$) pelo Quadro 1, e $f_{cm0} = 10$ MPa.

Figura 6 – Caracterização das barras de aço



a) ensaio de tração

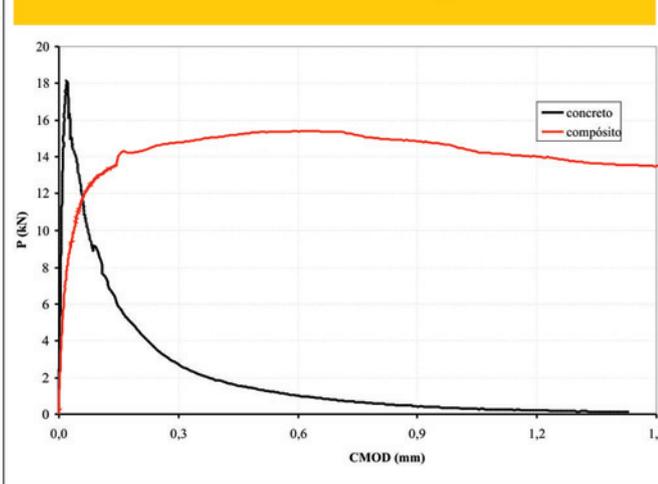


b) curva tensão-deformação

Quadro 4.1 - Valores de G_{F0} segundo FIB (9)

$d_{m\acute{o}x}$ (mm)	8	16	32
G_{F0} (N/mm)	0,02	0,03	0,05

Figura 7 - Curvas médias P-CMOD do concreto e do compósito



4. Apresentação e análise dos resultados

4.1. Modos de ruína observados

As vigotas de concreto armado sem reforço apresentaram modo

de ruína esperado e compatível com o dimensionamento, isto é, deformação excessiva da armadura longitudinal inferior sem esmagamento do concreto comprimido. O ensaio foi interrompido quando a deformação da armadura era de aproximadamente 15,7%. Nesse instante, as vigotas apresentavam poucas fissuras de grandes aberturas propagadas ao longo de praticamente toda a sua altura.

Entre as vigotas reforçadas dos grupos B e C, modos distintos de ruína foram obtidos. Nas vigotas reforçadas do grupo B (VR1-1 e VR1-2) moldadas com o concreto comum, a ruína deu-se por separação de um pedaço de concreto da camada de cobertura da armadura, seguido pelo desprendimento do reforço praticamente a partir do meio do vão de cisalhamento (Figura [8]).

Nas vigotas reforçadas do grupo C o modo de ruína caracterizou-se pelo arrancamento da camada de cobertura da armadura longitudinal inferior. A ruína iniciou-se no final do reforço com o surgimento de uma fissura que propagou-se lentamente (ação das fibras de aço) e de forma inclinada até a armadura. Essa fissura progrediu horizontalmente, ao nível da armadura, e resultou na separação da camada de cobertura (Figura [9]).

É importante destacar que nas vigotas do grupo C, o modo e a posição da ruína foram alterados de separação parcial no meio do vão de cisalhamento para arrancamento da camada de cobertura no final do reforço. Essa mudança reflete a eliminação do desprendimento do reforço, como observado nas vigotas do grupo B, devido ao efeito da presença das fibras de aço no compósito cimentício de argamassa.

4.2. Cargas

A influência do compósito cimentício sobre o comportamento das vigotas reforçadas pode ser avaliada através da análise das cargas indicadas na Tabela [7] e das comparações estabelecidas na Figura [10]. A carga de fissuração (P_f) corresponde à carga em que se observa mudança acentuada de inclinação da curva P-d no seu ramo

Tabela 6 - Forças e tensões conforme RILEM (8)

Material	Forças (kN)					Tensões (MPa)				
	F_L		F_M		$F_{R,1}$	$f_{fct,L}$		$f_{eq,2}$		$f_{R,1}$
Concreto	14,67		14,67		1,80	4,22				0,52
	17,79	16,87	17,79	16,87	- 1,33	5,12	4,85	-	-	- 0,39
	18,14		18,14		0,86	5,22				0,25
Compósito	11,94		12,83		12,82	3,40		3,66		3,61
	18,42	12,66	20,94	14,12	20,87 14,09	5,29 3,69		5,98 4,13		5,99 4,09
	13,37		15,41		15,36	3,97		4,59		4,56

F_L - força máxima de offset;

F_M - força máxima suportada pelo material;

$F_{R,1}$ - força correspondente ao deslocamento vertical de 0,46mm;

$f_{fct,L}$ - tensão correspondente à força F_L ;

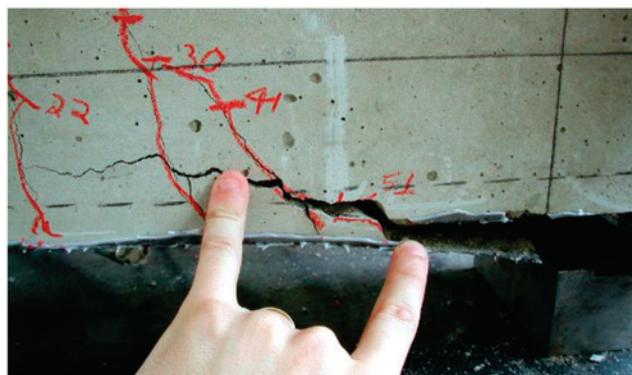
$f_{eq,2}$ - tensão equivalente à tração na flexão;

$f_{R,1}$ - tensão residual.

Figura 8 – Ruína nas vigotas reforçadas do grupo B



a) formação da fissura



b) propagação da fissura após desprendimento

Figura (9) – Ruína nas vigotas reforçadas do grupo C



a) fissura principal no final do reforço



b) propagação da fissura

Tabela 7 – Cargas e modos de ruína observados

Grupo	Vigotas	P_i (kN)		P_y (kN)		P_u (kN)		Modos de ruína
A	VRE-1	14,18	14,01	26,17	23,93	40,25	38,35	Deformação excessiva da armadura inferior
	VRE-2	13,84		21,68		36,45		
B	VR1-1	17,42	17,16	48,84	50,25	61,93	59,87	Separação parcial da camada de concreto e desprendimento do reforço
	VR1-2	16,90		51,66		57,81		
C	VR2-1	14,75	15,13	53,21	53,24	79,67	82,94	Arrancamento da camada de cobrimento
	VR2-2	15,50		53,27		86,21		

Figura 10 - Comparação entre cargas

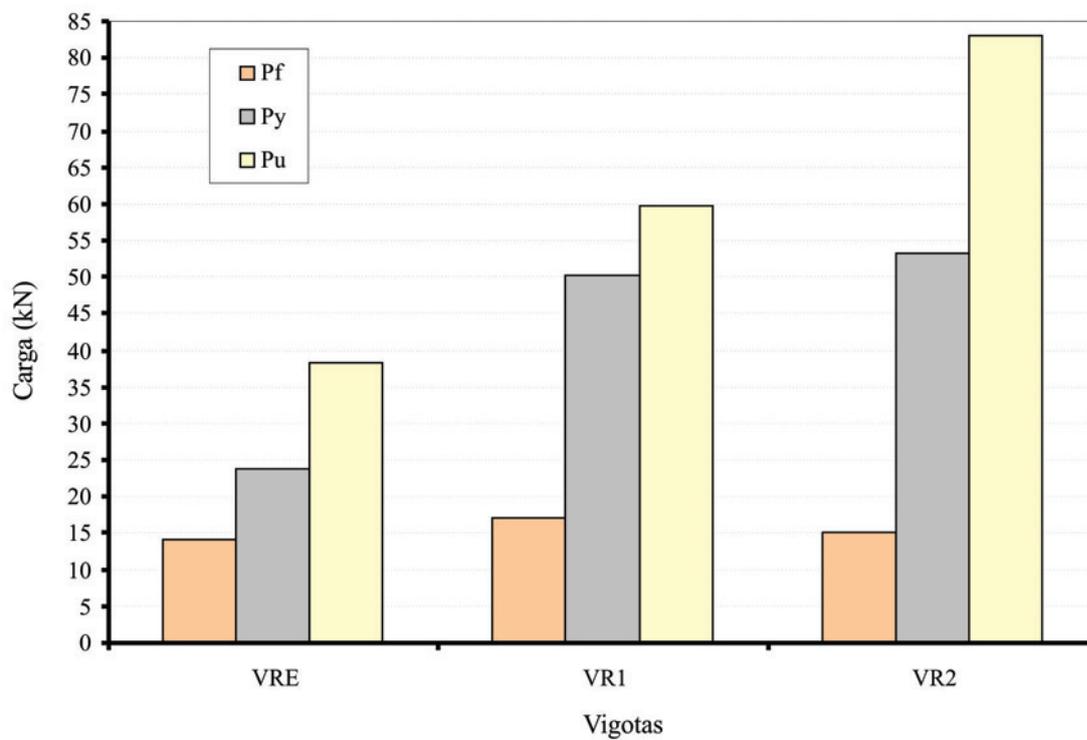
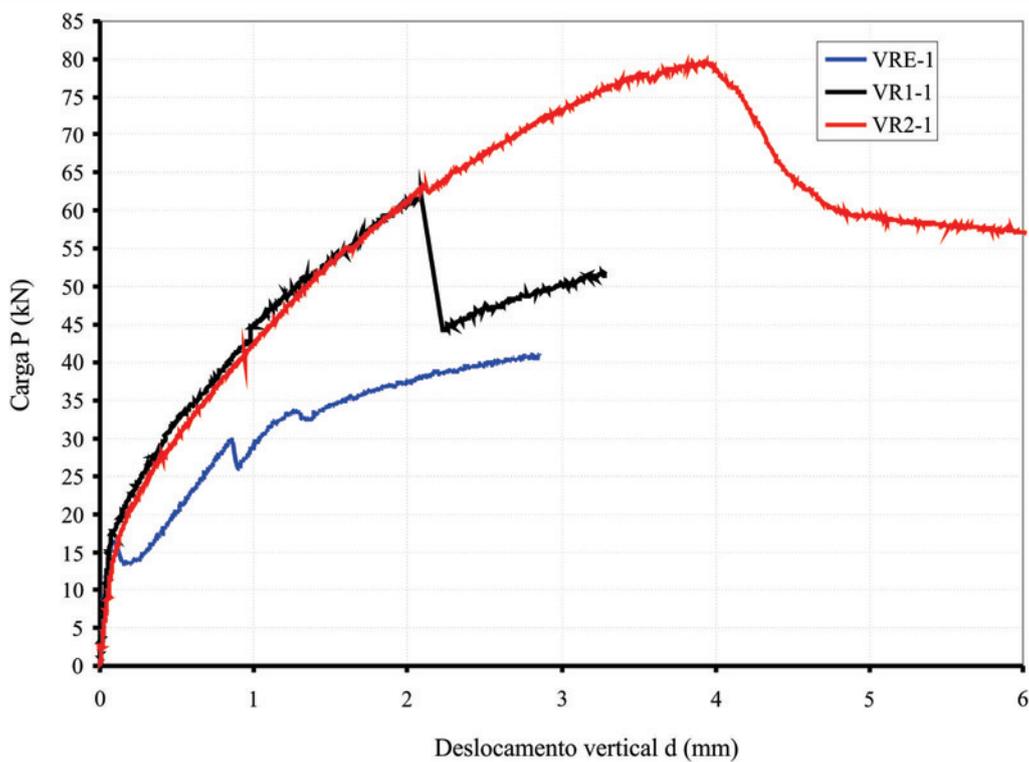


Figura 11 - Curvas P- δ no meio do vão



ascendente. A carga correspondente ao escoamento da armadura longitudinal (P_y) foi obtida quando a deformação média das barras de aço da vigota era equivalente ao valor da deformação de escoamento ϵ_y obtida nos ensaios de tração das barras de aço. A carga última (P_u) corresponde ao valor da carga de ruína da vigota.

Como esperado, as vigotas de concreto comum reforçadas apresentaram carga de fissuração, de escoamento da armadura e de ruína maiores do que as vigotas sem reforço. Os aumentos médios verificados foram, respectivamente, da ordem de 22%, 110% e 56%. Esses aumentos são ainda mais significativos quando a comparação é feita com as cargas médias obtidas com as vigotas do grupo C. Nesse caso os aumentos verificados em relação às vigotas sem reforço foram de 8%, 122% e 116%.

A carga média de fissuração das vigotas do grupo C foi inferior à do grupo B, pois de acordo com a caracterização realizada, o concreto

possui maior resistência à tração na flexão do que o composto cimento de argamassa. Até surgir a primeira fissura é o concreto situado abaixo da linha neutra que resiste às tensões normais de tração. Logo, a vigota de concreto fissurou num nível de carregamento mais elevado. As vigotas do grupo C comparativamente às de concreto reforçadas, apresentaram maiores valores de carga de escoamento e de ruína. Os aumentos verificados foram respectivamente, de 6% e 39%. Isso mostra que as fibras de aço exerceram influência sobre a carga de escoamento da armadura e principalmente, sobre a carga de ruptura da vigota reforçada.

4.3. Deslocamentos verticais

Na Figura [11] reúnem-se as curvas obtidas experimentalmente de carga-deslocamento vertical no meio do vão ($P-\delta$) para as vigotas

Figura 12 - Deformações da armadura e no reforço no meio do vão das vigotas

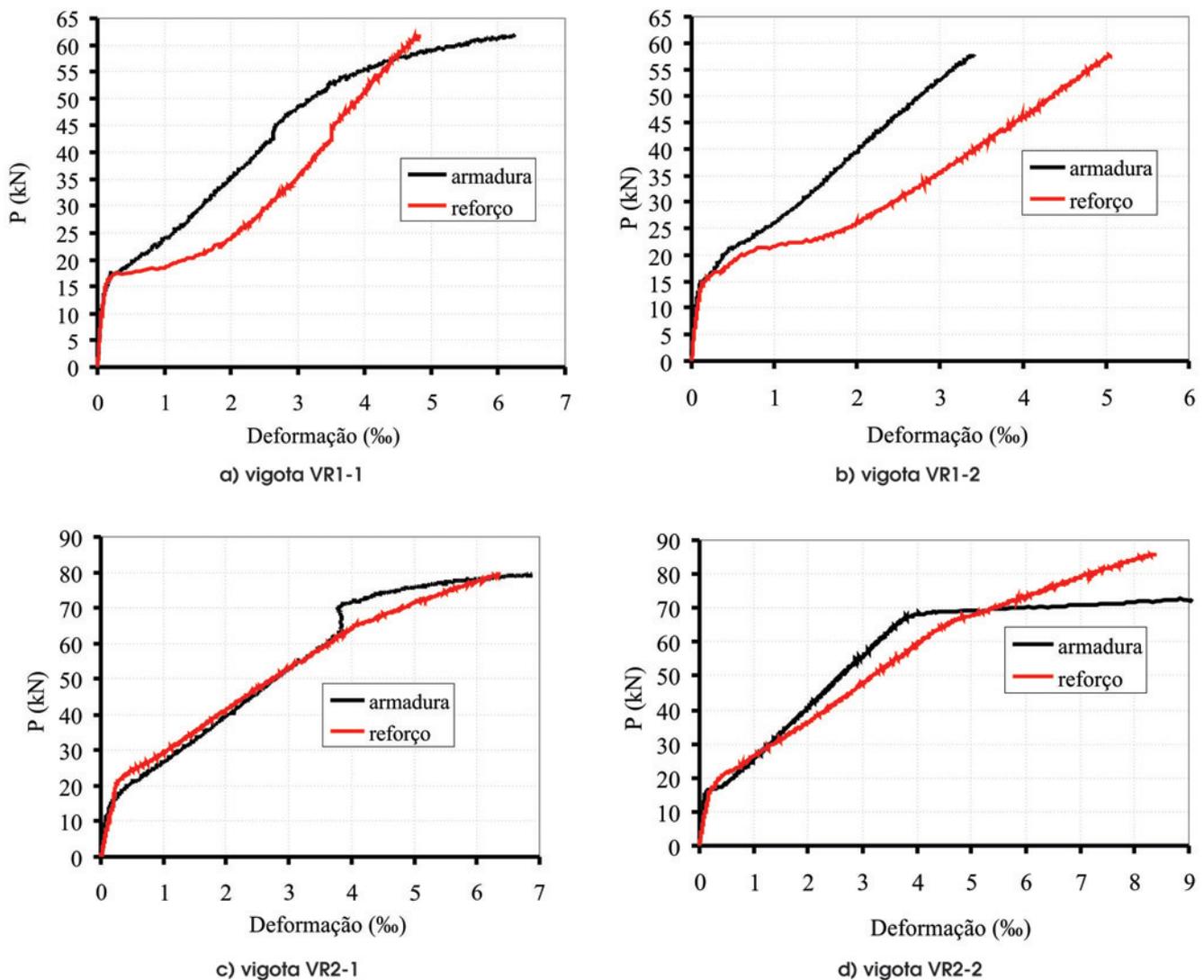
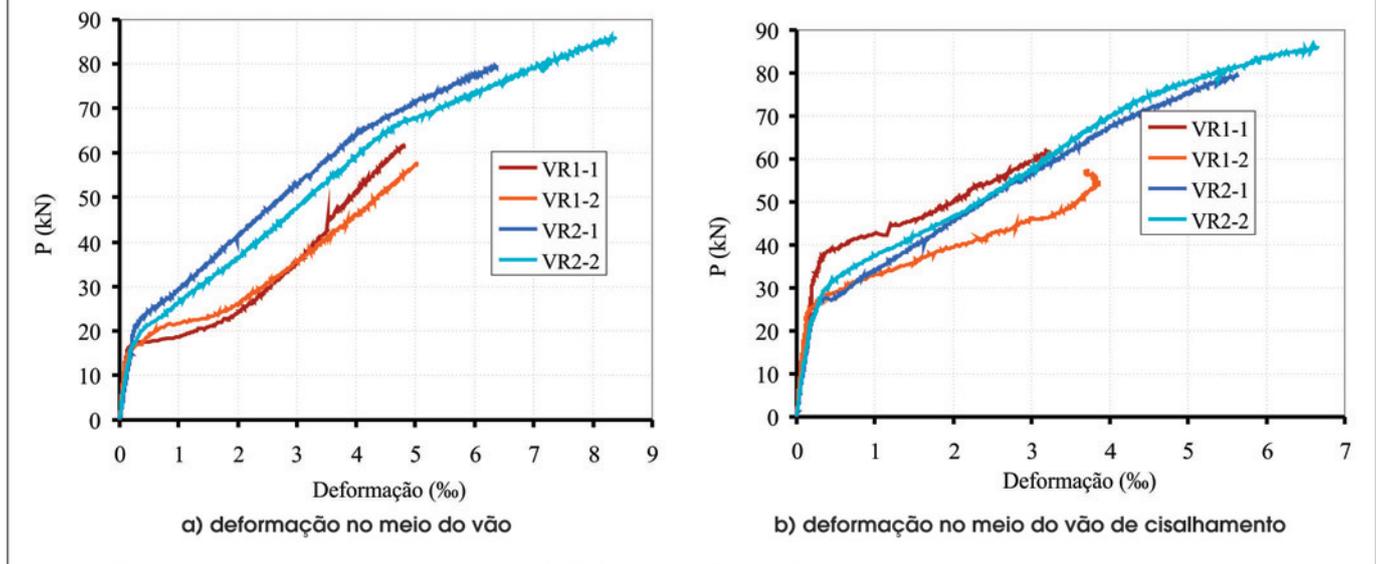


Figura 13 - Comparação entre deformações no reforço das vigotas



reforçadas e sem reforço. Para efeito de uma melhor visualização, somente o comportamento de uma vigota de cada grupo é apresentado. Ressalta-se ainda que dentro de cada grupo o comportamento das vigotas foi bem semelhante.

A presença do reforço na vigota de concreto armado (VR1-1) proporcionou elevação na capacidade de carga e, após a fissuração do concreto, ganho na rigidez da seção.

A curva P- δ da vigota VR2-1 mostra uma elevada capacidade de carga e de deformação antes da ruptura. O ramo descendente da curva apresenta uma queda mais suave, o que reflete uma ruína mais dúctil proporcionada pelas fibras de aço.

A adição de fibras de aço melhorou substancialmente o comportamento pós-fissuração e a ductilidade da vigota reforçada VR2-1. Já a ruína da vigota VR1-1 ocorreu de maneira frágil devido ao desprendimento do reforço. Logo, a perda de resistência gradual verificada na vigota VR2-1 é uma constatação importante que pode ser considerada como um aspecto favorável no comportamento estrutural.

4.4. Deformações específicas

Na Figura [12] reúnem-se os diagramas força-deformação específica da armadura e do reforço no meio do vão das vigotas do grupo B e C. Da análise dos diagramas, é possível tecer alguns comentários como os descritos nos parágrafos seguintes.

Antes do início da fissuração a viga encontra-se em regime elástico linear, logo as deformações no reforço e na armadura evoluem igualmente e nenhuma diferença é detectada entre os comportamentos das vigotas dos grupos B e C.

Com o surgimento da primeira fissura na vigota, é notável a diferença entre o comportamento das vigotas dos grupos B e C. Enquanto que nas vigotas do grupo B as deformações no reforço (devido à fissuração) são mais pronunciadas do que na armadura, nas vigotas do grupo C a armadura e o reforço possuem deformações semelhantes. Isso mostra que a presença das fibras de aço

evitou a concentração de tensões no reforço devido à propagação de fissuras, nesse caso, no meio do vão.

Da observação da Figura [12-d] nota-se que o escoamento da armadura é procedido por um patamar de deformações bem definido. Esse comportamento é característico de barras de aço da classe A e difere-se do observado nas demais vigotas. Esse fato ocorreu por descuido na confecção da armadura das vigotas. Entretanto, em nada prejudicou na análise dos resultados.

Uma comparação entre os valores de deformação específica no reforço no meio do vão de cisalhamento (extensômetro 3) e no meio do vão livre (extensômetro 1) das vigotas dos grupos B e C é feita na Figura [13].

No meio do vão, considerando-se um mesmo nível de carga aplicada às vigotas, a Figura [13-a] revela que a fissuração elevou bruscamente a deformação no reforço das vigotas moldadas com concreto comum, enquanto que a presença de fibras de aço nas vigotas VR2-1 e VR2-2 diminuiu as deformações no reforço.

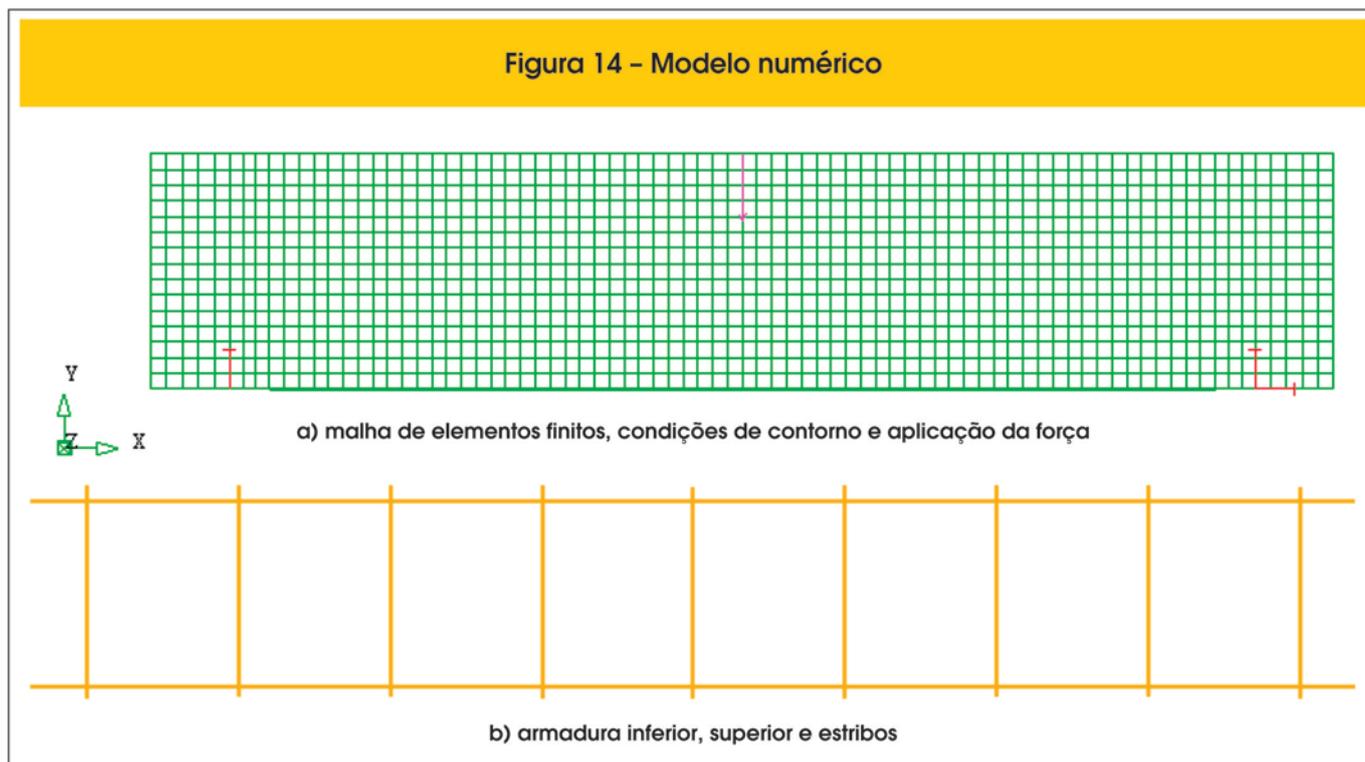
No meio do vão de cisalhamento as deformações no reforço das vigotas do grupo C também atingiram valores mais elevados do que no reforço das vigotas do grupo B (ver Figura [13-b]).

5. Modelo numérico

Neste item descreve-se a análise de elementos finitos desenvolvida com objetivo de comparar os resultados obtidos com os experimentais, fundamentando ainda mais esses últimos. A análise numérica não-linear das vigotas reforçadas e sem reforço foi conduzida utilizando-se o programa Diana versão 9.1, baseado no método dos elementos finitos (MEF). Na Figura 14 são apresentadas a malha de elementos finitos e a disposição geométrica das armaduras definidas no programa.

As condições de contorno foram estabelecidas de maneira a representar o ensaio realizado no laboratório. A malha de elementos finitos foi elaborada utilizando-se elementos quadráticos de oito nós do tipo CQ16M com dimensões uniformes.

Figura 14 – Modelo numérico



Para as armaduras discretas foram utilizados elementos do tipo “embedded reinforcement”.

Os nós dos elementos do reforço externo (Figura 14) foram conectados aos nós adjacentes dos elementos de concreto simulando uma perfeita aderência entre os materiais.

Os modelos de elementos finitos foram carregados pela imposição de uma força concentrada do tipo “displace”. Essa opção permitiu carregar o modelo de maneira semelhante a que foram realizados os ensaios, ou seja, por controle de deslocamento.

As barras de aço inferior e superior da armadura das vigotas foram modeladas considerando-se o encruamento observado nos ensaios

de caracterização realizados. Os valores de tensões e deformações plásticas da armadura definidos no programa Diana são ilustrados na Figura 15-a. A resistência à tração direta do concreto foi tomada segundo o ACI-318M [11] como $0,332 \cdot \sqrt{f_c}$. Para o compósito cimentício a resistência à tração direta foi tomada segundo a RILEM [8] como $0,6 \cdot f_{ct,L}$. O seu comportamento pós-pico foi representado com o “Exponential softening in tension”, considerando-se para tanto a energia de fratura calculada até um $d = 2,65$ mm com base nas curvas P-d do ensaio de flexão em três pontos realizado (Figura 15-b). Na Figura 16 apresenta-se a evolução dos deslocamentos verticais de um nó situado na face inferior da vigota, na mesma linha

Figura 15 – Parâmetros da armadura e do compósito cimentício

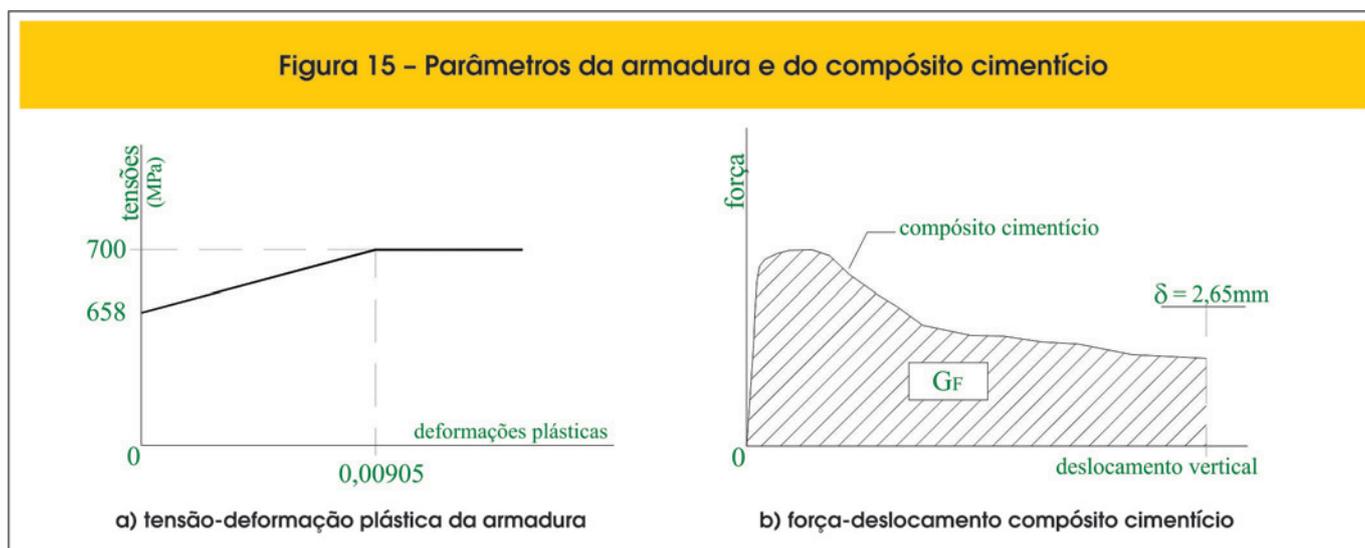
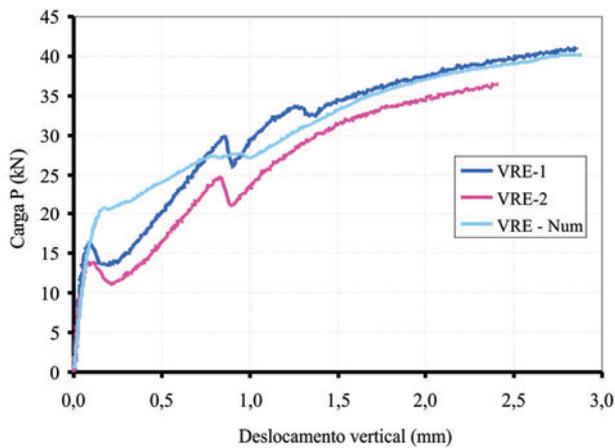
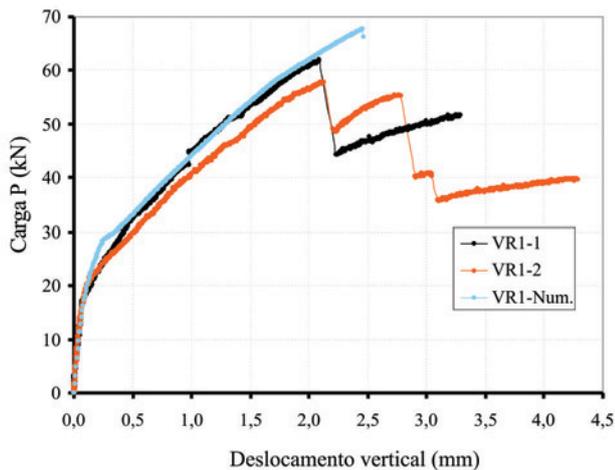


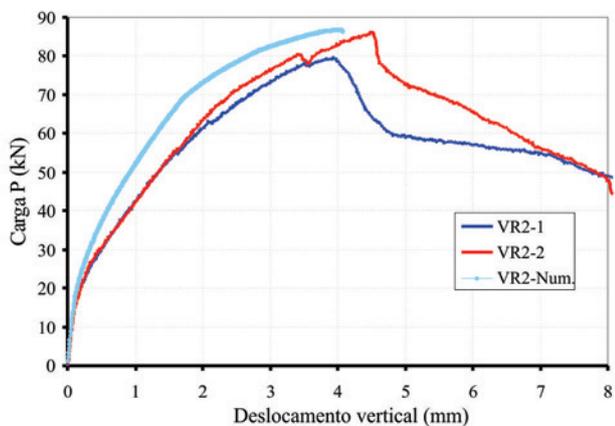
Figura 16 – Deslocamentos verticais numéricos e experimentais



a) Vigota VRE – grupo A



b) Vigota VR1 grupo B



c) Vigota VR2 – grupo C

de aplicação da carga concentrada. Esses deslocamentos são comparados com os obtidos experimentalmente.

Considerando-se somente a fase elástica de comportamento das vigotas, pode-se afirmar que as curvas numéricas e experimentais são idênticas. No entanto, após a fissuração do concreto são notadas diferenças no comportamento das curvas, sendo que para as vigotas reforçadas as curvas numéricas apresentaram-se mais rígidas do que as experimentais.

Após o escoamento da armadura, a curva numérica da vigota sem reforço mostrou ter um comportamento intermediário entre as duas curvas experimentais das vigotas VRE-1 e VRE-2. No entanto, percebe-se que a primeira fissura no concreto ocorreu para um valor de carga experimental bem inferior ao obtido numericamente. Tal fato pode estar associado à resistência à tração direta do concreto.

Após a primeira fissura e até antes do escoamento da armadura, observa-se um acentuado distanciamento das curvas experimentais em relação à numérica. Da curva experimental, nota-se que a carga aplicada às vigotas decresce em função da perda de rigidez provocada pela fissuração do concreto. Esse efeito não foi representado na curva numérica. As curvas voltam a se aproximar, praticamente no nível de carga referente ao escoamento da armadura, e mantém boa semelhança até ao final do ensaio.

A curva numérica representativa do comportamento das vigotas do grupo B apresentou boa concordância com as experimentais, especialmente com a da vigota VR1-1. Nota-se que após a fissuração do concreto a curva numérica mostra-se mais rígida do que curva VR1-2 e com evolução praticamente igual à da vigota VR1-1.

A carga última numérica é 13,0% superior ao valor médio obtido experimentalmente. As flechas correspondentes às cargas últimas das vigotas VR1-1 e VR2-1 foram respectivamente, iguais a 2,09 mm e 2,12 mm, enquanto que a obtida via MEF foi de 2,46 mm, ou seja, 16,6% superior à média registrada experimentalmente.

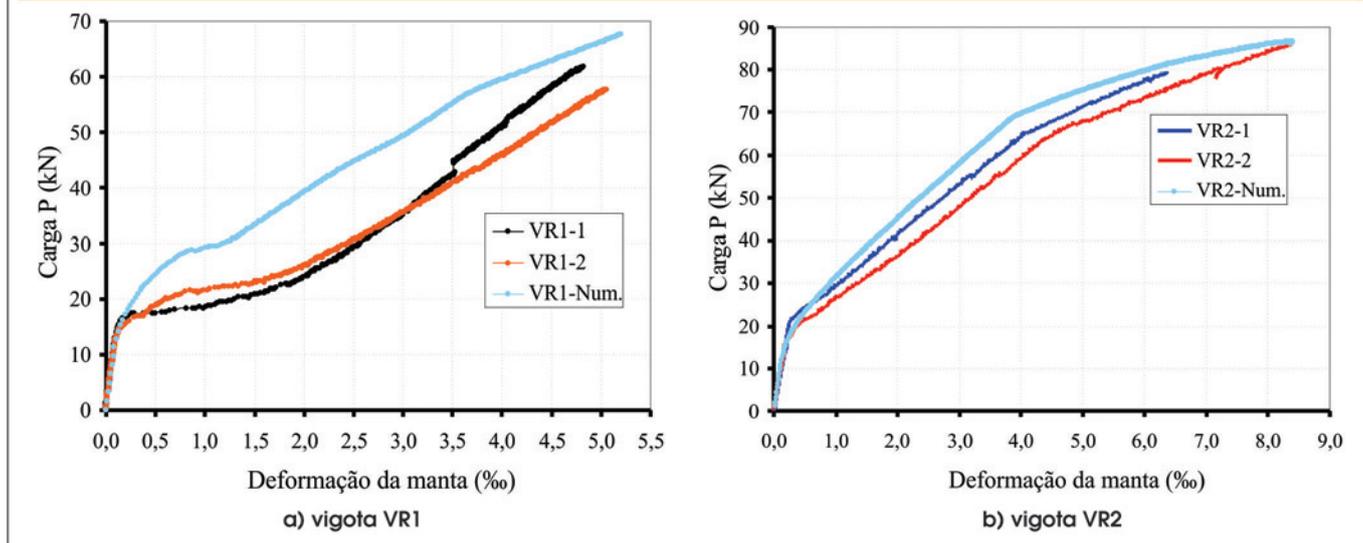
O fato da análise não-linear conduzida com o programa computacional Diana não levar em consideração o efeito da perda de rigidez devido ao processo de desprendimento do reforço, assim como a idealização de aderência perfeita entre as barras de aço e o concreto, explicam a superação dos valores de cargas experimentais pelos numéricos e também a maior rigidez da curva numérica.

A curva numérica das vigotas do grupo C mostrou-se também mais rígida do que as curvas experimentais. A carga de ruptura obtida via MEF é 4,6% superior à carga média obtida experimentalmente. A flecha última da curva numérica foi igual a 4,08 mm, enquanto que, as experimentais foram de 3,93 mm e 4,50 mm.

No entanto, pode-se afirmar que apesar da relativa homogeneidade do modelo numérico quando comparado com a heterogeneidade das vigotas analisadas no laboratório e, das simplificações consideradas no modelo (principalmente, a resistência à tração direta do compósito cimentício e o uso do G_f para definição do seu comportamento pós-pico) os resultados numéricos conseguiram representar bem o comportamento experimental das vigotas do grupo C.

A Figura 17 compara a evolução das deformações numéricas e experimentais do reforço no meio do vão livre das vigotas. Observa-se que as deformações no reforço obtidas via MEF e as experimentais são semelhantes, principalmente nas vigotas do grupo C. Nesse caso, a máxima deformação obtida numérica-

Figura 17 – Deformações numéricas e experimentais do reforço no meio do vão



mente foi de 8,40%, enquanto que as experimentais foram de 6,96% e de 8,38%.

Nas vigotas do grupo B, as máximas deformações experimentais do reforço foram de 4,82% e de 5,05%. Já a máxima deformação numérica do reforço foi de 5,19%, ou seja, apenas 5,1% superior à média experimental.

Após a fissuração do concreto e considerando-se um mesmo valor de carga, as deformações do reforço via MEF mostraram-se bem inferiores às experimentais. A fissuração do concreto provoca concentração de tensões no reforço (como já visto). Porém, esse efeito não foi reproduzido no modelo numérico. Interessante é notar que nas vigotas do grupo C, como as fibras de aço evitam a concentração de tensões no reforço, a curva numérica melhor aproximou-se das experimentais (como também já visto).

6. Conclusões

Em resumo, a partir de um estudo experimental e de uma simulação numérica por elementos finitos, as principais conclusões são:

- A utilização de um compósito cimentício de argamassa contendo fibras curtas de aço alterou o modo de ruína das vigotas reforçadas a esforços de flexão;
- O modo de ruína frágil, sem aviso, por desprendimento do reforço devido ao surgimento de uma fissura no meio do vão de cisalhamento foi evitado, quando da utilização do compósito cimentício;
- A presença de fibras curtas de aço melhorou consideravelmente o comportamento pós-fissuração da vigota reforçada, sendo que, a ruptura frágil foi alterada para uma ruptura mais dúctil com perda gradual de resistência da peça;
- Uma maior deformação no reforço das vigotas moldadas com o compósito cimentício foi alcançada;
- O mecanismo de ação das fibras curtas de aço mostrou ser possível evitar a concentração de tensões no reforço, alterar a configuração de fissuras ao longo da extensão do reforço

e até tornar mais dúctil a sua ruptura, que até então era considerada prematura e frágil;

- A simulação numérica, utilizando-se o programa computacional Diana, reproduziu satisfatoriamente os resultados experimentais. Foram obtidos valores de flechas, deformações e tensões, tanto na fase linear quanto na não-linear, bem próximos dos experimentais;
- De uma maneira geral, as curvas numéricas das vigotas reforçadas mostraram-se mais rígidas do que as experimentais. O fato está relacionado à não consideração da redução da rigidez da vigota em virtude do desprendimento do reforço;
- A utilização da energia de fratura do compósito cimentício como parâmetro para caracterizar o seu comportamento pós-fissuração, mostrou ser possível representar satisfatoriamente os valores de forças e deformações experimentais.

6. Agradecimentos

À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pela concessão da bolsa durante o trabalho de doutorado do autor e à Maccaferri – América Latina pela doação das fibras de aço.

7. Referências bibliográficas

- [01] FERRARI, V.J. Reforço à flexão de vigas de concreto armado com manta de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) aderido a substrato de transição constituído por compósito cimentício de alto desempenho, São Carlos, 2007, Tese (doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 322 p.
- [02] BUYUKOZTURK, O.; KARACA, E. (2004). Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members

- strengthened using FRP composites. *Construction and Building Materials*, 24, p. 9-19.
- [03] WU, Z.S.;YIN, J. (2003). Structural performances of short steel-fiber reinforced concrete beams with externally bonded FRP sheets. *Construction and Building Materials*, 17, p.463-470.
- [04] CARRAZEDO, R. (2005). Mecanismos de confinamento em pilares de concreto encamisados com polímeros reforçados com fibras submetidos à flexo-compressão. 267p. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2005.
- [05] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos – NBR 5739. Rio de Janeiro, 1994.
- [06] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos – NBR 7222. Rio de Janeiro, 1994.
- [07] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Materiais metálicos – Determinação das propriedades mecânicas à tração – NBR ISO 6892. Rio de Janeiro, 2002.
- [08] RILEM TC 162-TDF. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete, *Materials and Structures*, v.35, p. 579-582, 2002.
- [09] RILEM (1985). Draft Recommendation, 50-FMC Committee Fractures Mechanics of Concrete. Determination of fracture energy of mortar and concrete by means of three-poin bend tests on notched beams. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, v.18, n.106, p. 285-290.
- [10] FEDERATION INTERNATIONALE DE BETON – FIB (1999). Structural concrete textbook on behavior design and performance. Updated knowledge of the CEB/FIP Model Code 1990, v.1. International Federation for Structural Concrete (FIB), Switzerland.
- [11] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318M: Building code requirements for reinforced concrete. Detroit.