

Reforço à flexão de vigas de concreto armado com Tecido de Polímero Reforçado com Fibras de Carbono (PRFC) aderido a substrato de transição constituído por compósito cimentício de alto desempenho

Flexural strengthening of reinforced concrete beams with carbon fibers reinforced polymer (CFRP) sheet bonded to a transition layer of high performance cement-based composite



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

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

Abstract

Resistance to corrosion, high tensile strength, low weight, easiness and rapidity of application, are characteristics that have contributed to the spread of the strengthening technique characterized by bonding of carbon fibers reinforced polymer (CFRP). This research aimed to develop an innovate strengthening method for RC beams, based on a high performance cement-based composite of steel fibers (macro + microfibras) to be applied as a transition layer. The purpose of this transition layer is better control the cracking of concrete and detain or even avoid premature debonding of strengthening. A preliminary study in short beams molded with steel fibers and strengthened with CFRP sheet, was carried out where was verified that the conception of the transition layer is valid. Tests were developed to get a cement-based composite with adequate characteristics to constitute the layer transition. Results showed the possibility to develop a high performance material with a pseudo strain-hardening behavior, high strength and fracture toughness. The application of the strengthening on the transition layer surface had significantly to improve the performance levels of the strengthened beam. In summary, it was proven the efficiency of the new strengthening technique, and much information can be used as criteria of projects for repaired and strengthened structures.

Keywords: strengthening of beams; carbon fibers; steel fibers concrete; fracture mechanic; rehabilitation of structures.

Resumo

Resistência à corrosão, elevada resistência à tração, baixo peso, facilidade e rapidez de aplicação, são algumas das características interessantes que têm contribuído para a disseminação da técnica de reforço caracterizada pela colagem de polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC) em elementos estruturais de concreto. Nesta pesquisa propõe-se uma inovação construtiva fundamentada no desenvolvimento de um compósito de alto desempenho à base de cimento Portland e fibras de aço (macro + microfibras), destinado a constituir o que está sendo preliminarmente chamado de "substrato de transição". A finalidade desse substrato é controlar melhor a fissuração do concreto da viga e retardar ou até evitar o desprendimento prematuro do reforço polimérico. Foram realizados ensaios específicos visando à obtenção de um compósito cimentício com características apropriadas para constituir o substrato de transição. Os resultados e as análises efetuadas mostram que foi possível desenvolver um material de elevado desempenho, traduzido por um comportamento de pseudo-encruamento, com elevados ganhos de resistência e tenacidade ao fraturamento. A aplicação do reforço com manta sobre a superfície do substrato de transição, formado a partir da reconstituição do banzo tracionado da viga com o compósito cimentício que foi desenvolvido, mostrou melhorar significativamente os níveis de desempenho da peça reforçada. Comprovou-se a eficiência da técnica de reforço proposta, além de reunir uma série de informações que podem ser exploradas para se tornarem úteis como critérios de projeto de estruturas recuperadas e reforçadas.

Palavras-chave: reforço de vigas; fibras de carbono; concreto com fibras de aço; Mecânica da Fratura; reabilitação de estruturas.

^a Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Civil, vladimirjf@hotmail.com, Avenida Colombo, 5790, Maringá-PR, Brasil;

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

1. Introdução

Nos últimos anos, aspectos relacionados à durabilidade, manutenção, recuperação e reforço de estruturas tem-se destacado com mais importância no cenário nacional. Construções que se apresentam com vida útil aquém do desejável, o envelhecimento de grandes estruturas que já operam no limite de sua estabilidade e segurança (algumas de nossas pontes e viadutos, por exemplo), a ausência de inspeções periódicas e manutenções preventivas são alguns dos fatores que concorrem para a relevância dos conceitos relacionados ao reforço e à recuperação estrutural.

Uma estrutura recuperada e/ou reforçada deve apresentar desempenho superior ao que ela apresentava antes da realização da intervenção. Nesse sentido, o desenvolvimento de novas tecnologias e técnicas que sejam mais seguras e eficientes, desperta a atenção de pesquisadores em vários centros.

Como técnica de reforço de estruturas de concreto armado, a aplicação de PRFC, desperta interesse e ganha aceitação pelas diversas vantagens que oferece, notadamente aquelas relacionadas à elevada relação resistência/peso, imunidade à corrosão, facilidade e rapidez de aplicação. No Brasil, grandes estruturas já foram reforçadas com PRFC. No entanto, o conhecimento já existente pode ser melhor concebido com vistas à potencialização dessa tecnologia.

Assim este trabalho tem como objetivo geral propor, como uma inovação construtiva, o desenvolvimento de uma técnica de reforço à flexão de vigas de concreto armado, a qual compreende um processo de prévia recuperação da estrutura, pela elaboração e aplicação de um compósito de alto desempenho à base de cimento Portland e fibras curtas de aço, destinado a constituir o que está sendo chamado de “substrato de transição”. Com esse substrato, como mostrado na Figura [1], espera-se reconstituir o banzo tracionado de vigas de concreto armado de maneira a melhor explorar as propriedades resistentes do reforço com mantas de PRFC e, possivelmente, melhorar o desempenho da viga como um todo. É sabido (Bian & Maalej [1], Ferrari [2], Leung [3], entre outros) que o reforço de vigas de concreto armado com manta de PRFC é susceptível ao surgimento de uma ruína frágil, prematura e ex-

tremamente indesejável, pois impossibilita o total aproveitamento das propriedades resistentes à tração do polímero. É importante salientar que a aplicação dos sistemas de PRFC protendidos constitui-se numa possibilidade para obter o melhor aproveitamento da sua capacidade resistente.

Tal modo de ruína antecipa o colapso da viga reforçada por falha nos mecanismos de transferência de esforços. Um desses mecanismos refere-se ao destacamento localizado do reforço (efeito designado na literatura por *peeling off*), a partir de sua zona de ancoragem ou de zonas com excessiva concentração de fissuras de flexão e/ou cisalhamento. Incrementos mais significativos de resistência somente podem ser alcançados se os modos de ruína prematuros forem evitados (FIB, [4]).

Assim, com o proposto e apresentado neste trabalho, imagina-se retirar uma parte do banzo tracionado das vigas a serem reforçadas (frequentemente danificado por ações mecânicas, corrosão, desgaste natural), como ilustra a Figura [2], para reconstituí-lo com o compósito cimentício de alto desempenho. Para tanto, supõe-se que a parte reconstituída do banzo venha a formar um substrato de transição, cujas características seriam mais apropriadas para aplicação do reforço à flexão com manta de PRFC.

2. Compósito cimentício de alto desempenho (CCAD)

Neste item do trabalho, são apresentados a metodologia experimental e os resultados obtidos no desenvolvimento de um compósito cimentício com características mais apropriadas para reconstituir o banzo tracionado de vigas de concreto armado, que sirva de substrato para colagem do PRFC. Espera-se com esse compósito, constituir o chamado “substrato de transição” para melhor controlar a fissuração do concreto e retardar o desprendimento prematuro do reforço polimérico.

Segundo Ferrari [5], as modificações decorrentes da adição de fibras de aço ao concreto, em taxa relativamente baixas (no máximo 2%), restringem-se apenas à fase de pós-pico do histórico de carregamento. Segundo Ferreira [6], nessas condições, as fibras de aço não são suficientes para inibir o processo de fissuração da matriz que antecede a carga máxima (crescimento subcrítico da fissura).

Figura 1 – Esquema de reforço com manta de PRFC e substrato de transição

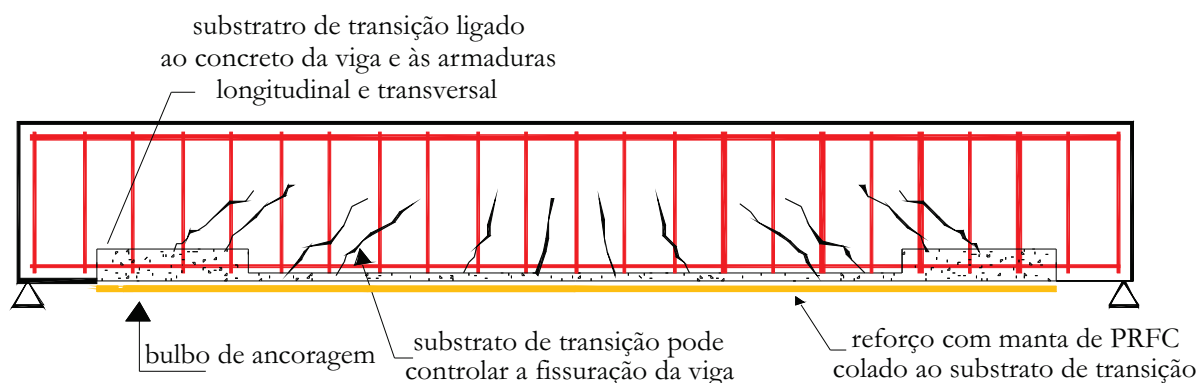


Figura 2 - Vigas de concreto armado com banzo tracionado danificado por corrosão (Ferrari (5))



Assim, com o objetivo de melhorar o comportamento do compósito cimentício na fase pré-pico de resistência, estuda-se neste item o efeito da incorporação de microfibras de aço às fibras de aço convencionais, numa tentativa de modificar o compósito em sua microestrutura e conseqüentemente melhorar o processo de transferência de tensões da matriz para as fibras.

2.1 Configuração do ensaio

Para avaliar o comportamento à tração na flexão dos CCAD foram realizados ensaios de flexão em três pontos em corpos-de-prova prismáticos dotados de entalhe central reto passante conforme as recomendações da RILEM TC 162-TDF [7]. Na Figura [3] é possível observar o aspecto geral da configuração do ensaio. Os ensaios foram conduzidos sob o controle dos deslocamentos de abertura da entrada do entalhe (CMOD – *crack mouth opening displacement*), utilizando-se para tanto um extensômetro elétrico do tipo *clip gauge*.

2.2 Compósitos analisados

Foram analisados treze distintos compósitos formados a partir da variação do volume e do tipo de fibras de aço. Eles foram divididos em grupos formados por três prismas (150 mm x 150 mm x 500 mm) moldados com as mesmas características.

Na Tabela [1] apresentam-se os diferentes compósitos analisados com informações sobre a composição do traço utilizado, consumo de cimento, volume de fibras de aço e do módulo de elasticidade (E_{cs}). Esses foram divididos em duas etapas conforme o tipo de matriz cimentícia utilizada, argamassa e microconcreto. A fibra de aço aqui especificada simplesmente por “A”, tem nome comercial *FS8-Wirand*, foi fornecida pela empresa *Maccaferri – América Latina*, possui um comprimento de 25mm com ganchos nas extremidades e um diâmetro de 0,75mm. Já a fibra “C”, que foi fornecida pelo mesmo fabricante, tem um comprimento de apenas 13mm, ganchos nas extremidades e um diâmetro de 0,75mm.

2.3 Resultados dos ensaios de flexão em três pontos

2.3.1 Forças e resistências

A determinação da tenacidade flexional dos compósitos foi feita seguindo-se as recomendações prescritas pelo grupo de trabalho TC 162-TDF da RILEM. Na Tabela [2] apresentam-se os valores de forças e resistência calculados com base nessas recomendações. Para os compósitos de argamassa a adição de fibras sempre aumentou o valor da resistência ($f_{fct,L}$) assim, pode-se dizer que para esses compósitos a contribuição da matriz em termos de resistência foi incrementada com a incorporação de fibras de aço. Os compósitos híbridos com adição de microfibras de aço do tipo C às fibras do tipo A, foram os que apresentaram maiores valores de resistência ($f_{fct,L}$) entre todos os CCAD de argamassa analisados. Para os CCAD de microconcreto o valor da resistência ($f_{fct,L}$) do compósito CPM1A diminuiu em relação ao compósito CPM. Isso mostra que a presença isolada da fibra A não melhorou a contribuição da matriz de microconcreto em termos dessa resistência. Entretanto, com a incorporação das microfibras de aço às fibras do tipo A,

Figura 3 - Configuração geral do ensaio de flexão em três pontos

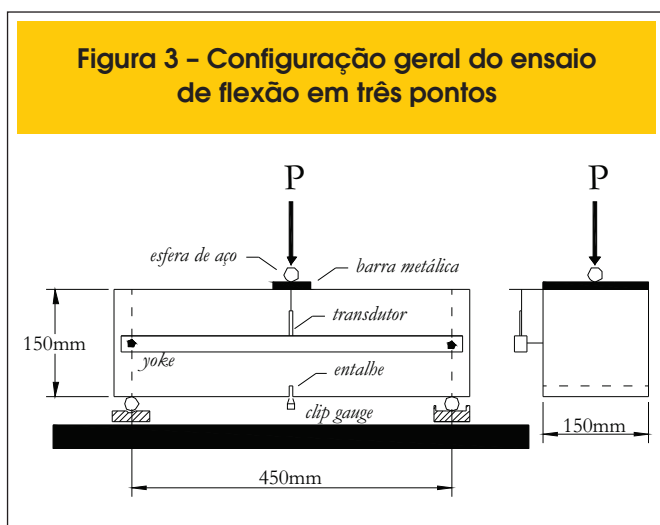


Tabela 1 - Compósitos analisados

Matriz cimentícia	Grupo	Compósitos	Taxa de fibra	Tipo fibra	Idade (dias)	E_{cs} (MPa)
Argamassa (A)	1	CPA	0%	-	29	23.839
	2	CPA1A	1%	A	29	22.696
	3	CPA1.5A	1.5%	A	29	23.100
	4	CPA2A	2%	A	29	23.974
	5	CPA1.5A0.5C	1.5%+0.5%	A+C	28	28.217
	6	CPA1.5A1.5C	1.5%+1.5%	A+C	28	32.261
	7	CPA1.5A2.5C	1.5%+2.5%	A+C	28	31.041
	8	CPA1.5A3.5C	1.5%+3.5%	A+C	28	29.137
Microconcreto (M)	9	CPM	0%	-	28	35.160
	10	CPM1A	1%	A	28	30.551
	11	CPM1A1C	1%+1%	A+C	28	26.281
	12	CPM1A2C	1%+2%	A+C	28	29.974
	13	CPM1A2.5C	1%+2.5%	A+C	28	19.900

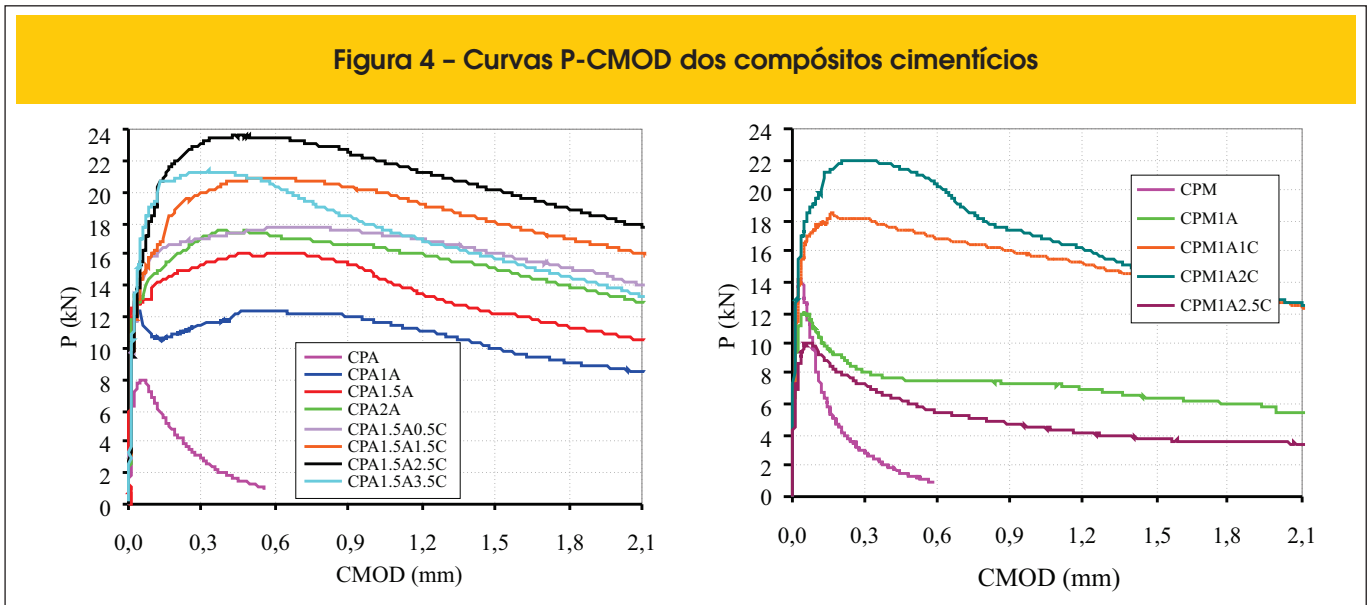
a) Traço em massa dos compósitos de argamassa: cimento CP-V ARI PLUS; areia:água/cimento - 1:3,0:0,5. Consumo de Aditivo Superplastificante Glêniun 51 igual a 0,4%, dosado em relação ao peso de cimento;
 b) Traço em massa dos compósitos de microconcreto: cimento CP-V ARI PLUS; areia:brita 0:água/cimento - 1:2,13:1,83:0,48. Consumo de Aditivo Superplastificante Glêniun 51 igual a 0,5%, dosado em relação ao peso de cimento;
 c) Consumo de cimento dos compósitos de argamassa: 512kg/m³;
 d) Consumo de cimento dos compósitos de microconcreto: 446kg/m³.

Tabela 2 - Forças e resistências conforme RILEM (4)

Compósito	Forças (kN)					Resistências (MPa)			
	F_L	F_M	$F_{R,1}$	$F_{R,4}$	$f_{ct,L}$	$f_{eq,2}$	$f_{eq,3}$	$f_{R,1}$	$f_{R,4}$
CPA	8,00	8,00	1,26	-	2,33	-	-	0,37	-
CPA1A	13,41	13,41	12,46	5,22	3,87	3,31	2,58	3,60	1,51
CPA1.5 ^a	13,15	16,10	16,01	6,10	3,73	4,58	3,16	4,54	1,73
CPA2A	14,50	17,59	17,35	7,59	4,56	5,53	4,20	5,45	2,38
CPA1.5A0.5C	16,41	17,78	17,23	9,32	4,58	4,94	3,98	4,79	2,61
CPA1.5A1.5C	16,01	20,95	20,91	9,42	4,79	6,46	4,80	6,25	2,81
CPA1.5A2.5C	22,12	23,68	23,49	12,79	6,13	6,49	4,97	6,51	3,55
CPA1.5A3.5C	20,03	21,42	20,79	6,08	5,52	5,66	3,75	5,73	1,68
CPM	14,19	14,19	1,25	-	4,04	-	-	0,36	-
CPM1A	12,05	12,05	7,53	3,69	3,32	1,97	1,58	2,07	1,02
CPM1A1C	17,63	18,53	16,92	7,47	5,17	5,06	3,73	4,96	2,19
CPM1A2C	19,37	21,94	19,73	8,04	5,54	5,73	4,13	5,65	2,30
CPM1A2.5C	10,03	10,03	6,34	2,26	2,95	1,54	1,07	1,86	0,66

F_L - força máxima de offset dentro do intervalo de deslocamento vertical (δ) igual a 0,05mm;
 F_M - força máxima do compósito;
 $F_{R,1}$ e $F_{R,4}$ - forças residuais correspondentes aos deslocamentos $\delta_{R1} = 0,46$ mm e $\delta_{R4} = 3,00$ mm;
 $f_{ct,L}$ - tensão correspondente à F_L ;
 $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ - resistências flexionais equivalentes;
 $f_{R,1}$ e $f_{R,4}$ - resistências residuais.

Figura 4 - Curvas P-CMOD dos compósitos cimentícios



verificou-se aumento no valor da resistência $f_{ct,L}$. Essa tendência foi verificada nos compósitos CPM1A1C e CPM1A2C, nos quais, a resistência foi respectivamente, de 28% e 37% maior do que a do CPM. Os valores das resistências $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$, caracterizam o comportamento dos compósitos em relação ao desempenho das fibras. Logo, destaca-se entre os CCAD de argamassa, o desempenho dos compósitos CPA1.5A, CPA2A, CPA1.5A0.5C, CPA1.5A1.5C e CPA1.5A2.5C e, entre os CCAD de microconcreto, somente o compósito CPM1A2C. Nesses compósitos, a ação das fibras de aço elevou o nível de resistência do material de forma que a resistência flexional equivalente ($f_{eq,2}$) superou o valor de resistência dado pela contribuição apenas da matriz ($f_{ct,L}$).

2.3.2 Curvas P-CMOD

Para representar o comportamento de cada compósito, selecionou-se dentre as três curvas obtidas por grupo, a curva “média”, que é aquela de comportamento intermediário que possa ser representativa das outras duas curvas do grupo.

Nos compósitos CPA1.5A2.5C, CPA1.5A3.5C e CPM1A1C, por conta do desempenho distinto entre as três curvas de cada grupo, selecionou-se ao invés da curva “média”, a curva de “maior potencial” para representação desses compósitos. A curva “potencial” é aquela que representa o comportamento do exemplar do grupo que demonstrou maior ductilidade e resistência.

Na Figura [4] reúnem-se as curvas “médias” P-CMOD dos CCAD de argamassa e de microconcreto, respectivamente. O comportamento desigual entre as curvas acentuou-se mais notavelmente após a ruptura da matriz, ou seja, quando a contribuição das fibras passar a ser mais efetiva. O aumento no volume de fibras A, proporcionou melhora gradual na ductilidade desses compósitos. Sobremaneira, a incorporação das microfibras C às fibras A contribuiu ainda mais nesse sentido.

2.3.3 Curvas de Resistência ao Fraturamento

As curvas de resistência obtidas para os compósitos de argamassa CPA1.5A1.5C e CPA1.5A2.5C são comparadas com a do

microconcreto CPM1A2C na Figura [5], onde K_R é a resistência ao fraturamento e α é a profundidade da fissura (a) normalizada relativamente à altura (W) do corpo-de-prova prismático, ou seja, $\alpha = a/W$. Na figura são representadas também as curvas de resistência da matriz de argamassa e de microconcreto sem fibras juntamente com os históricos de carregamento ao longo do processo de ruptura.

Como mostra a figura [5], a partir do ponto em que se inicia o processo de crescimento de fissuras na matriz dos compósitos CPA1.5A1.5C, CPA1.5A2.5C e CPM1A2C, observa-se um aumento eminente da resistência ao fraturamento desses materiais. Por exemplo, analisando-se a ponta da fissura a 70% da altura da seção, infere-se que a resistência ao fraturamento alcança valores até quatro vezes superiores àqueles verificados à 1/3 da altura da seção.

Figura 5 - Esquematização do desempenho dos compósitos

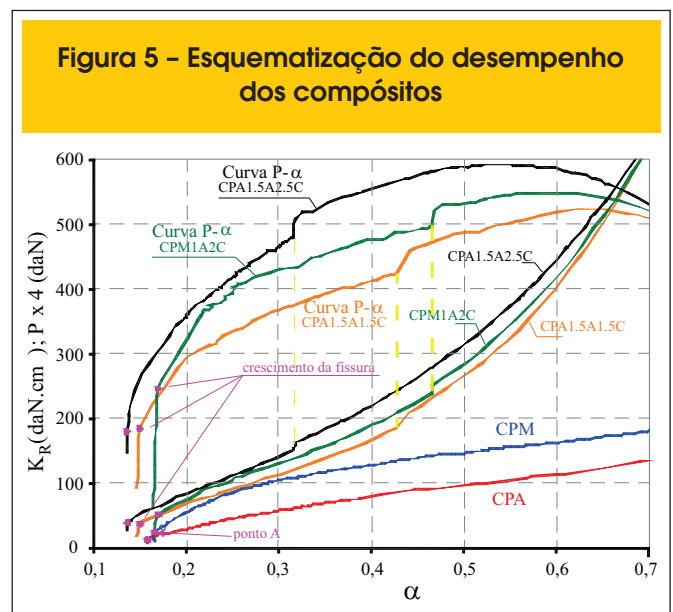


Tabela 3 - Características das vigas

Vigas	Característica
V1A	Viga de concreto armado de referência, sem reforço
V1C	Viga de concreto armado reforçada à flexão com três camadas de manta de fibra de carbono
V2C	Viga em que o banzo tracionado de concreto foi demolido e reconstituído integralmente com o compósito cimentício desenvolvido no item 2. A viga foi reforçada à flexão com três camadas de manta de fibra de carbono

O extraordinário ganho de resistência desses três compósitos foram aproximadamente iguais, com ligeira superioridade para o compósito de argamassa CPA1.5A2.5C, seguido pelo de micro-concreto CPM1A2C e pelo CPA1.5A1.5C. É importante destacar que a evolução do ganho de resistência ao fraturamento ocorreu para cada compósito segundo dois estágios bem definidos: o estágio inicial da fissuração (antes da linha tracejada em amarelo), onde se verificou um aumento de tenacidade ao fraturamento um pouco mais suave, e o estágio final do processo de fissuração (após a linha tracejada em amarelo), onde a resistência ao fraturamento aumentou de maneira mais acentuada.

É no estágio inicial onde se inicia o processo de tracionamento das fibras e microfibras de aço e a transmissão de tensões entre as faces da fissura por meio dessas fibras. Nesse estágio, em que ocorre a formação das faces das fissuras, nota-se que uma característica é o fato da fissura mais evoluir do que o material ganhar resistência ao fraturamento. No estágio final do processo de fissuração é onde se verifica um aumento considerável da resistência ao fraturamento do compósito por conta do arrancamento das fibras, que se encontram ancoradas à matriz cimentícia. Nesse estágio, a eficiência das fibras em relação à

contribuição para o acréscimo de tenacidade ao fraturamento é refletida notavelmente.

3. Reconstituição e reforço do banzo tracionado das vigas de concreto armado

3.1 Características das vigas

Foram confeccionadas três vigas de concreto armado de seção retangular de 170 mm x 350 mm, comprimento total de 3.600mm e vão livre de 3.200 mm. A armadura longitudinal inferior das vigas foi composta por duas barras de aço CA50, com 12,5 mm de diâmetro. A armadura superior foi composta por duas barras de aço CA50, com 6,3 mm de diâmetro. A armadura transversal foi formada por estribos com barras de aço CA50 de 6,3 mm de diâmetro, espaçados uniformemente a cada 120 mm. As características de cada viga estão descritas na Tabela [3].

A viga sem reforço V1A é a de referência para as demais que foram reforçadas. A partir dessa foram estabelecidas considerações com relação ao incremento de resistência e rigidez proporcionadas pelo reforço. A viga V1A foi dimensionada com reduzida taxa

Figura 6 - Configuração da viga V2C

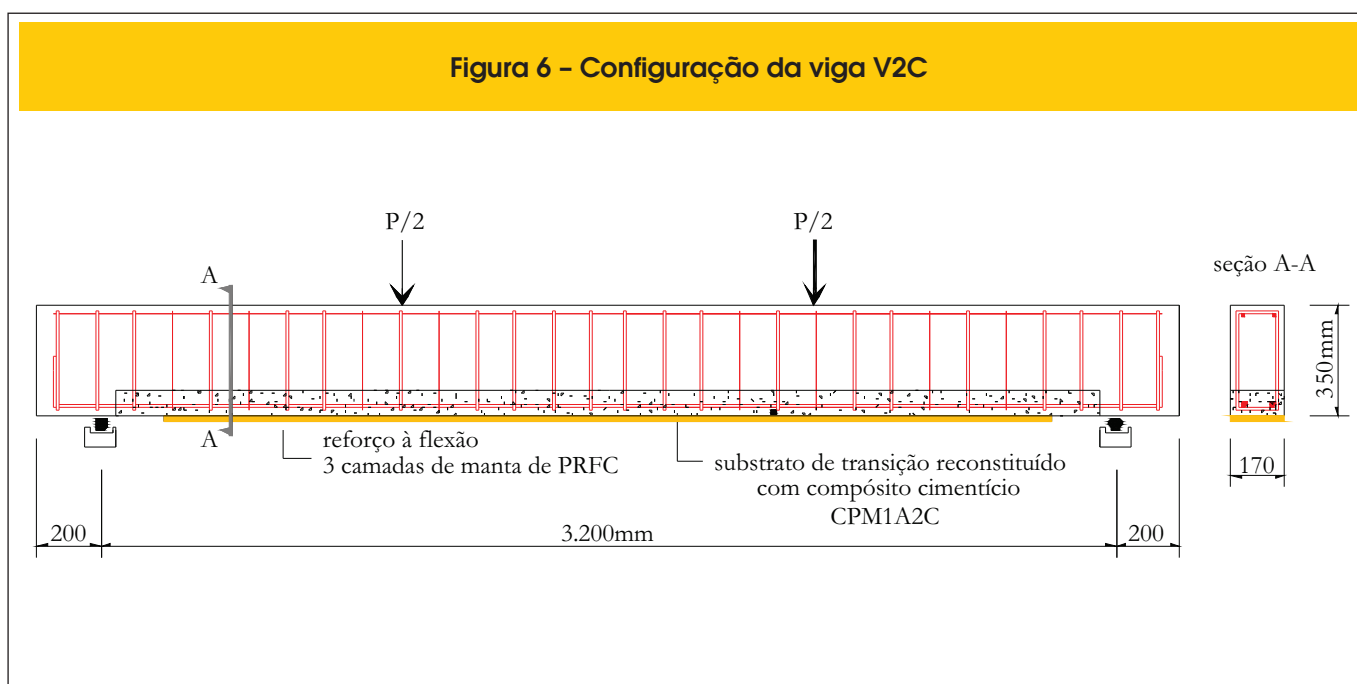


Figura 7 - Remoção do concreto do banzo tracionado da viga V2C



de armadura longitudinal de modo que o seu estado limite último fosse caracterizado pela deformação excessiva da armadura sem ruptura no concreto comprimido.

A viga V1C foi reforçada à flexão por meio da aplicação de três camadas de manta de fibras de carbono. O reforço foi projetado para que fosse possível detectar o seu desprendimento prematuro. A viga V2C foi projetada para que o seu desempenho fosse comparado diretamente ao da viga de concreto armado reforçada. Tal comparação visa detectar contribuições do substrato de transição frente ao desprendimento e sobre o desempenho do reforço. Para tanto, o banzo tracionado da viga V2C foi demolido e em seguida reconstituído aplicando-se compósito cimentício de alto desempenho CPM1A2C (ver Figura [6]). O compósito CPM1A2C foi o escolhido para ser o utilizado na reconstituição do banzo tracionado da viga V2C por apresentar desempenho satisfatório em termos

de resistência flexional e resistência ao faturamento. Informações adicionais sobre o desenvolvimento dos compósitos pode ser obtida em Ferrari [6] e Ferrari & Hanai [9].

3.2 Reconstituição do banzo tracionado e aplicação do reforço nas vigas

Os procedimentos para a retirada do concreto, reconstituição e reforço do banzo tracionado da viga V2C foram iniciados quando o concreto tinha a idade de 23 dias. A remoção do concreto foi feita mecanicamente com martelete elétrico rompedor e, complementada com marreta, ponteiro e talhadeira (Figura [7]). Para remoldagem do banzo tracionado com o compósito CPM1A2C, duas fôrmas de madeira em compensado plastificado foram posicionadas nas duas laterais da viga. O compósito foi lançado manualmente no interior das fôrmas.

Figura 8 - Aspecto do substrato tracionado após a remoldagem e após a colagem do reforço externo



Tabela 4 – Propriedades do sistema de reforço com manta de fibras de carbono

	Nome comercial	Sikadur 330
Adesivo epóxi	Cor	Parte A – branca / Parte B - cinza
	Resistência à tração	30MPa (7 dias)
	Deformação na tração	9‰
	Módulo na flexão	3,800 MPa
	Módulo na tração	4,500 MPa
	Relação da mistura	4:1 – A:B (em peso)
	Consumo	1.0 a 1.5kg/m ² (1ª cam.)
Manta de fibras de carbono (propriedades mecânicas sem o epóxi)	Nome comercial	SikaWrap – 300C
	Gramatura	300g/m ² ± 15g/m ²
	Espessura da manta	0.166mm (efetiva dos fios)
	Densidade da fibra	1.79g/cm ³
	Resistência à tração	3,900 MPa
	Módulo de elasticidade	230 GPa
	Deformação na ruptura	15‰

Propriedades mecânicas das fibras de carbono obtidas a partir do ensaio de tração do compósito: Resistência à tração: 3.129MPa; deformação última: 13,13‰; módulo de elasticidade: 234GPa.

A metodologia geral e os cuidados essenciais utilizados para a aplicação do reforço com mantas de fibras de carbono nas

vigas V1C e V2C estão detalhados em Ferrari [5]. O adesivo epóxi utilizado foi o *Sikadur 330* e a manta foi a *SikaWrap 300C*, ambos, fornecidos pela Sika, sendo as propriedades físicas e mecânicas indicadas na Tabela [4]. Na Figura [8] mostra-se o aspecto do substrato após a sua reconstituição e após a colagem do reforço.

Figura 9 – Esquema geral do ensaio de flexão das vigas



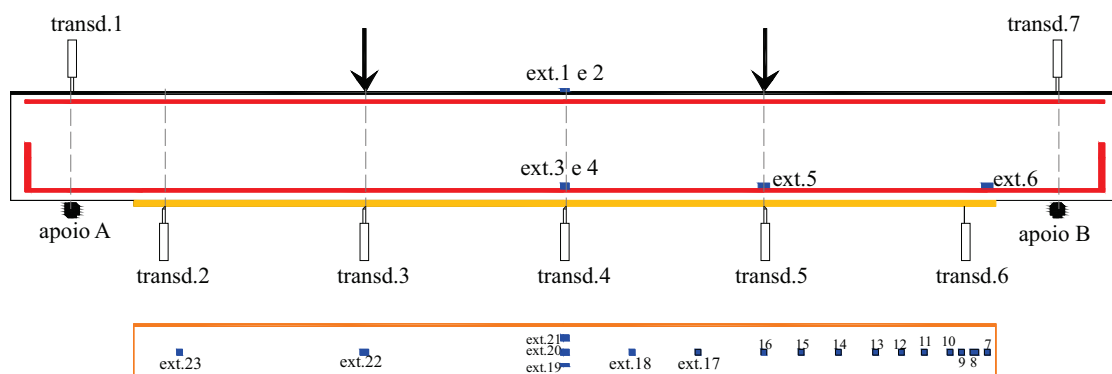
3.3 Configuração do ensaio e instrumentação

As vigas de concreto armado foram solicitadas à flexão simples em quatro pontos, por meio de ensaio monotônico (cargamento crescente até a ruína). O comportamento estrutural das vigas foi observado e monitorado durante todo o ensaio, registrando-se a força aplicada, os correspondentes deslocamentos verticais e as deformações do concreto, aço e reforço.

O esquema de ensaio para cada viga foi montado na estrutura de reação do Laboratório de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, como ilustrado por meio da Figura [9]. A força necessária para solicitar cada viga à flexão foi introduzida por meio de um atuador servo-hidráulico da marca Instron com capacidade nominal de 500 kN, capaz de controlar a intensidade e a velocidade de aplicação das forças e deslocamentos.

Os ensaios foram conduzidos sob controle de deslocamento do pistão do atuador com a imposição de uma taxa de 0,007 mm/s. O atuador permaneceu preso a uma viga metálica de grande rigidez, parte de um pórtico de reação no centro da viga. Para o monitoramento das deformações específicas da armadura e do reforço foram utilizados extensômetros elétricos de resistência da marca *Vishay Micro-Measurements* com resistência de 120.0 OHMS e 12 mm de comprimento. A nomenclatura e o esquema de posicionamento da instrumentação das vigas estão indicados na Figura [10].

Figura 10 - Nomenclatura e posicionamento dos extensômetros e LVDT's



Posicionamento dos extensômetros:

Extensômetros no concreto e armadura

referência	número do extensômetro					
apoio A	1	2	3	4	5	6
0,0 cm	160	160	160	160	225	297

transd. = transdutor
ext. = extensômetro elétrico

Extensômetros no reforço

referência	número do extensômetro																
apoio A	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
0,0 cm	297	293	289	285	277	269	261	249	237	225	203,4	181,8	160	160	160	95	35

4. Apresentação e análise dos resultados das vigas

4.1. Modos de ruína

Como se esperava, o modo de ruína da viga V1A foi de deformação excessiva da armadura longitudinal, seguida por deformações elevadas no concreto comprimido, configuração compatível com o domínio 2 de deformações para a qual a viga foi dimensionada.

Figura 11 - Modo de ruína das vigas V1C e V2C



Tabela 5 - Cargas e modos de ruína das vigas

Vigas	P_f (kN)	P_y (kN)	P_u (kN)	Modo de ruína	Incrementos (%)		
					P_f	P_y	P_u
V1A	21,01	79,80	89,27	Deformação excessiva da armadura	-	-	-
V1C	25,16	118,45	147,37	Desprendimento do reforço	19,8	48,4	65,1
V2C	34,92	133,37	196,35	Destacamento na interface compósito cimentício-reforço	66,2	67,1	120,0

A ruína da viga V1C (Figura [11-a]) deu-se a partir do surgimento de uma fissura na extremidade do reforço ($P=117$ kN). Essa fissura propagou-se na direção horizontal e culminou com o desprendimento do reforço juntamente com toda a camada de concreto do cobrimento da armadura ao longo do vão de cisalhamento (*peeling-off*).

O modo de ruína da viga V2C (Figura [11-b]) foi diferente do observado na viga V1C. Embora tenha surgido uma fissura na extremidade do reforço quando a força aplicada era de 141 kN, ela não se propagou na horizontal e o processo de desprendimento do reforço por ruptura da camada de concreto junto à armadura foi evitado.

Na viga V2C a ruína teve origem numa seção localizada no vão de cisalhamento e próximo da aplicação da força concentrada. O surgimento de uma fissura de flexão/cisalhamento e a evolução de sua abertura com o acréscimo do carregamento, provocaram o destacamento do reforço através da interface do compósito ci-

mentício com o adesivo epóxi até a sua extremidade mais próxima. Uma fina camada de microconcreto permaneceu aderida à manta.

4.2 Cargas

Na Tabela [5] são reunidos os valores de carregamento de fissuração (P_f), de escoamento da armadura longitudinal (P_y) e de ruína (P_u) das vigas. A presença do reforço aumentou a carga de primeira fissura das vigas reforçadas. O acréscimo foi de 19,8% para a viga de concreto armado reforçada e de 66,2% na viga reconstituída e reforçada. Em relação à viga V1C, o carregamento de fissuração da viga V2C foi incrementada em 38,8%.

A presença do reforço também aumentou o carregamento necessário para o escoamento da armadura longitudinal. Isso ocorre porque o reforço compartilha com armadura longitudinal a resistência dos esforços de tração. Na viga V1C o aumento foi de 48,4%. Já na viga V2C o aumento chegou a 67,1%.

Com relação à carga última, destaca-se a resposta da viga V2C. Um incremento significativo de 120% foi observado em relação à viga de referência, enquanto que, a viga V1C apresentou um incremento limitado a 65,1%. Em relação à própria viga de concreto armado reforçada, a capacidade resistente da viga V2C foi 33,2% superior.

4.3 Deslocamentos verticais

Na Figura [12] são comparados por meio das curvas P-d os comportamentos das vigas V1A, V1C e V2C. Verifica-se que até o car-

Figura 12 - Curvas P- δ das vigas V1A, V1C e V2C

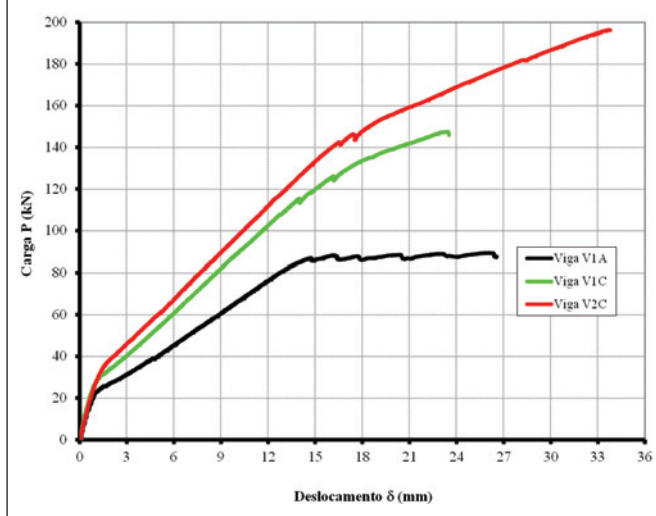


Tabela 6 - Comparativo das flechas das vigas no meio do vão

Vigas	Flecha (mm)	Comparativo
V1A	12,79	1,00
V1C	8,73	1,47
V2C	7,68	1,67

regamento de fissuração a resposta das vigas é semelhante. Após a fissuração do concreto, é nítido o aumento da rigidez nas vigas reforçadas em relação à viga sem reforço. Ressalta-se o efeito da presença do substrato de transição na resposta da viga V2C – reconstituída e reforçada. Maior rigidez e capacidade de carga foram verificadas para essa viga em relação principalmente à viga de concreto armado V1C, reforçada com a mesma área de reforço.

Na viga V1A observa-se que nenhum acréscimo de carga após o escoamento da armadura longitudinal foi obtido. Já nas vigas reforçadas vê-se claramente que ocorre acréscimo de carga após o escoamento da armadura longitudinal. Nesse sentido, a maior extensão do trecho final da curva da viga V2C indica que o reforço foi mais solicitado nessa viga do que na viga V1C.

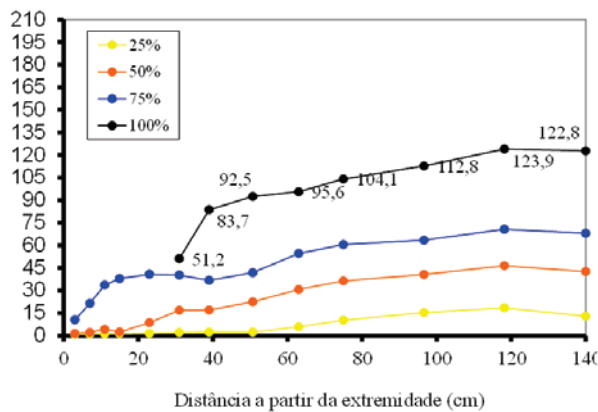
Na Tabela [6] apresenta-se uma comparação entre os deslocamen-

tos verticais das vigas no meio do vão para um carregamento igual a 90% da carga de ruína da viga V1A. Os valores mostram que as vigas reforçadas apresentaram-se mais rígidas do que a viga de referência. A flecha da viga V1A foi 47% maior do que a flecha da viga V1C. A viga V2C apresentou uma flecha ainda menos pronunciada do que a viga sem reforço. A flecha da viga V1A foi 67% superior à da viga V2C. Logo, a inovação proposta no presente trabalho, reconstituição e reforço do banzo tracionado da viga, não somente é eficaz em termos de capacidade de carga, como também em termos de rigidez.

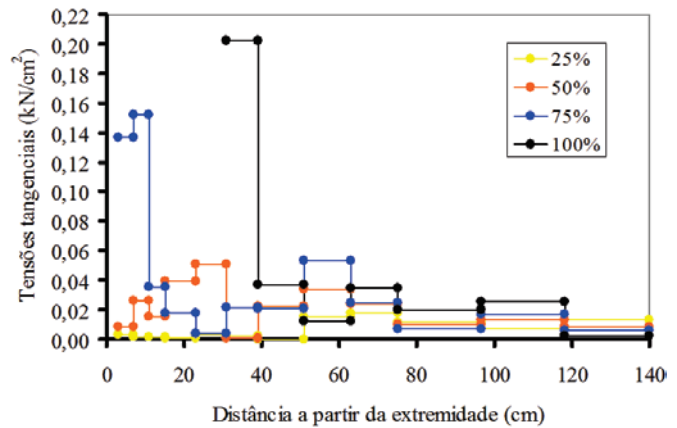
4.4 Tensões e deformações do reforço

A resposta do reforço frente à solicitação das vigas é aqui avaliada por meio da distribuição de deformações específicas ao longo de

Figura 13 – Distribuição de tensões normais e tangenciais na viga V1C

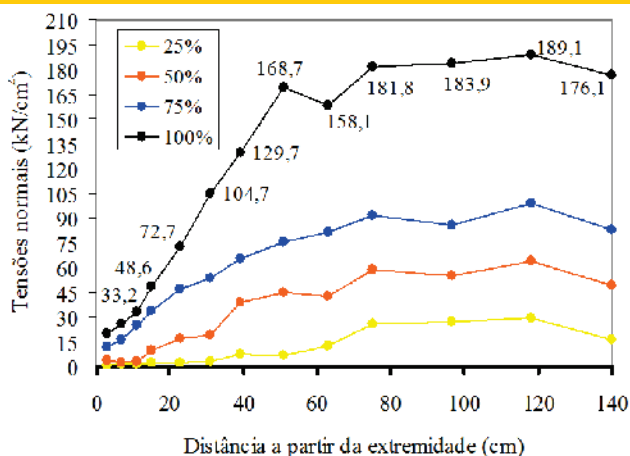


A tensões normais

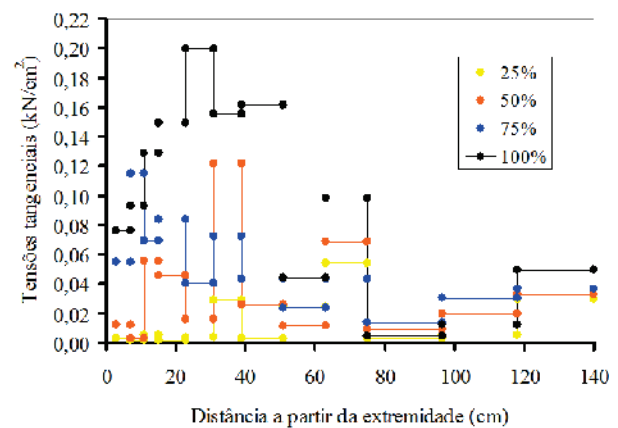


B tensões tangenciais

Figura 14 – Distribuição de tensões normais e tangenciais na viga V2C

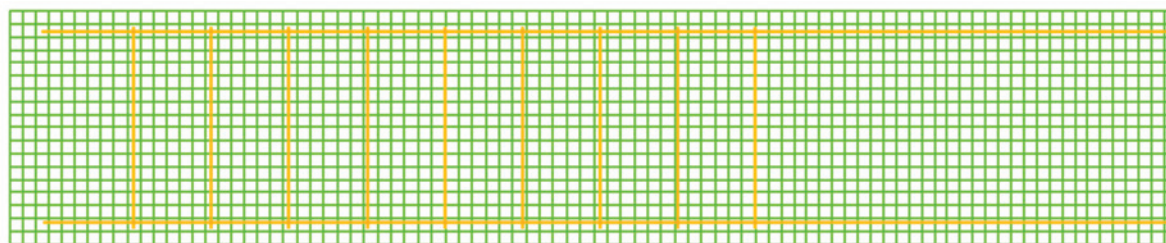


A tensões normais



B tensões tangenciais

Figura 15 - Malha de elementos finitos e disposição das armaduras



toda a sua extensão. Associando as propriedades geométricas e mecânicas do reforço aos valores de deformações é possível obter a distribuição de tensões longitudinais e tangenciais ao longo do reforço. É possível calcular as tensões tangenciais no reforço, entre os pontos instrumentados, fazendo-se uso da eq. [1].

$$\tau_r = \frac{\varepsilon_r(i+1) - \varepsilon_r(i)}{s(i+1) - s(i)} \cdot E_r \cdot t_r \quad (1)$$

Em que:

- τ_r = é a tensão tangencial;
- ε_r = é a deformação específica no reforço;
- s_i = posição relativa do extensômetro;
- E_r = módulo de elasticidade do reforço;
- t_r = espessura do reforço.

Nas Figuras [13] e [14] são apresentados os perfis de tensões normais e tangenciais ao longo do reforço das vigas V1C e V2C, respectivamente, para carregamentos referentes a 25%, 50%, 75% e 100% da força última. Da análise geral dessas figuras é possível constatar que os máximos valores das tensões normais foram registrados na região central das vigas. Nas vigas V1C e V2C o valor máximo das tensões normais ocorreu a 21,3 cm do meio do vão e foi registrado por meio do extensômetro 18.

Já um exame geral das tensões tangenciais aponta que os valores máximos ocorreram na região do vão de cisalhamento. Com o aumento da força aplicada às vigas, verifica-se que os máximos valores das tensões tangenciais tendem a deslocar-se em direção

à extremidade do reforço. Na viga V2C, até 50% da força de ruptura, o máximo valor da tensão tangencial localiza-se a 31 cm da extremidade do reforço. Para a viga V1C essa posição deu-se a 23 cm da extremidade do reforço.

Na viga V1C, a máxima tensão normal, 123,9kN/cm², foi registrada por meio do extensômetro 18, localizado a 21,8 cm da seção do meio do vão. Esse valor de tensão equivale a uma deformação no reforço igual a 5,30%. Do perfil de tensões verificam-se valores significativos de tensões normais (da ordem de 45 kN/cm²) e a concentração dos maiores valores de tensões tangenciais na extremidade do reforço para 75% e 100% da carga última.

Na viga V2C a distribuição de tensões normais e tangenciais ao longo do reforço (Figura [14]) indica valores máximos de 189,1 kN/cm² e 0,20 kN/cm², respectivamente. A tensão normal máxima, que equivale a uma deformação do reforço de 8,08%, foi registrada pelo extensômetro 18 e a tensão tangencial máxima foi dada pelo extensômetro 11.

5. Análise numérica

5.1 Modelo numérico bidimensional não-linear

Os comportamentos das vigas V1A, V1C e V2C foram simulados de maneira não-linear utilizando-se o programa computacional de elementos finitos Diana versão 9.1. Na Figura [15] apresenta-se a malha de elementos finitos bidimensional juntamente com a disposição das armaduras na discretização das vigas. A malha foi elaborada utilizando-se elementos quadráticos de oito nós do tipo CQ16M. As barras longitudinais e

Figura 16 - Condições de contorno e carga concentrada

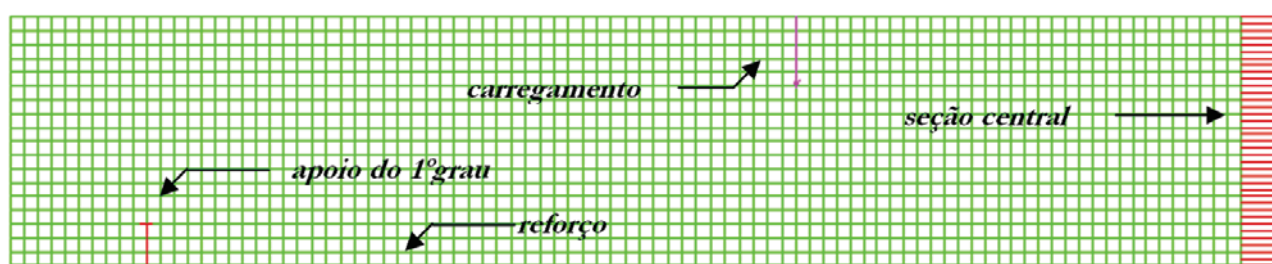


Tabela 7 – Materiais e parâmetros do modelo numérico das vigas V1A, V1C e V2C

Parâmetros	Vigas			
	V1A	V1C	V2C	
Concreto	Módulo de elasticidade	30.034 MPa	26.553 MPa	29.380 MPa
	Coefficiente de Poisson	0,20	0,20	0,20
	Resistência à tração	2,04 MPa	1,93 MPa	2,06 MPa
	Energia de fratura	0,151 N/mm	0,123 N/mm	0,155 N/mm
	Largura da banda de fissuração	19,61 mm	20,12 mm	20,03 mm
	Resistência à compressão	37,84 MPa	33,95 MPa	38,68 MPa
	Comportamento à tração		Modelo exponencial	
Aço	Módulo de elasticidade	210.921 MPa	199.677 MPa	210.921 MPa
	Tensão de escoamento	547,99 MPa	532,44 MPa	547,99 MPa
	Comportamento após escoamento	Modelo de plasticidade sem encruamento		

transversais da armadura das vigas foram modeladas discretamente através de elementos especiais denominados *embedded reinforcement*.

Na Figura [16] mostra-se a aplicação do carregamento, o apoio, a presença do reforço externo e a condição de simetria do modelo. A aderência entre a armadura e o concreto foi considerada perfeita, eliminando-se a possibilidade de ruptura por escorregamento das barras. Os nós dos elementos finitos representativos do reforço externo foram conectados aos nós adjacentes dos elementos de concreto simulando uma aderência perfeita entre os materiais. O carregamento foi estabelecido pela imposição de uma força concentrada do tipo *displace*.

Os parâmetros considerados no programa Diana e as propriedades mecânicas do concreto e da armadura inferior utilizadas na análise não-linear das vigas principais V1A, V1C e V2C estão representadas na Tabela [7]. Essas propriedades foram obtidas por meio de ensaios de caracterização que se encontram descritos em Ferrari [5].

Os valores de resistência à tração (*tensile strength*) considerados para o concreto, foram os obtidos segundo o ACI [10] por meio da equação: $0,332 \times (f_c)^{1/2}$. Os valores da largu-

ra da banda de fissuração (*crack bandwidth*) foram tomados considerando-se a raiz quadrada da área do elemento finito, conforme recomendação existente no manual do próprio Diana [11].

A presença do substrato de transição na viga V2C foi estabelecida por meio de uma superfície plana localizada no banzo tracionado do modelo. A aderência entre o substrato de transição e a superfície representativa do concreto adjacente foi considerada perfeita. As propriedades mecânicas do substrato de transição da viga V2C foram tomadas a partir dos valores da caracterização do compósito cimentício e estão indicadas na Tabela [8].

Os valores de *Tensile strength* aqui assumidos para a resistência à tração do compósito cimentício foram obtidos por meio da RILEM TC 162-TDF [8] através da equação: $0,6 \times f_{ct,L}$. O comportamento pós-pico do compósito cimentício foi representado por um diagrama do tipo *Exponential softening in tension*, tendo no elevado valor atribuído a energia de fraturamento, a indicação da presença das fibras e microfibras de aço. A energia de fratura foi calculada até um deslocamento vertical do corpo-de-prova prismático igual a $d = 2,65$ mm.

Tabela 8 – Materiais e parâmetros referentes ao substrato de transição da viga V2C

Modelo numérico V2C - Compósito cimentício CPM1A2C

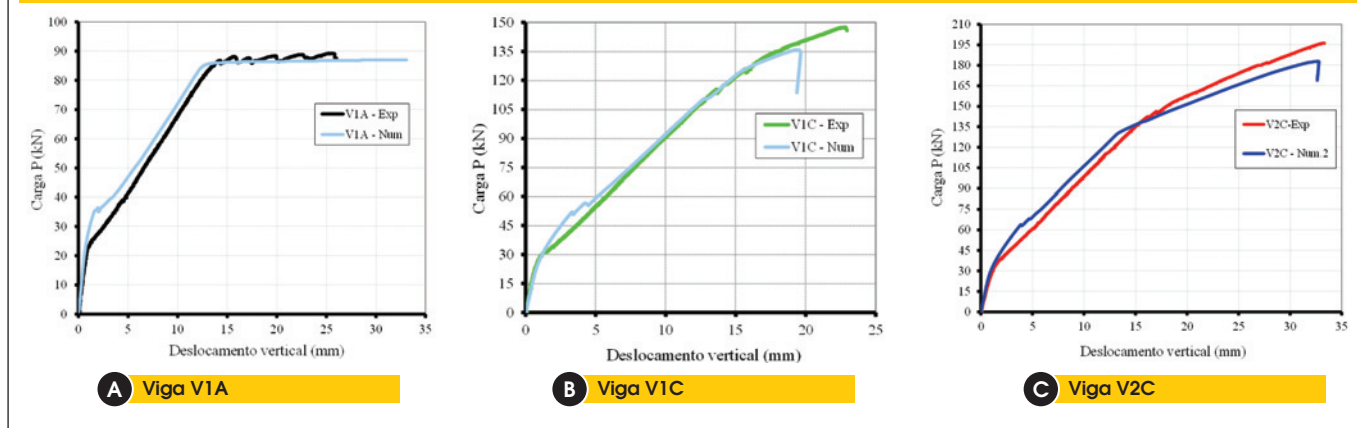
Linear Elasticity

Isotropic, Young's modulus = 28,700 MPa, Poisson's ratio = 0.20

Static Nonlinearity

Concrete and Brittle Materials, Total Strain Rotating Crack, Direct Input, Exponential Softening in Tension, Ideal in compression, Tensile strength = 2.24 MPa, Mode-I tensile fracture energy = 0.526 N.mm/mm², Crack bandwidth = (finite element area)^{0.5} = 20.03 mm, Compressive strength = 28.07 MPa.

Figura 17 - Comparação entre curvas P- δ numéricas e experimentais



5.2 Resultados da análise numérica

Na Figura [17] as curvas carga versus deslocamento vertical no meio do vão, obtidas numericamente são comparadas com os resultados experimentais. Da Figura [17-a] nota-se que na fase elástica, a curva numérica da viga de referência é idêntica à experimental e após a fissuração do concreto, a numérica mostra-se mais rígida. Já na fase de plastificação da armadura, ambas as curvas voltam a se aproximar.

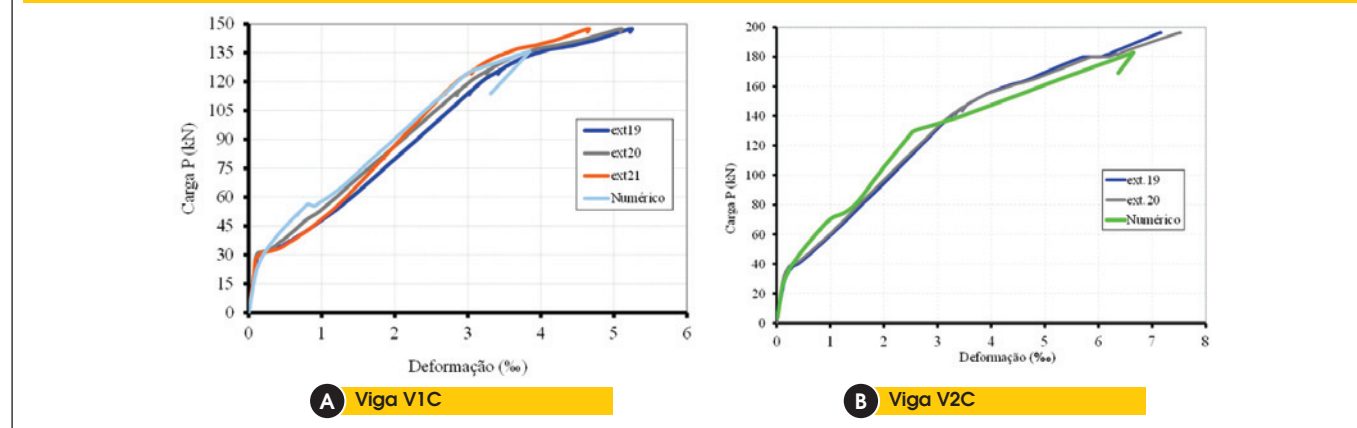
Para a viga de referência, a carga de fissuração obtida via MEF é de 24,6 kN, a qual é 17% mais elevada do que a carga de 21,01 kN, de fissuração, extraída dos resultados experimentais. Para a carga de 85,3 kN ocorre o escoamento da armadura, representado pela queda acentuada da rigidez da curva numérica. Esse valor supera o obtido experimentalmente (79,80 kN) em apenas 6,89%. Da Figura [18-b] observa-se que o comportamento das curvas, numérica e experimental, é bem semelhante. Após a fissuração do concreto e até a carga de 75 kN, a curva numérica apresenta-se um pouco mais rígida do que a experimental. Após esse valor

de carga as curvas voltam a evoluir de maneira bem semelhante até aproximadamente 128,62 kN, a partir daí então, e até a ruína, a curva numérica evolui com uma rigidez menor do que a da curva experimental.

A primeira fissura do concreto obtida via MEF ocorreu com $P = 26,96$ kN, sendo esse valor 7,15% superior ao obtido experimentalmente. O escoamento da armadura de acordo com o modelo numérico deu-se para uma força de 122,4 kN, ou seja, apenas 3,33% acima do valor experimental que é de 118,45 kN. Já o valor da carga correspondente a ruína apontada pelo modelo numérico é de 134,34 kN, enquanto que a experimental é de 147,37 kN.

Da Figura [18-c] verifica-se que até o escoamento da armadura, a curva numérica mostra maior rigidez do que a curva experimental. Após o escoamento da armadura, a curva numérica passa a apresentar maiores valores de deslocamentos verticais do que a curva experimental, dentro de um mesmo nível de carregamento. O surgimento da primeira fissura de acordo com os resultados experimentais deu-se para uma carga de 34,92 kN, enquanto que pelo modelo numéricos, deu-se para uma carga de 32,16 kN. O escoamento

Figura 18 - Deformações numéricas e experimentais no meio do reforço



mento da armadura conforme os resultados experimentais ocorreu para uma carga de 133,37 kN, ao passo que o modelo numérico indicou escoamento para uma carga de 129,64 kN. Esse valor é 2,88% inferior ao obtido experimentalmente. Quanto à ruína da viga V2C, o modelo numérico indicou um valor de carga de 182,9 kN, ao passo que o valor de carga experimental foi de 196,35 kN.

De um modo geral, as curvas numéricas de carga versus deslocamento vertical no meio do vão da viga de referência e das vigas reforçadas apresentaram boa concordância com as curvas experimentais. Na fase elástica o comportamento das vigas foi praticamente idêntico, com exceção da curva do modelo V2C-Num, que se mostrou um pouco mais rígida que a curva experimental, mesmo nessa fase de carregamento.

Até o escoamento da armadura as curvas numéricas mostraram-se mais rígidas que as curvas experimentais. Já após o escoamento da armadura, os deslocamentos verticais representados pelos modelos das vigas reforçadas foram mais acentuados do que os resultados experimentais.

Na Figura [18] são estabelecidas comparações da evolução das deformações no reforço obtidas experimentalmente com os resultados extraídos da análise numérica. Os valores de deformações referem-se à seção central da viga. Para a viga V1C, os valores de deformações numéricas do reforço no meio do vão correlacionam-se muito bem com os valores experimentais. Mesmo após a fissuração do concreto e o escoamento da armadura, a evolução das deformações numéricas representa satisfatoriamente os valores experimentais. Nota-se que até o escoamento da armadura, a curva numérica apresenta-se ligeiramente mais inclinada do que as experimentais. Após o escoamento da armadura, as deformações numéricas do reforço evoluem mais pronunciadamente e a ruína ocorre logo em seguida.

Da Figura [18-b], nota-se que o modelo numérico representa bem a evolução das deformações experimentais no reforço da viga V2C. Antes do escoamento da armadura, a curva numérica apresenta-se mais inclinada do que a curva experimental. Mesmo após o escoamento da armadura, a curva numérica evoluiu semelhantemente às deformações experimentais.

6. Conclusões

A pesquisa realizada teve como objetivo geral propor e examinar uma técnica construtiva inovadora para reforço à flexão de vigas de concreto armado. Essa técnica compreende um processo de prévia recuperação das vigas com um compósito de alto desempenho à base de cimento Portland e fibras curtas de aço, destinado a constituir o aqui chamado “*substrato de transição*”.

Após a realização de diversas etapas de análise experimental e teórica, pode-se concluir que a técnica proposta – ainda que passível de novos aperfeiçoamentos, como qualquer outra técnica – mostra-se eficiente tanto na reconstituição do banzo tracionado de vigas de concreto armado como na melhoria do desempenho da viga como um todo, em particular na exploração mais eficaz das propriedades resistentes do reforço com mantas de PRFC.

O desenvolvimento da pesquisa não se limitou ao simples teste e comparação de vigas reforçadas e não-reforçadas, mas procurou abranger diversos fundamentos e avaliações científicas que focalizaram o problema em questão. Da análise conjunta de todos os resultados obtidos, é que se pôde concluir que o objetivo pretendido foi alcançado.

Por fim, destaca-se uma síntese das conclusões parciais e comentários complementares sobre cada estudo específico elaborado:

a adição das microfibras de aço às fibras convencionais, potencializa uma maior contribuição da matriz para a resistência do compósito e a melhoria do mecanismo de transferência de tensões da matriz para as fibras;

com a fissuração da matriz, a transferência de tensões foi facilitada pelas microfibras de aço que, em grande quantidade na matriz, condicionaram o avanço das fissuras à elevação do nível de carregamento;

o reforço à flexão de vigas por meio da colagem externa de manta de PRFC a um substrato de transição constitui uma estratégia eficiente e de aplicação prática na Engenharia;

apesar de se ter analisado um único caso (viga V2C), ficou demonstrado que a reconstituição prévia do banzo tracionado com um compósito cimentício de alto desempenho à base de macro e microfibras de aço evita a rápida propagação de fissura crítica na extremidade do reforço e retarda o desprendimento prematuro da manta. Com a presença de um material de maior resistência ao fraturamento no banzo tracionado da viga, as fissuras são mais distribuídas e de menor abertura ao longo da extensão do reforço;

além de expressivo incremento na resistência, a colagem da manta de PRFC a um substrato de transição leva a significativo aumento da rigidez da viga em relação a uma viga sem substrato de transição.

7. Agradecimentos

Agradecemos à FAPESP e à CAPES pelo apoio financeiro, sem o qual esta pesquisa não poderia ter sido realizada. Agradecemos também à MACCAFERRI – América Latina pela produção, sob encomenda, das microfibras de aço.

8. Referências bibliográficas

- [01] Juvandes L. Strengthening and rehabilitation of concrete structures using composites materials. Thesis, Porto University Engineering; 1999.
- [02] Ferrari VJ. Flexural strengthening of reinforced concrete beams with carbono fibers sheets. Thesis, Federal University of Santa Catarina; 2002.
- [03] Beber, AJ. (2003). Structural behavior of strengthened reinforced concrete beams with steel fibers composites. Thesis, Porto Alegre. Tese, Federal University of Rio Grande do Sul; 2003.
- [04] FIB. Bond of reinforcement in concrete-state-of-the-art report. Lauseanne. Bulletin 10. 2000.
- [05] Ferrari VJ. Flexural strengthening of reinforced concrete beams with carbon fibers reinforced polymer sheet bonded to a transition layer of high performance cement-based composite. Thesis, University of Sao Paulo, School of engineering; 2007.
- [06] Ferreira LET. About the fracture resistance concrete and the steel fibers concrete. Thesis, University of Sao Paulo; 2002.
- [07] RILEM TC 162-TDF. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. Bending test. Materials and Structures, 2002a; 35, 579-582.

- [08] RILEM TC 162-TDF. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. Design of steel fibre reinforced concrete using the s-w method: principles and applications. *Materials and Structures*, 2002b; 35, 262-278.
- [09] Ferrari, V.J; Hanai, J.B. Development and analysis of high performance hybrid cement composites. *Ibracon Structures and Materials Journal*, 2009; 3, 254-270.
- [10] ACI.318M. Building code requirements for reinforced concrete. 1989
- [11] DIANA – Finite Element Analysis – user’s manual release 9.