

## CFRP Composites on the Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams

### Compósitos de CFRP no Reforço ao Cisalhamento de Vigas de Concreto Armado



**A. J. BEBER**  
andriei@univali.br  
**A. CAMPOS FILHO**  
americo@ufrgs.br

#### Abstract

This study aims to explore the main structural implications on the use of *CFRP* composites for the shear strengthening of R/C beams. Thirty beams 300 cm long with a 15 x 30 cm cross-section were fabricated and strengthened in shear using different strengthening schemes, applying two *CFRP* composite systems. Failure loads and modes are analysed. The strengthening schemes are also analysed in order to provide valuable information regarding the rational usage of such peculiar material. Experimental results corroborate how versatile the *CFRP* composites can be, especially when tailored for a particular situation.

Keywords: shear strengthening; shear failure; concrete; *CFRP*; efficacy.

#### Resumo

Este estudo tem por objetivo explorar as principais implicações estruturais da aplicação dos compósitos de *CFRP* ao cisalhamento de vigas de concreto armado. Para o desenvolvimento desse estudo foram construídas 30 vigas com seção transversal 15x30 cm com 300 cm de comprimento. Destas, duas serviram como referência e as demais foram reforçadas, adotando-se diferentes configurações de reforço ao cisalhamento, empregando dois tipos de sistema de reforço. Os resultados de cargas de ruptura, assim como seus respectivos modos, são analisados e confrontam-se as diferentes configurações de reforço estudadas. Do ponto de vista de aplicação, observou-se a grande versatilidade dos compósitos, permitindo uma infinidade de configurações, especialmente desenvolvidas para uma determinada situação. Além de consideráveis incrementos na resistência das vigas reforçadas, a avaliação de diferentes configurações de reforço permite uma aplicação mais racional dos compósitos, cujo custo é bastante elevado.

Palavras-chave: reforço ao cisalhamento, concreto armado, compósitos de *CFRP*.

<sup>a</sup> CETAU, UNIVALI, 5<sup>a</sup> Avenida S/N, Balneário Camboriú/SC, Brasil;

<sup>b</sup> CEMACOM, PPGE, UFRGS, Av. Osvaldo Aranha, 99 3<sup>o</sup> andar, Porto Alegre/RS, Brasil.

## 1 Introdução

Nos últimos anos, diversos centros de pesquisa, espalhados por todo o mundo, têm se dedicado à proposição e ao desenvolvimento de novas alternativas para o reforço de estruturas de concreto armado. Uma das mais notáveis técnicas, apresentadas nos últimos anos, envolve a aplicação de materiais compósitos, mais especificamente os compósitos de *CFRP*, como alternativa de substituição às tradicionais chapas de aço, empregadas, com indubitável sucesso, desde a década de 60 [1].

Os compósitos, inicialmente desenvolvidos para aplicações nas indústrias aeroespacial, automotiva, naval, de equipamentos esportivos e armamentos, passam a ocupar um lugar de destaque como alternativa viável no reforço de estruturas de concreto armado e protendido. Os materiais compósitos podem resolver uma série de problemas no âmbito da reabilitação estrutural. A combinação de fibras e polímeros permite que o elemento de reforço seja confeccionado para atender a uma solução particular, tanto em relação à sua geometria quanto às suas propriedades mecânicas [1]. Dentre suas principais virtudes, destacam-se a alta resistência, o baixo peso próprio, a resistência à corrosão eletroquímica, a grande durabilidade e a capacidade de assumir formas complexas [2].

Embora o número de aplicações nesta área seja ainda reduzido, motivado principalmente pelo elevado custo de produção dos compósitos de *CFRP*, existe um imenso potencial em sua utilização na reabilitação estrutural de elementos de concreto armado. Em muitos casos, a aplicação de compósitos pode significar um meio de estender a vida útil de uma estrutura que possivelmente não poderia ser reforçada utilizando materiais convencionais [3]. Ainda, a habilidade de se conduzir a completa operação de reforço em períodos muito curtos de tempo, sem que seja necessário interromper, completamente, a utilização da estrutura, é, sem dúvida alguma, a maior vantagem dos compósitos.

## 2 Compósitos de CFRP no reforço de vigas de concreto armado

Apesar da aplicação dos compósitos de *CFRP* no reforço à flexão de vigas de concreto armado, constituir-se em uma alternativa viável, com modelos teóricos para o dimensionamento e verificação já consolidados, identificou-se que, em muitas situações, pode-se ultrapassar a resistência ao cisalhamento do elemento estrutural [4, 5, 6]. Assim é interessante garantir que a resistência ao cisalhamento de uma viga seja maior que sua resistência à flexão. O respaldo alcançado pela técnica no reforço à flexão, abriu um novo horizonte em sua aplicação, ou seja, a possibilidade da sua utilização, também, para elevar a resistência ao cisalhamento de vigas de concreto armado [7].

Para estes casos, os compósitos de *CFRP* (laminados, mantas e tecidos) demonstram ser eficientes, também, na elevação da resistência ao cisalhamento. Entretanto, o número de aplicações é significativamente menor e poucos estudos têm-se dedicado especificamente ao tema.

O método mais eficiente de reforço ao cisalhamento é o envolvimento total — *wrapping*, ou seja, o completo

envolvimento da seção transversal da viga [figura 1(a)]. Contudo, em algumas situações, esta pode não se constituir em uma alternativa viável do ponto de vista prático. A presença de uma laje ou outro elemento, contíguo à viga, impede que seja possível envolver o topo da seção. Uma alternativa seria perfurar a laje e envolver a seção com tiras ou bandas de reforço. Esta alternativa é, porém, bastante complicada e onerosa.

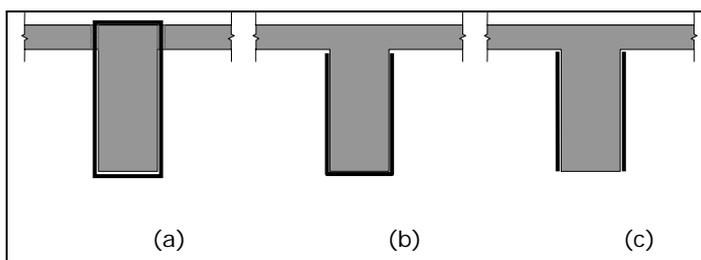


Figura 1 - Possíveis configurações de um reforço ao cisalhamento.

O método mais comum de reforço ao cisalhamento caracteriza-se pela colagem do reforço nas laterais e base da seção [figura 1(b)]. Este método é denominado "*U wrap*", isto é, envolvimento tipo "*U*". Trata-se de uma alternativa prática e bastante eficiente no aumento da resistência ao cisalhamento [8, 9].

Em algumas situações, ainda, pode não ser possível envolver a base da viga. Nestes casos é possível simplesmente colar o reforço em ambos os lados [figura 1(c)]. A eficiência desta configuração, porém, é limitada por conta de possíveis problemas de ancoragem.

O reforço transversal com compósitos de *CFRP* pode ser executado de forma contínua, ou sob a forma de tiras ou bandas, convenientemente espaçadas. A utilização de tiras pode ser eficiente na otimização do uso do material. Em alguns casos, pesquisadores apontam uma economia de até 40% no consumo de compósito de *CFRP* para um mesmo incremento na resistência ao cisalhamento [4]. Ainda, se todo o comprimento da viga deve ser reforçado, o emprego de tiras permite ao concreto certa permeabilidade, garantindo, assim, a migração da umidade.

## 3 Programa experimental

A estratégia experimental consistiu na construção de 30 vigas de concreto armado, com seção retangular, sem carregamento prévio, reforçadas externamente ao cisalhamento com compósitos de *CFRP*, sem a incorporação de mecanismos adicionais de ancoragem. O objetivo principal deste estudo consistiu na avaliação de cargas e modos de ruptura de vigas com 12 configurações diferentes de reforço propostas. As vigas possuíam seção transversal de 15 x 30cm e comprimento de 300cm, como pode ser observado no esquema da figura 2.

A armadura longitudinal inferior era composta por seis barras de aço CA-50, com 16,0mm de diâmetro (dispostas em duas camadas) e duas barras com diâmetro de 16,0mm na parte superior. Além disso, essas vigas não possuíam armadura transversal, excetuando-se estribos de montagem em suas extremidades. A armadura possuía um cobrimento de 1,5cm. As vigas foram executadas sem nenhuma armadura transversal para evidenciar que a

capacidade resistente alcançada era devida exclusivamente ao reforço. A presença de estribos introduziria uma incerteza nos resultados obtidos e tornaria mais difícil uma posterior proposição de modelo teórico para dimensionamento do reforço.

A tabela 1 apresenta, esquematicamente, as configurações de reforço ao cisalhamento testadas neste estudo. As vigas V8\_A e V8\_B não receberam qualquer reforço e são denominadas vigas de controle, a partir das quais serão tecidas considerações a respeito do desempenho do reforço.

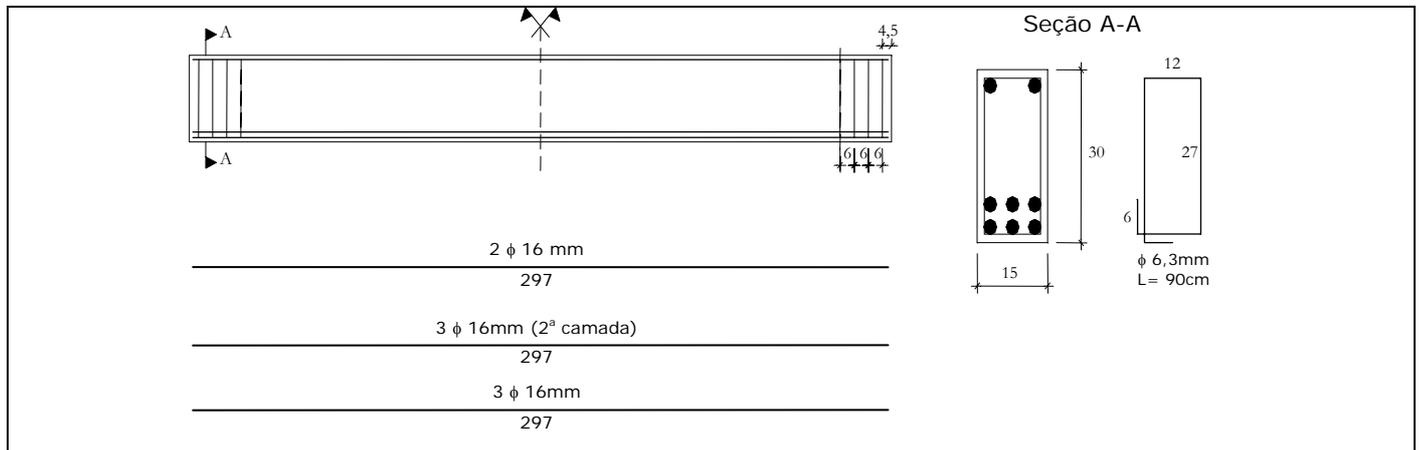


Figura 2 - Detalhamento da armadura das vigas.

Tabela 1 - Configurações de reforço testadas.

Esquema de reforço (dimensões em cm)		Vigas			
	<i>Manta Flexível</i>				
	$S_f = 10\text{cm}$ $w_f = 5\text{cm}$ $\beta = 90^\circ$	Somente nas laterais	V9_A	V9_B	V21_A
		Tipo "L"	V10_A	V10_B	V17_A
		Tipo "U"	V11_A	V11_B	V17_B
	Envolvimento completo	V12_A	V18_A	V20_A	
	<i>Manta Flexível</i>				
	$S_f = 14,14\text{ cm}$ $w_f = 5\text{ cm}$ $\beta = 45^\circ$	Somente nas laterais	V12_B	V14_B	
Tipo "L"		V19_A	V19_B		
	<i>Manta Flexível</i>				
	$S_f = 65,5\text{cm}$ $w_f = 65,5\text{cm}$ $\beta = 90^\circ$	Somente nas laterais	V13_A	V13_B	
		Tipo "U"	V15_B	V16_B	
		Envolvimento completo	V18_B	V_16_A	
	<i>Manta Flexível</i>				
	$S_f = 65,5\text{cm}$ $w_f = 65,5\text{cm}$ $\beta = 45^\circ$	Somente nas laterais	V14_A	V15_A	
		<i>Laminado pré-fabricado</i>			
	$S_f = 10\text{ cm}$ $w_f = 5\text{ cm}$ $\beta = 90^\circ$	Somente nas laterais	V22_B	V20_B	
	<i>Laminado pré-fabricado</i>				
	$S_f = 14,14\text{cm}$ $w_f = 5\text{cm}$ $\beta = 45^\circ$	Somente nas laterais	V21_B	V22_A	

O concreto utilizado na confecção das vigas é do tipo convencional e foi dosado em laboratório, sem a incorporação de qualquer aditivo. A mistura foi executada mecanicamente. Cada betonada correspondeu ao volume de uma viga e a moldagem e 9 corpos de prova cilíndricos de 10 x 20cm, para a determinação das propriedades mecânicas do concreto. Os corpos de prova foram ensaiados à compressão simples e à compressão diametral, na data em que cada uma das vigas correspondentes foi ensaiada. A partir desses ensaios, obteve-se uma resistência à compressão média de 32,8 MPa, com um coeficiente de variação de 5,24%. A resistência à tração média, obtida através do ensaio de compressão diametral, foi de 2,9 MPa, com um coeficiente de variação de 9,09%.

As barras de armadura, da categoria CA50, empregadas na construção das vigas, foram ensaiadas à tração para a determinação de suas tensões de escoamento e ruptura. Foram ensaiadas duas amostras. Esses ensaios indicaram uma tensão média de escoamento de 625,1 MPa para barras com diâmetro de 16,0mm.

**Tabela 2 - Características dos sistemas de reforço empregados.**

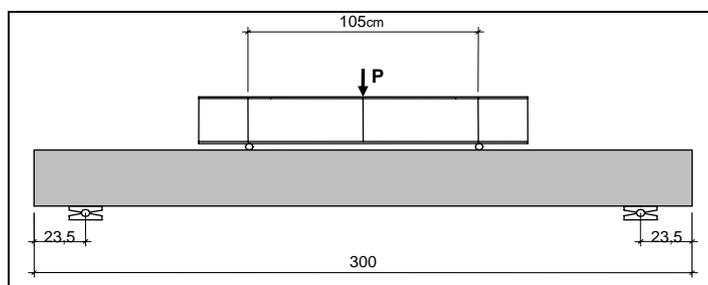
Propriedade	Laminado pré-fabricado [10]	Manta flexível curada <i>in situ</i> [1]
Resistência à tração	2500 MPa	3400 MPa
Módulo de elasticidade	205000 MPa	230000MPa
Deformação específica na ruptura	0,0122	0,0148
Peso de fibra por área	-	200 g/m <sup>2</sup>
Espessura	1,4 mm	0,111mm
Largura	5 cm	25cm

Para a execução dos reforços foram empregados os dois sistemas de reforço com compósitos de CFRP disponíveis atualmente no mercado nacional — laminado pré-fabricado e manta flexível curada *in situ* —, provenientes de dois fornecedores diferentes. As propriedades dos sistemas compósitos de CFRP empregados neste trabalho são apresentadas na tabela 2 [1, 10].

Todas as vigas foram ensaiadas com duas cargas concentradas aplicadas em seus terços médios. A avaliação do comportamento estrutural das vigas com diferentes configurações de reforço foi feita com base no monitoramento de cargas, deslocamentos e deformações específicas, através de um sistema de aquisição de dados completamente automatizado. O esquema de ensaio pode ser observado na figura 3.

As cargas verticais, aplicadas de baixo para cima através do pistão hidráulico da prensa universal (com um deslocamento constante de 2 mm/min), foram medidas através da célula de carga da própria prensa. A aquisição dos dados de carga foi realizada através de um sistema de aquisição de dados conectado diretamente à prensa. Os deslocamentos verticais foram determinados através de LVDT'S (*linear variable displacement transducer*) com curso de  $\pm 50,8$ mm e precisão de 0,01mm. O monitoramento das deformações específicas nos dois vãos de cisalhamento, em uma das

faces da viga, foi realizado através de três *strain gages* com resistência de 20mm de comprimento, dispostos sob a forma de roseta.



**Figura 3 - Esquema de ensaio.**

## 4 Discussão dos resultados

A aplicação dos compósitos de CFRP no reforço ao cisalhamento produz sensíveis modificações sobre o comportamento de vigas de concreto armado. Estas modificações são evidentes, principalmente, na elevação da resistência. Em alguns casos, a aplicação do reforço ao cisalhamento com compósitos de CFRP pode, até mesmo, modificar o modo de ruptura da viga que, eventualmente, pode deixar de estar associado a uma falha por cisalhamento e passe a estar associado a uma falha por flexão.

No caso particular das vigas desse estudo, o esforço de cisalhamento total é resistido pela soma das contribuições do concreto e do reforço com compósito de CFRP, uma vez que estas não apresentavam armadura transversal.

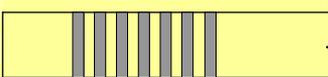
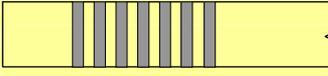
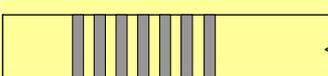
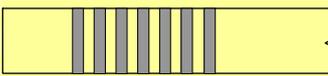
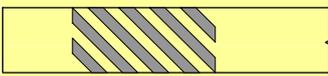
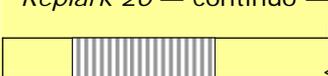
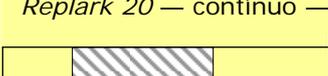
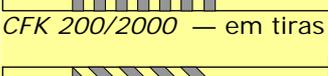
Dentre os modos de ruptura observados nesse estudo incluem-se a ruptura por tração diagonal (vigas sem reforço), ruptura do compósito com descolamento associado e, em alguns casos, arrancamento do concreto do cobrimento.



**Figura 4 - Detalhes do modo de ruptura das vigas V9\_A, V9\_B e V21\_A.**

Os resultados das cargas e modos de ruptura para cada uma das vigas testadas são apresentados na tabela 3. As vigas com as diferentes configurações testadas foram agrupadas de maneira a permitir a comparação sob diversos aspectos: orientação, distribuição, quantidade e tipo de sistema de reforço.

Tabela 3 - Cargas e modos de ruptura.

Viga	Configuração do reforço	Quant. de reforço [m <sup>2</sup> ]	Modo de ruptura	Carga de ruptura [kN]	Incremento [%]
V8_A	-	-	tração diagonal	114,70	-
V8_B	-	-	tração diagonal	112,98	-
V9_A		0,4200	descolamento do reforço	196,24	72,4
V9_B	<i>somente nas laterais</i>			208,58	83,2
V21_A	Replark 20 — em tiras — 90°	0,5824	descolamento e ruptura do reforço	230,38	102,4
V10_A	<i>tipo "L"</i>			214,97	88,8
V10_B		0,5075	descolamento e ruptura do reforço	211,98	86,2
V17_A	Replark 20 — em tiras — 90°			205,57	80,6
V11_A		0,6615	ruptura do reforço	196,85	72,9
V11_B	<i>tipo "U"</i>			249,60	119,3
V17_B	Replark 20 — em tiras — 90°	0,3891	descolamento do reforço	185,86	63,3
V12_A	<i>envolvimento completo</i>			232,71	104,4
V18_A		0,5489	descolamento do reforço	254,57	123,6
V20_A	Replark 20 — em tiras — 90°			280,24	146,2
V12_B		0,7860	descolamento e ruptura do reforço	203,30	78,6
V14_B	Replark 20 — em tiras — 45°			183,30	61,0
V19_A		0,9498	descolamento e arrancamento do reforço e cobrimento	236,83	108,0
V19_B	Replark 20 — em tiras — 45°			230,26	102,3
V13_A		1,230	descolamento do reforço e arrancamento do cobrimento	244,01	114,3
V13_B	Replark 20 — contínuo — 90°			251,50	120,9
V15_B		0,7860	descolamento do reforço e arrancamento do cobrimento	276,74	143,1
V16_B	Replark 20 — contínuo — 90°			224,85	97,5
V16_A		0,3891	esmagamento do concreto (flexão)	367,92	223,2
V18_B	Replark 20 — contínuo — 90°			404,82	255,6
V14_A		0,4200	descolamento do reforço e arrancamento do cobrimento	256,78	125,6
V15_A	Replark 20 — contínuo — 45°			241,12	111,8
V20_B		0,3891	descolamento do reforço e arrancamento do cobrimento	285,82	151,1
V22_B	CFK 200/2000 — em tiras — 90°			225,02	97,7
V21_B		0,4200	descolamento do reforço e arrancamento do cobrimento	271,40	138,4
V22_A	CFK 200/2000 — em tiras — 45°			251,19	120,7

O comportamento das vigas de controle, V8\_A e V8\_B, foi rigorosamente compatível com o esperado. Como essas vigas não apresentavam armadura transversal, o modo de ruptura apresentado por ambas caracterizou-se pela ruptura por tração diagonal, de forma brusca e repentina, com a formação de uma grande fissura, com inclinação aproximada de  $45^\circ$  em relação ao eixo longitudinal da viga. É importante ressaltar que as vigas foram ensaiadas de forma invertida e, portanto, a orientação das fissuras de cisalhamento aparecerá, igualmente, de forma invertida nas ilustrações.

#### 4.1 Vigas reforçadas com tiras à $90^\circ$

A observação do conjunto de vigas reforçadas com tiras orientadas à  $90^\circ$  em relação ao eixo longitudinal das vigas confirmou a expectativa de que o envolvimento completo da seção transversal, embora trabalhoso do ponto de vista executivo, apresentou o melhor desempenho. Houve uma elevação da carga de ruptura de até 146,2%.

Por outro lado, o desempenho das demais vigas foi relativamente semelhante, principalmente, quanto à magnitude dos incrementos de resistência alcançados. Destaca-se a relativa dispersão observada entre os resultados das vigas com configurações de reforço iguais. Esta situação pode ser atribuída, em parte, às dificuldades inerentes ao processo de preparação das arestas das vigas que receberam o reforço tipo "L" e "U".

Embora tenham apresentado incrementos de resistência semelhantes, os modos de ruptura apresentados pelas vigas reforçadas com tiras somente nas laterais, do tipo "L" e "U", orientadas à  $90^\circ$ , foram diferentes. O modo de ruptura apresentado pelas vigas que receberam o reforço somente na lateral foi controlado pelo descolamento do reforço, como pode ser observado na figura 4. Nesta figura, é possível observar, ainda, a formação de uma grande fissura, com uma inclinação aproximada de  $45^\circ$ , estendendo-se por praticamente todo o vão de cisalhamento. Esta fissura intercepta as tiras de reforço, definindo, assim, os comprimentos de ancoragem disponíveis em cada uma destas tiras.

O reforço sob a forma de tiras em "L" demonstrou ser o mais estável nesse conjunto de vigas testadas. O incremento na carga de ruptura oscilou entre 80,6% e 88,8%. A tentativa de empregar as tiras em "L", foi motivada por dois aspectos: melhorar as condições de ancoragem e permitir, posteriormente, a comparação destes resultados com as vigas reforçadas com tiras inclinadas. O modo de ruptura destas vigas caracterizou-se pela combinação do descolamento com a ruptura do compósito à tração.

As evidências experimentais observadas nesse estudo apontam, neste caso, que o início do descolamento ocorre junto ao banzo comprimido, uma vez que o reforço conta com ancoragem suficiente na base da viga. No entanto, a ruptura do compósito ocorre próximo ao banzo tracionado, junto à fissura diagonal, no ponto em que o reforço, também em decorrência do maior comprimento de ancoragem, está sendo solicitado à maior deformação e, conseqüentemente, tensão.

Finalmente, as vigas que receberam o reforço através do envolvimento completo da seção transversal, apresentaram um modo de ruptura associado, exclusivamente, à ruptura do compósito. Nesta situação, contando com um comprimento de ancoragem suficiente, as tiras de reforço têm seu desempenho maximizado, conduzindo a maiores incrementos em resistência. Esta configuração contribui, ainda, para o retardamento no surgimento da fissura diagonal de tração, através do confinamento parcial proporcionado pelas tiras de reforço. Este efeito pode ser observado na figura 5.



Figura 5 - Detalhe do modo de ruptura das vigas V12\_A, V18\_A e V20\_A.

O desempenho das vigas com reforço somente nas laterais, tipo "L" e tipo "U" foi muito parecido. O incremento médio de resistência foi de cerca de 85% em relação às vigas de referência. Contudo, observa-se que a solução de reforço tipo "L" utiliza uma quantidade de fibra 15% maior que a solução tipo "U" e 39% maior que solução de reforço colado somente nas laterais.

#### 4.2 Vigas reforçadas com tiras à $45^\circ$

Em virtude da natureza anisotrópica dos compósitos, deve-se procurar orientar as fibras, preferencialmente, na direção das tensões principais atuantes. Em função desta condição, um conjunto de vigas recebeu o reforço em tiras orientadas à  $45^\circ$  em relação ao eixo longitudinal da viga. Neste grupo foram testadas duas alternativas: reforço colado somente nas laterais e tipo "L". O modo de ruptura das vigas que receberam o reforço somente nas laterais caracterizou-se pelo descolamento, de forma semelhante ao reforço orientado à  $90^\circ$ . O reforço tipo "L", por sua vez, apresentou um modo de ruptura combinando o descolamento das tiras de reforço, próximo ao banzo comprimido, e sua ruptura na região próxima ao apoio, junto ao início da fissura diagonal de tração.

O incremento médio de resistência das vigas com reforço à  $45^\circ$ , somente nas laterais e do tipo "L" foi de cerca de 70% e 105%, respectivamente. O desempenho superior do reforço tipo "L" se justifica na medida em que esta configuração permite maiores comprimentos de ancoragem das tiras de reforço. Por outro lado, a quantidade de fibra utilizada no reforço tipo "L" foi 41% maior.

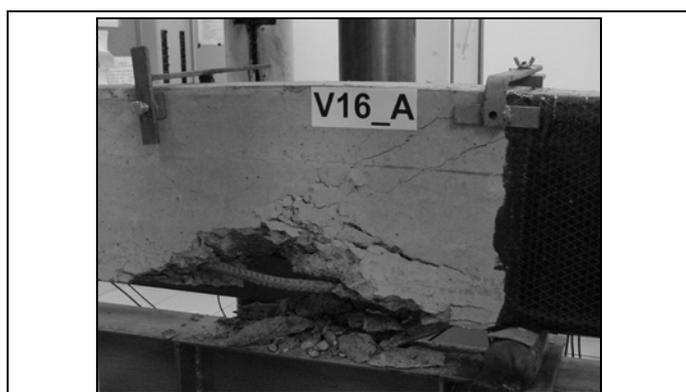
#### 4.3 Vigas com reforço contínuo

Além da execução sob a forma de tiras, convenientemente espaçadas, um reforço ao cisalhamento, empregando

compósitos de *CFRP*, pode ser aplicado de forma contínua. Esta solução, embora possa significar, uma elevação nos custos, pode representar uma alternativa interessante em algumas situações, onde o efeito de confinamento parcial da seção transversal pode ser relevante na escolha desse sistema de reforço.

As vigas com reforço contínuo receberam o reforço em toda a extensão do vão de cisalhamento, orientado à  $90^\circ$  em relação ao eixo longitudinal da viga. Foram testadas três alternativas: reforço colado somente nas laterais, tipo "U" e envolvimento completo. Mesmo consumindo uma quantidade de reforço elevada, o desempenho das vigas que receberam o reforço através do envolvimento completo da seção transversal foi bastante significativo. O incremento em resistência foi da ordem de 240%.

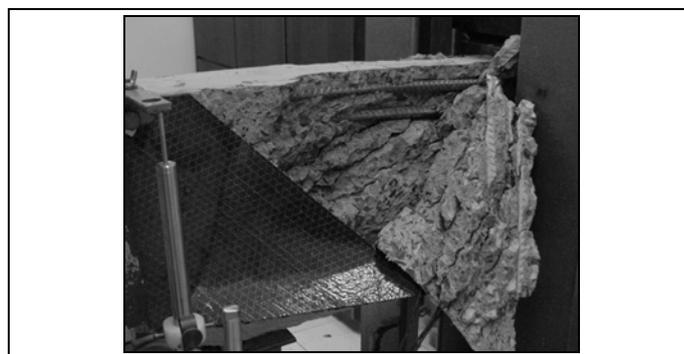
Além disso, esta alternativa promoveu uma modificação fundamental no comportamento das vigas V16\_A e V18\_B. Em oposição a um modo de ruptura associado ao cisalhamento, estas vigas apresentaram uma ruptura clássica de flexão, através do esmagamento do concreto e conseqüente flambagem da armadura de compressão, como pode ser observado na figura 6.



**Figura 6 - Detalhe do modo de ruptura das vigas V16\_A e V18\_B.**

Por outro lado, o comportamento das alternativas de reforço colado somente nas laterais e tipo "U" foi bastante parecido, embora o consumo de material do reforço tipo "U" tenha sido cerca de 21% maior. O incremento em resistência de ambas as soluções oscilou entre 114% e 143%, e seus modos de ruptura foram idênticos, caracterizados pelo descolamento do reforço e arrancamento do concreto do cobrimento.

O mecanismo de transferência de esforços entre concreto e reforço ajuda a explicar o fenômeno de arrancamento do concreto do cobrimento, observado nas vigas que receberam o reforço contínuo. Como o reforço se estende por uma área bastante grande, neste caso em todo o vão de cisalhamento, todo o concreto do cobrimento, nesta área, é mobilizado para a transferência de tensões entre os materiais. Com a evolução do carregamento, surgem fissuras ao longo do cobrimento, formando um plano de fratura. No instante do descolamento do reforço, em função de uma alteração significativa na distribuição de tensões ao longo do reforço, partes do cobrimento são arrancadas junto com o reforço. Um detalhe desse modo de ruptura pode ser observado na figura 7.



**Figura 7 - Detalhe do modo de ruptura das vigas V14\_A e V15\_A.**

As vigas com reforço contínuo orientado à  $45^\circ$ , colado somente nas laterais, apresentaram um comportamento semelhante às vigas com reforço contínuo orientado à  $90^\circ$ . Houve um incremento de cerca de 119% na carga de ruptura e seu modo de ruptura caracterizou-se, igualmente, pelo descolamento associado ao arrancamento do concreto do cobrimento.

A principal virtude das mantas flexíveis está associada à grande versatilidade em sua aplicação. A utilização das mantas flexíveis permite a execução de reforços em variadas configurações e soluções de ancoragem. Entretanto, algumas configurações de reforço podem ser altamente eficientes do ponto de vista estrutural mas extremamente complexas do ponto de vista executivo.

No caso particular desse estudo, observou-se que, embora o desempenho das vigas reforçadas com mantas orientadas à  $45^\circ$  tenham sido compatíveis com as demais soluções, a execução destes reforços demonstrou ser bastante complexa. O processo de preparação da superfície de concreto torna-se mais complexo, principalmente, para reforços em tiras. Além disso, o procedimento de corte das mantas, nas dimensões projetadas, é bastante trabalhoso e o desperdício de material é elevado.

#### 4.4 Vigas reforçadas com laminados pré-fabricados

Para o reforço do último conjunto de vigas foram empregados laminados pré-fabricados. Estas vigas receberam o reforço através de tiras, orientadas a  $45^\circ$  e  $90^\circ$ , coladas somente nas laterais. O modo de ruptura apresentado nestas vigas foi controlado pelo descolamento do reforço em conjunto com o arrancamento do concreto do cobrimento. O incremento médio em resistência oscilou entre 124% e 129%, para tiras orientadas à  $90^\circ$  e  $45^\circ$ , respectivamente.

#### 4.5 Distribuição e orientação dos reforços

A comparação entre o desempenho de diferentes distribuições e orientações de reforço torna possível a avaliação da eficiência das diversas configurações testadas. No caso do reforço colado somente na lateral (orientados a  $45^\circ$  e  $90^\circ$ ), observou-se uma ligeira vantagem para as fibras orientadas à  $90^\circ$ , mesmo utilizando uma quantidade de reforço 8% maior.

Por outro lado, o reforço tipo "L", orientado à  $45^\circ$ , além de consumir uma quantidade de reforço 6% menor, obteve um

desempenho médio superior quanto à resistência (cerca de 10% maior do que o reforço tipo "L" orientado à 90°). Esta superioridade no desempenho pode ser atribuída, em parte, ao maior comprimento de ancoragem das tiras de reforço na base da viga, em virtude de sua orientação. Enquanto o comprimento de ancoragem na base das vigas que receberam o reforço orientado à 90° estendia-se por 15 cm, nas vigas cujo reforço estava orientado à 45° este comprimento estendia-se por 21cm.

Outro importante aspecto na avaliação da eficiência de uma configuração de reforço está associado à otimização de sua aplicação. Isto significa dizer que, sob determinadas condições (carregamento, vinculação, geometria, resistência, etc.), é possível que a utilização de maiores quantidades de reforço não necessariamente estarão associadas a maiores incrementos nas cargas de ruptura. No caso das vigas desse estudo, as evidências experimentais confirmam esta possibilidade.

As vigas que receberam o reforço contínuo, colado somente nas laterais e tipo "U", utilizaram uma quantidade de reforço cerca de 87% maior que as vigas que receberam o reforço em tiras, adotando estas mesmas soluções de ancoragem. Entretanto, mesmo aumentando consideravelmente a quantidade de reforço, o desempenho destas vigas foi apenas 38% superior. No caso das vigas com reforço contínuo orientado à 45° esta diferença fica ainda mais evidente onde, para que se alcançasse um desempenho 38% maior foi necessário o dobro da quantidade de reforço.

A observação destes resultados confirma a expectativa de que possa existir, em função das características peculiares de cada situação de reforço, um ponto de equilíbrio entre consumo de material e desempenho.

A utilização dos laminados pré-fabricados no reforço ao cisalhamento caracteriza-se como uma alternativa menos versátil do que a aplicação das mantas flexíveis. A principal limitação dos laminados pré-fabricados está associada à pouca versatilidade das soluções de ancoragem possíveis. Mesmo apresentando um desempenho superior ao das vigas reforçadas com mantas flexíveis, o modo de ruptura, controlado pelo descolamento do reforço, impede que maiores incrementos em resistência sejam alcançados. Embora tenham utilizado a mesma quantidade de reforço, para as tiras orientadas à 45° e 90°, o desempenho das vigas reforçadas com laminados foi, em média, 45% maior.

Isto implica em dizer, que, sem a adoção de medidas adicionais para a melhoria das condições de ancoragem do reforço, a utilização dos laminados, em determinadas situações, pode não representar a melhor alternativa. É importante lembrar que o processo de fabricação destes dois sistemas de reforço é bastante diferente e, além dos aspectos técnicos, os aspectos econômicos podem representar um importante fator para a escolha deste sistema.

Finalmente, a maior rigidez dos laminados teve, também, influência sobre o modo de ruptura destas vigas. Mesmo tendo sido controlado pelo descolamento do reforço e arrancamento do concreto do cobrimento, o dano causado à viga, após a ruptura, foi bastante severo.

## 5 Considerações Finais

A utilização dos compósitos de *CFRP* na reabilitação de estruturas de concreto armado representa o que existe de mais moderno, disponível atualmente, neste importante segmento da engenharia estrutural. Os resultados desse estudo confirmam integralmente esta constatação.

Os incrementos de resistência foram expressivos, com ganhos de até 255,6%. Além disso, as diferentes distribuições, orientações e soluções de ancoragem permitem explorar várias configurações e sua eficiência na elevação da resistência das vigas reforçadas.

De modo geral, o comportamento das vigas reforçadas foi controlado, basicamente, por dois modos de ruptura. O descolamento do reforço caracterizou-se como o modo de ruptura mais freqüente e está associado ao mecanismo de transferência de esforços entre concreto e reforço. No entanto, para as vigas que contavam com ancoragem suficiente, este modo de ruptura é evitado e a ruptura do reforço à tração passa a ser dominante. Existem, ainda, situações intermediárias, em que há uma combinação destes dois modos de ruptura.

O resultado mais expressivo na elevação da resistência foi alcançado pelas vigas que receberam o reforço contínuo orientado à 90° com a solução de ancoragem de envolvimento completo. Esta solução de ancoragem promoveu uma modificação fundamental no comportamento destas vigas. Em oposição a um modo de ruptura associado ao cisalhamento, estas vigas apresentaram uma ruptura clássica de flexão, através do esmagamento do concreto e conseqüente flambagem da armadura de compressão.

No caso particular das vigas reforçadas com tiras orientadas à 45°, a solução de ancoragem tipo "L" representou uma alternativa eficiente na elevação da resistência. No entanto, embora o desempenho das vigas reforçadas com mantas orientadas à 45° tenham sido compatíveis com as demais soluções, a execução destes reforços demonstrou ser bastante complexa, podendo inclusive, inviabilizar a adoção desta alternativa.

O emprego de reforços contínuos implica na utilização de maiores quantidades de reforço, porém, não necessariamente proporciona incrementos de resistência na mesma magnitude. Esta constatação, portanto, confirma a idéia da existência de um ponto de equilíbrio entre quantidade de reforço e desempenho, em função de características particulares de cada viga.

Finalmente, a utilização dos laminados pré-fabricados permite, também, incrementos significativos na resistência das vigas reforçadas. Contudo, em função de suas características, a única solução de ancoragem possível, neste caso, é a colagem do reforço somente na lateral. Esta restrição limita o desempenho das vigas reforçadas com os laminados, uma vez que o modo de ruptura é controlado pelo descolamento do reforço. Em algumas situações, portanto, a variedade de soluções de ancoragem decorrentes da utilização das mantas flexíveis pode representar uma vantagem deste sistema de reforço.

## 6 Agradecimentos

Os resultados apresentados nesse trabalho compõem a tese de doutoramento do primeiro autor. Agradecimentos ao CNPq pelo suporte financeiro e às empresas Master Builders Technologies do Brasil, Votorantim Cimentos S/A, Belgo-Mineira e Siderúrgica Gerdau S/A; pela doação de materiais empregados no programa experimental dessa tese.

## 7 Referências

- [1] BEBER, A. J. Avaliação do desempenho de vigas de concreto armado reforçadas com lâminas de fibra de carbono. Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1999. 108 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia.
- [2] NORRIS, T.; SAADATMANESH, H.; EHSANI, M. R. Shear and flexural strengthening of R/C beams with carbon fiber sheets. *Journal of Structural Engineering*, New York, ASCE. v.123, n.7, p.903-911, July 1997.
- [3] KARBHARI, V. M.; ZHAO, L. Use of Composites for 21st Century Civil Infrastructure. *Computer Methods Applied Mech. Engineering*. 2000. p. 433-454.
- [4] KHALIFA, A.; GOLD, W. J.; NANNI, A.; AZIZ, M. I. A. Contribution of Externally Bonded FRP to Shear Capacity of Flexural Members. *ASCE-Journal of Composites for Construction*, v. 2, n. 4, p. 195-203, Nov. 1998.
- [5] BEBER, A. J. Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono. Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 2003. 317 p. Tese de Doutorado em Engenharia.
- [6] CAROLIN, A. Strengthening of concrete structures with CFRP: shear strengthening and full-scale applications. Department of Civil and Mining Engineering – Division of Structural Engineering. Lulea University of Technology, 2001. Licentiate thesis.
- [7] SWAMY, R. N.; MUKHOPADHYAYA, P.; LYNSDALE, C. J. Strengthening for shear RC beams by external plate bonding. *The Structural Engineer*, London, v. 77, n.12, p. 19-30, Jun. 1999.
- [8] MBT-Master Builders Technologies. MBrace™ Composite Strengthening System – Engineering Design Guidelines. 2nd edition, 1998.
- [9] MACHADO, A.P. Reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono – características, dimensionamento e aplicação. São Paulo: Pini, 2002.
- [10] KEBLE, J.; SCHERER, J. Alternative structural strengthening with advanced composites. In: *INTERNATIONAL STRUCTURAL FAULTS AND REPAIR*, 8., 1999. London. Proceedings... Edinburgh: Engineering Technics Press, 1999. CD-ROM. MANUAL SBD.

