

Proposta de uma técnica de reforço ao corte com CFRP

Salvador J. E. Dias^{1†}, Joaquim A. O. Barros²

*Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil
Azurém, P – 4800-058 Guimarães, Portugal*

RESUMO

As mais recentes técnicas de reforço ao corte de vigas de betão armado com materiais compósitos são apresentadas no presente trabalho, tomando como base alguns dos trabalhos experimentais efectuados até ao momento. Uma nova técnica de reforço ao corte baseada na inserção de laminados de CFRP no betão de recobrimento das faces laterais de vigas de betão armado é proposta. O desempenho desta técnica de reforço foi avaliado por intermédio de uma campanha de ensaios em vigas de betão armado. Os resultados obtidos nos ensaios realizados são analisados e interpretados.

1. TÉCNICAS DE REFORÇO AO CORTE COM COMPÓSITOS DE CFRP

A necessidade de reabilitar, reparar e reforçar estruturas de betão armado aumentou consideravelmente nos últimos anos (*fib* - Bulletin 14, 2001). Existem fundamentados indícios de que nos próximos anos essa necessidade aumentará. As causas desta situação são várias: necessidade de mudança do tipo de utilização (aumento das cargas a actuar na estrutura); erros de projecto e/ou de construção; redução da resistência dos materiais resultante da sua degradação (carbonatação do betão e corrosão das armaduras); envelhecimento dos materiais; alterações nos códigos de dimensionamento com a introdução de disposições mais severas; ocorrência de acidentes (sismos, incêndios, explosões, cheias ou actos de vandalismo). Existem diferentes tipos de intervenção para fazer face aos problemas provocados pelas causas anteriormente enunciadas, destacando-se a demolição total ou parcial da estrutura, a imposição de medidas restritivas no seu uso, a modificação do seu sistema estrutural, a substituição ou introdução de novos elementos ou o reforço de elementos estruturais. A opção por um dos referidos tipos de intervenção passa, necessariamente, por uma análise técnica e económica da situação em causa.

Para o cenário de reforço de elementos estruturais, dependendo da solicitação em causa, pode ser necessário mobilizar vários tipos de sistemas de reforço. Concretamente, pode ser necessário aumentar a resistência à flexão, ao corte, ou à flexão e ao corte em simultâneo. Também podem existir cenários em que seja necessário aumentar o confinamento do betão.

Neste trabalho será abordado o reforço ao corte de elementos de betão. A necessidade de uma intervenção de reforço ao esforço transversal de um determinado elemento estrutural pode ser provocada por alguma das razões anteriormente indicadas. Além disso, refira-se

¹ Assistente

[†] Autor para quem a correspondência deverá ser enviada (sdias@civil.uminho.pt)

² Professor Auxiliar

também os casos de elementos estruturais que, posteriormente a uma operação de reforço à flexão, o seu modo de rotura passa a ser por corte. Esta ocorrência deve ser evitada dado que a rotura por corte é frágil e quase instantânea. Assim, à necessidade de um reforço à flexão pode, também, estar associada a necessidade de um reforço ao esforço transversal.

Tradicionalmente existem duas técnicas de reforço ao corte de vigas de betão armado, uma que recorre à utilização de armaduras exteriores, e uma outra em que as secções são encamisadas em betão armado. A utilização de armaduras exteriores (chapas de aço ou perfis metálicos) é uma técnica adequada quando há deficiência de armaduras transversais. A fixação destes elementos é geralmente efectuada com adesivos epoxídicos, os quais podem ser aplicados por espalhamento sobre as superfícies a fixar ou por injeção preenchendo os espaços entre a superfície da peça a reforçar e o elemento de reforço. A ligação pode ser complementada com buchas metálicas. De forma a garantir boas condições de ligação do reforço é necessário proceder a uma cuidadosa preparação, não somente da superfície de betão a reforçar, como também das chapas. Trata-se de uma técnica simples de executar e que recorre a materiais com comportamento bem conhecido. No entanto, apresenta alguns inconvenientes, nomeadamente: devido à corrosividade do aço há grande probabilidade da zona da colagem (interface betão-adesivo-aço) se deteriorar; dificuldade de manipulação de pesadas chapas de aço no local da obra (especialmente em superfícies curvas); necessidade de suportes durante o tempo de cura do adesivo; limitação do comprimento das chapas, por restrições do seu transporte, podendo dar origem à necessidade de execução de emendas. A técnica de encamisamento com betão armado consiste no aumento da secção transversal introduzindo-se uma armadura suplementar numa camada de betão que envolve a secção inicial. Face à adição de armaduras exteriores, esta técnica garante maior protecção ao fogo e à corrosão das armaduras suplementares. No entanto, o aumento das dimensões da secção transversal nem sempre é admissível do ponto de vista arquitectónico e pode causar restrições à manutenção do tipo de utilização da construção. Além disto, é necessário um determinado tempo até que o betão de encamisamento ganhe resistência e a estrutura possa ser posta em serviço.

A utilização de materiais compósitos de CFRP (Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono) no reforço estrutural está associada ao facto de se pretender evitar os aspectos negativos apontados anteriormente às técnicas de reforço tradicionais. Os materiais compósitos de CFRP apresentam elevada rigidez e resistência à tracção, baixo peso específico e bom comportamento à fadiga. O reduzido peso específico dos compósitos de CFRP facilita o seu transporte e manuseamento. A disponibilização destes materiais com dimensões quase ilimitadas em termos de comprimento, ao contrário do que acontece com as chapas de aço, elimina a necessidade de executar emendas no reforço. A elevada resistência à corrosão dos compósitos de CFRP permite a sua utilização em ambientes agressivos como, por exemplo, em zonas costeiras. As elevadas potencialidades dos materiais compósitos em termos mecânicos proporcionam soluções de reforço que poucas alterações introduzem na arquitectura inicial das estruturas, pois conseguem-se obter consideráveis aumentos da capacidade resistente dos elementos estruturais com recurso a pequenas quantidades de reforço. Além disto, existem materiais compósitos de CFRP que se adaptam perfeitamente a superfícies curvas, o que é difícil e oneroso de se conseguir por meio de chapas metálicas. A par disto, as técnicas de reforço utilizando materiais compósitos são de fácil e rápida execução.

Na Figura 1 apresentam-se alguns detalhes das técnicas de reforço ao corte com materiais compósitos de CFRP desenvolvidas até ao momento e que serão apresentadas de seguida, nomeadamente, a técnica que recorre à colagem externa de compósitos de CFRP (mantas e laminados) e a técnica que se baseia na inserção de varões de CFRP em entalhes realizados no betão de recobrimento.

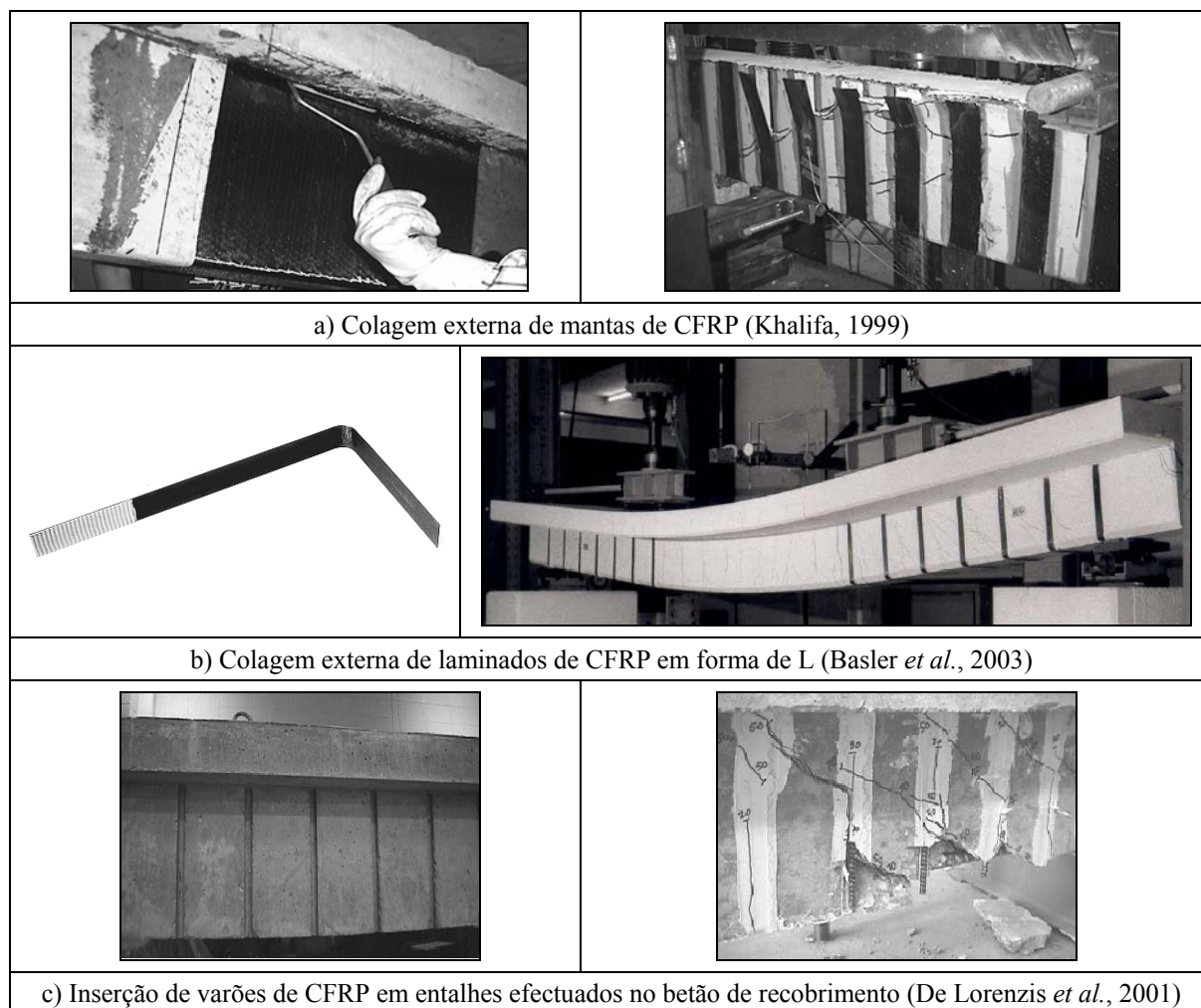


Figura 1 - Técnicas de reforço ao corte com compósitos de CFRP.

A colagem externa de compósitos de CFRP com as fibras orientadas transversalmente ao eixo da peça ou segundo a normal às potenciais fendas de corte permite aumentar a capacidade resistente ao esforço transversal do elemento. Na Figura 2 apresentam-se várias configurações que Khalifa (1999) sugere para o reforço ao corte de vigas de betão armado com mantas de CFRP. Estas tipologias distinguem-se quanto à configuração da superfície colada (Figura 2-a), distribuição do reforço de CFRP (Figura 2-b), orientação das fibras (Figura 2-c), sobreposição de camadas com diferente orientação das fibras (Figura 2-d) e quanto à adopção de mecanismos de ancoragem (Figura 2-e).

Uma outra alternativa de reforço ao corte proposta é a que se baseia na colagem externa de laminados de CFRP. Para esta solução destacam-se os laminados em forma de L (ver Figura 1-b) que apresentam uma extremidade rugosa por forma a melhorar a aderência do reforço à superfície de betão.

Diversos estudos experimentais, alguns deles descritos por Dias e Barros (2004-a), têm demonstrado que a colagem externa de compósitos de CFRP (mantas e laminados) permite aumentar consideravelmente a resistência ao corte de vigas de betão armado. No entanto, em resultado do descolamento prematuro do CFRP, o nível máximo de tensão mobilizado no reforço é bastante inferior à sua resistência última. Além disto, estes modos de rotura são frágeis e quase instantâneos. Por estes motivos, pela susceptibilidade dos CFRP colados externamente à acção do fogo, às condições ambientais adversas e a actos de vandalismo, novas técnicas de reforço ao corte com compósitos de CFRP têm vindo a ser propostas pela comunidade científica.

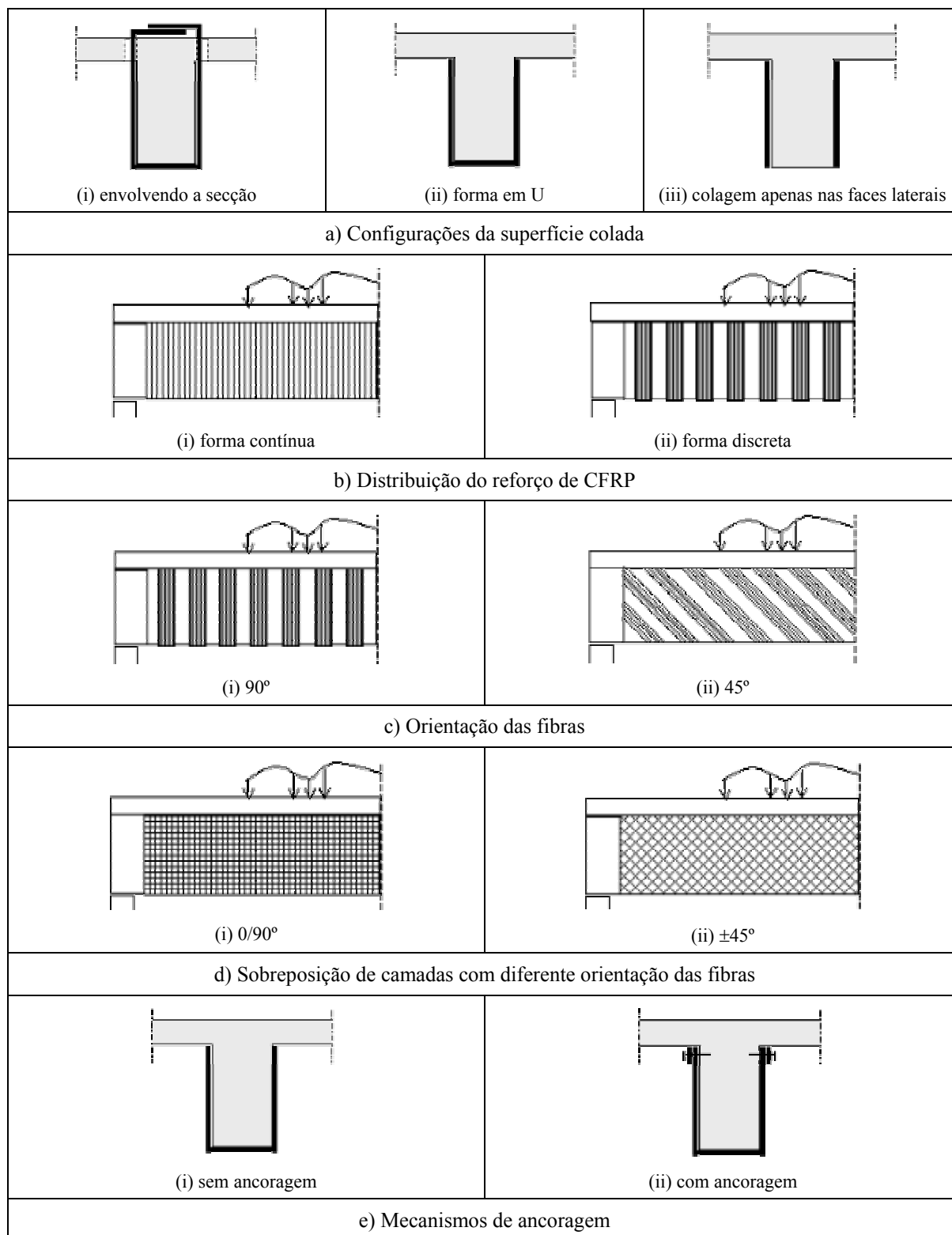


Figura 2 - Configurações de reforço ao corte com mantas de CFRP (Khalifa, 1999).

Com o objectivo de aumentar a eficácia dos compósitos de CFRP no reforço ao corte, De Lorenzis *et al.* (2001) utilizaram varões de CFRP inseridos em entalhes efectuados no betão de recobrimento das faces laterais de vigas de betão armado (ver Figura 1-c). Esta técnica de reforço permitiu aumentar significativamente a capacidade de carga das vigas. Além disto, esta técnica garante uma maior protecção do reforço, pois este encontra-se inserido no elemento e não colado externamente. Um dos aspectos menos positivos desta

técnica é a necessidade de ter de se efectuar no betão de recobrimento entalhes com dimensões suficientes para alojar o varão mais a espessura do adesivo. Face ao exposto, tornou-se evidente a necessidade de realizar estudos experimentais para avaliar o desempenho de novas técnicas de reforço ao corte com compósitos de CFRP de forma a colmatarem as lacunas existentes nas técnicas desenvolvidas até ao momento e anteriormente referidas.

2. PROPOSTA DE UMA TÉCNICA DE REFORÇO AO CORTE COM CFRP

Neste trabalho propõe-se uma técnica de reforço ao corte para vigas de betão armado baseada em procedimentos de reforço semelhantes aos utilizados por De Lorenzis *et al.* (2001) mas, em vez de varões de CFRP, são utilizadas faixas de laminado de CFRP inseridas em finos entalhes. Trata-se assim da aplicação, no reforço ao corte, da técnica já experimentada no reforço à flexão de elementos de betão armado (Figura 3). Os estudos efectuados (Ferreira, 2000; Fortes *et al.*, 2002 e Barros *et al.*, 2003) permitiram verificar tratar-se de uma técnica mais eficaz que as baseadas na colagem externa de CFRP, dado que a precocidade da descolagem do CFRP é retardada, sendo mesmo evitada em muitos casos, resultando níveis de deformação mais elevados nos CFRP e aumentos mais significativos na capacidade de carga dos elementos reforçados. No reforço à flexão, além do aumento da capacidade de carga, também se registou um aumento significativo da deformação dos elementos reforçados no momento da sua rotura. Ensaios de arranque em flexão revelaram que os valores médios das tensões de corte alcançados são significativamente superiores aos registados com técnicas baseadas na colagem exterior (Sena-Cruz *et al.*, 2002).

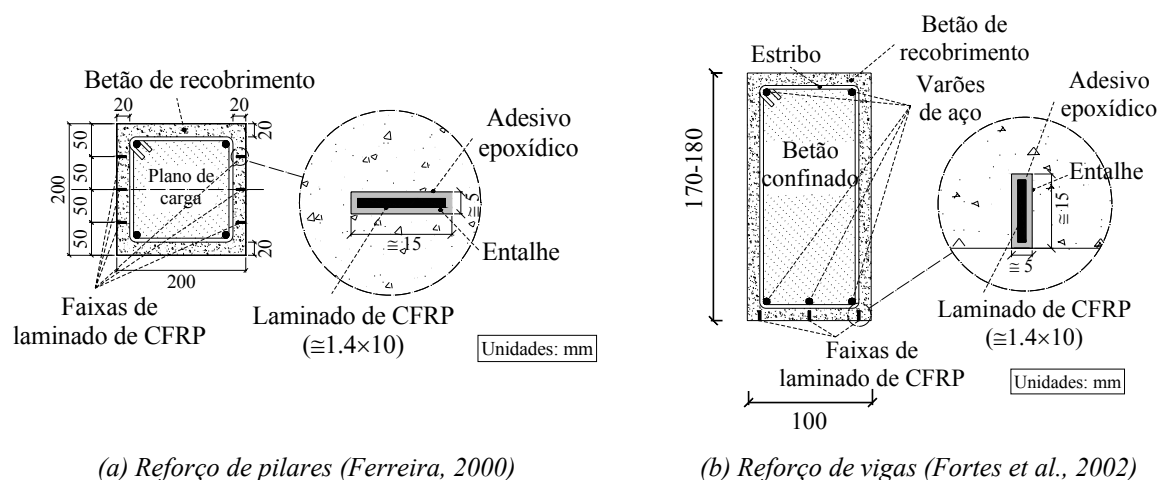


Figura 3 - Reforço à flexão por inserção de laminados de CFRP no betão de recobrimento.

Na técnica de reforço ao corte que se propõe neste trabalho, faixas de laminado de CFRP, com uma secção transversal de $1.4 \times 10 \text{ mm}^2$, são inseridas em entalhes efectuados no betão de recobrimento das faces laterais das vigas a reforçar. Os entalhes com cerca de 5 mm de largura e 15 mm de profundidade são executados com um equipamento que dispõe de um disco de corte e dispositivos de ajuste da profundidade e do alinhamento do entalhe. A fixação dos laminados de CFRP é efectuada por intermédio de um adesivo epoxídico (Figura 4). Nesta técnica, a área de colagem do laminado é dupla da mobilizada na técnica da colagem externa, o que permite aumentar o grau de fixação do laminado ao betão, mobilizando-se tensões mais elevadas no CFRP aquando da rotura do elemento reforçado. O facto dos laminados ficarem inseridos em entalhes aumenta a segurança em relação à actuação do fogo, aos efeitos dos agentes ambientais agressivos e a actos de vandalismo.

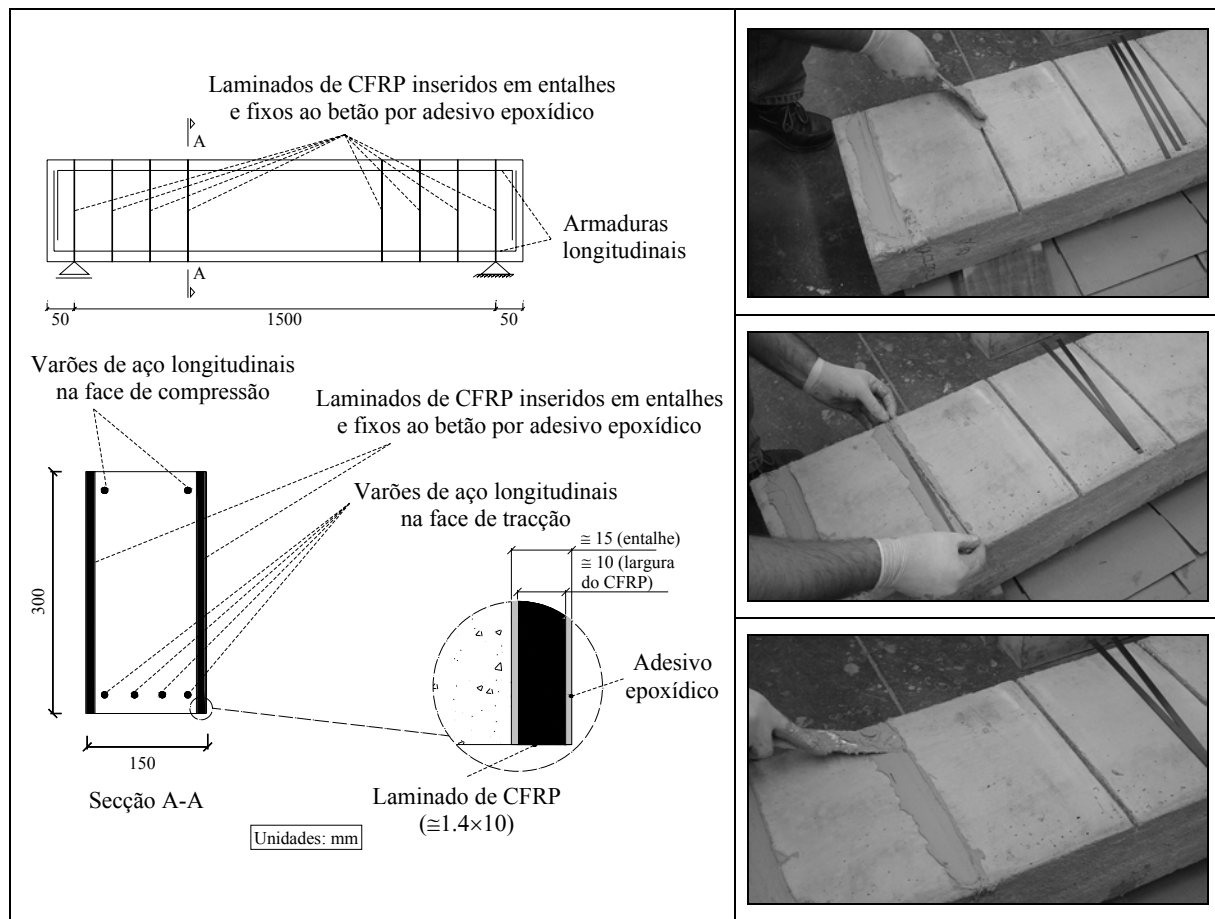


Figura 4 - Reforço ao corte de vigas de betão armado recorrendo à inserção de laminados de CFRP em entalhes efectuados no betão de recobrimento.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

A eficácia da técnica de reforço ao corte baseada na inserção de laminados de CFRP, descrita esquematicamente na Figura 4, foi avaliada por intermédio da realização, no Laboratório de Ensaio de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho (LEST), de uma campanha de ensaios experimentais em dez vigas de betão armado com secção transversal de $0.15 \times 0.3 \text{ m}^2$, comprimento de 1.6 m e vão de 1.5 m. Foram considerados dois tipos de armaduras longitudinais na face traccionada, um constituído por $4\phi 10$ (cinco vigas) e o outro por $4\phi 12$ (cinco vigas). Em todas as vigas utilizaram-se $2\phi 6$ para armadura longitudinal de compressão. As vigas tinham um vão de corte igual a duas vezes a altura da secção ($a/h = 2$).

O programa experimental englobou vigas sem qualquer armadura transversal, vigas com estribos de aço verticais, vigas em que o reforço ao corte foi materializado por intermédio de faixas discretas de manta de CFRP coladas externamente em forma de U, e vigas reforçadas ao esforço transversal com laminados de CFRP dispostos verticalmente ou inclinados a 45° , inseridos em entalhes efectuados no betão de recobrimento das faces laterais da viga. As vigas reforçadas com CFRP não continham armaduras transversais de aço. A quantidade de reforço nos vários sistemas utilizados foi determinada por forma a que o modo de ruína das vigas fosse por corte e para valores de cargas semelhantes (REBAP, 1983 e ACI Committee 440, 2001). Na Tabela 1 e nas Figuras 5 e 6 apresentam-se os dados necessários para a caracterização dos modelos de vigas ensaiados.

Tabela 1 - Características dos modelos ensaiados.

Vigas	Sistema de reforço ao esforço transversal
4 ϕ 10 longitudinais	VA10 -
	VAE-30 Estribos a 90° (6 ϕ 6, 2r *, 300 mm de espaçamento)
	VAM-19 Mantas de CFRP coladas externamente (forma de U, fibras orientadas a 90°, 8 faixas de 2 camadas com 25 mm de largura e 190 mm de espaçamento)
	VACV-20 Laminados de CFRP inseridos em entalhes verticais (16 laminados espaçados de 200 mm)
	VACI-30 Laminados de CFRP inseridos em entalhes inclinados a 45° (12 laminados espaçados de 300 mm)
4 ϕ 12 longitudinais	VA12 -
	VAE-15 Estribos a 90° (10 ϕ 6, 2r *, 150 mm de espaçamento)
	VAM-9.5 Mantas de CFRP coladas externamente (forma de U, fibras orientadas a 90°, 14 faixas de 2 camadas com 25 mm de largura e 95 mm de espaçamento)
	VACV-10 Laminados de CFRP inseridos em entalhes verticais (28 laminados espaçados de 100 mm)
	VACI-15 Laminados de CFRP inseridos em entalhes inclinados a 45° (24 laminados espaçados de 150 mm)

* 2r - estribos de dois ramos.

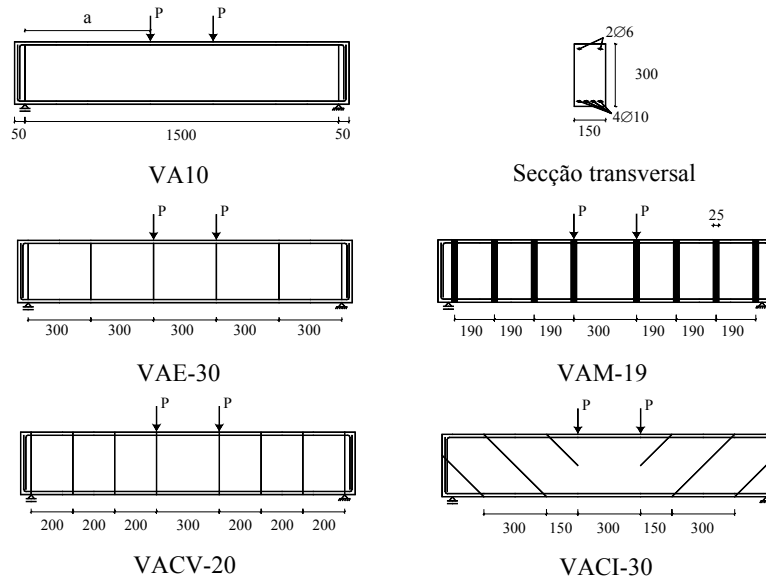


Figura 5 - Vigas ensaiadas com 4 ϕ 10 longitudinais (dimensões em mm).

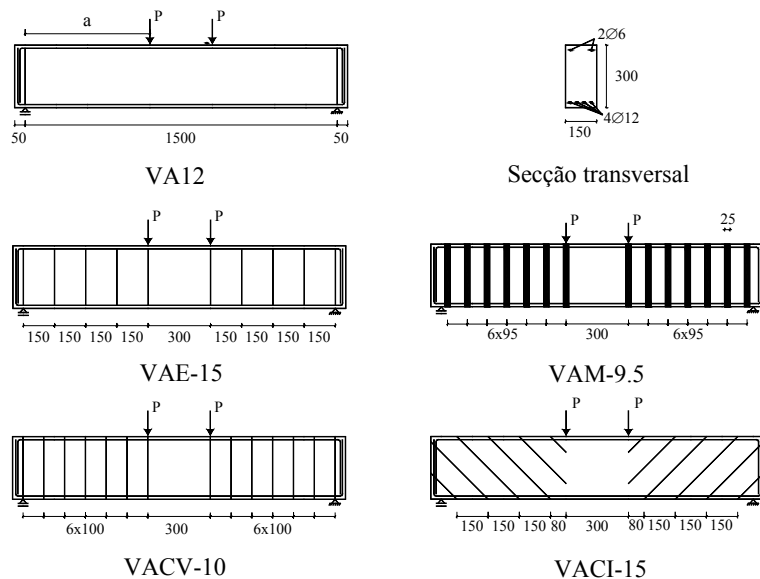


Figura 6 - Vigas ensaiadas com 4 ϕ 12 longitudinais (dimensões em mm).

A avaliação da resistência à compressão do betão das vigas foi efectuada experimentalmente aos 28 dias e à data da realização dos ensaios das vigas, a qual corresponde uma idade média de 227 dias. Para tal, efectuaram-se ensaios de compressão uniaxial sobre cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Nas vigas ensaiadas utilizaram-se armaduras de três tipos de varões de aço nervurado (varões com diâmetro de 6 mm, 10 mm e 12 mm), cujas principais propriedades foram avaliadas experimentalmente por intermédio de ensaios de tracção. Na Tabela 2 estão registados os valores médios das propriedades mecânicas mais significativas, obtidas experimentalmente, do betão e dos aços utilizados.

Tabela 2 - Principais características do betão e do aço (valores médios).

Tensão		Aos 28 dias		Data do ensaio das vigas	
Betão	f_{cm}	37.6 MPa (C30/37)*		49.2 MPa (227 dias)	
	Tensão	$\phi 6$ (longitudinal)	$\phi 6$ (transversal)	$\phi 10$	$\phi 12$
Aço	f_{sym}	622 MPa	540 MPa	464 MPa	574 MPa
	f_{sum}	702 MPa	694 MPa	581 MPa	672 MPa

* Classe de resistência do betão; Na Tabela f_{cm} representa o valor médio da resistência à compressão do betão enquanto f_{sym} e f_{sum} representam, respectivamente, os valores médios da tensão de cedência e da tensão de rotura das armaduras de aço.

Neste trabalho foram utilizados dois sistemas compósitos de CFRP unidireccionais, a manta flexível *curada "in situ"* e o laminado semi-rígido *pré-fabricado*. As características dos materiais constituintes dos sistemas de reforço adoptados foram obtidas das fichas técnicas disponibilizadas pelo fornecedor (Bettor MBT Portugal, 1999) e encontram-se resumidas na Tabela 3. A aplicação dos sistemas de reforços de CFRP utilizados (mantas e laminados) encontra-se detalhadamente descrita em Dias e Barros (2004-b).

Tabela 3 - Principais propriedades dos constituintes dos CFRP.

Sistema de CFRP			Principais propriedades				
Tipo	Constituinte	Designação	Resistência à tracção [MPa]	Módulo de elasticidade [GPa]	Extensão última (%)	Espessura (mm)	
Manta <i>curada "in situ"</i>	Primário	MBrace Primário	12	0.7	3.0	–	
	Resina	MBrace Saturante	54	3	2.5	–	
	Manta	MBrace Manta C5-30	3000	390	0.8	0.167	
	Adesivo	MBrace Adesivo	-	7	–	–	
Laminado <i>pré-fabricado</i>	Laminado	MBrace Laminado LM	(i)	2200	150	1.4	1.4
			(ii)	2286	166	1.3	

(i) - De acordo com o fornecedor (Bettor MBT Portugal, 1999); (ii) - Valores experimentais (Dias e Barros, 2004-b).

As vigas foram submetidas a quatro pontos de carga até à sua rotura. Na Figura 7 apresenta-se o esquema de ensaio das vigas. Para instrumentação utilizou-se uma célula de carga com capacidade de 300 kN (0.06% de linearidade), dois LVDT's de 25 mm de campo de medida e três LVDT's de 50 mm de campo de medida. Os ensaios foram controlados por intermédio do LVDT colocado a meio vão, tendo-se utilizado uma velocidade de deslocamento de 0.01 mm/s.

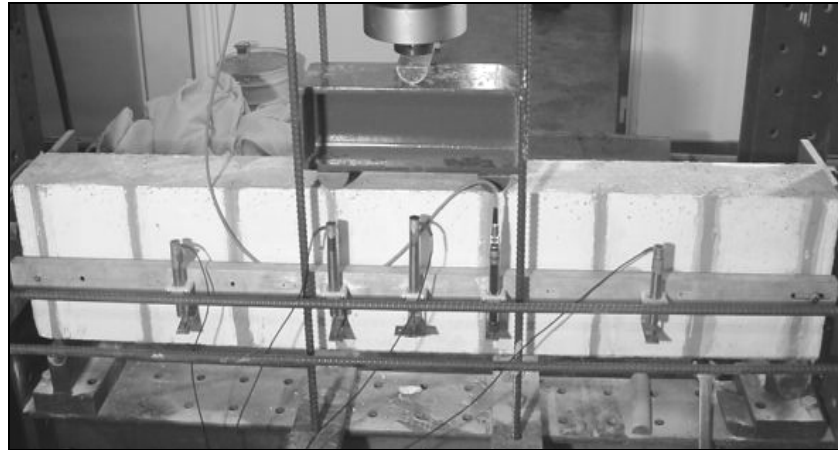


Figura 7 - Esquema geral do ensaio das vigas.

Na Figura 8 apresentam-se as curvas correspondentes à relação entre a carga total ($2P$) e o deslocamento a meio vão (δ) das vigas VA10, VAE-30, VAM-19, VACV-20 e VACI-30 (ver Figura 5). Na Tabela 4 apresentam-se, para cada um dos modelos anteriormente referidos, os valores registados para a carga total máxima (F_{max}). Atribuindo as designações $F_{max,VA10}$ e $F_{max,VAE-30}$ à carga total máxima registada na viga sem armadura transversal e na viga reforçada somente com estribos, respectivamente, determinaram-se os factores $F_{max}/F_{max,VA10}$ e $F_{max}/F_{max,VAE-30}$ indicados na Tabela 4. Nesta tabela apresentam-se, também, os valores dos factores δ_p , $\delta_{p,VA10}$ e $\delta_{p,VAE-30}$, em que δ_p é, para cada modelo de viga, o deslocamento a meio vão correspondente a $0.95F_{max}$ (ver exemplo da obtenção deste deslocamento na Figura 9), $\delta_{p,VA10}$ e $\delta_{p,VAE-30}$ são, respectivamente, os deslocamentos a meio vão correspondentes a $0.95F_{max,VA10}$ e $0.95F_{max,VAE-30}$.

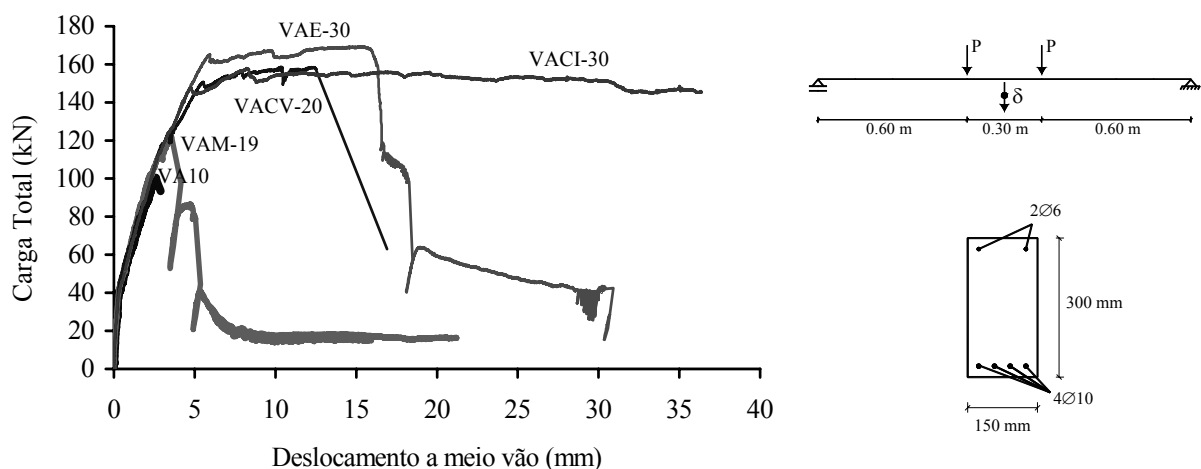


Figura 8 - Curvas carga total vs deslocamento a meio vão das vigas com $4\phi 10$ longitudinais.

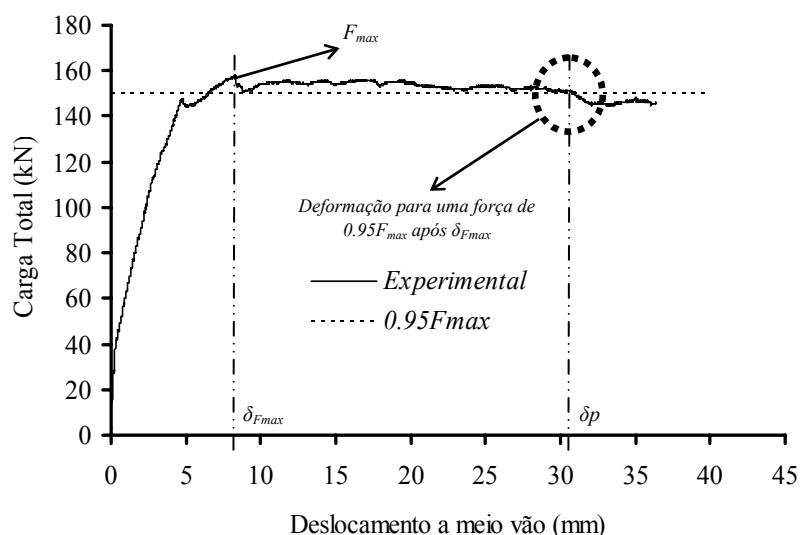


Figura 9 - Determinação do deslocamento a meio vão para uma carga de $0.95F_{max}$ após δ_{Fmax} .

Da análise dos resultados apresentados na Figura 8 e na Tabela 4 verifica-se que a participação dos compósitos de CFRP (mantas e laminados) proporcionou um aumento significativo da capacidade máxima de carga da viga de referência VA10 (sem qualquer reforço ao corte). Tendo por base os resultados obtidos na viga VA10 constata-se que os estribos permitiram um aumento da força F_{max} de 69%, enquanto na viga com faixas de manta (VAM-19) o incremento foi de 22% e nas vigas com laminados inseridos o incremento foi de aproximadamente 58%. Comparando a força máxima registada nas vigas reforçadas com compósitos de CFRP com a observada na viga VAE-30 (com estribos) verifica-se que nas vigas VAM-19, VACV-20 e VACI-30 alcançou-se um valor 28%, 6% e 7% inferior, respectivamente.

O melhor desempenho dos laminados aplicados com uma inclinação de 45° foi evidente em termos de deformação registada na rotura da viga. Considerando como indicador de capacidade de deformação o deslocamento correspondente a δ_p , constata-se que, quando comparado com o deslocamento de pico verificado na viga VA10 ($\delta_{p,VA10}$), o deslocamento de pico registado nas vigas VAE-30, VACV-20, VACI-30 e VAM-19 foi 480%, 359%, 1006% e 34% superior, respectivamente, pelo que a viga reforçada com laminados inclinados a 45° introduziu um acréscimo de capacidade de deformação 91% superior ao acréscimo proporcionado pela viga estribada.

Tabela 4 - Resultados relevantes das vigas com $4\phi 10$ longitudinais.

Vigas	F_{max} [kN]	$F_{max}/F_{max,VA10}$	$F_{max}/F_{max,VAE-30}$	δ_p [mm]	$\delta_p/\delta_{p,VA10}$	$\delta_p/\delta_{p,VAE-30}$
VA10	100.40	1.00	0.59	2.80	1.00	0.17
VAE-30	169.35	1.69	1.00	16.25	5.80	1.00
VAM-19	122.06	1.22	0.72	3.75	1.34	0.23
VACV-20	158.64	1.58	0.94	12.86	4.59	0.79
VACI-30	157.90	1.57	0.93	30.96	11.06	1.91

Na Figura 10 apresentam-se os modos de rotura verificados nas cinco vigas com 4 ϕ 10 longitudinais. A viga VA10 rompeu pela ocorrência de uma fenda de corte num dos vãos de corte, após se ter desenvolvido um pequeno número de fendas de flexão. Na viga estribada (VAE-30), após o desenvolvimento de fendas de flexão (em maior número que no caso anterior) surgiram fendas de corte em cada um dos vãos de corte. A rotura acabou por ocorrer por abertura excessiva de uma dessas fendas, onde se deu a rotura de um dos estribos aí localizados. O aumento da abertura da fenda de corte foi acompanhado pelo fecho das restantes fendas. A viga reforçada com faixas de manta (VAM-19) rompeu violentamente, com destacamento da manta, logo após a formação da fenda de corte. As vigas reforçadas com laminados inseridos no betão de recobrimento apresentaram modos de rotura menos frágeis que o verificado na viga VAM-19 (manta), principalmente a viga VACI-30, cuja rotura foi por flexão. Após atingida a carga máxima, as vigas reforçadas com laminados inseridos mantiveram essa carga até flechas de valor elevado, principalmente a viga VACI-30. Esta elevada capacidade de retenção de resistência não foi observada na viga VAM-19 (Figura 8).



Figura 10 - Modos de rotura verificados nas vigas com 4 ϕ 10 longitudinais.

Na Figura 11 apresentam-se as curvas correspondentes à relação entre a carga total (2P) e o deslocamento a meio vão (δ) das vigas VA12, VAE-15, VAM-9.5, VACV-10 e VACI-15 (ver Figura 6). Na Tabela 5 são apresentados indicadores da eficácia das técnicas de reforço ao corte em termos de aumento da capacidade máxima de carga (F_{max}) e de deformação na rotura das vigas (δ_p). Atribuindo as designações $F_{max,VA12}$ e $F_{max,VAE-15}$ à carga máxima registada na viga sem qualquer armadura transversal e na viga reforçada somente com estribos, respectivamente, determinaram-se os factores $F_{max}/F_{max,VA12}$ e $F_{max}/F_{max,VAE-15}$ indicados na Tabela 5. Designando por $\delta_{p,VA12}$ e $\delta_{p,VAE-15}$ os deslocamentos correspondentes a $0.95F_{max,VA12}$ e $0.95F_{max,VAE-15}$, determinaram-se os factores $\delta_p/\delta_{p,VA12}$ e $\delta_p/\delta_{p,VAE-15}$ incluídos na Tabela 5.

Da análise dos resultados apresentados na Figura 11 e na Tabela 5 verifica-se que a presença dos compósitos de CFRP (mantas e laminados) proporcionou um aumento significativo da capacidade máxima de carga da viga de referência VA12 (sem qualquer reforço ao corte). Tendo por base os resultados da viga VA12 constata-se que os estribos permitiram um aumento da força F_{max} de 85%, enquanto os CFRP garantiram incrementos de 54% a 125%, sendo o maior valor o registado na viga com laminados inclinados (VACI-15) e o menor na viga com faixas de manta (VAM-9.5). Comparando a força F_{max} registada nas

vigas reforçadas com laminados de CFRP com a observada na viga VAE-15 (com estribos) verifica-se que na viga VACV-10 atingiu-se um valor 9% superior e na viga VACI-15 registou-se um valor 22% superior. Para o caso da viga VAM-9.5 o valor de F_{max} obtido foi 17% inferior ao verificado na viga VAE-15.

O melhor desempenho dos laminados aplicados a 45° também é notório em termos de capacidade de deformação na rotura da viga. Quando comparado com o deslocamento de pico verificado na viga VA12 ($\delta_{p,VA12}$), o deslocamento de pico registado na viga VAE-15 foi 131% superior, enquanto nas vigas reforçadas com laminados inclinados, verticais e com faixas de manta foi 329%, 145% e 79% superior, respectivamente, isto é, a viga reforçada com laminados inclinados a 45° proporcionou um acréscimo de capacidade de deformação 85% superior ao acréscimo proporcionado pela viga estribada.

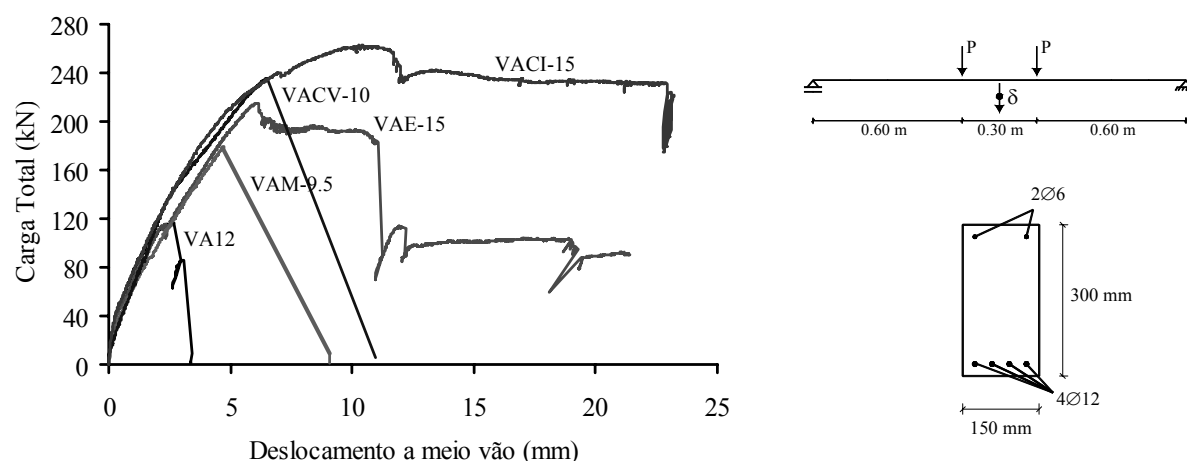


Figura 11 - Curvas carga total vs deslocamento a meio vão das vigas com 4 ϕ 12 longitudinais.

Tabela 5 - Resultados relevantes das vigas com 4 ϕ 12 longitudinais.

Vigas	F_{max} [kN]	$F_{max}/F_{max, VA12}$	$F_{max}/F_{max, VAE-15}$	δ_p [mm]	$\delta_p/\delta_{p,VA12}$	$\delta_p/\delta_{p,VAE-15}$
VA12	116.50	1.00	0.54	2.74	1.00	0.43
VAE-15	215.04	1.85	1.00	6.34	2.31	1.00
VAM-9.5	179.54	1.54	0.83	4.91	1.79	0.77
VACV-10	235.11	2.02	1.09	6.70	2.45	1.06
VACI-15	262.38	2.25	1.22	11.75	4.29	1.85

Na Figura 12 apresentam-se os modos de rotura verificados nas cinco vigas com 4 ϕ 12 longitudinais. As primeiras fendas que surgiram na viga VA12 foram de flexão. O aumento do carregamento provocou o aparecimento de duas fendas de corte (uma em cada vão de corte). A ruína da viga ocorreu pela abertura excessiva de uma dessas fendas. Na viga estribada (VAE-15), após o desenvolvimento de fendas de flexão (em maior número que no caso anterior) surgiram fendas de corte em cada um dos vãos de corte. A ruína acabou por ocorrer por abertura excessiva de uma dessas fendas, onde se deu a rotura de um dos estribos aí localizados. Em ambas as vigas, o aumento da abertura da fenda de corte foi acompanhado pelo fecho das restantes fendas. A viga reforçada com faixas de manta (VAM-9.5) rompeu violentamente, com destacamento da manta, logo após a formação da fenda de rotura por

corde. As vigas reforçadas com laminados inseridos apresentaram modos de rotura menos frágeis que o verificado na viga VAM-9.5 (manta), especialmente a viga VACI-15, cuja rotura foi por flexão. Após atingir a carga máxima, a viga reforçada com laminados inseridos em entalhes inclinados manteve essa carga até flechas de valor elevado (Figura 11).



Figura 12 - Modos de rotura verificados nas vigas com 4 ϕ 12 longitudinais.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposta uma nova técnica de reforço ao corte de vigas de betão armado por intermédio da inserção de laminados de CFRP em entalhes efectuados no betão de recobrimento. O programa experimental efectuado para a validação da técnica de reforço proposta permite que sejam avançadas as conclusões seguintes:

- a utilização de compósitos de CFRP como elementos resistentes ao esforço transversal, colados externamente (mantas) ou inseridos no betão de recobrimento (laminados), permite aumentos significativos de capacidade máxima de carga de vigas de betão armado com rotura por corte;

- de entre as técnicas de reforço ao corte com CFRP, a que permitiu maior incremento da carga máxima foi a baseada na inserção de laminados no betão de recobrimento das faces laterais das vigas. Tendo por base o comportamento registado nos modelos não reforçados, verificou-se que a capacidade de carga dos modelos reforçados com faixas de manta e com laminados inseridos aumentou, em média, 38% e 85%, respectivamente;

- de entre as técnicas de reforço ao corte com CFRP, a que permitiu maior incremento de capacidade de deformação das vigas foi a baseada na inserção de laminados em entalhes efectuados no betão de recobrimento das faces laterais das vigas. Tendo por base o comportamento registado nos modelos não reforçados, verificou-se que a capacidade de deformação dos modelos reforçados com faixas de manta e com laminados inseridos aumentou, em média, 56% e 460%, respectivamente;

- as vigas reforçadas com faixas de laminado apresentaram valores de carga máxima e capacidade de deformação superiores aos registados nas vigas estribadas. Tendo por base os resultados obtidos nos modelos não reforçados, verificou-se que os modelos reforçados com estribos convencionais e com laminados de CFRP apresentaram um aumento médio da carga máxima de 77% e 86%, respectivamente, e uma capacidade de deformação 305% e 460% superior, respectivamente;

- após a carga de pico, as vigas reforçadas com laminados inseridos no betão de recobrimento apresentaram uma capacidade de carga residual superior ao registado nas restantes vigas;

- os modos de rotura das vigas reforçadas ao esforço transversal com laminados inseridos no betão de recobrimento são menos frágeis que os verificados nas vigas reforçadas com mantas coladas externamente;

- quando comparada com a técnica que recorre à colagem externa de mantas de CFRP, a que se baseia na inserção de laminados de CFRP no betão de recobrimento é mais fácil e rápida de executar, pelo que mais económica. Além disto, este sistema de reforço fica mais protegido à acção do fogo, às condições ambientais agressivas e a actos de vandalismo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores manifestam os seus agradecimentos à colaboração prestada pela empresa UNIBETÃO (Central de Braga) na betonagem dos modelos e pelas empresas BeTTor MBT Portugal e S&P Reinforcement pela prestabilidade e fornecimento dos sistemas de CFRP.

6. REFERÊNCIAS

ACI Committee 440, 2001, “*Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*”, American Concrete Institute, October, 112 pp.

Barros, J.A.O., Sena-Cruz, J.M., Dias, S.J.E., Ferreira, D.R.S.M. e Fortes, A.S., 2003, “*Investigação no âmbito da utilização de materiais compósitos no reforço de estruturas de betão*”, Vº Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, São Paulo, Brasil.

Basler, M., White, D. e Desroches, M., 2003, “*Shear strengthening with bonded CFRP L-shaped plates*”, Field Applications of FRP Reinforcement: Case Studies, ACI International SP-215, Editors: Sami Rizkalla and Antonio Nanni, pp. 373-384.

Bettor MBT Portugal, 1999, “*Sistema Compósito MBrace*”, Fichas técnicas, Lisboa.

De Lorenzis, L. e Nanni, A., 2001, “*Shear strengthening of reinforced concrete beams with near-surface mounted fiber-reinforced polymer rods*”, ACI Structural Journal, Vol. 98, nº 1, January-February, pp. 60-68.

Dias, S.J.E. e Barros, J.A.O., 2004-a, “*Materiais compósitos no reforço ao corte de vigas de betão armado*”, Relatório Técnico 04-DEC/E-03, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Fevereiro, 74 pp.

Dias, S.J.E. e Barros, J.A.O., 2004-b, “*Desempenho de distintas técnicas de reforço ao corte com compósitos de CFRP*”, Relatório Técnico 04-DEC/E-08, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Maio, 109 pp.

Ferreira, D.R.S.M., 2000, “*Pilares de betão armado reforçados com laminados de fibras de carbono*”, Tese de Mestrado, Escola de Engenharia da Universidade do Minho.

fib - Bulletin 14, 2001, “*Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*”, Technical report by Task Group 9.3 FRP (Fiber Reinforced Polymer) reinforcement for concrete structures, Fédération Internationale du Béton - fib, July, 130 pp.

Fortes, A.S., Barros, J.A.O. e Padaratz, I.J., 2002, “*Vigas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento*”, Relatório 02-DEC/E-13, Universidade do Minho, Junho, 32 pp.

Khalifa, A., 1999, “*Shear Performance of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Advanced Composites*”, PhD. Thesis, Structural Engineering Department, Alexandria University, Egypt.

REBAP, 1983, “*Regulamento de estruturas de betão armado e pré-esforçado*”, Decreto-Lei nº 349-C/83 de 30 de Julho, edição Porto Editora, Porto, 211 pp.

Sena-Cruz, J. e Barros, J.A.O., 2002, “*Caracterização experimental da ligação de laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento*”, Relatório Técnico 02-DEC/E-15, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Setembro, 54 pp.