

MATERIAIS COMPÓSITOS NO REFORÇO DE ESTRUTURAS

Joaquim Barros

Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Portugal

RESUMO

Neste trabalho faz-se uma breve apresentação dos materiais compósitos (FRP) utilizados no reforço de estruturas e das principais técnicas de reforço com FRP. Uma nova técnica de reforço à flexão e ao corte tem sido desenvolvida e investigada durante os últimos anos no DEC-EEUM. O programa experimental efectuado é resumidamente descrito, e alguns dos resultados mais significativos são apresentados.

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de reabilitar, reparar e reforçar estruturas de betão armado aumentou consideravelmente na última década. 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 ou ocorrência de acidentes (sismos, incêndios, explosões, cheias ou actos de vandalismo). A utilização de materiais compósitos de FRP (Polímeros Reforçados com Fibras - *Fiber Reinforced Polymers*) no reforço estrutural deriva de se pretender evitar os aspectos menos positivos apontados às técnicas de reforço tradicionais (Dias e Barros 2004). De facto, a utilização de FRP no reforço de estruturas constitui uma técnica de fácil e simples execução, em que a arquitectura inicial da construção é marginalmente afectada. Além disto, os FRP têm baixo peso específico, apresentam elevadas resistências mecânicas e são imunes à corrosão.

2. MATERIAIS COMPÓSITOS UTILIZADOS NO REFORÇO DE ESTRUTURAS

Os materiais compósitos de FRP são constituídos, essencialmente, por fibras embebidas numa matriz polimérica. As fibras apresentam-se sob a forma de filamentos de pequeno diâmetro, têm módulo de elasticidade e resistência à tracção elevados, baixa densidade e apresentam comportamento frágil. As fibras podem ser dispostas apenas numa direcção (compósitos de FRP unidireccionais) ou em várias direcções (compósitos de FRP bi- ou multi-direccionais). As fibras contínuas mais correntes nos FRP para aplicações em engenharia civil são de vidro (G), de aramida (A) e de carbono (C), sendo os respectivos compósitos denominados na língua Inglesa por GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymers* - Polímeros Reforçados com Fibras de Vidro), AFRP (*Aramid Fiber Reinforced Polymers* - Polímeros Reforçados com Fibras de Aramida) e CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymers* - Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono). De entre estes três tipos de fibras, as de carbono são as que apresentam melhores propriedades mecânicas, são as mais resistentes à acção de agentes químicos, são imunes à corrosão e não absorvem água. As fibras de vidro são as de menor custo, têm maior peso específico, apresentam grande sensibilidade a meios alcalinos e têm menor resistência a acções

de fadiga. As fibras de aramida apresentam dificuldades de moldagem, têm baixa resistência à compressão, são sensíveis à fluência, à acção dos raios ultra-violetas e às temperaturas elevadas. As inúmeras vantagens que as fibras de carbono apresentam, em relação às de aramida e às de vidro, justificam que sejam as mais utilizadas na execução de reforços estruturais com materiais compósitos. Na Figura 1 (ACI 440R-96, 1996) apresentam-se diagramas tensão vs extensão representativos do comportamento à tracção uniaxial dos seguintes materiais: aço convencional tipo A500, cordões de armadura de pré-esforço, fibras de carbono de elevado módulo de elasticidade (HM), fibras de carbono de elevada resistência (HS), fibras de aramida e fibras de vidro. Na Tabela 1 (Carolin, 2003) apresentam-se valores “típicos” de propriedades do betão, do aço e das fibras de carbono, vidro e aramida. Verifica-se que a densidade das fibras é bastante inferior à dos materiais convencionais, enquanto a resistência das fibras é significativamente superior à destes materiais. As fibras de carbono podem alcançar valores de módulo de elasticidade superiores a 600 GPa.

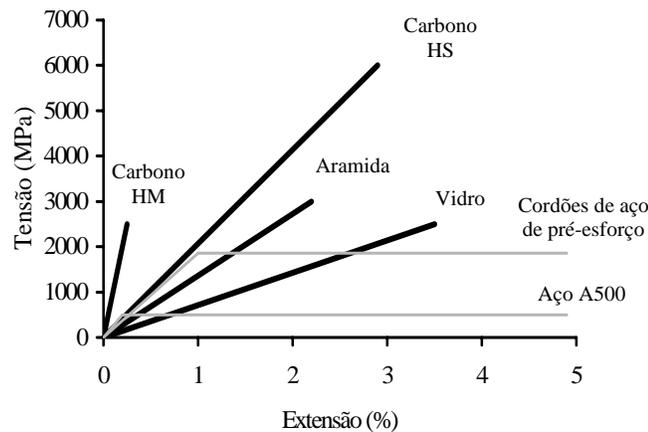


Figura 1 - Diagrama tensão vs extensão de distintos tipos de fibras, do aço convencional (A500) e de cordões de aço de pré-esforço.

Tabela 1 - Propriedades típicas do betão, do aço e de fibras de carbono.

Material	Módulo de elasticidade [GPa]	Resistência à tracção [MPa]	Densidade [Kg/m ³]
Betão	20-40	1-3	2400
Aço	200-210	240-690	7800
Fibras de vidro (E)	69-72	1860-2680	1200-2100
Fibras de carbono	200-800	1380-6200	1500-1600
Fibras de aramida	69-124	3440-4140	1200-1500

A matriz é a segunda componente dos materiais compósitos de FRP, tendo por função garantir que as fibras funcionem em conjunto, protegendo-as das agressões ambientais, dos danos mecânicos e dos fenómenos de instabilidade. Para a matriz, a escolha tem recaído em resinas termoendurecíveis, do tipo epoxi, devido às excelentes propriedades em termos de aderência à maior parte dos materiais, de resistência quer mecânica quer à agressividade do meio e, ainda, pelo facto de não absorverem água. Na Tabela 2 registam-se algumas das propriedades dos dois tipos de resinas mais utilizadas nos materiais compósitos de FRP: as de polyester e as de epoxi (Carolin, 2003).

Tabela 2 - Propriedades de resinas utilizadas em materiais compósitos.

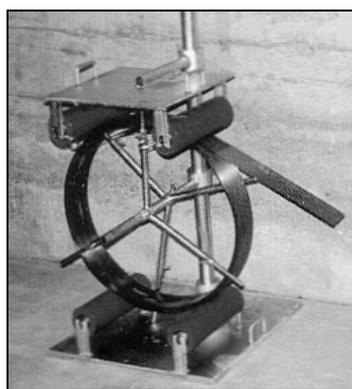
Resina	Módulo de elasticidade à tracção [GPa]	Resistência à tracção [MPa]	Extensão na rotura [%]	Densidade [Kg/m ³]
Polyester	2.1-4.1	20-100	1.0-6.5	1000-1450
Époxi	2.5-4.1	55-130	1.5-9.0	1100-1300

Dado que os compósitos em fibra de carbono (CFRP) são os mais utilizados no reforço estrutural, neste trabalho dar-se-á especial relevo aos sistemas de reforço com CFRP.

Os sistemas *pré-fabricados* e os sistemas *curados "in situ"* são, de entre os vários sistemas de reforço com CFRP, os mais frequentemente utilizados. Os sistemas *pré-fabricados* são fornecidos sob a forma de perfis e podem apresentar vários formatos, destacando-se a forma de varão (secção circular) e a de laminado semi-rígido (secção rectangular ou quadrada), ambos com as fibras no sentido longitudinal do elemento (reforço unidireccional). Os restantes constituintes deste sistema de reforço são o produto de colagem (adesivo epoxi) e, em alguns casos, o primário para melhorar a aderência dos CFRP à superfície do elemento a reforçar. Na Figura 3 apresentam-se exemplares de varões e laminados de CFRP unidireccionais, constituintes dos sistemas *pré-fabricados*.



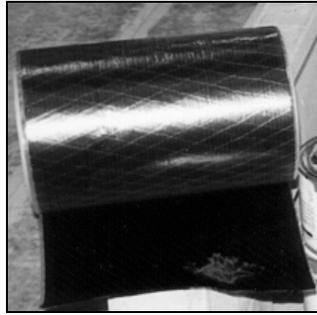
a) Varões de CFRP



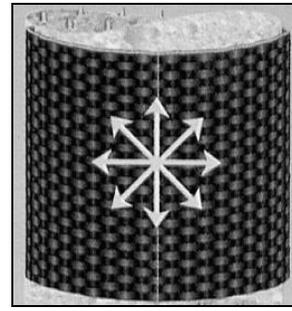
b) Laminado de CFRP

Figura 2 - Sistemas *pré-fabricados*.

Nos sistemas *curados "in situ"*, a matriz e as fibras são fornecidas em separado e o processo de fabrico do compósito de CFRP (matriz + fibras) é efectuado na zona a reforçar. Com a resina de saturação efectua-se a impregnação plena das fibras e a ligação ao substracto de betão (só após o endurecimento da resina é que se obtém o compósito de CFRP). Em alguns casos, nestes sistemas de reforço também se utiliza o primário. Os sistemas *curados "in situ"* são classificados, em termos da direcção que as fibras apresentam, em mantas (fibras dispostas unidireccionalmente) e tecidos (fibras dispostas em várias direcções). Ao contrário dos varões e dos laminados, as mantas e os tecidos são materiais flexíveis, sendo assim apropriados para aplicações em superfícies curvas. Na Figura 3 apresentam-se exemplares de manta unidireccional e de tecidos de CFRP, constituintes dos sistemas *curados "in situ"*, bem como um exemplo de um sistema de CFRP *curado "in situ"* (manta). As propriedades mais relevantes dos constituintes de alguns dos sistemas de compósitos de CFRP actualmente disponíveis no mercado nacional estão disponíveis em outro trabalho (Dias e Barros 2004)



a) Manta de CFRP unidireccional



b) Tecido de CFRP

Figura 3 - Sistemas curados "in situ".

3. TÉCNICAS DE REFORÇO

A técnica de reforço mais correntemente utilizada baseia-se na colagem externa de sistemas de FRP, devendo a direcção das fibras ficar o mais coincidente possível com a direcção das tensões de tracção. Esta técnica tem sido utilizada no reforço à flexão e ao corte (ACI 2002, Juvandes *et al.* 2001, Barros e Dias 2003). A aplicação de sistemas compósitos de CFRP no reforço de elementos de betão segundo a técnica da colagem externa envolve essencialmente três tarefas (Dias e Barros, 2004):

- preparação da superfície do elemento de forma a garantir que a base tenha boas condições de aderência. No caso do sistema curado "in situ" a superfície deve ser esmerilada, enquanto que no caso dos laminados a superfície do elemento deve ser boiardada com jacto de areia ou ser "picotada" com um martelo de agulhas. De seguida, a superfície tratada deve ser limpa por intermédio da aplicação de ar comprimido. Em alguns sistemas de reforço recomenda-se a aplicação de uma camada de primário, de forma a melhorar a aderência dos CFRP à superfície do elemento a reforçar;
- colagem propriamente dita do reforço;
- controlo de qualidade da técnica de reforço antes, durante e após a aplicação.

Existe um conjunto de medidas a tomar antes, durante e após a aplicação do reforço de forma a minimizar os riscos de se proceder a um deficiente reforço, designadamente:

- a avaliação da qualidade do betão da superfície do elemento estrutural a reforçar deve ser efectuada recorrendo a ensaios de tracção directa de "pull-off". Para o caso do sistema curado "in situ" recomenda-se que o betão apresente uma resistência à tracção superficial superior a 1.0 MPa e, para o sistema pré-fabricado, a referida resistência dever ser superior a 1.5 MPa;
- todas as irregularidades da superfície a reforçar devem ser tratadas, utilizando para tal uma argamassa de regularização designada por "putty";
- a base do betão deve estar limpa e seca, não devendo o teor máximo de humidade exceder 4%. Deve estar isenta de gorduras e óleos e não deve apresentar partículas soltas;
- a humidade relativa da superfície de betão não deve ser superior a 80% na altura da aplicação do reforço;
- a temperatura do ar deve ser, no mínimo, de 10°C e superior, em 3°C, à temperatura que origina a formação de orvalho;

- é recomendado a fixação de um limite superior para a amplitude térmica esperada numa aplicação normal da construção (T_c) de valor igual ao da temperatura de transição vítrea (T_g) das resinas ou dos adesivos, reduzido de 10°C a 20°C [$T_c \cong T_g - 10^\circ\text{C}$ (a 20°C)];
- as misturas das duas componentes (resina e endurecedor) fornecidas pelo fabricante devem ser efectuadas atendendo às especificações técnicas, quer em termos de dosagens como no modo de mistura;
- deve ser respeitado o tempo prático de utilização (“pot-life”) das resinas e adesivos;
- na aplicação do sistema de manta deve ser garantido o alinhamento das fibras e deve-se evitar a formação de bolhas de ar;
- após a colagem do laminado, deve-se verificar, aplicando pancadas suaves, que não existem vazios entre o adesivo e o laminado;
- o reforço deve ser pintado de forma a proteger a matriz da acção dos raios ultra-violetas.

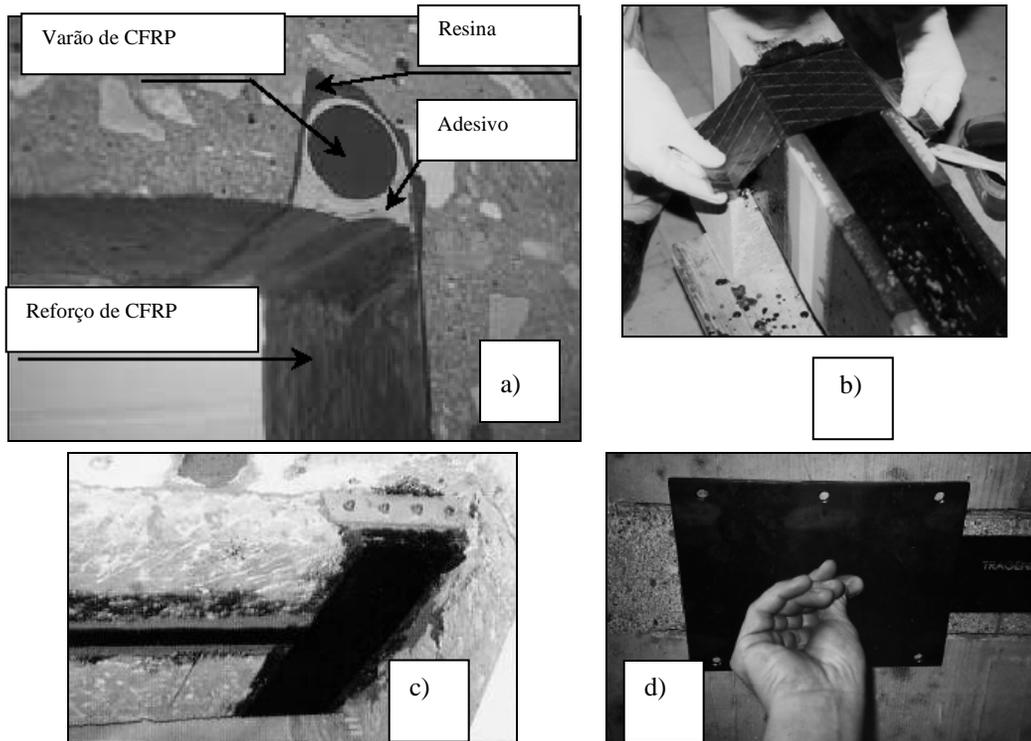


Figura 4 - Mecanismos exteriores de fixação do reforço de CFRP: a) Khalifa, 1998; b) Dias, 2001; c) Belbetões, 2002 e d) S&P, 2002.

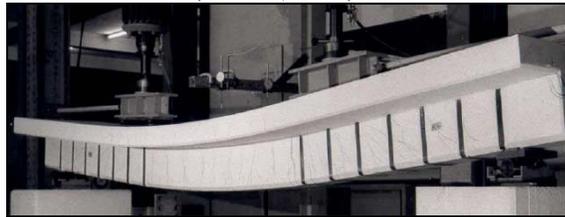
De entre os modos de ruína que se têm verificado em ensaios experimentais com elementos de betão armado reforçados por intermédio da colagem externa de compósitos de CFRP, o mais frequente tem sido o que conduz à perda de aderência entre o CFRP e o betão, resultando ruínas prematuras por destacamento dos CFRP. Constata-se assim que, frequentemente, as tensões instaladas nos CFRP são bastante inferiores à sua resistência, o que origina um desaproveitamento do reforço. Na tentativa de se evitar a ocorrência de modos de ruína prematuros e, simultaneamente, incrementar a ductilidade e a capacidade de carga última dos

elementos reforçados, têm sido utilizados mecanismos exteriores de fixação do reforço longitudinal. Na Figura 4 apresentam-se alguns exemplos, já utilizados, de mecanismos exteriores de fixação do reforço de CFRP (Figura 4-a) e 4-b) para o caso de mantas; Figura 4-c) e 4-d) para o caso de laminados).

Na Figura 5 apresentam-se aspectos de reforço ao corte com materiais compósitos de CFRP, segundo 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. Uma das técnicas de reforço, aceite recentemente, é a que consiste na colagem externa com mantas de CFRP (Figura 5-a)). A operação de aplicação de reforço ao corte segundo esta técnica envolve as tarefas indicadas para o caso do reforço à flexão, descritas no início deste capítulo.



a) Colagem externa de mantas de CFRP (Khalifa, 1999)



b) Colagem externa de laminados de CFRP em forma de L (EMPA, 1998 e Basler *et al.*, 2003)



c) Inserção de varões de CFRP em entalhes efectuados no betão de recobrimento (De Lorenzis *et al.*, 2001)

Figura 5 - Reforço ao corte com compósitos de CFRP.

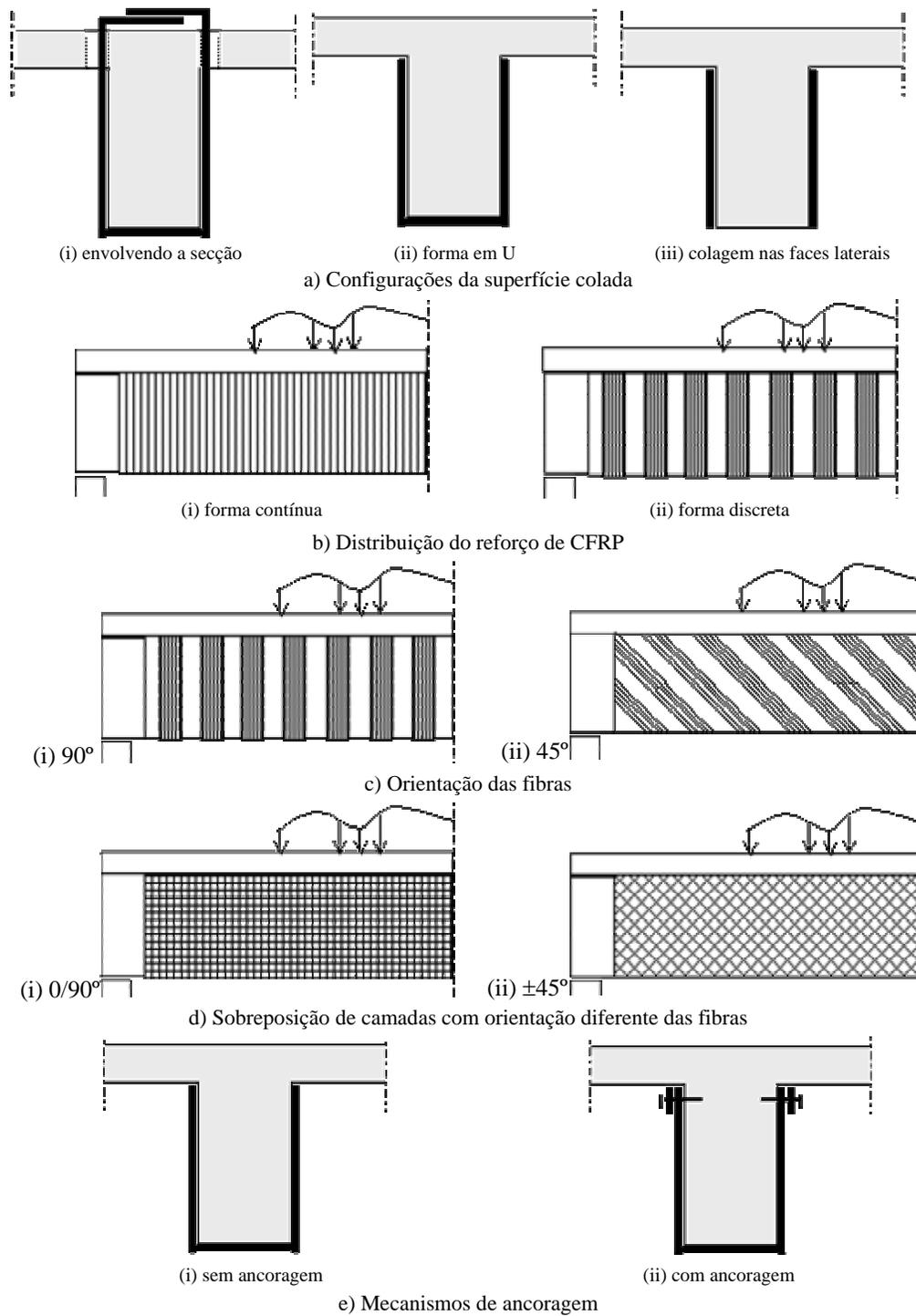


Figura 6 - Reforço ao corte com compostos de CFRP (Khalifa, 1999).

Na Figura 6 apresentam-se várias configurações que Khalifa (1999) sugeriu para reforçar ao corte vigas de betão com compósitos de CFRP. Estas configurações distinguem-se quanto à configuração da superfície colada (Figura 6-a)), distribuição do reforço de CFRP (Figura 6-b)), orientação das fibras (Figura 6-c)), sobreposição de camadas com orientação diferente das fibras (Figura 6-d)) e quanto à adopção de mecanismos de ancoragem (Figura 6-e)).

Sistemas de FRP podem ainda ser usados para aumentar o confinamento do betão, principalmente em elementos sujeitos a esforços de compressão, como é o caso dos pilares (Ferreira e Barros 2003).

4. INVESTIGAÇÃO DESENVOLVIDA NA DEC-EEUM

Neste capítulo apresentam-se os resultados mais significativos da investigação experimental realizada para avaliar o desempenho de uma técnica de reforço baseada na fixação de laminados de CFRP em ranhuras efectuadas no betão de recobrimento de elementos estruturais. Com esta técnica foram reforçados e ensaiados elementos de pilar e de viga de betão armado com rotura por flexão, e vigas de betão armado com rotura por corte. A ligação betão-CFRP foi investigada por intermédio de ensaios de arranque em flexão.

4.1. Programa experimental e técnica de reforço

A Tabela 3 resume o programa experimental realizado, indicando os seus principais objectivos. A técnica de reforço desenvolvida baseia-se nos seguintes procedimentos (ver Figura 7): a) rasgos de 4 a 5 mm de largura e 12 a 15 mm de profundidade são executados na face dos elementos a reforçar; b) os rasgos são limpos com a aplicação de ar comprimido; c) os CFRP são limpos com acetona; d) adesivo epoxi é produzido segundo as recomendações do fabricante; e) os rasgos são preenchidos com o adesivo; f) adesivo é aplicado nas faces dos CFRP; g) os CFRP são introduzidos nos rasgos retirando-se o adesivo em excesso. O período de cura do adesivo foi de, pelo menos, cinco dias. As propriedades dos materiais utilizados neste programa experimental encontram-se em outro trabalho (Barros *et al.* 2003).

Tabela 3. Programa experimental

Grupo de ensaio	Elementos com rotura por flexão		Elementos com rotura por corte	Ensaio de arranque em flexão
Tipo de elemento	Pilares de betão armado	Vigas de betão armado		Vigas de betão
Tipo de ensaio	Ensaio cíclico	Ensaio monotónico		
Topologia do carregamento	Carga axial de compressão constante e carregamento cíclico horizontal de amplitude crescente	Quatro pontos de carga		
Objectivos	Avaliar a influência da percentagem da armadura longitudinal, ρ_{sl}		Comparação do desempenho das técnicas de reforço ao corte com CFRP	Comportamento da ligação betão-adesivo-CFRP
Variáveis do programa experimental	Percentagem de armadura longitudinal	Percentagem de armadura longitudinal	Técnica de reforço ao corte	Comprimento de aderência

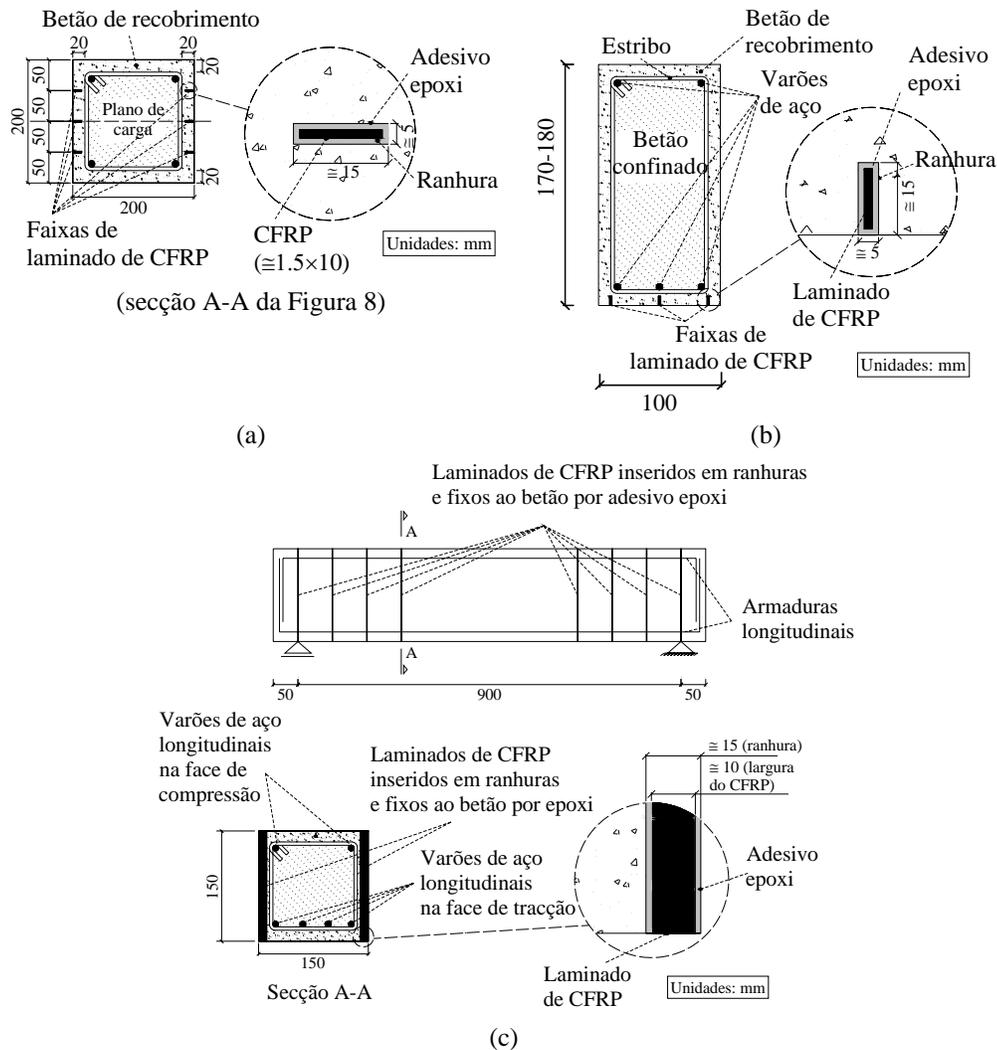


Figura 7. Técnica de reforço aplicada em: (a) pilares com rotura por flexão; (b) vigas com rotura por flexão; (c) vigas com rotura por corte

4.2. Reforço à flexão

4.2.1 Pilares

Para avaliar a eficácia da técnica de reforço proposta, em elementos submetidos a compressão axial constante e carga horizontal cíclica (Figura 8), séries de pilares de betão armado foram ensaiadas (Ferreira 2000). Tomando por base de comparação os resultados obtidos na série de pilares não reforçados, constatou-se que o reforço proporcionou um aumento significativo da capacidade de carga dos pilares. A título de exemplo, na Figura 9 apresenta-se a relação entre a força horizontal e o deslocamento ao nível da carga horizontal registada no pilar reforçado e não reforçado.

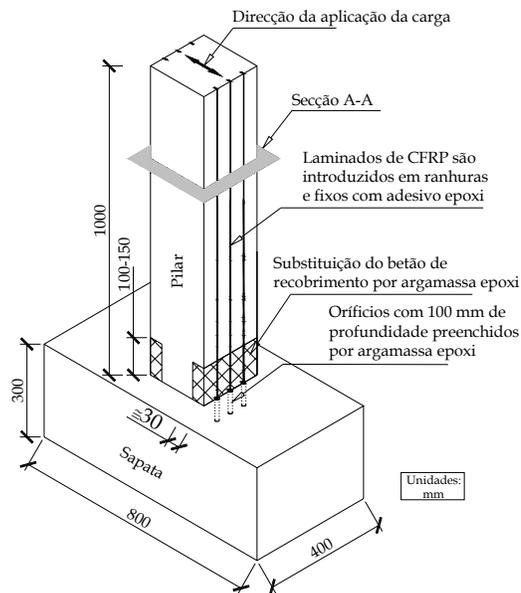


Figura 8. Técnica de reforço aplicada nos pilares (Secção A-A na Figura 7a)

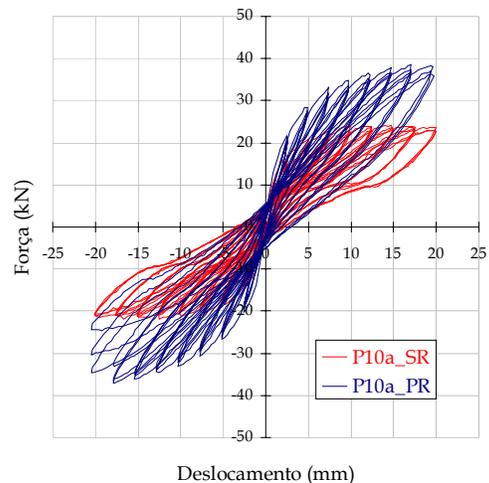


Figura 9. Resposta força-deslocamento em pilar reforçado com 4φ10 (SR- não reforçado; PR - previamente reforçado).

4.2.2 Vigas

Quatro séries de vigas foram ensaiadas para verificar se a técnica de reforço descrita na secção 4.1 permitia duplicar a capacidade máxima de carga de vigas com rotura por flexão. Todos os detalhes desta campanha de ensaios encontram-se descritos em outros trabalhos (Barros *et al.* 2003). A título de exemplo, as relações força-flecha e força-extensão registadas numa das séries são apresentadas nas figuras 10 e 11, respectivamente. O desempenho da técnica de reforço nas restantes séries foi semelhante, pelo que a presente técnica permite aumentar significativamente a capacidade de carga de vigas com rotura por flexão.

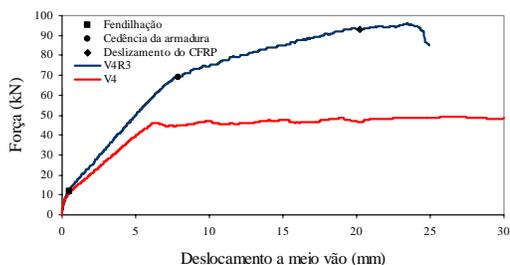


Figura 10. Diagrama força vs flecha na série S4

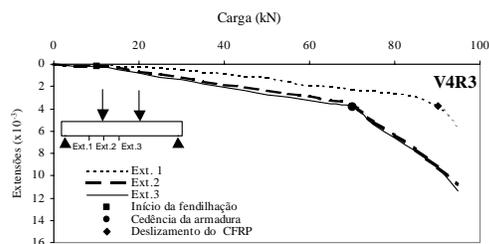


Figura 11. Diagrama força vs extensão nos laminados na viga V4R3 da série S4

4.3. Reforço ao corte

Três tipos de técnicas de reforço com CFRP foram utilizados para verificar qual a mais eficaz no reforço ao corte de vigas de betão armado (1000 mm de comprimento, 900 mm de vão, secção transversal $150 \times 150 \text{ mm}^2$ e vão de corte de aproximadamente 2). As séries de vigas testadas eram compostas por uma viga de referência sem qualquer tipo de reforço ao corte (VB10), uma viga com estribos em varão de aço $\phi 6$ afastados de 150 mm nos vãos de corte (VBE-15), uma viga com faixas de duas camadas de manta de CFRP S&P C-Sheet 530 C5-30, em forma de U, de 25 mm de largura e afastadas 80 mm no vão de corte (VBM-8), uma viga com CFRP inseridos em ranhuras verticais efectuadas no betão de recobrimento das faces verticais da viga, afastados de 100 mm (VBCV-10), e uma viga com CFRP inclinados a 45 (VBCI-15). A quantidade de reforço ao corte foi determinada segundo o ACI Committee 440, de forma a que todas as vigas reforçadas (inclusive a VBE-15) tivessem idêntica resistência e rompessem por corte. Nesta série as vigas dispunham de $4\phi 10$ na face de tracção. Todos os detalhes desta campanha de ensaios encontram-se descritos em outros trabalhos (Barros e Salvador 2003). A resposta força-flecha registada nas vigas está representada na Figura 12, a partir das quais se verifica que a técnica de reforço adoptada não é somente eficaz em termos de aumentar a capacidade máxima de carga, como também em assegurar maior capacidade deformacional às vigas reforçadas.

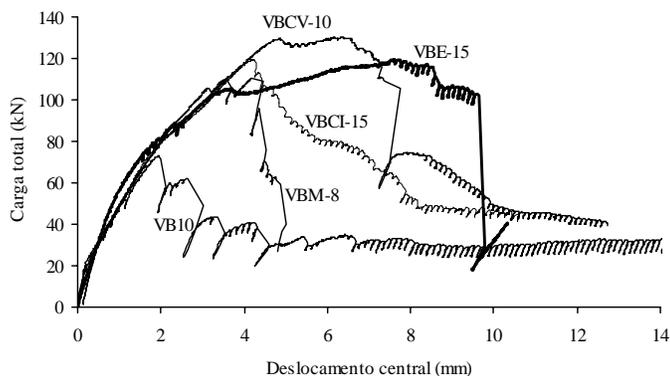


Figura 12. Relação carga total vs deslocamento central para as vigas com rotura por corte.

4.4. Caracterização da ligação betão-adesivo-CFRP

Com o objectivo de avaliar a influência do comprimento de aderência do CFRP no comportamento da ligação, com adesivo, entre CFRP e betão, foram efectuados ensaios de arranque em flexão, tendo-se utilizado três comprimentos de aderência (Sena-Cruz e Barros 2002). A Figura 13 representa o provete, o carregamento e os instrumentos utilizados na medição de deslocamentos, forças e extensões. No bloco B o laminado era fixo ao betão num comprimento total de 325 mm, enquanto no bloco A o laminado era apenas fixo no comprimento de aderência (L_a).

A influência do comprimento de aderência na relação entre a força de arrancamento e o deslizamento (deslocamento no LVDT2), $F-s_l$, está representada na Figura 14. A influência do comprimento de aderência na relação entre a tensão média de corte e o deslizamento (deslocamento no LVDT2), $\tau-s_l$, está representada na Figura 15. Nas Figuras 14 e 15, cada curva é a resposta média registada em três provetes.

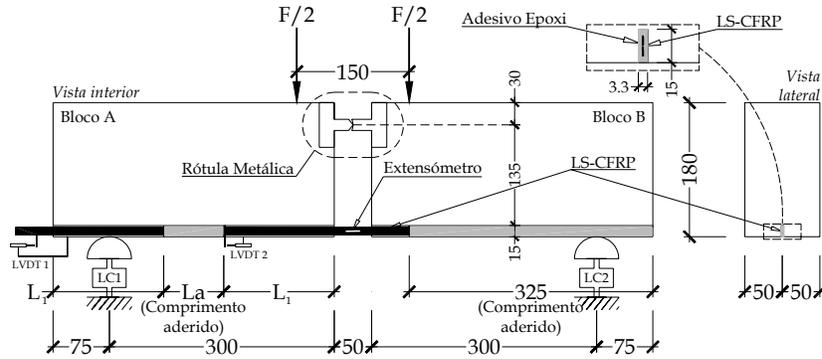


Figura 13. Provete do ensaio de arranque em flexão

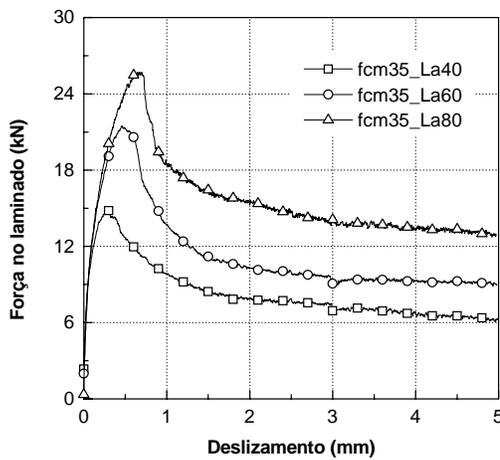


Figura 14. Influência do comprimento de aderência (L_a) na relação força de arrancamento vs deslizamento

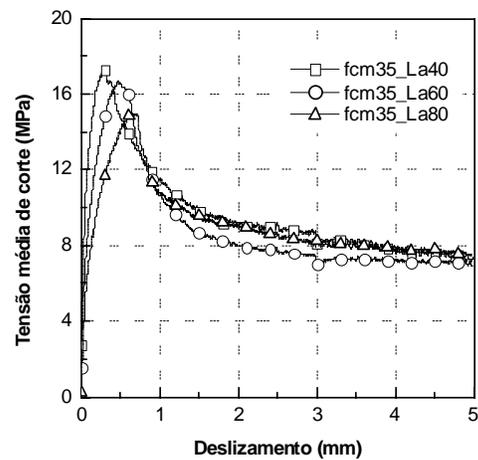


Figura 15. Influência do comprimento de aderência (L_a) na relação tensão média de corte vs deslizamento

Da análise das Figuras 14 a 15 e dos resultados obtidos constata-se que (Sena-Cruz e Barros 2002):

- Aumentando ao comprimento de aderência do CFRP, a força na faixa de laminado aumenta;
- Aumentando ao comprimento de aderência aumenta o deslizamento na fase pré-pico, dado que existe maior volume de adesivo, sendo este um material com elevada deformabilidade não linear. Assim, quanto maior L_a maior foi o deslizamento no pico;
- O τ_{max} (tensão máxima de corte) diminui com o aumento do comprimento de aderência do laminado. A tensão máxima de corte é significativamente superior à registada em outras configurações de ensaio de arranque;
- A energia de fractura tem uma tendência para diminuir com o comprimento de aderência do laminado, devido, fundamentalmente, à diminuição da tensão máxima de corte com este comprimento. Contudo, esta diminuição parece tender para uma assíntota, dado o atrito betão-adesivo-CFRP garantir um nível de resistência residual elevado.

5. CONCLUSÕES

No presente trabalho apresentaram-se as principais propriedades dos materiais compósitos (FRP) utilizados no reforço de estruturas. As mais utilizadas técnicas de reforço e os principais sistemas de reforço em FRP foram descritos.

A segunda parte do trabalho foi dedicada à descrição da investigação desenvolvida no DEC-EEUM no âmbito de uma nova técnica de reforço com CFRP (FRP com fibras de carbono). Esta técnica baseia-se na inserção de faixas de laminados de CFRP em ranhuras efectuadas no betão de recobrimento dos elementos a reforçar. Os CFRP são fixos ao betão por intermédio de adesivo epoxi. Esta técnica foi utilizada para aumentar a capacidade de carga de elementos de pilar e de viga com rotura por flexão, e de viga com rotura por corte. A ligação betão-adesivo-CFRP foi estudada em termos de avaliar a influência do comprimento de aderência do CFRP nos principais parâmetros que permitem caracterizar esta ligação.

Dos resultados obtidos verificou-se que a técnica proposta é 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. Nos elementos de viga, além do aumento da capacidade de carga, também se registou um aumento significativo da sua capacidade deformacional no momento da sua rotura, indicador da eficácia da presente técnica em termos de ductilidade.

Os ensaios de arranque em flexão revelaram que as tensões média de corte alcançadas são significativamente superiores às registadas com técnicas baseadas na colagem exterior. Verificou-se que a força de arranque aumentou com o comprimento de aderência.

6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho resulta da investigação desenvolvida e de trabalhos escritos em colaboração com os meus alunos de doutoramento, nomeadamente: José Sena-Cruz, Salvador Dias, Débora Ferreira e Adriano Fortes. O eles o meu especial obrigado. O meu agradecimento estende-se a todas as empresas que têm contribuído para o sucesso das campanhas experimentais realizadas, designadamente: S&P, Bettor MBT Portugal, Secil, Nordesfer, Ferseque, Casais, Solusel, VSL e Unibetão (Braga). Ao CEMACON, agradece-se a colaboração prestada nos ensaios de caracterização dos laminados de CFRP e do adesivo.

7. REFERÊNCIAS

- ACI 440R-96, 1996 - *State of the art report on fiber reinforced plastic reinforcement for concrete structures*, reported by ACI Committee 440, Manual prático de betão, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 68 p.
- ACI Committee 440, 2002 - *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*, ACI Committee 440, 118 p.
- Barros, J.A.O.; Dias, S.J.E., 2003 - "Shear strengthening of reinforced concrete beams with laminate strips of CFRP", *International Conference Composites in Constructions - CCC2003*, Italy, p. 289-294.

- Barros, J.A.O.; Sena-Cruz, J.M.; Dias, S.J.E.; Ferreira, D.R.S.M.; Fortes, A.S., 2003 - "Investigação no âmbito da utilização de materiais compósitos no reforço de estruturas de betão", *V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto*, CD-Rom.
- Basler, M., White, D. e Desroches, M., 2003 - "Shear strengthening with bonded CFRP L-shaped plates", *Field Applications of FRP Reinforcement: Case Studies, ACI Internacional SP-215*, Editors: Sami Rizkalla and Antonio Nanni, p. 373-384.
- Belbetões, 2002 - "Remodelação do edifício do Marquês de Pombal, n.º12, Lisboa", Ficha técnica.
- Carolin, A., 2003 - *Carbon fibre reinforced polymers for strengthening of structural elements*, Doctoral Thesis, Department of Civil and Mining Engineering, Division of Structural Engineering, Lulea University of Technology, Suécia, June, 190 p.
- 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, nº1, January-February, p. 60-68.
- Dias, S.J.E.; Barros, J.A.O., 2004 - *Materiais compósitos de CFRP no reforço ao corte de vigas de betão armado*, Relatório técnico 04-DEC/E-03, DEC-EEUM, 66 p.
- Dias, S.J.E., 2001 - *Verificação experimental do reforço com CFRP de estruturas de betão à flexão*, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Departamento de Engenharia Civil, Porto, Março, 203 p.
- EMPA, 1998 - *Testing of CFRP shear strips on reinforced concrete T-beams (T1 e T2)*, Report nº 169'219E/1 do Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, 39 p.
- Ferreira, D.R.S.M.; Barros, J.A.O., 2003 - "Strategies for concrete confinement with strips of CFRP sheet", *International Conference Composites in Constructions - CCC2003*, Cosenza, Italy, p. 483-488.
- 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, 207 p.
- Juvandes, L., Dias, S.J.E. e Figueiras, J.A., 2001 - "Experimental behaviour of concrete slabs strengthened with CFRP systems", *International Conference Composites in Constructions - CCC2001*, Porto, p. 479-485.
- Khalifa, A., Gold, W. J., Nanni A. e Aziz, M. I. A., 1998 - "Contribution of externally bonded FRP to shear capacity of RC flexural members", *Journal of Composites for Construction*, vol. 2, nº4, November, p. 195-202.
- Khalifa, Ahmed, 1999 - *Shear Performance of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Advanced Composites*, PH. D. Thesis, Structural Engineering Department, Alexandria University, Egypt.
- Sena-Cruz JM, Barros JAO, "Bond behavior of carbon laminate strips into concrete by pullout-bending tests. Bond in Concrete - from the research to standards", *International Symposium*, 2002, Hungry, p. 614-621.
- S&P, 2002 - *Design guide line for S&P FRP systems*, S&P Clever Reinforcement Company, Switzerland, 69 p.