

MATERIAIS COMPÓSITOS

NO REFORÇO DE ESTRUTURAS DE BETÃO – PARTE I: PROPRIEDADES E TÉCNICAS

Joaquim António Oliveira de Barros
Prof. Associado c/ Agregação do Dep. Eng^a Civil da Univ. do Minho

barros@civil.uminho
<http://www.civil.uminho.pt/composites/>

RESUMO

O presente artigo é o primeiro de duas publicações referentes à utilização de materiais compósitos no reforço de estruturas de betão. Os principais tipos de materiais compósitos utilizados no reforço estrutural são apresentados no presente trabalho, bem como os procedimentos para caracterizar as suas propriedades. As técnicas de reforço baseadas na utilização de materiais compósitos são descritas, apontando-se as suas possibilidades e deficiências. O próximo artigo será dedicado aos mais recentes avanços da investigação nesta área, bem como à apresentação de casos de estudo em que a utilização de materiais compósitos se revelou técnica e economicamente vantajosa.

1 – INTRODUÇÃO

Devido a diversas causas a reabilitação e o reforço de estruturas é uma actividade da indústria da construção civil, cujo impacto económico tem crescido significativamente nas últimas décadas, prevendo-se tornar uma área de elevada mobilização de emprego qualificado. Para que as intervenções de reforço sejam eficazes do ponto de vista arquitectónico, estrutural e económico, é necessário utilizar materiais de reforço de propriedades mecânicas de elevado desempenho, leves, de elevada resistência às acções agressivas de agentes ambientais, de fácil fixação ao betão, e que sejam aplicáveis segundo técnicas de reforço de simples e rápida execução. Os materiais de matriz polimérica reforçados com fibras (*Fiber Reinforced Polymers* - FRP) e as técnicas de reforço com FRP que têm sido propostas desde finais dos anos 80 do século passado, dispõem desse potencial, pelo que a sua utilização no reforço de estruturas de betão tem aumentado consideravelmente desde os primeiros trabalhos de reforço estrutural (1). O reforço de estruturas com FRP mobiliza actualmente diversos centros de investigação de excelência nos USA, na EU e no Japão, tendo sido constituídos comités técnicos nesta área. Por exemplo, o Comité Técnico 440 do “American Concrete Institute” (ACI) é o maior e mais activo comité do ACI, na actualidade, sendo representativo do entusiasmo que a comunidade técnica e científica têm revelado por esta área (2). Na Europa, a “Fédération Internationale du Béton” (*fib*), por intermédio do TG9.3, tem desenvolvido, nos últimos anos, trabalho que tem conduzido à elaboração de documentos, cujo objectivo é dotar o projectista de informação suficiente para o projecto de reforço estrutural com materiais compósitos (3). A “Japan Society of Civil Engineers” (JSCE) está a desenvolver estratégia similar (4). Na Itália, um grupo de trabalho publicou recentemente um documento muito completo sobre este assunto, podendo servir de modelo para eventuais grupos que pretendam desenvolver trabalho similar na área do reforço de estruturas com FRPs (5).

A necessidade de efectuar intervenções de reforço no património construído deve-se a várias causas, nomeadamente: alteração do tipo de utilização (aumento das cargas a actuar na estrutura); erros de projecto e/ou de construção; redução da resistência dos materiais em resultado da sua degradação (carbonatação do betão e corrosão das armaduras); alterações nos códigos de dimensionamento com a introdução de disposições mais severas; ocorrência de acidentes (sismos, incêndios, explosões, cheias ou actos de vandalismo).

A utilização de FRP no reforço estrutural deriva do facto de poderem constituir técnicas de relativa facilidade e rapidez de execução, cuja aplicação não altera significativamente a arquitectura inicial da construção. Além disto, os materiais utilizados têm baixo peso específico, apresentam elevadas resistências mecânicas e são imunes à corrosão.

2 – MATERIAIS, SISTEMAS E TÉCNICAS NO REFORÇO ESTRUTURAL COM FRPs

2.1 – Constituintes materiais de FRPs

Os materiais compósitos utilizados no reforço estrutural são formados, fundamentalmente, por dois componentes: as fibras e a matriz. As fibras garantem a necessária resistência e rigidez ao compósito, enquanto a matriz protege as fibras da acção directa de agentes ambientais, assegura uma melhor distribuição de tensões pelo sistema fibroso e evita a micro-encurvatura das fibras quando o compósito é submetido a esforços de compressão. Na Figura 1 representam-se curvas típicas tensão-extensão (σ - ϵ) para as fibras de compósitos mais correntemente utilizados no reforço estrutural (HS e HM significa elevada resistência e elevado módulo, respectivamente). Para efeitos comparativos, também se inclui a relação σ - ϵ para o aço de armaduras passivas e de pré-esforço.

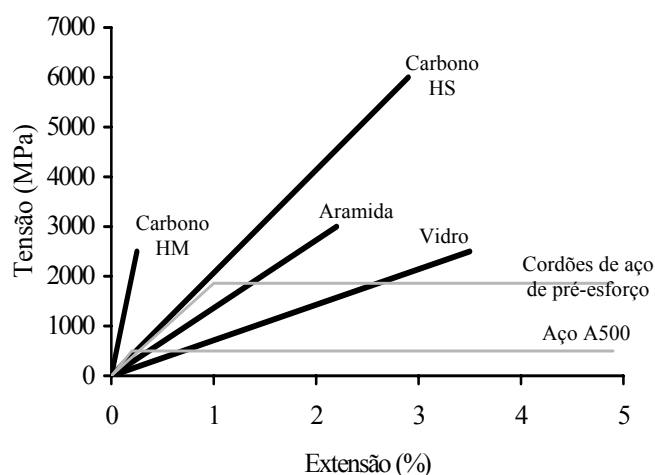


Figura 1 - Diagrama tensão vs extensão de distintos tipos de fibras, do aço convencional (A500) e de cordões de aço de pré-esforço.

Na Tabela 1 incluem-se valores típicos de algumas das principais propriedades de fibras utilizadas em compósitos no reforço estrutural. Para efeitos comparativos também se apresentam os valores dessas propriedades para o aço de construção e para o betão.

Tabela 1 - Propriedades típicas do betão, do aço e das fibras mais utilizadas no reforço estrutural.

Material	Módulo de elasticidade [GPa]	Resistência à compressão [MPa]	Resistência à tracção [MPa]	Densidade [Kg/m ³]
Betão	20-40	10-100	1-5	2400
Aço	200-210	240-690	240-690	7850
Aramida	80-190	-	2800-4000	1370-1470
Vidro	70-74	-	2000-3000	2550
Fibras de carbono	200-800	-	2500-6000	1750-1950

Na Tabela 2 apresentam-se valores para as principais propriedades das resinas mais utilizadas nos compósitos empregues no reforço estrutural.

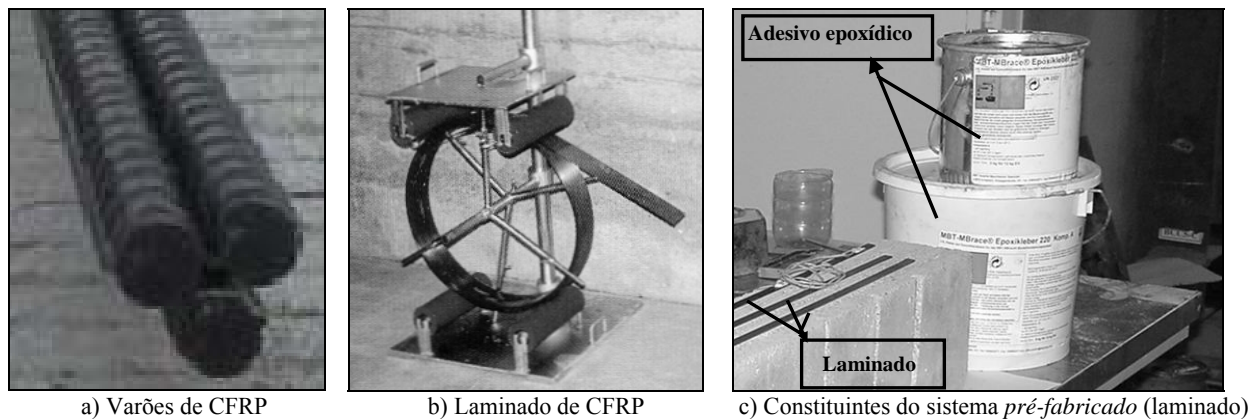
Tabela 2 - Propriedades típicas das resinas mais utilizadas no reforço estrutural.

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
Epoxídica	2.5-4.1	55-130	1.5-9.0	1100-1300

2.2 – Sistemas de FRPs

Os sistemas *pré-fabricados* e os sistemas *curados “in situ”* são, de entre os vários sistemas de reforço com FRPs, 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 (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 epoxídico, na maior parte dos casos) e, em alguns casos, o primário para melhorar a aderência dos FRPs à superfície do elemento a reforçar. Na Figura 2 apresentam-se exemplos de varões e laminados de CFRP unidireccionais (em fibras de carbono).

Nos sistemas *curados “in situ”*, a matriz e as fibras são fornecidas em separado e o processo de fabrico do compósito de FRP (matriz + fibras) é efectuada 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 FRP). 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). Na Figura 3 apresentam-se exemplos representativos dos sistemas *curados “in situ”*.

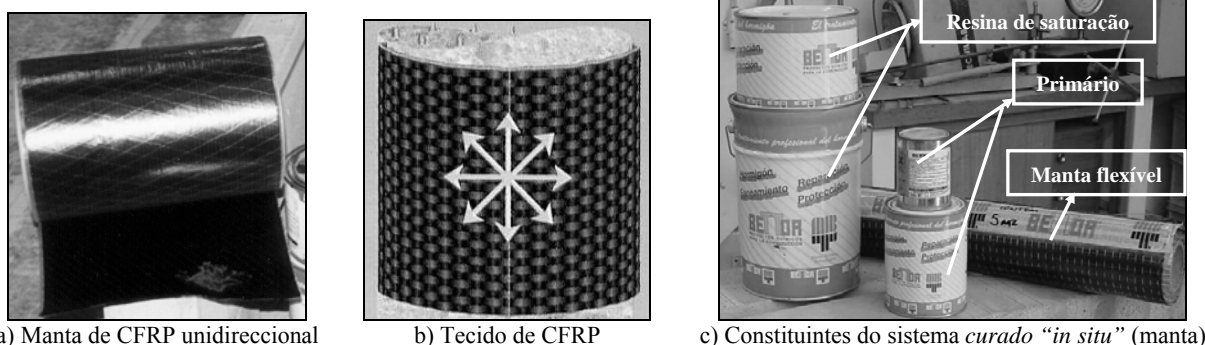


a) Varões de CFRP

b) Laminado de CFRP

c) Constituintes do sistema *pré-fabricado* (laminado)

Figura 2 - Sistemas *pré-fabricados*.



a) Manta de CFRP unidireccional

b) Tecido de CFRP

c) Constituintes do sistema *curado "in situ"* (manta)

Figura 3 - Sistemas curados "in situ".

2.3 – Caracterização experimental das propriedades dos FRPs

Recentemente, o ACI editou uma publicação onde são indicados os procedimentos para avaliar as propriedades dos compósitos mais correntemente utilizados no reforço estrutural (6). As propriedades que mais interessam neste domínio são as que permitem caracterizar o comportamento destes materiais em tracção directa, nomeadamente, a resistência, o módulo de elasticidade e a extensão última. Nas Figuras 4 e 5 representam-se exemplos de provetes utilizados na avaliação do comportamento à tracção de laminados e de manta de fibras de carbono, respectivamente (7). Na Figura 6 apresenta-se a configuração de ensaio geralmente utilizada na caracterização do comportamento à tracção dos FRPs para o reforço estrutural.

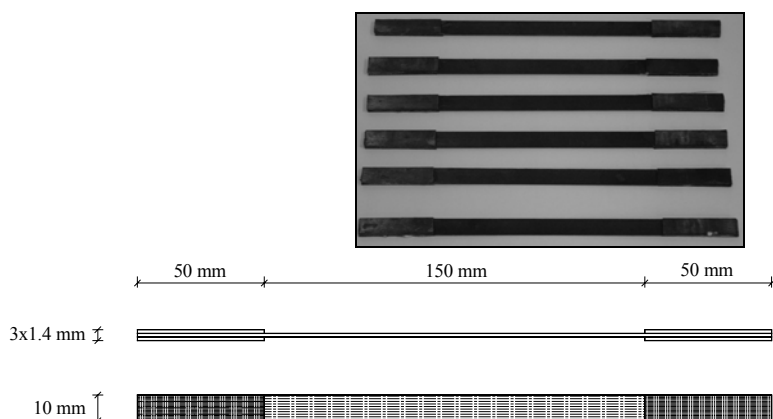


Figura 4 - Provetes de laminados de CFRP.

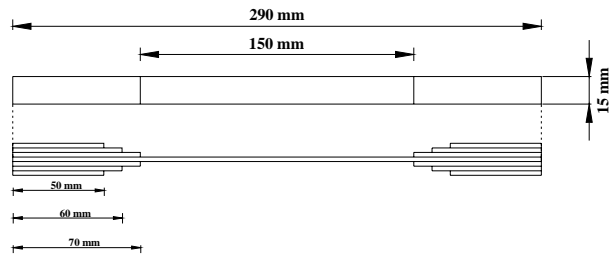
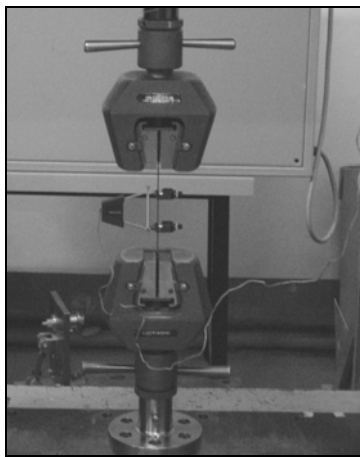
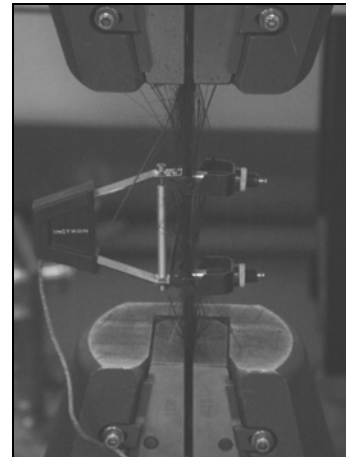


Figura 5 - Provetes de manta de CFRP (Ferreira e Barros 2004b).



Ensaio de tracção



Modo de rotura

Figura 6 - Ensaio de tracção uniaxial com provete de laminado de CFRP e respectivo modo de rotura.

2.4 – Técnicas de reforço

2.4.1 – Reforço à flexão

As primeiras aplicações de FRP tiveram como objectivo aumentar a resistência à flexão de estruturas de betão armado, tendo sido utilizados mantas e laminados de FRP coladas à superfície exterior da peça a reforçar, segundo a técnica designada na bibliografia Inglesa por EBR (“External Bonding Reinforcing technique”). Na Figura 7 apresentam-se os principais procedimentos desta técnica de reforço. Para mais detalhes consultar Dias (8) e Juvandes *et al* (9).

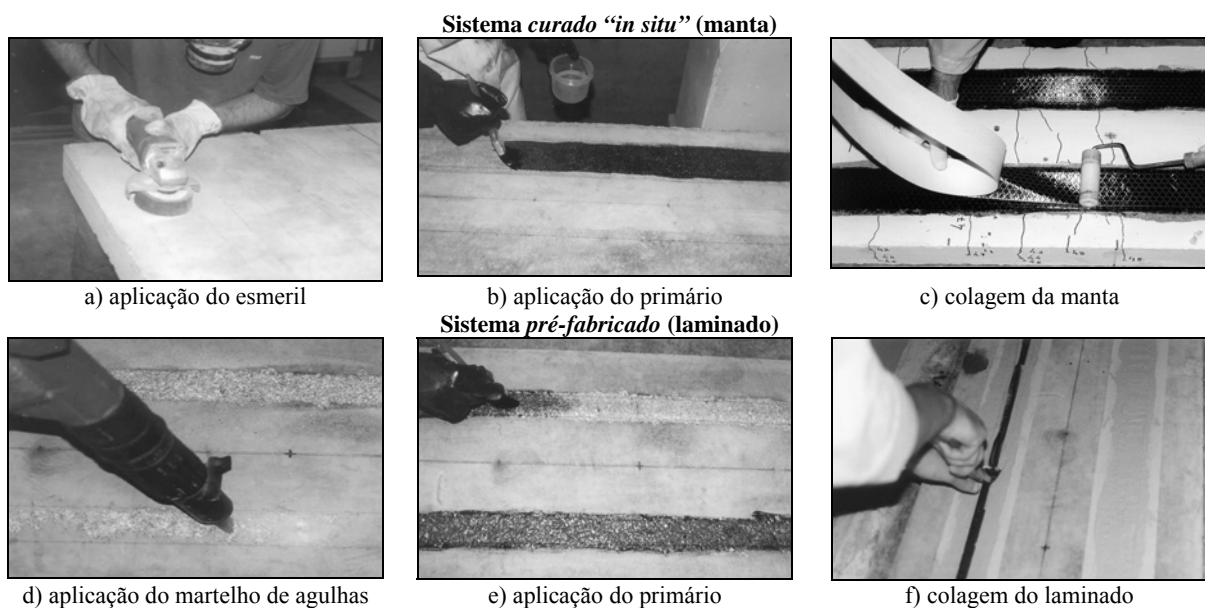


Figura 7 - Aplicação de sistemas de reforço de FRP segunda a técnica da colagem externa (8).

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 FRP, o mais frequente tem sido o que conduz à perda de aderência entre o FRP e o betão, resultando ruínas prematuras por destacamento do FRP. Consta-se assim que, frequentemente, as tensões instaladas no FRP são bastante inferiores à sua resistência, pelo que o potencial de reforço destes materiais não é eficazmente mobilizado. 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 8 apresentam-se alguns exemplos, já utilizados, de mecanismos exteriores de fixação de sistemas de reforço em FRP (Figura 8a e 8b para o caso de mantas; Figura 8c e 8d para o caso de laminados).

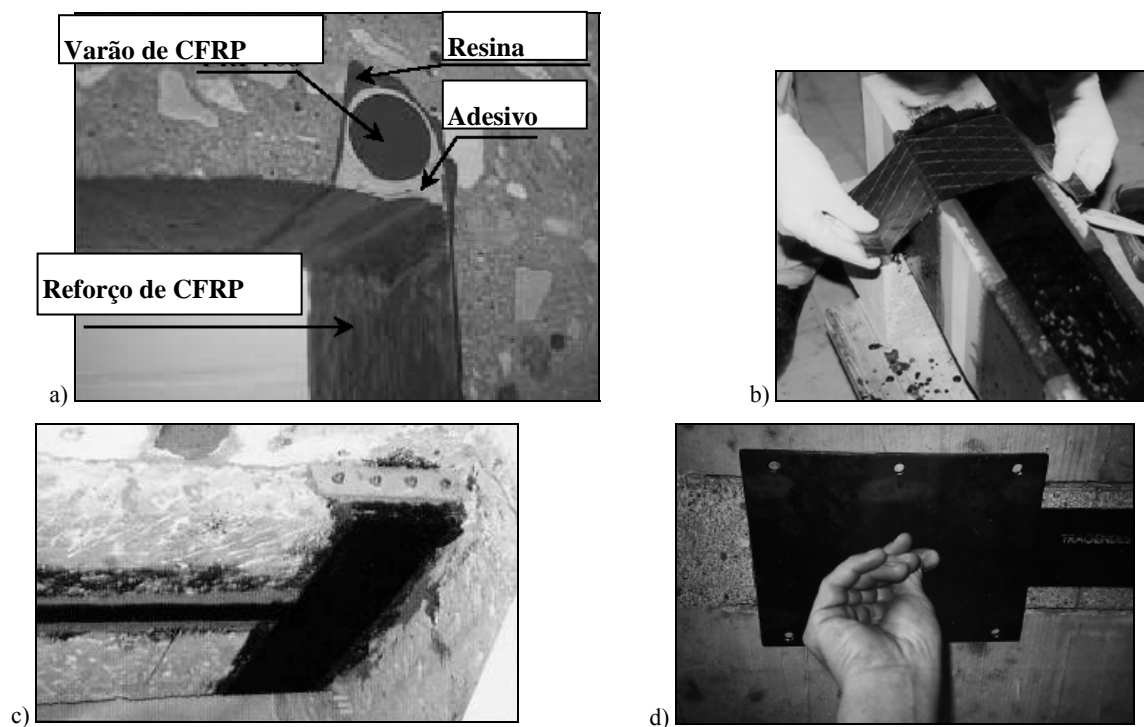


Figura 8 - Mecanismos exteriores de fixação do reforço de FRP: a) Khalifa *et al.*(10); b) Dias (8); c) Belbetões (11) e d) S&P (12).

Na técnica da colagem externa de compósitos de FRP, além de lhe estar associada, frequentemente, a ocorrência de roturas prematuras, os FRP ficam directamente expostos às condições ambientais. A influência negativa dos ciclos de gelo-degelo (13) e de temperaturas baixas e elevadas (14) na eficácia de reforço proporcionada por estes materiais deve ser tida em conta. Além disto, os reforços de FRP aplicados segundo a técnica da colagem externa ficam expostos directamente à acção do fogo e a actos de vandalismo.

Na tentativa de evitar estes inconvenientes, novas técnicas de reforço com materiais compósitos têm sido propostas. Uma das técnicas mais promissoras baseia-se na inserção de varões de fibras de vidro ou carbono (ver a Figura 2a) em entalhes efectuados no betão de recobrimento (15). Os varões de FRP são introduzidos no interior dos entalhes dos elementos a reforçar, sendo fixos ao betão por intermédio de adesivo epoxídico. Na Figura 9 apresentam-se alguns exemplos de aplicação desta técnica no: a) reforço à flexão (momentos negativos) de uma laje de betão armado (16); b) reforço à flexão da laje de betão armado do tabuleiro de uma ponte (17); c) reforço à flexão de pilares de betão armado de uma ponte (17).

Também com o objectivo de minimizar os aspectos negativos da colagem externa de FRP, Blaschko e Zilch (18) propuseram uma técnica de reforço à flexão baseada na inserção de laminados de fibras de carbono (CFRP) no betão de recobrimento das peças a reforçar. Esta técnica é actualmente designada, na nomenclatura Inglesa, por NSM (“Near Surface Mounted”). Pela mesma altura foram iniciados programas de investigação tendo como objectivo avaliar o desempenho da técnica NSM no reforço à flexão de pilares, vigas e painéis de alvenaria (19, 20). Esta técnica baseia-se nos procedimentos seguintes (ver Figura 10):

- Na face dos elementos a reforçar são executados entalhes (Figura 10a);
- Os entalhes são limpos com a aplicação de ar comprimido (Figuras 10b);
- Os laminados são cortados e posteriormente limpos com acetona (Figuras 10c e 10d);

- Adesivo epoxídico é produzido segundo as recomendações do fabricante (Figura 10e);
- Nas faces do laminado é aplicado adesivo (Figura 10f);
- Os entalhes são preenchidos com o adesivo (Figura 10g);
- Os laminados são introduzidos nos entalhes retirando-se o adesivo em excesso (Figura 10h).

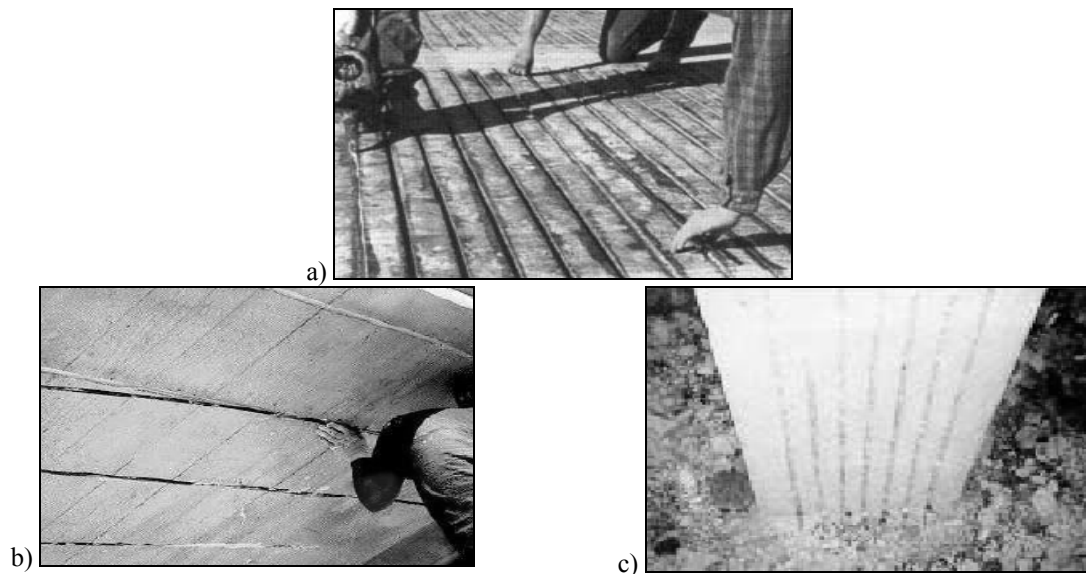


Figura 9 - Técnica da inserção de varões de FRP no reforço de estruturas de betão armado (aplicações em casos de obra).

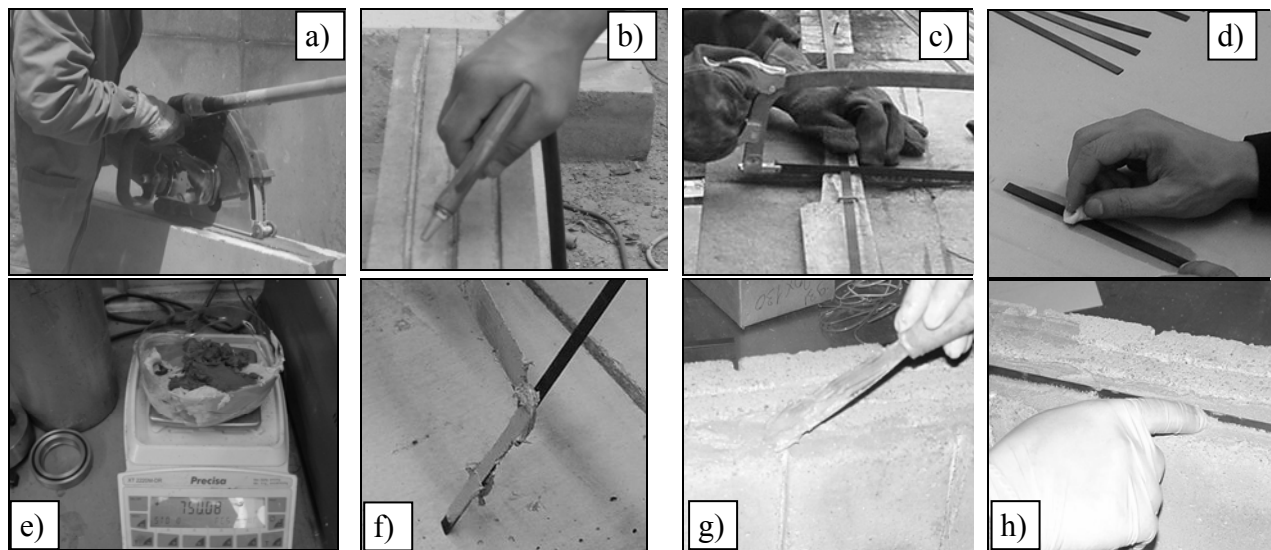


Figura 10 - Procedimentos de reforço segundo a técnica NSM.

2.4.2 – Reforço ao corte

Na Figura 11 apresentam-se aspectos relevantes das técnicas de reforço ao corte com FRP desenvolvidas até ao momento, nomeadamente, a técnica que recorre à colagem externa de mantas e laminados e a técnica que se baseia na inserção de varões e laminados em entalhes realizados no betão de recobrimento.

A investigação experimental tem revelado que a colagem externa de sistemas de FRP com as fibras orientadas transversalmente ao eixo da peça ou segundo a normal às potenciais fendas de corte permite aumentar a resistência ao esforço transversal do elemento. Na Figura 12 apresentam-se várias configurações sugeridas por Khalifa (23) para o reforço ao corte de vigas de betão.

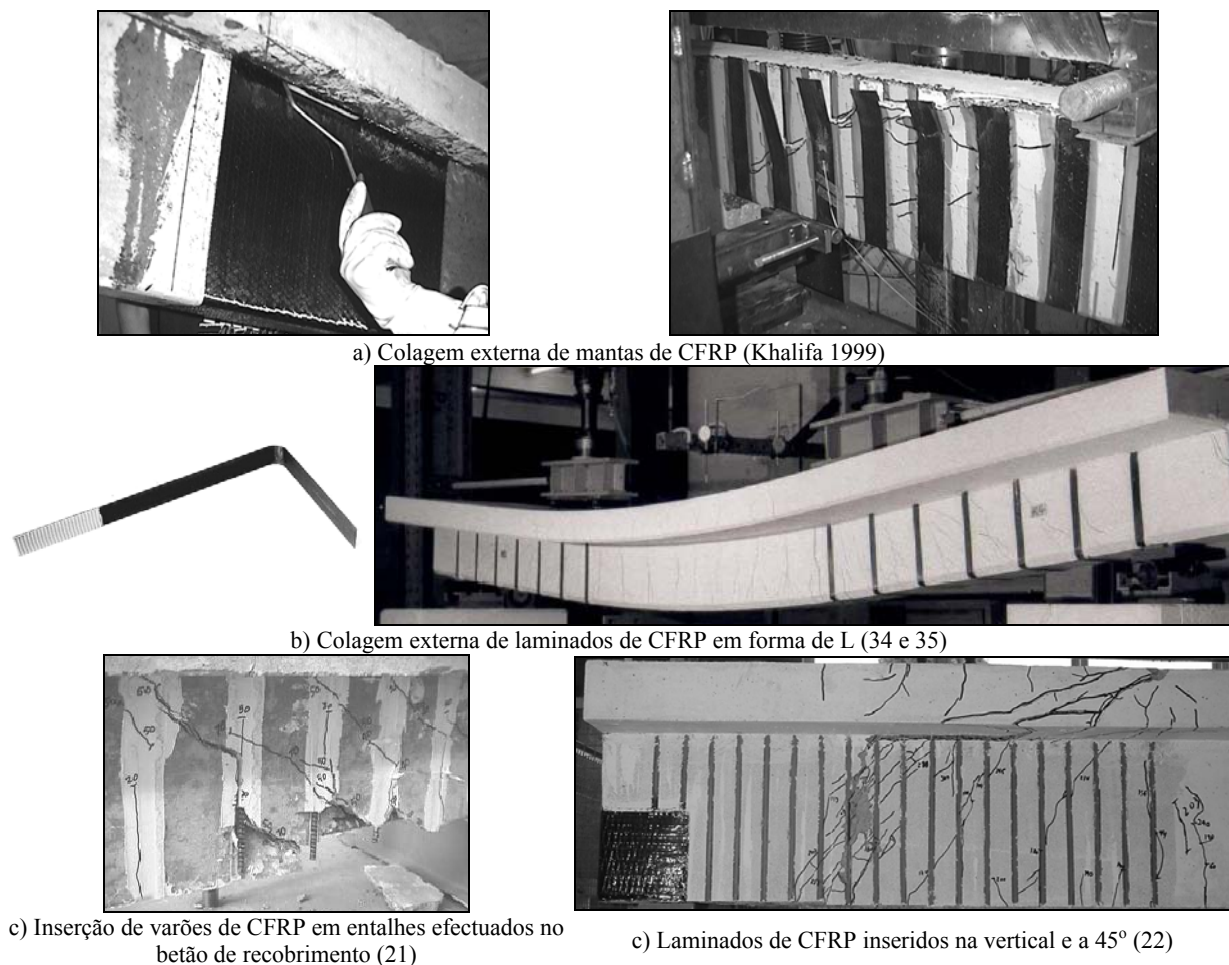
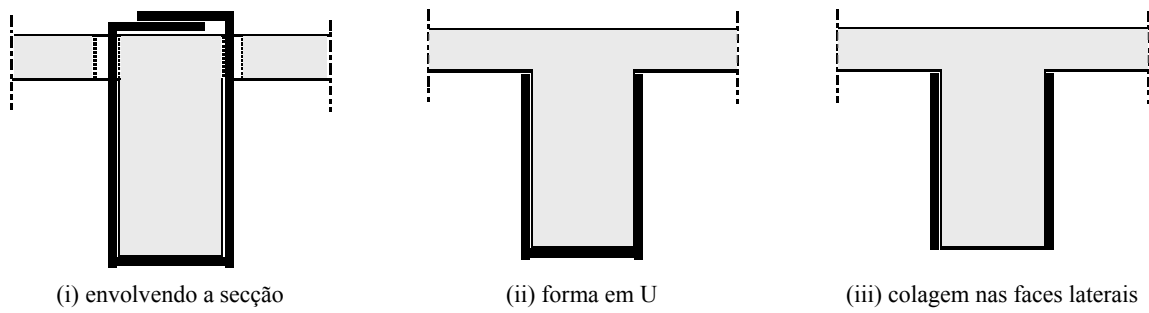


Figura 11 - Reforço ao corte com compósitos de CFRP.

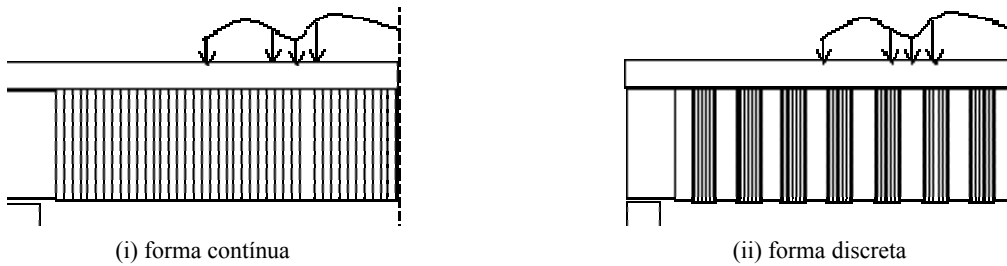
Os procedimentos empregues no reforço ao corte por utilização de manta colada à superfície das vigas encontram-se descritos na Figura 13, enquanto os relativos à técnica que recorre à inserção de laminados em ranhuras efectuadas no betão de recobrimento das faces laterais das vigas encontram-se na Figura 14.

2.4.3 – Confinamento

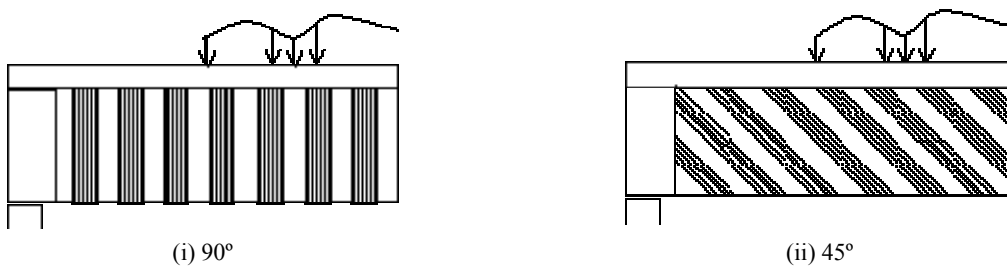
De entre os elementos estruturais, os pilares são os que requerem maior atenção do ponto de vista da sua estabilidade, dado que os danos provocados por acções sísmicas têm revelado que a deficiente ductilidade e resistência de elementos de pilar é uma das causas subjacentes ao colapso de estruturas. A ductilidade de elementos de betão pode ser aumentada por intermédio da aplicação de sistemas de reforço que elevem o grau de confinamento do betão (24-28). Em diversos casos, as chapas de aço, como material de reforço, têm vindo a ser substituídas por FRPs. Para tal, tem contribuído vários trabalhos de investigação (24, 29-32).



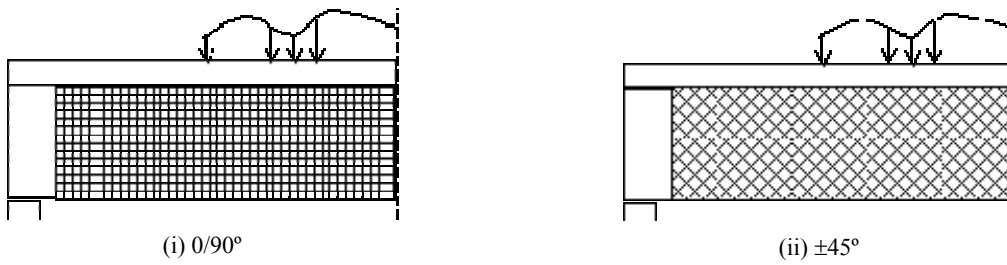
a) Configurações da superfície colada



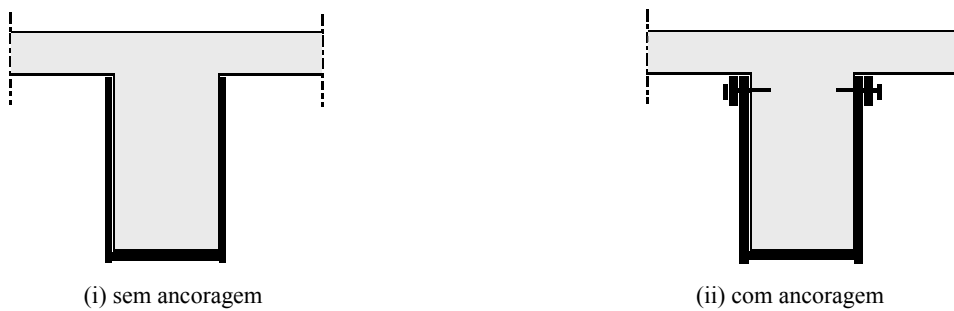
b) Distribuição do reforço de CFRP



c) Orientação das fibras



d) Sobreposição de camadas com orientação diferente das fibras

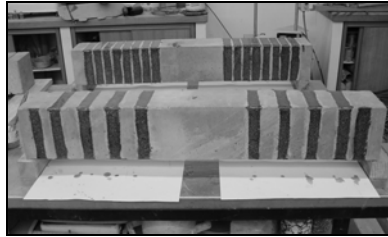


e) Mecanismos de ancoragem

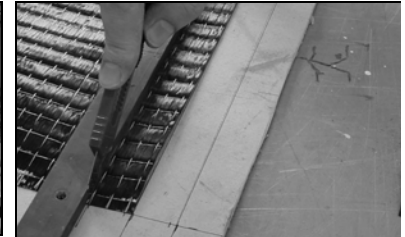
Figura 12 - Reforço ao corte com compostos de CFRP (23).



Preparação da superfície: esmerilagem



Após a aplicação do primário



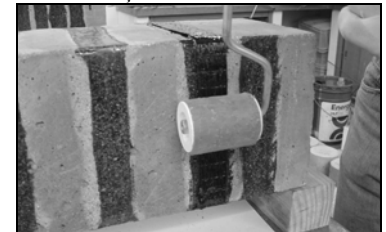
Obtenção das faixas de manta



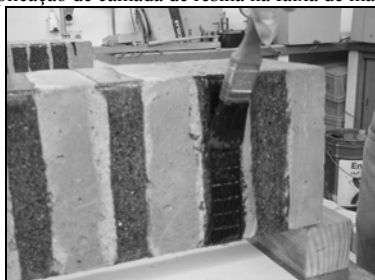
Aplicação de camada de resina na faixa de manta



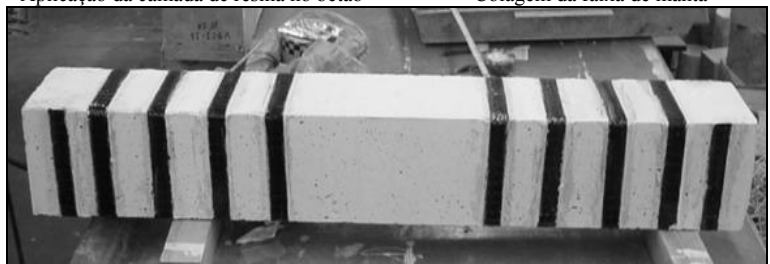
Aplicação da camada de resina no betão



Colagem da faixa de manta



Aplicação de camada de resina na faixa de manta



Aspecto final de viga reforçada (face traccionada virada para cima)

Figura 13 - Fases da aplicação de reforço ao corte por colagem externa de faixas de manta de CFRP.



Abertura dos entalhes



Corte dos laminados no comprimento desejado



Limpeza do laminado de CFRP



Preenchimento do entalhe com o adesivo



Aplicação do adesivo no laminado



Inserção do laminado no entalhe



Remoção do adesivo em excesso e execução do acabamento final



Aspecto final da viga após a execução do reforço

Figura 14 - Fases da aplicação de reforço ao corte com laminados inseridos no betão de recobrimento.

Na Figura 15 apresentam-se típicas relações tensão-extensão ($\sigma_c - \epsilon_c$) de provetes não confinados e de provetes com distintos níveis de confinamento. Da análise destas curvas verifica-se que o troço inicial, fase elástica, é semelhante para provetes confinados e provetes não confinados, dado que nesta fase o betão sofre pequena expansibilidade transversal, não activando eficazmente o material de reforço. Segue-se uma fase em que o betão entra num processo de micro-fendilhação, tendo sido classificada por fase de transição. A terceira fase, denominada de plástica, inicia-se quando a microfendilhação degenera em macro-fendilhação, sendo significativa a expansibilidade transversal do betão. Se o confinamento for efectivo, isto é, se houver acréscimo de carga por incremento de extensão, ocorrem grandes deformações e expansão radial significativa durante a fase plástica, sendo o confinamento tanto mais efectivo quanto maior for a tendência para essa expansibilidade. A expansibilidade do betão e a rigidez do confinamento são responsáveis pela inclinação da relação $\sigma_c - \epsilon_c$ correspondente à fase plástica. O betão bem confinado apresenta uma fase plástica com inclinação positiva e desenvolvimento aproximadamente linear, indicando que o confinamento é suficiente para conter o efeito da deterioração do betão durante o carregamento. Neste caso, a capacidade de carga do elemento aumenta. No betão deficientemente confinado, a tensão máxima atingida é similar à do betão não confinado, indicando que, para grandes deformações, o confinamento não é suficiente para impedir a diminuição da capacidade de carga do provete com o acréscimo de deformação.

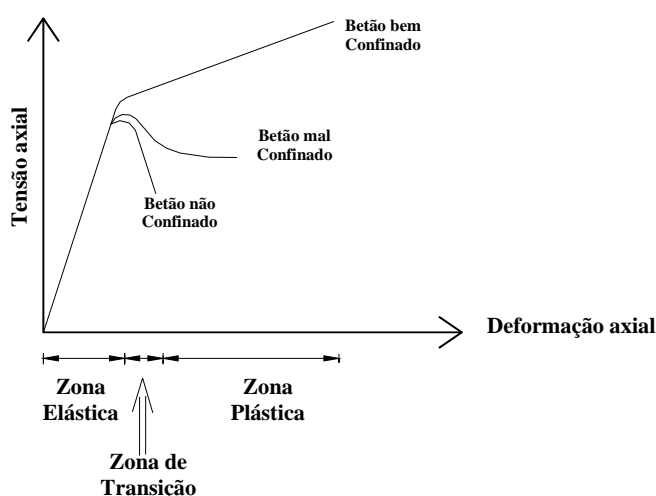


Figura 15 - Diagramas tensão-extensão de provete de betão não confinado e de provetes de betão com distinto nível de confinamento com FRP.

Os sistemas de confinamento são geralmente constituídos por mantas de FRP que envolvem toda a superfície exterior do elemento a confinar. No entanto, como nos pilares existe sempre alguma percentagem de cintas de aço, o desempenho do confinamento proporcionado por faixas de FRP dispostas entre as cintas metálicas tem sido recentemente investigado (33). Esta estratégia conduz a um menor consumo de FRP e a menor tempo dispendido nas operações de reforço. Os resultados obtidos são bastantes promissores, principalmente para pilares de betão de resistência baixa confinados com manta de CFRP de rigidez elevada.

4 – CONCLUSÕES

No presente trabalho foram apresentados os materiais compósitos mais utilizados, correntemente, no reforço de estruturas de betão armado, bem como as suas correspondentes propriedades e forma de as determinar. As técnicas de reforço à flexão e ao corte de elementos de betão armado com recurso à utilização de materiais compósitos foram tratadas. A técnica que permite aumentar a capacidade de carga e de absorção de energia de pilares foi introduzida. Em complemento é referido um conjunto seleccionado de trabalhos onde o leitor pode consolidar os seus conhecimentos na área da utilização de materiais compósitos no reforço de estruturas de betão armado. O próximo artigo será dedicado à apresentação de aspectos relevantes da investigação mais recentemente desenvolvida nesta área, bem como à apresentação de exemplos de aplicação e casos de estudo.

5 – AGRADECIMENTOS

O autor agradece o apoio prestado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) no projecto POCTI/ECM/59033/2004.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Meier, U., “Bridge repair with high performance composite materials”, *Material und Technik*, Vol. 15, nº4, 125-128, 1987.
- (2) ACI 440.2R-02, “Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures”, Reported by ACI Committee 440, 45 p, July 2002.
- (3) fib - Bulletin 14, “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, 130 p, July 2001.
- (4) JSCE, “Recommendations for Upgrading of Concrete Structures with Use of Continuous Fiber Sheets”, Japan Society of Civil Engineers, Japão, Abril, 2001.
- (5) CNR-DR 200/2004, “Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati – Materiali, strutture di c.a. e di c.a.p., strutture murarie”, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Commissione Incaricata di Formulare Pareri in Materia di Normativa Tecnica Relativa Alle Costruzioni, Itália, 164 p, 2004.
- (6) ACI 440.3R-04, “Guide test methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures”, Reported by ACI Committee 440, 40 p, October 2004.
- (7) Bonaldo, E.; Barros, J.A.O.; Lourenço, P.B., “Steel fibre reinforced concrete and CFRP laminate strips for high effective flexural strengthening of RC slabs”, *Technical Report 05-DEC/E-14*, Dep. Civil Eng. School Eng., University of Minho, 100 p, June 2005b.
- (8) Dias, S.J.E., “Verificação experimental do reforço com CFRP de estruturas de betão à flexão”, *Tese de Mestrado*, Dep. Eng^a Civil, FEUP, 203 p, Março 2001.
- (9) Juvandes, L., Dias, S.J.E. e Figueiras, J.A., “Eficiência do reforço de faixas de laje com sistemas compósitos de CFRP”, *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 52, 33-42, Setembro 2003.
- (10) Khalifa, A.; Gold, W. J.; Nanni A.; Aziz, M. I. A., “Contribution of externally bonded FRP to shear capacity of RC flexural members”, *Journal of Composites for Construction*, 2(4), 195-202, November 1998.
- (11) Belbetões, “Remodelação do edifício do Marquês de Pombal, nº12, Lisboa”, *Ficha técnica*, 2002.
- (12) S&P, “Design guideline for S&P FRP systems”, *S&P Clever Reinforcement Company*, Switzerland, 69 p., 2002.
- (13) Toutanji, H.; Balaguru, P., “Durability characteristics of concrete columns wrapped with FRP tow sheets”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 10(1), 52-57, 1998.
- (14) Pantuso, A.; Neubauer, U.; Rostasy, F.S., “Effects of thermal mismatch between FRP and concrete on bond”, *In Minutes of 4th ConcreteFibreCrete Meeting*, Lille, France, 2000.
- (15) De Lorenzis, L.; Nanni A.; La Tegola A., “Flexural and shear strengthening of reinforced concrete structures with near surface mounted FRP rods”, *Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, Ottawa, Canada, J. Humar and A. G. Raazaqpur, Editors, 521-528, August 2000.
- (16) Warren, G.E., “Waterfront repair and upgrade, advanced technology demonstration site nº2: Pier 12, NAVSTA San Diego”, *Site Specific Report SSR-2419-SHR*, Naval Facilities Engineering Service Center, Port Hueneme, CA, 1998.
- (17) Alkhrdaji, T.; Nanni, A.; Chen, G.; Barker, M., “Upgrading the transportation infrastructure: solid RD decks strengthened with FRP”, *Concrete International*, 21(10), 37-41, October 1999.
- (18) Blaschko, M. e Zilch, K., “Rehabilitation of concrete structures with CFRP strips glued into slits”, *Proceedings of the Twelfth International Conference of Composite Materials, ICCM 12*, Paris-France, July 1999.
- (19) Barros, J.A.O.; Ferreira, D.R.S.M.; Fortes, A.S., Dias, S.J.E., “Assessing the effectiveness of embedding CFRP laminates in the near surface for structural strengthening”, *Construction and Building Materials Journal*, Vol. 20, pp. 478-491, 2006.
- (20) Barros, J.A.O.; Fortes, A.S., “Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits”, *Journal Cement and Concrete Composites*, 27(4), 471-480, 2005.

- (21) De Lorenzis, L.; Nanni, A., "Shear strengthening of reinforced concrete beams with - near surface mounted fiber - reinforced polymer rods", *ACI Structural Journal*, 98(1), 60-68, January-February 2001.
- (22) Dias, S.J.E.; Barros, J.A.O., "Shear strengthening of T cross section reinforced concrete beams by near surface mounted technique", aceite para publicação no *Journal of Composites for Construction*.
- (23) Khalifa, A., "Shear Performance of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Advanced Composites", *PhD Thesis*, Structural Engineering Department, Alexandria University, Egypt, 1999.
- (24) Seible, F.; Priestley, M.J.N.; Hegemier, G.A.; Innamorato, D., "Seismic retrofit of RC columns with continuous carbon fiber jackets", *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 1(2), 52-62, 1997.
- (25) Mirmiran, A.; Shahawy, M., "Behavior of concrete columns confined by fiber composites." *Journal of Structural Engineering*, ASCE, May, 123(5), 583-590, 1997.
- (26) Saatcioglu, M.; Baingo, D., "Circular high-strength concrete columns under simulated seismic loading". *Journal of structural engineering*, ASCE, 125(3), 272-289, 1999.
- (27) Xiao, Y.; Wu, H.; Martin, G.R., "Prefabricated composite jacketing of RC columns for enhanced shear strength", *ASCE Journal of structural Engineering*, 124(3), 255-264, 1999.
- (28) Xiao, Y.; Wu, H., "Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets." *Journal of Material in Civil Engineering*, ASCE, 125(3), 255-264, 2000.
- (29) Saadatmanesh, H.; Ehsani, M. R.; Li, M.W., "Strength and ductility of concrete columns externally reinforced with fiber composites straps", *ACI Structural Journal*, 91(4): 434-447, 1994.
- (30) Nanni, A.; Bradford, N.M., "FRP jacketed concrete under uniaxial compression", *Construction and Building Materials*, 9(2), 115-124, 1995.
- (31) Saafi, M.; Toutanji, H. A.; Li, Z., "Behavior of concrete columns confined with fiber reinforced polymer tubes." *ACI Material Journal*, 96(4), 500-509, 1999.
- (32) Cole, C.; Belardi, A., "FRP jacketed Reinforced Concrete Columns", *Center for infrastructure engineering studies*, University of Missouri, Dep. Civil Eng., Rolla, 104 p, May 2001.
- (33) Barros, J.A.O.; Ferreira, D.R.S.M., "Assessing the efficiency of CFRP discrete confinement systems for concrete column elements", aceite para publicação no *Journal of Composites for Construction*, 2007.
- (34) EMPA, "Testing of CFRP shear strips on reinforced concrete T-beams (T1 e T2)", Report n° 169'219E/1 do Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, 39 p, 1998.
- (35) Basler, M., White, D. e Desroches, M., "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, 373-384, 2003.