

REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS COM MATERIAIS COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORÇADOS COM FIBRAS



Susana Cabral-Fonseca

Investigadora Auxiliar
LNEC
Lisboa
sbravo@lnec.pt

SUMÁRIO

Neste artigo é abordado o tema da utilização de materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras na reabilitação de estruturas. Procuraram-se sistematizar os motivos que têm conduzido ao sucesso da aplicação desta família de materiais, designadamente por darem aos projectistas a possibilidade de construir soluções “por medida” que se adequem aos requisitos específicos de uma dada aplicação.

Palavras-chave: Reabilitação, Materiais compósitos, Polímeros reforçados com fibras

1. INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras, também conhecidos por plásticos reforçados com fibras (de sigla FRP, da sua denominação na língua inglesa), têm emergido nos últimos anos como materiais atractivos para aplicações na Engenharia Civil, nomeadamente na construção de novos elementos estruturais e para a reabilitação de estruturas já existentes, extravasando assim os mercados iniciais que se circunscreviam às indústrias aeronáutica e de defesa [1].

A leveza e as elevadas características mecânicas que caracterizam os FRP, associadas à sua resistência à corrosão, através de uma combinação sinérgica de fibras de reforço e de matrizes poliméricas, tornam estes materiais adequados a diversas aplicações no domínio da indústria da construção, permitindo soluções construtivas inovadoras muitas vezes impossíveis de conceber com os materiais de construção tradicionais [2].

2. ENQUADRAMENTO

Durante o Século XX observou-se um crescimento sem precedentes na construção de infra-estruturas a nível mundial. Este crescimento não foi, na maioria das vezes, acompanhado pela implementação de programas adequados de manutenção e protecção destas estruturas, assunto a que só se veio a dar maior importância nas últimas duas décadas desse Século. Assistiu-se, ainda, à alteração de muitos requisitos de utilização e de segurança para alguns tipos de estruturas que, embora não se encontrem deterioradas, necessitam de intervenção [3]. Assim, a necessidade de reabilitar as estruturas degradadas, herdadas do Século XX, é um dos grandes desafios da Engenharia Civil do Século XXI.

A deterioração de pontes, edifícios e outras estruturas pode ser atribuída ao envelhecimento do próprio material por factores ambientais, deficiências de projecto e construção, insuficiências do programa de manutenção ou ocorrência de acidentes imprevisíveis (por exemplo, sismos). Quer porque as estruturas estejam a atingir o período de vida inicialmente previsto, evidenciando já efeitos de envelhecimento ou degradação prematura (acidental ou não), quer por terem surgido novas exigências estruturais, torna-se frequentemente necessário optar entre a sua substituição ou reabilitação [4]. Tal decisão é normalmente alicerçada em factores de natureza económica, social e/ou cultural. A reabilitação, muitas vezes associada ao reforço da estrutura, é a solução mais conveniente em muitas situações em que a substituição da estrutura seja impraticável, quer por motivos económicos, logísticos ou ainda culturais, nos casos em que se reclamam razões de salvaguarda do património construído.

A necessidade de proceder à reabilitação de estruturas em ambientes especialmente exigentes tem motivado a procura de diferentes tipos de soluções, que incluem técnicas e materiais distintos dos utilizados tradicionalmente. Nos últimos anos tem-se assistido à implementação de técnicas de reabilitação, com objectivos de reforçar, reparar ou implementar medidas de segurança anti-sísmica, utilizando materiais de FRP [5, 6, 7]. Estes materiais conjugam a resistência mecânica de fibras de reforço (principalmente, vidro e carbono) com as propriedades da matriz polimérica (normalmente de natureza termoendurecível) que constitui a fase contínua e que mantém as fibras protegidas e posicionadas, assegurando assim a transferência de carga entre elas.

3. MATERIAIS COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORÇADOS COM FIBRAS

Os FRP constituem uma família de materiais cuja aplicação estrutural generalizada em diversos domínios industriais tem conhecido ritmos de crescimento assinaláveis, desde o seu aparecimento em meados do Século XX [8]. Com efeito, apesar da produção e utilização de materiais compósitos, como conceito genérico, remontar à antiguidade, só no início da década de 1940 e após a descoberta dos polímeros artificiais e das primeiras fibras de reforço – as fibras de vidro, surgiram os primeiros FRP. Na década seguinte, iniciaram-se aplicações dos plásticos reforçados com fibras de vidro (GFRP) na indústria aeronáutica e aeroespacial. Estas indústrias foram, e são ainda actualmente, a força impulsionadora da

investigação e desenvolvimento dos materiais compósitos de elevado desempenho. Como resultado dos esforços, iniciados na década de 1960, no sentido de produzir fibras ainda mais resistentes e, sobretudo com maior módulo de elasticidade, surgiram as fibras de carbono, no início da década de 1970, que permitiram um assinalável desenvolvimento dos FRP, designadamente devido a um aumento considerável da aplicação dos plásticos reforçados com fibras de carbono (CFRP) nas indústrias tecnologicamente mais avançadas [2].

Apesar dos FRP apresentarem, desde o seu aparecimento, um ritmo de crescimento de consumo acelerado, só em meados da década de 1980 começaram a ter relevância na indústria da construção. Com efeito, quando comparados com outros materiais de construção convencionais, como a madeira, o aço ou o betão, os compósitos foram considerados, durante muitos anos, como materiais avançados utilizados apenas em produtos inovadores e de elevado desempenho. Actualmente, contudo, a enorme variedade de materiais poliméricos que se podem utilizar como matriz e a diversidade de formas e natureza dos reforços, bem como o conjunto de técnicas de fabrico já existentes, permitem a produção de uma vasta gama de FRP capaz de melhor se adequar a um maior número de aplicações [9].

O interesse crescente que os FRP têm vindo a suscitar na Engenharia Civil deve-se a vários factores que se resumem no Quadro 1 [2]. De uma forma geral, pode-se afirmar que eles dão ao projectista a possibilidade de escolher de entre uma infinidade de materiais o que “por medida” melhor se adequa aos requisitos específicos de uma dada aplicação, contribuindo para alargar a gama de materiais de construção que tem ao seu dispor.

Quadro 1. Características dos FRP como material de construção

Característica	Vantagem
Leveza	<ul style="list-style-type: none"> ✓ ¼ do peso do aço (em média) ✓ Colmatar situações impraticáveis com materiais convencionais, devido ao peso ✓ Facilidade de transporte e aplicação em obra
Elevada resistência e rigidez	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Possibilidade de concepção de componentes estruturais mais leves e resistentes
Versatilidade de propriedades	<ul style="list-style-type: none"> ✓ A escolha dos componentes dos FRP (natureza e configuração das fibras de reforço e da matriz polimérica) assim como do método de fabrico, permite fabricar o material “à medida” das exigências da aplicação em causa
Resistência à corrosão	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Vantagem importante em aplicações em que podem substituir outros materiais, designadamente os metálicos
Transparência electromagnética	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Relevante em estruturas em que é necessário evitar interferências electromagnéticas (exemplo armaduras metálicas do betão armado)
Resistência à fadiga	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Importante em estruturas com aptidões anti-sísmicas
Manutenção reduzida	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Apesar dos custos iniciais poderem ser superiores aos materiais de construção convencionais, a reduzida manutenção ao longo da vida em serviço, torna-os economicamente competitivos

Mas estes materiais também ostentam alguns inconvenientes, sendo o mais apontado nas aplicações estruturais, o facto de apresentarem um comportamento linear elástico até à rotura, sem cedência ou deformação plástica, ao contrário do que acontece com a maioria dos aços. A possibilidade da rotura poder acontecer subitamente e deve, por isso, ser tida em consideração na fase de projecto. A sua natureza orgânica também os torna, à partida, mais susceptíveis a temperaturas elevadas, designadamente em caso de incêndio, devendo este aspecto ser igualmente tido em conta na fase de projecto [2].

4. APLICAÇÕES DOS FRP NA ENGENHARIA CIVIL

Nos últimos anos assistiu-se a um aumento significativo do número e diversidade de aplicações dos FRP na Engenharia Civil (Figura 1), quer como material de construção, por si só, quer em conjugação com outros materiais de construção tradicionais, como o betão, o aço e a madeira. Para além disso, esta classe de materiais tem vindo a evidenciar-se em aplicações relacionadas com a reabilitação de estruturas existentes.

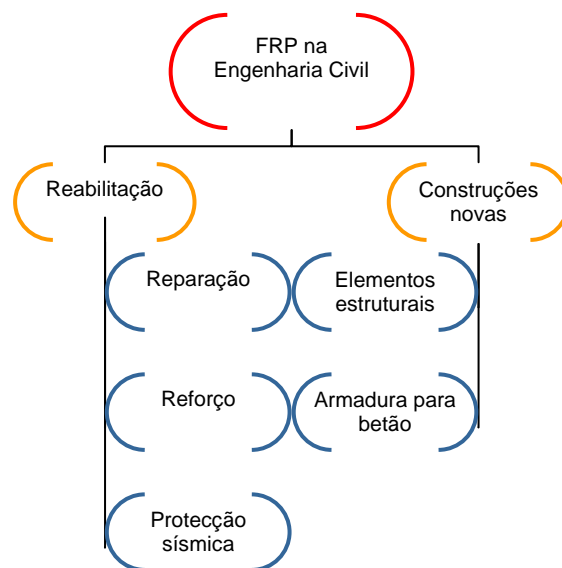


Figura 1: Aplicação dos FRP na Engenharia Civil

Nas construções novas destaca-se a utilização destes materiais em aplicações estruturais em que os FRP, devido às suas características particulares, podem substituir os materiais de construção tradicionais, podendo ser construídos componentes, ou mesmo estruturas inteiras de maior ou menor envergadura. As soluções existentes subdividem-se em dois grupos: (i) produtos que se encontram para venda sob a forma de componentes padronizados de diferentes formas e dimensões, de onde se destacam os perfis pultrudidos de FRP, que já se encontram ao abrigo de uma norma europeia [10]; (ii) produtos projectados e fabricados “à medida” para aplicações específicas.

Nas construções novas destaca-se ainda a utilização dos FRP como armadura de betão (sob a forma de varões ou malhas bi e tridimensionais) e na forma de cabos de pré-esforço [11, 12].

5. APLICAÇÕES DOS FRP NA REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS

Na reabilitação das estruturas existentes os FRP são normalmente usados com objectivos de reforço, reparação e na melhoria do desempenho sísmico das estruturas:

<u>Reparação</u>	Colmatação de uma deficiência funcional, ou substituição de um componente estrutural degradado; traduz as situações em que se recupera a resistência da estrutura onde ela está comprometida;
<u>Reforço</u>	Relacionado com a melhoria do nível de desempenho da estrutura, por exemplo, aumento de capacidade de carga de uma ponte por alteração do seu tabuleiro; pode igualmente resultar da correcção de anomalias decorrentes de deficiências de projecto e/ou construção ou falta de manutenção;
<u>Protecção sísmica</u>	Associado à melhoria da capacidade da estrutura para resistir a sismos, nomeadamente por aumento da ductilidade e da resistência ao corte dos seus elementos estruturais, o que permite que se atinjam níveis de dissipação da energia e de capacidade de deformação compatíveis com as exigências estabelecidas nos regulamentos aplicáveis à estrutura em causa.

A reparação das estruturas é frequentemente acompanhada por uma necessidade de melhorar o seu desempenho de forma a cumprir requisitos mais exigentes (por exemplo resultantes do aumento de tráfego numa ponte sub-projectada), surgindo associada ao reforço. Por outro lado, a necessidade de reforço pode surgir em estruturas que não estão degradadas, na sequência da implementação de acções preventivas anti-sísmicas

A reabilitação das estruturas com FRP pode ser efectuada por inúmeras técnicas, como a colagem de mantas e os laminados, pré-tencionados ou não, nas faces dos elementos estruturais ou a aplicação de cabos, pós-tensionados ou não, com o objectivo de aumentar a sua resistência à flexão e ao corte. Pode ainda efectuar-se o encamisamento total ou parcial do elemento estrutural, como por exemplo de um pilar, de forma a aumentar a sua ductilidade e resistência ao corte.

De acordo com a natureza e especificidades da estrutura a reabilitar, poderão ser usadas diferentes estratégias de reabilitação. Segue-se uma breve descrição das principais aplicações de FRP na reabilitação de estruturas (i) de betão, (ii) metálicas; (iii) madeira e (iv) alvenaria.

5.1 Estruturas de betão

Uma das técnicas tradicionais de reforçar/reparar estruturas de betão envolve a aplicação de chapas de aço na superfície externa da estrutura. Esta técnica, embora simples e efectiva, se forem considerados os aspectos relacionados com os custos e com o desempenho mecânico, apresenta os seguintes inconvenientes: (i) corrosão das chapas e deterioração da ligação aço-betão; (ii) necessidade de utilização de meios de transporte e de elevação potentes devido ao peso das chapas de aço; (iii) dificuldade de manipulação em espaços confinados e (iv) necessidade de juntas (soldaduras) por restrições dimensionais das chapas.

A substituição das chapas de aço por placas de FRP no reforço externo de estruturas de betão permite solucionar os problemas acima referidos. Estes materiais são comercializados em duas formas distintas [13, 14]:

- Sistema pré-fabricado (Figura 2): constituído por uma banda ou lâmina com reforço unidireccional, geralmente produzido por pultrusão; o agente adesivo (cola) usado na colagem do compósito ao betão é em geral uma resina epoxídica. Também existem componentes pré-fabricadas com formatos específicos.



Figura 2: Aplicação de um sistema pré-fabricado de FRP

- Sistema de cura "in situ" (Figura 3): constituído por feixes de fibras contínuas em forma de mantas, folhas ou tecidos, que se encontram pré-impregnadas, ou não, com uma matriz polimérica; a resina utilizada durante a aplicação deste reforço em obra tem como função a consolidação deste em paralelo com a sua colagem ao substrato; esta técnica permite a conjugação de reforço em várias direcções por aplicação de mantas com diferentes disposições/geometria de fibras.

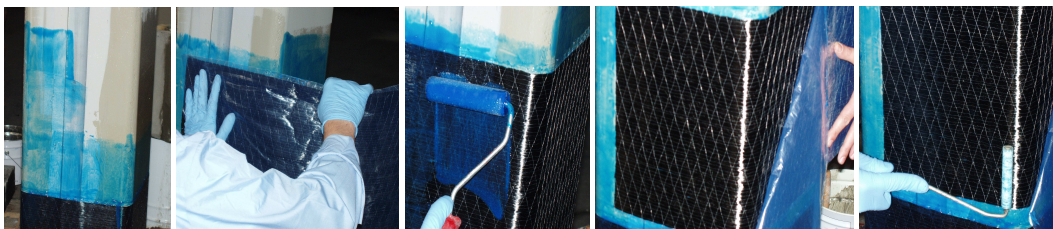


Figura 3: Aplicação de um sistema de cura "in situ" de FRP

Os sistemas pré-fabricados apresentam um melhor grau de uniformidade e de controlo da qualidade, pelo facto do material compósito ser fabricado em condições controladas. Para

que o sistema de reforço seja eficaz é necessário assegurar que o agente adesivo escolhido favorece a ligação do material compósito à superfície do betão. Os sistemas de cura “in situ” oferecem uma grande versatilidade para aplicações em campo que apresentem geometrias irregulares ou locais de difícil acesso com placas pré-fabricadas. Contudo, apresenta uma maior variabilidade nas suas propriedades, quando comparado com o sistema anterior.

Para além das técnicas de colagem de FRP descritas, têm sido desenvolvidas técnicas especiais:

- Encamisamento automático de pilares ou outras estruturas (por exemplo, chaminés) que consiste no enrolamento automático de um feixe de fibras ou de uma fita em redor da estrutura de betão. Este processo apresenta como principais vantagens a rapidez de instalação com uma qualidade controlada.
- FRP pré-tensionado: nalguns casos é vantajoso colar os FRP à superfície do betão num estado pré-tensionado (esta técnica exige dispositivos de ancoragem especiais).
- Inserção do reforço de FRP em pequenas ranhuras especialmente executadas para o efeito.

Apesar da utilização dos FRP na reabilitação de estruturas de betão ser relativamente recente, foram elaborados códigos e guias de projecto na Europa, nos Estados Unidos e no Japão [2].

5.2 Estruturas de madeira

A leveza e a resistência dos laminados de FRP usados no reforço de estruturas de betão tornam esta técnica igualmente aplicável na reabilitação de estruturas de madeira [15]. Com efeito, existe actualmente um considerável número de estruturas de madeira que foram reforçadas através da colagem de chapas ou laminados de FRP ou com a aplicação de mantas ou tecidos pela técnica de cura “in situ”. Nestes projectos foi demonstrada a habilidade dos materiais compósito para melhorar a resistência à flexão e ao corte, a rigidez e a ductilidade de vigas e pilares de madeira [16]. Outra aplicação muito importante dos FRP na reabilitação de estruturas de madeira é no melhoramento do desempenho das ligações mecânicas que são, frequentemente, as zonas mais susceptíveis.



Figura 4: Exemplo de aplicação de FRP numa estrutura de madeira (Catálogo “Sika Carbodur FRP Composites”)

5.3 Paredes de alvenaria

Nos últimos anos têm surgido exemplos de aplicação dos FRP na reabilitação de paredes de alvenaria, nomeadamente em património de importância histórica que necessita de ser preservado [17]. As técnicas geralmente usadas são a colagem à superfície de bandas de FRP ou a inserção de varões em entalhes produzidos para o efeito.



Figura 5: Exemplo de aplicação de FRP numa parede de alvenaria (Catálogo “Sika Carbodur FRP Composites”)

5.4 Estruturas metálicas

A reabilitação de estruturas metálicas com FRP apresenta um conjunto diferente de aspectos e problemas mais difíceis de resolver que o reforço de betão armado, em particular porque os materiais metálicos são mais resistentes e rígidos e portanto mais complicados de reforçar. Fundamentalmente utilizam-se duas técnicas: (i) a colagem de bandas ou laminados, normalmente fabricadas por pultrusão; (ii) colocação de mantas, quando a geometria da estrutura é complexa, ou em reforço de ligações. Os FRP mais utilizados no reforço externo de estruturas metálicas são os CFRP pelo facto de apresentarem melhores características mecânicas. Contudo, o menor valor do módulo de elasticidade destes materiais, quando comparados com o aço, obriga ao aumento da espessura requerida, e consequentemente o custo associado. Inúmeros projectos exploram a aplicação de laminados de CFRP pré-tensionados em estruturas de aço para melhorar a sua resistência a cargas de fadiga [18].

É importante realçar que na reabilitação de estruturas metálicas, os CFRP devem permanecer suficientemente isolados do aço de forma a prevenir a formação de correntes galvânicas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A indústria da construção encontra-se, neste início do Século XXI, a ser conquistada pelos FRP sob a forma de inúmeros produtos inovadores, cobrindo uma extensa gama de aplicações, que inclui a construção de estruturas novas, assim como a reabilitação das já existentes. Há indicações claras [19, 20] de que a reabilitação de estruturas usando FRP irá

continuar a crescer, prevendo-se que venha a ser a solução de muitos projectos de reforço, reparação e melhoria do desempenho anti-sísmico de pontes, edifícios, monumentos e outras estruturas.

A importância que os FRP vierem a ter no futuro na área da reabilitação de estruturas depende de diversos factores, designadamente o estabelecimento de códigos de projecto e ferramentas harmonizadas, assim como na elaboração de guias de boas práticas de aplicação e controlo da qualidade em obra.

REFERÊNCIAS

- [1] Lopez-Anido, R., Karbhari, V.M. – *Emerging Materials for Civil Infrastructure – State-of-the-art*. American Society of Civil Engineering, 2000, 224 p.
- [2] Cabral-Fonseca, S. – *Materiais Compósitos de Matriz Polimérica Reforçada com Fibras usados na Engenharia Civil: Características e Aplicações*. Informação Técnica de Materiais de Construção 35, LNEC, 2005.
- [3] Karbhari, V.M.; Seible, F. – “Fibre-reinforced composites – Advanced materials for the renewal of civil infrastructure”, *Applied Composite Materials*, 7 (2000) 95-124.
- [4] Bakis, C.E., Bank, L.C. et al – “Fibre-reinforced polymer composites for construction – State of art review”, *Journal of Composites for Construction*, 6 (2002), 73-87.
- [5] Halliwell, S.M. – *Polymer Composites in Construction*. BRE Publication, 2000.
- [6] Hollaway, L.C., Head, P.R. – *Advanced Polymer Composites and Polymers in the Civil Infrastructure*. Elsevier, 2001.
- [7] Cripps, A. – *Fibre-reinforced Polymer Composites in Construction*. Construction Industry Research and Information Association, CIRIA C564, 2002.
- [8] Martins de Brito, F. – *Caracterização do comportamento dos plásticos reforçados com vista a aplicações estruturais*, LNEC, 1985.
- [9] Bank, L.C. – *Composites for construction: Structural design with FRP materials*. Wiley & Sons, 2006.
- [10] EN 13706 (2002): Reinforced plastics composites – Specification for pultruded profiles. Part 1: Designation; Part 2: Methods of test and general requirements; Part 3: Specific requirements.
- [11] ACI 440R.96 - State-of-the-art report on fiber reinforced plastic (FRP) reinforcement for concrete structures, American Concrete Institute, 1996.
- [12] ACI 440.1R.01 - *Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars*, ACI Committee 440, American Concrete Institute, 2001.
- [13] ACI 440.2R.02 - *Guide for the design and construction of externally bonded FRP system for strengthening concrete structures*, ACI Committee 440, American Concrete Institute, 2002.

- [14] *Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*, FIB - Technical report on the design and use of externally bonded fiber reinforced polymer reinforcement (FRP EBR) for reinforced concrete structures, Fédération Internationale du Béton, 2001.
- [15] Steiger, R. - *Fibre reinforced plastics (FRP) in timber structures*, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, EMPA, Wood Department, Switzerland, 2001.
- [16] Meier, U. – *Strengthening and stiffening of historic wooden structures with CFRP* – Euromat 2003, Symposium P2 – Materials and Conservation of Cultural Heritage, EPFL – Lausanne.
- [17] Jai, J. et al – “Reinforcing masonry walls with composite materials”, *Journal of Composite Materials*, 34 (2000) 1369-1381.
- [18] Hollaway, L.C.; Cadei, J. – “Progress in the technique of upgrading metallic structures with advanced polymer composites”, *Progress in Structural Engineering and Materials*, 4 (2002) 131-148.
- [19] Hollaway, L.C. – “The evolution of and the way forward for advanced polymer composites in the civil infrastructure”, *Construction and Building Materials*, 17 (2003) 365-378.
- [20] Meier, U. – *External strengthening and rehabilitation: Where from-Where to?* FRP International – The Official Newsletter of the International Institute for FRP in Construction, 2004.