

Aplicações de materiais compósitos de resina e fibras na engenharia de construção

Luiz Antonio Vieira Carneiro, D.Sc.*

Ana Maria Abreu Jorge Teixeira, D.Sc.**

RESUMO

Este trabalho apresenta um resumo das diferentes aplicações de materiais compósitos de resina e fibras em estruturas para a engenharia de construção. Abordam-se os principais tipos de técnicas de reparo e reforço de elementos estruturais com o uso de materiais compósitos de resina e fibras e exemplo de sua aplicação em obras de reparo e/ou reforço ou em obras de pontes. Constata-se que, dependendo do seu tipo e das suas propriedades, as aplicações dos materiais compósitos na Engenharia de Construção são as mais variadas, fruto de sua versatilidade e de sua fácil colocação.

PALAVRAS-CHAVE

Compósitos, resinas, fibras, propriedades, aplicações, engenharia de construção.

Introdução

Diversas são as aplicações de materiais compósitos de resina e fibras em estruturas para a engenharia de construção. Dentre estas, podem-se citar o reparo e reforço de estruturas e a construção de pontes, viadutos e passarelas.

Técnicas de reparo e reforço de elementos estruturais de concreto são várias, e sua escolha deve depender das causas e extensão dos danos, da disponibilidade dos materiais e de estudo de viabilidade

de técnico-econômica. Diferentes tipos de reparo e reforço de elementos estruturais, sobre os quais têm havido estudos analíticos e experimentais, vêm sendo desenvolvidos e aplicados. Entre estes elementos estão lajes (de pontes, de piso de estacionamento), vigas (de pontes e de edificações em geral), e pilares (de pontes, de edifícios e de ancoradouros) de concreto, além de elementos estruturais de alvenaria (paredes), de madeira e de aço, muros de arrimo, túneis, silos, tanques e chaminés, e em diversas estruturas sujeitas a abalos sísmicos.

* Professor e Coordenador de Graduação da Seção de Ensino de Engenharia de Fortificação e Construção, Instituto Militar de Engenharia.

** Professora e Chefe do Laboratório de Materiais de Construção e Concreto, Seção de Ensino de Engenharia de Fortificação e Construção, Instituto Militar de Engenharia.

Sistemas de reparo e reforço com compósitos de resina e fibras

Sistemas de reforço de elementos estruturais de concreto são projetados de acordo com o tipo de estrutura e com o desempenho desejado, devendo-se levar em conta as propriedades e características dos materiais que o compõem, a interação destes materiais e as condições de execução do reforço.

Os dois tipos mais comuns encontrados no mercado são aqueles que o material de reforço é comercializado na forma de pré-fabricados ou secos pré-impregnados com resinas ou não. Todos são colados na superfície a ser reforçada com o uso de resinas, que completam o sistema de reforço e cada um deles tem suas particularidades e vantagens.

Sistemas pré-fabricados

Os sistemas pré-fabricados são laminados de compósitos de resina e fibras, com tamanhos e seção transversal definidos e prontos para serem colados no elemento estrutural a ser reforçado.

Em geral, têm 40% a 70% de teor de fibras, em volume, com espessura variando de 1,0mm a 1,5mm e podem ser aplicados em uma ou mais camadas, em superfícies planas.

Seu processo de fabricação é automatizado e normalmente baseia-se na pultrusão, que consiste na produção de compósitos de grandes comprimentos, de diversas formas e de seção transversal constante. Após serem as fibras alinhadas e impregnadas com a resina líquida aquecida, os compósitos são tracionados continuamente, passando por um molde aquecido, sobre o qual são curados e cortados nos tamanhos desejados (v. Figura 1).

Um dos sistemas pré-fabricados encontrados no mercado é o da SIKA (1998), formado de

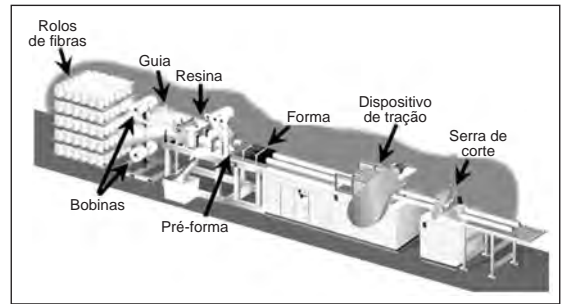


Figura 1 – Esquema do Processo de Pultrusão de Compósitos Pré-fabricados. Disponível em: <<http://www.strongwell.com/Processes/Pultrusion.html>>. Acesso em: ago. 2003.

lâmina de compósito de resina epóxi e fibras de carbono, para o qual são dadas as recomendações abaixo apresentadas.

Caso a superfície do concreto a ser reforçada esteja fissurada ou desnivelada, recomenda-se a injeção das fissuras com resina epóxi apropriada e aplicação de argamassa polimérica na superfície desnivelada.

Após preparo do substrato de concreto e feita a verificação de que a resistência do concreto à tração é superior a 1,5 MPa por meio de ensaio de arrancamento, aplica-se uma camada de 1mm de espessura de resina epóxi, sem necessidade do uso de *primer* na superfície do concreto. Sobre a superfície limpa da lâmina de compósito de resina e fibras de carbono, aplica-se também uma camada de 1mm a 2mm de espessura da mesma resina epóxi.

Dependendo do ambiente do elemento estrutural reforçado, pode-se aplicar uma camada de proteção à base de polímeros ou resina epóxi. Em face da limitação de temperatura de trabalho de 50 °C do sistema da SIKA (1998), aconselha-se aplicar sobre a camada de proteção um revestimento de cor clara.

Sistemas Curados in Situ

São sistemas formados por feixe de fibras contínuas na forma de fios (mantas), mais comu-

mente unidirecionais (folhas) ou bidirecionais (tecidos) em estado seco ou pré-impregnado, colado sobre uma resina epóxi previamente espalhada na superfície plana ou curva a ser reforçada.

Em comparação com os sistemas pré-fabricados, são mais flexíveis e aplicáveis em diferentes tipos de estruturas, têm menor espessura final, que pode variar entre 0,1mm e 0,5mm, e têm 25% a 40% de teor de fibras.

Contudo, apresentam a desvantagem de um menor controle de qualidade, já que, ao se impregnar as fibras com resina, o compósito pode ter suas fibras desalinhadas, fato que afeta suas propriedades.

Segundo catálogo da MBT (1998), seu sistema de reforço curado *in situ* é constituído por um preparador de superfície, uma massa reparadora de defeitos da superfície, um epóxi saturante com alto teor de sólidos, uma ou mais camadas de folha de fibras de carbono unidire-

cionais, e uma camada de revestimento que tem função protetora e estética.

Antes da execução do reforço, recomenda-se arredondamento de cantos vivos a fim de se evitar a ruptura prematura da fibra de carbono devido à concentração de tensões, e adequado preparo da superfície do concreto.

A Figura 2 ilustra as etapas de aplicação do sistema de reforço Mbrace™, que são:

1) aplicação de *primer*, que é um epóxi de baixa viscosidade e de alta concentração de sólidos, com o uso de um rolo (v. Figura 2a);

2) nivelamento da superfície com uma pasta de epóxi com alta concentração de sólidos, utilizando-se um rodo ou uma desempenadeira (v. Figura 2b);

3) aplicação da primeira camada de resina com alta concentração de sólidos, por meio de um rolo, com o objetivo de iniciar a saturação das fibras de carbono (v. Figura 2c);

4) aplicação da folha de fibra de carbono, componente mais importante do sistema, sobre a



(a) Aplicação de *Primer* na Superfície de Concreto



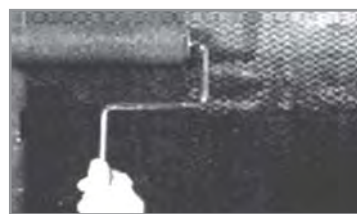
(b) Aplicação de Resina Epóxi na Superfície de Concreto



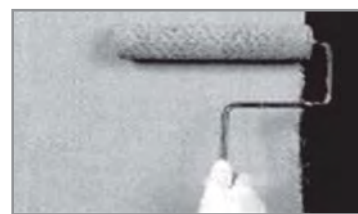
(c) Aplicação da Cola de Resina Epóxi na Superfície de Concreto



(d) Aplicação da Folha de Fibras de Carbono na Superfície de Concreto



(e) Aplicação da Cola de Resina Epóxi sobre a Folha de Fibras de Carbono Colada



(f) Aplicação de Camada Proteção sobre a Folha de Fibras de Carbono Colada

Figura 2 – Etapas de Aplicação do Sistema de Reforço Mbrace™. Disponível em: <<http://www.teprem.com.br/Fibra2.htm>>. Acesso em: mai. 2003

primeira camada de saturante úmido, removendo-se o papel de suporte (v. Figura 2d);

5) aplicação da segunda camada de resina, com o uso de um rolo (v. Figura 2e);

6) aplicação da camada de proteção (v. Figura 2f).

Para o caso de reforço com mais de uma camada, depois da etapa 5, repetem-se as etapas 3, 4 e 5 antes da 6.

Tipos de reforço com compósitos de resina e fibras

Reforço por encamisamento automatizado

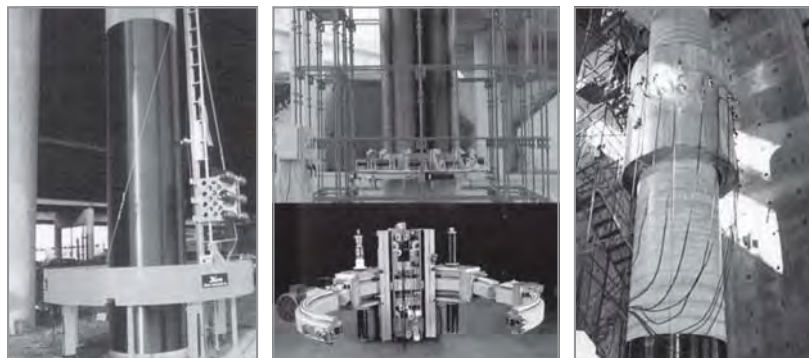
O encamisamento de pilares ou outros elementos, como, por exemplo, chaminés, com sis-

equipamento utilizado para execução de cura do sistema de reforço.

Reforço com Pré-tração

Neste tipo de técnica (v. Figura 4), compósitos de resina e fibras são tracionados com tensão de cerca de 50% da sua resistência à tração antes das operações de colagem e de execução de sistema de ancoragem nas extremidades do reforço de superfícies de concreto de pilares ou de vigas.

Suas principais vantagens são os ganhos de resistência e de durabilidade em consequência do aumento de rigidez e da diminuição da abertura de fissuras na estrutura de concreto reforçado com relação a sem reforço, embora seja uma técnica mais demorada e de maior custo que a sem pré-tração do material de reforço.



(a) Equipamentos de Encamisamento ROBO-Wrapper™

(b) Equipamento de Cura do Reforço ROBO-Curing System™

Figura 3 – Detalhe da Técnica de Encamisamento Automático. Disponível em: <<http://www.xsys.com/rwfp.html>>. Acesso em: ago. 2003

temas de compósitos de resina e fibras curados *in situ* pode ser feito por meio de um equipamento robotizado, que permite rápida execução de reforço de boa qualidade.

Tipos de equipamentos de encamisamento automático, de acordo com dimensões do pilar e velocidade de execução, podem ser visualizados na Figura 3a. A Figura 3b ilustra



Figura 4 – Detalhe da Técnica de Reforço com Pré-tração em Vigas. Disponível em: <http://www.sp-reinforcement.ch/english/i_faser_06e.htm>. Acesso em: jul. 2003

Cura Térmica Acelerada do Reforço *in Situ*

Em locais de baixa temperatura ou onde se requer menor tempo de execução do reforço, a cura térmica pode ser adotada, com o uso de dispositivos de aquecimento elétricos ou de infravermelho.

Aproveitando a boa condutividade elétrica das fibras, característica mais destacada nas de carbono, esta técnica de reforço (v. Figura 5) utiliza equipamento de aquecimento que permite a passagem de corrente elétrica através do compósito durante a execução do reforço e controla a temperatura de cura da cola.

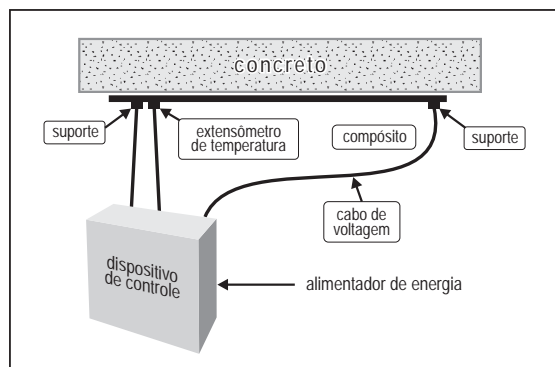


Figura 5 – Detalhe da Técnica de Cura Térmica Acelerada (CEB, 2001)

Pré-moldagem do Reforço

Sistemas pré-fabricados de materiais compósitos de resina e fibras podem ser moldados antes da sua aplicação no elemento estrutural, em vez do uso de sistemas curados *in situ*.

Nesta técnica, os materiais compósitos de resina e fibras pré-moldados servem como elementos de fôrma e de armadura externa do elemento de concreto a ser reforçado. É utilizada comumente no confinamento externo de



Figura 6 – Exemplo de Aplicação da Técnica de Pré-moldagem. Disponível em: <http://www.innovationandresearchfocus.org.uk/articles/html/issue_52/strengthening_concrete_structures_with_fibre_-_composites.asp>. Acesso em: ago. 2003

pilares, particularmente de seção transversal circular (v. Figura 6).

Reforço colado em sulcos feitos no concreto

Em vez da colagem tradicional do material compósito de resina e fibras na superfície externa de concreto, é feita a colagem do reforço em sulcos abertos na superfície de concreto (v. Figura 7), cuja profundidade tem dimensão menor que a do cobrimento.

Possibilidade de maior capacidade de ancoragem e de melhor proteção do reforço são vantagens com relação à técnica tradicional de colagem externa do reforço (BARROS *et al.*, 2003; FORTES *et al.*, 2003).

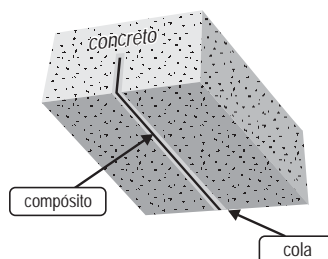


Figura 7 – Detalhe da Técnica de Colagem do Reforço em Sulcos de Concreto (CEB, 2001).

Impregnação a vácuo do reforço

Até certo ponto, esta técnica pode ser comparada com a tradicional técnica de colagem de sistemas curados *in situ*. Tendo sido as fibras dispostas na direção principal do reforço, após devido preparo, aplicação e cura de *primer* na superfície de concreto, o equipamento a vácuo (v. Figura 8) é colocado sobre a camada de fibras e, então, aplica-se pressão a vácuo, cuja intensidade depende de resina epóxi distribuída sobre o concreto.

Apesar do maior custo e da dificuldade no alcance do nível de pressão a vácuo requerida, a técnica de impregnação a vácuo tem algumas vantagens sobre a técnica de colagem de sistemas curados *in situ*, sendo a falta de manuseio na sua execução a que mais se destaca, o que leva a uma boa qualidade do sistema de reforço.

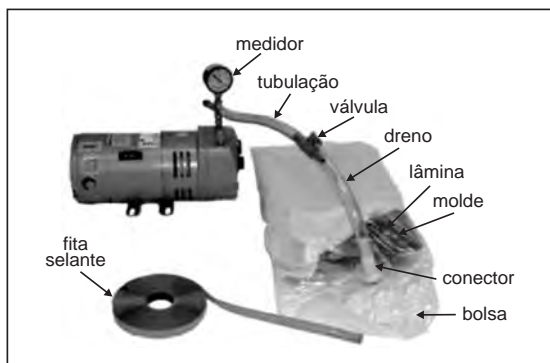


Figura 8 – Detalhes do Equipamento de Impregnação a Vácuo. Disponível em: <<http://www.fibreglast.com/products>>. Acesso em: abr.2003

Exemplos de aplicação dos compósitos de resina e fibras

Obras de reparo e/ou reforço

Apesar de os materiais compósitos de resina e fibras serem frágeis, mas relativamente de-

formáveis, mais caros que o aço (TRIANTAFILLOU, 1998b), e necessitarem de proteção contra radiação ultravioleta e fogo (EMMONS *et al.*, 1998a, b), tiveram sua aplicação inicialmente motivada pela necessidade de reforçar estruturas danificadas por abalos sísmicos no Japão.

Exemplos de aplicação de compósitos de resina e fibras no reforço de lajes, vigas e pilares de concreto, realizados no ano de 1996 nas cidades italianas de Perugia, Bari e Spoleto, respectivamente, podem ser vistos na Figura 9.



Figura 9 – Exemplos de Aplicação de Materiais Compósitos de Resina e Fibras no Reforço de Elementos Estruturais de Concreto. Disponível em: <<http://www.shf.ac.uk/uni/projects/tmrnet/galleries>>. Acesso em: nov.2002



Figura 10 – Exemplo de Aplicação de Lâminas de Compósitos de Resina e Fibras de Carbono no Reforço de Lajes de Concreto. Disponível em: <<http://www.ecn.purdue.edu/ECT/Civil/cfrp.htm>>. Acesso em: jul. 2003

A Figura 10 apresenta aplicação de lâminas de compósitos de resina e fibras de carbono no reforço bidirecional de lajes de concreto.

Balázs e Almakt (2000) relataram alguns exemplos de aplicação dos materiais compósitos de resina e fibras no reforço de diferentes estruturas danificadas pela corrosão do aço, pela fissuração intensa ou pela ação do fogo, ou afetadas por mudanças de elementos estruturais realizados na Hungria desde 1996, tais como lajes com ou sem aberturas, vigas de concreto armado e protendido e silos.

No Brasil, várias são as aplicações de compósitos no reforço de lajes (de pontes, de piso de estacionamento), vigas (de pontes e de edificações em geral), pilares (de pontes, de edifícios e de ancoradouros), paredes de concreto, muros de arrimo, túneis, silos, tanques e torres de transmissão de sinais.

Devido ao aumento de sobrecarga, executaram-se reforços à flexão na laje de um supermercado em Jacarepaguá/RJ, destinada a depósito de mercadorias, conforme ilustra a Figura 11.

Em um prédio localizado em São Cristóvão/RJ, foram feitos serviços de recuperação da armadura interna longitudinal de tração e de reforço à flexão e ao cortante em vigas de concre-



(a) Reforço Bidirecional na Região de Momentos Fletores Positivos



(b) Reforço Unidirecional na Região de Momentos Fletores Negativos

Figura 11 – Exemplo de Aplicação de Folhas de Compósitos de Resina e Fibras de Carbono no Reforço de Lajes de Concreto. (Fonte: TEPREM Engenharia Ltda. – jan. 2000).

to para que a estrutura pudesse suportar cargas oriundas de equipamentos de grande peso. A Figura 12 apresenta algumas das etapas destes serviços.

A Figura 13 mostra sequência de etapas de execução do reforço de pilares de um pavimento localizado no estacionamento de um *shopping center* no Rio de Janeiro/RJ. Os pilares, que apresentavam fissuras junto a suas extremidades, foram reforçados com duas camadas de folhas de resina e fibras de carbono, tendo 100mm de comprimento de traspasse entre as folhas.

Uma torre de transmissão de concreto armado de 100m de altura, com seção transversal variável de 4,6m na base a 3,0m no topo, foi confinada externamente com duas camadas de tiras



(a) Recuperação da Armadura com Inibidor de Corrosão



(b) Execução do Reforço à Flexão da Viga de Concreto



(c) Execução do Escoramento do Reforço da Viga para Cura da Cola



(d) Execução do Reforço ao Cortante da Viga de Concreto



(e) Vista Frontal da Obra de Reforço



(f) Vista Após Aplicação de Argamassa Protetora e Pintura

Figura 12 – Exemplo de Aplicação de Folhas de Compósitos de Resina e Fibras de Carbono no Reforço de Vigas de Concreto. (Fonte: TEPREM Engenharia Ltda. – 08/2000)



(a) Vista do Pilar Fissurado Antes do Reforço



(b) Injeção de Resina Epóxi nas Fissuras



(c) Arredondamento das Arestas de Canto do Pilar com Raio de 10mm



(d) Aplicação de Resina Epóxi Primer



(e) Aplicação de Resina Epóxi para Regularização da Superfície



(f) Aplicação de Resina Epóxi Saturante na Superfície do Concreto



(g) Colocação da Primeira Folha de Fibras de Carbono Sobre a Superfície do Concreto



(h) Colocação da Segunda Folha de Fibras de Carbono Sobre a Superfície com Resina Epóxi



(i) Vista Completa do Pilar Após a Segunda Camada de Reforço



(j) Vista Completa do Pilar Após a Segunda Camada de Reforço

Figura 13 – Exemplo de Aplicação de Folhas de Compósitos de Resina e Fibras de Carbono no Reforço de Pilares de Concreto. (Fonte: TEPREM Engenharia Ltda. – 12/1998)

de folhas de compósito de resina e fibras de carbono de 50cm de largura espaçadas de 70cm a 90cm, devido à fissuração do concreto, à corrosão das armaduras e ao aumento de carga provocado pela colocação de novas antenas para televisão digital. Esta solução foi adotada por levar a um pequeno aumento de cargas na fundação e por poder ser executada em região com concentração de antenas não removíveis da torre (DUARTE e CONTARINI, 1999).

Compósitos de resina e fibras têm sido empregados na forma de cabos (TRIANAFILLOU e FARDIS, 1997) ou lâminas (TRIANAFILLOU, 1998a) de compósito de fibras unidirecionais, por serem leves e conduzirem alteração mínima de dimensões em estruturas de alvenaria de edificações europeias históricas e de arquitetura relevante.

Estudos experimentais feitos por Plevris e Triantafillou (1995), Triantafillou (1997) e Triantafillou (1998a) mostraram que compósitos de resina e fibras colados podem ser satisfatoriamente utilizados como materiais de reforço à flexão e ao cortante de vigas de madeira. Também verificou-se que, na forma de compósitos pré-tracionados, podem melhorar o comportamento estrutural à flexão destas estruturas (TRIANAFILLOU e DESKOVIC, 1992).

Iyer (2001) e Iskander e Stachula (2002) relataram o uso bem-sucedido de tubos de compósitos de resina e fibras de vidro na execução de estacas de fundação de estruturas de pontes de concreto, sujeitas a águas salinas e solos agressivos.

Estruturas de ancoradouro de concreto armado foram alvos de estudos de reforço à flexão e ao cortante com materiais compósitos de resina e fibras (MALVAR *et al.*, 1995; PANTELIDES *et al.*, 1999, MONTI *et al.*, 2001).

A Figura 14 mostra exemplos de aplicação de estacas de tubos de compósitos de resina e



Figura 14 – Detalhe de Estacas de Tubos de Compósitos de Resina e Fibras de Vidro. Disponível em: <<http://www.ecn.purdue.edu/ECT/Civil/cp40.htm>>. Acesso em: jul. 2003

fibras de vidro, com núcleo de concreto, em obras de ponta de cais.

Cabos externos pré-tracionados e estribos em forma de barras internas de compósitos de fibras de carbono têm mostrado sua eficiência no reforço à flexão e ao cortante de estruturas de pontes de concreto (FAM *et al.*, 1997).

Obras de Pontes e Estruturas em Geral

Atualmente, materiais compósitos de resina e fibras têm sido aplicados na construção de pontes novas e também no reparo e reforço de pontes preexistentes. Eles têm sido utilizados na forma de barras para armaduras passivas no concreto e armaduras de protensão interna e externa, para estais, para cabos de pontes suspensas etc.; na forma de tiras e chapas para o reforço de vigas e pilares; na forma de perfis estruturais e na forma de painéis sanduíche para lajes de tabuleiro de pontes e lajes de edifícios (KELLER, 2003).

A construção de pontes em materiais compósitos demorou a ser aceita devido ao elevado custo inicial para a sua construção e à falta de conhecimento e entendimento das práticas de projeto, construção, inspeção e reparo. No entanto, o desenvolvimento pela indústria aeroes-

pacial, de produtos compósitos cada vez mais resistentes, rígidos e duráveis, tem impulsionado o aumento de pesquisas e a aplicação dos materiais compósitos na engenharia civil (HOTA e HOTA, 2002).

As primeiras aplicações dos materiais compósitos em pontes foram na reabilitação de estruturas existentes, por meio de reforço em materiais compósitos ou da substituição dos componentes estruturais convencionais danificados por outros em materiais compósitos (SEIBLE *et al.*, 1999).

Uma aplicação, cujo interesse vem crescendo muito na América do Norte e na Europa, é a utilização dos materiais compósitos nos tabuleiros de pontes novas ou já existentes. Isto porque, nessas regiões, há muitas pontes em concreto, que sofrem oxidação pelo uso frequente do sal para o degelo das pistas durante o inverno. Os tabuleiros em materiais compósitos são facilmente instalados, são leves, não sofrem corrosão e apresentam elevada energia de absorção de impacto, o que garante a este tipo de estrutura uma vida útil entre 50 e 60 anos, que é bem superior à vida útil entre 15 e 20 anos prevista para as estruturas de concreto nessas regiões (HOTA e HOTA, 2002). Na maioria desses tabuleiros têm sido utilizadas fibras de vidro ou de carbono e matrizes de poliéster ou viniléster, adicionando-se, ocasionalmente, uretano ao viniléster com o objetivo de aumentar a durabilidade do produto final, principalmente para estruturas construídas em ambientes alcalinos severos (HOTA e HOTA, 2002).

A partir de 1996 a utilização dos materiais compósitos em pontes, em suas diversas formas, apresentou um crescimento mundial acelerado. Nos Estados Unidos, aproximadamente 40% das 575.000 pontes existentes em rodovias necessitavam de reparos, principalmente devido à cor-

rosão dos tabuleiros em concreto armado. E, desde 1995, mais de 2 bilhões de dólares já foram investidos no desenvolvimento de projetos de reparo de pontes, tendo mais de 40% deste valor sido destinado às aplicações com materiais compósitos com o objetivo de desenvolver uma nova geração de pontes com maior durabilidade, menor custo de manutenção e tempo reduzido de construção.

Em 1996, entrou em operação o primeiro tabuleiro de ponte em compósito dos Estados Unidos, e, no ano 2000, já havia 32 tabuleiros em compósito prontos. No Japão, o uso de chapa de compósito para aplicações de reforço triplicou de 1995 para 1996, após o terremoto de Kobe. Enquanto no início dos anos 1980 havia apenas 30 centros de pesquisa no mundo destinados ao desenvolvimento de materiais compósitos para aplicação em engenharia civil, nos anos 2000 já havia mais de 300 deles. Os materiais compósitos podem ser produzidos em diversos formatos na indústria e podem ser transportados para o local da construção e montados em pouco tempo, dispensando equipamentos robustos para içamento e reduzindo os custos de montagem e o período de interrupção do tráfego nas rodovias (KELLER, 2003).

Há vários projetos de passarelas e pontes totalmente em materiais compósitos já elaborados ou que estão em desenvolvimento. Há projetos em que os materiais convencionais são substituídos pelos materiais compósitos, mantendo-se a concepção estrutural normalmente utilizada para o aço ou para o concreto armado. Em outros projetos a proposta é o desenvolvimento de concepções estruturais novas, visando o melhor aproveitamento das propriedades dos materiais compósitos. Atualmente, os projetos com substituição do material

prevalecem em relação aos projetos visando novas concepções estruturais.

Geralmente, o custo inicial de projeto e de material para a construção de uma ponte ou passarela em material compósito é superior ao de uma estrutura equivalente em aço, porém economiza-se em mão de obra e equipamentos durante a construção e em manutenção durante a vida útil da estrutura. Além disso, o tempo para montagem da estrutura é menor (SOBRINO e PULIDO, 2002).

O desenvolvimento e o futuro dos materiais compósitos em aplicações estruturais na engenharia civil dependem do desenvolvimento de novas formas estruturais e de técnicas de ligação (SOBRINO e PULIDO, 2002).

Exemplos de pontes e passarelas em material compósito podem ser agrupados nas seguintes categorias:

- pontes com superestrutura em material compósito;
- pontes com tabuleiro em material compósito (painéis sanduíche ou painéis formados pela associação de perfis pultrudados colados).

Nas Figuras 15 a 19 são apresentadas pontes e passarelas com superestrutura em material compósito, cujos projetos adotaram os materiais compósitos em concepções estruturais convencionais, comumente adotadas para o aço ou o concreto armado. As superestruturas foram construídas com vigas retas ou vigas treliçadas de perfis pultrudados ou moldados. As seções transversais dos perfis pultrudados são idênticas aos dos perfis de aço usualmente adotados, e, com exceção da passarela de Pontresina na qual se fez uso de conexões coladas, em todas as outras empregaram-se ligações parafusadas.

Destaca-se, nesta categoria, a ponte protótipo desmontável projetada pela Universidade

de Tecnologia de Aachen, na Alemanha, no ano de 2002 (Figuras 18 e 19). A ponte é toda em material compósito, tem 20m de vão e capacidade para suportar um veículo sobre rodas de 136 kN. Para aproveitar a elevada resistência do perfil pultrudado na direção longitudinal e compensar o seu baixo módulo de elasticidade, foram adotadas vigas treliçadas. As vigas e o tabuleiro



Figura 15 – Passarela Kolding, Dinamarca, 1997 (CHRISTOFFERSEN *et al.*, 1999)



Figura 16 – Passarela Pontresina, Suíça, 1997 (KELLER, 1999)

da ponte constituem elementos estruturais independentes para possibilitar a substituição dos membros danificados. Foram adotadas ligações parafusadas entre os perfis, que foram reforçados com chapas de aço coladas na região dos furos, para compensar a sua baixa resistência ao cisalhamento paralelo às fibras.

Algumas estruturas de pontes e passarelas com superestrutura em material compósito são



Figura 17 – Passarela Lleida, Espanha, 2001
(SOBRINO e PULIDO, 2002)



Figura 18 – Ponte protótipo da RWTH-Aachen, Alemanha, 2002
(SEDLACEK e TRUMPF, 2002)



Figura 19 – Detalhe do apoio do tabuleiro sobre as transversinas e das ligações das transversinas à treliça da ponte protótipo da RWTH-Aachen (SEDLACEK e TRUMPF, 2002)

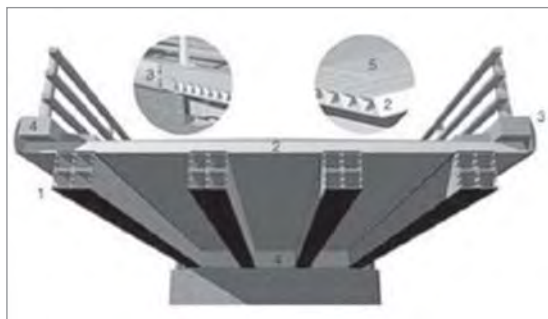


Figura 20 – Ponte West Mill, Inglaterra, 2002: (1) vigas pultrudadas; (2) laje moldada (FIBERLINE COMPOSITES)



Figura 21 – Vista geral da Passarela Aberfeldy, Escócia, Reino Unido
(STRUCTURAL ENGINEERING INTERNATIONAL, 1994)

ilustradas nas Figuras 20 e 21. No entanto, estas estruturas têm vigamento formado pela associação de perfis pultrudados ou moldados e tabuleiros de painéis sanduíche de material compósito.

Algumas seções transversais de painéis comumente utilizadas em pontes biapoiadas projetadas com tabuleiro de material compósito (painéis sanduíche ou painéis de perfis pultrudados colados) são mostradas na Figura 22.

Em 2002, o Instituto Federal Suíço de Tecnologia (*Swiss Federal Institute of Technology*), localizado em Lausanne, na Suíça, apresentou um projeto de uma passarela estaiada com viga armada (Figura 23). Neste sistema estrutural os painéis sanduíche de GFRP, adotados como elementos

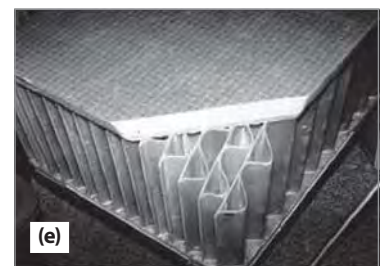
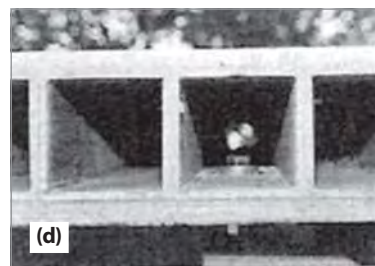
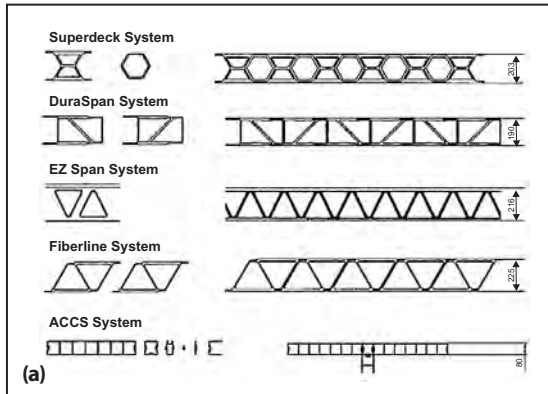


Figura 22 – Seções transversais de tabuleiros em painel pultrudado e painel sanduíche:

(a) Superdeck, DuraSpan, EZ-Span, Fiberline e ACCS (KELLER, 2001); (b) ASSET (PROJECTS BRE); (c) Hardcore (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION); (d) Strongwell (KELLER, 2001); (e) Kansas (FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION)

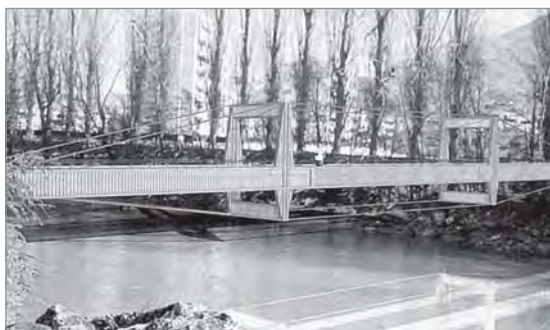


Figura 23 – Passarela estaiada e com viga armada, Suíça (SOBRINO e PULIDO, 2002)

de alma, são colados a perfis de GFRP, que funcionam como elementos de mesa, e cabos de compósito de carbono sustentam a viga superior e inferiormente. Não se tem notícia se a passarela foi construída.

As pontes e passarelas com estrutura de vigamento longitudinal em perfis, como a da Fi-

gura 20, ficam limitadas pela grande deformabilidade do material. Para se superar esta característica desfavorável dos compósitos de fibra de vidro, uma adequada rigidez estrutural deve ser alcançada a partir da própria concepção e da geometria da estrutura. Neste aspecto, a adoção de vigamentos treliçados (Figuras 16 e 18) é uma alternativa para melhor utilização do material. Outros sistemas estruturais, como o sistema estaiado (Figuras 15 e 21), ou em arco (Figura 17), ou em viga armada (Figura 23), permitem que se alcancem vãos maiores do que os sistemas em viga reta, para qualquer material de construção. Entretanto, a adoção do sistema estaiado da passarela de Aberfeldy (Figura 21) conduziu a características dinâmicas muito desfavoráveis para uma passarela (TEIXEIRA, 2000), enquanto o mesmo sistema adotado para estru-

turas mistas aço-concreto, ou estruturas só de aço, tem sido usado com sucesso.


Considerações finais

Um resumo das diferentes aplicações de materiais compósitos de resina e fibras em estruturas para a engenharia de construção foi apresentado neste trabalho.

Abordaram-se os principais tipos de técnicas de reparo e reforço de elementos estruturais com o uso de materiais compósitos de resina e fibras.

Mostraram-se as diversas aplicações desses materiais em obras de reparo e/ou reforço e em obras de pontes. Estudos existentes sobre o

reforço de vigas de concreto por meio de materiais compósitos de resina e fibras têm comprovado sua eficiência, expressa pelo aumento da capacidade resistente e da rigidez e pelo controle de fissuração destas, desde que sejam adequados o dimensionamento, o detalhamento e a colagem do reforço. No caso do confinamento externo de pilares, o aumento de suas resistência à compressão e ductilidade foi verificado (CARNEIRO, 2004).

Constatou-se que, dependendo do seu tipo e das suas propriedades, as aplicações dos materiais compósitos na Engenharia de Construção são as mais variadas, fruto de sua versatilidade e de sua fácil colocação. 

Referências

- BALÁZS, G., ALMAKT, M. M., 2000, "Strengthening with Carbon Fibres – Hungarian Experiences", *Concrete Structures*, pp. 52-60.
- BARROS, J. A. O., SENA-CRUZ, J. M., DIAS, S. J. E., et al., 2003, "Investigação no Âmbito da Utilização de Materiais Compósitos no Reforço de Estruturas de Betão", In: *Anais do V Simpósio EPUSP Sobre Estruturas de Concreto*, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, Jun.
- CARNEIRO, L. A. V., 2004, *Reforço de Vigas e Pilares de Concreto com Materiais Compósitos de Resina e Fibras*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- CHRISTOFFERSEN, J.; HAUGE, L.; JENSEN, H. E. et al., 1999, "Design and Construction of a CFRP Cable Stayed Footbridge", *International Association for Bridge and Structural Engineering, IABSE Conference Malmo*, Malmo.
- COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON, CEB-FIP TG 9.3 FRP, 2001, "Design and Use of Externally Bonded Fibre Reinforced Polymer Reinforcement (FRP EBR) for Reinforced Concrete Structures", *Technical Report Bulletin n. 14*, Lausanne, Switzerland, 138 p., Jul.
- DUARTE, A., CONTARINI, B., 1999, "Reforço Torre – TV Globo", In: *Anais do 41º Congresso Brasileiro do Concreto*, Salvador, Bahia, Brasil, Ago.
- EMMONS, P. H., VAYSBURD, A. M., THOMAS, J., 1998a, "Strengthening Concrete Structures, Part I", *Concrete International*, pp. 53-58, Mar.
- EMMONS, P. H., VAYSBURD, A. M., THOMAS, J., 1998b, "Strengthening Concrete Structures, Part II", *Concrete International*, pp. 56-60, Apr.
- FAM, A. Z., RIZKALLA, S. H., TADROS, G., 1997, "Behavior of CFRP for Prestressing and Shear Reinforcements of Concrete Highway Bridges", *ACI Structural Journal*, v. 94, n. 1, pp. 77-86, Jan.-Feb.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, U.S. Department of Transportation, www.fhwa.dot.gov/bridge/frp/deckproj.htm.
- FIBERLINE COMPOSITES, Dinamarca – www.fiberline.com.
- FORTES, A. S., BARROS, J. A. O., PADARATZ, I. J., 2003, "Estudo Comparativo de Três Técnicas de Reforço à Flexão com CFRP", In: *Anais do 45º Congresso Brasileiro do Concreto*, Vitória, Espírito Santo, Brasil, Ago.

- HOTA, G. V. S.; HOTA, S. R. V., 2002, "Advances in fibre-reinforced polymer composite bridge decks", *Progress in Structural Engineering and Materials*, v. 4, pp 161-168.
- ISKANDER, M. G., STACHULA, A., 2002, "Wave Equation Analyses of Fiber-Reinforced Polymer Composite Piling", *Journal of Composites for Construction*, v. 6, n. 2, pp. 88-96, May.
- IYER, S. L., 2001, "Fibre Reinforced Polymer (FRP) Tubes for Pile/Column Applications", *The Indian Concrete Journal*, Technical Papers, Jan.
- KELLER, T., 1999, "Towards Structural Forms for Composite Fibre Materials", *The Structural Engineer International*, v. 9, n. 4, pp. 297-300, November.
- KELLER, T., 2001, "Recent all-composite and hybrid fibre reinforced polymer bridges and buildings", *Progress in Structural Engineering and Materials*, v. 3, n. 2, pp 132-140.
- KELLER, T., 2003, "Use of Fibre Reinforced Polymers in Bridge Construction", *Structural Engineering Documents*, IABSE.
- MALVAR, L. J., WARREN, G. E., INABA, C., 1995, "Rehabilitation of Navy Pier Beams with Composite Sheets", Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, In: *Proceedings of the Second International Symposium*, RILEM, v. 1, oct, pp. 533-540.
- MASTER BUILDERS TECHNOLOGIES, MBT, 1998, "MBrace^o Sistema Compósito de Reforço", *Catálogo*, USA.
- MONTI, G., NISTICÒ, N., SANTINI, S., 2001, "Design of FRP Jackets for Upgrade of Circular Bridge Piers", *Journal of Composites for Construction*, v. 5, n. 2, pp. 94-101, Nov.
- PANTELIDES, C. P., GERGELY, J., REAVELEY, L. D., et al., 1999, "Retrofit of RC Bridge Pier with CFRP Advanced Composites", *Journal of Structural Engineering*, v. 125, n. 10, pp. 1094-1099, Oct.
- PLEVRIS, N., TRIANTAFILLOU, T. C., 1995, "Creep Behavior of FRP- Reinforced Wood Members", *Journal of Structural Engineering*, v. 121, n. 2, pp. 174-186, Feb.
- PROJECTS BRE, England – projects.bre.co.uk/composites/pdf/Bridge%20Decks.PDF.
- SEDLACEK, G.; TRUMPF, H., 2002, "Mobile Lightweight Fixed Bridges out of Pultruded Fiber-reinforced Polymer Profiles", *Institute of Steel Construction, RWTH, Aachen, Alemanha*.
- SEIBLE, F.; KARBHARI, V. M.; BURGUEÑO, R., 1999, "Kings Stormwater Channel and I- 5/Guilman Bridges, USA", *Structural Engineering International*, v. 4, pp 250-253.
- SIKA, 1998, "Guias de Diseno e Instalacion Sika CarboDur", Reforzamiento con Sistemas de Fibras de Carbono (CFRP) para Estructuras de Concreto y Madera, Santa Fe de Bogotá, D.C., Colombia, Mar.
- SOBRINO, J. A.; PULIDO, M. D. G., 2002, "Towards Advanced Composite Material Footbridges", *The Structural Engineer International*, v. 12, n. 2, pp. 84-86, May.
- STRUCTURAL ENGINEERING INTERNATIONAL, 1994, *Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering*, IABSE, foto da passarela na contra-capta da revista, v. 4, n. 1, February.
- TEIXEIRA, A.M.A.J., 2000, *Passarelas Estaiadas de Materiais Novos e Convencionais sob Ação de Cargas Dinâmicas Humanas*, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- TRIANAFILLOU, T. C., 1997, "Shear Reinforcement of Wood Using FRP Materials", *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 9, n. 2, pp. 65-69, May.
- TRIANAFILLOU, T. C., 1998a, "Strengthening of Masonry Structures Using Epoxy-Bonded FRP Laminates", *Journal of Composites for Construction*, v. 2, n. 2, pp. 96-104, May.
- TRIANAFILLOU, T. C., 1998b, "Strengthening of Structures with Advanced FRPs", *Progress in Structural Engineering and Materials*, v. 1, n. 2, pp. 126-134.
- TRIANAFILLOU, T. C., DESKOVIC, N., 1992, "Prestressed FRP Sheets as External Reinforcement of Wood Members", *Journal of Structural Engineering*, v. 118, n. 5, pp. 1270-1284, May.
- TRIANAFILLOU, T. C., FARDIS, M. N., 1997, "Strengthening of Historic Masonry Structures with Composite Materials", *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, v. 30, pp. 486-496, Oct.