

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
Curso de Engenharia Civil

Ana Beatriz Borges Santos Cardoso
Camila Eduarda Moreira Campos
Láila Teodoro Batista
Priscilla Flávia Silva Oliva

**REFORÇO ESTRUTURAL EM CONCRETO ARMADO COM FIBRA DE
CARBONO: OBRAS BRASILEIRAS E ESTUDO DE CASO DO VIADUTO SANTA
TEREZA**

Belo Horizonte
2019

Ana Beatriz Borges Santos Cardoso

Camila Eduarda Moreira Campos

Láila Teodoro Batista

Priscilla Flávia Silva Oliva

**REFORÇO ESTRUTURAL EM CONCRETO ARMADO COM FIBRA DE
CARBONO: OBRAS BRASILEIRAS E ESTUDO DE CASO DO VIADUTO SANTA
TEREZA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil

Orientador: Profa. Dra. Gláucia Nolasco de Almeida Mello

Coorientador: Prof. Dr. João Batista Santos de Assis

Área de concentração: Estruturas

Belo Horizonte

2019

Ana Beatriz Borges Santos Cardoso

Camila Eduarda Moreira Campos

Láila Teodoro Batista

Priscilla Flávia Silva Oliva

**REFORÇO ESTRUTURAL EM CONCRETO ARMADO COM FIBRA DE
CARBONO: OBRAS BRASILEIRAS E ESTUDO DE CASO DO VIADUTO SANTA
TEREZA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dra. Gláucia Nolasco de Almeida Mello

Coorientador: Prof. Dr. João Batista Santos de Assis

Área de concentração: Estruturas

Prof. Dra. Gláucia Nolasco de Almeida Mello – PUC Minas (Orientadora)

Prof. M.e José de Paula Batista – PUC Minas (Banca Examinadora)

Prof. M.e Rafael Arêdes Couto – PUC Minas (Banca Examinadora)

Belo Horizonte, 04 de dezembro de 2019.

Às nossas famílias por todo incentivo, e ao nosso querido Professor e amigo João Batista, nossa fonte de inspiração profissional.

AGRADECIMENTOS

À nossa orientadora, Profa. Dra. Gláucia Nolasco de Almeida Mello, que acolheu este trabalho com tamanha dedicação.

Ao Prof. Dr. João Batista de Assis, que nos guiou com empenho para execução deste trabalho.

Ao Prof. Ari de Paula Machado, que nos possibilitou conhecer as particularidades do reforço estrutural executado no Viaduto Santa Tereza.

Às empresas que nos forneceram informações técnicas a respeito de obras que foram executadas com reforço estrutural com fibra de carbono.

RESUMO

Este trabalho de grupo descreve a utilização da fibra de carbono como elemento de reforço e recomposição de estruturas de concreto armado. O reforço estrutural pode ser necessário, em estruturas novas ou antigas, devido a manifestações patológicas, aumento das cargas solicitantes de projeto, limitações em relação ao seu dimensionamento e alteração de sua utilização inicial. Ressalta-se que esse tipo de reforço constitui uma tecnologia recente, que teve aplicação pioneira no Brasil em 1998, no Viaduto Santa Tereza, em Belo Horizonte, MG. Primeiramente, são apresentadas as estruturas de concreto armado e suas necessidades de reabilitação, ligadas aos métodos convencionais de reforço estrutural. Posteriormente, são apresentados os compósitos mais recentemente utilizados como reforços e, então, o assunto de compósitos de fibras de carbono. Estas, por sua vez, são descritas em histórico, propriedades físicas e mecânicas, vantagens, aplicações em diferentes tipos de estruturas e diferentes tipos de sistemas. Ao final, são apresentadas as estruturas de concreto armado que tiveram os compósitos de fibra de carbono utilizados como método de reforço e expostos os motivos que levaram a sua aplicação. Como estudo de caso, vai-se detalhar mais o uso do reforço estrutural no viaduto Santa Tereza em Belo Horizonte, por ser uma obra pioneira que aplicou esta tecnologia.

Palavras-chave: Compósitos. Fibra de carbono. Reforço.

ABSTRACT

This group work describes the use of carbon fiber as an element of strengthening and rehabilitation of concrete structures. The structural reinforcement can be needed, in new or old structures, due to pathological manifestations, increases in project requesting loads, limitations in relation to their sizing and alteration of their initial utility. This type of strengthening is a recent technology and had your pioneering application in Brazil in 1998, in the structural reinforcement of the Santa Tereza viaduct in Belo Horizonte, MG. Initially, the work presents the structures of reinforced concrete and their premise of rehabilitation, linked to conventional methods of structural strengthening. Subsequently, the most recently reinforcement used composites are presented, and then the topic of carbon fiber composites is initiated, how carbon fibers are exposed in history, physical and mechanical properties, advantages and applications in different types of structures. Finally, reinforced concrete structures that had the carbon fiber composite used as a reinforcement method are presented and the reasons that led to this application.

Keywords: Composites. Carbon fiber reinforcement. Strengthening.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principal classificação dos compósitos	34
Figura 2 - Compósito laminado	36
Figura 3 - Painéis em sanduíche.....	36
Figura 4 - Comparativo de desempenho dos polímeros.....	43
Figura 5 - Representação das curvas típicas de Tração x Deformação das fibras ...	46
Figura 6 - Representação esquemática do método de pultrusão	48
Figura 7 - Rolo de compósito de fibras de carbono	52
Figura 8 - Reforço de fibra de carbono aplicado horizontal e verticalmente em laje .	60
Figura 9 - Possíveis disposições do compósito para combater o cisalhamento.....	63
Figura 10 - Recorte do projeto de reforço com fibras de carbono	65
Figura 11 - Furos na laje da Sala Elétrica	67
Figura 12 - Furos circulares executados com auxílio de serra copo na laje.....	68
Figura 13 - Aplicação da fibra de carbono.....	68
Figura 14 - Aplicação da fibra de carbono.....	69
Figura 15 - Detalhe de projeto.....	70
Figura 16 - Detalhe de projeto.....	70
Figura 17 - Sequência executiva de projeto	72
Figura 18 - Reforço aplicado ao redor dos furos	73
Figura 19 - Tubulações instaladas próximo ao local do reforço	73
Figura 20 - Viaduto Santa Tereza	75
Figura 21 - Tabuleiros de pontes.....	77
Figura 22 - Dente Gerber e cargas verticais do Viaduto Santa Tereza	78
Figura 23 - Reforço estrutural do Viaduto Santa Tereza	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Propriedades dos principais tipos de fibra empregadas em compósitos reforçados com fibras.....	38
Quadro 2 - Propriedades da Resina Epóxi.....	43

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
2 JUSTIFICATIVA.....	23
3 OBJETIVO	25
3.1 Objetivo Geral.....	25
3.2 Objetivos Específicos	25
4 METODOLOGIA	27
5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
5.1 Concreto armado.....	29
5.1.1 <i>Reabilitação de estruturas de concreto armado</i>	29
5.2 Métodos convencionais de reforço	31
5.2.1 <i>Reforço com chapa/perfil metálico</i>	31
5.2.2 <i>Reforço com adição de armadura e aumento da seção transversal</i>	32
5.3 Materiais compósitos.....	33
5.3.1 <i>Compósitos reforçados com partículas</i>	35
5.3.2 <i>Compósitos estruturais</i>	35
5.3.3 <i>Compósitos reforçados com fibras</i>	37
5.3.4 <i>Compósitos com Matriz Polimérica</i>	38
5.3.5 <i>Fibras de vidro</i>	39
5.3.6 <i>Fibras de aramida</i>	40
5.3.7 <i>Fibras de Carbono</i>	40
5.4 Resinas.....	42
5.5 Histórico das fibras de carbono.....	44
5.6 Propriedades dos compósitos de fibras de carbono	45
5.7 Pultrusão – processo produtivo dos compósitos de fibra de carbono	47
5.8 Limites de resistência dos reforços com fibras de carbono	49
5.9 Resistência à temperatura dos compósitos de fibra de carbono	49
5.10 Verificação da ductilidade com reforço de fibra de carbono	50
5.11 Tensões limites para a ruptura por fluência e fadiga da fibra de carbono.....	50
5.12 Vantagens das fibras de carbono	51
5.12.1 <i>Resistência e rigidez</i>	51
5.12.2 <i>Peso próprio</i>	51
5.12.3 <i>Coeficiente de expansão térmica</i>	53
5.12.4 <i>Fadiga</i>	54
5.12.5 <i>Resistência à ação do fogo</i>	54
5.12.6 <i>Resistência a agentes químicos</i>	54
5.12.7 <i>Versatilidade</i>	55
5.12.8 <i>Aplicação</i>	55
5.12.9 <i>Fixação</i>	55
5.12.10 <i>Manutenção</i>	55
5.12.11 <i>Tempo de interdição da construção</i>	55
5.13 Metodologia de aplicação da fibra de carbono.....	56
5.14 Utilização da fibra de carbono para diferentes tipos de solicitações.....	59

5.14.1 Reforço à flexão	59
5.14.2 Reforço de vigas à flexão e ao corte	60
5.14.3 Reforço de lajes à flexão	60
5.14.4 Reforço à compressão axial por meio de confinamento	61
5.14.5 Reforço de pilares e colunas.....	62
5.14.6 Reforço da cortante de vigas com lâminas de fibras de carbono aderidas externamente ao concreto.....	62
6 OBRAS BRASILEIRAS COM EMPREGO DA FIBRA DE CARBONO	65
6.1 Sala Elétrica da AMG Mineração S.A.	65
6.2 Colégio Estudantil	67
6.3 Edifício residencial.....	69
6.4 Supermercado Verdemar	72
7 ESTUDO DE CASO – VIADUTO SANTA TEREZA	75
7.1 Histórico do Viaduto	75
7.2 Modelo estrutural	76
7.3 Obra de intervenção estrutural com emprego da fibra de carbono.....	78
8 CONCLUSÃO	81
REFERÊNCIAS.....	83

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de reabilitar uma estrutura de concreto armado tem se tornado cada vez mais frequente, podendo decorrer de uma diversidade de fatores. Além do processo natural de deterioração do concreto e de fatores ambientais que podem prejudicar a durabilidade da estrutura, a modernização de uma edificação, a alteração de sua utilização ou falhas no seu processo projetual e construtivo também podem acarretar na necessidade de uma intervenção (MEIER, 1995). O tipo de solução a ser utilizado depende da facilidade e da rapidez da execução, do método executivo, do conhecimento acerca da técnica a ser empregada e do custo associado a ela (FORTES, 2000).

Os compósitos são formados pela associação de dois ou mais materiais que possuem características distintas. Geralmente, são constituídos por uma matriz e por um elemento de reforço. Os compósitos que apresentam matriz polimérica e possuem as fibras como elemento de reforço são denominados Polímeros Reforçados com Fibras (PRF) e têm sido largamente utilizados nas indústrias aeroespacial, automotiva e naval nos últimos anos (FORTES, 2000).

Por ocuparem significativa porcentagem nesses materiais, as fibras apresentam propriedades que interferem diretamente nas características finais do produto. Atualmente, o tipo de fibra mais empregado nos compósitos com matriz polimérica é aquele de carbono que, dentre suas principais propriedades, apresenta alto módulo de elasticidade e elevada resistência à tração (MACHADO, 2006).

Os compósitos de fibra de carbono correspondem a uma eficiente alternativa para o reforço de estruturas de concreto armado por apresentarem extraordinária resistência mecânica e rigidez, resistência a ataques químicos e à corrosão, estabilidade térmica e reológica, baixo peso específico, rapidez e facilidade de instalação e baixo coeficiente de dilatação térmica (MACHADO, 2006). Nos últimos anos, embora se tenha observado um crescimento no emprego dos compósitos de fibra de carbono, a sua utilização ainda é pouco expressiva se comparada a dos métodos de reforço convencionais. Tal fato deve-se, principalmente, ao desconhecimento do material e ao seu alto valor de mercado, que muitas vezes inviabiliza sua aplicação. Dessa maneira, é de extrema relevância que se amplie o conhecimento em relação ao compósito de fibra de carbono utilizado como reforço

estrutural, a fim de demonstrar que suas características técnicas, associadas à sua facilidade de instalação e ao pequeno impacto gerado na arquitetura da estrutura, proporcionam uma vantajosa relação custo-benefício. E, ainda, demonstrar que essa relação pode, em muitos casos, tornar o compósito de fibra de carbono a melhor opção para o reforço estrutural em elementos de concreto armado.

2 JUSTIFICATIVA

No Brasil, a cultura da construção civil é considerada como tradicional, apresentando metodologias executivas conservadoras. Por outro lado, a inserção de novas tecnologias vem conquistando espaço no mercado gradativamente.

Construções são suscetíveis a mudanças e alterações e, nesse quadro, os reforços estruturais constituem solicitações bastante corriqueiras. Visando aprofundar o conhecimento sobre esses reforços, escolheu-se a fibra de carbono como foco, pelo seu caráter sofisticado e inovador dentro do segmento atual.

O baixo índice de emprego desse material em estruturas de concreto e o uso reduzido desse recurso elevaram a motivação ao estudo das suas características e empregabilidade. Dessa forma, considerou-se pertinente trazer para o centro da discussão um material com potencial pouco esclarecido técnica e economicamente.

3 OBJETIVO

3.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem o objetivo de estudar os compósitos de fibra de carbono empregados como elemento de reforço em estruturas de concreto armado e apresentar obras brasileiras que utilizaram esse tipo de reforço e o motivo de sua aplicação, com foco na obra pioneira de seu uso, o Viaduto Santa Tereza.

3.2 Objetivos Específicos

Neste trabalho, destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- a) apresentar características técnicas, vantagens da utilização da fibra de carbono como método de reforço em comparação com métodos tradicionais;
- b) apresentar obras e projetos de Belo Horizonte, em que foi estudado o emprego do compósito de fibra de carbono como elemento de reforço estrutural;
- c) apresentar as informações técnicas e históricas a respeito do Viaduto Santa Tereza, obra de intervenção pioneira no emprego da fibra de carbono como reforço estrutural na América Latina.

4 METODOLOGIA

O presente trabalho foi realizado a partir de pesquisas exploratórias, por meio das quais foi feito um levantamento bibliográfico sobre o assunto proposto. Foram também pesquisados diferentes artigos, textos acadêmicos e manuais para o aprofundamento no tema e direcionamento do estudo a respeito da fibra de carbono.

As informações foram buscadas em sistemas acadêmicos, sendo selecionados os autores com publicações que abordavam diferentes perspectivas. De posse das informações básicas do compósito, vantagens e aplicações, foram selecionados os textos que tratavam de forma mais explicativa e produtiva. Profissionais experientes em reforço estrutural com uso da fibra de carbono foram buscados em Minas Gerais, para agregar mais detalhes e veracidade aos estudos teóricos realizados. A busca por tais profissionais deu-se por prospecção de fornecedores e projetistas conhecidos e que trabalham na área.

A dinâmica da pesquisa proporcionou contato com importantes nomes do cenário da engenharia civil, como exemplo o professor Ari de Paula Machado, pioneiro na utilização da fibra de carbono em reforço estrutural na América Latina, o qual nos auxiliou sobremaneira com informações técnicas importantes para o direcionamento e o desenvolvimento deste trabalho. Visitas técnicas foram realizadas em obras que utilizaram o reforço com a manta de fibra de carbono, para enriquecer toda a teoria vista nos artigos e entrevistas.

O aprofundamento no estudo do Viaduto Santa Tereza tornou-se possível a partir dos dados coletados no Arquivo Público Mineiro, bem como no livro do Viaduto Santa Tereza e fontes de dados históricos, arquitetônicos e estruturais, utilizados para o estudo de caso.

Os resultados oriundos das coletas de dados serão expostos no desenvolvimento do presente trabalho, de modo a apresentar os principais pontos ministrados no estudo realizado.

5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

5.1 Concreto armado

O concreto é atualmente considerado o material estrutural e de construção civil de maior relevância no mundo, correspondendo a uma das descobertas de maior impacto na qualidade de vida da sociedade e que revolucionou a forma de construir e projetar (HELENE; ANDRADE, 2007). O material surgiu no final do século XIX, sendo que seu emprego consolidou-se no século XX. Desde então, é continuamente aprimorado, visando-se aperfeiçoar seu desempenho e versatilidade, tornando-se o material mais utilizado na construção civil.

Uma das grandes vantagens do concreto armado relaciona-se ao fato de ele apresentar significativa deformação antes do colapso da estrutura. O comportamento dúctil do aço possibilita sua considerável deformação em caso de tração superior àquela especificada em projeto. No entanto, o concreto não consegue acompanhá-lo, gerando um quadro de fissuração evidente na região sob tração do concreto armado. Tal característica permite diagnosticar a causa dos problemas que colocam em risco a integridade do material e intervir para que seja restabelecida a funcionalidade da estrutura, reduzindo-se, assim, o risco de acidentes.

Além disso, os componentes do concreto armado são facilmente encontrados e o concreto corresponde a um material de boa durabilidade, adaptabilidade a diversas formas, rapidez na execução, boa resistência ao fogo, baixa permeabilidade e boa resistência a choques e vibrações (BASTOS, 2006).

5.1.1 Reabilitação de estruturas de concreto armado

De modo geral, as estruturas executadas em concreto armado apresentam longo período de vida útil. No entanto, a funcionalidade da estrutura pode ser alterada de diversas maneiras ao longo do tempo. Algumas dessas alterações podem ocorrer por motivos como: manifestações patológicas, falhas no processo construtivo ou projetual, aumento da carga solicitante, alteração em sua geometria, envelhecimento natural, deterioração devido a agentes agressivos e finalidade alterada ou estendida (BEBER, 2003).

Além disso, hoje as estruturas de concreto armado são dimensionadas utilizando-se uma margem de segurança inferior do que em estruturas mais antigas. Dessa maneira, as edificações mais modernas tornam-se mais propensas ao surgimento de patologias e conseqüentemente menos resistentes para suportar agentes agressivos (BEBER, 2003).

Atualmente existe uma diversidade de soluções para a maior parte das alterações funcionais que possam surgir nas estruturas de concreto. A disseminação de um determinado tipo de solução é determinada pela facilidade e rapidez de execução, pelo conhecimento da técnica e pelo custo associado a ela (FORTES, 2000).

Para que um problema estrutural seja resolvido de forma eficiente, é necessário que se avaliem todas as informações disponíveis e que se estabeleça a solução adequada para cada tipo de problema. Primeiramente, é preciso que se faça uma vistoria da estrutura para que se identifiquem ocorrências de manifestações patológicas presentes. Determina-se, em seguida, a gravidade da situação e inicia-se a tomada de medidas emergenciais, caso necessário. É importante que se faça também um levantamento histórico para a coleta de dados a respeito do planejamento, projeto estrutural, execução, utilização e manutenção da edificação, tendo em vista que a causa dos problemas patológicos pode estar associada a falhas nessas etapas do processo construtivo. Em seguida emite-se um diagnóstico, seguido, ou não, de um prognóstico, em que são verificados os riscos e as conseqüências da adoção de cada alternativa proposta, e contempla-se as condutas a serem adotadas. É interessante que durante um determinado período faça-se um acompanhamento da estrutura para avaliação da eficiência do método empregado (FORTES, 2000).

A reabilitação estrutural é o tipo de intervenção realizada quando se precisa restaurar ou aumentar a capacidade de resistência dos elementos estruturais de uma construção. Essa intervenção pode ser necessária por diversos fatores mencionados anteriormente, como submissão da estrutura a cargas superiores para as quais foi dimensionada ou, por exemplo, no processo de modernização de uma construção, em que as forças atuantes devem ser redistribuídas e reforços localizados podem ser aplicáveis. Além disso, a deterioração natural da estrutura no decorrer dos anos, fatores ambientais, mudanças de utilização ou ainda eventuais problemas que comprometam a segurança da estrutura podem tornar necessária a aplicação do

reforço estrutural (MEIER, 1995).

A reabilitação das estruturas de concreto pode ser classificada em três tipos: reparo, reforço e *retrofit*. O reparo consiste em corrigir uma deficiência estrutural ou funcional localizada, não atingindo, na maioria das vezes, as condições de resistência e durabilidade iniciais da estrutura. O reforço visa aumentar o desempenho da estrutura, proporcionando maior resistência e/ou rigidez. O *retrofit* é um tipo de reforma que busca colocar a edificação em estado atualizado, envolvendo ações de modernização e readequação às exigências atuais (BEBER, 2003).

O método de aplicação e o desempenho das inúmeras técnicas de reforço existentes dependem da configuração geométrica do elemento e do carregamento existente (GARCEZ, 2007). Os métodos de reforço executados devem considerar rigores maiores do que os levados em consideração na construção original e a qualidade destes é dependente da análise correta dos fatores que o tornaram necessário, assim como do estudo dos efeitos da aplicação do reforço na estrutura, da escolha dos materiais adequados para a execução e da seleção de mão de obra apropriada (SOUZA; RIPPER, 1998).

Os reforços à flexão mais comuns consistem na adição de elementos de reforço na face tracionada dos elementos estruturais (GARCEZ, 2007). Geralmente, busca-se a elaboração de um projeto que possibilite a execução adequada para cada situação e que facilite a manutenção da estrutura, a fim de reduzir os níveis de deterioração.

5.2 Métodos convencionais de reforço

No Brasil, as técnicas comumente utilizadas para reforço estrutural baseiam-se na adição de chapas e perfis metálicos e na técnica de adição de armadura e aumento da seção transversal do concreto (MACHADO, 2019).

5.2.1 Reforço com chapa/perfil metálico

Uma das técnicas convencionais de reforço em concreto armado utilizada no Brasil é a adição de chapas e perfis metálicos. Essa técnica envolve, além da própria chapa/perfil, materiais que complementam e garantem a correta fixação das chapas

na estrutura. São estes os materiais (BRONZE, 2016):

- a) chapas/perfis metálicos;
- b) resina epoxídica;
- c) tinta anticorrosiva.

Nessas soluções de reforço, é exigido muitas vezes que a superfície da estrutura de concreto armado seja preparada.

No caso de utilização da resina, a superfície deve ser rugosa para que haja aderência e, quando não houver, a rugosidade pode ser alcançada com a aplicação de jateamento de areia. No caso de adição da estrutura de aço por meio de colagem deste elemento diretamente com a superfície de concreto, deverá ser utilizado um solvente adequado, para que a superfície de contato da chapa seja integralmente desengordurada antes da fixação. Em alguns casos, a utilização de tinta anticorrosiva é indicada para as seções metálicas que não estiverem em contato direto com a resina a fim de garantir a integridade contra ações nocivas do ambiente (BRONZE, 2016; MACHADO, 2019).

Para o caso de ancoragem das chapas ou perfis metálicos por meio de furos, estes devem ser feitos com diâmetro nominal disponível superior ao diâmetro da peça que será ancorada. O furo deve ser limpo para posterior aplicação da resina. Nestes casos, as peças são suspensas por operários quando leves, e quando pesadas, guias são utilizadas para o posicionamento dos elementos estruturais a serem instalados.

5.2.2 Reforço com adição de armadura e aumento da seção transversal

Outra técnica convencional de reforço em concreto armado utilizada no Brasil consiste na adição de armadura e aumento da seção transversal do concreto. Essa técnica envolve materiais que garantem a funcionalidade do reforço da estrutura existente. Abaixo são listados estes materiais (BRONZE, 2016):

- a) barras de aço;
- b) graute;
- c) resina epoxídica;

d) fôrmas.

O primeiro procedimento a ser feito é o escoramento do entorno, para viabilizar a escarificação da superfície que entrará em contato com o graute, visando garantir aderência da peça com o concreto existente.

Após a escarificação, conforme projeto, são realizados furos onde serão ancoradas as barras de aço na estrutura existente. Logo depois, as barras devem ser embutidas no concreto. O posicionamento da armadura para reforço deve ser especificado em projeto e conferido antes da montagem das fôrmas.

Finalizada a armação, inicia-se a montagem das fôrmas para o lançamento do graute, de modo que este fique confinado no interior da fôrma (BRONZE, 2016).

A Norma Técnica Brasileira (NBR 14931:2004) – “Execução de estruturas de concreto – Procedimento” descreve o procedimento ideal para execução desse tipo de reforço.

5.3 Materiais compósitos

Não existe uma definição universalmente aceita para materiais compósitos. Do latim, o termo deriva da palavra *compositus*, que por sua vez tem origem no termo *componere*, que significa aglutinar ou juntar. Um material compósito é definido como uma combinação macroestrutural de dois ou mais constituintes (KIELING; SANTANA; SANTOS, 2019). Ou seja, é um material constituído de fases quimicamente diferentes e que geralmente apresenta uma parcela significativa das propriedades de todos os materiais que o integram, de forma que se alcance a melhor combinação dessas propriedades (BEBER, 2003).

Dessa maneira, duas importantes características dos compósitos que devem ser consideradas, frequentemente inter-relacionadas, são a heterogeneidade e a anisotropia. A heterogeneidade implica que os materiais constituintes do compósito possuem diferentes propriedades. A anisotropia implica que o material apresenta tensões diferentes em suas variadas direções e, por consequência, uma dependência direta entre as propriedades dos constituintes dos compósitos (HENSHER, 2016).

É importante ressaltar que as características intrínsecas de cada constituinte influenciam nas propriedades do compósito como um todo. No entanto, a interação

entre os componentes resulta em novas propriedades, geradas a partir das propriedades individuais de cada constituinte. Logo, a natureza dos componentes, assim como a distribuição, a porcentagem relativa e a geometria de cada um alteram o desempenho do material (BEBER, 2003).

O material compósito não é uma criação humana, tendo em vista que está presente na natureza e no corpo humano, por exemplo. A madeira é um exemplo típico de compósito, pois é constituído por fibras de celulose envolvidas por uma matriz de resinas naturais. Assim como os ossos são formados por uma espécie de cimento cálcio e fibras de colágeno (SANTIAGO; MARÍN; FERNÁNDEZ, 2003).

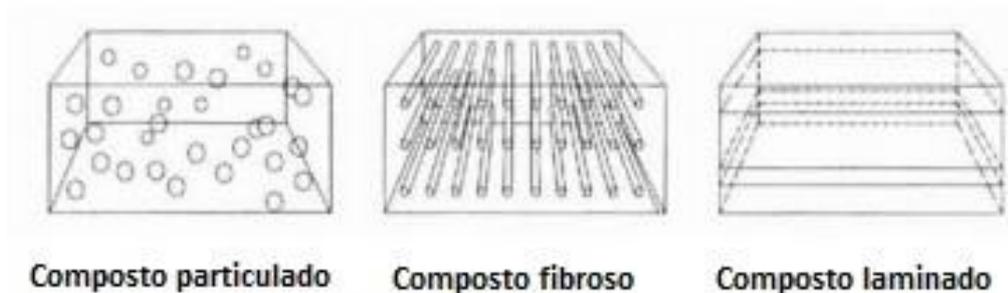
O interesse pelos materiais compósitos decorre das suas características de baixo peso específico e elevada resistência à fadiga, à abrasão, ao impacto e à corrosão (CALLISTER JÚNIOR, 2002).

O primeiro registro do aparecimento de materiais compósitos artificiais remonta à antiga civilização egípcia, que utilizava a palha misturada à argila para o reforço de tijolos e sarcófagos (BEBER, 2003). Após o Renascimento, utilizavam-se sisal e crina de cavalo para reforçar placas de gesso (AGOPYAN, 1993). Nos últimos anos, os compósitos podem ser encontrados em diversas áreas, tais como engenharia civil, industrial e aeronáutica. Entretanto, a aplicação tende ainda a ser limitada devido ao elevado custo, se comparado ao dos materiais convencionais. Por isso, novas alternativas de processamento para ampliar a viabilidade econômica dos compósitos têm sido estudadas.

Geralmente, os compósitos são formados por dois componentes: matriz e componente disperso ou componente de reforço. A matriz representa o corpo do material, servindo para dar forma ao compósito e sendo responsável por transferir as cargas para o componente de reforço. Na maioria das vezes, apresenta baixa densidade e é de natureza polimérica e sintética, que engloba o segundo componente. Já o componente disperso tende a ser a fase de maior resistência, com maior módulo de elasticidade e de maior fragilidade (SANTIAGO; MARÍN; FERNÁNDEZ, 2003).

Os materiais compósitos são classificados em três grupos principais de acordo com o tipo de componente de reforço empregado, sendo eles: compósitos reforçados com partículas, compósitos reforçados com fibras e compósitos estruturais, conforme exemplifica a Figura 1 (CALLISTER JÚNIOR, 2002).

Figura 1 - Principal classificação dos compósitos



Fonte: Adaptado de Santiago, Marín, Fernández, (2003, p. 47).

5.3.1 Compósitos reforçados com partículas

Os compósitos reforçados com partículas apresentam dimensão, comprimento e largura das partículas praticamente iguais, ou seja, embora as partículas possam assumir grande variação geométrica, suas dimensões são aproximadamente as mesmas em todas as direções (GARCEZ, 2007). As partículas devem ser pequenas e devem estar igualmente distribuídas ao longo de toda a matriz. Além disso, as propriedades mecânicas são melhoradas com o aumento do teor do material particulado (CALLISTER JÚNIOR, 2002). O concreto, por exemplo, classifica-se como um compósito reforçado por partículas. Sua matriz é constituída pelo cimento e areia, enquanto a brita corresponde ao particulado.

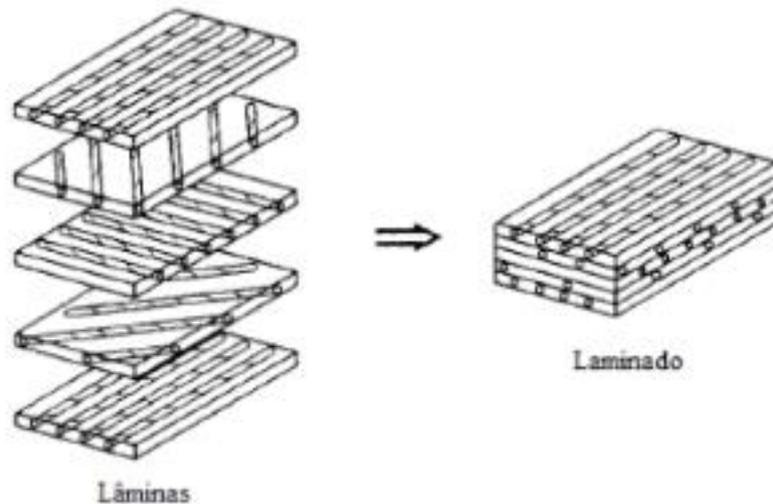
5.3.2 Compósitos estruturais

Os compósitos estruturais são formados por materiais homogêneos e por materiais compósitos, cujas propriedades dependem, além das características dos materiais constituintes, do projeto geométrico dos vários elementos estruturais (CALLISTER JÚNIOR, 2002).

Os tipos mais comuns de compósitos estruturais são os laminados e os painéis em sanduíche. Os compósitos laminados (ver Figura 2) caracterizam-se pela junção de duas ou mais lâminas unidas por uma matriz, que são colocadas de acordo com a orientação de maior resistência (GAMA, 2017). Dessa forma, o compósito laminar apresenta significativa resistência em diversas direções no plano bidimensional. A resistência à tração e à flexão desse tipo de compósito é determinada pelo número de camadas, pelo ângulo em que foram aplicadas as lâminas e pelo tipo de material

empregado.

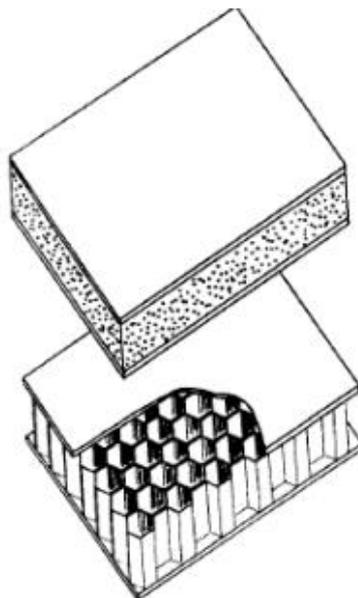
Figura 2 - Compósito laminado



Fonte: (GAMA, 2017, p. 28)

Os painéis em sanduíche (ver Figura 3) são constituídos por duas faces externas mais resistentes separadas por um material de menor densidade denominado recheio, que por sua vez apresenta menor rigidez e resistência. O recheio, além de separar as faces, é resistente às deformações perpendiculares ao plano da face. Além disto, proporciona rigidez contra o cisalhamento ao longo dos planos perpendiculares às faces.

Figura 3 - Painéis em sanduíche



Fonte: (GAMA, 2017, p. 32)

5.3.3 Compósitos reforçados com fibras

Os materiais compósitos de maior importância tecnológica são aqueles cujo componente estrutural caracteriza-se por elementos fibrosos. As fibras são materiais policristalinos, possuem diâmetros inferiores a 0,25 mm e geralmente consistem em polímeros ou cerâmicas como vidro, carbono e aramidas poliméricas (ver Quadro 1). As fibras podem ser classificadas como sintéticas, como as fibras de vidro, e naturais, como o algodão (ZANGIACOMI, 2006).

Normalmente, as fibras apresentam maior resistência do que os materiais brutos. Isso ocorre, pois, à medida que se diminui o volume da amostra, reduz-se a possibilidade de existir algum defeito crítico na superfície capaz de levar à fratura (CALLISTER JÚNIOR, 2002).

Quadro 1 - Propriedades dos principais tipos de fibra empregadas em compósitos reforçados com fibras

TIPO DE FIBRAS	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Deformação última (%)
Carbono de alta resistência	215 - 235	3500 - 4800	1,4 - 2,0
Carbono de ultra alta resistência	216 - 235	3500 - 6000	1,5 - 2,3
Carbono de alto módulo de elasticidade	350 - 500	2500 - 3100	0,5 - 0,9
Carbono de ultra alto módulo de elasticidade	500 - 700	2100 - 2400	0,2 - 0,4
Vidro - aluminoborosilicato de cálcio (E)	70	1900 - 3000	3,0 - 4,5
Vidro - aluminosilicato de magnésio (S)	85 - 90	3500 - 4800	4,5 - 5,5
Aramida com baixo módulo de elasticidade	70 - 80	3500 - 4100	4,3 - 5,0
Aramida com alto módulo de elasticidade	115 - 130	3500 - 4000	2,5 - 3,5

Fonte: (SALLABERY, 2005, p. 8).

As fibras fornecem resistência e rigidez ao compósito. Por sua vez, tais características do compósito dependem do tipo de fibra empregada, do grau de concentração e disposição das fibras na matriz (SALLABERY, 2005).

A matriz dos compósitos fibrosos pode ser constituída por metais, polímeros ou cerâmicas. A matriz corresponde ao meio através do qual uma tensão aplicada externamente é transmitida e distribuída às fibras. Além disto, ela liga as fibras umas às outras, protege-as contra danos causados pelo contato com o ambiente e serve como barreira à propagação de trincas frágeis de uma fibra para outra, ao dispersá-las e separá-las ordenadamente (CALLISTER JÚNIOR, 2002).

5.3.4 Compósitos com Matriz Polimérica

Um compósito reforçado com fibras e constituído por uma matriz polimérica é classificado como um PRF ou *Fibre-Reinforced Polymers* (FRP). Nas últimas décadas, os polímeros reforçados com fibras têm sido largamente empregados nas indústrias aeroespacial, automotiva e naval devido ao fato de apresentarem elevada resistência mecânica e baixo peso específico, assim como, por não constituírem materiais sujeitos à corrosão e pela flexibilidade de formas (FORTES, 2000).

As desvantagens do PRF relacionam-se principalmente com o elevado custo

em comparação com os materiais tradicionalmente empregados. Esses polímeros tornam-se competitivos nas seguintes situações: em condições ambientais em que os materiais convencionais não trazem os mesmos benefícios, quando não se pode interditar determinada estrutura para a realização de obras, quando a interdição representa perdas financeiras expressivas e, ainda, quando as questões de acessibilidade são críticas.

As fibras costumam ocupar de 50% a 70% do volume de um PRF (GARCEZ, 2007). Logo, verifica-se que as propriedades das fibras são de extrema relevância para as propriedades finais do produto e, por isso, a escolha de um tipo específico de fibra gera polímeros com características diferentes. Os tipos mais comuns de fibras a serem empregadas para reforço estrutural são: carbono, aramida e vidro.

5.3.5 Fibras de vidro

O vidro é produzido por meio do aquecimento de suas matérias-primas, até que ocorra a fusão destas (CALLISTER JÚNIOR, 2002). Por muito tempo, o equilíbrio entre o custo e a resistência das fibras de vidro as tornou muito atrativas na engenharia civil. As fibras de vidro estão disponíveis no mercado com a formulação denominada *E-Glass*, responsável por 80% a 90% da sua produção comercial (MACHADO, 2006).

As fibras de vidro podem ser produzidas por meio da fusão direta do vidro, que é colocado em uma câmara de aquecimento. A partir daí, as fibras são formadas ao se forçar a passagem do vidro derretido através de orifícios existentes na câmara (CALLISTER JÚNIOR, 2002).

A fibra de vidro é um material com grande disponibilidade e, quando presente no interior de uma matriz polimérica, apresenta elevadas propriedades específicas de resistência mecânica. Além disso, é resistente a agressões ambientais, abrasões e contaminações por contato. Entretanto, quando mantida sob carregamento constante, com tensões inferiores à resistência instantânea elástica, rompe por fluência, pois falha após um período de tempo proporcional à manutenção das tensões com um valor mínimo. Além disto, as fibras de vidro, quando submetidas a ambientes com elevado Ph, degradam-se ou rompem em decorrência do período de exposição

(MACHADO, 2006).

Entretanto, os problemas apresentados por essas fibras podem ser tratados, a fim de limitar as perdas de resistência por fluência entre 5% e 10%.

5.3.6 Fibras de aramida

A fibra de Kevlar® é um dos tipos de fibra de aramida, desenvolvida em 1965 pela companhia DuPont. Vem sendo amplamente empregada como componente de reforço em materiais compósitos devido à grande flexibilidade e ao elevado módulo de resistência mecânica, na ordem de 3000 MPa (ZANGIACOMI, 2006). A flexibilidade dessas fibras permite que esses materiais possam ser processados por meio de operações têxteis comuns. Além disso, elas possuem baixo peso específico, elevadas tenacidade e resistência ao ataque químico, à exposição ao meio ambiente e ao fogo. A faixa de temperatura em que as fibras de aramida mantêm suas propriedades situa-se entre -200 e 200°C.

Existem três tipos de Kevlar®, classificados pelo valor do módulo de elasticidade, que varia de 83 a 186 GPa. Entretanto, a principal característica da fibra de aramida relaciona-se com seu desempenho em situações de impacto, resistência à fluência e fadiga (BEBER, 2003). Embora as fibras de Kevlar® apresentem elevados módulos de tração e de resistência à tração longitudinal, não resistem bem à compressão (CALLISTER JÚNIOR, 2002). Os compósitos constituídos por fibras de aramida são normalmente empregados em produtos balísticos, artigos esportivos, peças automotivas, entre outros.

5.3.7 Fibras de Carbono

A fibra de carbono é o tipo de fibra mais empregado nos compósitos com matriz polimérica. Isso se deve ao fato de essas fibras apresentarem os maiores módulos específicos e resistências específicas se comparadas às demais fibras. Mesmo submetidas a temperaturas elevadas, as fibras de carbono mantêm as propriedades citadas, sendo ainda resistentes à umidade e a uma ampla diversidade de solventes, ácidos e bases quando se encontram em temperatura ambiente. Além da resistência e rigidez, as fibras de carbono possuem excelente resistência à fadiga, características de amortecimento de vibrações e estabilidade dimensional.

O carbono é um elemento químico que, em temperatura ambiente, apresenta sua forma mais estável: carbono cristalizado ou grafite. As fibras de carbono, por sua vez, representam uma mistura do carbono em sua forma amorfa e cristalina (BEBER, 2003). Além da engenharia civil, as fibras de carbono são empregadas em diversas áreas, como na indústria aeroespacial ou automotiva, devido à sua elevada resistência à tração e baixo peso específico. Apresentam arranjo bidimensional e normalmente coloração escura e podem ser manipuladas durante sua produção, para que se alcancem resistências e módulos de elasticidade mais elevados.

As fibras de carbono foram desenvolvidas no Japão, na década de 1950. No entanto, apenas em 1963 foi feita a produção da fibra como reforço em compósitos, na Inglaterra. Em 1971 foi realizada a primeira comercialização da fibra pela *Union Carbide* (ZANGIACOMI, 2006).

As fibras de carbono são, normalmente, produzidas a partir de três materiais orgânicos: *rayon* (polímero celulósico), fibras precursoras orgânicas como o *poliacrilonitrila* (PAN) ou com base no alcatrão (PITCH), que consiste em um subproduto da destilação do petróleo (MACHADO, 2006). Para formação das fibras de carbono, são necessárias temperaturas entre 1000°C e 3000°C, através de um processo de carbonização ou pirólise de um filamento orgânico.

O processo de produção consiste na oxidação dessas fibras precursoras, seguida do processamento a elevadas temperaturas. Nesse processo térmico as fibras resultantes apresentam os átomos de carbono perfeitamente alinhados ao longo da fibra precursora, característica que confere extraordinária resistência mecânica ao produto final.

As fibras de carbono apresentam elevado módulo de elasticidade, na ordem de 200 GPa, que varia em função da fibra precursora selecionada. Quanto maior o módulo de elasticidade da fibra de carbono, maior o seu custo. O *rayon* e as fibras precursoras orgânicas derivadas do alcatrão geram fibras de carbono com baixo módulo de elasticidade, na ordem de 50 GPa, por exemplo. Já o PAN é empregado na produção de fibras de carbono com elevado módulo de elasticidade, quando carbonizadas a temperaturas superiores a 800°C (MACHADO, 2006). O módulo de elasticidade também sofre influência da temperatura em que o processo industrial é realizado. Quanto maior a temperatura, mais elevado é o módulo de elasticidade. Entretanto, a utilização de elevadas temperaturas reduz a resistência à tração do

material (GARCEZ, 2007).

5.4 Resinas

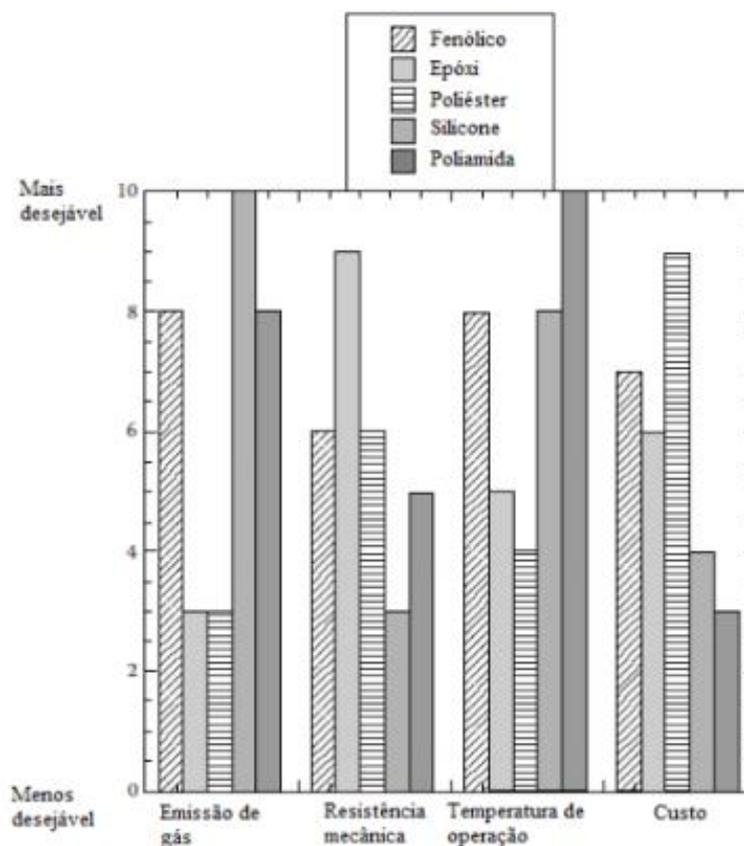
As fibras que constituem os PRF são embebidas em uma matriz que, além de protegê-las e oferecer suporte, aumenta a resistência ao impacto e à falha, permitindo que os componentes do compósito possam trabalhar como um único elemento e possibilitando que as fibras sejam capazes de suportar esforços. A matriz deve ser suficientemente rígida para impedir que as fibras entrem em colapso quando submetidas ao carregamento e para possibilitar a transferência das solicitações externas para as fibras. A matriz é capaz de absorver apenas uma pequena parcela desses esforços, pois normalmente apresenta menor resistência mecânica e rigidez quando comparada às fibras (GAMA, 2017).

Há uma ampla variedade de matrizes que podem ser empregadas nos PRF. O tipo de matriz utilizada no compósito também influencia nas propriedades do mesmo, principalmente naquelas que se relacionam ao cisalhamento e, de forma menos expressiva, nas propriedades de compressão do material (SANTIAGO; MARÍN; FERNÁNDEZ, 2003). Nas estruturas poliméricas, as matrizes mais empregadas são as resinas, que podem ser de natureza termorrígida ou termoplástica, classificadas de acordo com seu comportamento diante ao aumento de temperatura. As resinas termoplásticas, como o *nylon* e o polietileno, podem ser fundidas ou reprocessadas (BEBER, 2003). Ou seja, se aquecidas amolecem e se resfriadas voltam a se tornar rígidas. Além disso, as resinas termoplásticas apresentam elevada taxa de deformação e baixo tempo de cura (GAMA, 2017). As resinas termorrígidas, como as poliamidas e epóxi, são as mais adequadas para o emprego nos polímeros reforçados com fibras por apresentarem baixa taxa de deformação, baixa fluência, elevada resistência mecânica, boa estabilidade térmica e boa resistência química.

A escolha do tipo de resina a ser empregada depende da resistência mecânica proporcionada, custo, emissão de gases e temperatura de operação (ver Figura 4). As resinas existentes são desenvolvidas para que sejam compatíveis com o substrato de concreto e possuam elevada resistência de colagem, assim como apresentem a capacidade de preencher vazios e sejam aderentes com a fibra que será empregada no reforço, desenvolvendo as propriedades mecânicas necessárias ao compósito. Além disso, as resinas hoje comercializadas são produzidas para que sejam

facilmente manuseadas e aplicadas. Assim como apresentam comportamento estrutural otimizado para uma diversidade de condições ambientais (MACHADO, 2006).

Figura 4 - Comparativo de desempenho dos polímeros



Fonte: (GAMA, 2017, p. 26)

A resina mais empregada na composição dos polímeros reforçados com fibras é a epóxi. Comercializada desde 1940, é derivada do petróleo e resultante da união de epocloridina e bifenol. A proporção dos componentes utilizados resulta na obtenção de resinas com propriedades diferentes, conforme especificado no Quadro 2 (SOUZA; RIPPER, 1998).

Quadro 2 - Propriedades da Resina Epóxi

Propriedades da Resina Epóxi	
Módulo de elasticidade (GPa)	2,8 - 4,2
Resistência à tração (MPa)	35 - 100
Temperatura de Serviço (°C)	25 - 175
Temperatura de Transição Vítrea (°C)	130 - 250

Fonte: Adaptado de Garcez (2007, p. 28).

No geral, a resina epóxi apresenta alta resistência mecânica, baixa viscosidade, baixa volatilidade e retração durante o processo de cura e baixo enrugamento. Além disso, apresenta boa aderência a diversos tipos de fibras e substratos, pode ser manipulada em uma grande variedade de formas e é inerte à umidade, o que a torna uma boa alternativa para combater a corrosão das barras de armaduras.

O coeficiente de dilatação térmica da resina epóxi, entretanto, é muito superior ao do concreto, de forma que quando aplicada em peças submetidas à variação de temperatura pode levar ao surgimento de fissuras e deslocamentos causados pela diferença de deformações entre os dois materiais. Além disso, o emprego da resina epóxi a temperaturas inferiores a 10°C e superiores a 50°C pode não gerar os resultados esperados. Isso ocorre, pois quando submetida a baixas temperaturas, o processo de polimerização, ou seja, a transformação do material pastoso em um rígido, pode não acontecer. Submetida a elevadas temperaturas, por sua vez, a resina já rígida pode se tornar plástica. Além disso, quando a resina epóxi é aplicada a temperaturas superiores a 30°C, o processo de polimerização tende a ser acelerado, de forma que a aplicação em cada situação deve ser estudada para que se aproveite o período de plasticidade da resina, denominado “*potlife*” (SOUZA; RIPPER, 1998).

5.5 Histórico das fibras de carbono

O reforço executado com fibras de carbono tem o objetivo de recuperar ou fornecer à estrutura suas condições mínimas de segurança e funcionalidade (BEBER, 2003).

A trajetória da fibra de carbono até sua finalidade de reforço estrutural em concreto armado teve início com Thomas Edison, também conhecido como inventor da lâmpada. Ele foi o primeiro a utilizar as fibras de carbono, por volta de 1878, realizando a pirólise de fios de algodão e carbonizando-os em filamentos de fibra de

carbono a serem utilizados em uma de suas primeiras lâmpadas incandescentes (LEBRÃO, 2008).

Mais de 70 anos depois, a primeira fibra de carbono comercial foi produzida nos anos de 1950 por meio da utilização do *rayon* para aplicações em mísseis em temperaturas elevadas. Entretanto, concluiu-se que este material produzia pouco carbono, além de resultar em fibras com baixas propriedades mecânicas, sendo assim pouco eficiente (MACHADO, 2004).

Durante os anos de 1970, as fibras de carbono também foram comercializadas por meio da utilização do piche, a fim de reduzir o custo. No entanto, a resistência à compressão não se apresentou eficiente e o custo para purificação do líquido do piche era alto (LEBRÃO, 2008).

Desta forma, estendeu-se o campo de pesquisa no segmento, chegando ao material chamado de PAN, no Japão e na Inglaterra. Esse material apresentou maior eficiência em relação à produção de fibras de carbono.

Atualmente, ainda se estuda como aumentar a resistência das fibras, o seu módulo, sua resistência à manipulação e como diminuir deformações e falhas.

A ideia de utilizar as fibras de carbono para reforçar estruturas de concreto armado surgiu mesmo no Japão, no final do século XX. O motivo que levou a esse surgimento foi a alta quantidade de abalos sísmicos ocorrentes na região, que causavam diversos danos às estruturas. Com isso, havia a necessidade de recuperar e reforçar estruturas em um curto intervalo de tempo (BEBER, 2003).

Mais recentemente, as fibras de carbono vêm sendo utilizadas também no reforço de elementos estruturais de ambientes que apresentam classe alta de agressividade, como ambientes sujeitos a ataques químicos e ambientes industriais voltados para a mineração.

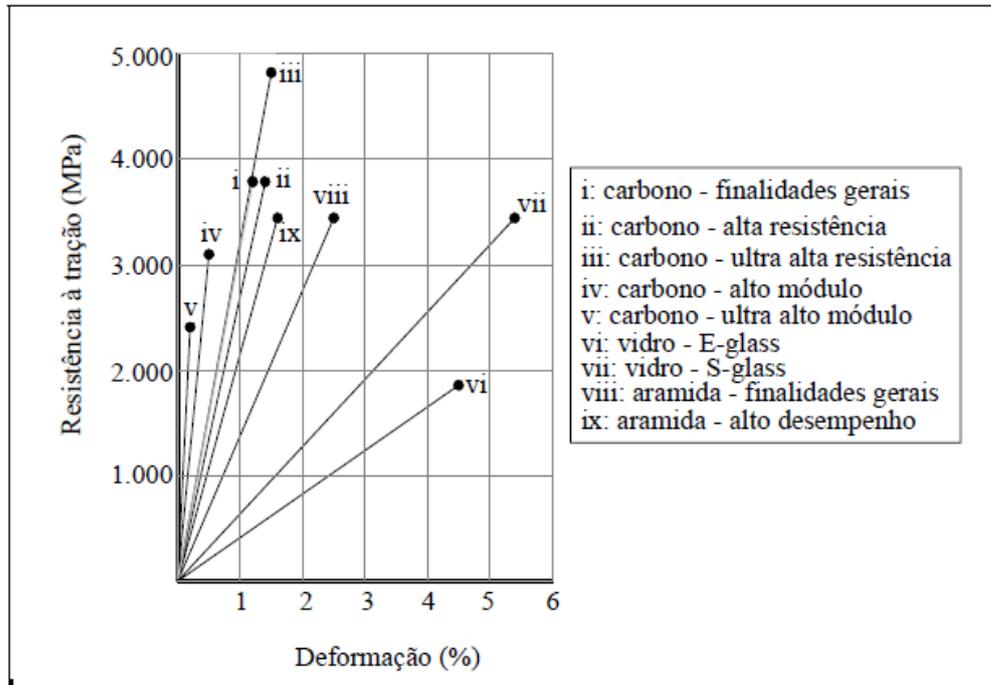
5.6 Propriedades dos compósitos de fibras de carbono

De acordo com o alto desempenho mecânico das fibras de carbono, resistência à corrosão, leveza, alta resistência à tração e grande rigidez, os produtos de Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono (PRFC) são altamente apropriados para o reforço de concreto armado (FERRARI; PADARATZ; LORIGGIO, 2002).

A Figura 5 faz um comparativo da curva de Tração x Deformação entre diversos

tipo de fibras. Pode-se perceber que, em comparação com outras fibras, a de carbono apresenta baixa deformação quando submetida a grandes esforços de tração.

Figura 5 - Representação das curvas típicas de Tração x Deformação das fibras



Fonte: (Ferrari; Padaratz; Loriggio, 2002, p. 1784)

A lâmina é uma fina camada de fibra que, quando envolta de matriz, produz o compósito. Essas lâminas podem ser dispostas de diferentes maneiras, em uma mesma direção, entrelaçadas formando os tecidos ou dispostas aleatoriamente. Na fabricação do compósito, várias camadas são sobrepostas de acordo com a configuração desejada. Essa configuração de camadas está diretamente ligada às propriedades mecânicas adquiridas pelo material ao final do processo de pultrusão (GALLI, 2016).

Os fatores que influenciam no ganho de resistência do compósito são o número de camadas e o ângulo de orientação entre as fibras. Em razão dessa importância com a orientação das lâminas, os compósitos são considerados ortotrópicos, nos quais as propriedades de cada peça são únicas e independentes nas três direções mutuamente perpendiculares (GALLI, 2016).

Já os compósitos cujas lâminas são alinhadas em uma única direção são considerados isotrópicos, nos quais um de seus planos principais é um plano no qual as propriedades são iguais em todas as direções. Na direção longitudinal, as

propriedades mecânicas do compósito são mais elevadas, pois a fibra reforça o material de maneira mais eficiente na direção longitudinal ao seu eixo, também chamada de direção de alinhamento das fibras (GALLI, 2016).

Existem duas maneiras para avaliar as propriedades mecânicas dos materiais compósitos. Sob uma verificação micromecânica, pela análise das propriedades dos constituintes, podem-se estimar as propriedades da lâmina. Já sob um estudo macromecânico, é possível inserir a configuração do arranjo de lâminas na determinação do comportamento mecânico do material (GALLI, 2016).

Devido ao fato de os laminados poderem ser produzidos com diferentes tipos de fibras de carbono, com propriedades físicas e mecânicas distintas, as lâminas também podem ter características diferentes. O módulo de elasticidade, a deformação na ruptura e o volume de fibra no compósito são fatores que influenciam na resistência final do produto composto. Sendo assim, para obter um produto com elevada resistência, baixo módulo de elasticidade, grande alongamento e baixo custo pode-se mesclar as diferentes fibras para produzir um laminado híbrido (MACHADO, 2002).

Entretanto, os laminados, apesar de terem alta aplicabilidade em casos de reforço à flexão, não são apropriados para confinamento e reforços ao cisalhamento, pois não admitem qualquer tipo de curvatura. Assim, para efetuar reforços em locais curvos ou quando for necessário mudar a direção da fibra, o tecido de fibra de carbono é o correto a ser aplicado (MACHADO, 2002).

5.7 Pultrusão – processo produtivo dos compósitos de fibra de carbono

O processo de pultrusão é contínuo e consiste em desenrolar, alinhar, esticar, e em seguida impregnar as fibras com resinas epoxídicas que então são enrijecidas por meio de calor e prensagem, ganhando forma (VANI, 2014).

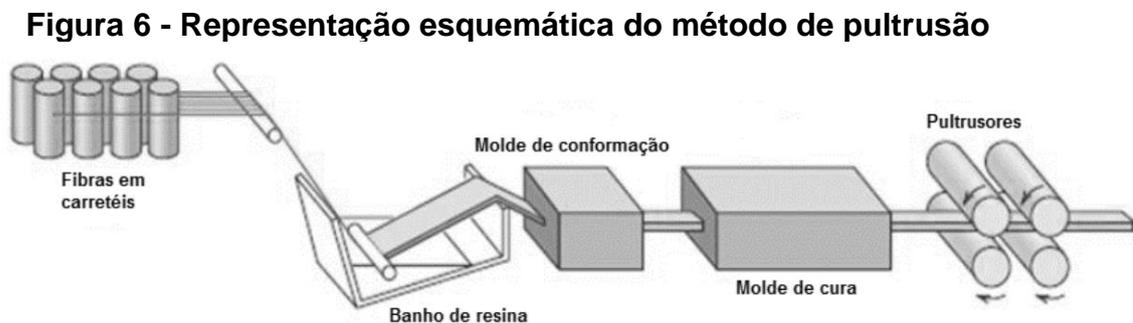
Em seguida, passam por um segundo molde também aquecido, onde ocorre a cura da resina. Só então, o compósito é resfriado e cortado de acordo com o perfil e as dimensões desejadas (GALLI, 2016).

O ponto-chave para se obter um produto de qualidade, com o processo de pultrusão, é o controle da temperatura e da velocidade de produção. Uma velocidade mais baixa de produção consome menos energia para a cura do material, porém, resulta em uma produção menor. Já uma alta velocidade de produção necessita de

mais calor, podendo resultar em um superaquecimento. Um controle ruim sobre a temperatura e a velocidade de execução do processo pode acarretar em um produto defeituoso, com formação de bolhas, trincas, fissuras ou cura insuficiente (VANI, 2014).

Esse processo tem a incorporação das fibras de carbono limitada entre 65% e 70% do volume do plástico conformado, devido a razões técnicas. Valor semelhante ao conseguido para as barras de fibras de carbono (MACHADO, 2002).

Além do ganho de resistência, outra grande vantagem desse processo é a possibilidade de um controle rigoroso da proporção de resina e fibra para a fabricação do compósito (GALLI, 2016). A Figura 6 ilustra o procedimento descrito.



Fonte: (GALLI, 2016, p. 4).

Dentre os tipos de laminados de fibra de carbono, destacam-se os pré-curados.

Esses são produtos manufacturados nas instalações industriais dos fornecedores e só então despachados para o local da obra onde serão aplicados. Os três tipos de sistemas pré-curados mais comuns são: os laminados unidirecionais fornecidos em bobinas ou em amarrados de barras; as grelhas pré-curadas multidirecionais também disponibilizadas em bobinas; e as cascas ou placas pré-curadas, disponibilizadas sob a forma de cascas cortadas longitudinalmente (MACHADO, 2002).

Buscando uma maior velocidade de aplicação do sistema para o reforço à compressão axial por meio de encamisamento, reduzir sua manutenção e aumentar sua durabilidade, o reforço pode ser aplicado de diferentes maneiras (SUDANO, 2005):

- a) tecidos de fibras que são convenientemente colados no pilar por meio da resina

- polimérica;
- b) processo *filament winding*;
- c) camadas de compósitos pré-fabricados;
- d) processo de infusão de resina;
- e) fibras picadas jateadas na estrutura juntamente à resina polimérica, os processos *spray up*;
- f) inserção de fitas pré-impregnadas com a resina no interior do elemento estrutural.

5.8 Limites de resistência dos reforços com fibras de carbono

Para que não ocorra colapso da estrutura reforçada, são impostos limites de resistência dos reforços com os sistemas compostos com fibras de carbono. Tais colapsos podem se dar devido ao descolamento do sistema composto, fogo e incêndios, vandalismo, falha prematura localizada na interface do concreto do substrato com o sistema composto, entre outras situações (MACHADO, 2002).

Além desses limites, o reforço com fibra de carbono, após ser danificado, deve ainda ser capaz de resistir a um nível mínimo de carregamento sem entrar em colapso, segundo recomendações de fabricantes de sistemas compostos estruturados com fibras de carbono e projetistas estruturais (MACHADO, 2002).

5.9 Resistência à temperatura dos compósitos de fibra de carbono

As resinas poliméricas usadas tanto nos sistemas compostos aderidos, via seca ou pré-impregnados, e os adesivos poliméricos utilizados nos sistemas compostos pré-curados possuem uma temperatura vítrea do polímero. Essa temperatura varia dependendo do processo químico do polímero. A faixa de variação das resinas e dos adesivos aplicados *in loco* é da ordem de 90°C (MACHADO, 2002).

Quando sob temperaturas maiores que 90°C, as resinas e os adesivos perdem sua integridade física. Sendo assim, o compósito de fibra de carbono também perde suas características de resistência às temperaturas excessivas. Não sendo capaz também de resistir à ação do fogo por um período de tempo significativo (MACHADO, 2002).

Além disso, revestimentos comuns contra incêndio não proporcionam isolamento térmico suficiente para manter a temperatura na peça e do sistema composto abaixo da temperatura vítrea. Esses revestimentos podem ser painéis de gesso, fibras minerais diversas ou pinturas intumescentes (MACHADO, 2002).

Porém, apesar de o compósito de fibra de carbono, em si, ter baixa resistência ao fogo, a combinação do sistema composto com uma estrutura de concreto preexistente pode ainda ter uma resistência pertinente ao fogo, uma vez que o próprio concreto possui resistência inerente ao fogo (MACHADO, 2002).

Sendo assim, as mesmas características de resistência a temperaturas estabelecidas para as estruturas de concreto armado podem ser aplicadas para as estruturas reforçadas com compostos de fibras de carbono, garantindo que a estrutura reforçada não entre em colapso sob a ação do fogo (MACHADO, 2002).

5.10 Verificação da ductilidade com reforço de fibra de carbono

A ductilidade é a propriedade de um material de ser manipulado, deformado, sem que ocorra o rompimento da estrutura.

Nos reforços com fibra de carbono, em que a manta da fibra é colada nas faces externas das peças de concreto armado, ocorre a redução da ductilidade original da estrutura. Na maioria dos casos essa perda de ductilidade é muito baixa, podendo ser considerada desprezível. Porém, é necessário fazer a verificação se essa perda é realmente indiferente para o bom desempenho da estrutura (MACHADO, 2002).

5.11 Tensões limites para a ruptura por fluência e fadiga da fibra de carbono

Com o passar do período conhecido como tempo de capacidade de sustentação das estruturas, quando submetidas a um carregamento constante, essas podem eventualmente vir a romper por fluência. Essa falha é semelhante à fadiga observada nos metais (MACHADO, 2002).

A capacidade de sustentação de tensões reduz à medida que a relação entre as tensões de longa duração e as tensões de curta duração atuantes nas fibras de carbono do sistema composto aumenta. Comumente, o reforço é submetido a condições ambientais adversas, como elevadas temperaturas, exposição às radiações ultravioleta, alcalinidade elevada, ciclos de umedecimento e secagem e

ciclos de congelamento e descongelamento (MACHADO, 2002).

Entretanto, as fibras de carbono são pouco suscetíveis à ruptura por fluência e aos carregamentos que produzem fadiga, não sendo significativamente afetada pelo meio ambiente, a menos que a resina ou a interface fibra/resina seja substancialmente degradada pelo meio ambiente (MACHADO, 2002).

Assim, para evitar a ruptura por fluência e por fadiga nos sistemas de reforço compostos com fibra de carbono, deve ser feita a verificação da permanência dos níveis de tensão no domínio elástico do elemento da estrutura quando elaborado o projeto (MACHADO, 2002).

5.12 Vantagens das fibras de carbono

Os compósitos de fibra de carbono são empregados como método de reforço em estruturas de concreto armado considerando-se: boa resistência mecânica e rigidez, baixo peso específico, baixo coeficiente de expansão térmica, alta resistência à fadiga, alta resistência à ação do fogo, alta resistência a agentes químicos, boa versatilidade, facilidade de aplicação, facilidade de fixação, baixa demanda de manutenção e baixo tempo de interdição necessário.

5.12.1 Resistência e rigidez

O principal motivo da escolha da utilização do compósito de fibras de carbono para reforço estrutural de concreto armado são os altos índices de resistência e rigidez que o compósito apresenta.

A rigidez dos materiais está relacionada com o módulo de elasticidade, que é obtido pela razão entre a tensão aplicada e a deformação sofrida, sendo que o módulo de elasticidade dos compósitos de fibra de carbono pode variar entre 230 e 640 GPa (BEBER, 2003).

Além disso, a resistência desse conjunto, que relaciona a capacidade do material de resistir a cargas solicitantes sem sofrer deformações plásticas, pode variar entre 1.500 e 5.000 MPa (BEBER, 2003).

5.12.2 Peso próprio

A massa específica dos compósitos de fibra de carbono é considerada baixa, apresentando cerca de 20% da massa específica do aço (BEBER, 2003).

Isso pode levar à diminuição de custos com seu transporte, uma vez que os compósitos podem ser facilmente transportados em formas de rolos, como se pode observar na Figura 7, por meio de veículos de pequeno porte.

Figura 7 - Rolo de compósito de fibras de carbono



Fonte: Elaborado pelos autores (2019).

Além disso, o baixo peso próprio apresentado pelas fibras de carbono pode contribuir também para a diminuição de custos por meio da dispensa de equipamentos e máquinas na obra, como equipamentos de posicionamento, de içamento, de escoramento, de fixação e de aplicação.

5.12.3 Coeficiente de expansão térmica

De modo geral, o conjunto de fibras de carbono apresenta baixo coeficiente de expansão térmica. No entanto, ele depende de uma série de características a serem adotadas na confecção do compósito, como: tipo de fibra, tipo de matriz, geometria da fibra e fração volumétrica. Ou seja, o coeficiente de expansão pode ser adequado conforme sua necessidade, por meio da alteração das características do compósito, apresentando grande versatilidade.

5.12.4 Fadiga

A resistência à fadiga dos compósitos de fibra de carbono é, em sua maioria, muito superior à resistência à fadiga dos metais e de outros compósitos, principalmente se a composição da direção das fibras de carbono estiver na mesma direção da solicitação dos esforços.

5.12.5 Resistência à ação do fogo

A resistência à ação do fogo dos compósitos de fibra de carbono depende principalmente da resina aplicada para sua fixação, uma vez que a resistência ao fogo da resina epoxídica costuma ser inferior à resistência das próprias fibras de carbono.

No entanto, de forma a mitigar os efeitos causados pelo fogo em todo o compósito, pode ser aplicada camada protetora na superfície das fibras, depois de sua fixação. Além disso, a capacidade de condução térmica dos compósitos é muito baixa, contribuindo para que o fogo não seja espalhado.

Também é possível considerar que, durante o ataque do fogo, o compósito é carbonizado ao invés de queimado, o que mantém o reforço operante por um longo período (BEBER, 2003).

5.12.6 Resistência a agentes químicos

Os compósitos de fibra de carbono também não sofrem deterioração proveniente da ação de agentes agressivos, químicos, biológicos ou físicos. Eles apresentam alta resistência a solventes, a ácidos e a bases, sendo comumente utilizados como reforços em ambientes sujeitos a ataques de agentes químicos, como

indústrias e mineradoras.

5.12.7 Versatilidade

As fibras de carbono apresentam grande variedade de características, tanto físicas quanto mecânicas, possibilitando que elas sejam ajustadas conforme a necessidade de projeto e apresentando, assim, grande versatilidade (BEBER, 2003).

5.12.8 Aplicação

A aplicação de reforço com mantas de fibra de carbono é considerada simples, apesar de exigir mão de obra especializada. Isso ocorre porque a aplicação da manta deve ser executada de forma criteriosa, para impedir a permanência de bolhas entre a superfície da manta e a superfície da estrutura de concreto armado, o que prejudicaria a fixação correta do reforço.

5.12.9 Fixação

Uma vez que a espessura das mantas de fibra de carbono costuma apresentar valor baixo e que o compósito tem capacidade de se ajustar facilmente à superfície de concreto, as tensões que levariam ao deslocamento do reforço são muito baixas e, assim, a necessidade de elementos de ancoragem e de fixação é reduzida.

5.12.10 Manutenção

Os custos com reforços em estruturas de concreto armado por meio da aplicação de compósitos de fibra de carbono também são reduzidos, uma vez que as mantas não necessitam de manutenção periódica, como pinturas protetoras, por exemplo.

5.12.11 Tempo de interdição da construção

Já que a aplicação das mantas de fibra de carbono é feita de maneira

relativamente rápida, como consequência também é reduzido o tempo de interdição da obra.

Esse tempo pode ser significativo, como o tempo de interdição em um tráfego, em uma edificação, e até mesmo em paradas de plantas de mineração, cujo gasto com a interdição pode ser alto e acarretar grandes prejuízos (BEBER, 2003).

5.13 Metodologia de aplicação da fibra de carbono

Para garantir que a manta de fibra de carbono exerça devidamente sua função como reforço, é necessário garantir sua correta aplicação. Sendo assim, é fundamental que a superfície que irá receber a manta esteja íntegra e nivelada. Para isso, todas as manifestações patológicas significativas existentes no substrato deverão ser corrigidas, garantindo que as transferências de esforços na interface concreto armado/sistema composto ocorram devidamente (MACHADO, 2002).

O processo de aplicação consiste basicamente na recuperação de manifestações patológicas, preparação da superfície, aplicação de imprimador primário e regularizador, corte e imprimação das fibras, aplicação da lâmina e da segunda camada de saturação e, por fim, o revestimento estético/protetor. Normalmente, para verificar a boa aderência do sistema à superfície de concreto, são executados testes de arrancamento a cada reforço executado (MACHADO, 2002).

Vide abaixo o detalhamento das etapas:

a) recuperação de fissuras e trincas estruturais

Todas as trincas e fissuras com aberturas maiores que 0,25 mm deverão ser recuperadas. Para isso, podem ser utilizados procedimentos convencionais de injeção de epóxi sob pressão. Para as fissuras com aberturas menores que 0,25 mm expostas ao meio ambiente deve-se fazer injeção de resinas ou seladores, para evitar futuras corrosões na armadura (MACHADO, 2002).

b) preparação da superfície para recebimento do sistema composto

Em caso de reforço para os esforços de flexão e de cisalhamento das vigas, lajes ou pilares, que exigem um sistema de colagem eficiente que garanta uma adequada transferência de esforços entre os meios aderidos, predomina a condição crítica de colagem do sistema composto.

No caso da colagem crítica, a superfície de concreto deve ser limpa, com a utilização de abrasivos ou jatos de areia ou granalhas metálicas. Essa limpeza contempla remoção de poeira, pó, substâncias oleosas e graxas, partículas sólidas não totalmente aderidas, recobrimentos diversos como pintura, argamassas, entre outros. Deverão ficar totalmente expostas quaisquer brocas ou imperfeições superficiais significativas.

Para evitar concentrações de tensões na fibra e eliminar eventuais “vazios” entre o concreto e o sistema, por deficiência de colagem, as quinas envolvidas na aplicação, quando existirem, devem ser arredondadas. Assim como os cantos ruidosos devem ser suavizados com a aplicação de massa regularizadora apropriada com acabamento lixado.

A água pode inibir a penetração das resinas e reduzir drasticamente a eficiência da ponte de aderência entre o concreto e o sistema. Assim, toda a superfície em que será aplicado o reforço deverá estar seca (MACHADO, 2002).

Nos casos em que será feito o confinamento de colunas, o que exige uma maior condição de contato eficiente entre o concreto e o sistema composto, predomina condição crítica de contato íntimo para o sistema.

No caso de contato crítico, as superfícies não podem apresentar concavidades ou convexidades que impeçam o carregamento correto do sistema composto. No caso de irregularidades superficiais expressivas, como brocas, isso deve ser corrigido por preenchimento com material de reparação com características mecânicas compatíveis com as do concreto armado (MACHADO, 2002).

a) Aplicação do imprimador primário

Para estabelecer uma ponte de aderência eficiente entre a superfície da peça de concreto e o reforço, é aplicado um Primer. Os imprimadores têm como objetivo penetrar nos poros do concreto, colmatando-os. Pode ser aplicado com o uso de pincel comum ou rolo de espuma. Após duas horas da aplicação do primer na superfície de concreto, já é possível a aplicação da resina de saturação da manta de fibra de carbono (BEBER, 2003).

b) Aplicação do regularizador de superfícies

Para estabelecer uma superfície desempenada contínua, as massas reguladoras calafetam e/ou regularizam a superfície de concreto, onde será

aplicado o sistema.

Não é necessário um total nivelamento da superfície com a horizontal, pois o sistema composto possui grande flexibilidade (MACHADO, 2002).

c) Corte das fibras de carbono

O corte da manta é feito com o uso de régua metálica, tesoura de aço e faca de corte ou estilete, em bancadas especialmente montadas para a execução do corte (MACHADO, 2002).

Uma vantagem dessa facilidade de corte está na possibilidade de a manta assumir diversas formas e tamanhos, adequando-se melhor à solicitação (BEBER, 2003).

d) Imprimação das fibras de carbono

Existem duas maneiras distintas com a qual as lâminas de fibra de carbono deverão ser saturadas e aderidas às peças que serão reforçadas:

1º - Saturação via úmida – A lâmina é saturada em bancada própria, para depois ser transportada para sua aplicação no local que será reforçado.

Esse meio de saturação é mais econômico quanto à resina e menos trabalhoso. Porém, devido ao transporte, limita a lâmina a um comprimento de 3,5 a 4,0 m.

2º - Saturação via seca – A saturação é feita diretamente sobre o concreto onde será aplicado o reforço (MACHADO, 2002).

Utiliza-se o rolo de espuma para espalhar tanto os imprimantes, como os saturantes.

e) Aplicação da lâmina de fibra de carbono

O tempo máximo de aplicação da lâmina de fibra de carbono é de 25 a 30 minutos, independentemente do tipo de imprimação utilizado. Os ajustes de alinhamento e prumo das lâminas de fibra de carbono devem ser feitos nesse intervalo de tempo.

De acordo com o *American Concrete Institute (ACI), Committee 440*, na orientação das fibras de carbono não podem ocorrer ondulações ou desvios de direção maiores que 5° (87 mm/m) da direção especificada em projeto. O engenheiro projetista deve ser comunicado caso ocorram desvios maiores que esse.

Para garantir uma perfeita aderência da lâmina ao substrato de concreto, é feita a “rolagem das bolhas de ar”. Procedimento que consiste em eliminar as

bolhas que tenham ficado aprisionadas na interface colada. É feita com a utilização de pequenos rolos de aço denteados.

Os rolos metálicos servem para promover o alinhamento das fibras e a rolagem das bolhas de ar que possam estar aprisionadas no sistema composto (MACHADO, 2002).

f) Segunda camada de saturação

A segunda operação deve ocorrer após cerca de 30 minutos e garantir que a fibra de carbono esteja totalmente saturada (encapsulada).

Em casos em que é necessária a aplicação de mais uma camada da fibra, deve-se repetir esses passos para a aplicação de cada nova camada. Ressaltando, também, que cada lâmina exige duas imprimações independentes, não podendo a camada de imprimação anterior ser utilizada para a colocação da próxima lâmina (MACHADO, 2002).

g) Revestimento estético e/ou protetor

Alguns revestimentos especiais com diversas cores e texturas podem ser utilizados quando, por questões estéticas, tornar-se interessante esconder o sistema composto aplicado. Entretanto, também é exigido do reforço atender às condições específicas de agressões físicas, mecânicas e ambientais. Sendo assim, o revestimento passa a ser, além de estético, parte da proteção mecânica e química do sistema composto (MACHADO, 2002).

Os sistemas compostos podem ser aplicados para promover o reforço estrutural em elementos em que ocorram momentos fletores (tensões de tração, compressão, esforço cortante e de torção com tensões tangenciais) e em casos específicos de confinamento.

5.14 Utilização da fibra de carbono para diferentes tipos de solicitações

5.14.1 Reforço à flexão

A norma ACI 440.2R-02 estabelece que o reforço de sistemas compostos estruturados com fibra de carbono e os fatores de majoração e minoração dos carregamentos devem ser projetados de acordo com as recomendações de utilização e resistência da ACI 318-99 (MACHADO, 2002).

Para realizar o reforço à flexão com sistema composto de fibra de carbono de estruturas de concreto armado é feita a colagem da manta na face superior ou inferior das peças. Sendo esse um reforço externo, a aderência entre o sistema composto estruturado com fibras de carbono e o substrato de concreto deve ser adequada.

Assim, existem quatro possibilidades de ocorrência de ruptura das peças de concreto armado reforçado: ruptura por escoamento do aço antes do esmagamento do concreto, por escoamento do aço antes da ruptura do sistema CFC, por esmagamento do concreto antes da ruptura por escoamento do aço ou ruptura do sistema compósito CFC antes da ruptura por escoamento do aço (MACHADO, 2002).

A ruptura por escoamento do aço antes do esmagamento do concreto e a ruptura por escoamento do aço antes da ruptura do sistema CFC caracterizam um comportamento dúctil da estrutura, o que é desejável. Já os outros dois modos de ruptura caracterizam um comportamento frágil da estrutura, o que é menos desejável (MACHADO, 2002).

5.14.2 Reforço de vigas à flexão e ao corte

Em caso de momentos fletores positivos e negativos, a fibra pode absorver os esforços de tração. Já nos casos de esforço cortante, a fibra pode absorver tensões tangenciais (de cisalhamento).

5.14.3 Reforço de lajes à flexão

As lâminas de fibra podem ser colocadas segundo a direção 0° (horizontal), ou 90° (vertical), para o reforço de lajes, assim como para o reforço de vigas.

A Figura 8, ilustra a colocação horizontal e vertical da fibras.

Figura 8 - Reforço de fibra de carbono aplicado horizontal e verticalmente em laje



Fonte: (MACHADO, 2002, p. 103).

5.14.4 Reforço à compressão axial por meio de confinamento

Uma empregabilidade muito efetiva do compósito de fibra de carbono para aumentar a resistência da estrutura à compressão e aumentar a ductilidade do elemento reforçado é o confinamento da seção axialmente solicitada da peça de concreto armado. Por meio do envolvimento contínuo da peça comprimida por uma jaqueta de compósito da fibra é possível combater a expansão lateral do concreto, proveniente de valores críticos de tensão longitudinal (MACHADO, 2002).

O modelo mais efetivo de disposição das fibras para o confinamento é aquele em que elas ficam alinhadas com a direção transversal ao eixo longitudinal do elemento. Nessa orientação as fibras confinantes comportam-se similarmente a estribos em espiral ou mesmo a estribos convencionais (MACHADO, 2002).

Dessa maneira, considerando a aderência perfeita entre as fibras e o pilar, a camisa de reforço estará sujeita a uma combinação bilateral de tensão. A boa aderência interfacial irá proporcionar a transferência de forças axiais, aplicadas ao núcleo do pilar, para a camisa de reforço (SUDANO, 2005).

A jaqueta de compósito de fibra de carbono estabiliza os danos e mantém a integridade física da estrutura antes do colapso, quando em estado limite último. É importante ter em mente que os danos para cargas de serviço, como fissuras, devem ser evitados, pois o sistema composto deve agir somente para atender sobrecarregamentos transitórios ou temporários (MACHADO, 2002).

5.14.5 Reforço de pilares e colunas

As condições deste reforço aplicam-se também em casos de reforço em chaminés de concreto armado. Pode ser feito para aumentar a resistência à flexão ou aumentar a resistência à compressão axial por meio de confinamento (MACHADO, 2002).

O reforço por flexão deve sempre ser instalado antes dos reforços para o corte e para o confinamento (MACHADO, 2002).

A aplicação com objetivo de reforço estrutural requer um sistema de colagem compatível ao funcionamento da estrutura e da respectiva superfície de contato da mesma. Há dois possíveis funcionamentos estruturais, sendo eles: a predominância da condição crítica de colagem do sistema composto, em caso de reforço para os esforços de flexão e de cisalhamento das vigas, lajes ou pilares, o que exige um sistema de colagem eficiente que garanta uma adequada transferência de esforços entre os meios aderidos, e a predominância da condição crítica de contato íntimo para o sistema composto, em caso de confinamento de colunas, o que exige uma maior condição de contato eficiente entre o concreto e o sistema composto (MACHADO, 2002).

No caso específico de resistência à compressão axial, como a manta de fibra de carbono resiste bem à tração, torna-se viável sua aplicação como confinamento de pilares. A força axial aplicada no pilar provoca tração nas suas laterais, que pode ser resistida pela camisas de reforço aplicada, evitando assim a expansão lateral dele (SUDANO, 2005).

“Estudos realizados por Jones & Hanna (1997) mostraram que para pilares de concreto, com 33 MPa de resistência média, encamisados com 300 g de tecido de fibra, o aumento na resistência final foi de 600%.” (SUDANO, 2005).

5.14.6 Reforço da cortante de vigas com lâminas de fibras de carbono aderidas externamente ao concreto

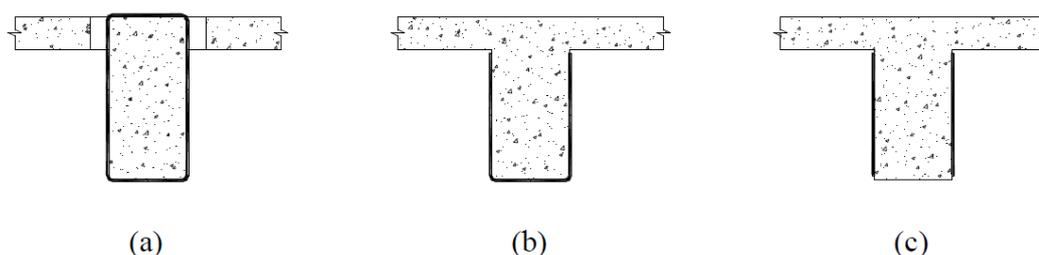
Outra maneira de reforço estrutural que se pode executar com o compósito de fibra de carbono é o reforço ao cisalhamento das peças de concreto armado.

Para reforçar o elemento, o compósito é disposto transversalmente, envolvendo

a estrutura, com a finalidade de, como os estribos de aço, reforçar as diagonais tracionadas da treliça de Morsch (MACHADO, 2002).

Na Figura 9, estão representadas as possíveis disposições do compósito de fibra de carbono para reforçar a estrutura para combater o cisalhamento (MACHADO, 2002).

Figura 9 - Possíveis disposições do compósito para combater o cisalhamento



Fonte: (MACHADO, 2002, p. 47).

Na Figura 9(a), está indicado o envolvimento total da seção transversal com a lâmina. Essa é a configuração mais empregada em vigas que não possuem laje superior ou inferior. Contudo, em casos em que a viga possui laje superior ou inferior, essa técnica torna-se inviável economicamente, pois será necessário rasgar a laje, permitindo a passagem da fibra para completar o envolvimento da peça (MACHADO, 2002).

Na Figura 9(b), está representada a técnica de colagem da fibra que abrange os três lados do elemento, lateral-fundo-lateral. Quando não é viável fazer o corte na laje superior, para o envolvimento total da peça, o envolvimento em “U” é uma solução de fácil execução e que permite o incremento de resistência nominal de cisalhamento (MACHADO, 2002).

A Figura 9(c), está indicado o modelo de colagem do compósito menos eficiente, se comparado aos outros dois métodos. Porém, em casos em que se tem limitação de ancoragem característica, esse método oferece notável reforço ao cisalhamento (MACHADO, 2002).

Quanto ao número de camadas de fibra de carbono, quanto maior ele for, maior a resistência geral do sistema, menor o comprimento efetivo de aderência do compósito e menor a eficiência de aplicação do reforço (MACHADO, 2002).

6 OBRAS BRASILEIRAS COM EMPREGO DA FIBRA DE CARBONO

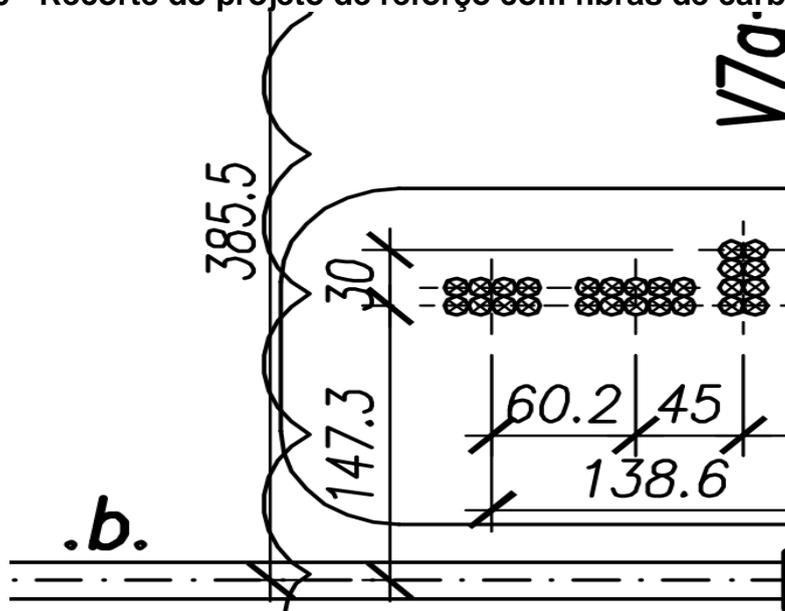
6.1 Sala Elétrica da AMG Mineração S.A.

Para reforçar a laje da Sala Elétrica da planta de mineração da AMG Mineração S.A, localizada na cidade de Nazareno – MG, foi elaborado pela empresa de tecnologia de mineração e metalurgia, Outotec Tecnologia Brasil, um projeto de reforço estrutural com mantas de fibra de carbono.

A planta de produção de espodumênio da mineradora passava por processos de melhorias, denominados “Improvements SP01”, que objetivavam aumentar a produção e a porcentagem de espodumênio no concentrado final. Para isso, novos equipamentos, como moinho de bolas e tanques de reagentes, foram adicionados ao processo. Assim, foi necessário também adicionar novos painéis elétricos, que levariam seus cabeamentos ao pavimento abaixo, até a sala de controle.

Para possibilitar a passagem dos novos cabeamentos elétricos, foram executados 74 furos na laje, conforme modelo da Figura 10, com serra copo, que formaram rasgos, dispostos conforme ampliação do projeto abaixo.

Figura 10 - Recorte do projeto de reforço com fibras de carbono



Fonte: Dados da pesquisa.¹

¹ Imagem disponibilizada pela empresa Outotec Tecnologia LTDA no primeiro semestre de 2019.

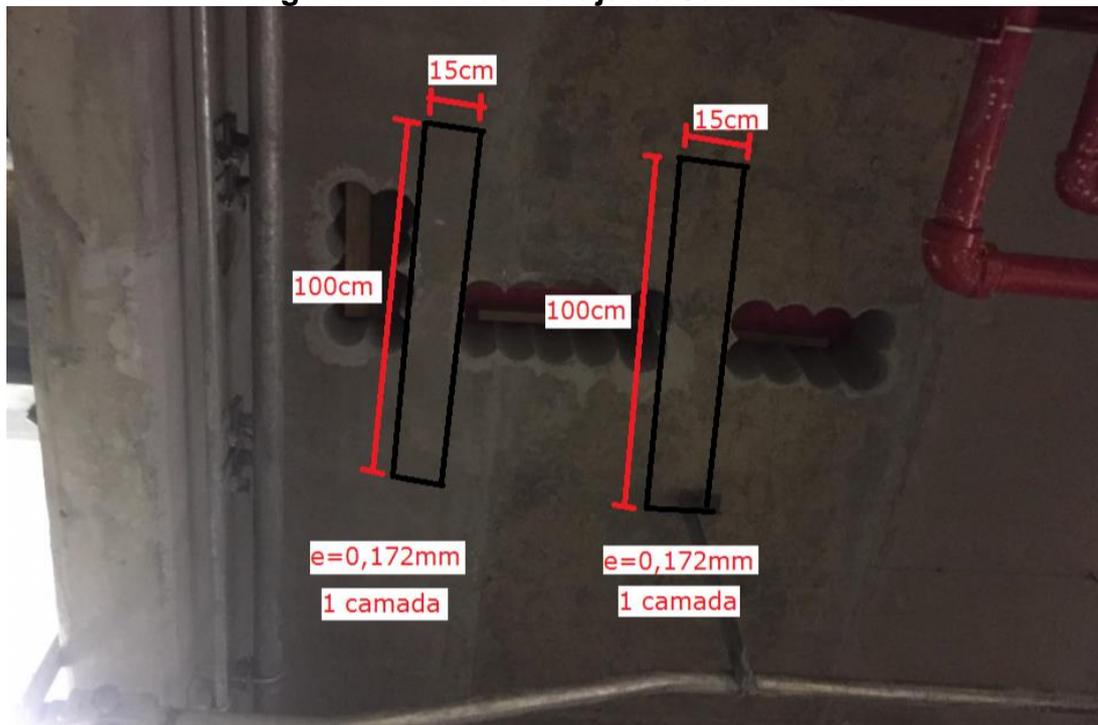
Do lado direito da viga vertical, onde estão dispostos 48 dos furos com diâmetro de 100 mm, o reforço foi executado com a utilização de dois perfis metálicos. Entretanto, no lado esquerdo da viga vertical, com 26 furos também com diâmetro de 100 mm, o reforço não pôde ser executado com perfis metálicos, pois havia interferência com o bandejamento de cabos que passava a 1 m abaixo do fundo da laje, com 40 cm de largura.

Assim, a fibra de carbono foi projetada como a melhor opção de reforço, porque sua aplicação não era impedida pelos bandejamentos. Além disso, a fibra de carbono nesse caso também apresentava outras vantagens. Uma dessas vantagens dava-se porque a aplicação da fibra de carbono possibilitava que a Sala Elétrica permanecesse em funcionamento, sem oferecer riscos, como explosões. Riscos que outros tipos de reforços que comumente utilizam soldas poderiam oferecer.

Dentre as dificuldades para execução da obra, pôde-se observar o seguinte:

- a) necessidade de mão de obra especializada: pelo fato de que a obra ocorreria dentro de uma planta de mineração, seria necessária a mobilização da equipe que executaria o reforço com as fibras de carbono. Tal mobilização inclui treinamentos de integração, que são muitas vezes mais duradouros que o próprio serviço. Isso levou a um aumento considerável do preço de execução dos serviços.
- b) a resina epoxídica utilizada para fixação da fibra de carbono é um material inflamável, sendo necessária a aplicação de camada protetora, uma vez que o local de instalação é uma sala com a presença de cabeamentos e equipamentos elétricos.

O projeto, com base nas novas cargas solicitantes e na perda de armadura da laje devido à execução dos furos, foi então calculado considerando duas mantas de fibra de carbono, com uma camada cada, de dimensões 1 x 0,15 m² por 0,172 mm de espessura, conforme Figura 11.

Figura 11 - Furos na laje da Sala Elétrica

Fonte: Elaborado pelos autores (2019).

6.2 Colégio Estudantil

O reforço estrutural em concreto armado com fibra de carbono foi realizado nas lajes de um colégio estudantil, localizado no bairro Santo Antônio, em Belo Horizonte, Minas Gerais. Tanto o fornecimento quanto a aplicação desse reforço foram feitos pela empresa Statera Engenharia.

Em entrevista realizada com o engenheiro civil, Marcelo Erbeta Mendes, também diretor comercial da Statera, a necessidade de reforçar estruturalmente as lajes do colégio se deu porque, inicialmente, a estrutura do prédio havia sido projetada com o intuito final de funcionar como edifício comercial. No entanto, mais tarde, a estrutura viria a ser utilizada como um colégio.

Dessa forma, ao adaptar a estrutura para adequá-la aos requisitos de um colégio, foi necessária a instalação de novos dutos de ar condicionado e de novas tubulações de energia elétrica. Assim, para possibilitar a passagem desses novos dutos e tubulações, foram executados furos circulares nas lajes, conforme apresentado a Figura 12 abaixo.

Figura 12 - Furos circulares executados com auxílio de serra copo na laje



Fonte: Dados da pesquisa.²

Para então reforçar a laje, foram aplicadas mantas de fibra de carbono, ver Figura 13, tanto na face superior, quanto na face inferior da laje.

Figura 13 - Aplicação da fibra de carbono



Fonte: Dados da pesquisa.

² Figura 12, 13, 14,15, 16, 17,18 e 19 disponibilizada pelo engenheiro civil e diretor comercial Marcelo Mendes na empresa Statera Engenharia no primeiro semestre de 2019.

Os motivos que levaram à escolha da fibra de carbono foram a rapidez e facilidade de execução, estética e conforto visual. Sua aplicação foi simples e rápida.

A maior dificuldade foi apenas a necessidade de quebrar o contrapiso, vide Figura 14, para que a manta de fibra de carbono fosse aplicada diretamente em contato com o concreto armado.

Figura 14 - Aplicação da fibra de carbono



Fonte: Dados da pesquisa.

6.3 Edifício residencial

Foi elaborado o projeto de reforço de concreto armado com aplicação de fibras de carbono em um prédio residencial, na cidade de Belo Horizonte.

O apartamento apresentava, inicialmente, laje comum em concreto armado com determinadas cargas solicitantes de projeto.

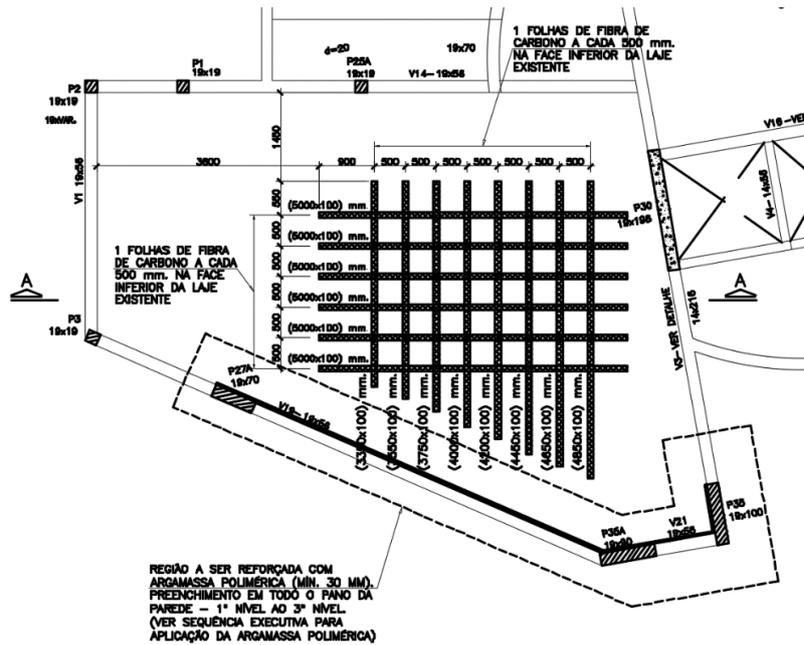
Posteriormente, por vontade da residente do local, veio a ser instalado um telhado verde. A laje então serviria de apoio para o telhado verde e conseqüentemente sofreria um aumento das suas cargas solicitantes. Conseqüentemente, as cargas solicitantes nas vigas existentes também seriam aumentadas.

Dessa forma, houve a necessidade de reforçar tanto as vigas quanto a laje do

edifício residencial e a aplicação das mantas de fibras de carbono foi escolhida para este caso.

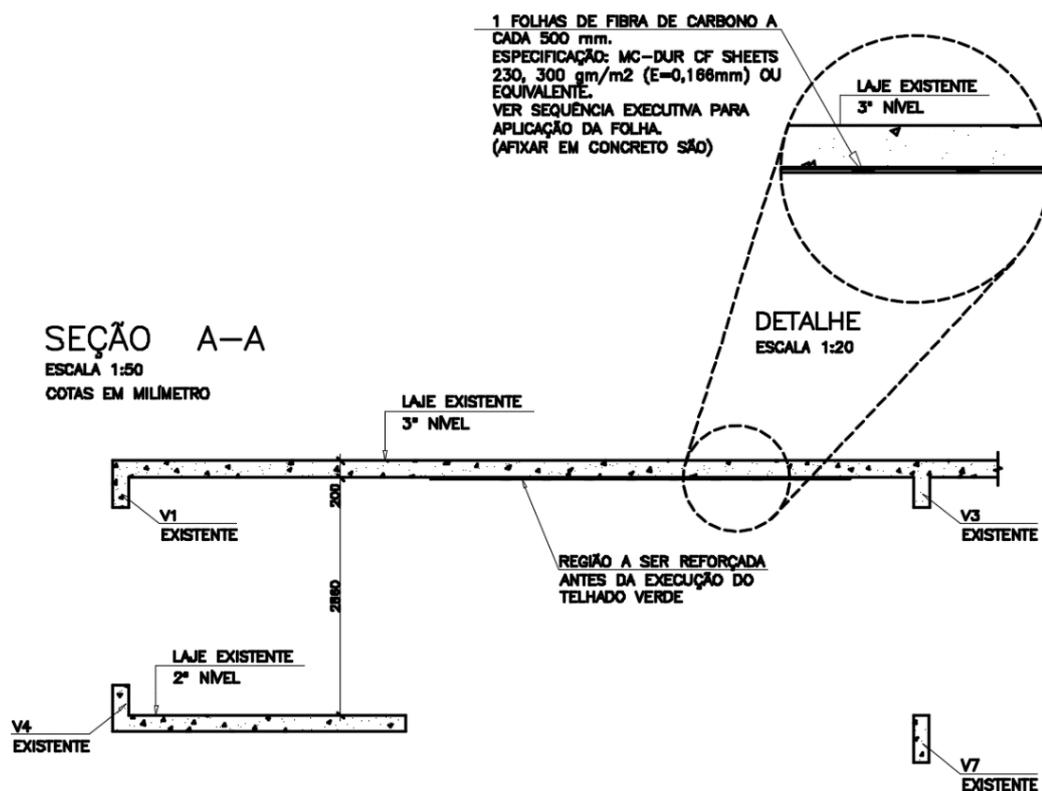
Os reforços aplicados na laje do pavimento foram projetados em tiras entrelaçadas a cada 500 mm, conforme mostrado na Figura 15 e Figura 16, e aplicados na superfície inferior da laje.

Figura 15 - Detalhe de projeto



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 16 - Detalhe de projeto



Fonte: Dados da pesquisa.

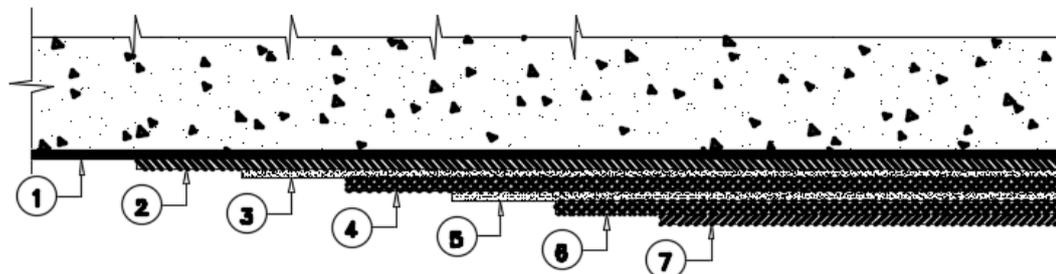
As vigas foram reforçadas em formato “U”, em modo de confinamento, e que a especificação indica três camadas de fibra de carbono a cada 300 mm.

A seqüência executiva para aplicação das folhas de fibra de carbono chamadas nas notas acima são apresentadas na Figura 17.

Figura 17 - Sequência executiva de projeto

**SEQUÊNCIA EXECUTIVA PARA
APLICAÇÃO DA FOLHA DE CARBONO:**

- ① **IMPRIMAÇÃO DA SUPERFÍCIE TRATADA DO CONCRETO COM RESINA DE IMPREGNAÇÃO;**
- ② **REGULARIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE COM ARGAMASSA DE NIVELAMENTO (TIPO PUTTY), PARA CORREÇÃO DE PEQUENAS IMPERFEIÇÕES SUPERFICIAIS, SE NECESSÁRIO;**
- ③ **SATURAÇÃO, COM A UTILIZAÇÃO DE ADESIVO EPOXY;**
- ④ **APLICAÇÃO DA FOLHA DE FIBRA DE CARBONO, (300 g.), COM A LARGURA E O POSICIONAMENTO INDICADO NO PROJETO;**
- ⑤ **SEGUNDA CAMADA DE SATURAÇÃO COM A UTILIZAÇÃO DE ADESIVO EPOXY. REPETIR ESTA OPERAÇÃO ANTES DE COLOCAR A SEGUNDA FOLHA DE FIBRA DE CARBONO;**
- ⑥ **APLICAÇÃO DA SEGUNDA FOLHA DE FIBRA DE CARBONO, (300 g.), COM A LARGURA E O POSICIONAMENTO INDICADO NO PROJETO;**
- ⑦ **REPETIR PROCEDIMENTOS 5 E 6 PARA TERCEIRA FOLHA DE FIBRA DE CARBONO.**
- ⑦ **PINTURA DE ACABAMENTO BASE ACRÍLICA.**



Fonte: Dados da pesquisa.

6.4 Supermercado Verdemar

Outra obra com a utilização de reforço com o compósito de fibra de carbono ocorreu no Supermercado Verdemar no Shopping Pátio Savassi, em Belo Horizonte, MG.

O projeto da obra foi feito pela empresa Aloizio D'Avila, de São Paulo. Porém, a execução da obra ficou por responsabilidade de Gabriel Nogueira, funcionário da empresa GN2 Engenharia, de Belo Horizonte, MG. Em entrevista realizada por integrante do grupo com Gabriel Nogueira, foram obtidas as seguintes informações: o serviço foi feito devido à necessidade de reforçar a laje, uma vez que foram

executados furos que não estavam previstos no projeto inicial da implantação do Supermercado. Assim, foram feitos reforços com fibra de carbono nas bordas das aberturas, conforme Figura 18.

Figura 18 - Reforço aplicado ao redor dos furos



Fonte: Dados da pesquisa.

Segundo Nogueira, as opções de reforço resumiram-se em duas: reforço com chapa de aço ou com fibra de carbono. Porém, devido à agressividade do ambiente, pois a estrutura é laje de teto do estacionamento do Shopping, a chapa de aço sofreria corrosão. Em alguns furos também seria difícil o acesso da chapa, devido às tubulações instaladas (ver Figura 19) próximo ao local do reforço. Portanto, o reforço escolhido foi o sistema composto de fibra de carbono.

Figura 19 - Tubulações instaladas próximo ao local do reforço



Fonte: Dados da pesquisa.

Além da maior facilidade de aplicação e da maior durabilidade da fibra em relação ao aço, outras vantagens citadas por Nogueira que levaram à escolha da fibra de carbono foram a velocidade de execução e o fator estético.

Por tratar-se de uma obra executada em um Shopping, com muita movimentação de pessoas, algumas restrições foram impostas para o maior conforto dos frequentadores do Supermercado. Questões como barulho excessivo e geração de poeira devido ao lixamento das paredes culminaram por prolongar o tempo de execução da obra, que foi totalmente executada em 20 dias.

7 ESTUDO DE CASO – VIADUTO SANTA TEREZA

7.1 Histórico do Viaduto

Na América Latina, a primeira estrutura de concreto armado reforçada com fibra de carbono foi o Viaduto Artur Bernardes, popularmente conhecido como Viaduto Santa Tereza, localizado em Belo Horizonte, Minas Gerais (BEBER, 2003).

O Viaduto Santa Tereza, Figura 20, corresponde a um dos mais importantes símbolos arquitetônicos de Belo Horizonte. A estrutura tem destaque no sistema viário local e regional, permitindo intenso fluxo de pedestres e veículos e abrigando um dos maiores centros culturais da cidade (CASTRO; OLIVEIRA, 1999). Projetado pelo engenheiro Emílio Baumgart em 1926 e inaugurado em 1929, sua construção foi uma das pioneiras em concreto armado no Brasil e foi concebida com a finalidade de interligar os bairros Floresta e Santa Tereza, região Leste, ao centro de Belo Horizonte.

Figura 20 - Viaduto Santa Tereza



Fonte: (OLIVEIRA, 2019, p.1).

A construção do Viaduto solucionou os desastres quase diários que ocorriam entre as linhas da Estrada de Ferro Central do Brasil e o bairro Floresta. O local contava com um fluxo de aproximadamente 2.000 veículos por dia, o que, na época, já gerava um conflito entre o tráfego dos automóveis e o serviço dos trens da ferrovia (O MAIOR..., 1928). A obra apresenta 400 metros de extensão, 13 metros de largura e um arco parabólico de 14 metros de altura que vence um vão de 56 metros. Além

do arco, a obra conta com outros 17 vãos de aproximadamente 20 metros.

Após a inauguração, em setembro de 1929, as revistas de arquitetura da época elogiaram os responsáveis pela construção do maior vão de concreto armado da América do Sul. O viaduto foi considerado uma obra grandiosa, que revolucionou a arquitetura usual da década de 20 e que marcou a paisagem urbana de Belo Horizonte, representando a evolução e o crescimento da até então jovem capital mineira. (GOUTHIER, 1990).

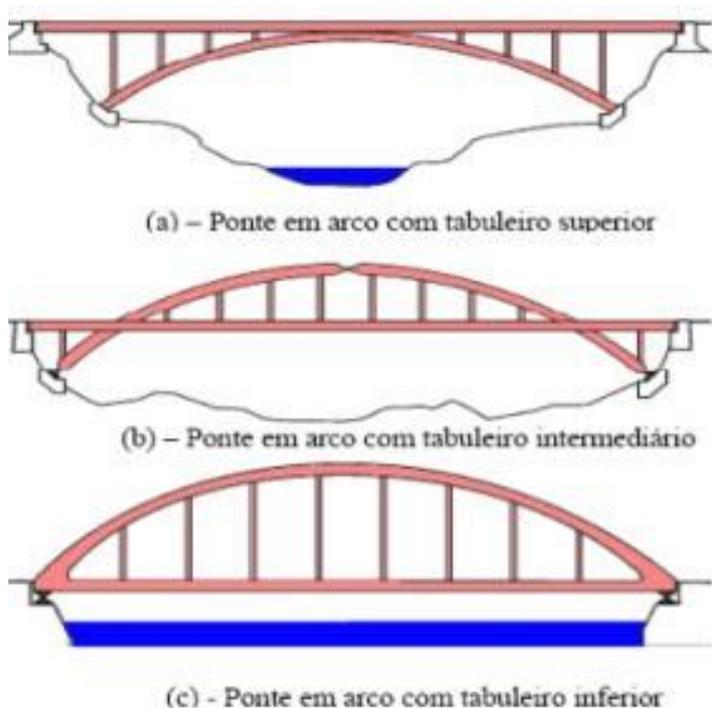
Em março de 1988, o Viaduto Santa Tereza foi tombado pelo Instituto Estadual do Patrimônio Histórico e Artístico (Iepha-MG), como parte integrante do conjunto arquitetônico da Praça Rui Barbosa (MACHADO, 2004).

7.2 Modelo estrutural

Pontes são estruturas sujeitas a ação de cargas móveis, com posicionamento variável, que tem como objetivo transpor obstáculos naturais como rio, vale, mar e córrego (NBR 7188:2013). Quando a estrutura é construída visando transpor obstáculos artificiais, como avenidas ou rodovias, é denominada Viaduto (NBR 7188:2013).

As pontes são classificadas de acordo com o sistema estrutural a qual foram projetadas. Podem ser em treliça, pênsil, estaiada, viga de alma cheia, em laje ou arco³. O sistema estrutural do Viaduto Santa Tereza é em arco. O arco corresponde a uma estrutura estável com capacidade de vencer grandes vãos. Tal característica está relacionada à sua geometria, que faz com que a estrutura seja submetida majoritariamente a esforços de compressão (NUNES, 2009). Pelo fato do viaduto Santa Tereza apresentar tabuleiro inferior (ver Figura 21), a transferência de cargas do tabuleiro para arco é realizada por pendurais (SILVA, 2019).

³ Apostila utilizada na aula do Prof. Dr. Euler de Oliveira Guerra da disciplina Pontes, do curso de bacharelado em Engenharia Civil ofertada pela PUC Minas, lecionada no segundo semestre de 2019.

Figura 21 - Tabuleiros de pontes

(a) – Ponte em arco com tabuleiro superior

(b) – Ponte em arco com tabuleiro intermediário

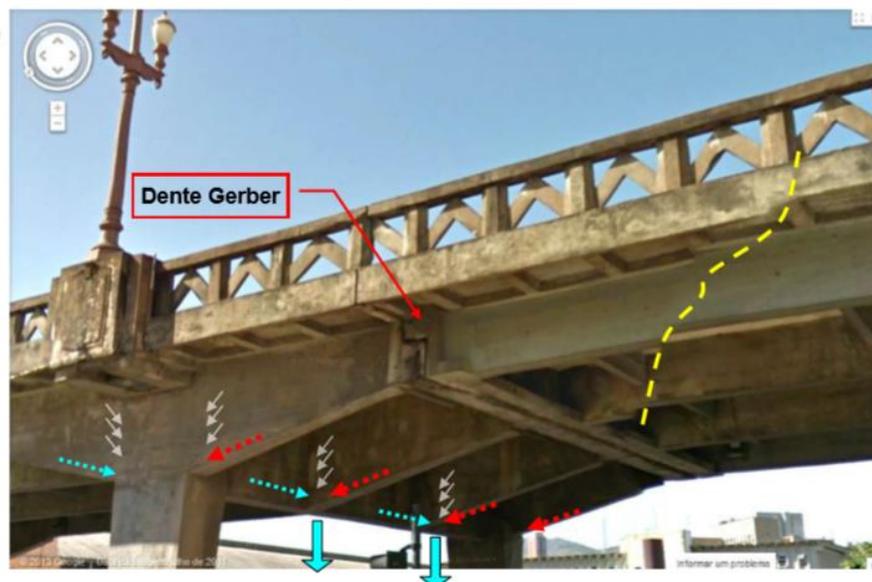
(c) - Ponte em arco com tabuleiro inferior

Fonte: Leme (2019).

No Viaduto Santa Tereza, vários tabuleiros são ligados aos apoios através de Dentes *Gerber* (ver Figura 22). Duas cargas verticais são aplicadas no fundo da travessa, trazidas pelos banzos comprimidos inclinados das longarinas (THOMAZ, 2015).

Seguindo a normatização alemã, em 1928, a estrutura foi calculada para resistir a cargas de trem tipo de 24 toneladas. Naquela época, para dimensionar os estribos e os ferros dobrados, era usado a treliça de *Mörsch* original, com diagonais a 45° e sem qualquer redução na armadura de cisalhamento (estribos + ferros dobrados). Para a fundação do viaduto, as estacas foram cravadas com 6 m a 14 m de profundidade (THOMAZ, 2015).

Figura 22 - Dente Gerber e cargas verticais do Viaduto Santa Tereza



Fonte: (THOMAZ, 2015).

O grupo modernista carioca, formado por Lúcio Costa, Oscar Niemeyer, Alcides da Rocha Miranda e outros, que atuou em conjunto com Baumgart, teve preocupação não só com a estrutura, como também com a estética do viaduto. Neste predominam linhas de composição decisivamente geométricas. Com ideias influenciadas pelo neoplasticismo e pelo art-déco, as formas geométricas na composição de guarda-corpos e o revestimento em argamassa em tom de concreto foram tendências adotadas na arquitetura da década de 30 (APCBH, 1999).

Outro fato importante, considerando a construção do Viaduto Santa Tereza, é que antes mesmo de sua conclusão existiram polêmicas e críticas a respeito de defeitos de ordem técnica, como altura excessiva e rumo errado (GOUTHIER, 1992). Porém, após sua conclusão, embora o enorme declive imposto à Rua da Bahia desse causa a suposição e novos erros, as críticas tiveram fim (GOUTHIER, 1992).

Somando o pioneirismo e a rusticidade das obras em concreto armado com a preocupação estética de uma estrutura com maior qualidade plástica, ainda hoje o Viaduto Santa Tereza é considerado uma das mais importantes obras de arte de engenharia em área urbana do Estado de Minas Gerais (APCBH,1999).

7.3 Obra de intervenção estrutural com emprego da fibra de carbono

Desde a sua inauguração, em 1929, o Viaduto Santa Tereza passou por inúmeros processos de intervenção, devido, principalmente, à falta de monitoramento

e manutenção da estrutura ao decorrer do seu processo de degradação natural. Entretanto, a intervenção de maior impacto foi o reforço estrutural com uso da fibra de carbono, realizado em 1998 (MACHADO, 2019).

O Viaduto Santa Tereza foi projetado conforme as cargas aplicáveis na época do projeto, em 1926. No final do século XX, embora já tivesse sofrido mais de 30 intervenções, o desenvolvimento das indústrias, crescimento econômico e social levaram ao aumento das solicitações e o Viaduto começou a apresentar sinais de insuficiência.

Em 1985 foi realizada uma reparação parcial da estrutura do viaduto, mas ao longo do tempo viam-se luminárias quebradas, pichações, estruturas de guarda-corpos quebradas e danos estruturais como:

- a) as juntas de dilatação apresentavam rompimentos permitindo a infiltração de águas pluviais e acarretando deterioração do concreto (APCBH, 1999);
- b) a pista de rolamento estava com o concreto da sobre-laje desagregado e solto e o concreto asfáltico fissurado e rompido, permitindo a infiltração de umidade para a estrutura, causando oxidação (APCBH, 1999);
- c) o concreto dos guarda-corpos e das pilastras de sustentação das luminárias ornamentais estava solto e deteriorado, com armaduras expostas e oxidadas, devido à falta de recobrimento adequado (APCBH, 1999);
- d) as bases dos quatro pilares junto ao Ribeirão Arrudas estavam com o concreto deteriorado e as armaduras oxidadas (APCBH, 1999);
- e) as fissuras transversais na pista do Viaduto podiam ser observadas através do capeamento asfáltico (APCBH, 1999);
- f) havia ausências de proteção adequada de toda a superfície do Viaduto (APCBH,1999);

Por se tratar de parte integrante do conjunto arquitetônico da Praça Rui Barbosa, tombado pelo Instituto Estadual do Patrimônio Histórico e Artístico (Iepha-MG), qualquer intervenção realizada no Viaduto deveria trazer o menor impacto possível.

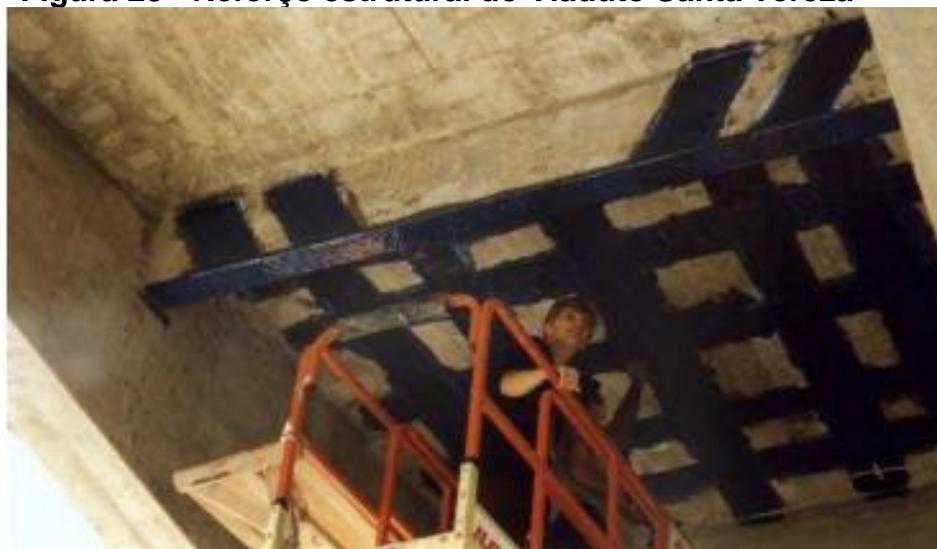
Em entrevista cedida pelo engenheiro Ari de Paula Machado, responsável pelo

projeto de reforço estrutural do Viaduto⁴, mediante a necessidade apresentada pela estrutura, surgiu a ideia de tornar o Viaduto apenas uma passarela para pedestres, reduzindo assim suas cargas atuantes e gerando o menor impacto cabível. Mas pela importância da obra para a logística da cidade de Belo Horizonte, o lepha permitiu que o reforço fosse realizado garantindo que as dimensões do Viaduto não fossem acrescidas além de 8 mm.

Diante desse desafio para a engenharia, optou-se pela inovação da fibra de carbono, visto que o modelo tradicional de reforço com chapas de aço não atenderia a limitação imposta para o patrimônio histórico.

Assim, em 1998, foi realizada a reforma do reforço estrutural com uso da fibra de carbono, conforme Figura 23. O Viaduto teve suas lajes e vigas reforçadas com a fibra, resultando num acréscimo das dimensões máximo de 1,5 mm em relação ao original, mantendo os padrões exigidos pelo Instituto Estadual do Patrimônio Histórico e Artístico de Minas Gerais, com estética conveniente (MACHADO, 2019).

Figura 23 - Reforço estrutural do Viaduto Santa Tereza



Fonte: (CURTY, 2009).

⁴ Informações coletadas a partir de uma entrevista concedida às integrantes do grupo pelo Professor Ari de Paula Machado, engenheiro responsável pelo projeto da obra pioneira, da América Latina, em reforço estrutural com fibra de carbono do Viaduto Santa Tereza.

8 CONCLUSÃO

Muitas das estruturas de concreto armado existentes nos dias de hoje apresentam modificações e alterações em relação ao seu projeto original, no objetivo de se adequarem à necessidade de uma sociedade em constante mudança. Em muitos desses casos, os compósitos de fibra de carbono têm sido cada vez mais utilizados a fim de reforçar e recompor essas estruturas, como demonstrado em indústria, shopping, colégio, residência e viaduto.

Os compósitos apresentam grande variedade de características que permitem que eles possam ser ajustados conforme a necessidade de reforço da estrutura de concreto armado. Na sua utilização têm sido notadas, inclusive, grandes vantagens e excelente custo-benefício.

Além desses benefícios, o custo de sua produção e aplicação tende a diminuir à medida que fornecedores e empresas entram nesse mercado, à medida que são elaborados estudos que possibilitam que suas características sejam mais amplamente conhecidas e avaliadas e à medida que engenheiros calculistas passam a ter domínio sobre o assunto e a considerar o compósito como opção viável para reforçar uma estrutura.

Dessa forma, este estudo conclui seu objetivo de expandir e difundir o entendimento dos reforços de concreto armado executados por meio de compósitos de fibra de carbono, analisando as minúcias do Viaduto Santa Tereza, e suas peculiaridades inerentes ao reforço demandado.

Para trabalhos futuros tem-se como sugestão a inserção de uma frente disciplinar que abranja os tipos diversos de reforço estrutural e a montagem de um protótipo de concreto armado com manta de fibra de carbono para testes de resistência da mesma.

REFERÊNCIAS

AGOPYAN, V. **O emprego de materiais fibrosos na construção civil**. In: Simpósio Internacional sobre Materiais Reforçados com Fibras para Construção Civil. In: SIMPOSIO INTERNACIONAL SOBRE MATERIAIS REFORÇADOS COM FIBRAS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL, 1993. São Paulo, **Anais [...]**, São Paulo: EPUSP, 1993. p. 11-25.

ALVIM, Afia. Viaduto Santa Tereza: um marco na arquitetura e na memória de BH. [S.l.]: Literalmente UAI, dez. 2017. Disponível em: <https://www.literalmenteuai.com.br/viaduto-santa-tereza-um-marco/>. Acesso em 7 abr. 2019.

ARQUIVO PÚBLICO DA CIDADE DE BELO HORIZONTE. **Viaduto Santa Tereza**. Belo Horizonte: APCBH, 1999 . Acesso em: 10 set. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10520**: Informação e documentação: citações em documentos: apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14931**: Execução de estruturas de concreto: Procedimentos, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: Informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7188**: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Fundamentos do concreto armado**. Bauru: UNESP, 2006.

BEBER, Andriei José. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/2974>. Acesso em: 14 abr. 2019.

BRONZE, Ricardo Alves. Estudo comparativo: uso do sistema de fibras de carbono e sistema convencional para reforço de estruturas de concreto. 2016. Projeto (Trabalho de conclusão de curso) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

CAIRES, Ana Júlia. **Viaduto Santa Tereza**: conheça um dos símbolos de BH. Belo Horizonte: Hometeka, 2015. Disponível em: <https://www.hometeka.com.br/f5/viaduto-santa-tereza-conheca-um-dos-simbolos-de-bh/>. Acesso em: 14 abr. 2019.

CALLISTER JÚNIOR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 5.

ed. Rio de Janeiro: Grupo Gen-LTC, 2002.

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e terapia do concreto armado**. São Paulo: Pini, 1998.

CASTRO, Célio; OLIVEIRA, Wagner Caetano Alves de. **Viaduto Santa Tereza**. Belo Horizonte: Prefeitura de Belo Horizonte, 1999.

CURTY, Larissa Azevedo. **Estudo experimental dos consoles curtos de concreto armado reforçados com compósitos de fibras de carbono**. 2009. (Dissertação de Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/32821/32821_1.PDF. Acesso em: 19 mar. 2019.

FERRARI, V.; PADARATZ, I.; LORIGGIO, D. Reforço à flexão de vigas de concreto armado com manta de fibra de carbono: mecanismos de incremento de ancoragem. **Acta Scientiarum Maringá**, v. 24, n. 6, p. 1783-1791, 2002.

FORTES, Adriano Silva. **Vigas de concreto armado reforçadas com fibras de carbono**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/78159>. Acesso em 27 abr. 2019.

GALLI, Cecilia Antunes. **Caracterização das propriedades mecânicas de compósitos de matriz de epóxi com fibras de carbono unidirecionais**. 2016. Projeto de pesquisa – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2016. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10016041.pdf>. Acesso em: 24 maio 2019.

GAMA, Daniel Pereira Nunes. **Análise das propriedades de tensão e flexão de compósitos sanduíche**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017. Disponível em: <http://www.mec.uff.br/pdftheses/DanielPereiraNunesGama2017.pdf>. Acesso em: 27 abr. 2019.

GARCEZ, Mônica Regina. **Alternativas para melhoria no desempenho de estruturas de concreto armado reforçadas pela colagem de polímeros reforçados com fibras**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/10593>. Acesso em: 27 abr. 2019.

GOUTHIER, Juliana. Descobrindo a cidade. **Estado de Minas**, Belo Horizonte, ano 62, 11 dez. 1990. Editoria de cidade.

GOUTHIER, Juliana. Um viaduto polêmico antes da inauguração. **Estado de Minas**, Belo Horizonte, 11 dez. 1992. Descobrindo a Cidade.

HELENE, P.; ANDRADE T. Concreto de cimento Portland. In: ISAIA, G. C.(Ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2 v., v.2, p. 905-944. 2007.

HENSHER, David A. **Fiber-reinforced-plastic (FRP) reinforcement for concrete structures: properties and applications**. Amsterdam: Elsevier, 2016. Disponível em: http://ibracon.org.br/Site_revista/Concreto_Construcoes/revista-interna_68.php. Acesso em: 12 maio. 2019.

KARBHARI, V.M.; ZHAO, L. Use of composites for 21st century civil infrastructure. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, Amsterdam, v.185, n.2/4, p.433-454, May 2000.

KIELING, Antônio Claudio; SANTANA, Genilson Pereira; SANTOS, Maria Cristina dos. Compósitos de madeira plástica: considerações gerais. **Scientia Amazônia**, Manaus, v.8, n.1, p. 1-14, 2019. Disponível em: <http://scientia-amazonia.org/>. Acesso em: 27 abr. 2019.

LAPA, José Silva. **Patologia, recuperação e reparo das estruturas de concreto**. 2008. Monografia (Especialização em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2008. Disponível em: <http://www.cecc.eng.ufmg.br/trabalhos/pg1/Patologia,%20Recupera%E7%E3o%20e%20Reparo%20das%20Estruturas%20de%20Concreto.pdf>. Acesso em> 12 maio 2019.

LEBRÃO, Guilherme Wolf. Fibra de Carbono. **Revista Plástico Sul**, 2008. Disponível em: <https://maua.br/files/artigos/artigo-fibra-de-carbono-prof.-guilherme.pdf>. Acesso em: 3 abr. 2019.

LEME, Matheus G. L. **Pontes em Arco**. [S.l.]: Leme Ribas Engenharia e Arquitetura, 2008. Disponível em: lemeribas.blogspot.com/2008/04/as-estruturas-em-arco-permitem-o.html. Acesso em 24 out. 2019.

MACHADO, A. de P. **Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibras de carbono**. Belo Horizonte: Viapol, 2002. Disponível em: <http://www.viapol.com.br/media/97576/manual-fibra-de-carbono.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2019.

MACHADO, Ari de Paula. **Fibras de carbono: manual prático de dimensionamento**. Belo Horizonte: MBrace, 2006.

MACHADO, Marcélia Gomes. **Estudo experimental da ductilidade de vigas em concreto armado reforçadas à flexão utilizando compósitos com tecido de fibras de carbono**. 2004. Dissertação (Mestrado em Estruturas em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: Disponível em:

<https://www.redalyc.org/html/470/47016116/>. Acesso em: 2 mar. 2019.

MARCHETTI, Osvaldemar. **Pontes de concreto armado**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2018.

MEDEIROS, H.F. Marcelo *et al.* O compósito que deu certo: Concreto + aço = Concreto Armado. **Concreto & Construções**, São Paulo, ano 40, n.68, p. 98-74, out. /nov./dez. 2012. Disponível em: http://ibracon.org.br/Site_revista/Concreto_Construcoes/revista-interna_68.php. Acesso em: 12 maio. 2019.

MEIER, U. Strenghtning of structures using carbonfibre/epoxy composites. **Construtionand Building Materials**, v.9, n.6, p.341-355, 1995.

MENEGHETTI, Leila Cristina; SILVA FILHO, Luiz Carlos Pinto da; GARCEZ, Mônica Regina. Verificação da possibilidade de variação das fibras formadoras do compósito nos sistemas prf aplicados no reforço à flexão de vigas de concreto armado. **Ciência & Engenharia**, v. 16, n.1/2, p. 107 - 114, jan. /dez. 2007. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/cieng/article/view/660>. Acesso em: 27 abr. 2019.

NUNES, Patrícia C. C. **Teoria do Arco de Alvenaria: uma perspectiva histórica**. 2009. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/4465>. Acesso em: 24 out. 2019.

OLIVEIRA, Daniel Ferreira. **Levantamento de causas de patologias na construção civil**. 2013. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10007893.pdf>. Acesso em: 12 maio. 2019.

OLIVEIRA, Natália. Após Carnaval, vândalos jogam pedras em carro da PM no viaduto Santa Tereza. **Super Notícia**, Belo Horizonte, ano 19, 6 mar. 2019. Disponível em: <https://www.otempo.com.br/diversao/carnaval-2019/apos-carnaval-vandalos-jogam-pedras-em-carro-da-pm-no-viaduto-santa-tereza-1.2145798>. Acesso em: 13 out. 2019.

O MAIOR viaducto de cimento armado. **Gazeta de Notícias**, Rio de Janeiro, 15 setembro 1928. Disponível em: <http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/baumgart/baumgart01.pdf>. Acesso em: 29 set. 2019.

PAIVA, J. M. F. *et al.* Avaliação da temperatura de transição vítrea de compósitos poliméricos reparados de uso aeronáutico. **Polímeros: ciência e tecnologia**, São Carlos, v.16, n.1, p. 79-87, jan./mar. 2006. Disponível em: <https://www.redalyc.org/html/470/47016116/>. Acesso em: 27 abr. 2019.

SABINO, Fernando. **O encontro marcado**. 92. ed. Rio de Janeiro: Record, 2011.

SALLABERY, Roberta Dutra. **Limite de deformação das fibras de carbono usadas no reforço à flexão de vigas de concreto armado**. 2005. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

SANTIAGO, M. Olivares; MARÍN, C. Galán; FERNÁNDEZ, J. Roa. Los composites: características y aplicaciones en la edificación. **Informes de la Construcción**, Sevilla, v.54, n.484, 2003. Disponível em: <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/56827>. Acesso em: 27 abr. 2019.

SILVA, Marcos L. A. da. Vídeo aula: Pontes e grandes estruturas. CP01: conceitos gerais. In: SILVA, Marcos L. A. da. **UNIP**. São Paulo: Slide Player, 2019. Disponível em: <https://slideplayer.com.br/slide/10220581/>. Acesso em: 24 out. 2019.

SOUZA, V.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998.

SOUSA, Gonçalo N. A. C. de. **Estudo do comportamento estrutural de uma ponte em arco**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012.

SUDANO, Alexandre Luis. **Influência da forma da seção transversal no confinamento de pilares de concreto armado encamisados com PRFC (polímero reforçado com fibra de carbono)**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. / Disponível em: <http://livros01.livrosgratis.com.br/cp002582.pdf>. Acesso em: 12 maio 2019.

THOMAZ, Eduardo C. S. Notas de Aula: “**A técnica do concreto armado e Emílio Baumgart**”: artigo do Prof. Eng. Arthur Eugenio Jermann – 1944.[S.l.]: aquarius, 2015. Disponível em: http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/baumgart/baumgart_ponte_garcas.pdf. Acesso em: 24 out. 2019.

VANI, Giovani Carlos. **Avaliação das propriedades mecânicas de compósitos obtidos pelos processos de laminação contínua e pultrusão**. 2014. Dissertação (Mestrado em Projeto e Processos de Fabricação) – Programa de Pós-Graduação em Projeto e Processos de Fabricação, Universidade de Passo Fundo, Rio Grande do Sul, 2014. Disponível em: <http://tede.upf.br/jspui/handle/tede/382>. Acesso em: 20 maio 2019.

VIADUTO de Santa Tereza. **Hoje em dia**, Belo Horizonte, ano 9, 21 abr. 1997. BH 100 anos.

VILLA, Alisson. Poetas alpinistas. **Revista Revestrés**, Belo Horizonte, 2016.

Disponível em: <http://www.revistarevestres.com.br/reves/cultura/poetas-alpinistas/>. Acesso em: 27 abr. 2019.

ZANGIACOMI, Marco Henrique; BITTENCOURT, Edison. Compósitos reforçados com fibras de PANox e fibras de aramida. **RECIE**, Uberlândia, v.15, n. 1/2, p. 55-61, jan. /dez. 2006. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/cieng/article/view/530/490>. Acesso em: 27 abr. 2019.