



**FUNDAÇÃO PRESIDENTE ANTÔNIO CARLOS - FUPAC  
FACULDADE PRESIDENTE ANTÔNIO CARLOS DE UBÁ  
ENGENHARIA CIVIL**

**TARINE CUSTÓDIO DA SILVA**

**SISTEMAS COMPOSTOS DE FIBRAS DE CARBONO COMO REFORÇO  
ESTRUTURAL EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**

**UBÁ/MG  
2021**

**TARINE CUSTÓDIO DA SILVA**

**SISTEMAS COMPOSTOS DE FIBRAS DE CARBONO COMO REFORÇO  
ESTRUTURAL EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Civil, da Faculdade Presidente Antônio Carlos de Ubá como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Dr<sup>a</sup> Erika Maria Carvalho Silva  
Gravina

**UBÁ/MG  
2021**

## RESUMO

Um dos materiais mais utilizados na construção civil é o concreto armado. Contudo, as estruturas de concreto armado possuem durabilidade limitada, podendo apresentar diversas manifestações patológicas ao longo do tempo derivadas de uma série de fatores, entre eles, erros de projeto, má execução, mudança de utilização e falta de manutenção. Como forma de recuperar a capacidade resistente de uma estrutura de concreto armado compensando essas mudanças, utiliza-se o reforço estrutural. Esse trabalho tem como objetivo apresentar um estudo acerca dos métodos de reforços em estruturas de concreto armado utilizando sistemas compostos de fibras de carbono. Dentre os vários métodos de reforço, a utilização dos sistemas compostos de fibras de carbono tem ganhado espaço na construção civil por possuir elevada resistência mecânica, dentre outras vantagens. Este sistema é formado através da junção da fibra de carbono com a matriz polimérica. A matriz polimérica tem a função de dar coesão às fibras e transferir as tensões cisalhantes, entre os elementos estruturais e a fibra de carbono, que absorve as tensões de tração geradas pelos esforços solicitantes que não são absorvidas pelo elemento de concreto armado. Diante do exposto, concluiu-se que a recuperação e /ou reforço com fibras de carbono é um método eficiente e adequado tanto para obras de pequeno porte quanto para grandes obras, exigindo a definição de parâmetros rigorosos e análises que descrevam com fidelidade os fenômenos que atuarão nas construções.

**Palavras-chave:** Reforço estrutural. Fibra de carbono. Compósito de fibra de carbono.

## ABSTRACT

One of the most used materials in civil construction is reinforced concrete. However, reinforced concrete structures have limited durability and may present various pathological manifestations over time, derived from a series of factors, including design errors, poor execution, change in use and lack of maintenance. As a way to recover the resistant capacity of a reinforced concrete structure, compensating for these changes, structural reinforcement is used. This work aims to present a study about reinforcement methods in reinforced concrete structures using carbon fiber composite systems. Among the various reinforcement methods, the use of systems composed of carbon fibers has gained ground in civil construction due to its high mechanical resistance, among other advantages. This system is formed by joining the carbon fiber with the polymer matrix. The polymer matrix has the function of giving cohesion to the fibers and transferring the shear stresses between the structural elements and the carbon fiber, which absorbs the tensile stresses generated by the loads that are not absorbed by the reinforced concrete element. Given the above, it was concluded that the recovery and/or reinforcement with carbon fibers is an efficient and suitable method for both small and large works, requiring the definition of strict parameters and analyzes that faithfully describe the phenomena that will act in the constructions.

**Keywords:** Structural reinforcement. Carbon fiber. Carbon fiber composite.

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto armado foi consolidado como um dos mais importantes materiais da engenharia estrutural no século XX. Seu processo construtivo é composto por três etapas: a montagem das formas e armaduras, depois o lançamento do concreto, e finalizando, o processo de cura. A dosagem correta do concreto de acordo com o formato e a função de cada parte da estrutura é muito importante, busca-se sempre um ponto ideal nas proporções de modo a garantir graus concomitantes e aceitáveis de trabalhabilidade e resistência. O amplo uso do concreto é explicado, sobretudo pelos reduzidos custos de produção, além da facilidade com a qual elementos estruturais de concreto podem ser obtidos através de uma variedade de formas e tamanhos, tendo em vista a consistência plástica em seu estado fresco.

No entanto, falhas na execução do processo construtivo resultam em queda de qualidade das estruturas de concreto armado, resultando nas chamadas patologias, interferindo na vida útil deste. As patologias são defeitos que ocorrem em alguma etapa da execução dos elementos estruturais. Pode-se também definir como causas de patologias, nas edificações, alguma falha ocorrida em uma das etapas do processo construtivo: planejamento, projeto executivo, fabricação fora do canteiro, execução e uso. Os tipos de patologias mais comuns em estruturas de concreto armado são as fissuras ou trincas, corrosão das armaduras, degradação e eflorescência.

Considerando que a ocorrência destas patologias interfere na vida útil do concreto armado torna-se necessário o reparo da mesma através do reforço, que tem como principal finalidade a restauração da segurança e garantia de durabilidade. A recuperação e reforço das estruturas constituem um forte segmento da indústria da construção civil para atender a necessidade de restabelecer as condições originais e promover adequações, aumentando a resistência da capa resistente das estruturas danificadas.

Nos últimos anos os sistemas compostos de fibra de carbono têm sido muito utilizados como reforço no reparo de estruturas de concreto armado devido sua alta resistência, baixo peso, facilidade no manuseio, reduzindo assim o tempo de trabalho. Dentre as características e vantagens desse reforço, a norma americana *American Concrete Institute* (ACI-440) cita alta resistência longitudinal à tração, resistência à corrosão, antimagnetismo, alta resistência à fadiga (varia com o tipo de fibra) e leveza (cerca de 1/4 a 1/5 da densidade do aço). Além, de possuir rápida aplicação comparada aos demais métodos e não gerar resíduos e entulhos após sua aplicação.

Esse trabalho tem como objetivo apresentar um estudo dos métodos de reforços em

estruturas de concreto armado utilizando sistemas compostos de fibras de carbono.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Concreto armado

O concreto armado é resultado da associação do concreto simples (que é uma mistura feita de agregados miúdos e graúdos, cimento, água e aditivos) com uma armadura passiva (barras de aço), onde esta só trabalha se houver solicitação, sendo que ambos resistem solidariamente aos esforços submetidos pela peça. A aderência concreto/aço garante esta ação conjunta, não ocorrendo deslizamento ou escorregamento relativo no momento em que for solicitado, garantindo o comportamento monolítico (CLÍMACO, 2008).

Inventado na Europa em meados do século XIX o concreto armado foi introduzido como um processo construtivo que foi bastante difundido, pois propiciou grandes construções, vencendo grandes vãos e alcançando alturas nunca previstas. O concreto, por ser um material de fácil modelagem e poder assumir variadas formas, começou a ser usado em grande quantidade (GONÇALVES, 2015).

Segundo Benevolo (1976 *apud* GONÇALVES, 2015) o concreto armado foi empregado de forma inicial apenas em embarcações e tubulações hidráulicas, a partir do fim do século XIX sua utilização passa a ser empregada também nas edificações. Em junção ao aço e o vidro, formaram os denominados “novos materiais” da arquitetura moderna, confeccionados em escala industrial e possibilitando a construção de arranha-céus, pontes, silos, estações ferroviárias ou, em suma, aqueles novos objetos arquitetônicos característicos do cenário do mundo modernizado do século XX. A tecnologia do concreto armado é predominante no Brasil seja ela formal ou informal.

De acordo com Vasconcelos (1992), próximo dos anos 1900, surgiram as primeiras construções em concreto armado em território brasileiro. Tem-se notícia de que a primeira execução utilizando o concreto armado foram as casas de habitação em Copacabana, no Rio de Janeiro. Neste tempo, o cálculo das estruturas de concreto eram feitos no exterior, a partir de 1924, com a formação de engenheiros brasileiros especializados em concreto armado, os cálculos passaram a serem feitos aqui.

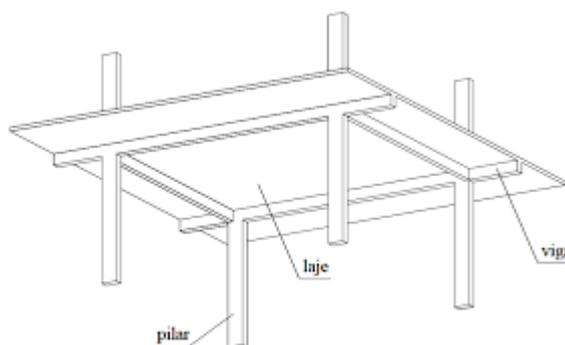
Para Borges (2010) a função estrutural do concreto é resistir aos esforços solicitantes de compressão e fica a cargo do aço resistir aos esforços solicitantes de tração, visto que cada um destes possui propriedades características que os possibilitam absorver os esforços provenientes das cargas permanentes e variáveis de cada edificação.

Carvalho e Filho (2014) definem as propriedades do concreto fresco como: a consistência, a trabalhabilidade e a homogeneidade, que auxiliam na garantia, no estado endurecido, de propriedades como a resistência à tração e à compressão.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 6118 (2014, p.3) item 3.1.3 define que “elementos de concreto armado são aqueles cujo comportamento estrutural depende da aderência entre concreto e armadura e nos quais não se aplicam alongamentos iniciais das armaduras antes da materialização dessa aderência”. Ainda de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014, p.4) item 3.1.5 “armadura passiva é qualquer armadura que não seja usada para produzir forças de protensão, isto é, que não seja previamente alongada”.

Para Clímaco (2008), estrutura é o conjunto das partes resistentes de uma edificação, subdivide-se em três categorias, de acordo, com a finalidade e a responsabilidade na segurança da edificação (FIG.1). A estrutura primária, pilares, tem a finalidade de garantir a resistência global da construção. Enquanto a estrutura secundária, vigas, confere resistência localizada às diferentes partes da construção, recebe cargas diretas ou apenas as reações da estrutura terciária. Já a estrutura terciária, lajes, tem a finalidade de suportar a aplicação direta das cargas distribuídas em superfície (FUSCO, 1976 *apud* CLÍMACO, 2008).

Figura 1 - Conjunto das partes resistentes de uma edificação



Fonte: Smiriglio, 2015.

Para Süsskind (1987) o concreto e a armadura possuem perfeita aderência entre si. Esta aderência ocorre pela semelhança entre coeficientes de dilatação térmica e também pela proteção química e física que o concreto oferece para as armaduras, garantindo a viabilidade do concreto armado, tornando-o um material viável, com grande durabilidade e confiável.

As principais características estruturais do concreto armado, de acordo com Carvalho e Filho (2014), são:

- Boa resistência à maioria das solicitações;

- Boa trabalhabilidade, que garante a adaptação às diversas formas;
- Estrutura monolítica, pela aderência entre o concreto e o aço;
- Material com durabilidade e resistência ao fogo superiores à madeira e ao aço, desde que bem executado e de acordo com as normas;
- Resistência a choques, vibrações, efeitos térmicos, atmosféricos e desgastes mecânicos;
- Peso próprio elevado, devido ao alto peso específico do concreto (em torno de  $25\text{kN/m}^3$  - concreto convencional), o que pode limitar o uso e elevar o custo;
- Necessário sistema de formas, escoramentos e processo de cura;
- Dificuldade na execução de reformas e intervenções.

Segundo Beber (2003) as estruturas de concreto são largamente utilizadas pelo fato de terem um bom custo benefício no aspecto estrutural e econômico. No entanto, são sensíveis às patologias, qualquer deficiência dos materiais, da execução ou do cálculo gerando situações de risco.

A norma brasileira utilizada para o dimensionamento de estruturas de concreto é a NBR 6118 (ABNT, 2014), que estabelece as exigências básicas para projetos de estruturas de concreto simples, armado e protendido, exceto os que empregam concretos leves, pesados ou especiais. Segundo esta norma, as estruturas de concreto devem atender aos requisitos de: capacidade resistente, desempenho em serviço e durabilidade. A capacidade resistente consiste na segurança à ruptura. O desempenho se refere ao material manter as condições de utilização durante a vida útil, não apresentando danos que comprometam o uso previsto no projeto, desde que seja feita a manutenção prescrita. E a durabilidade é a resistência às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração dos projetos.

Helene (2001) tem como definição de durabilidade o resultado da interação entre a estrutura de concreto, o ambiente e as condições de uso, de operação e de manutenção. Logo não é uma propriedade inerente ou intrínseca à estrutura, à armadura ou ao concreto. A mesma estrutura pode ter diferentes comportamentos, ou, diferentes funções de durabilidade no tempo. Isso vai de acordo com suas diversas partes, é dependente até da forma em que é utilizada.

Para Carvalho e Filho (2014) a agressividade do meio ambiente é umas das principais causas da perda de qualidade e durabilidade das estruturas, que segundo a norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014) está ligada às ações físicas e químicas exercidas sobre as estruturas de concreto, independente das ações mecânicas, variações volumétricas de origem térmica,

retração hidráulica e outras previstas no dimensionamento. A mesma classifica a agressividade ambiental de acordo com o QUADRO 1 abaixo.

Quadro 1 - Classes de agressividade ambiental (CAA)

Classe de agressividade do ambiente	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana <sup>a.b</sup>	Pequeno
III	Forte	Marinha <sup>a</sup>	Grande
		Industrial <sup>a.b</sup>	
IV	Muito forte	Industrial <sup>a,c</sup>	Elevado
		Respingos de maré	
<p><sup>a</sup> Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).</p>			
<p><sup>b</sup> Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.</p>			
<p><sup>c</sup> Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.</p>			

Fonte: NBR 6118:2014. Adaptado pela autora

A NBR 6118 (2014, p.15) item 6.2.1 define vida útil de projeto como:

O período de tempo durante o qual se mantêm as características das estruturas de concreto, sem intervenções significativas, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor, bem como de execução dos reparos necessários decorrentes de danos acidentais.

Ainda de acordo com a NBR 6118 (2014, p.15) o item 6.2.2 “O conceito de vida útil aplica-se à estrutura como um todo ou às suas partes”. Dentro desse mesmo item observa-se

que, “determinadas partes das estruturas podem merecer consideração especial com valor de vida útil diferente do todo, como, por exemplo, aparelhos de apoio e juntas de movimentação”.

Para Andrade (1997) nas condições de uso de um material, se seu desempenho se deteriorar ao ponto de que seu uso contínuo seja considerado inseguro ou não econômico, pode-se considerar que o material atingiu o fim de sua vida útil.

### ***2.1.1 Patologias em estruturas de concreto armado***

A palavra patologia, é proveniente do grego (patos – doença, e logia – ciência, estudo) e tem como significado “estudo da doença”. Na construção civil, pode ser designada aos estudos dos danos aos quais as edificações estão sujeitas. Apresentam-se em diversas formas como: trincas, fissuras, rachaduras, entre outras. Pelo fato de possuir diversas formas e aspectos, as patologias também podem ser denominadas como manifestações patológicas (ARIVABENE, 2015).

De acordo com Cánovas (1988), patologia é o estudo dos mecanismos, sintomas, causas e origens dos danos em obras. Em algumas situações, consegue-se fazer um diagnóstico das patologias através da visualização. Contudo, em outras situações o problema é mais crítico, necessitando a verificação do projeto, investigando cargas e ações as quais à estrutura foi submetida. Fazer uma análise criteriosa da forma de execução da obra e, também, como a patologia se comporta mediante a determinados estímulos, também ajudam a detectar outros problemas. Deste modo, pode-se constatar a causa destes problemas, fazendo os devidos reparos para que não ocorram novamente.

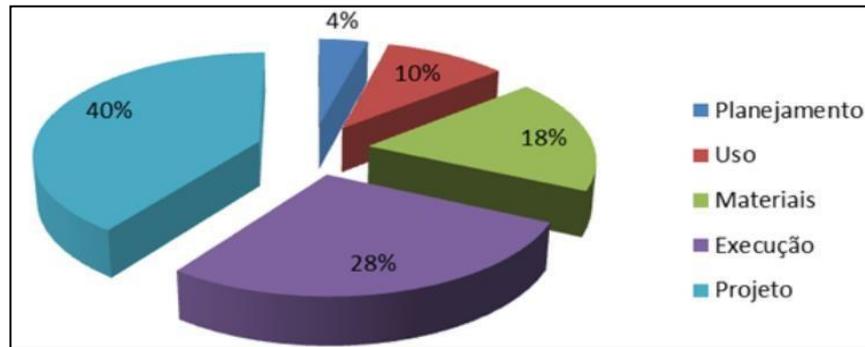
De acordo com Piancastelli (1997), o concreto armado é um material que se sujeita a alterações, ao longo do tempo, devido a interações entre seus elementos constitutivos (cimento, areia, brita, água e aço), interações entre esses e agentes externos (ácidos, bases, sais, gases e outros) e com materiais que lhe são adicionados (aditivos e adições minerais).

Segundo Beber (2003) as estruturas de concreto armado hoje possuem maiores riscos de apresentarem patologias que as mais antigas, pois, eram dimensionadas com margem de segurança superior as atuais. Modificações, envelhecimento natural e a deterioração por meio de ações de agentes agressivos, nas estruturas de concreto armado, alteram as condições iniciais consideradas no projeto original.

Segundo Gonçalves (2015) as causas mais comuns que levam a ocorrência de patologias em estruturas de concreto armado são por consequência de falhas na concepção do projeto, má

qualidade dos materiais, erros na execução, utilização para fins diferentes dos comuns. Conforme a FIG. 2, a origem mais corriqueira de manifestação patológica é na etapa de projeto.

Figura 2 - Frequência das origens de manifestações patológicas



Fonte: Helene, 1992, *apoud*, Aleixo, Eloy, Junior, 2019.

Existem também patologias causadas por fatores externos, tais como: efeitos da umidade, mudanças de temperatura, instabilidade do solo e efeitos excessivos do vento. Podem ser mencionadas situações ainda mais sérias e catastróficas, como terremotos. Esses fatores podem causar patologias que vão das mais simples às mais graves, com isso, é papel do engenheiro civil dimensionar as estruturas para evitar ao máximo a ocorrência de patologias causadas por esses fenômenos (GONÇALVES, 2015).

Para Machado (2002) as principais manifestações patológicas, em ordem crescente de ocorrência estatística são: a deterioração e degradação química da construção, as deformações (flechas e rotações) excessivas, a segregação dos materiais componentes do concreto, a corrosão das armaduras do concreto armado, as fissuras e trincas ativas ou passivas nas peças de concreto armado e manchas na superfície do concreto armado, conforme apresentado no QUADRO 2.

Quadro 2 - As principais manifestações patológicas, em ordem crescente de ocorrência estatística.

MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS	OCORRÊNCIA (PERCENTUAL)
Deterioração e degradação química da construção	7%
Deformações (flechas e rotações) excessivas	10%
Segregação dos materiais componentes do concreto	20%
Corrosão das armaduras do concreto armado	20%
Fissuras e trincas ativas ou passivas nas peças de concreto armado	21%
Manchas na superfície do concreto armado	22%

Fonte: Machado, 2002. Adaptado pela autora

### 2.1.1.1 Infiltrações, manchas, bolor ou mofo e eflorescência

Segundo Miotto (2010), as manifestações patológicas que mais ocorrem são as infiltrações, manchas, bolor ou mofo e eflorescência.

A infiltração é a resultante de um processo no qual há um contato do substrato de concreto com uma grande quantidade de água, o que leva a mesma a fluir ou até mesmo gotejar por meio desse substrato. A água que fica aderida ao substrato, ocasionará o que chamamos de mancha. Entende-se como bolor ou mofo a colonização de diversas populações de fungos filamentosos sobre variados tipos de substrato, ocasionando a formação de manchas escuras indesejáveis em tons de preto, marrom e verde. A eflorescência ocorre devido a formações salinas nas superfícies das paredes, trazidas de seu interior pela umidade (ARIVABENE, 2015).

A FIG. 3A mostra a infiltração, seguida por manchas e mofo e a FIG. 3B, a eflorescência.

Figura 3A – Infiltração, mancha e mofo.



Fonte: Leak Inspection, 2019<sup>1</sup>

Figura 3B – Eflorescência.



Fonte: AECweb, 2021<sup>2</sup>.

### 2.1.1.2 Concreto segregado

O concreto é um produto composto por areia, pedra (brita), cimento e água, que quando preparado e lançado corretamente, transforma-se em uma mistura homogênea, onde todas as pedras estão completamente envoltas pela argamassa (areia cimento e água). Se ocorrer um erro de lançamento ou de adensamento, as pedras se separam da argamassa, formando um concreto

<sup>1</sup> LEAK INSPECTIN. Disponível em: <https://www.leak.com.br/2019/03/08/como-tratar-infiltracao-em-lajes-e-paredes/>. Acesso em: 15 nov. 2021.

<sup>2</sup> AECWEB. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/como-evitar-e-remover-eflorescencias-em-estruturas-de-concreto/19336>. Acesso em: 15 nov. 2021.

cheio de vazios, permeável, que permite a passagem de água com facilidade (ARIVABENE, 2015), conforme demonstrado na FIG. 4.

Piancastelli (1997) traz que esse processo de separação pode ser provocado, entre outras causas, por: lançamento livre de grande altura; concentração de armadura que impede a passagem da brita; vazamento da pasta de cimento através das fôrmas; má dosagem do concreto; uso inadequado de vibradores.

Figura 4 – Concreto segregado



Fonte: ECIVIL, 2021.<sup>3</sup>

### 2.1.1.3 Fissuras, trincas e rachaduras

Segundo Cánovas (1988), as fissuras são patologias que oferecem risco a segurança da estrutura e também acabam por ser uma abertura para a ocorrência de corrosão das armaduras, já que acabam por desproteger o aço.

Uma das possíveis causas da fissuração em estruturas de concreto armado é: para Ferreira (2018) a contração plástica nas estruturas de concreto armado que é causada pela redução de volume devido à elevada perda de água na superfície por meio de evaporação, antes mesmo do endurecimento do concreto e o assentamento do concreto/perda de aderência. De acordo com Souza e Ripper (1998), devido ao assentamento do concreto, causa o efeito parede, que consiste em um vazio que é formado na parte inferior da barra de aço, assim causando uma perda de aderência e fissuras. Diversos fatores contribuem para este deslocamento, como por exemplo: escoramento mal travado, dimensões e volumes muito grandes para formas de

---

<sup>3</sup> ECIVIL. Disponível em: <https://www.ecivilnet.com/dicionario/o-que-e-segregacao.html>. Acesso em: 15 nov. 2021.

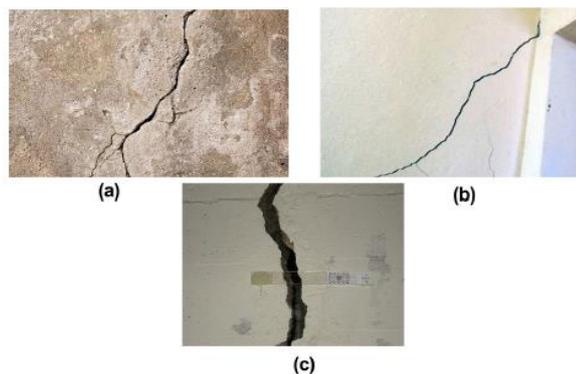
compensado, sendo mais apropriado o uso de formas metálicas. Dito isso, pode-se ocorrer fissuração da peça ou uma deformação acentuada da mesma, e como consequência a perda de resistência mecânica. No caso das barras estarem próximas e em grande número, poderá ocorrer uma interação entre as fissuras, gerando um quadro mais grave. É importante levar em consideração que, esta patologia também permite a entrada de agentes prejudiciais às armaduras (FERREIRA, 2018). A fissuração pode ser considerada uma das patologias que mais ocorre, ou pelo menos a que chama mais atenção dos proprietários (SOUZA e RIPPER, 1998).

Podendo ter sua formação de forma congênita, as trincas podem aparecer logo no projeto arquitetônico da construção. Os profissionais ligados ao assunto precisam estar cientes de que muito pode ser feito para minimizar as trincas reconhecendo que as movimentações dos materiais e componentes das edificações civis são inevitáveis (THOMAZ, 1989).

A definição de fissura pode conflitar com as de trinca e rachadura. As trincas são semelhantes às fissuras em relação ao tratamento das mesmas, se distinguem apenas na dimensão. Trincas têm aberturas maiores que 0,5mm. Já as rachaduras têm propriedades que as diferenciam das demais, possuem abertura acentuada e profunda. Sua dimensão é superior a 1mm, sendo que em alguns casos podem ocorrer abertura de fendas de um lado ao outro da parede. A partir da espessura de 1,5 mm, pode-se chamar de fenda (GONÇALVES, 2015).

A FIG.5 mostra exemplos de (a) fissura, (b) trinca e (c) rachadura, no concreto armado.

Figura 5 - Fissura, trinca e rachadura



Fonte: AEC web, 2021<sup>4</sup>; Fórum da construção, 2021<sup>5</sup>; Ecivil, 2021<sup>6</sup>

<sup>4</sup>AECWEB. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/quais-sao-as-causas-mais-comuns-de-fissuras-nas-construcoes/16674>. Acesso em: 16 nov. 2021.

<sup>5</sup> FORUM DA CONSTRUÇÃO. Disponível em: <http://www.forumdaconstrucao.com.br/conteudo.php?a=17&Cod=2118>. Acesso em: 16 nov. 2021.

<sup>6</sup> ECIVIL. Disponível em: <https://www.ecivilnet.com/dicionario/o-que-e-rachadura.html> Acesso em: 16 nov. 2021.

#### 2.1.1.4 Corrosão da armadura

Para Cascudo (2005) a definição de corrosão de elementos metálicos é a modificação de um metal em íon metálico pela sua interação química ou eletroquímica com o meio ambiente. A partir da afirmação dada acima, é possível definir a corrosão das armaduras nas estruturas de concreto armado, como sendo um processo de degradação da fase metálica existente, que conseqüentemente provoca a perda de seção das barras de aço. E concomitante a esta perda de seção, formam-se produtos de corrosão de caráter expansivo, geralmente no entorno das armaduras, que vão se acumulando e gerando tensões internas não previstas em projeto. As mesmas, acabam fissurando o concreto e sequencialmente lascando-o e destacando-o, deixando, a armadura totalmente exposta aos seus agentes agressores, o que acelera ainda mais o processo corrosivo, conforme pode ser observado na FIG. 6.

Figura 6 - Corrosão na armadura



Fonte: Gênova Engenharia e Construção Civil (2015)<sup>7</sup>

## 2.2 Reforço estrutural com sistema Composto de Fibras de Carbono (CFC)

Para Souza e Ripper (1998) uso de fibras de carbono para reforço de estruturas de concreto armado, teve sua concepção no início dos anos 80 no Japão, devido a grande ocorrência de abalos sísmicos em curto espaço de tempo e com escalas consideráveis, várias construções tinham suas estruturas comprometidas, especialmente os pilares.

Tendo em vista estes ocorridos citados acima, o governo japonês e entidades privadas se uniram na busca de novas tecnologias que suprissem a necessidade de reforçar os pilares das

---

<sup>7</sup> GÊNNOVA ENGENHARIA E CONSTRUÇÃO CIVIL. Disponível em: [https://www.construtoragenova.com.br/midia/techne\\_recuperacao\\_estrutural/](https://www.construtoragenova.com.br/midia/techne_recuperacao_estrutural/). Acesso em: 16 nov. 2021.

edificações com eficácia, segurança e agilidade. Naquela época o uso de fibra de carbono era comum nas indústrias do tipo navais e automobilísticas no reforço de várias peças, portanto os testes realizados comprovaram sua eficiência em reforços de estruturas de concreto armado. Após o terremoto de Kobeem 1995 essa técnica ganhou mais repercussão e aprimoramento (SOUZA e RIPPER, 1998). Ela contribuiu para o aprimoramento das estruturas de concreto armado existentes, viabilizando sua utilização sobre carregamentos maiores e a recuperação de peças que tenham a resistência afetada por acidentes. Além das irregularidades durante a execução dos serviços de montagem e locação de formas como a distribuição das armaduras e preenchimento da forma com concreto, este método de reforço pode ser conceituado como a evolução dos métodos pioneiros (GALLARDO, 2002).

De acordo com Souza e Ripper (1998) o reforço de estruturas de concreto armado com sistema composto de fibra de carbono, não se aplica apenas em pilares como no início de sua aplicação. Suas propriedades mecânicas permitem o seu uso em outros elementos estruturais de concreto armado danificados como lajes e vigas. Dispostas corretamente sobre os elementos estruturais as fibras de carbono resistem perfeitamente aos esforços de tração e cisalhamento resultantes do carregamento de toda estrutura.

Os sistemas compostos de fibra de carbono (CFC) são um dos tipos de Polímero Reforçado com Fibras (PRF). Os sistemas FRP “*Fiber Reinforced Polymer*”, são abordados na norma americana ACI 440.2R-08. Trata-se de uma norma que orienta sobre o uso do sistema, propriedades dos materiais, recomendações para o projeto, construção e inspeção do sistema de reforço (ACI, 2008).

### **2.2.1. Componentes do sistema**

A composição do sistema composto de fibras de carbono utilizado no reforço de estruturas de concreto armado é constituído de dois componentes: elemento estrutural e matriz polimérica. A perfeita eficácia do sistema para resistir aos esforços atuantes na estrutura só ocorre devido a atuação conjunta dos componentes (MACHADO, 2021).

O elemento estrutural utilizado neste sistema são as fibras de carbono. De acordo com Gallardo (2002), pelo fato da fibra de carbono possuir elevada resistência mecânica a ataques químicos, grande rigidez, baixa deformação e não sofrer corrosão, apresenta um excelente desempenho no reforço estrutural. Tem como principal característica, no que diz respeito à resistência, alta capacidade de absorver os esforços de tração exercidos pelo carregamento da estrutura.

Segundo Machado (2021) a matriz polimérica garante a adesão do elemento estrutural à superfície de concreto e permite que o conjunto tenha a coesão necessária, proporcionando assim a passagem das tensões cisalhantes entre o concreto e as fibras de carbono.

Araújo (2014) ressalta que dois sistemas compostos de fibra de carbono são utilizados frequentemente para reforço estrutural: os curados *in-situ* e os pré-fabricados. Os sistemas curados *in-situ* funcionam da seguinte forma, a matriz polimérica e a fibra são dadas separadamente, sendo realizada a impregnação no momento em que for feita sua aplicação. Segundo Meier (1997, *apud* BEBER, 2003) o sistema só se transforma em CFC depois de se executar o reforço, isto é, após a aplicação da resina seguida da aplicação da fibra de carbono. A resina (matriz polimérica) passa por um processo chamado cura ou polimerização. Beber (2003) define cura ou polimerização como um processo químico de endurecimento, que altera de forma irreversível as propriedades de uma resina termorrígida. Normalmente, a cura é dada pela adição de um agente de cura ou catalisador (endurecedor), com ou sem aquecimento (ou pressão). Esse sistema é classificado como manta quando as fibras são dispostas unidirecionalmente, e como tecido, quando estão dispostas em várias direções, como pode ser observado nas FIG.7 e FIG.8. Ainda segundo Araújo (2014), diferente dos sistemas curados *in situ*, os sistemas pré-fabricados fornecem a fibra já impregnada e curada (pela matriz polimérica), podendo ser encontrado em várias formas, sendo a mais comum a lâmina com espessuras entre 1,0 e 1,4mm (FIG.9).

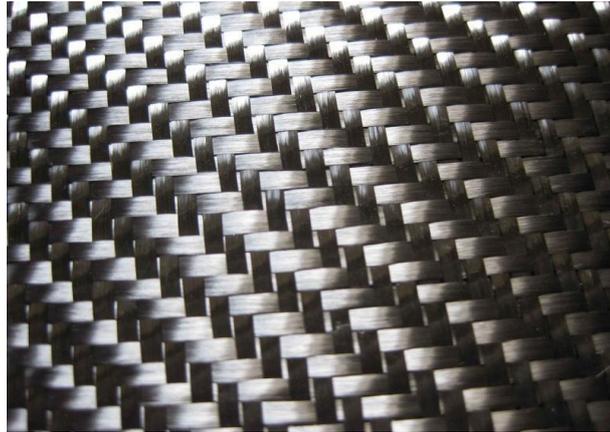
As FIG.7, FIG.8 e FIG.9 mostram os tipos de fibra de carbono mais utilizadas.

Figura 7 - Manta de fibra de carbono.



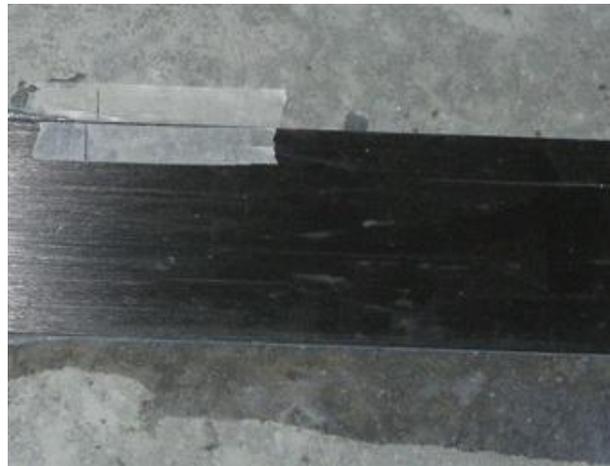
Figura: Araújo (2014)

Figura 8- Tecido de fibra de carbono.



Fonte: Araújo (2014)

Figura 9 - Laminado de fibra de carbono.



Fonte: Araújo (2014)

### 2.2.1.1 Fibras de carbono

Possuindo excepcionais características mecânicas, a fibra de carbono resulta do tratamento térmico (carbonização) de fibras precursoras orgânicas tais como o poliacrilonitril (PAN) ou com base no alcatrão proveniente do petróleo ou do carvão (PITCH) em um ambiente inerte e, também, por meio de fibras de rayon. Seu processo de produção ocorre devido a oxidação dessas fibras precursoras e em seguida seu processamento sob elevadas temperaturas (variando de 1.000°C a 1.500°C para as fibras de carbono a até cerca de 3.000°C para as fibras de grafite). As fibras resultantes desse processo retratam os átomos de carbono perfeitamente alinhados ao longo da fibra precursora, essa característica atribui para a fibra de carbono extraordinária resistência mecânica. Quanto maior for a temperatura em que for processada,

maior será seu módulo de elasticidade, variando de 100GPa a 300GPa. Portanto, quanto maior for o módulo de elasticidade maior será o custo do material (MACHADO, 2021).

Seu alto módulo de elasticidade e alta resistência dependem do grau de orientação das fibras, ou seja, da paralelização de seus eixos entre si. As fibras de carbono possuem diâmetro de 0,07 e 0,10 mm e podem ser longas quando contínuas ou curtas quando cortadas, como pode ser visualizado na FIG.10. A relação entre o comprimento e o diâmetro médio da fibra curta é chamada de fator de tamanho. As propriedades dos compósitos de fibra curta são altamente dependentes dessa relação, sendo a resistência mecânica do compósito maior para maiores fatores de tamanho (BRONZE, 2016).

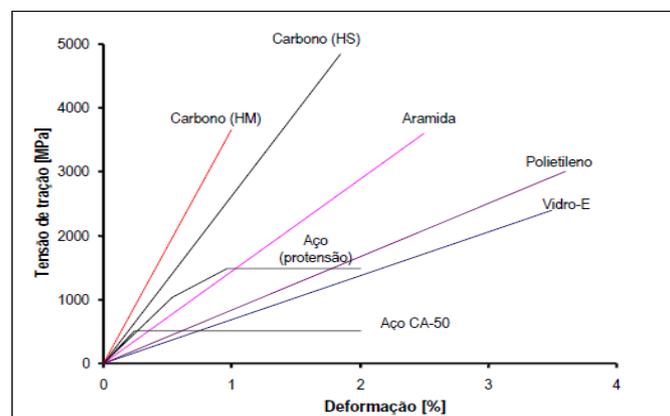
Figura 10 – Fibras curtas e contínuas



Fonte: Correia (2017)

A FIG. 11 apresenta o diagrama tensão versus deformação de diferentes tipos de fibras e outros materiais. De acordo com Kendall (1997, *apud*, BEBER, 2003), carbono HS é o carbono de elevada resistência e possui maior deformação e HM o carbono de elevado módulo e menor deformação.

Figura 11 - Diagrama tensão-deformação de fibras e de outros materiais



Fonte: Beber (2003)

Observa-se no gráfico que a fibra de carbono apresenta a melhor relação entre tensão e deformação entre as fibras e os materiais comparados, explicando sua ampla utilização em diversas aplicações.

### 2.2.1.2 Matriz polimérica

As matrizes têm como função manter as fibras posicionadas na estrutura e protegê-las de danos externos podendo ser formadas por metais, polímeros ou cerâmicas. Transferem e distribuem as cargas aplicadas às fibras. Em alguns casos precisam de ductilidade, tenacidade ou isolamento elétrica. É necessária a boa aderência às fibras. Ambas devem ser compatíveis, ou seja, não podem acontecer reações entre estas. Outro requisito importante para a matriz é o bom desempenho na temperatura de serviço. As matrizes mais utilizadas são os polímeros. Podendo ser resinas termofixas, como a epóxi, o poliéster e o fenol, ou termoplásticas (GIBSON, 1994).

De acordo com Hollaway (1993, *apud*, BEBER, 2003, p. 22), a matriz polimérica deve:

- Unir as fibras e proteger suas superfícies durante o manuseio, fabricação e ao longo de toda sua vida útil;
- Dispersar e separar, ordenadamente, as fibras com o objetivo de evitar a propagação de fissuras e conseqüente ruptura do compósito;
- Transferir integralmente as tensões para as fibras por atrito ou adesão;
- Ser química e termicamente compatível com a fibra.

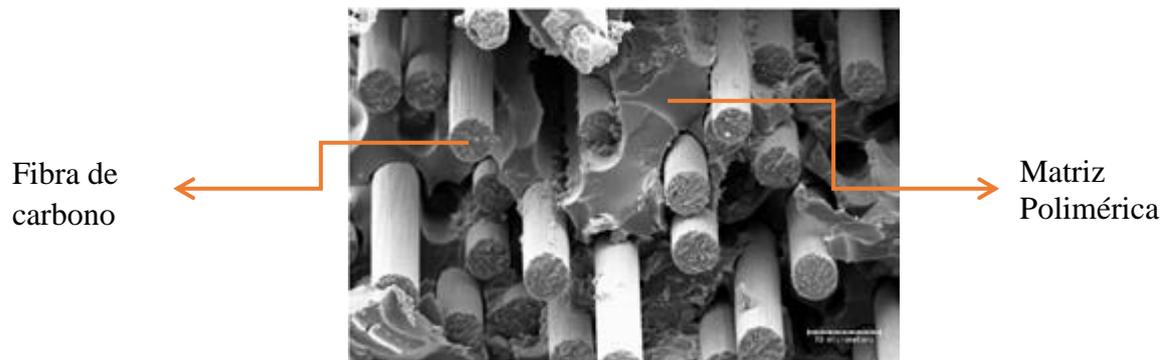
De acordo com Machado (2011, *apud*, SOUZA, 2014) a matriz polimérica é composta por:

- Imprimador epoxídico: penetra nos poros da peça de concreto a ser reforçada criando uma camada que permita a transmissão dos esforços;
- Pasta de regularização: pasta epoxídica usada para conformar a superfície de concreto para que os esforços sejam transmitidos uniformemente para as fibras de carbono;
- Resina saturante: usada para saturar as fibras de carbono e realizar a aderência destas sobre a superfície da peça de concreto pós- aplicação das camadas citadas acima.

As resinas termorrígidas mais utilizadas em compósitos para o reforço estrutural, são: o poliéster, éster-vinílico, uretano metacrilato, fenol e epóxi (HOLLAWAY, LEEMING, 1999).

A FIG. 12 mostra a matriz polimérica no sistema composto de fibra de carbono.

Figura 12 – Sistema Composto de fibra de carbono



Fonte: Machado (2021). Adaptado pela autora.

Algumas propriedades mecânicas importantes na caracterização de matrizes poliméricas dos compósitos são apresentadas no QUADRO 3.

Quadro 3 - Propriedades mecânicas de algumas resinas termorrígidas

Propriedade	Resinas		
	Poliéster	Éster-vinílico	Epóxi
Resistência à tração [MPa]	20–100	79–90	55–130
Módulo de elasticidade [GPa]	2,1–4,1	3,0–3,3	2,5–4,1
Deformação na ruptura [%]	1–6	3,9–5,2	1–9
Resistência à flexão [MPa]	125	110–149	131
Peso específico [kN/m <sup>3</sup> ]	9,8–14,2	10,9–12,9	10,8–12,7

Nanni et al(1993), *apud*, Beber, (2003)

### 2.2.1.3 Resina epóxi

De acordo com Gibson (1994) as resinas epóxis e poliésteres têm sido as resinas mais utilizadas nos últimos anos.

As resinas epóxi são termorrígidas de alto desempenho que contém, por molécula, pelo menos dois grupos epóxi terminais (grupos oxirano ou etoxilina). Sua facilidade de moldagem em superfícies complexas ocorre devido a baixa viscosidade destas resinas à temperatura ambiente. No processamento de resinas epóxi vários agentes de cura são utilizados, estes são responsáveis pelo tipo de reação de cura que ocorre, essa cura pode ocorrer por meio da ação do calor ou tratamento químico (NETO, PARDINI, 2006).

Ainda de acordo com Neto e Pardini (2006) os endurecedores são agentes de cura utilizados no processo de obtenção da resina. Após a cura, a transição vítrea ou endurecimento, o módulo de elasticidade e a resistência mecânica são afetados pela relação epóxi/endurecedor. A resistência à tração de sistemas epóxi curados variam de 40MPa a 90MPa, e o módulo de elasticidade varia de 2,5GPa a 6,0GPa, com a deformação de ruptura variando de 1% a 6% e a resistência à compressão de 100Mpa a 220Mpa (NETO, PARDINI, 2006).

### **2.3 Processo Construtivo dos sistemas compostos de fibra de carbono**

Segundo Juvandes (2011) os sistemas pré-fabricados são feitos através da impregnação de um conjunto de feixes de fibras contínuas (com orientação unidirecional) por meio de uma resina termoendurecível, unificados por um processo de pultrusão (processo contínuo que combina ações de tração e extrusão para a produção de um compósito de CFC) com controle da espessura e da largura em fábrica. Trata-se de um CFC com forma final, desprezando qualquer polimerização ou cura em obra para a sua aplicação. O Laminado (“*Laminate*”, “*Strips*”) é a forma comercial mais utilizada e possui espessura típica de 1,2 a 1,4mm e com largura variável. O adesivo adicionado ao sistema (para colagem dos laminados no substrato de concreto) é um material diferente do compósito sendo geralmente utilizado o tipo epóxi.

Ainda de acordo com Juvandes (2011) os sistemas curados “*in situ*” não apresentam à princípio um CFC, mas feixes de fibra contínuas em forma de fios podendo ser apresentadas como mantas (“*Sheets*”) ou tecidos (“*Fabrics*”), em estado seco ou pré impregnado. As mantas são formadas por fibras unidirecionais e apresentam-se como folhas de espessuras de 0.1 a 0.2mm e tem larguras entre 25 e 30cm. E os tecidos são formados por fibras entrelaçadas, dispostas bi ou multidirecionalmente, com a largura por volta de 60cm. A porcentagem de fibras é dada pelo peso do produto por m<sup>2</sup> (g/m<sup>2</sup>), sendo comum encontrar mantas de CFC entre 200 a 400 g/m<sup>2</sup>, sendo válido para ambos os produtos citados acima. O sistema inclui a resina de saturação (matriz polimérica), a qual tem como função impregnar o conjunto de fibras. Segundo o conceito de CFC, a mistura fibra com resina acontecerá após a execução do reforço, isto é, após a polimerização da resina que é aplicada “*in situ*”.

Segundo Borges (2016) os tipos de instalação dos compósitos podem variar de acordo com o sistema adotado e com o tipo e situação a que a estrutura, na qual será aplicado, está submetida. Foram desenvolvidos pelos fabricantes ao longo dos anos manuais, procedimentos e especificações para a utilização do composto de fibra de carbono como reforço de estruturas.

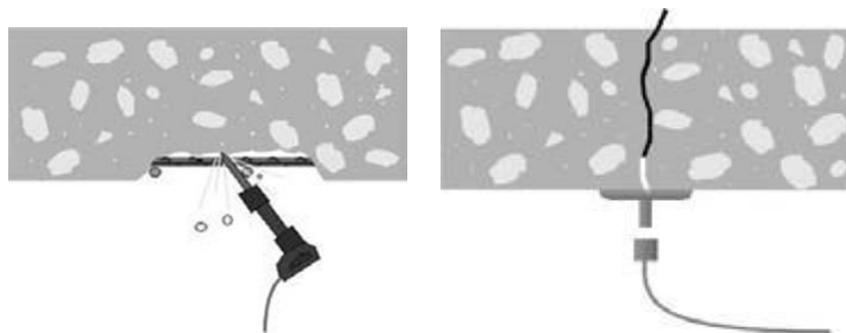
Para Beber (2003) independente do sistema a ser aplicado, antes de sua execução a superfície do substrato de concreto, a qual receberá o reforço deverá ser recuperada e preparada

### ***2.3.1 Recuperação do substrato de concreto***

Segundo Machado (2021) para se instalar o sistema composto é essencial que o substrato em que o mesmo será colado esteja íntegro, isto é, que possua resistência mecânica suficiente para que possa realizar as transferências de esforços para a interface concreto armado/reforço.

Ainda de acordo com Machado (2021) todas as manifestações patológicas presentes no substrato necessitarão de correção. A corrosão nas armaduras é uma das manifestações patológicas que mais ocorrem em estruturas de concreto armado. Deste modo, é necessária a recuperação e a passivação das barras de aço que sofreram danos devido a corrosão e a extração seguida da recuperação das superfícies de concreto danificadas por esta manifestação. É essencial que se recupere todas as trincas, existentes no substrato de concreto que irá receber o reforço, por meio de injeção com epóxi sob pressão. O que inclui também as fissuras com aberturas maiores que 0,25 mm e em fissuras com aberturas menores que 0,25mm, onde deve ser feita a injeção de resinas ou seladores para que se possa evitar o surgimento de corrosão da armadura na peça. A FIG. 13 mostra a remoção da superfície degradada e a recuperação das trincas por meio de injeção com epóxi.

Figura 13 – Remoção da superfície degradada e recuperação da trinca



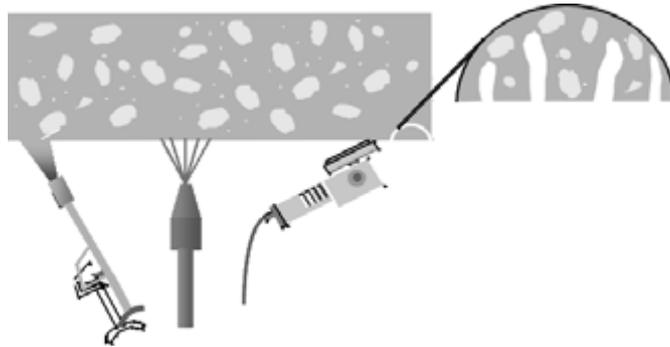
Fonte: Machado (2021)

### ***2.3.2 Preparação da superfície do substrato de concreto armado***

Após garantir a integridade do substrato, onde será aplicado o sistema composto, segue para a etapa de preparação da superfície do substrato. Esta preparação irá variar conforme duas

situações, sendo elas, a condição crítica de colagem do sistema composto, que trata de reforços para esforços de flexão e o decisalhamento em vigas, lajes ou pilares de concreto armado, e, que há necessidade da aplicação de um sistema de colagem (adesivo) com ótimo desempenho para que a transferência de esforços entre os meios aderidos seja realizada. E a condição crítica de contato íntimo que é utilizada em casos de reforço por confinamento de colunas, que necessita de uma condição de contato com ótimo desempenho entre o substrato de concreto e o sistema composto (MACHADO, 2021). De acordo com Araújo (2014) nesta condição a colagem não é obrigatória, contudo, é realizada a fim de auxiliar na aplicação do reforço. Para Machado (2021) quando se tratar da colagem crítica a superfície do concreto passa pelas seguintes etapas de preparação, conforme a FIG.14 e explicado no texto seguinte:

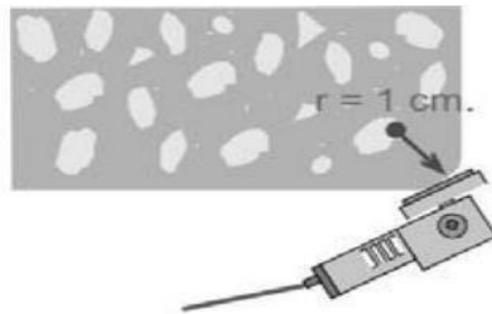
Figura 14 – Preparação da superfície do substrato de concreto armado



Fonte: Machado, 2021.

É feita a utilização de abrasivos, jatos de areia ou limalhas metálicas para que a limpeza da superfície, onde será aplicado o sistema composto, seja feita corretamente. Em superfícies pequenas ou limitadas usam-se politrizes, geralmente conectadas com aspiradores de pó, o que viabiliza a limpeza evitando que ocorra a contaminação do ambiente. Esta limpeza tem como função remover poeira, pó, substâncias oleosas e graxas, partículas sólidas que não se aderiram totalmente, pinturas, argamassas, entre outros. Quando o sistema de reforço solicitar o recobrimento de várias camadas de superfície lateral da peça, deverá ser feito o arredondamento das quinas do substrato onde será aplicado o reforço, com o intuito de evitar concentração de tensões na fibra de carbono, evitando também a formação de “vazios” entre o concreto e o sistema composto (MACHADO, 2021). Esse arredondamento pode ser visualizado na FIG. 15.

Figura 15 - Arredondamento de quina com politriz.



Fonte: Machado (2021)

Quando se tratar do caso de condição crítica de contato íntimo, em aplicações que serão feitas através do confinamento das peças de concreto armado, é importante que a preparação das superfícies seja direcionada para a execução de um contato íntimo e contínuo entre as superfícies envolvidas. As mesmas não podem obter concavidades ou convexidades que dificultem o carregamento correto do sistema composto. Devem ser feitas as correções dessas irregularidades expressivas por meio de preenchimento com material de reparação que seja compatível com as características mecânicas do concreto ou por meio de extração (MACHADO, 2021).

### ***2.3.3 Aplicação dos sistemas compostos de fibra de carbono***

Neste tópico serão descritas as aplicações de um tipo de sistema composto de fibra de carbono pré-fabricado, o laminado e um tipo de sistema composto curado “in situ”, as mantas flexíveis. A aplicação dos tecidos é a mesma que a das mantas flexíveis, visto que, como citado acima o que as diferencia é a posição (direção) das fibras.

#### ***2.3.3.1 Laminados Pré-fabricados***

Segundo Beber (2003) após concluída a etapa de preparação da superfície de concreto, é realizado o corte do laminado na dimensão desejada. Em seguida é aplicada uma fina camada do adesivo epóxi no substrato de concreto, e por fim, posiciona-se o laminado na superfície do concreto. A colagem do CFC deve ser feita imediatamente, levando em consideração que o tempo para aplicação do adesivo é entre 25 e 30 minutos. Podendo o mesmo variar de acordo com a temperatura do ambiente, quanto maior a temperatura menor o tempo (ARAÚJO, 2014). Aplica-se também sobre o laminado uma camada de resina, com uma espessura levemente superior no decorrer da linha central do laminado. Processo este que contribui para a diminuição

do risco da formação de vazios durante a aplicação do laminado na superfície de concreto. O laminado é, por sua vez, posicionado sobre a superfície de concreto, como pode ser observado na FIG. 16, e pressionado com um rolo de borracha, o que garante sua colagem ao substrato de concreto. O que resta do adesivo deverá ser espalhado pelas laterais. É exercida certa pressão para garantir que não ocorra a formação de vazios (do centro para as extremidades). A espessura do adesivo ao final da aplicação deve ser constante no decorrer de todo o comprimento do laminado, tendo uma espessura mínima entre 1,5 mm e 2,0 mm. Usualmente, é aplicado somente uma camada de laminado, deste modo, todo o volume de adesivo pode ser aplicado sobre o laminado (BEBER, 2003).

Figura 16 – Posicionamento do laminado sobre a superfície



Fonte: Borges (2016)

De acordo com ACI 440.2R-8 (2017, *apud*, OLIVEIRA, 2020) se houver necessidade de aplicação de mais de uma lâmina, orienta-se o uso de ferramentas, conforme a FIG.17 abaixo, que distribuam uniformemente o adesivo nas lâminas.

Figura 17 - Ferramenta de aplicação de adesivo sobre a lâmina.

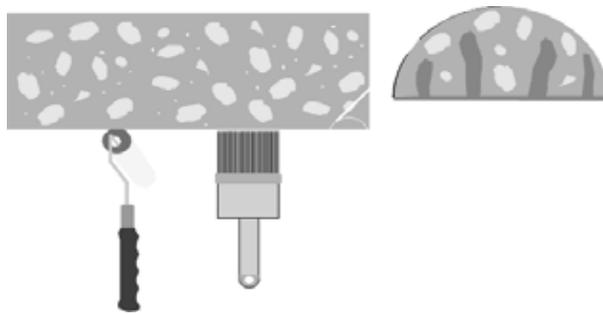


Fonte: Borges (2016)

### 2.3.3.2 Mantas Flexíveis

De acordo com (Beber, 2003) a aplicação das mantas é feita da seguinte forma: após a preparação da superfície, procede-se a imprimação do substrato de concreto através da aplicação do *primer* (imprimador epoxídico). Para que ocorra a impregnação do substrato de concreto, aplica-se uma demão de *primer* sobre a superfície preparada do substrato, o que viabilizará a consolidação das partículas soltas e não será possível ocorrer a absorção da água contida na resina, pelos poros do concreto (BORGES, 2016). Na FIG.18 observa-se a aplicação do *primer* no substrato.

Figura 18 – Aplicação do *primer* no substrato de concreto



Fonte: Machado (2021)

De acordo com Beber (2003) as mantas flexíveis de fibra de carbono, são vendidas em rolos com comprimentos de até 100 metros. Também é possível, em alguns casos, encontra-las com comprimentos especiais de até 300 metros. A pré-impregnação com resina epóxi tem por objetivo apenas manter as fibras de carbono orientadas em uma direção. As mantas podem ser cortadas facilmente com tesoura ou qualquer ferramenta de corte. Esta facilidade possibilita a manta flexível e, conseqüentemente o reforço, assumir formas e tamanhos diversos. Logo após a aplicação do *primer*, aplica-se a resina de saturação, no substrato de concreto, à base de epóxi, também é bi componente, isto é, é constituída por um agente principal e um catalisador. Sua principal função é formar a matriz do compósito de fibra de carbono. Além disso, a resina de saturação é responsável pela aderência do compósito ao substrato de concreto, que foi preparado com o *primer*. Deve-se controlar a quantidade de resina, de acordo com as recomendações do fabricante do sistema de reforço. Quanto mais grossa for a camada de resina, menor será a eficiência do reforço. Contudo, se esta quantidade não for suficiente para viabilizar a impregnação das fibras de carbono, o compósito não será formado, o que poderá comprometer seu desempenho estrutural. Machado (2021) define este tipo de saturação como saturação via seca. Na FIG.19 é mostrado a aplicação da resina sobre o substrato de concreto.

Figura 19 – Saturação via seca.



Fonte: Machado (2021)

Outra alternativa é a aplicação da resina de saturação diretamente na manta, podendo ser realizada essa saturação em uma bancada, de acordo com a FIG.20, e em seguida dar continuidade a aplicação da manta na superfície de concreto. Essa saturação é denominada saturação via úmida (MACHADO, 2021).

Figura 20 – Saturação via úmida realizada em bancada

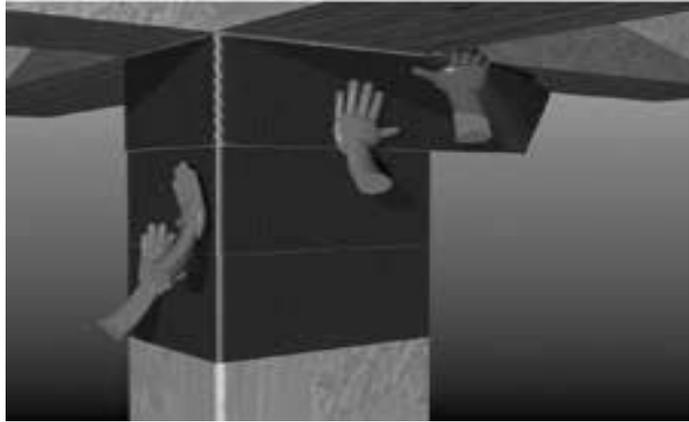


Fonte: Machado (2021)

Para Machado (2021) a saturação via úmida é uma técnica menos trabalhosa, porém a mesma limita comprimento da lâmina a qual será transportada, variando de 3,5 a 4,0m. Fica à cargo do aplicador optar por qual o sistema será adotado, levando em consideração que o resultado final para os dois procedimentos não é alterado.

Segundo Beber (2003) a manta, com a face oposta ao papel ou plástico protetor, é colada cuidadosamente mantendo um único sentido durante a colocação. Usando a pressão das mãos, o aplicador deve expulsar o ar aprisionado e seguir fixando a manta na posição, se atentando aos limites do elemento (FIG. 21).

Figura 21 – Aplicação da manta no substrato de concreto



Fonte: Machado (2021)

Assim que for posicionada, aplica-se o rolo de borracha, mantendo um único sentido, com o intuito de pressionar uniformemente a camada de fibra de carbono, tirando o ar aprisionado, possibilitando aderência da fibra ao substrato de concreto de acordo com a FIG. 22 (MACHADO, 2021).

Figura 22 – Aplicação do rolo de borracha para expulsar o ar aprisionado



Fonte: Machado (2021)

Após a execução desta etapa, se ainda houver a presença de ar aprisionado, aplica-se novamente o rolo, porém seguindo o sentido contrário ao da primeira aplicação. O excesso lateral de resina é retirado e aplicado sobre a manta, junto ao restante da resina de saturação designada à formação do corpo do compósito de fibra de carbono. Se no projeto houver previsão de mais uma camada de reforço, basta aplicar, sobre a superfície já acabada, a segunda manta e repetir todas as operações anteriores. O tempo de cura da resina, que é o mesmo tempo do reforço, está submetido às condições climáticas, temperatura e umidade. Este período não ultrapassa os 7 dias. Logo após o período de cura, a superfície reforçada admite a aplicação de reboco, proteção contra o fogo ou pintura de qualquer natureza (BEBER, 2003).

## **2.4 Aplicações dos sistemas compostos de fibra de carbono nos elementos estruturais de concreto armado**

Para Machado (2002) o sistema composto estruturado com fibras de carbono pode ser aplicado em vários elementos de concreto armado. Principalmente, onde existe ocorrência de momentos fletores, com tensões de tração e compressão, esforços cortantes e de torção com tensões tangenciais e em casos de confinamento. Este sistema pode ser usado para: reforço de vigas à flexão e ao corte, reforço de lajes à flexão, reforço de pilares e colunas, reforços de tanques, silos e reservatórios e reforço de muros de arrimo, vigas-parede, alvenarias e melhoria da resistência a impactos e explosões. Neste tópico estudou-se a aplicação nos elementos estruturais: vigas, pilares/colunas e lajes.

### ***2.4.1 Reforço de vigas à flexão e ao corte***

Segundo Beber (2003), o dimensionamento do reforço leva em consideração critérios que garantam a estabilidade estrutural da peça, como coeficientes de minoração do desempenho do reforço levando em consideração que o mesmo é um método no qual a análise da interação entre os seus componentes e o concreto armado ainda ser uma área sob estudo.

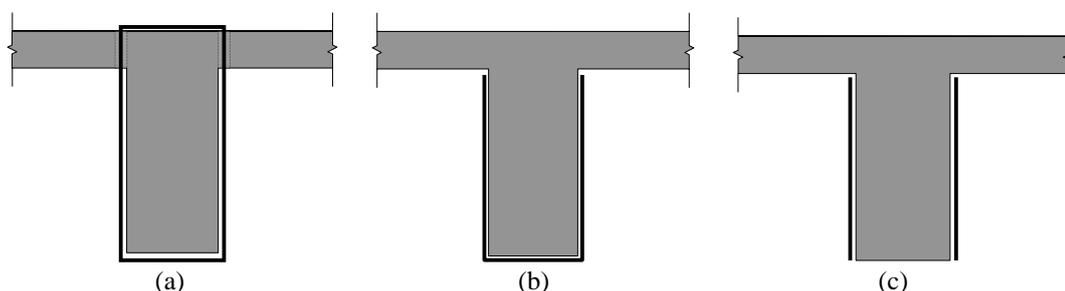
De acordo com Gallardo (2002), outro fator de extrema importância para o desempenho do reforço à flexão em vigas, é o dimensionamento da largura do sistema e possibilidade de haver necessidade de ancoragem da mesma. Os esforços de tração que influenciam na extremidade de vigas devem ser transmitidos para o reforço uniformemente, sendo assim determinada a largura do laminado ou manta de fibra de carbono a ser empregada na peça que deve ser no mínimo equivalente a largura da base da viga que for receber o esforço. Em alguns casos dependendo do estado em que se encontra o substrato de concreto, o reforço que possui os filamentos de fibra de carbono posicionados longitudinalmente ao eixo da viga resistindo aos esforços de tração, deve ser ancorado em seu sentido transversal, com outra camada do sistema CFC. Esta ancoragem pode ser feita com a mesma camada de reforço ao cisalhamento. Outro modo de ancoragem do sistema de reforço em vigas é aumentar o comprimento do composto de fibra de carbono até os pontos de apoio da peça.

De acordo com Machado (2002) como nos estribos das vigas de concreto armado, a inclinação das tiras de fibra de carbono posicionadas para combater a força cisalhante, eleva muito a sua eficácia. O que determina a configuração para a aplicação do reforço com fibra de

carbono para resistir ao corte são fatores como: acesso à viga, atentando-se ao perímetro em torno da viga para a execução do reforço e a situação a que a viga está submetida de acordo com o tipo de carregamento.

O modo de aplicação pode variar entre: Envolvimento total da superfície transversal conforme a primeira representação da FIG. 25 (a): este modo é o que possui melhor performance, além de combater os esforços de cortantes, ainda possibilita a perfeita ancoragem de todo sistema, no caso de vigas que são diretamente ligadas com a laje este método possui uma execução um pouco mais complexa, devido a necessidade da transposição da laje pelas tiras de fibra de carbono. Modo de envolvimento tipo U conforme a segunda representação da FIG.25 (b): é o método mais utilizado devido a sua perfeita adaptação a vigas ligadas a lajes, apresenta boa performance em pontos de momento positivo, onde a armadura positiva é feita na parte inferior, contudo, não promove resistência ao cisalhamento em seções de momento negativo, onde a armadura é feita na parte superior da viga, causando a ocorrência de fissuras no topo da seção, perto da laje. Essas fissuras podem se espalhar por toda viga anulando a eficiência do reforço (MBT, 1998, *apud*, BEBER, 2003). Auxilia na ancoragem do sistema de combate a flexão. Envolvimento lateral conforme a terceira representação da FIG.23 (c): dentre os outros métodos citados a cima, este é o menos eficaz. Sua eficiência é limitada devido aos possíveis problemas de ancoragem, ou seja, está mais propício ao descolamento (BEBER, 2003).

Figura 23 – Configurações possíveis ao cisalhamento: (a) Envolvimento total, (b) tipo U e (c) lateral.



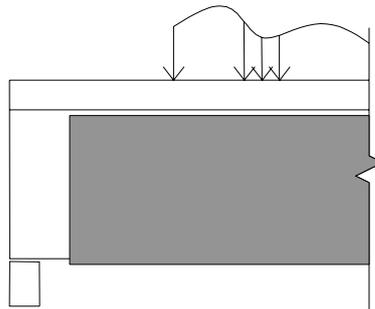
Fonte: Beber (2003). Adaptado pela autora

O reforço transversal (lateral) pode ser feito de forma contínua, ou em forma de tiras ou bandas, apropriadamente espaçadas. As FIG.24 e FIG.25 mostram os dois tipos de reforço. O uso de tiras apresenta eficiência no que diz respeito a otimização do material. Pesquisadores

indicam uma economia de até 40% no consumo de compósito de PRFC para o mesmo acréscimo na resistência ao cisalhamento (KHALIFA et al, 1998, *apud*, BEBER, 2003).

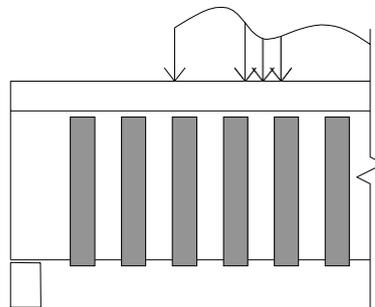
Beber (2003) ainda afirma que se for necessário o reforço por todo o comprimento da viga, o uso de tiras proporciona ao concreto permeabilidade, viabilizando, assim, a passagem da umidade.

Figura 24 – Reforço transversal de forma contínua



Fonte: Beber (2003)

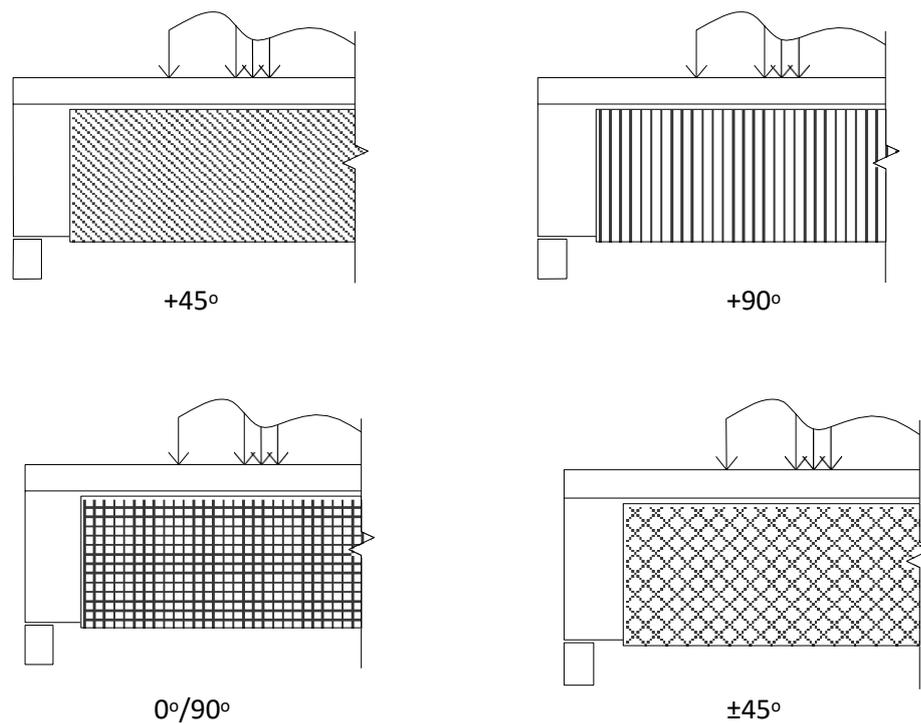
Figura 25 – Reforço transversal em tiras



Fonte: Beber (2003)

A orientação das fibras no momento de aplicação do reforço é o que determina sua eficiência, podendo ser aplicadas tanto na vertical quanto no sentido inclinado, de acordo com a FIG. 26. Em algumas ocasiões, podem ser aplicadas em duas camadas ortogonais entre si, onde o objetivo é que a primeira camada faça a absorção da maior parte dos esforços e a segunda dê melhor aderência a primeira camada, diminuindo assim a ocorrência de fissuras (ARAÚJO, 2014).

Figura 26 – Orientação das fibras de PRFC



Fonte: Beber (2003)

#### 2.4.2 Reforço de lajes à flexão

De acordo com Machado (2021), conforme o caso das vigas, as lajes podem ser reforçadas à flexão com lâminas de fibras de carbono posicionadas segundo as duas direções (x, y) como pode ser observado na FIG.27.

Segundo Oliveira (2020) o recomendável é deixar partes de concreto sem a aplicação do compósito, para facilitar a migração da umidade e para a estrutura ser monitorada periodicamente. As cargas atuantes podem ser determinadas da mesma forma que é feito em lajes maciças, seguindo as diretrizes da NBR 6118 (2014).

Figura 27 – Reforço de lajes à flexão



Fonte: Machado (2021)

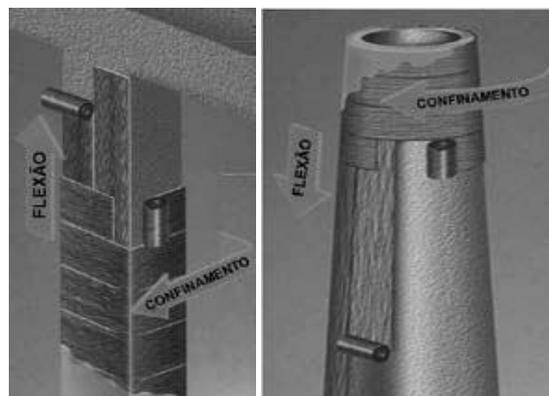
### 2.4.3 Reforço de pilares e colunas

O reforço com compostos de fibras de carbono pode ser aplicado em pilares, aumentando a resistência e ductilidade. O reforço é garantido pelo confinamento, viabilizado pela colocação das fibras transversalmente ao eixo (ACI, 2008), conforme a FIG.28.

Pode ser aplicado em peças que estão sofrendo carregamento axial, resultado dos esforços de compressão (MACHADO, 2011, *apud*, SOUZA, 2014).

Existem duas formas distintas de se fazer o reforço em pilares e colunas, sendo elas: aumento de sua resistência à flexão e o aumento de sua resistência à compressão axial por meio de confinamento. É imprescindível ressaltar que o reforço por flexão deverá sempre ser instalado primeiro seguido do reforço para o confinamento. Este modo de execução tem como função garantir a condição denominada “colagem crítica” para o reforço à flexão, onde é reivindicada uma aderência íntima entre o concreto e o sistema composto, e para o reforço por confinamento a condição chamada de “contato íntimo”, onde as necessidades de aderência entre o sistema composto e o concreto não são obrigatórias e sim as necessidades de contato (MACHADO, 2021).

Figura 28 – Reforço em pilares e colunas



Fonte: Machado (2011)

### 2.5 Vantagens e desvantagens do sistema composto de fibra de carbono

Beber (2003) aponta várias vantagens do CFC comparado aos materiais usualmente utilizados para reforço, dentre elas podem ser citadas:

- Alta resistência e rigidez – Em aplicações como reforço estrutural, os compósitos usados têm valores de resistência de 3 a 5 vezes maior que do aço;

- Massa específica reduzida - A densidade dos compósitos equivale apenas cerca de 20% da densidade do aço;
- Facilidade de transporte e manuseio - Os compósitos são tão leves que, um homem consegue transportar uma chapa de material compósito de 20 metros de comprimento.
- Versatilidade de projeto – Não há limitações de comprimento para os compósitos, e é aceitável aplica-los em várias camadas em alguma situação particular;
- Menor necessidade de fixação - Mantas flexíveis e laminados pré-fabricados de material compósito possuem menores espessuras que chapas de aço com capacidade equivalente. Isto contribui para a redução de efeitos das tensões que levam ao descolamento do reforço, diminuindo a demanda do uso de elementos para a ancoragem e fixação dos reforços;
- Durabilidade - Os materiais compósitos não passam por deterioração vinda da ação de agentes agressivos, químicos, físicos ou biológicos. Contudo, deve se atentar de forma especial à ação da radiação ultravioleta;
- Resistência à ação do fogo - Os materiais compósitos têm menor condutividade térmica que o aço, o que acaba por reduzir o efeito do fogo na parte interna do adesivo. O material compósito carboniza ao invés de queimar, o que mantém o reforço operante por um período maior do que o reforço com chapa de aço colada (FIB, 2000, *apud*, BEBER, 2003).
- Manutenção - Os materiais compósitos não precisam de manutenção periódica, o que causa uma leve redução dos custos globais adicionais deste sistema de reforço;
- Menor tempo de interdição - Muitas das vantagens mencionadas acima se combinam, viabilizando a instalação de sistemas de reforço com compósitos em menor tempo, principalmente quando comparado ao sistema de reforço com chapas de aço. Deste modo, os custos de instalação, devido ao tempo, serão menores comparados aos outros métodos, ocorre também a diminuição do tempo de interdição de uma edificação para a aplicação do reforço;
- Protensão - A chance de se protender os materiais compósitos cria novas concepções para a sua aplicação. O uso de materiais compósitos pode ser feito para substituir sistemas de protensão comprometido, proporcionando aumento da resistência ao cisalhamento pelo estímulo de tensões longitudinais. Podendo inibir a formação de fissuras, proporcionando um aumento do estado limite de utilização da estrutura.

De acordo com Bronze (2016) os sistemas compostos de fibra de carbono não envolvem geração de entulho em suas aplicações, o que contribui para diminuição de custos adicionais, como de fretes e retirada de entulho.

Como desvantagens, os materiais compósitos apresentam uma intolerância em relação à preparação da superfície. Uma superfície que não foi preparada corretamente e apresenta irregularidade pode levar à possibilidade de modos de ruptura frágeis, junto ao destacamento do reforço (SWAMY e MUKHOPADHYAYA, 1995, *apud*, BEBER, 2003). O custo dos materiais compósitos é maior do que outros materiais utilizados como reforço, como as chapas de aço que possuem a mesma resistência. Deste modo, o custo é o que mais influencia ao se avaliar outras alternativas de técnicas de reforço. Conforme visto nas vantagens citadas acima, para o caso de novas técnicas, o custo acaba por se reduzir à medida que aumentam o número de fornecedores e empresas neste mercado. Ao se comparar custos entre as diversas técnicas de reforço disponíveis não devem ser considerados apenas o custo dos materiais, mas outros fatores como a mão-de-obra e os custos para execução de cada etapa. O uso de sistemas compósitos tem mostrado ser a solução mais econômica (HOLLAWAY e LEEMING, 1999).

Segundo Machado (2002), ao utilizar o sistema composto de fibras de carbono como reforço e levando em consideração que ele é colado a parte externa da superfície do substrato, é de extrema importância que seja feita a verificação de sua resistência ao fogo. Desta forma esses sistemas compostos devem atender as normas e códigos existentes. É necessário que seja avaliada a resina epoxídea a ser utilizada em relação ao seu potencial de geração de fumaça e propagação de chama. Também deve ser observada a resistência ao fogo da estrutura de concreto após ser reforçada, uma vez que resina determinará a resistência ao fogo. Podendo ser termoplástica, ou seja, fundir e solidificar várias vezes e as termoestáveis que não voltam ao estágio inicial depois de submetidas ao aquecimento. Sendo, portanto, necessária a aplicação de proteções especiais quando as fibras de carbono forem diretamente expostas ao fogo .

### 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O aumento significativo das obras de reforço em estruturas de concreto armado resulta, sobretudo, da existência de uma quantidade cada vez maior de estruturas que estão tendo problemas estruturais relativos às cargas para as quais foram projetadas ou que estão atingindo o fim da sua vida útil de projeto. Tais estruturas necessitam de intervenções para restaurar sua resistência inicial e/ou aumentar sua capacidade resistente em função de alterações dos carregamentos atuantes.

O reforço em estruturas de concreto armado utilizando compósitos de fibra de carbono aumenta, consideravelmente, a capacidade portante da estrutura o que é uma vantagem quando comparado com outros materiais de engenharia tais como concreto e chapas de aço.

Além da resistência e rigidez, as fibras de carbono possuem excelente resistência à fadiga, características de amortecimento de vibrações, resistência térmica e estabilidade dimensional.

Os sistemas compostos de fibra de carbono podem ser utilizados em manifestações patológicas de grande ocorrência como fissuras, trincas e corrosão das armaduras. Os mesmos combatem esforços como flexão e corte (cisalhamento) com muita eficiência.

Os compósitos usados possuem valores de resistência cerca de 3 a 5 vezes maior que do aço, são leves e maleáveis, o que facilita o transporte. Vale ressaltar que, a instalação desses sistemas de reforço ocorre em menor tempo, principalmente quando comparado ao sistema de reforço com chapas de aço. Assim como os custos de instalação devido ao tempo serão menores, desta forma também diminui o tempo de interdição de uma edificação. Além disso, sua aplicação não gera entulho o que contribui para diminuição dos custos adicionais.

Deste modo, a recuperação e /ou reforço com fibras de carbono é um método eficiente e adequado tanto para obras de pequeno porte quanto para grandes obras, exigindo a definição de parâmetros rigorosos e análises que descrevam com fidelidade os fenômenos que atuarão nas construções. Como não existe uma norma brasileira que regule o uso dos compósitos de fibra de carbono como reforço estrutural, é papel dos projetistas escolherem o método de dimensionamento caso a caso, sempre alerta aos aspectos como segurança, responsabilidade, economia e contexto ao qual será inserido.

## REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 6118**. Projeto de estruturas de concreto — Procedimento, 2014.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440. 2R-08**: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. USA, 2008.

ANDRADE, J. J. O. **Durabilidade das estruturas de concreto armado: Análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco**. 1997. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

ARAÚJO, I. N. **Dimensionamento de reforço de elementos estruturais de concreto armado usando polímeros reforçados com fibras de carbono**. 2014. Monografia – Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2014.

ARIVABENE, A. C. Patologias em estruturas de concreto armado Estudo de caso. **Revista Especialize On-line IPOG**, Goiânia, v. 01/2015, ed. 10<sup>a</sup>, Dezembro, 2015.

BEBER, A. J. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armadoreforçadas com compósitos de fibra de carbono**. 2003. 317f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

BORGES, I. O. **Estudo de reforço de vigas e lajes com compósitos de fibra de carbono colados**. 2016. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Universidade de Brasília. Brasília, 2016.

BORGES, N. A. **Curso prático de cálculo em concreto armado: projetos de edifícios**. Rio de Janeiro: Imperial Novo Milênio, 2010. 252p.

BRANDÃO, A. M. S.; PINHEIRO, L. M. **Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado: aspectos relativos ao projeto**. Cadernos de Engenharia de Estruturas. EESC. Universidade de São Paulo. São Carlos, 1999.

BRONZE, R. A. **Estudo Comparativo: Uso do sistema de fibras de carbono e sistema convencional para reforço de estruturas de concreto**. 2016. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2016.

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e terapia do concreto armado**. Tradução de M. Celeste Marcondes, Beatriz Cannabrava. São Paulo: PINI, 1988.

CARVALHO, Roberto C.; FILHO, Jasson R. de F. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado: segundo a NBR 6118: 2014**. 4. ed. São Paulo: EdUFScar, 2014.

CASCUDO, O. **Inspeção e Diagnóstico de Estruturas de Concreto com Problemas de Corrosão da Armadura**. In: **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. Editor: Geraldo Cechella Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005.

CLÍMACO, João C. T. S. **Estruturas de concreto armado: fundamentos de projeto, dimensionamento e verificação**. 2ª Edição, revisada. Brasília: Editora Universidade de Brasília: Finatec, 2008.

CORREIA, D. A. L. **Estudo do efeito da percentagem de fibra na resistência à fadiga de compósitos de fibra curta carbono/epóxi**. 2017. Dissertação (Mestrado em engenharia civil). Universidade de Coimbra. Coimbra. 2017.

FERREIRA, Ricardo. **Patologias em estruturas de concreto armado**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Faculdade de Ciências Humanas e Sociais, Monte Carmelo, Minas Gerais, 2018.

GALLARDO, S. M. A. G. **Reforço à Flexão em Vigas de Concreto Utilizando Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono**. 2002. 229 p. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) – Universidade estadual de Campinas, Campinas, 2002.

GIBSON, R.F. (1994). **Principles of composite material mechanics**. McGraw-Hill.

GONÇALVES, Eduardo A. B. **Estudo de patologias e suas causas nas estruturas de concreto armado de obras de edificações**. 2015. 174f. Trabalho de Conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

HELENE, P. R. L. **Introdução da vida útil no projeto das estruturas de concreto**. WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES. São José dos Campos, 2001.

HOLLAWAY, L. C.; LEEMING, M. B. **Strengthening of reinforced concrete structures using externally bonded FRP composites in structural and civil engineering**. 1 ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 1999. 327 p.

JUVANDES, L. F. P. **Aplicações de Compósitos FRP no Reforço de Estruturas**. Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, Porto, 2011.

MACHADO, A. d. P. **Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibra de carbono**. Disponível em: <http://viapol.com.br/media/97576/manual-fibra-de-carbono.pdf>. Acesso em: 15 de novembro de 2021. (Sem data de publicação).

MACHADO, A. d. P. **Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono**. São Paulo: PINI, 2002.

MIOTTO, D. **Estudo de caso de patologias observadas em edificação escolar estadual no município de Pato Branco - PR**. Monografia (Especialização em Construção de Obras Públicas) – Universidade Federal do Paraná: Paraná, 2010.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais: ciência e tecnologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006. 313p.

OLIVEIRA, P. D. **Reforço de um pavimento de concreto armado usando fibras de carbono: estudo de caso**. 2020. Monografia – (Graduação em Engenharia Civil), Universidade de Alagoas, Maceió, 2020.

PIANCASTELLI, E. M. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto Armado. Apostila para Curso de Extensão**, Ed. Depto. Estruturas da Escola de Engenharia da UFRG, Belo Horizonte, 1997.

SOUZA, S. G. **Reforço de estruturas de concreto armado com sistema composto de fibras de carbono**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil), Centro Universitário de Formiga. Formiga, 2014.

SOUZA, V.; RIPPER, T. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. – São Paulo: Pini, 1998.

SÜSSEKIND, J. C. **Curso de Concreto**. 5.ed. Rio de Janeiro, 1987: Globo. v. I.  
THOMAZ, Ercio. **Trincas em edifício: Causas, prevenção e recuperação**. 1ª ed. São Paulo, Pini, 1989.

VASCONCELOS, A. C. **O concreto no Brasil**. Pini. São Paulo, 1992.