

**FACULDADE DOCTUM
DAIANA APARECIDA DO NASCIMENTO
EMANUELLE VALERIANO GOMES**

**REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO COM A
UTILIZAÇÃO DE FIBRAS**

Juiz de Fora
2019

**DAIANA APARECIDA DO NASCIMENTO
EMANUELLE VALERIANO GOMES**

**REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO COM A
UTILIZAÇÃO DE FIBRAS**

Monografia de Conclusão de Curso, apresentada ao curso de Engenharia Civil, Faculdade Doctum de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

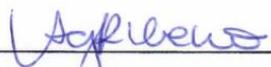
Orientador (a): Prof^a. Mestre Ana Cristina Junqueira Ribeiro

Juiz de Fora
2019

Nascimento, Daiana. Gomes, Emanuelle.
Reabilitação de estruturas em concreto armado com utilização
de fibras / Daiana, Emanuelle - 2019.
89 páginas.

Monografia (Curso de Engenharia Civil) –
Faculdade Doctum Juiz de Fora.

1. Patologia. 2. Reabilitação de estruturas

	FACULDADE DOCTUM DE JUIZ DE FORA	FORMULÁRIO 9
	TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	
TERMO DE APROVAÇÃO		
FOLHA DE APROVAÇÃO		
<p>O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado <u>Reabilitação de Estruturas em concreto armado com a utilização de Fibras</u></p>		
<p>elaborado pelos alunos <u>Daiana Aparecida Nascimento</u> <u>Emanuelle Valeriano Gomes</u></p>		
<p>foi aprovado por todos os membros da Banca Examinadora e aceita pelo curso de <u>Engenharia Civil</u>, como requisito parcial da obtenção do título de Bacharel em <u>Engenharia Civil</u>.</p>		
<p>Juiz de Fora, <u>04</u> de <u>dezembro</u> de 2019.</p>		
<p> _____ Professor Orientador</p>		
<p> _____ Professor Avaliador 1</p>		
<p> _____ Professor Avaliador 2</p>		

AGRADECIMENTOS

Daiana,

Agradeço a Deus primeiramente pela realização desse sonho que parecia ser tão impossível, me tornar uma engenheira civil.

Aos meus amados pais Jesus do Nascimento e Maria Aparecida Marques Nascimento e minha amada irmã Maria Fernanda Nascimento por todo o carinho, por todos os impossíveis que vocês fizeram tornar possíveis para me ajudar, todo apoio nos momentos difíceis, por não terem me deixado desistir e por terem comemorado os bons momentos juntos comigo sou imensamente grata por me ajudarem chegar até aqui. Amo vocês Família!

Agradeço imensamente a minha amiga Emanuelle Valeriano Gomes e dupla neste trabalho, não só nesses como em tantos outros nesses 5 anos, obrigada pela amizade sincera, por todos os momentos que vivemos e tenha certeza que levarei essa parceria para sempre em meu coração, foram muitas dificuldades que passei ao longo desses anos e serei eternamente grata a você por sempre ter estado lá para me oferecer ajuda e apoio. Sou muito grata a sua mãe Gilmara Valeriano e irmã Júlia Valeriano Gomes por sempre me receberem e acolherem como parte da família.

Gostaria de deixar minha muito obrigada a orientadora, professora e amiga, Mestre Ana Cristina Junqueira Ribeiro pela orientação deste trabalho, por apoiar nossa ideia e nos guiar pelo melhor caminho. Nesses anos que passei pela faculdade aprendi muito em suas aulas e levarei para sempre o conhecimento assimilado em suas aulas. Agradeço pelo estágio que fiz sob sua supervisão, no Escritório Escola da faculdade Doctum, lá eu aprendi com você um dos trabalhos mais nobres que o ser humano pode exercer, aplicar os conhecimentos adquiridos e o saber da profissão seja ela qual for para ajudar o próximo.

E por fim gostaria de agradecer e dedicar esse trabalho ao meu tio querido Jose Romeu do Nascimento que nos deixou esse ano, mas que me ajudou incontáveis vezes, acreditou no meu sonho e sempre impulsionou a ir mais longe, você faz muita falta tio. E a sua filha e minha prima Maria Eduarda Rivelli Nascimento por sempre ir estudar de brincadeira junto comigo nas tardes de fim de semana e me fazer companhia nos estudos.

Cheguei até aqui com a ajuda de cada um de vocês e podem ter a certeza de que sem vocês jamais teria vencido essa jornada. Muito obrigada!

Emanuelle,

Especialmente a minha mãe Gilmara, irmã Julia e irmão Lucas pelo amor, carinho, incentivo nas horas mais difíceis e por todo apoio pela jornada, me fizeram crescer e ser uma pessoa credível pelas minhas capacidades.

A minha melhor amiga Daiana e a sua família, por todo acolhimento, paciência, carinho, amizade, o meu muito obrigada por estarem presentes em toda formação acadêmica.

A empresa Barreto Engenharia LTDA, especialmente a Isabela e ao Ramon, o meu muito obrigado pela oportunidade que me deram de realizar o estágio e me proporcionaram a aplicação dos conhecimentos teóricos, em contexto real de trabalho.

A minha família que sempre acreditou em mim, meu pai Fabiano, minha vó Gilda, tias Neu e Marcelle e tio Rubinho, aos primos Vitor Emanuel e Manuela, obrigada pelo carinho durante todos esses anos.

A minha orientadora Mestre Ana Cristina pela sua dedicação e paciência durante todo o percurso. Seus conhecimentos fizeram grande diferença no resultado final deste trabalho.

A faculdade Rede de Ensino Doctum e a todos os professores pela oportunidade de aprendizado.

Ao Zenoni e a Sônia, por todo apoio que me ajudaram a realizar meu sonho.

A todos, inclusive os que por lapso não tenha referido, aqui deixo a minha mais profunda gratidão.

RESUMO

NASCIMENTO, DAIANA; GOMES, EMANUELLE. **Reabilitação de estruturas em concreto armado com utilização de fibras**. 89 páginas. Monografia de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia civil). Faculdade Doctum, Juiz de Fora, 2019.

As estruturas de concreto armado podem apresentar falhas ao longo de sua vida útil comprometendo sua durabilidade e os motivos do surgimento da patologia, que na engenharia civil, tem suas causas devido ao tipo de material empregado na construção, erros de projeto, erros na execução de projeto, no mau uso e na falta de manutenção. O objetivo deste trabalho é apresentar uma forma de reabilitar a estrutura fissurada pelo surgimento e desenvolvimento de patologias ao longo de sua vida útil garantindo assim o seu desempenho, apresentando os procedimentos de recuperação da estrutura danificada e a técnica de reforço utilizando fibras de alto desempenho coladas com resinas que formam um compósito chamado de PRF (Polímero Reforçado com Fibras) que fornecem o retardamento das fissuras em vigas, lajes e pilares e grande acréscimo de resistência nas peças reabilitadas. Este trabalho de conclusão da graduação é uma revisão bibliográfica e desenvolve uma análise comparativa entre as fibras de aramida, carbono e vidro, com o intuito final de demonstrar sua eficácia quando utilizadas como reforço estrutural.

Palavras-chave: Patologias - Reabilitação de estruturas – FRP.

ABSTRACT

Reinforced concrete structures may fail during their lifetime, compromising their durability and the reasons for the emergence of the pathology, which in civil engineering has its causes due to the type of material used in construction, design errors, errors in the execution of design, misuse and lack of maintenance. The aim of this paper is to present a way to rehabilitate the cracked structure by the emergence and development of pathologies throughout its useful life thus ensuring its performance, presenting the damaged structure recovery procedures and the reinforcement technique using high performance fibers bonded with resins that form a composite called Fiber Reinforced Polymer (FRP) that provide retardation of cracks in beams, slabs and columns and greatly increased strength in rehabilitated parts. This undergraduate paper is a literature review and develops a comparative analysis between aramid, carbon and glass fibers, with the ultimate aim of demonstrating their effectiveness when used as structural reinforcement.

KEYWORDS: Pathologies - Structural Rehabilitation - FRP.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fissuras de flexão em vigas	38
Figura 2 : Fissuras de flexão próxima aos apoios	38
Figura 3: Fissuras de flexão na laje.....	39
Figura 4: Fissuras causadas pela compressão em vigas e lajes	39
Figura 5: Fissuras por cisalhamento em viga	40
Figura 7 : Fissuras por corrosão em viga, pilar e laje.	41
Figura 8: Fissura na viga com mancha de corrosão	42
Figura 11: Fissuras causadas por incêndio	44
Figura 12: Técnicas de reforço.....	47
Figura 13: Componentes da aplicação do PRF	49
Figura 14: Composição da resina epóxi	51
Figura 15: Resina de impregnação	52
Figura 16: Resina de regularização.....	52
Figura 17: Tela de fibra de aramida	54
Figura 18: Fibra de aramida	55
Figura 19: Representação gráfica de diversos tipos de reforço com CFRP.....	57
Figura 20 : Algumas formas disponíveis da fibra de carbono.	58
Figura 21: Tela de fibra de vidro.....	59
Figura 22: Formas disponíveis de fibra de vidro: Manta (arbitrariamente orientada) e tecidos com orientação a 0 a 90°.	60
Figura 23: Tensões atuante entre o PRF e o concreto	66
Figura 24: Modos de ruptura em vigas	67
Figura 25: Remoção do concreto degradado	68
Figura 26: Injeção de fissuras	69
Figura 27: Formas de aplicação do PRF.	70

Figura 28: Sistema pré-fabricado	71
Figura 29: Possibilidade de posição da fibra para reforço	72
Figura 30: Colagem como reforço ao cisalhamento	72
Figura 31: Série de aplicações do FRP	73
Figura 32: Reforço de vigas e lajes a flexão.....	75
Figura 33: Reforço de vigas ao cisalhamento.	76
Figura 34: Aplicação de FRP em vigas a 45°.	76
Figura 35: Reforço de pilares a compressão	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Ações ambiente.....	35
Quadro 4: Vantagens e desvantagens das fibras	64
Quadro 5: Vantagens e desvantagens das fibras utilizadas em reforços de estruturas	65
Quadro 6: Modos de rupturas segundo a relação vão x altura da viga	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o revestimento nominal para $c=10\text{mm}$	41
Tabela 2: Comparativo entre fibras de alto desempenho	63
Tabela 3: Modos de ruptura	79
Tabela 4: Fibra de alto desempenho - carbono	84
Tabela 5: Fibra de alto desempenho - vidro	85
Tabela 6: Fibra de alto desempenho - aramida	87

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Análise percentual das causas de problemas patológicos	36
Gráfico 2: Fases de um incêndio.....	43
Gráfico 3: Relação entre resistência à ruptura e temperatura na fase de incêndio ...	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
ACI	AMERICAN CONCRETE INSTITUTE
FIB	FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BETÓN
ISIS	INTELLIGENT SENSING FOR INNOVATE STRUCTURES
NBR	NORMA BRASILEIRA REGULAMENTADORA
PRF	POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS
PRFA	POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRA DE ARAMIDA
PRFC	POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRA DE CARBONO
PRFV	POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRA DE VIDRO
VUP	VIDA ÚTIL DE PROJETO

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Graus Celsius
%	Por cento
Y	Peso específico
μ	Mu (10^{-3})
a	Vão de cisalhamento
cm	Centímetro
d	Altura útil
GPa	Giga-Pascal
g/m	Grama por metro
g/m ²	Grama por metro quadrado
KN	Kilo-Newton
m	Metro
MPa	Mega-Pascal
mm	Milímetro
wk	Abertura das fissuras

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	28
2. OBJETIVOS.....	29
2.1 OBJETIVO GERAL.....	29
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	29
3. JUSTIFICATIVA.....	29
4. METODOLOGIA.....	30
5. ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO.....	31
5.1 CONCRETO ARMADO.....	31
5.1.1 EXECUÇÃO.....	32
5.2 VIDA ÚTIL/ DURABILIDADE.....	32
5.2.1 DETERIORAÇÃO.....	34
5.3 DESEMPENHO.....	35
5.4 AÇÕES AMBIENTE.....	35
6 PATOLOGIA DA ESTRUTURA.....	36
6.1 FISSURAS.....	36
7 REABILITAÇÃO EM ESTRUTURA DE CONCRETO COM PRF.....	45
7.1 RECUPERAÇÃO DA ESTRUTURA.....	46
7.2 REFORÇO DA ESTRUTURA.....	47
7.3 PRF (POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS).....	47
7.3.1 COMPÓSITO.....	50
7.3.2 FIBRAS DE ALTO DESEMPENHO.....	53
7.4 MODO DE RUPTURA.....	65
7.5 PROCESSO CONSTRUTIVO DOS SISTEMAS COMPOSTOS.....	68
7.5.1 RECUPERAÇÃO DO SUBSTRATO DE CONCRETO.....	68
7.5.2 EXECUÇÃO DO REFORÇO COM PRF.....	70
8. ANÁLISE.....	75
8.1 REFORÇO A FLEXÃO, CISALHAMENTO OU COMPRESSÃO.....	75
8.2 FADIGA.....	77
8.3 TEMPERATURA.....	78
8.4 CORROSÃO.....	78

8.5 RUPTURA.....	79
9 RESULTADOS	83
10 CONSIDERAÇÃO FINAL.....	89
REFERÊNCIAS	91
APÊNDICES	98
APÊNDICE 1: VIDA ÚTIL	98

1 INTRODUÇÃO

A engenharia tem o comprometimento com a sociedade de gerar formas econômicas e sustentáveis para se construir. Uma das maneiras de se reduzir esses impactos é a adequação dos processos construtivos e de reparos para que as construções se tornem duradouras, uma vez que não se constrói para que as estruturas em um curto espaço de tempo se degradem e tenham pouco tempo de vida útil e durabilidade (ALMEIDA, 2016).

Com o passar do tempo a construção civil vem buscando melhorias, aperfeiçoamentos e inovações tecnológicas. Existem diversas técnicas construtivas, abundância de materiais disponíveis no mercado e sendo desenvolvidos para realização de reparações nas estruturas (ZUCCHI, 2015).

Apesar de que há milhares de anos o homem vem desenvolvendo e aperfeiçoando os materiais, técnicas e métodos, fortalecendo, portanto o desenvolvimento da construção, sabe-se que ainda existem falhas nessa busca por aprimoramento e essas falhas estão diretamente ligadas a deterioração, imprudência, negligência e acidentes que influenciam algumas estruturas a manifestar desempenho inábil (SOUZZA E RIPPER, 1998).

De acordo com Zucchi (2015), perante tanta inovação manifestou-se inúmeras patologias derivadas do mau uso das propriedades dos materiais, falta de utilização de técnicas adequadas para uma construção, erros em projetos como também na execução dos empreendimentos.

Por meio do avanço sem controle da construção civil e a busca em amenizar custos e prazos de entrega, surgiu o aparecimento constante de vários de tipos de exposições patológicas. Portanto é imprescindível reforçar que se deve projetar não somente estruturas que suportem cargas de projeto, mas também que sejam estruturas duradouras. Uma estrutura durável é aquela que mantém seu desempenho mesmo que expostas em determinadas circunstâncias ambientais ao longo de toda sua vida útil sem alteração de suas características (ALMEIDA, 2016).

De acordo com Sousa (2008), o conceito de reabilitação incorpora as ações de reparo e reforço ou a combinação das duas para que uma estrutura seja novamente habilitada a cumprir o desempenho para o qual foi projetada ou responder a novas condições de projeto e exigências de desempenho.

Desta forma o atual trabalho pretende demonstrar os tipos de fibras capazes de contribuir ao avanço das principais técnicas de reforço a flexão, ao cisalhamento e a compressão.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo do trabalho é fazer uma revisão bibliográfica sobre reabilitação de estruturas fissuradas por esforços de cisalhamento, compressão e flexão utilizando a colagem de polímeros reforçados com fibras de aramida, carbono e vidro.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Identificação da patologia fissura na estrutura de concreto armado;
- Caracterizar os diferentes tipos de fibras utilizados em reabilitação estrutural;
- Apresentar os procedimentos de execução na reabilitação estrutural com colagem de PRF (Polímeros Reforçados com Fibras de Aramida, Carbono ou Vidro);
- Análise dos autores sobre o comparativo entre as fibras.

3. JUSTIFICATIVA

Existe uma carência a respeito do ganho do saber sobre os elementos utilizados para reforçar ou recuperar estruturas danificadas e as técnicas de aplicabilidade destes elementos, já que com o crescimento da construção civil as manifestações patológicas se fazem presentes. Na época atual uma grande parte das construções está com sua durabilidade prejudicada em consequência de falta de manutenção ou está chegando ao fim de sua vida útil e com o agravante do surgimento das patologias que comprometem o pleno uso da estrutura se torna imprescindível a reabilitação estrutural (BRITO, 2018).

No Brasil, a utilização do PRF é mais frequente na aplicação de reforço à flexão de vigas e lajes de concreto armado. Em uma escala menos utilizada também se executa o reforço ao cisalhamento de vigas e a compressão de pilares (SANTOS, 2014).

O intuito deste trabalho é apresentar técnica que pode ser usada como medida de reabilitação estrutural utilizando PRF, sendo uma alternativa de intervenção simples, dotada de diversas vantagens, utilidades e ser de fácil aplicação e manuseio, mas que ainda está sendo muito estudado.

É um assunto abordado superficialmente na graduação e há inexistência de normas técnicas brasileiras sobre o referido assunto, portanto será utilizado as propostas normativas da *Fédération Internationale du béton* (FIB), *American Concrete Institute* (ACI), e da Intelligent Sensing for Innovate Structures (ISIS). Desta forma este trabalho será um complemento bibliográfico.

4. METODOLOGIA

O presente trabalho é uma revisão bibliográfica sobre o tema reabilitação das estruturas de concreto armados devido ao surgimento de fissuras.

Os métodos usados na presente pesquisa foram realizados a partir de revisão bibliográfica de caráter qualitativo descritivo de levantamento entre fibras de aramida, carbono e vidro aplicadas na reabilitação estrutural. Para realização do estudo foram utilizadas revistas digitais, artigos científicos, livros e manuais.

A pesquisa tem caráter qualitativo e possui uma ordem cronológica no qual depende dos dados coletados, da dimensão da amostra e os instrumentos utilizados, resultando em uma investigação com aspectos subjetivos (GIL, 2010).

De acordo com Prodanov e Freitas (2013), a pesquisa qualitativa é considerada como uma investigação descritiva, que expõe o maior número possível de fundamentos presentes no estudo. Características básicas da pesquisa qualitativa são a interpretação e atribuição de significados no processo do estudo e não requerer métodos ou técnicas de levantamento numérico.

A metodologia de pesquisa com caráter descritivo segundo Prodanov e Freitas (2013), almeja analisar, registrar e organizar dados, sem manuseá-los, ou seja, o pesquisador somente registra e descreve as referências sem interferir.

5. ESTRUTURA DE CONCRETO ARMADO

As estruturas de concreto armado são compostas por lajes, vigas e pilares, podendo também ser a junção destes elementos, como as escadas, que são ligadas por lajes e vigas (GIONGO, 2007).

Para Bastos (2014), os materiais que compõem o concreto armado, possuem vasta acessibilidade para a sua fabricação, o que gera estruturas de diferentes tipos, como pontes e viadutos, edifícios de múltiplos pavimentos, portos, reservatórios, barragens, pisos industriais, pavimentos rodoviários e de aeroportos, paredes de contenção etc.

5.1 CONCRETO ARMADO

Tendo em vista a necessidade de se utilizar um material que apresenta boa resistência a compressão, o concreto foi incorporado dentro da construção civil. Ele é obtido através da mistura do cimento, agregado fino (areia), agregado graúdo (brita) e água. Quando é necessário que o concreto possua maior resistência, trabalhabilidade ou retardamento da cura utiliza-se produtos químicos como sílica, polímeros, etc (CARVALHO E FILHO, 2014).

Carvalho e Filho (2014) afirmam que o concreto não pode ser usado como elemento isolado, por possuir como desvantagem baixa resistência à tração, sendo assim, elementos como lajes, vigas, tirantes e outras peças que apresentam flexão, precisam de um material capaz de suportar a tração. Por essa razão, emprega-se o aço, originando o concreto armado (BRONZE, 2016).

A vasta utilização do concreto armado é devido a ele possuir algumas vantagens tais como fácil execução, ser econômico em relação a outros tipos de materiais, possuir boa resistência a solicitações e a compressão, apresentar resistência ao fogo, choque e vibrações, efeitos térmicos, atmosféricos e desgastes mecânicos. No que se refere às desvantagens, o concreto armado possui peso próprio elevado ($\gamma \approx 25 \text{ KN/m}^3$), a propagação térmica e acústica é baixa e tem a necessidade de forma e escoramento (CARVALHO E FILHO, 2014).

Júnior (2013) afirma que para uma estrutura de concreto armado perder sua estabilidade, os erros podem ser associados ao um mal dimensionamento do projeto até uma execução errônea, afetando diretamente a vida útil e durabilidade do material.

5.1.1 EXECUÇÃO

Segundo Carvalho e Filho (2014) para o dimensionamento e execução do concreto armado, visando à obtenção de segurança e qualidade, a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) dispõem de técnicas a serem cumpridas por meio de normas específicas. Com relação ao concreto armado empregam-se as seguintes normas:

- NBR 6118/2014: Projeto de estrutura de concreto armado- Procedimentos;
- NBR 6120/ 2019: Cargas para cálculo de estrutura de edificações- Procedimentos;
- NBR 8681/2003: Ações e segurança nas estruturas- Procedimentos;
- NBR 14931/2004: Execução de estruturas de concreto armado- Procedimentos.

A distribuição das cargas funciona da seguinte maneira, a laje recebe as cargas oriundas das ações permanentes e acidentais, que por sua vez transmite para as vigas, logo após as vigas receberem as ações permanentes da alvenaria. Posteriormente, os pilares recebem as cargas das vigas e distribui para a fundação (GIONGO, 2007).

Bastos (2014) exemplifica a produção de uma estrutura, onde a armadura de aço é posicionada nas fôrmas e posteriormente é lançado o concreto concomitantemente com o adensamento do concreto, que deve aderir ao aço. Logo após as precauções tomadas durante a cura do concreto é retirada as fôrmas gerando peças de concreto armado.

5.2 VIDA ÚTIL/ DURABILIDADE

A vida útil e a durabilidade são conceitos que devem ser trabalhados simultaneamente. Para que uma estrutura tenha a classificação de estável e utilizável a sua funcionalidade deverá estar acima do limite mínimo estabelecido em projeto (JÚNIOR, 2013).

Bertollini (2010) estabelece a vida útil de uma estrutura como o espaço de tempo onde determinada estrutura assegura a sua estabilidade bem como suas funcionalidades para as quais foi projetada.

A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 15575-1 Edificações Habitacionais- Desempenho (2013) determina: A vida útil de uma edificação como o

intervalo de tempo onde há sucessão de todas ações para as quais foi projetada e construída, e que sejam cumpridas usualmente a efetuação dos procedimentos de manutenção.

Já a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 6118 (2014, p. 15) especifica que:

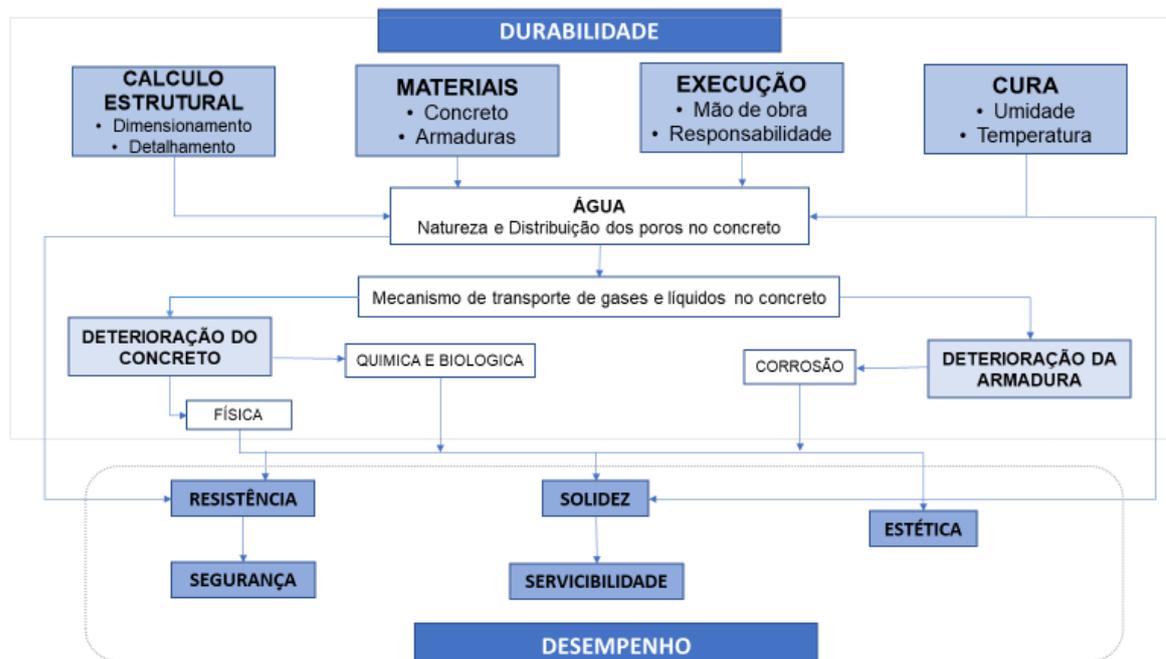
O conceito de vida útil aplica-se à estrutura como um todo ou às suas partes. Dessa forma, determinadas partes das estruturas podem merecer consideração especial com valor de vida útil diferente do todo, como, por exemplo, aparelhos de apoio e juntas de movimentação.

A NBR 15575-1 (2013), define a vida útil de projeto (VUP), conforme apêndice 1, de uma estrutura considerando como elementos estruturais as lajes, vigas e pilares entre outros, como sendo maior ou igual a 50 anos.

A NBR 6118 (2014, p. 13) tem por definição como a durabilidade sendo: “[.] a habilidade de uma estrutura ser tenaz quando exposta as influências ambientais, esses impactos devem ser previstos pelo autor do projeto estrutural preferencialmente no início da concepção do projeto”.

Possan (2010), enfatiza que a durabilidade é inerente a especificidade dos materiais, mas que está ligada com o desempenho deles em determinadas circunstâncias ambientais. O desgaste tem efeito nas transformações nas características mecânicas, físicas e químicas em sua maioria por ação da agressividade do meio ambiente. O fluxograma 1 correlaciona a vida útil e a durabilidade:

Fluxograma 1: Inter-relação entre vida útil e durabilidade



Fonte: Adaptado de Souza e Ripper, 1988.

5.2.1 DETERIORAÇÃO

De acordo com Souza e Ripper (1998), o concreto como objeto de construção é mutável ao passar do tempo, pode sofrer transformações em suas propriedades físicas e químicas em função das particularidades dos elementos e como reagem quando restringidos ao meio ambiente. E como consequência tem-se alterações que comprometem o desempenho estrutural chamada deterioração. E os elementos agressores são denominados de agentes de deterioração.

Ainda de acordo com Souza e Ripper (1998) as causas de deterioração podem ser desde o envelhecimento e desgaste da estrutura, profissionais que usam materiais ínfimos fora das especificações por motivos econômicos, até os acidentes.

Segundo Bauer (2012, p. 409): “[...] a maioria dos danos apresentados em elementos estruturais, são do tipo evolutivo, ou seja, em um prazo mais ou menos curto, poderão comprometer sua estabilidade.”

Bauer (2012) também relacionou a deterioração de uma estrutura com suas causas relacionadas em grupos. De acordo com a classificação de Bauer o primeiro grupo são os erros no projeto estrutural, o segundo grupo tem-se emprego de materiais inapropriados, a terceira imprecisão na hora da execução e o quarto e último grupo conta com a agressividade do meio ambiente.

Existe uma crescente preocupação com a durabilidade devido aos altos índices de degradação das estruturas nos últimos tempos acarretando elevados custos de manutenção (POSSAN, 2010).

5.3 DESEMPENHO

Compreende-se como o proceder de cada produto ao longo de sua vida útil correspondendo ao resultado do trabalho desenvolvido nas fases de projeto, construção e manutenção (SOUZA E RIPPER, 1998).

A NBR 6118 (2014), relata o desempenho como a habilidade de a estrutura manter suas condições plenas de uso para a qual foi projetada no decorrer de sua vida útil.

Bertolini (2010), atribui o declínio gradativo do desempenho que um elemento de construção sofre aos efeitos do ambiente, que provoca alteração nos materiais empregados na construção.

5.4 AÇÕES AMBIENTE

Bertolini (2010), classifica as ações físico-químicas dos ambientes que os materiais estão sujeitos conforme o quadro 1:

Quadro 1: Ações ambiente

Ações químicas	Preveem uma interação do tipo químico entre o material e as substâncias presentes no ambiente; são específicas para cada material, como, por exemplo: a corrosão dos metais (generalizadas, localizada, sob tensão), o ataque por sulfatos ao concreto, o ataque ácido as rochas, o ataque alcalino ao vidro, etc.
Transporte nos materiais porosos	No caso dos materiais porosos (como os concretos, os tijolos, as rochas), as substâncias agressivas, tanto em estado gasoso como líquido, podem penetrar através dos poros e, portanto, agredir o material não só a partir da superfície, mas a partir de seu próprio interior. Os principais mecanismos que proporcionam este transporte são: a difusão, a permeabilidade, a absorção capilar, a migração elétrica (transporte de íons) e os fenômenos eletrocinéticos (por exemplo, a eletro-osmose).
Variação de umidade	As variações de umidade produzidas pela exposição ao ambiente podem determinar variações dimensionais em alguns materiais; quando estas variações são bloqueadas, podem gerar pressões no material que podem danificá-lo.
Variações de temperatura	Determinam variações dimensionais que, se bloqueadas, podem danificar o material; os efeitos das variações de temperatura podem ter consequências muito sérias em caso de incêndio, mesmo no caso de materiais não combustíveis.
Ações expansivas	Fenômenos da natureza física ou mesmo da natureza química podem determinar ações expansivas que podem danificar sobretudo aos materiais porosos e frágeis, como no caso do gelo/degelo ou mesmo da cristalização salina.

Fonte: Adaptado de Bertolini, 2010.

Todos os fenômenos citados no quadro 1 com o tempo podem conduzir a uma perda de desempenho das funcionalidades para as quais foi projetada e comprometer a utilização da estrutura (BERTOLINI, 2010).

6 PATOLOGIA DA ESTRUTURA

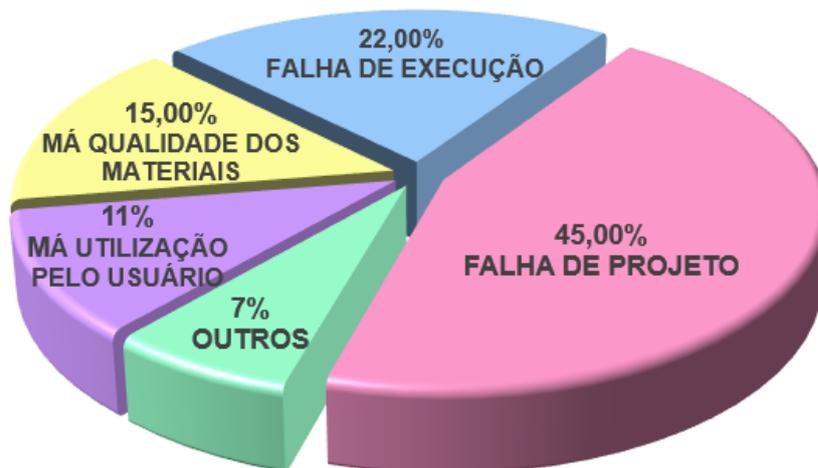
Patologia estrutural está relacionada ao estudo de quais foram as origens, causas e consequência que acarretaram a degradação da estrutura. É manifestada em forma de fissuras, corrosão e recalque diferencial da fundação, sendo que, se não for tratada a tempo, pode comprometer a segurança da edificação (LAPA, 2008).

Souza e Ripper (1998, p.23), afirmam que:

[...] o surgimento de problema patológico em dada estrutura indica, em última instância e de maneira geral, a existência de uma ou mais falhas durante a execução de uma das etapas da construção, além de apontar para falhas também no sistema de controle de qualidade próprio a uma ou mais atividades.

Trindade (2015), afirma que os erros oriundos no planejamento do projeto estrutural é o que mais provoca manifestação patológica, conforme demonstra o gráfico 1.

Gráfico 1: Análise percentual das causas de problemas patológicos



Fonte: Adaptado de Bronze, 2016.

6.1 FISSURAS

Cunha (2011), admite que a fissura é a patologia que surge com maior grau de incidência nas edificações, podendo haver diversas origens, seja por erros no projeto estrutural, na execução da edificação, por incorreta utilização de materiais na concretagem ou inadequada utilização da estrutura. O colapso estrutural advém da

abertura excessiva das fissuras, promovendo a perda de rigidez e, por conseguinte a ampliação de flechas nos elementos fletidos. Bauer (2012), complementa que com a abertura da fissura o risco da corrosão no concreto e a penetração de agentes agressivos externos são maiores.

A NBR 9575 – Impermeabilização – Seleção e Projeto (2010) especifica que as fissuras, microfissuras e trincas são formadas pelo rompimento de uma substância ou material. E são classificadas de acordo com a abertura, sendo que a abertura da fissura é até 0,5mm , já as da microfissuras são inferiores a 0,05mm e as trincas variam de 0,5mm a 1mm.

A NBR 6118 (2014) reconhece que devido ao concreto não suportar bem a tração, é inevitável a abertura das fissuras, conseqüentemente ela estabelece o estado limite de fissuras (ELS-W), no qual as aberturas das fissuras (**w_k**), não devem ultrapassar o limite, conforme o quadro 2.

Quadro 2: Exigências de durabilidade relacionada à fissuração e à proteção da armadura, em função das classes de agressividade ambiental

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de protensão	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto simples	CAA I a CAA IV	Não há	–
Concreto armado	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,4$ mm	Combinação frequente
	CAA II e CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3$ mm	
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré-tração com CAA I ou Pós-tração com CAA I e II	ELS-W $w_k \leq 0,2$ mm	Combinação frequente
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré-tração com CAA II ou Pós-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação frequente
		ELS-D ^a	Combinação quase permanente
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré-tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação rara
		ELS-D ^a	Combinação frequente
^a A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com $a_p = 50$ mm (Figura 3.1). NOTAS 1 As definições de ELS-W, ELS-F e ELS-D encontram-se em 3.2. 2 Para as classes de agressividade ambiental CAA-III e IV, exige-se que as cordoalhas não aderentes tenham proteção especial na região de suas ancoragens. 3 No projeto de lajes lisas e cogumelo protendidas, basta ser atendido o ELS-F para a combinação frequente das ações, em todas as classes de agressividade ambiental.			

Para minorar a fissura nas peças estruturais, deve-se conhecer sua origem, o grau da intensidade e magnitude para reconhecer que a estrutura tem uma deficiência (HELENE, 1986).

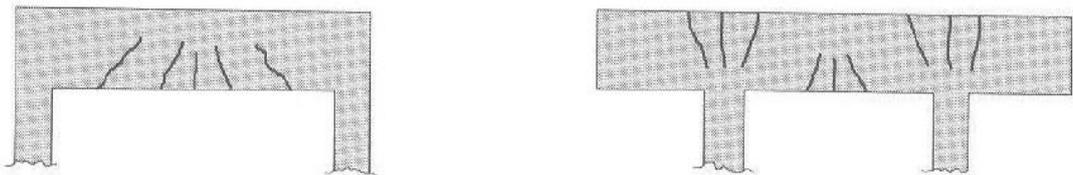
A ação externa mais influente que gera as fissuras, é a tensão de tração, sendo elas a flexão, cisalhamento, punção, torção e em pequenas ocorrências a de pretensão (FILHO E CARMONA, 2013).

• FISSURA CAUSADA PELA FLEXÃO

Thomaz (1989), afirma que, as causas mais prováveis da ocorrência de fissuras por flexão, conforme a figura 1 e 2, são:

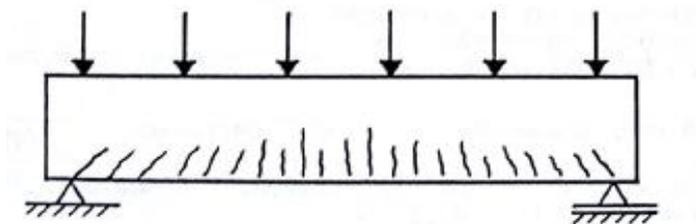
- Erros do engenheiro responsável pela concepção do projeto estrutural quando se faz uma má avaliação da carga atuante na estrutura;
- Utilização incorreta dos materiais durante a execução da obra;
- Aplicação de sobrecarga que não se atenha ao projeto.

Figura 1: Fissuras de flexão em vigas



Fonte: Helene, 1992.

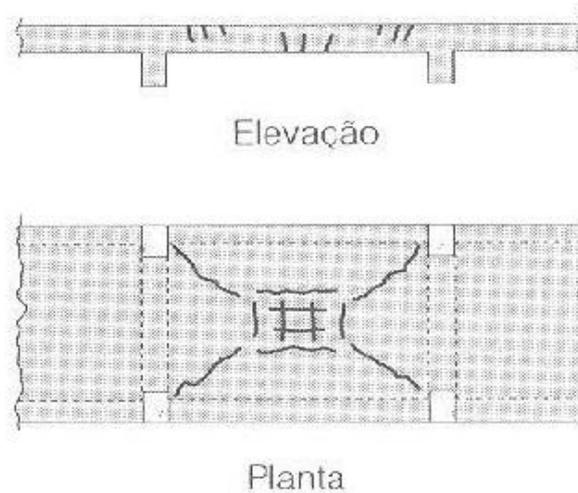
Figura 2 : Fissuras de flexão próxima aos apoios



Fonte: Thomaz, 1989.

Nas lajes, as fissuras não têm uma direção, conforme a figura 3, como nas vigas, pois elas dependem da relação entre a largura e o comprimento, os tipos de vinculação, solicitações externas atuantes (MARCELLI, 2007).

Figura 3: Fissuras de flexão na laje

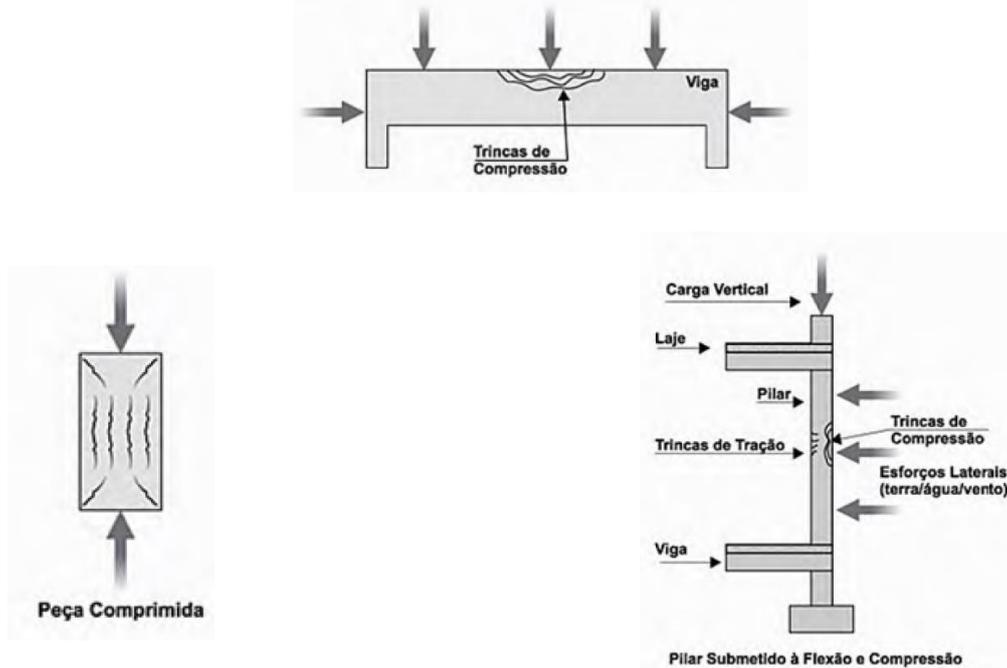


Fonte: Helene, 1992.

• FISSURA CAUSADA POR COMPRESSÃO

Fissuras causadas por compressão, como na figura 4, tem caráter emergencial, pertinente ao concreto possuir como vantagem a absorção dos esforços por compressão, sendo assim, a peça quando comprimida, não suporta mais tal esforço o que resulta em uma redistribuição das cargas gerando assim uma sobrecarga no pilar mais próximo (MARCELLI, 2007).

Figura 4: Fissuras causadas pela compressão em vigas e lajes

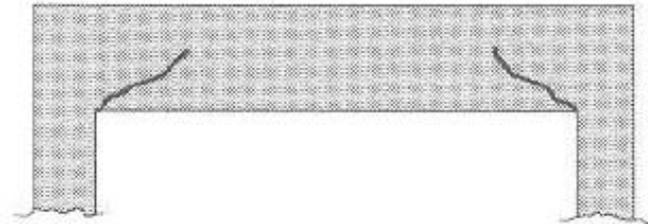


Fonte: Marcelli, 2007.

- **FISSURA CAUSADA POR CISALHAMENTO**

As fissuras causadas por cisalhamento, conforme a figura 5 aparentam onde o esforço da cortante é máxima pertinente a peça possuir excesso de carga, seção insuficiente ou a armadura não estar disposta para combater tal esforço (MARCELLI, 2007).

Figura 5: Fissuras por cisalhamento em viga



Fonte: Marcelli, 2007.

- **FISSURA CAUSADA POR CORROSÃO**

Conforme Costa (2013), a corrosão no concreto armado ocorre devido ao contato direto do oxigênio e umidade com o aço exposto.

O processo corrosivo surge com maior incidência na execução do concreto armado, onde alguns cuidados que não são tomados, como (GRANATO, 2002):

- Equívoco no cobrimento da armadura, de acordo com as recomendações da ABNT 6118;
- Excesso de água no concreto, gerando um concreto poroso e com fissuras de retração;
- Falta da cura no concreto, provocando a ocorrência de fissuras.

A corrosão reduz a seção da peça estrutural e aderência entre concreto e aço, conseqüentemente minimiza a resistência do material. A capacidade de deformação e resistência à fadiga também são afetadas. Sendo assim, a corrosão possui um maior impacto na durabilidade da estrutura, o que afeta diretamente a vida útil e deterioração estrutural (ALBERGARIA, 2013).

A não ser que o concreto seja bem executado permitindo a proteção do aço contra a corrosão, sendo essa a finalidade do cobrimento de concreto, desde que não

possua “ninhos”, tenha teor de argamassa ideal e homogêneo (HELENE, 1986). O cobrimento deve atender o pressuposto pela NBR 6118 (2014) conforme na tabela 1:

Tabela 1: Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $c=10\text{mm}$.

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV ^c
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ^b	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ^d	30		40	50
Concreto protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

^a Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

^b Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal $\geq 15\text{ mm}$.

^c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

^d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal $\geq 45\text{ mm}$.

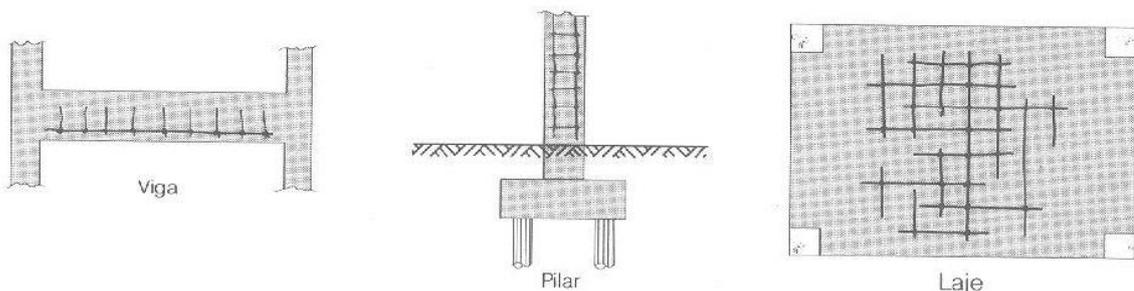
Fonte: NBR 6118, 2014.

De acordo com a NBR 6118 (2014, p. 16):

Classe de agressividade do meio ambiente está relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto, independentemente das ações mecânicas, das variações volumétricas de origem térmica, da retração hidráulica e outras previstas no dimensionamento das estruturas.

Segundo Marcelli (2007), as fissuras causadas por corrosão, conforme a figura 6 são as mais frequentes e devem ser tratadas emergencialmente para não acelerar o processo de ruptura da estrutura.

Figura 6: Fissuras por corrosão em viga, pilar e laje.



Fonte: Helene, 1992.

Em peças estruturais onde a presença de corrosão, o aço teoricamente aumenta mais de seis vezes o seu volume, de acordo com o oxigênio presente. Sendo assim, devido o concreto não resistir a tração, surge fissuras estruturais como pode ser observado na figura 7 (ALBERGARIA, 2013).

Figura 7: Fissura na viga com mancha de corrosão



Fonte: Marcelli, 2007.

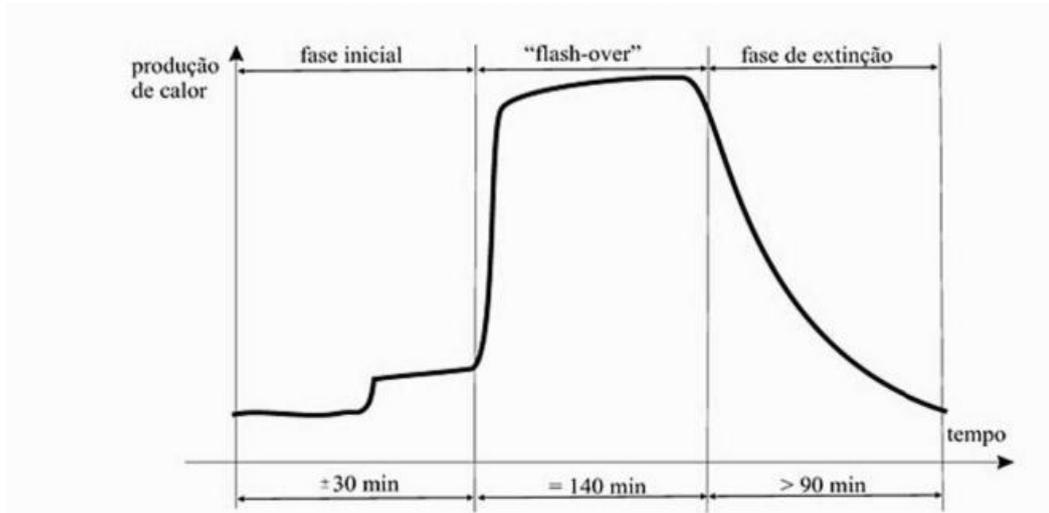
• FISSURA CAUSADA POR INCÊNDIO

O incêndio é um fenômeno derivado de causas de origens naturais (combustão espontânea, raios, etc.), ou artificiais que incluem também os de origem física (curto-circuito, calor por atrito, etc.), química (reações exotérmicas) e biológica (autocombustão), e ainda as consequências da ação do homem sejam elas acidentais, culposas ou dolosas (SOUZA E RIPPER, 1998). A propagação do incêndio ocorre devido à simultaneidade de três elementos: combustível, comburente (oxigênio) e uma fonte de ignição (calor) (VIEIRA, 2017).

Conforme o gráfico 2, a primeira fase descrita como fase de ignição, no qual começa a combustão e ocorre um aumento gradativo da temperatura, sem afetar o comportamento estrutural da edificação. A segunda fase é descrita como a fase de propagação do fogo, onde as chamas atingem os materiais liberando gases inflamáveis e fumaça, e por serem menos densos, acendem para o teto, o ambiente fica com temperatura em torno de 450°C a 600°C. A partir do momento em que as chamas dominam o ambiente e todo o material, é denominado como *flash over*, sendo o mesmo, o ponto mais crítico onde a temperatura atingida é em torno de 1000°C. A

terceira fase descrita como fase de extinção é quando o incêndio começa o declínio até sua extinção, na proporção em que os materiais são consumidos pela chama ou o oxigênio cessa (ALBERGARIA, 2013).

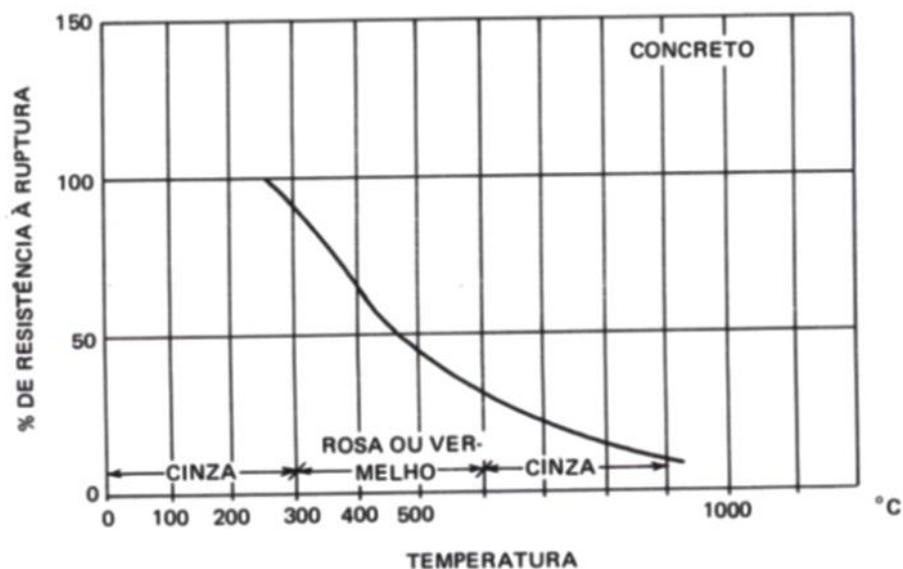
Gráfico 2: Fases de um incêndio



Fonte: Souza e Ripper (1998).

A mudança de cor no concreto armado está relacionada com as temperaturas de exposição, conforme o gráfico 3, no qual relaciona a resistência à ruptura com a temperatura no qual o concreto foi exposto e sua coloração (ALBERGARIA, 2013).

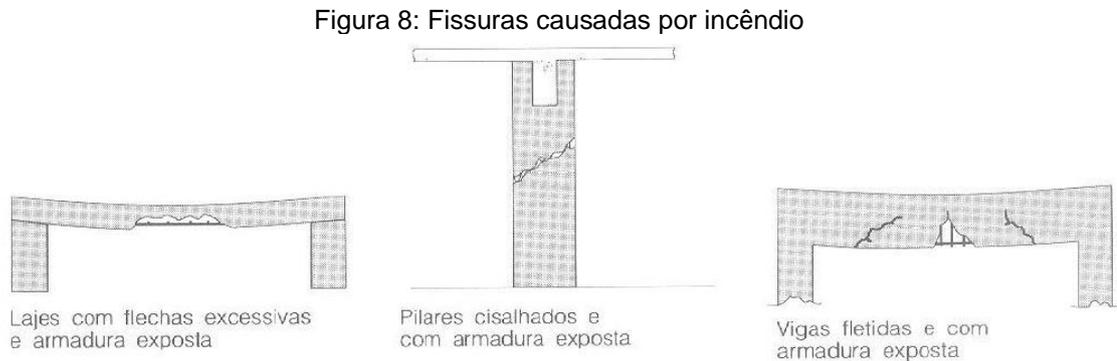
Gráfico 3: Relação entre resistência à ruptura e temperatura na fase de incêndio



Fonte: Bauer (2012).

As peças estruturais que ficam sujeitas a elevadas temperaturas na sua face inferior, estão suscetíveis à ocorrência de deformações evidenciadas e fissuras de

tração e flexão, conforme a figura 8. O calor excessivo pode provocar dilatações das vigas e tendo potencial de fissurar os pilares por cisalhamento e podendo provocar colapso parcial ou total da estrutura (MARCELLI, 2007).



Fonte: Helene, 1992.

- ## FISSURA CAUSADA POR FADIGA

A fadiga é compreendida como método de ruptura que abrange o desenvolvimento e o crescente avanço de uma fissura em um elemento estrutural exposto a um carregamento variável ao longo do tempo. É um fenômeno que tem uma amplitude máxima do carregamento entre as tensões do interior da peça, comprometendo ao longo do tempo a peça gerando fissuras no elemento estrutural (MENEGETTI, 2007).

De acordo com Stein (2016), fadiga é uma ocorrência que está correlacionada a ações dinâmicas repetitivas que pode motivar a diminuição de resistência do material. O concreto possui uma redução em sua capacidade de se deformar e por isso essas alterações são definitivas e pontuais, causando o desenvolvimento de fissuras especialmente em pontos de acúmulo de tensão.

Segundo *Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading - ACI 215R (1991)*, a resistência a fadiga é determinada de acordo com a força estática que a estrutura é capaz de suportar por um número de ciclos, quando sujeita a repetições de carga, ou seja, ela é influenciada pelas cargas, a excentricidade da carga, propriedades dos materiais e condições ambientais.

Meneghetti (2007, p. 102) afirma que

A deterioração progressiva e irreversível do material pode ocorrer após a aplicação de um número muito pequeno de ciclos (fadiga de baixo ciclo que vai de 1 a 1000 ciclos), nos casos de altos níveis de tensão, ou depois de mais de 1000 ciclos (fadiga de alto ciclo), quando o nível de tensão não é elevado.

Aumentando gradativamente o ciclo de carregamento à fissura atinge um tamanho crítico, acarretando o colapso da estrutura de forma silenciosa (GARCEZ, 2007).

De acordo com Stein (2016), o rompimento por fadiga se divide em três fases a primeira fase: em que acontecem a abertura das fissuras na qual os danos são mínimos e prolonga-se de forma gradual, na segunda etapa sucede o desenvolvimento das fissuras onde há danos maiores e piores a cada ciclo de carregamento suportado pela estrutura e na terceira fase ocorre ruptura, ou seja, o comprometimento da estrutura.

7 REABILITAÇÃO EM ESTRUTURA DE CONCRETO COM PRF

Reabilitação é a combinação entre recuperação e reforço, onde a estrutura é capaz de garantir a sua integridade novamente de acordo com as novas ações que possam ser impostas (SOUSA, 2008). Para Santos (2017), a reabilitação preserva os elementos de interesse cultural, histórico e arquitetônico, como resultado, aumenta-se a vida útil, a valorização da estrutura e a qualidade de vida dos usuários.

Santos (2017) afirma que a metodologia empregada na reabilitação é bem heterogênea, onde em alguns casos são feitas obras de modificação, de ampliação ou diminuição de áreas, de remodelação e reforço. Dessa forma, a reabilitação pode integrar com o reforço, porém o inverso não é verídico.

Define-se por recuperação, como a recomposição das peças estruturais, como vigas, pilares e lajes, logo a vida útil da estrutura retorna a ser a inicial calculada em projeto. Já por reforço, deduz que a estrutura não atende as ações solicitantes e com isso presume que houve a perda da resistência residual (RODRIGUES, 2009).

Para determinar o tipo de intervenção, seja ela recuperação, reforço ou a reabilitação da estrutura, deve-se identificar primeiramente a causa da manifestação patológica e definir um estudo sobre o resultado das ações elaboradas. Com a adequada escolha da intervenção, é necessário selecionar cautelosamente o material, a mão de obra e o equipamento utilizados na execução (SOUZA E RIPPER, 1998).

Sousa (2008) afirma que o reforço nas edificações surge devido a diversas causas, sendo elas:

- Degradação estrutural pertinente ao envelhecimento natural, provocada por erros de projetos/construção ou a falta de manutenção;

- Degradação pertinente a ações acidentais, como incêndio, sismo ou explosões;
- Alteração no uso da estrutura;
- Eliminação ou incremento de peças estruturais (vigas, lajes e pilares);
- Expansão da vida útil da estrutura.

Biscaia (2012) complementa sobre outros fatores da degradação como a poluição por irradiação de gases, chuva ácida e ambientes com classe de agressividade salina.

Ao longo do tempo, cresce gradativamente a necessidade de reabilitar a estrutura de concreto armado, em virtude de diversas causas que podem ser analisadas como um todo ou separadas, porém, antes de reabilitar é recomendado levar em conta alguns fatores como (SOUSA, 2008):

- Orçamento da intervenção;
- Limitações arquitetônicas;
- Vida útil pós-reforço;
- Classe de exposição ambiental;
- Mão de obra especializada;
- Tipo de intervenção (reforço/ recuperação).

7.1 RECUPERAÇÃO DA ESTRUTURA

Segundo Rodrigues (2005, p. 1), recuperação é definida quando “[...] uma estrutura visa repor o seu desempenho nos níveis iniciais ou protege-la contra a deterioração futura.”

Para aplicação do PRF (Polímeros Reforçados com Fibras), a superfície do concreto deve estar em bom estado, já que é muito frequente encontrar o concreto armado em estado de deterioração. Com o objetivo de iniciar a reabilitação, previamente recupera o concreto antigo e insere um revestimento com altos atributos mecânicos, a fim de tornar possível a aderência entre o substrato e a fibra (FERRARI, 2007).

Rodrigues (2005), aponta que as técnicas mais utilizadas para a recuperação são a injeção de fissuras com resinas epóxi, restauração com argamassas de reparação ou a modificação do concreto armado por um outro com propriedades superiores.

7.2 REFORÇO DA ESTRUTURA

Pérez (2016) define reforço como “[...] o aumento da capacidade portante da estrutura, sendo executado quando o elemento estrutural não tem mais capacidade para suportar aumento nos esforços de tração, compressão, flexão, cisalhamento, etc.”

De acordo com a NBR 6118 (2014), toda estrutura deve atender a exigências mínimas de qualidade como segurança a ruptura, desempenho em serviço (sem comprometimento da estrutura durante a vida útil) e de durabilidade no decurso da sua concepção estrutural e ao longo da sua vida útil.

Segundo Santos (2017), o reforço quando advém da fase construtiva são devido a erros na execução do edifício, erros de dimensionamento do projeto ou na fabricação do concreto armado. Quando associado à vida útil, o reforço decorre perante a antecipação de ações (sobrecarga) ou caso de acidentes (choques, explosões e incêndios). A autora ainda complementa que o reforço pode decorrer por modificações na edificação que não se atenha ao projeto inicial, excluindo ou inserindo peças estruturais (vigas ou pilares), ou até mesmo aumentando a segurança, aperfeiçoando o comportamento estrutural.

Na construção civil, a diversas técnicas de reforço, conforme a figura 9, como encamisamento das seções, incremento de concreto simples ou armado, adição de chapas metálicas ou perfis metálicos e por colagem de fibras (PERÉZ, 2016). Para a presente pesquisa será abordada a colagem de PRF como alternativa para o reforço estrutural.

Figura 9: Técnicas de reforço



Fonte: <https://www.intech.eng.br/reforco-estrutural/>.

7.3 PRF (POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS)

Em virtude da necessidade de materiais com propriedades como durabilidade e resistência, e que sejam adaptáveis a estrutura de concreto armado, emprega-se os Polímeros Reforçados com Fibras (PRF) ou de sigla internacional “*Fiber Reinforced*

Polymer” (FRP), caracterizados pela alta resistência a tração, baixo peso específico, resistência a corrosão e a fadiga (GUIDE FOR THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF EXTERNALLY BONDED FRP SYSTEMS FOR STRENGTHENING CONCRETE STRUCTURES - ACI 440.2R-02, 2002).

Boto (2015), sustenta que os poliméricos surgem recorrentes a diminuição do peso específico da peça, simplificação da execução e pela redução do custo de fabricação das fibras, tornando-as mais acessíveis.

Souza e Ripper (1998) salienta que o PRF tem como intuito integrar a armadura e não a substituir. Seu principal objetivo é aumentar a resistência e o aumento a ruptura a tração do concreto.

O método de reforço com PRF vem sendo difundida na construção civil brasileira, sendo o primeiro país da América Latina a adotar a colagem. Em Belo Horizonte, no Estado de Minas Gerais, sucedeu-se o reforço do viaduto Santa Teresa, e pelo fato de ser um patrimônio histórico e cultural de Minas Gerais, foram impostas restrições quanto à remodelação estrutural e a sua localização central impossibilitava a interdição do tráfego (FERRARI, 2007).

Ferrari (2007) aponta as principais vantagens do PRF, sendo elas:

- Resistência a corrosão;
- Elevada resistência à tração;
- Baixo peso próprio;
- Fácil maleabilidade na aplicação;
- Diversos comprimentos para comercialização.

A técnica de PRF é uma solução nova na construção civil e que alguns fatores devem ser estudados e solucionados no futuro. Dentre as desvantagens da colagem das fibras podem ser citadas (FERRARI, 2007):

- Baixa resistência à temperatura;
- Baixa resistência à radiação ultravioleta;
- Baixa proteção a vandalismo e ação de raio;
- Como reforço a flexão, apresenta pouca ductilidade, em virtude do aparecimento de ruína frágil;
- Alto custo das fibras.

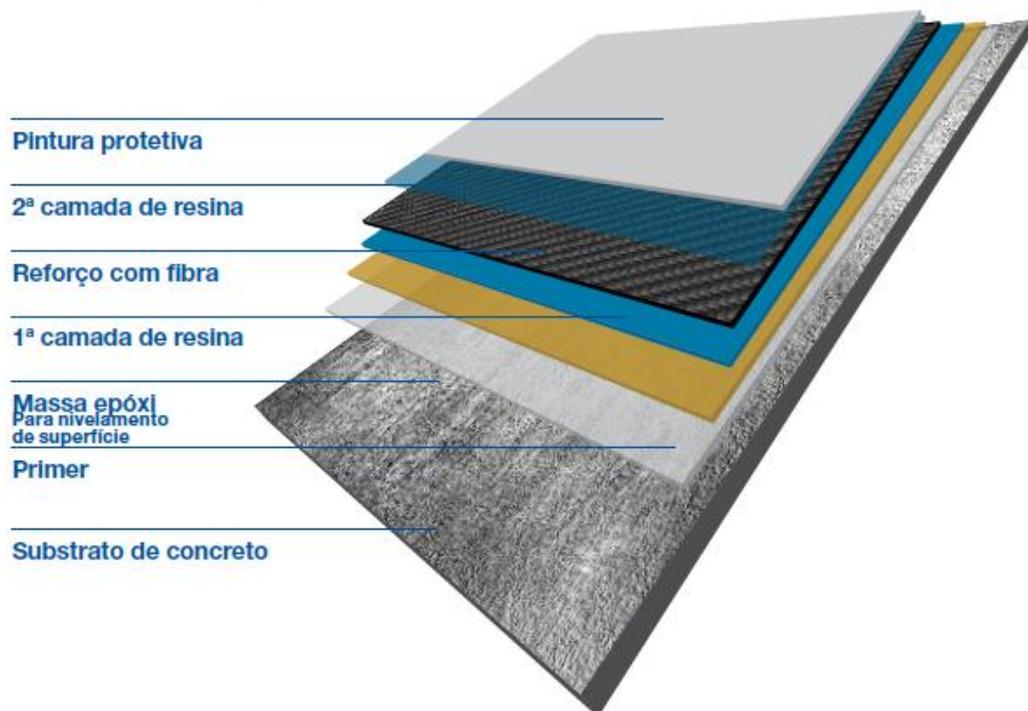
De acordo com a ACI 440.2R-02 (2002), a escolha do tipo de fibra é dada quando o engenheiro responsável pela reabilitação avalia a condição atual da

estrutura, determinando o grau de deterioração e sua origem, estipulando a capacidade de carga e verificando a situação da superfície do concreto. Durante a vistoria é imprescindível o registro dos seguintes dados:

- Medidas das peças estruturais existentes;
- Medida, posicionamento e origem da corrosão do aço;
- Medida, posicionamento e origem das fissuras;
- Estipular a quantidade de aço presente;
- Teste de compressão do concreto;
- Estabilidade do concreto para posterioridade de aplicação do PRF.

As fibras são compostas de várias camadas conforme a figura 10, sendo a primeira a resina de epóxi (primário ou “*putty*”), o compósito polimérico, podendo ser a fibra de aramida, carbono ou vidro e por último o adesivo de ligação (REIS, 2001).

Figura 10: Componentes da aplicação do PRF



Fonte: Master Brace, 2017.

Como solução para o reforço estrutural, são utilizados três tipos de materiais: aramida, carbono e vidro. Comercialmente, são encontrados em formas quadradas, redondas e triangulares proporcionalmente. A resistência ideal do compósito provém do espaço entre as partículas, do diâmetro e da fração de volume (SANTOS, 2017).

7.3.1 COMPÓSITO

Os compósitos eclodiram como possibilidade para o reforço do concreto armado em virtude de suas características, como alta resistência a tração, a corrosão, a ataques químicos e a cargas dinâmicas, boa durabilidade, baixo peso específico, baixa deformação, simplicidade na aplicação. A viabilidade técnica x econômica vem sendo pesquisada afincos no âmbito de estudos teóricos, experimentais e casos de execução (CARNEIRO, 2004).

Carneiro (2004) define materiais compósitos como a união de dois ou mais materiais não solúveis entre si, gerando um novo produto, com propriedades superiores aos dos materiais. O compósito possui duas fases distintas: uma é chamada de fase de reforço e a outra de matriz, que envolve a primeira, sendo capaz de conter adições e materiais de enchimento, denominados *fillers*, que alteram e ampliam suas propriedades.

● MATRIZ POLIMÉRICA

A matriz apenas se torna eficaz, devido a forte interação entre fibra e matriz, tendo em vista a ampliação da resistência mecânica da fibra. Evidentemente as fibras resistem grande parcela de carga aplicada, tornando-se mais resistentes que a matriz. Contudo, perante a atuação de ações aplicadas na interface, as bordas tornam-se ineficientes (NOSSA, 2011).

De acordo com o boletim *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures* ACI 440R-96 (2002) a matriz polimérica é subdividida em duas categorias: termofixos e termoplásticos. Os polímeros termofixos (resinas epóxi, poliéster e fenólicas, utilizadas no reforço estrutural com fibras) possuem propriedades como boa processabilidade, fluência e resistência química. Os termofixos amolecem ou fundem quando aquecidos, sem perder suas características.

Os polímeros termoplásticos, dentre as suas vantagens, possuem maior resistência à fratura e ao impacto, vida útil infinita quando bem protegida a umidade e simplicidade na aplicação. A diferença para o termoplástico, é que ele não pode ser endurecido e aquecido novamente (ACI 440R-96, 2002).

Garcez (2007), considera uma matriz ideal para o compósito, quando ele possui atributos como resistência a tração e modulo de elasticidade distinta da matriz. O

modulo de elasticidade do compósito é obtido pela soma do modulo de elasticidade da matriz e da fibra e o resultado é multiplicado pela porcentagem em volume de cada elemento. Sendo que, o polimérico reforçado com fibra é constituído de 30% de matriz e 70% de compósito, conseqüentemente a matriz tem pouca influência no modulo de elasticidade do compósito.

A matriz é composta por vários tipos de resinas, como, epoxídicas, poliéster, viniléster e fenólicas. Porém, para a utilização no reforço estrutural, utiliza-se a resina epoxídicas, por possuir vantagens como elevada viscosidade, alta aderência, alta durabilidade, baixa retração e processo de cura longo (BORBA, 2015).

● RESINA

Machado (2010, p. 115) define resina como “[...] componente do sistema polimérico que requer um catalisador ou endurecedor para a sua polimerização ou cura na sua utilização nos compostos”.

O intuito da resina é a colagem das fibras no substrato do concreto, carreando uma excelente aderência entre as suas interfaces visando à durabilidade. No mérito de resistência a tração, a resina tem pouca persuasão, mas no quesito de resistência ao cisalhamento e a compressão o compósito é preponderante (CARNEIRO, 2004). O boletim ACI 440.2R-02 (2002) complementa outras vantagens das resinas, como trabalhabilidade, capacidade de enchimento, *pot life* resistente na aplicação e adesão com as fibras.

Dentre a construção civil, encontram-se diversas resinas por sua constante utilização, como as resinas de poliéster, as acrílicas, os poliuretanos e epóxi. A mais empregada na reabilitação das estruturas é a resina epóxi, conforme a figura 11 (SANTOS, 2008).

Figura 6: Composição da resina epóxi



Fonte: Bronze, 2016.

Na indústria brasileira, as resinas epoxídicas são derivadas do petróleo, derivando da aglutinação da epocloridina e do bifenol. Com a definição da proporção de cada material, determina-se a aplicação de interesse (SANTOS, 2008).

No reforço estrutural, utiliza a resina de alta resistência RE-500, fabricada pela empresa Hilti, por compreender inúmeras vantagens como, diminuição do comprimento de ancoragem, tixotrópica (mudança de viscosidade, não escoando do furo) e sobreposição em superfícies úmidas e submersas (BRONZE, 2016).

Além da resina epóxi, deve-se aplicar o primer de impregnação, de acordo com a figura 12, destinado a melhorar a aderência entre a resina e o concreto. É necessário retirar a nata superficial de toda a peça de concreto, além de graxas, óleos e poeira (SANTOS, 2008).

Figura 12: Resina de impregnação



Fonte: Bronze, 2016.

Caso a face do concreto exibir imperfeições, recorre-se a resina epóxi de regularização, conforme a figura 13, para completar os vazios, destinando a regularização do substrato para conseqüente colagem do material compósito (BRONZE, 2016).

Figura 13: Resina de regularização



Fonte: Bronze, 2016.

• ADESIVO DE LIGAÇÃO

O adesivo é obtido a partir da mistura de uma resina epóxi com um endurecedor, podendo incluir enchimentos, inclusões amolecedoras, aditivos, entre outros. A finalidade do adesivo epóxi é proporcionar uma distribuição de tensão de cisalhamento entre a face do concreto e o compósito (EXTERNALLY BONDED FRP REINFORCEMENT FOR RC STRUCTURES – FIB 14, 2001).

As principais propriedades do adesivo segundo Ferrari (2007) são resistência à tração, a fluência, química e solventes, boa aderência com as fibras e baixa retração durante a cura.

Para a correta utilização do adesivo deve-se levar conta três conceitos de tempo: *pot life*, *open time* e *glass transition temperature*. A FIB 14 (2001, p. 15) define *pot life* como “[...] tempo que se pode trabalhar com o adesivo depois de misturar a resina e o endurecedor, antes dele começar a endurecer no recipiente, podendo variar entre alguns segundos até vários anos”.

Pérez (2016, p. 48) define *open time* como “[...] tempo máximo após a aplicação do adesivo sobre a superfície antes da união do material”.

E *Glass transition temperature* é o tempo de transição do polímero quando ele sofre alta alteração de temperatura, perdendo suas propriedades vítreas e passando a possuir características plásticas (PÉREZ, 2016).

7.3.2 FIBRAS DE ALTO DESEMPENHO

O boletim FIB 14 (2001) especifica que as fibras empregadas em materiais compósitos necessitam possuir alta resistência e rigidez, tenacidade e durabilidade. As fibras de alto desempenho são empregadas na construção civil em virtude de sua boa performance e eficiência quanto a seu uso estrutural. Segundo Brito (2018), as fibras comumente aplicadas como reforço usando compósito polimérico são as fibras de aramida, carbono e vidro, existem ainda outras fibras que são menos utilizadas como as fibras de basalto, boro, poliamida e poliéster, entre tantas outras. Algumas dessas fibras como o carbono por exemplo podem demonstrar características mecânicas melhores que a do aço se forem comparadas.

De acordo com a FIB 14 (2001), a maior parte dos materiais é mais forte e mais dura em sua forma fibrosa. Um elevado coeficiente da relação

comprimento/diâmetro, possibilita uma transferência de carga da matriz para as fibras, e proporciona a total vantagem das características das fibras. Sendo assim as fibras são consideradas materiais de reforço de grande eficácia. Existe a capacidade de se fabricar na forma contínua ou descontínua. Pérez (2016), sugere que as fibras mais favoráveis para o reforço de estruturas devido à alta capacidade de transferência de carga e alta resistência são as fibras contínuas.

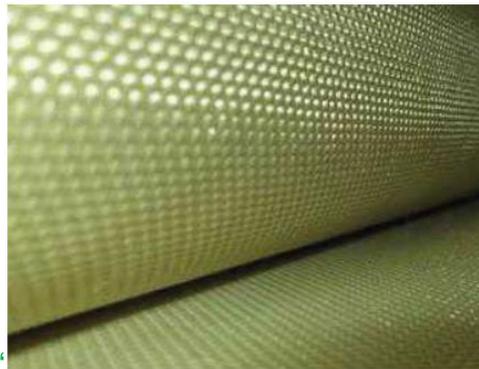
Neste trabalho sucederá a análise de fibras de aramida, carbono e vidro.

7.3.2.1 COMPÓSITOS DE FIBRAS DE ARAMIDA (AFRP)

Os filamentos de aramida são elementos de alta resistência e começaram a ser difundidos década de 1970. Se comparado aos metais as fibras de aramida são distintas na combinação resistência-peso (CALLISTER,1999).

As fibras de aramida são fabricadas para a forma comercial por *DuPont* (Kevlar 29, 49 que é a mais usada e 149) e *Akzo Nobel* (*Twaron* 1055, 2000) e se diferenciam pelo comportamento mecânico. Podem ser encontradas em reboques, fios, mechas e tecidos, conforme a figura 14 (ACI 440.2R-02, 2002).

Figura 7: Tela de fibra de aramida



Fonte: Santos, 2017.

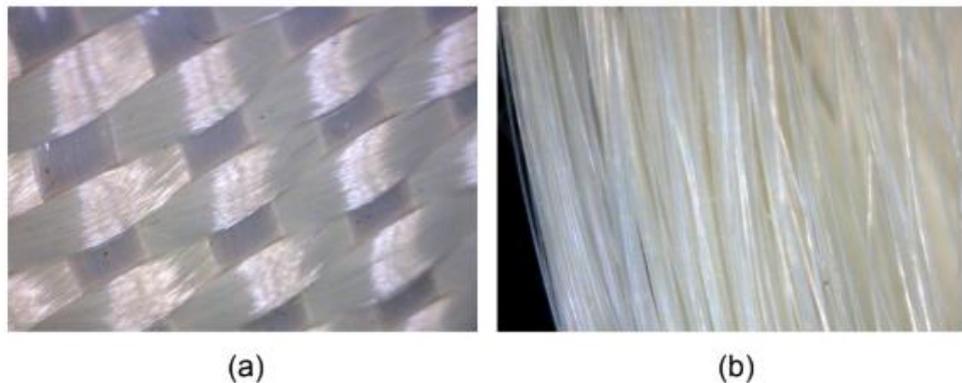
De acordo com Carneiro (2004), as fibras de aramida são constituídas por elementos orgânicos aromáticos sintéticos, composto por carbono, hidrogênio e nitrogênio e provenientes da trefilagem de uma variante do nylon, da qual possui um sistema molecular com base em cadeias de amida e benzeno. Sua fabricação se dá por meio da mistura de polímeros e ácidos, como por exemplo ácido sulfúrico, o mesmo autor complementa “que é extrudada em cilindros com temperatura de 200°C, lavada ensecada em bobinas, sendo então trefilada com o objetivo de aumentar sua resistência e rigidez” (CARNEIRO, 2004, p. 19).

A fibra de aramida possui um desempenho moderadamente baixo quando sujeita a compressão, mas quando submetida a tração, sua resistência é melhor comparado a outros tipos de materiais. A estrutura da fibra permite ela ser resistente à combustão, onde suas propriedades se mantem intactas quando expostas a temperaturas entre -200°C e 200°C . Além disso, as fibras dispõem de resistência ao impacto, a fluência e a falha por fadiga. Contudo, a fibra de aramida quando exposta a ácidos e bases fortes sofre degradação (CALLISTER, 1999).

A FIB 14 (2001), corrobora com Callister (1999) e afirma que a fibra de aramida tem um bom comportamento elástico sob tensão, mas o desempenho não é linear e dúctil quando submetido a compressão e demonstram aprazível tenacidade e flexibilidade aos danos causados por fadiga.

As fibras de aramida presentes na figura 15 (a) e (b), possuem resistência à tração e o modulo de elasticidade com maior relevância se comparado a outras fibras orgânicas (SANTOS, 2017).

Figura 8: Fibra de aramida



Fonte: Nossa, 2011.

A aramida é um material demasiado resistente consequentemente possibilita benefícios como reforços em pilares retangulares, usualmente para esse tipo de utilização são pré-esforçados antecipadamente a aplicação (S&P, 2006).

Carneiro (2004) complementa que a fibras possuem grandes benefícios como apresentar elevada resistência a tração e a impactos, baixa densidade, retração e resistência a ataques químicos. Dispõe de excelente rigidez e grande habilidade de deformação, mas se degrada quando exposta a luz solar.

Garcez (2007), afirma que uma relevante vantagem do emprego da fibra de aramida é ter uma conduta mais resistente na ruptura em comparação com as fibras

de carbono e vidro. Apesar de que as fibras usadas para o reforço com PRF sejam classificadas como elementos frágeis, a aramida demonstra uma conduta menos frágil que a fibra de carbono e vidro.

Outras vantagens no uso de AFRP no reforço de estruturas pode-se citar o bom desempenho e resistência quando exposto a altas temperaturas e a auto extinção, grande durabilidade, elevada resistência à tração e ao impacto, baixa condutividade elétrica e massa específica. E desvantagens como baixa resistência a compressão, alta taxa de absorção de umidade e péssima aderência as resinas e o custo elevado (SANTOS, 2017).

7.3.2.2 COMPÓSITOS DE FIBRAS DE CARBONO REFORÇADO (CFRP)

O carbono é considerado como um elemento que de acordo com a temperatura em que o ambiente está sujeito, em sua forma mais invariável ele pode se apresentar com o aspecto de carbono cristalizado ou grafite. As fibras do carbono surgem de uma combinação de carbono, no formato amorfa e cristalina (GARCEZ, 2007).

As fibras de carbono geralmente são desenvolvidas com base em 3 elementos de origem natural, que são o *rayon* (polímero celulósico), poliacrilonitrila (PAN) e *pitch* (alcatrão de petróleo ou de carvão). Habitualmente contém coloração escura e este pode ser manipulado a fim de garantir graus de resistência e módulo de elasticidade de maior excelência. Para se obter fibras com maior modulo de elasticidade durante a fabricação devem ser manuseadas temperaturas mais elevadas. Porém o uso de temperaturas maiores afeta a resistência a tração, fazendo com que haja uma diminuição da resistência (GARCEZ, 2007).

Souza e Ripper (1998), afirmam que a produção das fibras de carbono é realizada através do procedimento de carbonização das fibras de polímeros orgânicos e suas propriedades mecânicas estão ligadas a estrutura molecular que se obtêm através do processo de carbonização. As fibras de carbono necessitam de uma confecção em temperaturas elevadas, podendo chegar até 3000°C. E é nesse processo que muitas vezes grande parte das fibras se derretem ou até mesmo sofrem o processo de vaporização.

Ainda de acordo com Souza e Riper (1998, p. 153):

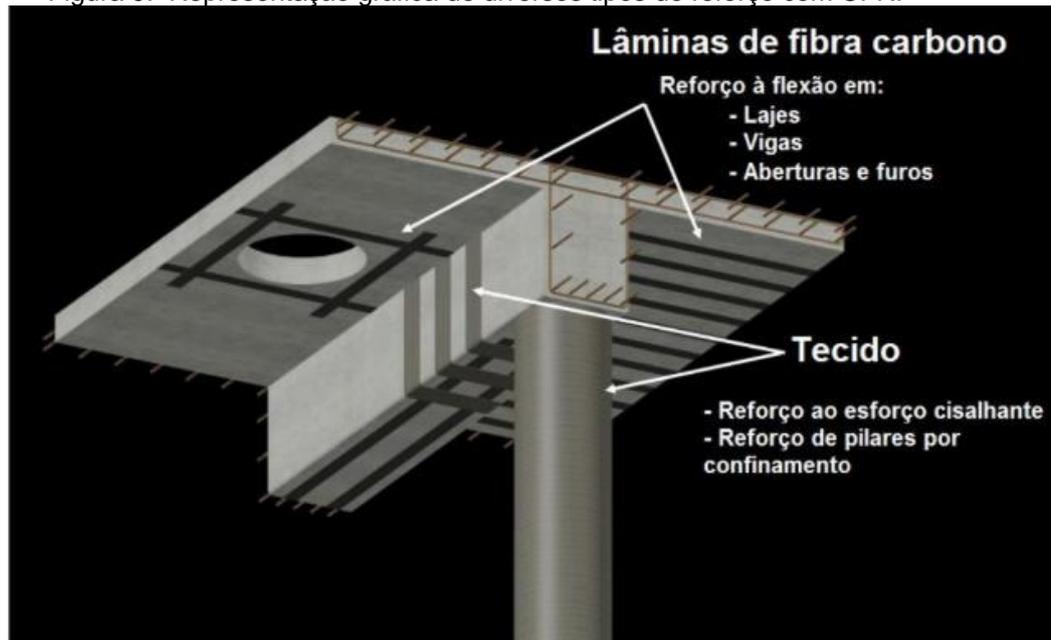
Existem diversas formas comerciais para reproduzir as fibras de carbono, normalmente passando pela sua incorporação a uma matriz de resinas poliméricas, com a eventual adição de metais, de forma a se conseguir a obtenção de formas tão diferentes como perfis, barras, laminados, tecidos bidirecionais e folhas flexíveis unidirecionais.

A configuração comercial mais usual para o acréscimo de ductibilidade e resistência das estruturas de concreto armado são folhas flexíveis pré-impregnadas, método onde os feixes de filamentos de fibras de carbono são reunidos de forma constante e são aderidos a uma folha de apoio que é impregnada com uma pequena porção de resina epoxídica, assim ela admite uma espessura que chega a décimos de milímetros. A unidade do compósito é produzida a partir do acréscimo da resina de colagem, como produto final é concebido uma matriz extraordinariamente resistente (SOUZA E RIPPER, 1998).

As folhas de CFRP proporcionam a peça aplicada uma melhoria na resistência flexão e a força cortante em vigas e lajes. No processo de colagem deve-se haver cuidado para a realização de um dimensionamento bem executado, verificando a resistência da resina que for utilizada no procedimento (ADORNO *et al.*, 2015).

Na figura 16 são apresentados alguns tipos de reforços que usam o CFRP:

Figura 9: Representação gráfica de diversos tipos de reforço com CFRP



Fonte: Borges, 2016.

Os compósitos de fibras de carbono reforçado mais usuais são os laminados, mantas e os tecidos, como na figura 17. Os laminados são produzidos com a espessura de até 1,5 mm e suas fibras são unidirecionais e prontos para o uso por serem elementos pré-curados. Já as mantas podem ser fibras de carbono contínuas

unidirecionais ou multidirecionais, e fazem uso de matriz polimérica (resina epóxi) que ao contrário das fibras laminadas são endurecidas *in situ* (SANTOS, 2017).

Figura 17: Algumas formas disponíveis da fibra de carbono.



Fonte: Pérez, 2016.

Bronze (2016), afirma que a direção das fibras e o quanto os eixos são paralelos interferem diretamente no modulo de elasticidade e alta resistência.

Ainda de acordo com Bronze (2016, p. 409):

As fibras têm diâmetros entre 0,07 e 0,10 milímetros, podendo ser longas quando contínuas ou curtas quando fios cortados. A relação entre comprimento e diâmetro médio das fibras curtas é chamada de fator de tamanho. As propriedades de um compósito com fibras curtas são muito dependentes dessa relação, sendo a resistência mecânica do compósito maior para maiores fatores de tamanho.

Para Souza e Ripper (1998), a prática de reforçar estruturas é de habitualmente dar preferência aos CFRP de alta resistência e modulo de elasticidade similar ao do aço utilizado nas construções.

A resina usada como matriz polimérica, é empregada como fixação da fibra de carbono à estrutura, e essa resina possui propriedades de resistência e dureza que são primordiais para a transmissão de esforço da peça que está sendo reforçada com o CFRP, o modo como é aplicada tem total interferência no efeito final. O uso de grande volume de resina não é garantia de alto nível de aderência, as vezes o excesso de resina pode proporcionar uma menor aderência e acarretar o descolamento da fibra (ADORNO *et al.*, 2015).

Santos (2017) salienta que o CFRP tem as vantagens em seu emprego por serem flexíveis, fácil de transportar e de simples manuseio e aplicabilidade, ser leve (96 a 288 g/m nos laminados). Conforme Carneiro (2004), as fibras de carbono possuem alta dureza e resistência aos ataques químicos por ele ser um elemento inerte, apresenta bom comportamento a fadiga (cargas cíclicas), variação térmica e reológica e um baixo peso. Garcez (2007) afirma que o CFRP tem um alto modo de

resistência-peso, podendo ser cerca de 5 vezes mais leves do que o aço e resistência a tração de 8 até 10 vezes mais elevada. Quando submetidas a altas temperaturas elas mantem sua capacidade de resistência a tração e o modulo de elasticidade, mas podem se oxidar e degradar quando expostas a elevadas temperaturas e são imunes a corrosão, podendo ser utilizadas em ambientes marinhos sem prejudicar sua durabilidade.

De acordo com Carneiro (2004), como desvantagem tem-se a pouca resistência a impactos e alta condutibilidade elétrica podendo gerar o aparecimento de corrosão e o alto custo da fibra. Santos (2017), traz outros inconvenientes que podem existir na utilização do CFR como a necessidade de proteção contra raios ultravioleta e ao fogo, possuir alta condutibilidade térmica e comportamento muito frágil, ter difícil colagem em locais úmidos e devido a capacidade resistente ser restringida podendo ocasionar o descolamento e carecer de cuidados específicos.

7.3.2.3 COMPÓSITO DE FIBRAS DE VIDRO REFORÇADO (GFRP)

Os GFRP (figura 18) são constituídos de fibras de vidro e uma matriz polimérica (SANTOS, 2017). Ainda segundo o mesmo autor as fibras são concebidas por fibras aglomeradas longitudinalmente, mantas de reforço e um véu de exterior que possui os fios desordenados. E a matriz polimérica é fundamentada por resina, *filler* (elemento de enchimento) e aditivos. São utilizados materiais de proteção e que oferecem resistência ao fogo como painéis de gesso, tintas intumescentes e materiais inorgânicos projetados.

Figura 18: Tela de fibra de vidro



Fonte: Santos, 2017.

As fibras de vidro resultam da combinação de numerosas composições baseadas na sílica, com acréscimo de óxidos de cálcio, boro, sódio, ferro e alumínio (CARNEIRO, 2004).

Ainda segundo Carneiro (2004), o processo da fabricação da fibra de vidro inicia-se a no aquecimento de uma combinação de calcário e areia, colocados num forno com temperatura em volta de 1400°C. O mesmo autor complementa, logo após a mistura irá passar por equipamentos que tenham aberturas no entorno de 10 µm gerando formas de filamento que irão receber uma solução orgânica o qual possui fórmula de um ligante através de espargidores, para que os filamentos se transformem em conjuntos de fio e lubrificantes, que estarão protegidos contra abrasão, agentes de acoplamento e antiestéticos e propiciam excelente adesão entre as fibras de vidro e matriz.

As fibras de vidro industrialmente acessíveis são formadas por filamentos de diâmetro de 5 a 15 µm e a formação de cordoalhas se dá pelo agrupamento de 200 a 400 filamentos. E essas cordoalhas são capazes de serem cortadas em vários comprimentos, ou podem ser arranjadas e formar um tecido, tudo isso depende da finalidade do uso para a aplicação (SOUZA E RIPPER, 1998).

Os tipos de comercialização mais comuns das fibras de vidro estão presentes na figura 19. As formas mais habituais das fibras de vidro são as mantas de fibras picotadas (*chopped-strand mat*), tecido de fibras (*woven roving*) e existem também as barras que são usadas para o reforço (PÉREZ, 2016).

Figura 19: Formas disponíveis de fibra de vidro: Manta (arbitrariamente orientada) e tecidos com orientação a 0 a 90°.



Fonte: Pérez, 2016.

De acordo com Beber (2003) as fibras de vidro podem ser classificadas conforme o quadro 3:

Quadro 3: Classificação das fibras

Módulo de elasticidade de cerca de 70 GPa. Resistência variando de 1000 a 2000 MPa.	TIPO E	Aplicações usuais, baixo conteúdo de álcalis (<1%).
	TIPO A	Elevado conteúdo de álcalis (10 a 15%).
	TIPO C	Excelente resistência à corrosão utilizado para acabamento de superfícies.
	TIPO E-CR	Livre de boro, boa resistência a corrosão por ácidos.
Módulo de elasticidade de cerca de 85 GPa. Resistência variando de 2000 a 3000 MPa.	TIPO R, S	Excelentes propriedades mecânicas, utilizados para aplicação de alto desempenho (aeroespacial).
	TIPO AR	Resistente à ação de álcalis, empregado em concretos reforçados com fibras.

Fonte: Adaptado de Beber, 2003.

Conforme Pereira (2009), o tipo mais utilizado entre os materiais compósitos é a fibra de vidro do tipo E (em 90% dos casos de aplicação), por ter um custo mais acessível e apresentar favoráveis propriedades elétricas, de rigidez e resistência ao desgaste.

De acordo com Garcez (2007) devido a seu inferior módulo de elasticidade, as fibras de vidro não propiciam a dureza que é fundamental em certas aplicações estruturais como em pontes por exemplo. Conforme o mesmo autor especifica não ser indicado o uso das fibras de vidro que possuam menor custo e baixa resistência aos álcalis como as fibras de vidro do tipo E. Sendo assim se houvesse um contato entre a fibra e o concreto poderiam surgir danos a fibra, entretanto com a utilização externa de compósitos de fibras onde geralmente estão envoltas por uma matriz polimérica, é uma ocorrência bastante rara.

Santos (2017) afirma, se comparado o GFRP ao aço, a tensão de rotura é equivalente podendo ser até superior, a condutibilidade térmica é altamente inferior, densidade sendo capaz de ser até quatro vezes menor do que a do aço e possui um coeficiente de dilatação térmica idêntico.

De acordo com Andrade (2017), algumas das vantagens da fibra de vidro são a resistência química aos microrganismos, boa resistência a impactos, elevada resistência a tração, baixo coeficiente de dilatação térmica e mediana resistência mecânica.

A fibra de vidro dispõe de favorável capacidade de se deformar, é resistente e possui baixo custo, mas tem resistência a fadiga, a abrasão e a fluência baixos, inferior capacidade de aderência aos polímeros e menor rigidez. É necessário a utilização de uma matriz apropriada para que na presença de água, ácidos e em um meio alcalino não se degrade (CARNEIRO, 2004).

Algumas das desvantagens no uso de fibras de compósitos reforçados com fibras de vidro é a falta de regulamentação, o seu desempenho frágil, apresentar instabilidade, possibilidade de se deformar e inferior modulo de elasticidade (SANTOS, 2017).

Souza e Ripper (1998) afirmam que as fibras de vidro são suscetíveis a ataques se expostas ao meio alcalino, com o passar do tempo podendo levar a perda de resistência. O mesmo autor acrescenta:

Esta redução de resistência pode ser controlada pela utilização de fibras resistentes a álcalis, fibras com um revestimento orgânico, ou ainda pela redução do grau de umidade ambiental. Em virtude deste problema, a utilização deste material tem sido estudada em centros de pesquisa, de forma que se possa determinar como variam, ao longo do tempo, as propriedades do concreto com fibras de vidro (SOUZA E RIPPER, 1998, p. 100).

7.3.2.4 COMPARATIVO DAS PROPRIEDADES ENTRE AS FIBRAS DE ARAMIDA, CARBONO E VIDRO

No quadro 3 está representado um comparativo entre as fibras tratadas acima. De acordo com Zucchi (2015) a tabela 2 é classificado com valores que podem variar de 1 a 4 e possui os critérios de inadequado, suficiente, bom e muito bom. A significância está relacionada com a relevância da metodologia da aplicação do PRF na reabilitação de estruturas, e podem se diferenciar em (*) menos importante, (**) importante e (***) muito importante.

Tabela 2: Comparativo entre fibras de alto desempenho

CRITÉRIO	SIGNIFICÂNCIA	CARBONO	ARAMIDA	VIDRO- E
Resistência à tração	***	4	4	3
Resistência à compressão	*	4	1	3
Módulo de elasticidade / Rigidez	***	4	3	2
Ductilidade	***	2	3	2
Resistência à fadiga	**	4	1	2
Deformação lenta / carregamento	***	4	2	1
Resistência ao impacto	*	3	4	3
Coefficiente de expansão térmica	**	3	3	2
Resistência à radiação Ultravioleta	*	4	2	4
Resistência a umidade	**	4	2	2
Elevadas Temperaturas (80°C)	**	4	4	4
Resistência à corrosão	**	4	4	3
Reação a Álcalis	***	4	4	1
Resistência a ciclos gelo-degelo	*	4	4	4
Propriedades elétricas	*	4	4	4
Custo	***	2	3	4
Média ponderada	-	3,625	3,000	2,750

Fonte: Adaptado de Zucchi, 2015.

O autor Sousa (2008) e Zucchi (2015) trazem algumas vantagens e desvantagens representadas nos quadros 4 e 5:

Quadro 2: Vantagens e desvantagens das fibras

TIPO DE REFORÇO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
ARFP	Estabilidade térmica/resistente ao fogo; Resistencia à tração elevada; Modulo de elasticidade alto; Boa resistência ao impacto; Boa resistência química; Bom comportamento à ruptura/durável; Custo intermediário;	Absorção de água/ inchamento-rompimento da matriz; Materiais específicos para manuseio / dureza elevada;
CRFP	Resistencia à tração elevada; Baixo peso específico; Elevado modulo de elasticidade; Para aplicação de cargas cíclicas; Imunes à corrosão; Maior quantidade de produtores; Opção de se usar os laminados;	Custo elevado;
GRFP	Boa resistência à tração; Bom módulo de elasticidade; Baixo peso específico; Baixo custo;	Tipo E sensível a ataque por álcalis; Perda de resistência na presença de água;

Fonte: Adaptado de Zucchi, 2015.

Quadro 3: Vantagens e desvantagens das fibras utilizadas em reforços de estruturas

TIPO DE REFORÇO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
ARAMIDA	<p>Baixa densidade;</p> <p>Resistência à tração elevada;</p> <p>Excelente resistência ao choque, desgaste e vibrações;</p> <p>Bom comportamento ao fogo e boa resistência química.</p>	<p>Baixa resistência à compressão;</p> <p>Sensibilidade a fluência, à ação de raios ultravioletas e a temperaturas elevadas;</p> <p>Dificuldade de moldagem;</p> <p>Absorção de humidade.</p>
CARBONO	<p>Grande resistência à tração, compressão e fadiga;</p> <p>Grande resistência a altas temperaturas e à ação de agentes químicos;</p> <p>Boa condutividade térmica e elétrica;</p> <p>Imunes à corrosão.</p>	<p>Sensibilidade ao choque e abrasão;</p> <p>Corrosão do tipo galvânico;</p> <p>Cor negra;</p> <p>Dez vezes mais caras do que as fibras de vidro.</p>
VIDRO	<p>Grande resistência à temperatura;</p> <p>Boa aderência à matriz polimérica;</p> <p>Transparente;</p> <p>Boas características elétricas;</p> <p>Boa relação qualidade/preço.</p>	<p>Susceptível a danos na superfície;</p> <p>Características mecânicas inferiores aos das outras fibras;</p> <p>Maior peso específico.</p>

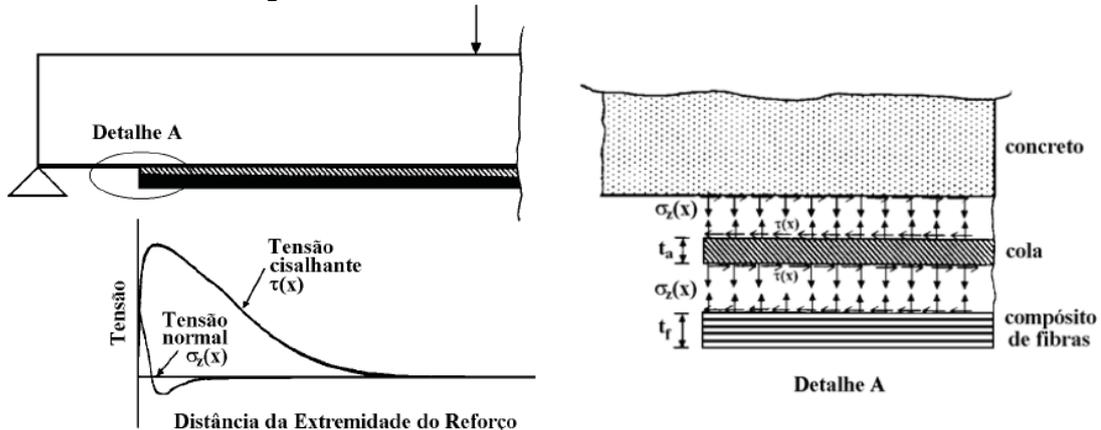
Fonte: Adaptado de Sousa, 2008.

7.4 MODO DE RUPTURA

É inevitável a ocorrência da ruptura das vigas com a colagem de PRF, ela ocorre em consequência da concentração de tensão ao cisalhamento e a normal nas margens da fibra, conforme a figura 20. A quantidade de camadas no reforço interfere diretamente no modo de ruptura da peça. Utilizando substancialmente poucas

camadas haverá escoamento da peça a tração. Em contrapartida, com demasiadas camadas sucederá o escoamento por compressão (CARNEIRO, 2004).

Figura 10: Tensões atuante entre o PRF e o concreto

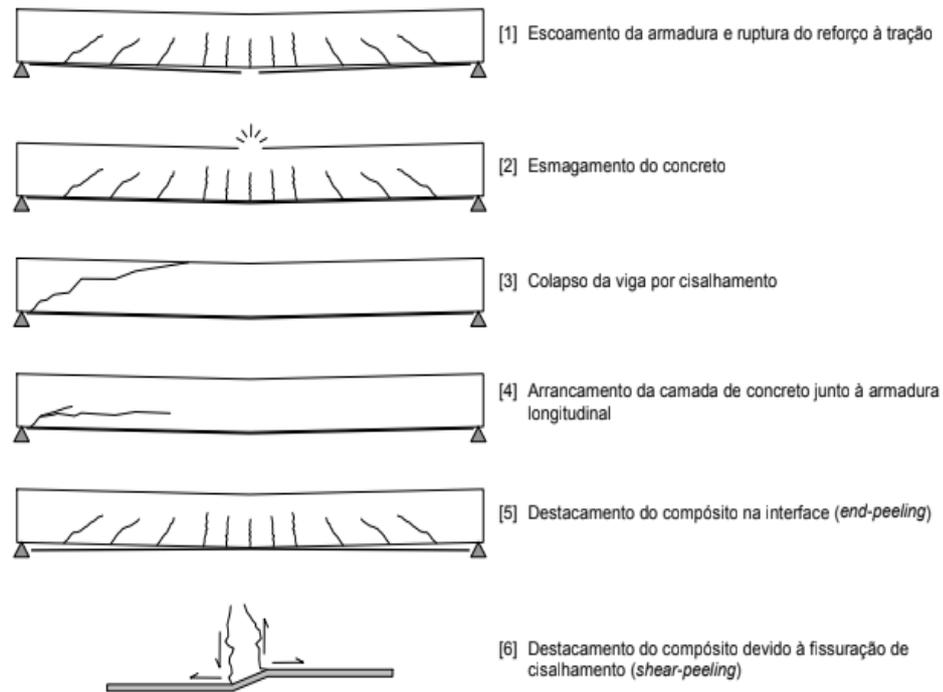


Fonte: Carneiro, 2004.

Beber (2003) afirma que a ruptura da viga com PRF depende da área efetiva do reforço, das propriedades do material, das técnicas de colagem, do cálculo do reforço e o estado de fissuração da viga. Os modos de rupturas do PRF mais frequentes, conforme a figura 21, são:

- Escoamento da armadura;
- Esmagamento do concreto;
- Destacamento do reforço causada por fissuras de flexão e ao cisalhamento;
- Destacamento concreto/ reforço;
- Destacamento devido a irregularidade da superfície;
- Arrancamento do cobrimento do concreto.

Figura 11: Modos de ruptura em vigas



Fonte: Beber, 2003.

Para caracterizar o tipo de ruptura, Beber (2003), em seu estudo expôs uma análise sobre a ruptura causada por cisalhamento, no qual ele faz a relação **a/d**, isto é, a relação do vão de cisalhamento e a altura útil da viga. A partir da análise do autor foi gerada a seguinte ponderação presente no quadro 6:

Quadro 4: Modos de rupturas segundo a relação vão x altura da viga

RELAÇÃO a/d	MODO DE RUPTURA
$a/d > 6$	Ruptura a flexão
$2,5 < a/d < 6$	Inclinação das fissuras próximas dos apoios
$1 < a/d < 2,5$	Fissura diagonal
$a/d < 1$	Viga - parede (não se aplica a esse trabalho)

Fonte: Adaptado de Beber, 2003.

Após a ruptura nas peças estruturais, podem transcorrer dois fenômenos, o desprendimento ou o destacamento. O desprendimento, ou seja, o desvinculamento entre o PRF e o concreto, é quando o concreto não aglutina na fibra, surgindo por causa da tensão cisalhante atuante ser maior que a tensão máxima do adesivo. Já o

destacamento é quando o concreto adere as fibras, devido a tensão cisalhante atuante ser maior que a tensão cisalhante do concreto projetada (FERRARI,2007).

7.5 PROCESSO CONSTRUTIVO DOS SISTEMAS COMPOSTOS

Para a instauração dos sistemas compostos de fibras é necessária uma sequência de procedimentos que será tratado a seguir.

O procedimento executivo possui duas fases específicas: preparação da estrutura e a aplicação do sistema compósito (ADORNO *et al.*, 2015)

7.5.1 RECUPERAÇÃO DO SUBSTRATO DE CONCRETO

É de extrema importância que seja verificada a integridade do concreto antes de seguir com a recuperação e mais adiante o reforço para que sejam garantidas resistência mecânica considerável para a transferência de esforços (MACHADO, 2002).

De acordo com Machado (2002), os procedimentos seguintes são necessários para a recuperação:

1. Remoção cuidadosa do concreto degradado (como na figura 22 abaixo);
2. Regularização do trecho que será reforçado;
3. No caso de armaduras corroídas é necessário a limpeza das corrosões presentes nas barras e a passivação da armadura;
4. Reestruturação da estrutura de concreto oferecendo garantia de que essa manifestação não se suceda novamente.

Figura 12: Remoção do concreto degradado

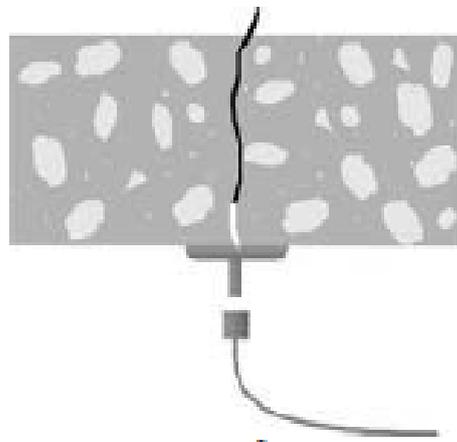


Fonte: Machado, 2002.

Machado (2002) especifica que todas trincas e fissuras que possuam abertura

que exceda 0,25 mm devem ser recuperadas. Para recuperá-las um dos métodos usados seria a injeção das aberturas com epóxi como na figura 23. O mesmo autor acrescenta, as aberturas inferiores a 0,25 mm sujeitas a exposição ao meio ambiente talvez necessitem fazer injeção de resinas ou utilizar seladores que previnam possíveis ataques a armadura gerando corrosão.

Figura 13: Injeção de fissuras



Fonte: Machado, 2002.

Para a limpeza da região onde será executado a colagem do sistema compósito do reforço são necessários o uso de abrasivos, jatos de areia ou limalhas metálicas. Esta limpeza precisa ser completa e eliminar quaisquer substâncias ou partículas solidas que estiverem soltas, poeiras, óleos e graxas, revestimentos como pinturas, argamassas, entre outros (SANTOS, 2008).

Se a colagem do compósito da fibra necessitar a colagem em mais de uma superfície lateral, é imprescindível o arredondamento de quinas das superfícies que estiverem incluídas na aplicação, para que não haja concentração de tensão na fibra e não restem vazios presentes entre a superfície do concreto e o compósito gerando alguma lacuna na colagem. (MACHADO, 2002). O mesmo autor complementa “os cantos rugosos devem ser suavizados com aplicação de massa regularizadora apropriada com acabamento lixado” (MACHADO, 2002, p.29).

Os autores Adorno *et al.* (2015) corroboram com Machado (2002), as arestas vivas devem ser arredondadas para um raio mínimo de 30 mm e em seguida é necessário a aplicação de um primer para aumentar a aglutinação do sistema compósito de fibra e a estrutura de concreto.

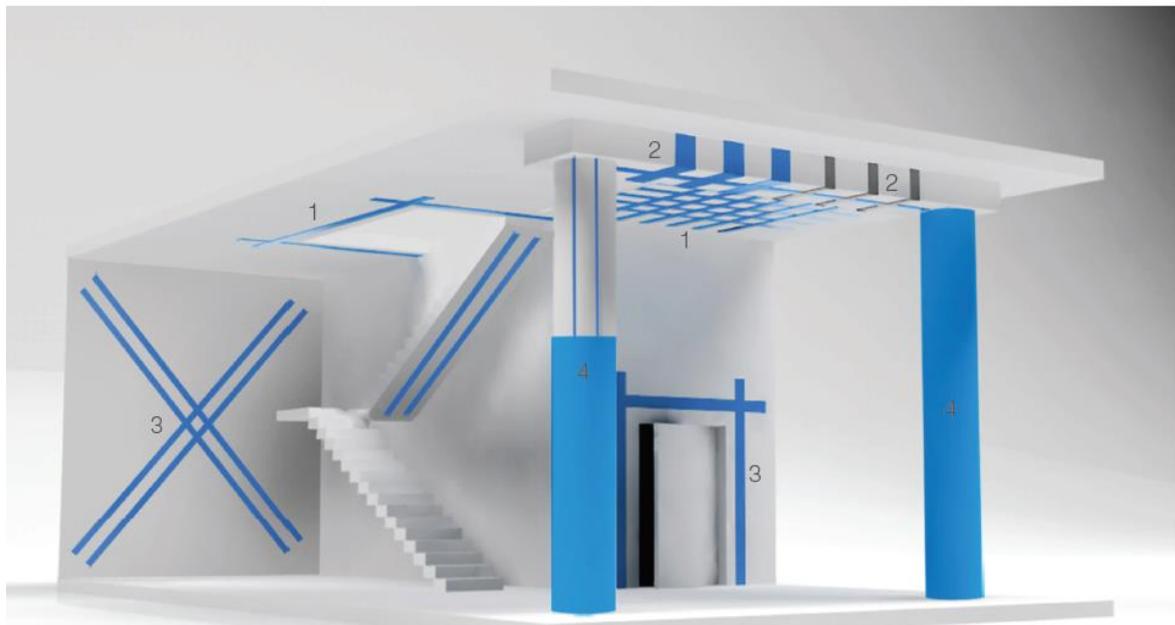
Santos (2008) especifica que caso o elemento estrutural encontre-se em estado de deterioração é fundamental que seja feita uma restauração da peça para depois

realizar o reforço da mesma.

7.5.2 EXECUÇÃO DO REFORÇO COM PRF

Para a aplicação do PRF deve-se escolher qual tipo de material é mais adequado para o reforço da estrutura. São comercializadas na forma de sistema pré-fabricados ou sistema curados “*in situ*”. Os dois sistemas são colados no substrato de concreto com a utilização da resina, totalizando em um sistema de reforço e cada um possui propriedades distintas e vantagens, conforme a figura 24. (CARNEIRO, 2004).

Figura 24: Formas de aplicação do PRF.



- 1 - Laje – reforço à flexão
- 2 - Viga – reforço ao corte através de mantas/ tecidos de carbono ou chapas de aço
- 3 - Parede resistente - aumento de capacidade de carga, rigidez ou resistência à tração
- 4 - Pilar – confinamento total; possibilidade adicional de laminados inseridos

Fonte: S&P, 2006.

O sistema pré-fabricado é caracterizado pela colagem adesiva curada a frio, segundo a figura 25, sendo que a superfície do concreto é vinculada com as fibras paralelamente a tendência das forças de tração principais (FIB 14, 2001).

Figura 14: Sistema pré-fabricado



Fonte: Master Brace, 2017.

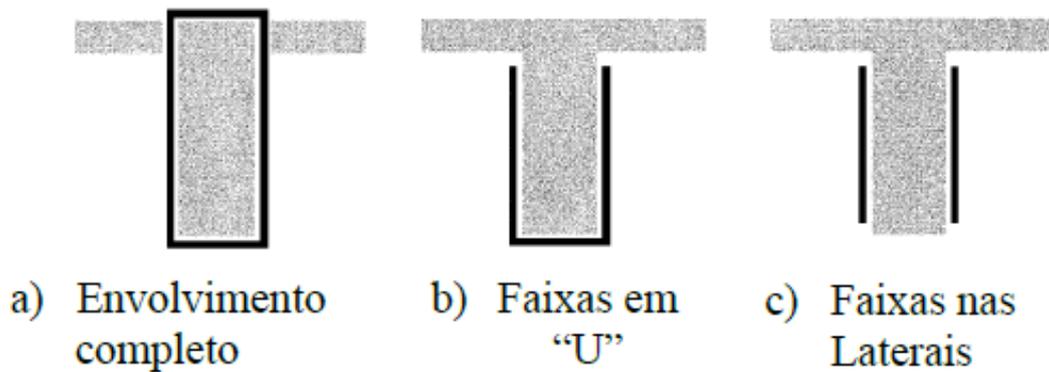
De acordo com a ACI 440.2R-02 (2002), os pré-fabricados possuem formato de tiras finas ou laminados (dimensão entre 1,0 a 1,5 mm). Comercialmente, são vendidos em forma de folhas laminadas unidirecionais, grades multidirecionais e cascas entregues em rolos.

Boto (2015, p. 105), afirma que “[...] os sistemas *“in situ”* não apresentam um produto final consolidado com resina, mas sim fibras em forma de fios, designados por tecidos (*“Fabrics”*) ou mantas (*“Sheets”*), em estado seco ou com teores de impregnação reduzidos.”

Carneiro (2004), complementa que o sistema *“in situ”* é mais maleável quando comparado ao sistema pré fabricado e que possuem espessuras em torno de 0,1 mm e 0,5 mm, com teor de fibras variando de 25% a 40%. Outra vantagem do sistema *“in situ”* é a utilização de inúmeras camadas com dimensões distintas (BEBER, 2003).

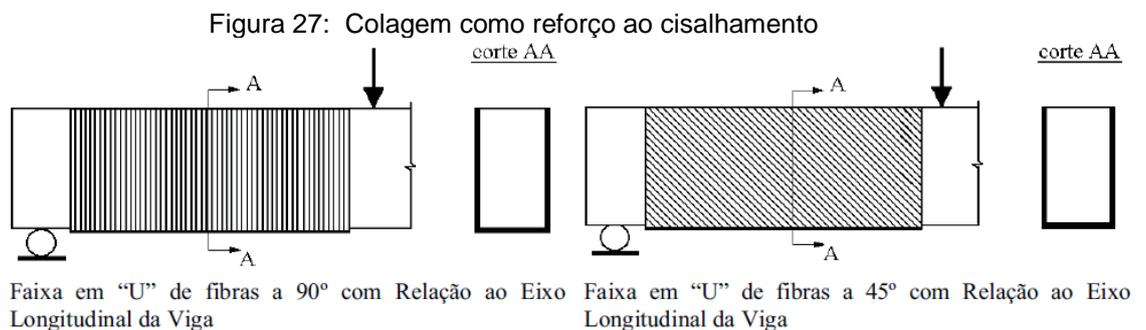
Pérez (2016), afirma que para a execução do reforço deve-se escolher o formato a ser empregado o PRF, conforme mostrado na figura 26, sendo a primeira opção a mais eficaz, porém é difícil aplicar em vigas em virtude da laje. A segunda opção é mais adotada como reforço estrutural.

Figura 15: Possibilidade de posição da fibra para reforço



Fonte: Pérez, 2016.

Quando utilizado para reforço de viga ao cisalhamento, os pré-fabricados devem ser aplicados com ângulos, como mostrado na figura 27. O mesmo pode ser aplicado como encamisamento de pilares, seja ela de formato circular ou retangular.



Fonte: Carneiro, 2004.

Carneiro (2004) estabelece a ordem das etapas de aplicação do reforço com compósitos, conforme a figura 28, sendo elas: aplicação do primer, nivelamento da superfície, aplicação da resina, aplicação da fibra e aplicação de resina novamente.

Figura 28: Série de aplicações do FRP.



a) Aplicação do primer



b) Mistura mecânica do adesivo epóxi



c) Aplicação do epóxi



d) Posicionamento da manta



e) Pressionamento da manta



f) Pressionamento com rolete metálico



g) Sobreposição de epóxi sob a manta



h) Aspecto final

Fonte: Ferrari, 2007.

O primer é um epóxi de diminuta viscosidade e elevada concentração de sólidos, no qual a sua execução é feita com rolo (CARNEIRO, 2004). Souza e Ripper (1998), complementa que o primer melhora a aderência do compósito.

Souza e Ripper (1998), recomendam um tempo de espera de uma hora, após a execução do primer e caso haver uma sobra do epóxi, deve ser retirado cautelosamente. Sucessivamente, é realizado o nivelamento da superfície usando pasta de epóxi de alta concentração de sólidos com o auxílio de uma desempenadeira (CARNEIRO, 2004).

A execução da primeira camada de resina é com auxílio de um rolo, inicializando a saturação das fibras. Posteriormente é aplicado a fibra, sendo ela o elemento de maior importância do sistema compósito, acima da camada de saturante úmido, movendo o papel de assistência. Por fim, é realizado a aplicação da segunda camada de resina com o auxílio de um rolo (CARNEIRO, 2004). Para melhorar as propriedades de resistência ao fogo, o acabamento externo é revestido de alto desempenho (SOUZA E RIPPER, 1998).

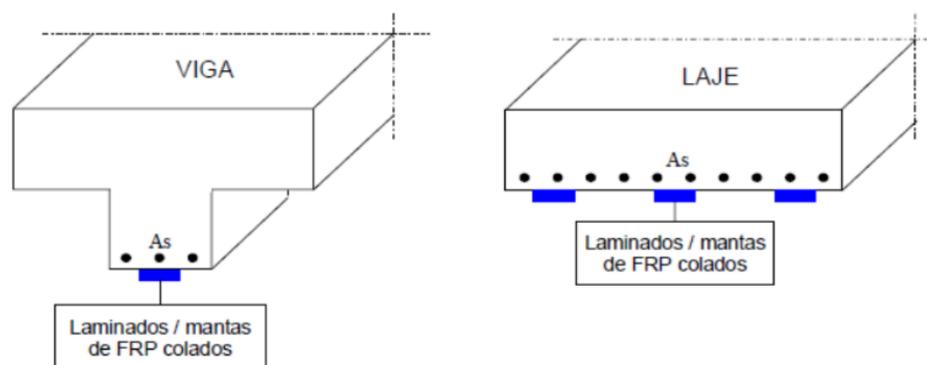
8. ANÁLISE

Para análise do presente trabalho foram considerados os seguintes autores Beber (2003), Carneiro (2004), Ferrari (2007), Gárcez (2007), Meneghetti (2007), Pereira (2009), Rodrigues (2009), Pérez (2016), Andrade (2017) e a norma internacional FIB 14 (2001) que em seus estudos fizeram ensaios experimentais ou pesquisas sobre a técnica de reforço com a utilização de fibras.

8.1 REFORÇO A FLEXÃO, CISALHAMENTO OU COMPRESSÃO

Para os autores Beber (2003), Ferrari (2007), Gárcez (2007), Rodrigues (2009) e Meneghetti (2007) as fibras empregadas para o reforço à flexão e ao cisalhamento em vigas e pilares devem ser fixadas em forma de mantas, laminados ou tecidos. Referente a execução a flexão, as fibras devem ser aplicadas na face inferior da viga ou laje com uma ou várias camadas, conforme a figura 29 dependendo da resistência requerida em projeto.

Figura 29: Reforço de vigas e lajes a flexão.



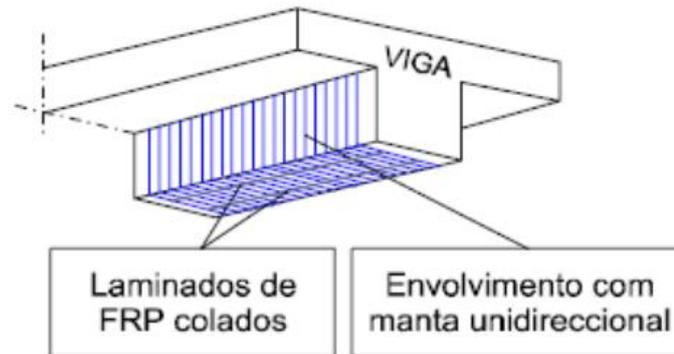
Fonte: Zucchi, 2015.

A FIB 14 (2001) sugere a aplicação das fibras uma adjacente a outra e caso houver a aplicação de PRF sobreposto, recomenda a limitação de cinco camadas de fibra. Porém, Beber (2003) em seu estudo sobre o comportamento de vigas com fibras carbono utilizou seis camadas sobrepostas e obteve resultados satisfatórios quanto ao ganho de resistência.

Beber (2003) em seu estudo recomenda que para a execução do reforço das vigas ao cisalhamento as fibras devem ser aplicadas em forma de “U” (figura 30), ou seja, na face inferior e nas faces laterais da viga, devido a sua eficácia em regiões onde à momento positivo. Na seção de momento negativo, ou seja, na face superior

da viga, é possível o desenvolvimento de fissuras próximo a laje e assim o reforço perde sua utilidade.

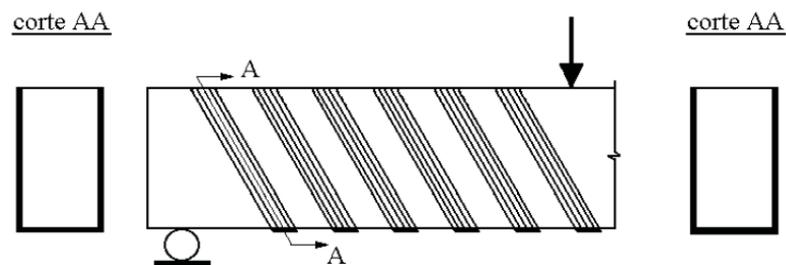
Figura 16: Reforço de vigas ao cisalhamento.



Fonte: Zucchi, 2015.

Beber (2003) e Carneiro (2004) ressaltam que as fibras do mesmo modo, podem ser utilizadas a 45° em relação ao eixo da peça, conforme a figura 31, porém não é muito indicado por ter uma execução trabalhosa.

Figura 17: Aplicação de FRP em vigas a 45° .



Fonte: Carneiro, 2004.

Pérez (2016), reforça que o envolvimento da viga amplia sua capacidade resistente, porém o autor ressalta que existe uma dimensão máxima de ancoragem, sendo está uma técnica complicada de executar. Beber (2003) e Pérez (2016) apontam que a desvantagem do envolvimento da seção de uma viga é a ruptura dúctil e ao deslocamento.

Na hipótese de acesso ao projeto estrutural e dessa forma ser possível a identificação da posição do estribo (armadura de cisalhamento), as fibras devem ser posicionadas entre os estribos, a fim de que o reforço ao cisalhamento não perca sua capacidade resistente.

Os pilares sujeitos a compressão são confinados com PRF, sendo aplicados com as fibras perpendiculares ao eixo longitudinal do pilar, de acordo com a figura 32.

Figura 18: Reforço de pilares a compressão



Fonte: Zucchi, 2015.

Pérez (2016), relata em seu estudo que os pilares com seção circular possuem bom desempenho, devido a tensão lateral ser uniforme em todo o seu perímetro. No entanto, os pilares com seção retangular ou quadrada devem dispor de arestas arredondas para minorar a tensão lateral irregular, sendo assim o mais indicado é ter o maior raio de aresta possível.

Carneiro (2004) em sua análise, recomenda a utilização da fibra de carbono para atingir maiores valores de resistência ao confinamento. Quando necessário uma maior ductilidade utiliza-se as fibras de vidro e aramida.

Pereira (2009) na sua tese de doutorado comprovou a eficácia do confinamento de pilares com fibra de vidro, onde foram ensaiados 6 corpos de prova sem reforço e 10 corpos de prova com fibra de vidro. A resistência média dos corpos de prova ensaiados a compressão sem reforço foi de 22,16 MPa, enquanto os corpos de prova com fibra de vidro apresentaram resistência média de compressão de 40,46 MPa, sendo assim o pilar obteve acréscimo de resistência a compressão de 82,58%.

8.2 FADIGA

Quando se trata da fadiga em elementos estruturais é escasso estudos sobre o assunto, por ser pertinente a casos de pontes, viadutos ou ferrovias.

Apesar disso, Meneghetti (2007) realizou ensaio a fadiga, onde foram ensaiadas vigas com seção 15x30 cm e comprimento de 300 cm, validando a aplicação da colagem das fibras de aramida, carbono e vidro. As vigas testemunho

(VT.F_1 e VT.F_2) apresentaram falha a fadiga com número de ciclos de $1,29 \times 10^5$ e romperam com 80,88 KN. Em compensação as vigas com uma camada de fibra de aramida (VRA.F_1 e VRA.F_2) e uma camada de fibra de carbono (VRC.F_1 e VRC.F_2), obtiveram resultados de falha semelhantes de $4,54 \times 10^5$ ciclos com carga de ruptura de 102,3 KN e $2,94 \times 10^5$ ciclos com carga de ruptura 103,26 KN, respectivamente. Já a viga com quatro camadas de fibra de vidro alcançou a falha com $2,16 \times 10^6$ ciclos e rompeu a 130,61 KN.

A autora complementa que as fissuras surgem no decurso dos primeiros ciclos de carregamento, havendo acréscimo da abertura de fissura com o prolongamento da carga.

Carneiro (2004) em sua tese analisou os resultados de Shahawy e Beitelman (1999) no qual foram feitos experimentos relativos ao desempenho a fadiga de vigas de concreto armado já fissuradas reforçadas com fibra de carbono. A viga testemunho suportou 3×10^5 ciclos, e as vigas com carbono contendo duas camadas obteve 2×10^6 ciclos e com três camadas 3×10^6 ciclos. Os autores complementam em suas pesquisas que o comportamento das vigas reforçadas a fadiga com fibra de carbono é superior, quando confrontado com a fibra de aramida e de vidro.

8.3 TEMPERATURA

Carneiro (2004) e Gárcez (2007) corroboram que as fibras quando expostas a 50°C podem perder sua capacidade como reforço. Para minorar este problema procede-se a utilização de isolantes térmicos, argamassa polimérica ou coberturas intumescentes. Gárcez (2007) ainda ressalta que em casos de incêndio as fibras podem libertar fumaça negra e densa, que ocasionalmente são capazes de serem tóxicos e corrosivos.

8.4 CORROSÃO

A FIB 14 (2001) não propõe a colagem de PRF em fissuras causadas pela corrosão, devido a ferrugem se expandir no concreto acarretando a ruptura. Logo, para a fibra servir como um substituto parcial do aço deve-se realizar a reparação da corrosão e seguir os procedimentos de reparação do substrato.

8.5 RUPTURA

A tabela 3 relaciona a quantidade de camadas de fibras aplicadas, o valor da carga resistida por essas fibras e o modo de ruptura. Para cada autor foram incluídos uma viga de referência que não apresentava a colagem de fibras, com o intuito de qualificar a contribuição das fibras como reforço estrutural.

Tabela 3: Modos de ruptura

Autor	Referência da viga		Tipo de fibra	Área efetiva (cm ²)	Número de camada	Carga de ruptura média	Modo de ruptura	Incremento (%)
	Sem reforço	Com reforço						
Ferrari (2007)	V1A	-	-	-	-	89,7	-	-
	-	V1B	Carbono	-	3	143,93	Ruptura do reforço	60,46
	-	V3B	Carbono	-	1	111,4	Ruptura do reforço	24,19
	-	V1C	Carbono	-	3	147,37	Desprendimento do reforço	64,29
Beber (2003)	V1_A e V1_B	-	-	-	-	103,68	-	-
	-	V4_A e V4_B	Carbono	0,17	1	131,43	Ruptura por fissuração excessiva de	26,77
	-	V5_A e V5_B	Carbono	0,990	6	177,94	Arrancamento do cobrimento	71,62
	-	V6_A e V6_B	Carbono	0,17	1	118,53	Ruptura por fissuração excessiva de	14,32
	-	V7_A e V7_B	Carbono	0,990	4	160,93	Descolamento na interface concreto/reforço	55,22
Gárces (2007)	VT	-	-	-	-	103,16	-	-
	-	VFC_01	Carbono	0,25	1	128,68	Descolamento do reforço	76,74
	-	VFA_01	Aramida	0,43	1	134,5		30,38
	-	VFC_02	Carbono	0,5	2	189,06		83,27
	-	VFA_02	Aramida	1,59	2	164,47		59,43
	-	VFV_02	Vidro		3	183,53		77,91
Andrade (2017)	1, 2, 3 e 4	-	-	-	-	9,71	-	-
	-	9	Vidro	1,8	-	17,11	Ruptura por cisalhamento	76,26
	-	10	Vidro	1,8	-	23,42		141,26
	-	11	Vidro	1,8	-	20,61		112,31
	-	12	Vidro	1,8	-	22,97		136,62
Meneghetti (2007)	VT.F_1 e VT.F_2	-	-	-	-	80,88	-	-
	-	VRC.F_1 e VRC.F_2	Carbono	-	1	103,26	Descolamento do reforço	27,67
	-	VRV.F_1 e VRV.F_2	Vidro	-	4	130,61		61,48
	-	VRA.F_1 e VRA.F_2	Aramida	-	1	102,13		26,27

Fonte: Do autor.

Carneiro (2004) estabelece que a quantidade de camadas de fibras utilizadas no reforço a flexão interfere na capacidade resistente, pois com uma maior quantia de

camadas, a peça torna-se suscetível a ruptura e deve haver um maior controle da fissuração.

Gárcez (2007) contesta e sustenta que o aumento das camadas de fibras é benéfico ao aumento da resistência a tração, resultando em maior rigidez da peça e a desaceleração da fissuração. A autora comprova em sua análise a utilização de FRP como reforço a flexão e ao cisalhamento, no qual foram ensaiados diversos tipos de compósitos, porém com a colagem de fibras foram analisadas 5 vigas com fibra de aramida, carbono e vidro e 1 viga testemunho (VT). As vigas VFC_01 e VFA_01 obtiveram aumento médio de 27% de resistência em relação a viga VT, possuindo apenas uma camada de reforço de carbono e aramida respectivamente. A viga VFC_02 disposta de duas camadas de fibra de carbono rompeu com carga de 189,06 KN, ou seja, 83,27% de incremento quando comparada a viga VT que rompeu a 103,16 KN. Em contrapartida, a viga VFA_02 com duas camadas de fibra de aramida, rompeu com carga de 164,47 KN, obtendo 23,84% a menos de resistência que a fibra de carbono. Para a fibra de vidro obter resultados semelhantes a aramida e ao carbono, foram necessárias três camadas de fibra de vidro, e assim alcançou 183,53 KN, essa propriedade é devido a fibra de vidro dispor de modulo de elasticidade inferior a fibra de carbono e de aramida.

A autora complementa que a geração das fissuras antecede a ruptura. As vigas VFC_01 e VFA_01 manifestaram fissuras com cargas de 20,65 KN e abertura de 1,87 mm, semelhante a viga VT que exibiu fissuras a 20,24 KN com abertura de 1,65 mm. Entretanto, o desempenho das vigas VFV_02, VFC_02 e VFA_02 foram súperos quando comparados as vigas com uma camada, apresentado fissuras com carga média de 26,91 KN e abertura de 2,34 mm. Em todas as vigas, no meio do vão surgiram as maiores aberturas das fissuras, devido a seção ser de maior momento fletor. Na viga VT, quando houve o alcance da máxima carga de ruptura, a fissura apresentava 2 mm. Já as vigas com uma camada quando submetidas a uma carga de 100 KN, tiveram abertura máxima de 0,4 mm.

Andrade (2017) em sua tese analisou 12 corpos de prova para resistência a flexão, porem para o presente trabalho, foram analisados somente 4 vigas em concreto armado sem fibras e 4 vigas em concreto armado reforçado com fibra de vidro. Nos ensaios das vigas de referência verificou uma resistência média rupturas das vigas V1 a V4 de 9,71 KN, enquanto as vigas V9 a V12 reforçadas com fibra de vidro apresentaram carga média 21,0 KN. Sendo assim, em seu estudo se sucede a

utilização das fibras de vidro no reforço a flexão, devido a um incremento da resistência de aproximadamente 116,61%, destarte verifica-se um aumento significativo da resistência com a colagem de fibras sendo o dobro de resistência quando comparada as vigas sem reforço.

Beber (2003) conduziu uma investigação experimental em vigas de concreto com a utilização de fibra de carbono. No total foram 14 vigas ensaiadas a flexão e 30 vigas ao cisalhamento com seção de 15x 30 cm e comprimento de 300 cm. O autor viabiliza a fibra de carbono como reforço a flexão, pois ela apresentou efeitos satisfatórios, em que as vigas usufruíram de majoração da rigidez e da resistência, sendo que a última houve um ganho médio de 41,98% quando comparada com vigas sem reforço.

Ferrari (2007) realizou um estudo sobre o comportamento das vigas a flexão com a utilização de fibra de carbono, sendo que os corpos de prova apresentavam formato cilíndrico de 10x 20 cm. O resultado com uma camada de carbono foi parecido com Beber (2003), com ruptura a 111,4 KN (V3B), ou seja, uma majoração de 24,19% de resistência quando comparado a viga sem reforço V1A, que rompeu a 89,7KN. Em parte, as vigas com três camadas, V1B e V1C, tiveram acréscimo médio de 62,34%.

Pérez (2016) sustenta a utilização de ancoragem em vigas reforçadas ao cisalhamento, visto que gera a majoração da resistência. É considerada como frágeis locais de junção do reforço e viga, ou seja, nas bordas da fibra, aplica-se o suporte de ancoragem.

Carneiro (2004) não incluiu a utilização de ancoragem nas bordas das fibras em seus ensaios, resultando na ruptura com descolamento. Apesar disso o autor chegou à conclusão que o compósito atingiu os resultados satisfatoriamente.

Nos ensaios de Ferrari (2007), o modo de ruptura foi dado pelo desprendimento da fibra na viga ocorrendo de forma brusca e o arrancamento do cobrimento se deu somente no vão de cisalhamento. No ensaio, o surgimento da fissura causada pelo desprendimento, conglomerou a outras fissuras levando a ruptura da camada de concreto.

Gárcez (2007) corrobora com Ferrari (2007) sobre o desprendimento se desenvolver no vão de cisalhamento. Devendo se atentar ao fato de que a ruptura ocorre de forma silenciosa e as fissuras no concreto estão concatenadas a ruptura, cuja a existência gera problemas de aderência. Porém, a autora salienta que a ruptura se desenvolve em níveis de carregamento superiores aos calculados em projeto. E

que utilização de ancoragem pode prevenir rupturas do tipo *peeling-off*, que possibilita o descolamento nas extremidades do PRF no concreto.

Carneiro (2004) acresce que a ruptura dos pilares de concreto confinados é súbita.

9 RESULTADOS

Analisando as tabelas compiladas onde os autores Carneiro (2004), Meneghett (2007), Garcez (2007), e as normas FIB 14 (2001) e ISIS (2007) trouxeram informações sobre a resistência a tração em MPa, ou seja, a carga máxima que a fibra suporta e os módulos de elasticidade em GPa, isto é, o limite de deformação que as fibras de aramida, carbono e vidro toleram. Os dados foram reunidos e expostos no apêndice 3, onde essas informações foram obtidas a partir de normas internacionais ou de fabricantes, porém se verificadas unicamente cada tipo, existem diferenças nos parâmetros usados entre o que as normas apresentam e o que as fabricantes asseguram.

Tabela 4: Fibra de alto desempenho - carbono

TIPOS DE FIBRAS		RESISTENCIA À TRAÇÃO (Mpa)	Módulo de elasticidade (Gpa)	
C A R B O N O	CARNEIRO (2004)			
	CEB (2001)			
	Alta resistência	3500 a 4800	215 a 235	
	Ultra-alta resistência	3500 a 6000	215 a 235	
	Alto módulo de elasticidade	2500 a 3100	350 a 500	
	Ultra- alto módulo de elasticidade	2100 2400	500 a 700	
	ACI 440.2R (2002)			
	Alta resistência	3790 a 4820	220 a 240	
	Ultra-alta resistência	4820 a 6200	220 a 240	
	Alto módulo de elasticidade	1720 a 3100	340 520	
	Ultra- alto módulo de elasticidade	1380 a 2400	520 a 690	
	Master Builders Technologies - MBT Brasil (MBT, 1998a)			
	CF - 130	3550	235	
	CF - 530	3000	380	
	Sika (SIKA, 2000)			
	Sika® CarboDur® S	2800	165	
	Sika® CarboDur® M	2400	210	
	Sika® CarboDur® H	1300	300	
	SikaWrap® Hex-230C	3500	230	
	SikaWrap® Hex-103C	3500	230	
	Toho Tenax Co., Ltd.			
	HTA	3720 a 3920	235	
	UT	5000 e 5390	240 e 255	
	IM	4710 e 5790	294 e 285	
	LM	3140	155	
	HM	3240	345	
	TM	3920	345	
	UM	3330 a 4900	6650 a 382	
	Clever Reinforcement Company - S&P FRP Systems			
	S&P C-SHEET 240	3800	240	
	S&P C-SHEET 640	2640	640	
	ISIS (2007)			
	PAN	Alta resistência	3500	200-240
		Alto módulo de Young	2500 - 4000	350 - 650
	Pitch	Comum	780 - 1000	38 - 40
		Alto módulo de Young	3000-3500	400 - 800
	GARCEZ (2007)			
	Laminado (strip) - Fabricante : Sika			
	CarboDur S	2800	165	
	CarboDur M	2400	210	
CarboDur H	1300	300		
Laminado (strip) - Fabricante : S&P Clever Reinforcement Company				
Laminate 150/2000	1300	165		
Laminate 200/2000	16650	205		
Tecidos (prepreg) - Fabricante: Mitsubishi Chemical Corporation				
Replark 20	3400	230		
Replark MM	2900	390		
Replark HM	1900	640		
Tecidos (dry fabric) - Fabricante: Degussa Constructions Chemicals				
Mbrace CF 530	3500	373		
Tecidos (dry fabric) - Fabricante: S&P Clever Reinforcement Company				
S&P C-Sheet 240	3800	240		
S&P C-Sheet 640	2650	640		
MENEGHETT (2007)				
Carbono Replark 20	3400	230		
Carbono CF 130	3400	227		
FIB 14 (2001)				
Força elevada	3500 -4800	215 -235		
Ultra alta resistência	3500 - 6000	215 -235		
Módulo alto	2500 - 3100	350 - 500		
Módulo ultra alto	2100 - 2400	500 - 700		

Fonte: Do autor.

Em um comparativo entre os três tipos de fibras identifica-se que as fibras de carbono no geral dispõem de valores superiores aos das outras fibras. Em específico a fibra de carbono da ACI, ultra - alto modulo de resistência, presente na tabela 4, pois possui superior módulo de elasticidade podendo chegar a 800 GPa, tendo a capacidade de ser até três vezes superior ao modulo de elasticidade da fibra de vidro e até duas vezes maior que a fibra de aramida quando comparadas e alta resistência a tração que se assemelha a fibra de aramida. As fibras de carbono são altamente resistentes a tração e compressão, fadiga, corrosão, deformações lentas, possuem comportamento mediano quando submetidas a impactos e tem excelente comportamento se exposto a altas temperaturas.

Tabela 5: Fibra de alto desempenho - vidro

TIPOS DE FIBRAS	RESISTENCIA À TRAÇÃO (Mpa)	Módulo de elasticidade (Gpa)	
V I D R O	CARNEIRO (2004)		
	CEB (2001)		
	Tipo E	1900 a 3000	70
	Tipo S	3500 a 4800	85 a 90
	ACI 440.2R (2002)		
	Tipo E	1860 a 2680	69 a 72
	Tipo S	3440 a 4140	86 a 90
	Master Builders Technologies - MBT Brasil (MBT, 1998a)		
	EG-30	1550	74
	Sika (SIKA, 2000)		
	SikaWrap ® Hex-100G	2550	70
	Clever Reinforcement Company - S&P FRP Systems		
	S&P G-Sheet E	3400	73
	S&P G-Sheet AR	3000	65
	ISIS (2007)		
	VIDRO E	3500 - 3600	74 - 75
	VIDRO S	4900	87
	Resistentes a alcalis	1800 - 3500	70 - 76
	GARCEZ (2007)		
	Tecidos (dry fabric) - Fabricante: Degussa Constructions Chemicals		
	Mbrace EG 900	1517	72,4
	Tecidos (dry fabric) - Fabricante: S&P Clever Reinforcement Company		
	S&P G-Sheet E	3400	73
	S&P G-Sheet AR	3000	65
	MENEGHETT (2007)		
	Vidro TRB 600	3400	72,4
	Vidro EG 900	1517	72,4
	FIB 14 (2001)		
E	1900 - 3000	70	
S	3500 - 4800	85 - 90	

Fonte: Do autor.

As fibras de vidro do tipo S de acordo com as normas que foram apresentadas na tabela 5, podem variar sua resistência entre 3500 a 4900 MPa e por isso são usados para aplicações onde se deseja alcançar alto desempenho. O módulo de elasticidade varia entre 85 e 90 GPa, porém essa variante da fibra de vidro não é muito utilizada devido a seu alto custo. Para a utilização no reforço, geralmente são usadas as fibras de vidro tipo E, que apresentam baixo módulo de resistência, ou seja, essa nuance da fibra de vidro dispõe de uma resistência inferior às fibras de aramida e carbono, conseqüentemente exibem um baixo custo, mas são altamente resistentes as temperaturas elevadas e a radiação ultravioleta.

Tabela 6: Fibra de alto desempenho - aramida

TIPOS DE FIBRAS		RESISTENCIA À TRAÇÃO (Mpa)	Módulo de elasticidade (Gpa)
A R A M I D A	CARNEIRO (2004)		
	CEB (2001)		
	Baixo módulo de elasticidade	3500 a 4100	70 a 80
	Alto módulo de elasticidade	3500 a 4000	115 a 130
	ACI 440.2R (2002)		
	Baixo módulo de elasticidade	3440 a 4140	69 a 83
	Alto módulo de elasticidade	3440 a 4140	110 a 124
	Du Pont		
	Kevlar® 29	2920	71
	Kevlar® 49	3000	112
	Kevlar® 119	3100	55
	Kevlar® 129	3400	97
	Clever Reinforcement Company - S&P FRP Systems		
	S&P A- Sheet 120	2900	120
	ISIS (2007)		
	Kevlar 29	3620	82,7
	Kevlar 49	2800	130
	Kevlar 129	4210	110
	Kevlar 149	3450	172 - 179
	Twaron	2800	130
	Technora	3500	74
	GARCEZ (2007)		
	Tecidos (dry fabric) - Fabricante: Degussa Constructions Chemicals		
	Mbrace AK 60	2000	120
	Tecidos (dry fabric) - Fabricante: S&P Clever Reinforcement Company		
	S&P A - Sheet 120	2900	120
MENEGHETT (2007)			
Aramida AK 60	2173,5	124,2	
FIB 14 (2001)			
Módulo baixo	3500 - 4100	70 - 80	
Módulo alto	3500 - 4000	115 - 130	

Fonte: Do autor.

Já as fibras de aramida (tabela 6) possuem uma resistência à tração elevada tendo o potencial de ser comparado com a fibra de carbono, seu módulo de elasticidade pode ser classificado como intermediário entre as fibras aqui confrontadas. Em análise a fibra de aramida é mais indicada para resistir à tração, impactos, meios alcalinos, a corrosão, elevadas temperaturas e possui um custo mediano.

Considerando a elevada resistência que as fibras de alto desempenho retêm, deve-se ser levado em consideração o número de camadas que será executado o reforço, pois como já referenciado em análise, quanto mais camadas são inseridas

verifica-se o alcance de maiores módulos de resistência já que se tratam de fibras de altíssimo desempenho que vão sendo aderidas umas às outras, ou seja a cada camada inserida maior é o ganho de resistência para a peça que está sendo reforçada.

Durante a análise é possível averiguar a efetividade da fibra de carbono como alternativa para o reforço e com a utilização de ancoragem nas bordas, a tendência de absorver a tensão seria maior e preveniria a ocorrência da ruptura por descolamento.

Vale salientar, que as fibras de aramida, carbono e vidro proporcionam uma redução da abertura da fissura e não na eliminação do número de fissuras, sendo capaz de ser benéfico sob perspectiva da durabilidade da estrutura em concreto armado.

Em um projeto devem ser considerados o cenário de ação em que as fibras serão inseridas, o ganho que é necessário de resistência, o ambiente que a fibra estará exposta e o custo-benefício, ou seja, é necessário uma análise para que assim se possa optar pela fibra que mais se adeque a determinada circunstância, já que os três tipos aqui apresentados se encaixam perfeitamente em múltiplas situações.

10 CONSIDERAÇÃO FINAL

Conforme visto, as estruturas de concreto armado ao longo de sua vida útil apresentam desenvolvimento de deterioração da estrutura, conhecido pela engenharia como patologia, sendo recorrente o surgimento de fissuras em vigas, lajes e pilares que comprometem a durabilidade da estrutura.

O presente estudo retratou o tema reabilitação em estruturas de concreto armado com a colagem das fibras de aramida, carbono e vidro que são coladas com resinas gerando assim os compósitos reforçados com fibras, como alternativa para reforçar estruturas fissuradas. As fibras são comercializadas em formas de mantas, tecidos ou barras, e possuem alta resistência, rigidez, tenacidade, durabilidade e diversas outras vantagens que fazem esse material ser uma ótima alternativa de recuperação de estruturas comprometidas. Para a aplicação do PRF, deve-se levar em conta o estado atual da peça a ser recuperada/ reforçada, as propriedades dos materiais, o detalhamento, o dimensionamento do reforço, além da sua execução.

Nos ensaios dos autores que avaliaram o comportamento das peças estruturais reforçadas a flexão, ao cisalhamento, a compressão e a fadiga com a utilização de fibras, foram comprovados a redução da abertura das fissuras, aumento da rigidez, assim como o aumento da resistência relativa para menores camadas de fibras. Os modos de ruptura analisados nesse estudo em se tratando de vigas, quando reforçadas a flexão e ao cisalhamento, estão associados a quantidade de camadas, ou seja, quanto maior o número de camadas, mais propenso a ruptura. E para minorar tal situação deve-se envolver completamente a peça e ancorar as bordas da fibra no concreto. Dos ensaios analisados em pilares, as fibras de carbono são mais resistentes e rígidas quando comparada a fibra de aramida e vidro. Quando se pretende um confinamento com maior ductilidade, utiliza-se as fibras de vidro e aramida.

O número de camadas que podem ser inseridas interfere diretamente no alcance de maiores resistência e garantem alto desempenho, os compósitos tem a vantagem possuir baixo peso específico, tornando assim esse sistema um sistema vantajoso para reabilitação de estruturas de concreto armado.

Trabalhos futuros podem ser elaborados dando continuidade ao tema acerca de abordar sobre parâmetros para identificação do nível de deterioração limite para a

reabilitação ser inserida e a manutenção da estrutura já reforçada com compósitos de fibras.

REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 15575-1 Edificações Habitacionais. Desempenho**, 2013.

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

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 9575 - Impermeabilização – Seleção e Projeto**, 2010.

ACI (American Concrete Institute). **Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading. ACI 215R**, 1991.

ACI (American Concrete Institute). **State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures ACI 440R-96**, 2002.

ACI (American Concrete Institute). **Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures ACI 440.2R-02**, 2002.

ADORNO, F.V.; DIAS, F.O.; E SILVEIRA, J.C.O. **Recuperação e reforço de vigas de concreto armado**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) -- Universidade Federal de Goiás, Goiás, 2015.

ALBERGARIA, B. M. B. **Inspeção e reabilitação de estruturas de betão armado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal, 2013.

ALMEIDA, D. M. **Influência de manifestações patológicas precoces e erros construtivos em estruturas de concreto armado: proposição de uma escala de impacto na durabilidade**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ANDRADE, N. P. **Utilização de compósito de fibra de vidro/ resina epóxi para reforço estrutural de vigas de concreto armado**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) -- Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Guaratinguetá, 2017.

BASTOS, P. S. S. **Estruturas de concreto armado – Notas de Aula**. UNESP. Bauru, São Paulo, 2014.

BAUER, L.A.F. **Materiais de construção**. Vol. 1, 5ªed. Rio de Janeiro: Ltc, 2012

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

BERTOLINI, L.; **Materiais de construção: patologia, reabilitação, prevenção**. Tradução de: Leda Maria Marques Dias Back. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

BISCAIA, H. E. C. **Comportamento e modelação da ligação GFRP/betão em elementos de betão armado expostos a ambientes agressivos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Nova Lisboa, Lisboa, 2012.

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

BORBA, S. I. M. **Comportamento da ligação CFRP/betão em estruturas de betão armado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Universidade Nova Lisboa, Lisboa, 2015.

BOTO, T. A. P. M. **Estratégias para intervenções de reparação e reforço em estruturas de betão armado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra, 2015.

BRITO, M. M. O. **Análise de reforço de lajes em concreto armado através de comparativo técnico econômico para diferentes alternativas de reforço estrutural com materiais compósitos.** Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

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

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de materiais: Uma Introdução.** Rio de Janeiro: 5ª, 1999. 589p.

CARNEIRO, V. A. L. **Reforço de vigas e pilares de concreto com materiais compósitos de resina e fibras.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

CARVALHO, R. C. FILHO, J. R.F. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**, v. 4, 2014

COSTA, G. M. **Manifestação patológica do concreto armado com foco na oxidação da ferragem.** Especialização em construção civil – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

CUNHA, D. J. E. **Análise de fissuração em vigas de concreto armado.** Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BETÓN. **Externally bonded FRP reinforcement for RC structures - *Bulletin 14*.** Lausanne: FIB, 2001. Technical Report – Fédération Internationale du Béton, 2001.

FERRARI, V. J. **Reforço à flexão de vigas de concreto armado com manta de polímero reforçado com fibras de carbon (PFRC) aderido ao substrato de transição constituído por compósito cimentício de alto desempenho.** Tese

(Doutorado em Engenharia Civil) -- Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2007.

CARMONA G. T; FILHO, C. A. Boletim técnico: **Fissuração nas estruturas de concreto**. México, ALCONPAT, p. 1-16, 2013.

GARCEZ, M. R. **Alternativas para melhoria no desempenho de estruturas de concreto armado reforçadas pela colagem de polímeros reforçados com fibras**. Tese (Doutorado em Engenharia) –Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6a ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GIONGO, J. S. Apostila: **Concreto armado**. São Carlos. 2007

GRANATO, J.E. Apostila: **Patologia das construções**. São Paulo, 2002.

HELENE, P.R.L. **Ciência e suas tecnologias – durabilidade e vida útil**. Ibracon. São Paulo, 2011.

HELENE, P.R.L.; **Corrosão das Estruturas para Concreto Armado**, São Paulo, IPT, PINI, 1986.

HELENE, P.R.L.; **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. 2ªed. São Paulo: Pini, 1992.

ISIS (2001), **Strengthening Reinforced Concrete Structures with Externally-Bonded Fiber Reinforced Polymers**, Design Manual n.º4, The Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, ISIS Canada Corp., Winnipeg, Manitoba, Canada, 209 p.

JÚNIOR, C. M. **Deterioração de elementos de cobertura em concreto armado: diagnóstico com enfoque na corrosão de armaduras**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013

LAPA, J. S. **Patologia, recuperação e reparo das estruturas de concreto armado**. Especialização em construção civil – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

MACHADO, A. P. **Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono**. São Paulo: Pini, 2002. 282p.

MACHADO, A. P. **Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono**. São Paulo, 2010.

MARCELLI, M.; **Sinistros na construção civil: causas e soluções para danos e prejuízos em obras**, São Paulo: Pini, 2007.

MENEGHETTI, L. C., **Análise de comportamento à fadiga de vigas de concreto armado reforçadas com PRF de vidro, carbono e aramida**. Tese (Doutorado em Engenharia) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

NOSSA, T. S. **Estudo comparativo das tensões na interface de compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de carbono, aramida e vidro**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2011.

PÉREZ, A. F. **Reforço de vigas ao cisalhamento com compósito de fibra de carbono (PRFC)**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

PEREIRA, S. C. **Avaliação de concretos reforçados por confinamento com manta de fibra de vidro estrutural e pré-impregnado**. Tese (Doutorado em ciência e engenharia de materiais) -- Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. Tese (Doutorado em Engenharia) –Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

PRODANOV, C.C.; FREITAS, C.E. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas de pesquisa e do trabalho científico**. 2ªed. Novo Hamburgo: Universidade Feevale, 2013.

REIS, L. S. N. **Sobre a recuperação e reforço de estruturas de concreto armado**. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

RODRIGUES, C.C. **Reparação e reforço de estruturas de betão armado com sistemas compósitos de FRP**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) -- Universidade de Lisboa, Lisboa, 2005.

RODRIGUES, T. J. S. **Reforço de estrutura com FRP's**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Aveiro, 2009.

S&P CLEVER REINFORCEMENT COMPANY, **Design Guide Line for S&P FRF Systems**. Brunnen, 2006.

SANTOS, P. M. **Comparação de reforço com chapas de aço e fibras de carbono em vigas de concreto armado submetidas à flexão simples**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) -- Universidade Estadual de Feira de Santana, 2008.

SANTOS, G. S. **Aplicação de mantas de polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC) como reforço à punção em lajes lisas de concreto armado**. Tese (Doutorado em estruturas e construção civil) – Universidade de Brasília, 2014.

SANTOS, C. S. F. **Análise de soluções de reforço de estruturas de betão armado**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) -- Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, Lisboa, 2017

SOUSA, A.F.V.S. **Reparação, reabilitação e reforço de estruturas de betão armado**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade do Porto, Portugal, 2008.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**, 1 ed. São Paulo: Pini, 1998.

STEIN, K.J. **Avaliação experimental dos efeitos combinados de corrosão e fadiga em vigas de concreto armado**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

THOMAZ, E. **Trincas em edifícios: causas, prevenção e recuperação**, 1 ed. São Paulo: Pini, 1989.

TRINDADE, S. D. **Patologia em estruturas de concreto armado**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) -- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

VIEIRA, A. S. T. B. **Inspeção e reabilitação de estruturas de betão armado danificadas pela ação do fogo**, 2017. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2017.

ZUCCHI, L. F. **Técnicas para o reforço de elementos estruturais**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

APÊNDICES

Apêndice 1: Vida útil

Vida útil de projeto	Período de tempo que vai até a despassivação da armadura, normalmente denominado de período de iniciação. Corresponde ao período de tempo necessário para que a frente de carbonatação ou a frente de cloretos atinja a armadura. Esse período, no entanto, é o período que deve ser adotado no projeto da estrutura, a favor da segurança;
Vida útil de serviço	Período de tempo que vai até o momento em que aparecem manchas na superfície do concreto, ou ocorrem fissuras no concreto de cobrimento, ou ainda quando há o destacamento do concreto de cobrimento. Em certas situações é inadmissível que uma estrutura de concreto apresente manchas de corrosão ou fissuras, em outros casos somente o início da queda de pedaços de concreto, colocando em risco a integridade de pessoas e bens, pode definir o momento a partir do qual se deve considerar terminada a vida útil de serviço
Vida útil última ou total	Período de tempo que vai até a ruptura ou colapso parcial ou total da estrutura. Corresponde ao período de tempo no qual há uma redução significativa da seção resistente da armadura ou uma perda importante da aderência armadura / concreto, podendo acarretar o colapso parcial ou total da estrutura;
Vida útil residual	Período de tempo em que a estrutura ainda será capaz de desempenhar suas funções. O prazo final, nesse caso, tanto pode ser o limite de projeto, o limite das condições de serviço, quanto o limite de ruptura, dando origem a três possíveis vidas úteis residuais; uma mais curta, contada até a despassivação da armadura, outra até o aparecimento de manchas, fissuras ou destacamento do concreto e outra longa contada até a perda significativa da capacidade resistente do componente estrutural ou seu eventual colapso.

Fonte: Adaptado de Helene, 1998.