



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS
GERAIS**

**Escola de Engenharia
Curso de Especialização em
Construção Civil**

Augusto Marçal Ballesteros

**Análise de desempenho do reforço com manta de
fibra de carbono em concretos de cimento Portland**

**Belo Horizonte,
2023.**

AUGUSTO MARÇAL BALLESTEROS

**Análise de desempenho do reforço com manta de fibra de carbono em
concretos de cimento Portland**

Versão final

Monografia de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Especialização em Gestão e Tecnologia na Construção Civil do departamento de Engenharia de Materiais e Construção, da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Chahud

Belo Horizonte,
2023

B191a

Ballesteros, Augusto Marçal.

Análise de desempenho do reforço com manta de fibra de carbono em concretos de cimento Portland [recurso eletrônico] / Augusto Marçal Ballesteros. – 2023.

1 recurso online (70 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Eduardo Chahud.

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil da Escola de Engenharia da UFMG.

Anexos: 67-70.

Bibliografia: f. 65-66.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Construção civil. 2. Resistência de materiais – Engenharia. 3. Concreto – Testes. 4. Concreto armado. 5. Cimento Portland. 6. Fibras de carbono. I. Chahud, Eduardo. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 691



ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA

ALUNO: AUGUSTO MARÇAL BALLESTEROS

MATRÍCULA: 2020683371

RESULTADO

Aos 29 dias do mês de março de 2023 realizou-se a defesa da MONOGRAFIA de autoria do aluno acima mencionado sob o título:
"ANÁLISE DE DESEMPENHO DO REFORÇO COM MANTA DE FIBRA DE CARBONO EM CONCRETOS DE CIMENTO"

Após análise, concluiu-se pela alternativa assinalada abaixo:

APROVADO

APROVADO COM CORREÇÕES

REPROVADO

NOTA: 92

CONCEITO: A

BANCA EXAMINADORA:

Nome

Prof. Dr. Eduardo Chahud

Assinatura

Eduardo Chahud
Assinado de forma digital por Eduardo Chahud
Dados: 2023.03.29 15:08:42 -03'00'

Nome

Prof. Dr.ª Sidnea Eliane Campos Ribeiro

Assinatura

Sidnea Eliane Campos Ribeiro
Assinado de forma digital por Sidnea Eliane Campos Ribeiro
Dados: 2023.03.29 15:08:42 -03'00'

O candidato faz jus ao grau de "ESPECIALISTA EM CONSTRUÇÃO CIVIL: "GESTÃO E TECNOLOGIA NA CONSTRUÇÃO CIVIL"

Antônio Neves de Carvalho Júnior
Assinado de forma digital por Antônio Neves de Carvalho Júnior
Dados: 2023.03.30 01:26:32 -03'00'

Belo Horizonte, 29 de março de 2023

Coordenador do Curso

**Análise de desempenho do reforço com manta de fibra de carbono em
concretos de cimento Portland**

Monografia de Conclusão de Curso apresentada em 29 de março de 2023, ao
Curso de Especialização em, aprovado pela banca examinadora constituída dos
professores:

Prof. Dr. Eduardo Chahud

UFMG – Escola de Engenharia

Prof. Sidnea Eliane Campos Ribeiro

UFMG – Escola de Engenharia

AGRADECIMENTOS

Gostaria agradecer acima de tudo a Deus e a toda espiritualidade. Agradeço também a todos aqueles que fazem parte de minha vida: aos meus pais, ao meu irmão, aos meus padrinhos, a todos os meus familiares e aos meus amigos por toda a contribuição para meu crescimento em diversos aspectos.

Agradeço também à Arcelor Mittal e à UFMG pela oportunidade, posto que essa especialização foi um marco muito importante para minha carreira e teve papel fundamental na transição para o profissional que me tornei. Sendo assim, agradeço também a todos os professores e demais colaboradores envolvidos nessa especialização, em especial ao Prof. Dr. Eduardo Chahud pela orientação nesta monografia.

Sou grato por todas as experiências e desafios que pude vivenciar até então, pois todas as lições aprendidas contribuíram e seguem contribuindo para meu crescimento e melhoria contínua.

RESUMO

A utilização do concreto armado abriu um vasto leque de novas aplicações na Engenharia Civil. Durante muito tempo, considerou-se o concreto armado como um material perene e definitivo, devido à sua vida útil relativamente longa. No entanto, as patologias podem levar décadas para se manifestarem, criando uma falsa sensação de segurança e durabilidade. O concreto, assim como qualquer outro material existente na natureza, está sujeito à ação deletéria do meio ambiente, além de agressões físicas e químicas. É importante lembrar que algumas patologias surgem tardiamente como sintomas, cujas causas estão relacionadas a não conformidades introduzidas durante o processo de fabricação. Somando-se à decrepitude natural do material, há a preocupação com o aumento de ganhos financeiros ou melhoria do bem-estar humano, o que pode levar a estruturas a serem submetidas a novas destinações e carregamentos não previstos no projeto original. Como resultado, técnicas para a reparação e reforço das estruturas foram desenvolvidas junto com as técnicas necessárias para a construção de novas estruturas. Nesse contexto, nosso objetivo é analisar o ganho de desempenho do concreto de cimento Portland por meio da aplicação de técnicas de reforço estrutural, como a fixação de mantas de fibra de carbono externamente ao elemento. A metodologia utilizada foi baseada em pesquisas bibliográficas, com a utilização de materiais publicados anteriormente por autores da área, guias e manuais. É importante destacar que não há norma técnica nacional disponível. O estudo busca apresentar a fibra de carbono de forma abrangente, incluindo sua história, formas de disponibilização na construção civil e metodologias de aplicação. Por fim, os testes de laboratório foram realizados para quantificar o aumento de desempenho, o que comprovou a eficácia do material.

Palavras-chave: Reforços estruturais. Intervenções. Concreto. Desempenho. Fibra de carbono.

ABSTRACT

The use of reinforced concrete has opened up a plethora of new applications in the field of Civil Engineering. Due to its relatively long lifespan, reinforced concrete has been considered a permanent and durable material for a long time. However, despite its reputation, like any other material in nature, concrete is subject to the deleterious effects of its environment, including physical and chemical aggressions that can cause pathologies that may take decades to manifest. These pathologies may result from non-conformities introduced during the manufacturing process. Moreover, in addition to the natural aging of the material, the pursuit of financial gain or better living standards may lead to the imposition of new destinations and loads on structures that were not foreseen in their original design. Consequently, techniques for the repair and reinforcement of structures have been developed in addition to the necessary techniques for the construction of new structures. The goal is to analyze the performance improvement of Portland cement concrete through the application of a structural reinforcement technique, specifically the use of carbon fiber blankets affixed externally to the element. The research methodology is based on a thorough review of previously published materials by experts in the field, guides, and manuals, as there is no national technical standard on this topic. The study aims to provide a comprehensive overview of carbon fiber material, including its history, manufacturing methods, availability in construction, and application methodologies. Finally, laboratory testing was conducted to quantify the increase in performance, which validated the effectiveness of the material.

Key words: Structural reinforcements. Interventions. Concrete. Performance. Carbon Fiber.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama de tensões x deformações das fibras	17
Figura 2 - Fibra de carbono disponibilizada na forma de manta (tecido).....	19
Figura 3 – Aplicação da fibra de carbono na forma de manta (tecido).....	19
Figura 4 - Fibra de carbono disponibilizada na forma de laminado	20
Figura 5 Aplicação da fibra de carbono na forma de laminado	20
Figura 6 – Reforço de vigas à flexão e ao corte	21
Figura 7 – Reforço de viga de concreto à flexão e ao corte	21
Figura 8 – Reforço de lajes à flexão nas duas direções	22
Figura 9 – Reforço de pilares à flexão e confinamento	23
Figura 10 – Reforço de reservatórios e tanques	23
Figura 11 – Pilares fendilhados por efeitos sísmicos	24
Figura 12 - Colunas confinadas preventivamente em seus terços superior e inferior	25
Figura 13 – Reforço de tubulações de grande diâmetro	25
Figura 14– Reforço de tubulações de concreto de grande diâmetro.....	26
Figura 15 – Reforço externo de tubulações de aço com grande diâmetro	26
Figura 16 e Figura 17 – Reforço em estrutura histórica Pallazo Mozzi, Florença	31
Figura 18 – Esquema de aplicação do reforço com manta de fibra de carbono	32
Figura 19 - Teste de arrancamento em tubulação reforçada com manta de fibra de carbono	33
Figura 20 – Moldagem dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos	35
Figura 21 – Adensamento vibratório dos corpos de prova	38
Figura 22 - Resinas utilizadas no ensaio.....	39
Figura 23 – Mistura dos componentes do MC-DUR 1209 TX	40
Figura 24 – Mistura dos componentes do MC-DUR 1209.....	40
Figura 25 – MC-DUR 1209 TX aplicado em corpo de prova cilíndrico	41
Figura 26 – MC-DUR 1209 TX sendo regularizado.....	41
Figura 27 – MC-DUR 1209 TX sendo aplicado em corpo de prova prismático	42
Figura 28– Utilização do rolo apropriado com discos metálicos.....	42
Figura 29– Impregnação da manta de fibra de carbono aplicada em corpo de prova prismático.....	43

Figura 30 – Impregnação da manta de fibra de carbono em corpo de prova cilíndrico	44
Figura 31 – Corpos de provas completamente saturados com o MC-DUR 1209.....	44
Figura 32 – Corpos de provas prismáticos acabados	45
Figura 33– Corpos de provas cilíndricos acabados.....	45
Figura 34 – Corpos de provas cilíndricos e prismáticos acabados.....	46
Figura 35 – Representação de uma compressão de um corpo de prova.....	46
Figura 36 – Ensaio de compressão para (a) material dúctil (b) material frágil.....	47
Figura 37 - Representação de uma tração de um corpo de prova	48
Figura 38 – Ensaio de tração por compressão diametral	48
Figura 39 – Ensaio de tração na flexão.....	49
Figura 40 – Corpos de prova moldados	50
Figura 41 – Retificação dos corpos de prova	51
Figura 42 – Ensaio de compressão axial do corpo de prova não reforçado.....	52
Figura 43– Ensaio de compressão axial do corpo de prova reforçado.....	52
Figura 44 – Corpo de prova reforçado após o ensaio de compressão axial	53
Figura 45 – Ensaio de tração por compressão diametral do corpo de prova não reforçado	54
Figura 46 – Ensaio de tração por compressão diametral do corpo de prova reforçado	55
Figura 47 – Corpo de prova reforçado após o ensaio de tração por compressão diametral.....	56
Figura 48 – Ensaio de tração na flexão do corpo de prova não reforçado	57
Figura 49 – Ensaio de tração na flexão do corpo de prova reforçado	58
Figura 50– Cálculo da tensão de ruptura quando esta ocorre fora do terço médio...58	
Figura 51 – Corpo de prova em que a ruptura ocorreu fora do terço médio	60
Figura 52 – Corpo de prova não reforçado após o ensaio de tração na flexão.....	61
Figura 58 – Corpo de prova reforçado após o ensaio de tração na flexão.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensão de corpo de prova e vão de ensaio prismático.....	36
Tabela 2 – Classe de consistência do concreto	36
Tabela 3 - Número de camadas para moldagem dos corpos de prova.....	37

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – *American Concrete Institute*

CFC – Compostos de fibra de carbono

CX - corpos de prova de concreto de cimento Portland CP V, onde X é o número de série de rompimento

EBR – *Externally Bonded Reinforcement*

EPI – Equipamento de proteção Individual

FEA – Faculdade de Engenharia e Arquitetura

FRP – Fibra de reforço polimérico

Fumec – Fundação Mineira de Educação e Cultura

FX - corpos de prova de cimento Portland CP V reforçados com a fibra, onde X é o número de série de rompimento

NBR – Norma Brasileira Registrada

NSM – *Near Surface Mounted*

P&D – Pesquisa e Desenvolvimento

PCH – Pequena Central Hidrelétrica

POP – Procedimento Operacional Padrão

PRFC – Polímero de fibra de carbono reforçado

VUP – Vida útil de projeto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	Considerações Iniciais	14
2.2	Histórico	15
2.2.1	Disponibilidade no mercado	16
2.2.1.1	Classificações e tipos de sistemas CFC disponíveis no mercado.....	18
2.2.2	Aplicações.....	20
2.2.2.1	Reforço de vigas à flexão e ao cisalhamento	21
2.2.2.2	Reforço de lajes à flexão	22
2.2.2.3	Reforço de pilares e colunas	22
2.2.2.4	Reforço de tanques, silos, reservatórios e tubulações	23
2.2.2.5	Aumento da dutibilidade de colunas para a prevenção de efeitos sísmicos	24
2.2.2.6	Reforço de estruturas históricas.....	27
2.2.2.7	Reforço de tubulações de grande diâmetro de concreto.....	28
2.2.2.8	Reforço de tubulações de grande diâmetro de aço.....	29
2.2.3	Metodologia de aplicação.....	31
2.2.4	Limitações de uso	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1	Ensaio laboratoriais	34
3.1.1	Moldagem e cura dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos	34
3.1.1.1	Moldagem dos corpos de prova cilíndricos	35
3.1.1.2	Moldagem dos corpos de prova prismáticos	36
3.1.1.3	Adensamento dos corpos de prova.....	36
3.1.1.4	Cura	38
3.1.1.5	Aplicação do tecido de fibra de carbono	39
3.1.2	Resistência a compressão axial.....	46
3.1.3	Resistência a tração simples.....	47
3.1.4	Resistência a tração na flexão	49

4 ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS PELOS ENSAIOS LABORATORIAIS.....	50
4.1 Ensaio de resistência à compressão axial	51
4.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	54
4.3 Ensaio de resistência à tração na flexão.....	57
4.4 Análise comparativa	61
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
REFERÊNCIAS.....	63
ANEXOS	67
Anexo A – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão	68
Anexo B – Resultados dos ensaios de compressão	69
Anexo C – Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral	70

1 INTRODUÇÃO

As estruturas civis podem requerer reparos ou reforços por diversos motivos, tais como: falhas no projeto ou execução, mudança de uso, degradação natural, manutenção inadequada ou sinistros. Exemplos incluem:

- um mezanino de galpão industrial que receberá novo maquinário
- alguém que decide fazer uma reforma em seu apartamento de cobertura acrescentando uma piscina aquecida moderna
- uma ponte rodoviária que precisa de reforço estrutural devido ao aumento do tráfego e da carga por eixo dos veículos de transporte de carga.

A necessidade de manutenção ou incremento no desempenho estrutural é observada em diferentes tipologias (industrial/comercial, residencial e infraestrutura). Beber (2003) apresenta conceitos relacionados ao reforço de estruturas, incluindo:

- mudanças no regime de utilização, aumento das solicitações
- necessidade de estender a vida útil da estrutura
- degeneração estrutural acelerada
- mínima interrupção durante as intervenções de reparo
- restrições econômicas.

Juvandes (1999) destaca a dificuldade de reforçar-se uma estrutura de concreto, especialmente em relação à sua capacidade de carga, uma vez que a estrutura está consolidada. O objetivo geral do trabalho é apresentar a análise e incremento do desempenho do concreto de cimento Portland, reforçado com manta de fibra de carbono, uma solução moderna e pouco intrusiva para reabilitação e reforço estrutural. Os objetivos específicos incluem apresentar a história e as principais características do concreto de cimento Portland em relação à durabilidade, apresentar métodos tradicionais de reforço estrutural, desenvolver o tema proposto em termos históricos, fabricação e disponibilidade no mercado, técnicas de aplicação e exemplos de uso, além de quantificar o aumento de desempenho da estrutura por meio da apresentação de resultados de ensaios laboratoriais. A pesquisa é aplicada em relação à sua natureza, quantitativa em relação à abordagem e descritiva considerando seus objetivos. Os procedimentos consistem em uma revisão bibliográfica das principais referências, de autores consagrados na engenharia estrutural.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordadas considerações sobre o reforço de fibra de carbono, contextualizando desde o histórico, com exemplos de uso, até a atualidade. Serão apresentadas as diferentes formas nas quais a fibra pode ser encontrada no mercado, bem como situações nas quais é aplicável, seja de forma preventiva ou corretiva.

2.1 Considerações Iniciais

A concepção de uma estrutura de concreto armado deve ser realizada com um objetivo definido, a fim de prevenir problemas decorrentes da capacidade de carga. No entanto, embora o processo seja teoricamente simples, pode ocorrer inadequação da estrutura às solicitações a que está sujeita, resultando em patologias decorrentes de erros de projeto, execução inadequada, uso de materiais de baixa qualidade, deterioração ao longo do tempo e outros fatores.

Algumas vezes, alterações no uso da estrutura podem aumentar as cargas para um nível além do que ela suporta da forma da qual foi concebida, como no caso de uma laje projetada para um escritório que é transformada em academia de ginástica ou quando um morador de uma cobertura adiciona um pavimento extra. Modificações estruturais, como aberturas em vigas ou lajes para passagem de tubulações, também podem causar problemas. Portanto, é necessário que um engenheiro civil avalie os novos esforços aos quais a estrutura será submetida e determine se ela precisará ser reforçada. A avaliação também é fundamental após possíveis sinistros, como incêndios, para determinar se a capacidade de carga da estrutura foi afetada.

Uma técnica notável de reforço estrutural é a utilização de materiais compósitos, especialmente compósitos de fibra de carbono, que são uma alternativa às tradicionais chapas de aço utilizadas desde a década de 60. Os compósitos de fibra de carbono não são afetados pela corrosão eletroquímica e resistem aos efeitos corrosivos de ácidos, álcalis, sais e outros agentes agressivos. Além disso, possuem vantagens como leveza, resistência à corrosão, excelentes propriedades mecânicas, facilidade de aplicação em superfícies variadas, método não destrutivo e prazos curtos

para a aplicação do reforço. Machado (2002) destaca suas diversas vantagens. Não há uma norma brasileira específica para sua utilização. Portanto, normas internacionais, como a ACI-440 - Fiber Reinforced Polymer, do American Concrete Institute, são empregadas como diretriz para essa finalidade de reforço.

2.2 Histórico

Os primeiros materiais compostos surgiram na Europa como uma alternativa para as chapas coladas com resina epóxi utilizadas para reforço estrutural. O uso desses novos materiais em colunas de concreto armado foi iniciado nos EUA e Japão durante os anos 80, mas a tecnologia se desenvolveu rapidamente após o terremoto de HyogokenNanbu em 1995. As indústrias aeroespacial e de defesa, construções navais, indústria automotiva e equipamentos esportivos (como raquetes de tênis e tacos de golfe) também passaram a usar os materiais poliméricos avançados devido ao desenvolvimento desses materiais.

Inicialmente, o elevado custo de produção desses materiais e o investimento insuficiente em P&D limitaram e inibiram a utilização dos materiais poliméricos avançados na indústria da construção civil. No entanto, com o barateamento das matérias-primas, ganhos de escala e consequente viabilidade econômica, surgiram projetos de pesquisa e construções dedicadas ao uso desses materiais. Esses projetos resultaram em vasto conhecimento experimental e impulsionaram sua utilização fora dos meios acadêmicos.

Uma das principais vantagens dos materiais compósitos é a possibilidade de confeccionar o elemento de reforço para atender a uma solução particular em relação à geometria e às propriedades mecânicas. Os sistemas compostos, principalmente estruturados com fibra de carbono, têm sido utilizados comercialmente desde a metade dos anos 1980. O desenvolvimento de sua utilização começou em intervenções e projetos pontuais, mas hoje chega a dezenas de milhares de aplicações.

De acordo com a empresa Toray (2019), o primeiro registro de uso da fibra de carbono foi feito por Thomas Edison no fim do século 19, queimando algodão e bambu para produzir uma fibra resistente ao calor e ideal para condução de

eletricidade. Embora a fibra não fosse tão resistente quanto a atual, Edison a utilizou devido à sua alta resistência ao calor.

A substituição do emprego de chapas de aço por polímeros reforçados com fibra (PRF) foi discutida e estudada no EMPA, laboratório suíço de pesquisa, a partir da década de 80, de acordo com Garcez (2007)¹, a Meier (2000) relata que a primeira aplicação externa de PRFC ocorreu em 1991, na ponte Ibach em Luzern, Suíça. A ponte havia sido construída em 1969 e precisava ter sua resistência elevada para se adequar às novas cargas rodoviárias. O reforço foi realizado durante a noite, por meio de uma plataforma móvel, sem a necessidade de gastos com andaimes e desvio do trânsito. Foram gastos apenas 6,2 kg de PRFC, enquanto que, se optassem por realizar o mesmo reforço com chapa de aço colada com resina, seriam consumidos 175 kg de aço.

Segundo Machado (2002), no Brasil, a primeira obra a ser reforçada utilizando a técnica descrita foi realizada em 1998 no viaduto de Santa Teresa, situado em Belo Horizonte, Minas Gerais. Este viaduto foi tombado pelo Patrimônio Histórico e Cultural do Estado de Minas Gerais e foi construído em 1927. Em conformidade com a norma ABNT NBR 7188:1982 em vigor, o viaduto precisou ser reforçado para suportar uma nova demanda de cargas (classe 45 tf), sem que suas dimensões sofressem alterações devido a sua condição de Patrimônio Tombado. Para atender a esta exigência, a solução encontrada foi a aplicação de Fibra de Carbono, que garantiu o aumento exigido pela norma sem afetar a estrutura original do viaduto, mantendo sua integridade estética.

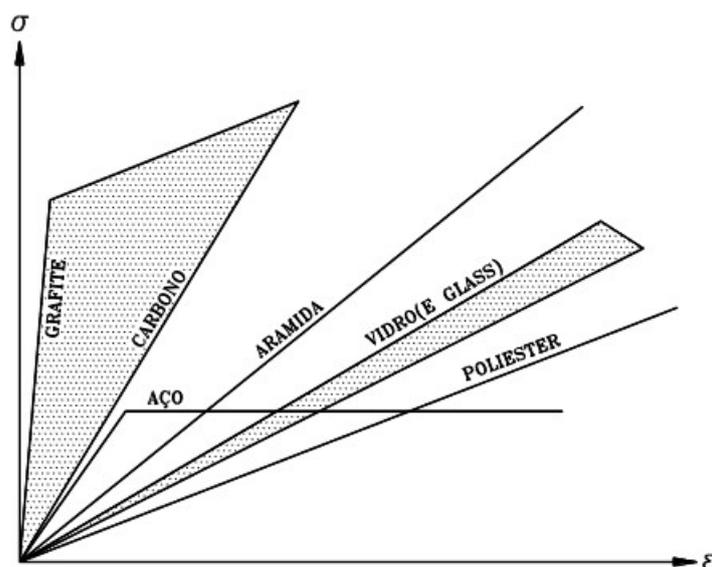
2.2.1 Disponibilidade no mercado

Existem diversas opções de fibras disponíveis no mercado, apresentando diferentes tipos e formatos, como: tecidos, laminados, barras e placas. De acordo com Machado (2011), as fibras de carbono são produzidas a partir do tratamento térmico de fibras precursoras orgânicas, tais como o poliácridonitril (PAN), alcatrão derivado do petróleo ou do carvão (PITCH) e fibras de rayon. O processo de produção envolve a oxidação dessas fibras precursoras, seguido por processamento em altas temperaturas, que varia de 1.000°C a 1.500°C para as fibras de carbono e até cerca

¹ *apud* De Melo Vieira (2014)

de 3.000°C para as fibras de grafite. Nesse processo, os átomos de carbono são perfeitamente alinhados ao longo da fibra precursora, conferindo ao produto final uma notável resistência mecânica. Na Figura 1 apresenta-se o diagrama de tensões x deformações das fibras e do aço.

Figura 1 - Diagrama de tensões x deformações das fibras



Fonte: Manual da Viapol (2011).

Ainda segundo Machado (2011), O módulo de elasticidade do material resultante varia de 100 GPa a 300 GPa para as fibras de carbono e até 650 GPa para as fibras de grafite, dependendo da temperatura de processamento. Quanto maior o módulo de elasticidade, maior o custo do material, sendo que as fibras de grafite custam cerca de 15 a 20 vezes mais do que as fibras de carbono. Os sistemas compostos estruturados que utilizam fibras de carbono apresentam características como:

- extraordinária resistência mecânica
- rigidez
- boa resistência à fadiga e cargas cíclicas
- elevada resistência a ataques químicos
- não são afetados pela corrosão
- possuem estabilidade térmica e reológica

Além disso, esses sistemas são extremamente leves, com peso específico da ordem de 1,6g/cm³ a 1,9g/cm³, cerca de 5 vezes menor do que o do aço estrutural, o

que permite que o seu peso próprio não seja considerado nos reforços.

2.2.1.1 Classificações e tipos de sistemas CFC disponíveis no mercado

A seguir serão apresentadas as classificações e sistemas CFC disponíveis no mercado com suas respectivas metodologias de aplicação e pontos de atenção.

2.2.1.1.1 Classificações e tipos de sistemas CFC disponíveis no mercado

De acordo com De Oliveira Borges (2016), o sistema NSM (Near Surface Mounted) é uma técnica utilizada para reforçar estruturas de concreto armado por meio da colagem de barras ou lâminas de fibra de carbono em entalhes feitos no cobrimento da estrutura. Diferentemente de outras metodologias, é possível aplicar o sistema NSM em concreto fissurado ou ligeiramente danificado, independentemente da resistência à tração da superfície do concreto. A utilização do sistema NSM evita o descolamento ou destacamento da superfície de concreto, que pode ser uma das causas da ruptura prematura, que é um dos principais problemas da utilização do CFC. Antes da aplicação, o substrato deve ser preparado e sulcos cortados com profundidade adequada, considerando as dimensões do CFC a ser aplicado e atentando para a profundidade de armaduras, tubulações ou outros materiais no interior da estrutura a ser reforçada. A aplicação deve ser acompanhada por adesivo adequado para garantir a aderência entre o reforço e a estrutura. A necessidade de camadas adicionais é individual a cada situação de projeto.

2.2.1.1.2 Composto de fibra de carbono aderido externamente

De acordo com De Oliveira Borges (2016), o CFC também é conhecido como EBR (Externally Bonded Reinforcement) e consiste em ser colocado simplesmente na superfície do substrato, que deve ser previamente preparado conforme descrito na metodologia. Existem diversas classificações para o composto, que pode estar em diferentes formas e variar de acordo com o local de aplicação, tais como: lâminas, tecidos, cabos, saturados via úmida, saturados via seca, pré-saturados, curados in loco ou pré-curados.

Não há uma forma melhor global para o composto, cada caso deve ser

analisado individualmente para escolher a forma mais adequada, levando em consideração a viabilidade de transferência de esforços entre o composto e o substrato, buscando sempre a forma mais simples e ágil de aplicação.

As figuras 02 a 05 apresentam os diferentes tipos de fibra de carbono comercialmente disponíveis, incluindo mantas, lâminas e barras, bem como exemplos de suas possíveis aplicações.

Figura 2 - Fibra de carbono disponibilizada na forma de manta (tecido)



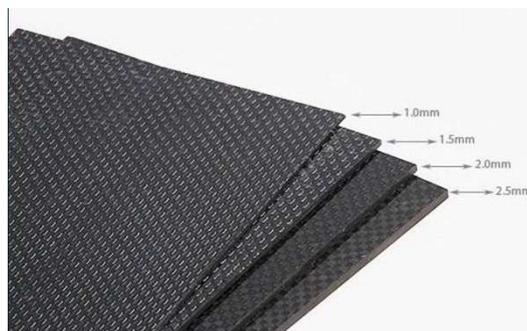
Fonte: Diprotec, Produtos técnicos para Construção (2017).

Figura 3 – Aplicação da fibra de carbono na forma de manta (tecido)



Fonte: Diprotec, Produtos técnicos para Construção (2017).

Figura 4 - Fibra de carbono disponibilizada na forma de laminado



Fonte: Tecknicas (2017).

Figura 5 Aplicação da fibra de carbono na forma de laminado



Fonte: Tecknicas (2017).

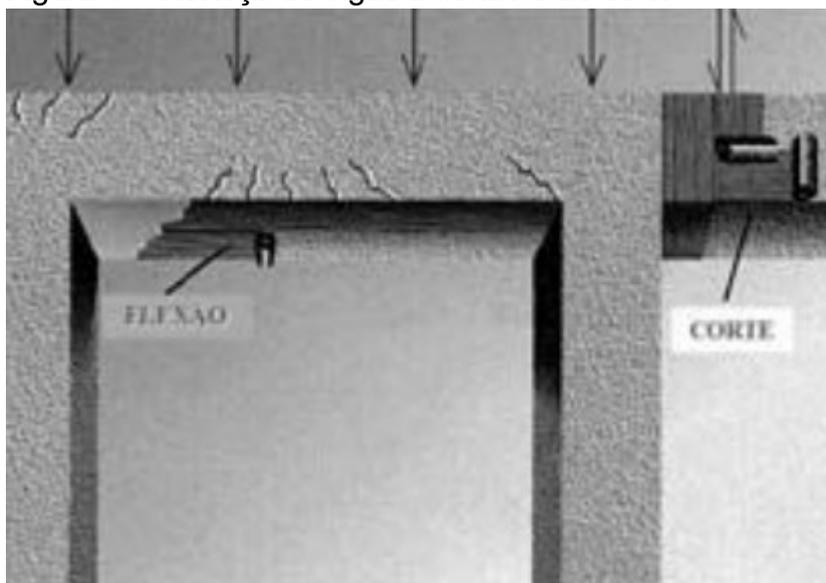
2.2.2 Aplicações

Conforme o Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono da Viapol (2011), os sistemas compostos estruturados com fibras de carbono podem ser utilizados em uma ampla gama de elementos de concreto armado para promover o reforço estrutural. Geralmente, esses sistemas são aplicáveis em elementos estruturais que experimentam momentos fletores, tensões de tração e compressão correspondentes, esforços cortantes e de torção com tensões tangenciais e em casos específicos de confinamento. A seguir serão demonstradas as principais aplicações práticas desses sistemas, segundo Machado (2002).

2.2.2.1 Reforço de vigas à flexão e ao cisalhamento

Conforme a Figura 06, os sistemas FRP têm a capacidade de absorver esforços de tração em momentos positivos e negativos, assim como as tensões tangenciais decorrentes dos esforços cortantes.

Figura 6 – Reforço de vigas à flexão e ao corte



Fonte: Manual da Viapol (2011).

Verifica-se que para suportar esforços de corte, as lâminas de fibra de carbono podem ser dispostas na direção 90° (vertical) e 0° (horizontal), ou mesmo em qualquer outra inclinação necessária ($\alpha \neq 0$). A Figura 7 apresenta um exemplo de uma viga de concreto armado reforçada com sistemas de fibra de carbono, que suporta esforços de flexão e corte.

Figura 7 – Reforço de viga de concreto à flexão e ao corte



Fonte: Viapol (2011).

2.2.2.2 Reforço de lajes à flexão

Conforme mencionado por Machado (2015), assim como as vigas, as lajes também podem ser reforçadas à flexão utilizando lâminas de FRP dispostas nas duas direções. É importante destacar que, como já mencionado anteriormente, o peso dos sistemas FRP é baixo, geralmente inferior a 1,5 kg/m². A Figura 8 ilustra um exemplo de aplicação de um sistema de fibras de carbono em uma laje de concreto armado reforçada.

Figura 8 – Reforço de lajes à flexão nas duas direções

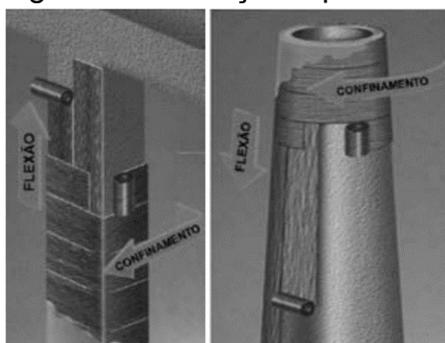


Fonte: Viapol (2011).

2.2.2.3 Reforço de pilares e colunas

Conforme destacado por Machado (2015), o uso de sistemas compostos FRP para reforço de pilares e colunas tem dois objetivos principais: aumentar a resistência à flexão e aumentar a resistência à compressão axial por confinamento de seção. Assim como no caso das vigas e lajes, as lâminas de FRP podem ser dispostas segundo as duas direções para o reforço à flexão. É importante ressaltar que, como já mencionado, o peso próprio dos sistemas FRP é baixo e pode ser desprezado. Tais considerações podem ser aplicadas também ao reforço de chaminés de concreto armado. A Figura 9 ilustra, à esquerda, as possibilidades de reforço para pilares e colunas e, à direita, as possibilidades para chaminés.

Figura 9 – Reforço de pilares à flexão e confinamento



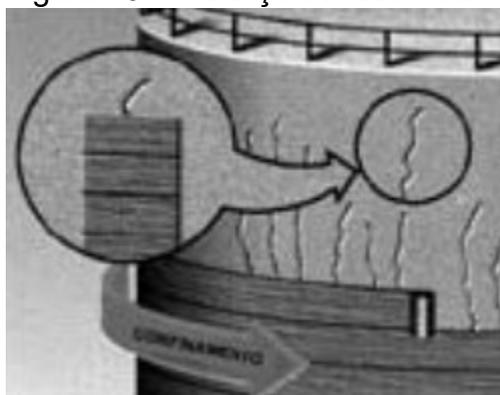
Fonte: Manual da Viapol (2011).

A partir da figura acima, é possível observar que o composto FRP pode atender simultaneamente a duas solicitações diferentes, sendo que cada uma delas requer um sistema de colagem próprio. Inicialmente, são aplicados os sistemas para atender à flexão e ao corte e, em seguida, sobre esses, é aplicado o reforço por confinamento.

2.2.2.4 Reforço de tanques, silos, reservatórios e tubulações

De acordo com Machado (2002), assim como pilares e colunas, estruturas como tanques, silos e reservatórios também podem ser reforçadas com o objetivo de aumentar a resistência à flexão e à compressão por confinamento de seção. A figura 10 ilustra o fissuramento vertical decorrente da tração radial que ocorre nas paredes de um reservatório, evidenciando a necessidade de reforços nesse tipo de estrutura.

Figura 10 – Reforço de reservatórios e tanques



Fonte: Manual da Viapol (2011).

Pode-se observar na figura acima que as fissuras verticais são causadas

pela tração radial nas paredes do reservatório. Após a realização dos procedimentos convencionais de tratamento de fissuras, o sistema composto com fibras de carbono é aplicado em toda a extensão ou de forma localizada e pontual. De acordo com Machado (2002), nesse tipo de reforço, o sistema composto atua de forma passiva, entrando em operação somente após a deformação da estrutura.

2.2.2.5 Aumento da dutibilidade de colunas para a prevenção de efeitos sísmicos

Conforme mencionado no Manual da Viapol (2011), os sistemas compostos estruturados com fibras de carbono são úteis para aumentar a dutibilidade, ou seja, a reserva de resistência, de colunas e pilares de concreto armado para resistir aos efeitos sísmicos, por meio do confinamento. Durante os abalos sísmicos, as tensões alternadas geradas causam o fendilhamento do concreto nas extremidades superior e inferior das colunas e pilares, como pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 – Pilares fendilhados por efeitos sísmicos



Fonte: Viapol (2011).

O confinamento é instalado preventivamente com o objetivo de minimizar os efeitos dos sismos. O sistema de confinamento tem como função evitar as deformações transversais do concreto e assegurar a integridade da seção da coluna ou pilar. De acordo com o Manual da Viapol (2011), o uso de sistemas compostos estruturados com fibras de carbono é uma aplicação interessante para aumentar a dutibilidade de colunas e pilares de concreto armado por confinamento, a fim de resistir aos efeitos sísmicos. Conforme mostrado na Figura 12, o confinamento pode ser aplicado preventivamente nos terços superior (lado esquerdo) e inferior (lado direito) das colunas.

Figura 12 - Colunas confinadas preventivamente em seus terços superior e inferior

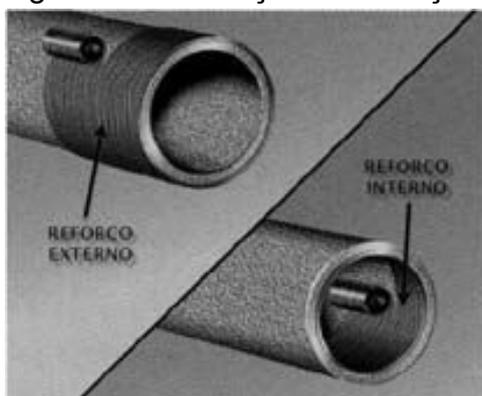


Fonte: Viapol (2011).

2.3.4.6 Reforço de tubulações de grande diâmetro de concreto

A utilização de sistemas compostos estruturados com fibras de carbono é uma opção viável para reforçar tubulações de concreto armado de grande diâmetro, seja interna ou externamente. Conforme demonstrado na Figura 13, o reforço pode ser aplicado de forma a atender às necessidades estruturais da tubulação.

Figura 13 – Reforço de tubulações de grande diâmetro



Fonte: Machado (2002).

A Figura 14 ilustra uma tubulação de água de grande diâmetro em concreto armado reforçada por meio de sistemas compostos estruturados com fibras de carbono.

Figura 14– Reforço de tubulações de concreto de grande diâmetro



Fonte: Viapol (2011).

2.3.4.7 Reforço de tubulações de grande diâmetro de aço

De acordo com Da Costa Vaz (2016), embora seja uma prática recente, a utilização de fibras de carbono para reforçar estruturas de tubulações de aço tem se mostrado cada vez mais necessária. Isso porque, nos últimos anos, tem sido comum a degradação das tubulações em indústrias e usinas devido ao envelhecimento das estruturas, resultando em diversas patologias, como corrosão do substrato metálico, comprometimento da integridade estrutural do tubo devido às paredes corroídas e surgimento de pequenos furos e cavidades na superfície, que podem resultar em vazamentos.

Figura 15 – Reforço externo de tubulações de aço com grande diâmetro



Fonte: Da Costa Vaz (2016).

A tecnologia de reforço estrutural de tubulações de aço por meio da instalação de mantas de fibra de carbono de alta resistência mecânica (Figura 15) apresenta-se como uma alternativa ao antigo método de substituição de tubulações, devido ao seu menor custo financeiro e ao baixo impacto devido à agilidade de execução dos serviços. Conforme destacado por Da Costa Vaz (2016), essa técnica tem como vantagens a garantia de maior resistência em comparação a uma nova tubulação, a prolongação da vida útil do equipamento em décadas, o excelente desempenho do tubo e a segurança dos operadores de usinas e indústrias, sendo uma solução eficiente para combater as patologias comuns causadas pelo tempo, tais como a elevada corrosão do substrato metálico, comprometimento da integridade estrutural do tubo devido às paredes corroídas e a ocorrência de pequenos furos e cavidades na superfície que podem provocar vazamentos.

2.2.2.6 Reforço de estruturas históricas

Conforme mencionado no Manual da Viapol (2011), os sistemas compostos estruturados com fibras de carbono são úteis para aumentar a ductibilidade, ou seja, a reserva de resistência, de colunas e pilares de concreto armado para resistir aos efeitos sísmicos, por meio do confinamento. Durante os abalos sísmicos, as tensões alternadas geradas causam o fendilhamento do concreto nas extremidades superior e inferior das colunas e pilares, como pode ser visto na Figura 11.

Figura 16 – Pilares fendilhados por efeitos sísmicos



Fonte: Viapol (2011).

O confinamento é instalado preventivamente com o objetivo de minimizar os efeitos dos sismos. O sistema de confinamento tem como função evitar as deformações transversais do concreto e assegurar a integridade da seção da coluna ou pilar. De acordo com o Manual da Viapol (2011), o uso de sistemas compostos estruturados com fibras de carbono é uma aplicação interessante para aumentar a

ductibilidade de colunas e pilares de concreto armado por confinamento, a fim de resistir aos efeitos sísmicos. Conforme mostrado na Figura 12, o confinamento pode ser aplicado preventivamente nos terços superior (lado esquerdo) e inferior (lado direito) das colunas.

Figura 17 - Colunas confinadas preventivamente em seus terços superior e inferior

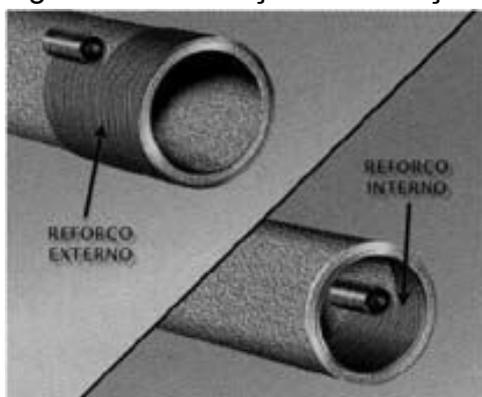


Fonte: Viapol (2011).

2.2.2.7 Reforço de tubulações de grande diâmetro de concreto

A utilização de sistemas compostos estruturados com fibras de carbono é uma opção viável para reforçar tubulações de concreto armado de grande diâmetro, seja interna ou externamente. Conforme demonstrado na Figura 13, o reforço pode ser aplicado de forma a atender às necessidades estruturais da tubulação.

Figura 18 – Reforço de tubulações de grande diâmetro



Fonte: Machado (2002).

A Figura 14 ilustra uma tubulação de água de grande diâmetro em concreto armado reforçada por meio de sistemas compostos estruturados com fibras de carbono.

Figura 19– Reforço de tubulações de concreto de grande diâmetro



Fonte: Viapol (2011).

2.2.2.8 Reforço de tubulações de grande diâmetro de aço

De acordo com Da Costa Vaz (2016), embora seja uma prática recente, a utilização de fibras de carbono para reforçar estruturas de tubulações de aço tem se mostrado cada vez mais necessária. Isso porque, nos últimos anos, tem sido comum a degradação das tubulações em indústrias e usinas devido ao envelhecimento das estruturas, resultando em diversas patologias, como corrosão do substrato metálico, comprometimento da integridade estrutural do tubo devido às paredes corroídas e surgimento de pequenos furos e cavidades na superfície, que podem resultar em vazamentos.

Figura 20 – Reforço externo de tubulações de aço com grande diâmetro



Fonte: Da Costa Vaz (2016).

A tecnologia de reforço estrutural de tubulações de aço por meio da instalação de mantas de fibra de carbono de alta resistência mecânica (Figura 15) apresenta-se como uma alternativa ao antigo método de substituição de tubulações, devido ao seu menor custo financeiro e ao baixo impacto devido à agilidade de execução dos serviços. Conforme destacado por Da Costa Vaz (2016), essa técnica tem como vantagens a garantia de maior resistência em comparação a uma nova tubulação, a prolongação da vida útil do equipamento em décadas, o excelente desempenho do tubo e a segurança dos operadores de usinas e indústrias, sendo uma solução eficiente para combater as patologias comuns causadas pelo tempo, tais como a elevada corrosão do substrato metálico, comprometimento da integridade estrutural do tubo devido às paredes corroídas e a ocorrência de pequenos furos e cavidades na superfície que podem provocar vazamentos.

Os sistemas de PRFV apresentam uma aplicação interessante no reforço de estruturas históricas, nas quais a preservação da forma e da estética é crucial.

Figura 21 e Figura 22 – Reforço em estrutura histórica Pallazo Mozzi, Florença



Fonte: MACHADO (2002).

Nas figuras 16 e 17 é possível observar a utilização do sistema FRP para estabilizar a deterioração natural de uma estrutura histórica.

2.2.3 Metodologia de aplicação

De acordo com o Manual da Viapol (2011), a metodologia adequada para a realização do reforço com tecido de fibra de carbono pode ser resumida da seguinte maneira:

- a) Recuperação do substrato de concreto armado para que o sistema possa ser aderido com segurança.
- b) Imprimação da superfície sobre a qual será aplicado o sistema para se estabelecer uma ponte de aderência entre o substrato de concreto e o sistema composto. Para tanto se utiliza um imprimador epoxídico (primer) com elevado teor de sólidos que, ao penetrar nos poros do concreto e ao estabelecer uma película sobre a superfície do concreto, cria uma interface altamente eficiente para a transmissão de esforços entre o composto e a peça de concreto.
- c) Regularização e correção das imperfeições superficiais do substrato de concreto, de modo a estabelecer um plano adequadamente nivelado. É utilizada uma pasta epoxídica contendo alto teor de sólidos para calafetar eventuais imperfeições superficiais e criar um plano desempenado para a aplicação do sistema composto.
- d) Aplicação da primeira camada de resina saturante com alto teor de sólidos que servirá para impregnar (saturar) a lâmina de fibra de carbono e aderi-la à superfície do concreto.
- e) Aplicação da lâmina de fibra de carbono que vai reforçar o sistema composto.

f) Aplicação da segunda camada de resina saturante para completar a impregnação da lâmina de fibra de carbono e acabando de conformar a matriz epoxídica que envelopa o sistema.

g) Aplicação (opcional) de película de acabamento com elevado teor de sólidos, alto brilho e resistente à corrosão, com o objetivo de proteção e/ou acabamento estético para o sistema.

A figura 18 ilustra o método de aplicação para a manta de fibra de carbono.

Figura 23 – Esquema de aplicação do reforço com manta de fibra de carbono



Fonte: Machado (2012).

Após a aplicação do composto de fibra de carbono, é necessário realizar testes para verificar as condições do reforço, conforme indicado por Machado (2002). O primeiro teste recomendado é o teste de sonoridade, que consiste em bater com um martelo de aço em toda a superfície do composto para identificar possíveis pontos de falha na aderência. Já o segundo teste é o teste mecânico de arrancamento, que envolve a aderência de uma peça metálica quadrada no composto de fibra de carbono e submetê-la ao arrancamento (Figura 19). Esse teste pode resultar em três situações: descolamento do composto do substrato de concreto, indicando má aplicação; ruptura do substrato de concreto, indicando um reforço adequado, mas com necessidade de reparação do concreto; ou ruptura do pino de ligação da placa com o equipamento de arrancamento, indicando uma aplicação perfeita do composto e um concreto adequado (MACHADO, 2002).

Figura 24 - Teste de arrancamento em tubulação reforçada com manta de fibra de carbono



Fonte: Construtora G-Maia (2016).

2.2.4 Limitações de uso

De acordo com Machado (2002), as propriedades dos sistemas compostos estruturados com fibra de carbono podem ser afetadas por características ambientais como alcalinidade, água salgada, agentes químicos, luz ultravioleta, altas temperaturas, umidade elevada e ciclos de congelamento e descongelamento. Isso pode resultar na degradação das propriedades mecânicas, como a resistência à tração, deformação e módulo de elasticidade. Para garantir a eficácia do projeto de reforço estrutural, essas possíveis degradações devem ser consideradas.

Com relação à alcalinidade e acidez, as fibras de carbono são resistentes, mas a resina epóxi deve ser capaz de resistir às agressões e proteger a fibra. Além disso, é importante evitar o contato direto dos sistemas compostos FRP com as armaduras da estrutura, para evitar a corrosão.

Embora os sistemas compostos FRP sejam altamente resistentes à ruptura por deformação e fadiga, eles não são eficientes em impactos e devem ser adequadamente protegidos. Também é importante considerar a resistência mínima do substrato de concreto, que deve ser capaz de transferir os esforços para o sistema FRP e atingir um valor mínimo de 1,5 MPa. A aplicação dos sistemas compostos FRP não interrompe a corrosão existente nas armaduras da estrutura e não deve ser aplicada sobre superfícies que apresentem armaduras corroídas ou substrato deteriorado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o intuito de complementar a pesquisa bibliográfica realizada, definiu-se a utilização de um ensaio realizado in loco, com a participação do autor, realizado em 2019, aonde foi empregada a técnica de reforço de corpos de prova cilíndricos e prismáticos com manta de fibra de carbono.

3.1 Ensaaios laboratoriais

Com o objetivo de realizar comparações padronizadas do desempenho da aplicação de fibra de carbono, todos os procedimentos seguiram as observações e recomendações das normas regulamentadoras aplicáveis. O traço utilizado foi de 1:2:3, o que significa o dobro de areia e o triplo de brita para a quantidade de cimento utilizada. Para avaliar os ganhos de resistência proporcionados pela aplicação da fibra de carbono no concreto, foram propostos os seguintes ensaios:

- compressão axial;
- tração na flexão;
- tração simples.

3.1.1 Moldagem e cura dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos

Para garantir a precisão e a qualidade dos resultados dos ensaios realizados, adotou-se as orientações da ABNT NBR 5738:2015 - Concreto - Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova. Seguir as normas estabelecidas pela ABNT é importante, pois elas estabelecem padrões e garantem a uniformidade nos procedimentos, possibilitando a comparação de pesquisas sobre um mesmo assunto. Além disso, o cumprimento das normas regulamentadoras é fundamental para garantir que os serviços ou produtos atendam às especificações necessárias.

Figura 25 – Moldagem dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos



Fonte: Acervo do autor (2019).

Observa-se na figura 20 os corpos de prova cilíndricos e prismáticos moldados para a realização dos ensaios.

3.1.1.1 Moldagem dos corpos de prova cilíndricos

De acordo com as especificações da norma ABNT NBR 5738:2015, o molde para corpos de prova cilíndricos deve seguir as seguintes características:

- O diâmetro pode ser de 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm ou 45 cm, com uma tolerância de 1%;
- A altura deve ser igual ao dobro do diâmetro, com uma tolerância de 2%;
- As dobras circulares devem ser perpendiculares ao eixo longitudinal do molde.

Os moldes devem ser fabricados em aço ou em material não absorvente que não reaja com o cimento Portland e que seja suficientemente resistente para manter a forma durante a moldagem. Além disso, eles devem ser fáceis de desmoldar, sem danificar o corpo de prova, e estanques nas laterais e no fundo quando fechados. A base do molde deve ser plana, com uma tolerância de 0,05 mm. O objetivo dessas especificações é garantir a precisão e a qualidade dos resultados obtidos nos ensaios de resistência mecânica do concreto.

3.1.1.2 Moldagem dos corpos de prova prismáticos

O molde utilizado para os corpos de prova prismáticos deve apresentar seção transversal quadrada, com superfícies lisas e sem saliências. As dimensões e vãos de ensaio devem seguir as especificações apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Dimensão de corpo de prova e vão de ensaio prismático

DIMENSÃO BÁSICA	COMPRIMENTO MÍNIMO	DIMENSÃO DE ENSAIO
mm	mm	mm
100	350	300
150	500	450
250	800	750
400	1400	1350

Fonte: NBR 5738 (2015).

3.1.1.3 Adensamento dos corpos de prova

Com auxílio da Tabela 2, o método de adensamento deve ser selecionado com base no slump medido do concreto.

Tabela 2 – Classe de consistência do concreto

CLASSE	ABATIMENTO (mm)	MÉTODO DO ADENSAMENTO
S10	$10 \leq A \leq 50$	Mecânico
S50	$50 \leq A \leq 100$	Mecânico ou Manual
S100	$100 \leq A \leq 160$	
S160	$160 \leq A \leq 200$	
S200	$A \geq 200$	Manual

Fonte: NBR 5738 (2015).

A determinação do número de camadas e golpes deve ser feita levando em consideração as dimensões do corpo de prova e o método de adensamento utilizado, seguindo as orientações apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Número de camadas para moldagem dos corpos de prova

TIPO DE CORPO DE PROVA	DIMENSÃO BÁSICA (d) mm	NÚMERO DE CAMADAS EM FUNÇÃO DO TIPO DE ADENSAMENTO		NÚMERO DE GOLPES PARA ADENSAMENTO MANUAL
		MECÂNICO	MANUAL	
Cilíndrico	100	1	2	12
	150	2	3	25
	200	2	4	50
	250	3	5	75
	300	3	6	100
	450	5	-	-
Prismático	100	1	1	75
	150	1	2	75
	250	2	3	200
	450 ^b	3	-	-

b. Para concretos com abatimento superior a 160 mm, a quantidade de camadas deve ser reduzida a metade da estabelecida nessa tabela. Caso o número de camadas resulte fracionário, arredondar para o inteiro superior mais próximo.

c. No caso de dimensão básica de 450 mm, somente é permitido adensamento mecânico.

Fonte: NBR 5738 (2015).

Conforme previsto na norma, é importante ressaltar que o método de adensamento pode ser realizado manualmente ou mecanicamente.

Figura 26 – Adensamento vibratório dos corpos de prova



Fonte: Acervo do autor (2019).

Na Figura 21, é possível observar o método de adensamento mecânico sendo utilizado por meio de vibradores.

3.1.1.4 Cura

Conforme a norma ABNT NBR 5738:2015, é fundamental destacar que o método de adensamento pode ser realizado manual ou mecanicamente. Além disso, as recomendações para o processo de cura inicial dos corpos de prova também devem ser seguidas, como:

- colocar os moldes em uma superfície horizontal rígida, sem vibrações e sem ações que possam perturbar o concreto;
- durante as primeiras 24 horas para corpos de prova cilíndricos e 48 horas para corpos de prova prismáticos, todos os corpos de prova devem ser armazenados em um local protegido de intempéries, cobertos com material não reativo e não absorvente para evitar a perda de água do concreto.

3.1.1.5 Aplicação do tecido de fibra de carbono

A aplicação do tecido de fibra de carbono seguiu todas as precauções de segurança necessárias, conforme especificado no presente estudo, além das orientações presentes no manual técnico da MC-Bauchemie, que forneceu todos os materiais utilizados no ensaio. A lista de materiais utilizados consiste em:

- **MC-DUR 1209 TX:** Adesivo tixotrópico que funciona como ponte de aderência do sistema;
- **MC-DUR CF-Sheets:** Manta de fibra de carbono;
- **MC-DUR 1209:** Resina de laminação para a saturação do sistema.

Figura 27 - Resinas utilizadas no ensaio



Fonte: Acervo do autor (2019).

Para iniciar o processo de aplicação da resina, foi necessário preparar a superfície conforme as recomendações do Manual técnico da MC-Bauchemie (2016). É necessário garantir que o substrato esteja limpo, são e sem quaisquer partículas soltas, poeira, óleos, nata de cimento ou outros agentes contaminantes. A fim de aumentar a aderência do material, foi utilizada uma escova com fios de aço, seguido de limpeza com álcool e estopa.

A mistura dos componentes das resinas foi realizada com o auxílio de um misturador de baixa rotação, somente após a preparação de todos os corpos de prova, devido ao tempo de trabalhabilidade de apenas 45 minutos. De acordo com o manual técnico da MC-Bauchemie (2016), a proporção de mistura das resinas é de 3:1 em peso para o MC-DUR 1209 TX e o MC-DUR 1209, e essa proporção foi adotada durante a realização dos ensaios.

Figura 28 – Mistura dos componentes do MC-DUR 1209 TX



Fonte: Acervo do autor, 2019

Figura 29 – Mistura dos componentes do MC-DUR 1209



Fonte: Acervo do autor (2019).

Conforme o manual técnico da MC-Bauchemie (2016), após a mistura dos componentes, utilizou-se uma desempenadeira metálica e espátula para aplicar o MC-DUR 1209 TX nos corpos de prova, com espessura de cerca de 10 mm.

Figura 30 – MC-DUR 1209 TX aplicado em corpo de prova cilíndrico



Fonte: Acervo do autor (2019).

Figura 31 – MC-DUR 1209 TX sendo regularizado



Fonte: Acervo do autor (2019).

Figura 32 – MC-DUR 1209 TX sendo aplicado em corpo de prova prismático



Fonte: Acervo do autor (2019).

Após a aplicação do adesivo MC-DUR 1209 TX, a manta de fibra de carbono foi colocada nos corpos de prova e pressionada com um rolo apropriado com discos metálicos, conforme recomendado para garantir uma aderência ideal do sistema.

Figura 33– Utilização do rolo apropriado com discos metálicos



Fonte: Acervo do autor (2019).

Após a aplicação da manta de fibra de carbono, procedeu-se à saturação da mesma com o MC-DUR 1209, por meio de rolo de pelo curto, a fim de garantir uma impregnação uniforme da resina. Seguindo a recomendação do manual técnico da MC-Bauchemie (2016), certificou-se de que a manta estivesse completamente embebida com a resina de laminação.

Figura 34– Impregnação da manta de fibra de carbono aplicada em corpo de prova prismático



Fonte: Acervo do autor (2019).

Figura 35 – Impregnação da manta de fibra de carbono em corpo de prova cilíndrico



Fonte: Acervo do autor (2019).

Figura 36 – Corpos de provas completamente saturados com o MC-DUR 1209



Fonte: Acervo do autor (2019).

Após a aplicação do sistema em todos os corpos de prova, estes foram deixados para secar naturalmente em local apropriado, sem exposição a intempéries. Concluída a secagem, os corpos de prova foram cuidadosamente acabados com lixadeira, a fim de remover sobras ou pontas do produto seco, de acordo com a metodologia descrita no presente trabalho. Zelou-se por manter a integridade do sistema aplicado durante o processo de acabamento.

Figura 37 – Corpos de provas prismáticos acabados



Fonte: Acervo do autor (2019).

Figura 38– Corpos de provas cilíndricos acabados



Fonte: Acervo do autor (2019).

Figura 39 – Corpos de provas cilíndricos e prismáticos acabados



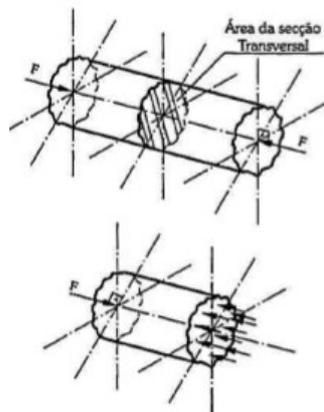
Fonte: Acervo do autor (2019).

3.1.2 Resistência a compressão axial

A força axial é definida como aquela que age perpendicularmente à área da seção transversal da peça. A compressão axial ocorre quando uma força é aplicada na extremidade, dirigindo-se ao centro da peça.

Figura 40 – Representação de uma compressão de um corpo de prova

Peça comprimida

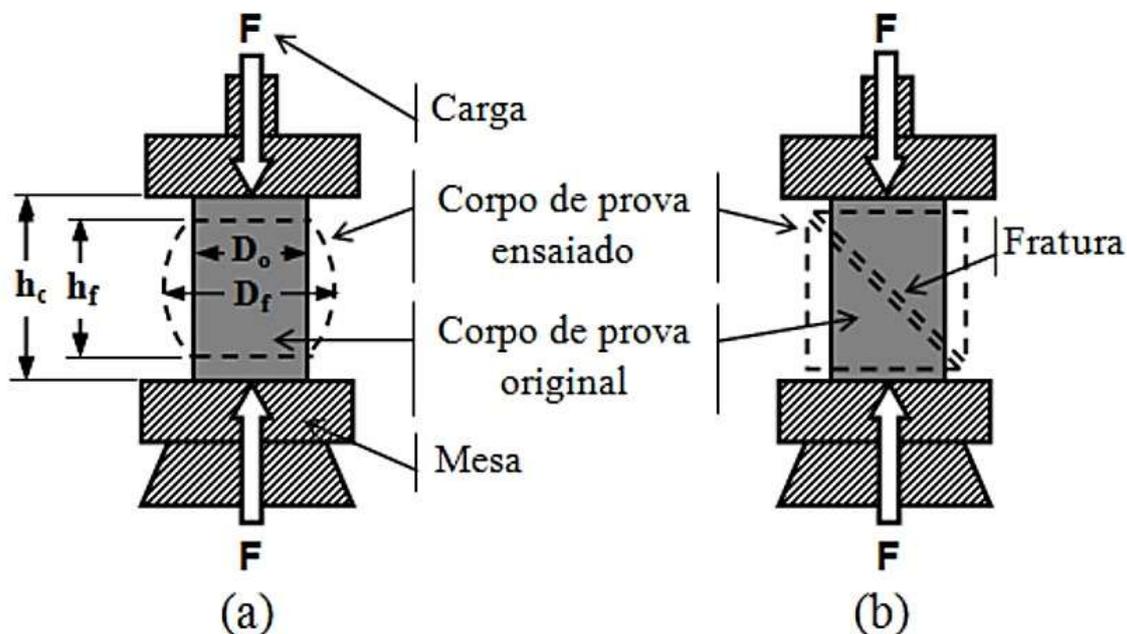


Fonte: Biopdi (2012).

O ensaio de compressão axial consiste em aplicar uma carga compressiva uniaxial no corpo de prova, com o objetivo de verificar sua resistência máxima a esse

tipo de esforço.

Figura 41 – Ensaio de compressão para (a) material dúctil (b) material frágil



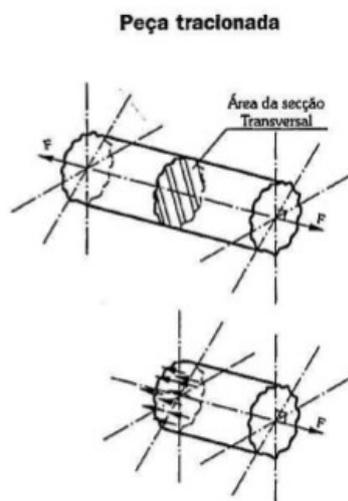
Fonte: Biopdi (2012).

O procedimento para o ensaio de compressão axial do corpo de prova ocorreu conforme a norma NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de-prova cilíndricos, que regulamenta o ensaio de compressão em corpos de prova cilíndricos de concreto.

3.1.3 Resistência a tração simples

A tração é um esforço gerado pelas forças aplicadas nas extremidades da barra, mas com sentido dirigido para o exterior, ao contrário da compressão axial.

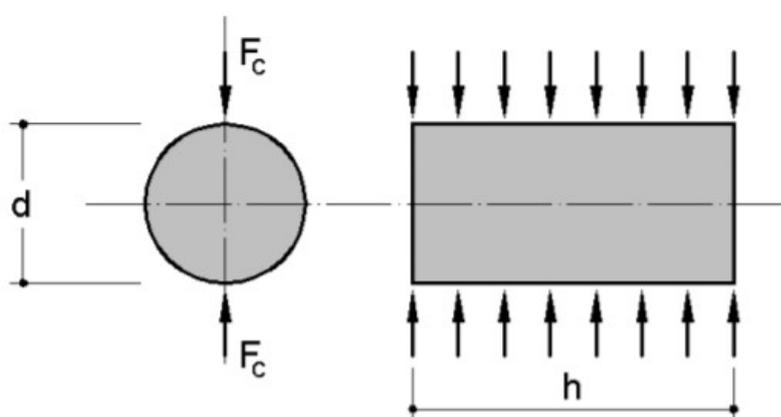
Figura 42 - Representação de uma tração de um corpo de prova



Fonte: Biopdi (2012).

O ensaio de tração indireta é realizado com um corpo-de-prova cilíndrico posicionado horizontalmente entre os pratos da prensa, onde uma força é aplicada até a sua ruptura por fendilhamento. Este ensaio tem como objetivo medir a resistência à tração simples do concreto, levando em consideração que, ao ser carregado diametralmente, o cilindro recebe tanto tensões de tração quanto de compressão, conforme indicado pela norma NBR 7222 - Concreto e Argamassa - Ensaio de Tração Indireta.

Figura 43 – Ensaio de tração por compressão diametral



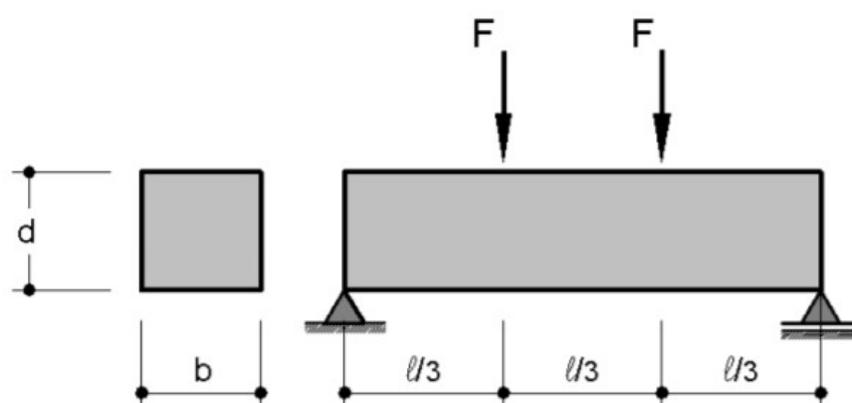
Fonte: Pinheiro, Muzardo, Santos (2004).

O ensaio de tração simples do corpo de prova deve ser realizado conforme a NBR 7222 – Concreto e Argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.

3.1.4 Resistência a tração na flexão

A Norma estabelece o método de ensaio de tração por flexão de corpos de prova de concreto, que utiliza o princípio da viga simplesmente apoiada com duas forças concentradas nos terços do vão, como descrito em (referência). Neste ensaio, um prisma de concreto é flexionado, o qual, devido à sua resistência à tração ser inferior à compressão, sofre ruptura por tração. Esse ensaio é fundamental para a dosagem e controle de concreto em pavimentos, já que o regime de sollicitação em serviço gera fadiga à tração por flexão.

Figura 44 – Ensaio de tração na flexão



Fonte: Pinheiro, Muzardo, Santos (2004).

O procedimento para o ensaio de tração na flexão do corpo de prova é especificado na norma NBR 12142 - Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Esse ensaio é importante para a dosagem e controle de concreto de pavimentos, uma vez que esse tipo de estrutura está sujeito a sollicitações de fadiga à tração por flexão durante o serviço. Durante o ensaio, um prisma de concreto é flexionado e, devido à sua baixa resistência à tração em relação à compressão, é rompido por tração.

4 ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS PELOS ENSAIOS LABORATORIAIS

Para todos os testes mencionados anteriormente, foram produzidos corpos de prova de concreto de cimento Portland CP V ARI, que serão denominados neste estudo como CX (onde X representa o número de série), e corpos de prova de cimento Portland CP V ARI reforçados com fibras, que serão referenciados como FX.

No ensaio de compressão axial, foram produzidos 03 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10 cm x 20 cm sem a aplicação de fibras, bem como 03 com reforço de fibra de carbono. Para o teste de tração simples, foram produzidos 02 corpos de prova cilíndricos com as mesmas dimensões e sem a aplicação de fibras, além de 03 com reforço de fibras. Por fim, no teste de tração na flexão, foram produzidos 02 corpos de prova prismáticos (50 cm x 15 cm x 15 cm) com fibras e 02 com o reforço aplicado.

Todos os corpos de prova foram submetidos à ruptura 28 dias após a produção. A seguir, estão apresentados os resultados dos testes juntamente com suas respectivas análises.

Figura 45 – Corpos de prova moldados



Fonte: Acervo do autor (2019).

4.1 Ensaio de resistência à compressão axial

Antes da execução do ensaio de compressão axial, os corpos de prova foram retificados em suas extremidades utilizando uma Retificadora de Corpos de Prova Automática, conforme ilustrado na Figura 41 e em conformidade com a Norma NBR 5738:2015 Versão Corrigida: 2016 - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.

Figura 46 – Retificação dos corpos de prova



Fonte: Acervo do autor (2019).

Estes foram submetidos ao ensaio e apresentaram as resistências a seguir para a idade de 28 dias:

- C1: 25.610 kgf;
- C2: 35.770 kgf;
- C3: 32.170 kgf;
- F1: 56.930 kgf;
- F2: 62.340 kgf;
- F3: 65.230 kgf.

Figura 47 – Ensaio de compressão axial do corpo de prova não reforçado



Fonte: Acervo do autor (2019).

Figura 48– Ensaio de compressão axial do corpo de prova reforçado



Fonte: Acervo do autor (2019).

A seção comprimida dos corpos de prova cilíndricos apresenta um diâmetro (d) de 10 cm. Para calcular a área, adotou-se a fórmula da área de uma circunferência:

$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 10^2}{4} = 78,54 \text{ cm}^2$; Em outras palavras, para um diâmetro de 10 cm, a área é de 78,54 cm².

De acordo com a norma NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, a resistência deve ser calculada dividindo-se a carga de

ruptura pela área da seção transversal do corpo de prova, utilizando a fórmula $f = \frac{F}{A}$. O resultado deve ser expresso com aproximação de 0,1 MPa. Portanto, os resultados obtidos foram os seguintes:

- C1: $f = \frac{25160}{78,54} = 32,0$ MPa
- C2: $f = \frac{35770}{78,54} = 44,7$ MPa
- C3: $f = \frac{32170}{78,54} = 40,2$ MPa
- F1: $f = \frac{56930}{78,54} = 71,1$ MPa
- F2: $f = \frac{62340}{78,54} = 77,8$ MPa
- F3: $f = \frac{65230}{78,54} = 81,4$ Mpa

Figura 49 – Corpo de prova reforçado após o ensaio de compressão axial



Fonte: Acervo do autor (2019).

Ao calcular a média das resistências obtidas, constatou-se que os corpos de prova não reforçados apresentaram um resultado de 39 MPa, enquanto os corpos de prova reforçados obtiveram um resultado de 76,8 MPa. Com base nos ensaios realizados, pode-se afirmar que os corpos de prova reforçados com fibra de carbono

apresentaram uma resistência à compressão 96,92% maior do que aqueles que não foram reforçados.

4.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Os corpos de prova foram ensaiados e os valores de resistência à tração simples obtidos para a idade de 28 dias estão apresentados a seguir.:

- C4: 10.420 kgf;
- C5: 14.310 kgf;
- F4: 27.960 kgf;
- F5: 28.830 kgf;
- F6: 23.000 kgf.

Figura 50 – Ensaio de tração por compressão diametral do corpo de prova não reforçado



Fonte: Acervo do autor (2019).

Figura 51 – Ensaio de tração por compressão diametral do corpo de prova reforçado



Fonte: Acervo do autor (2019).

De acordo com a norma NBR 7222 - Concreto e Argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos, o cálculo da resistência à tração simples deve ser realizado pela seguinte fórmula:

$$f = \frac{2 * F}{\pi * d * L}$$

Onde:

- f = resistência à tração por compressão diametral, expressa em MPa, com aproximação de 0,05 Mpa;
- F = carga máxima obtida no ensaio (kN);
- d = diâmetro do corpo de prova (mm);
- L = altura do corpo de prova (mm).

Os corpos de prova possuem diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm.
Aplicando os valores na formula:

- C4: $f = \frac{2 \cdot 102,19}{\pi \cdot 100 \cdot 200} = 3,3 \text{ MPa}$
- C5: $f = \frac{2 \cdot 140,33}{\pi \cdot 100 \cdot 200} = 4,5 \text{ MPa}$
- F4: $f = \frac{2 \cdot 274,19}{\pi \cdot 100 \cdot 200} = 8,7 \text{ MPa}$
- F5: $f = \frac{2 \cdot 282,73}{\pi \cdot 100 \cdot 200} = 9,0 \text{ MPa}$
- F6: $f = \frac{2 \cdot 225,55}{\pi \cdot 100 \cdot 200} = 7,2 \text{ Mpa}$

Figura 52 – Corpo de prova reforçado após o ensaio de tração por compressão diametral



Fonte: Acervo do autor (2019).

Após o cálculo da média das resistências obtidas, foi verificado que os corpos de prova não reforçados apresentaram resistência à tração simples média de 3,9 MPa, enquanto os corpos de prova reforçados com tecido de fibra de carbono apresentaram uma média de 8,3 MPa. Diante disso, pode-se afirmar que a adição de reforço estrutural com fibra de carbono resultou em um aumento de 112,82% na resistência à tração simples dos corpos de prova.

4.3 Ensaio de resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado de acordo com a norma NBR 12142 - Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos, utilizando o dispositivo de flexão indicado. Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio e apresentaram os seguintes resultados para a tração na flexão:

- C6: 4.090 kgf;
- C7: 3.240 kgf;
- F7: 8.750 kgf;
- F8: 8.030 kgf.

Figura 53 – Ensaio de tração na flexão do corpo de prova não reforçado



Fonte: Acervo do autor (2019).

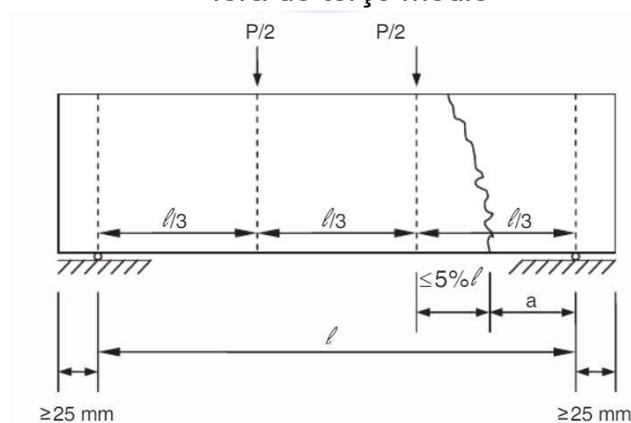
Figura 54 – Ensaio de tração na flexão do corpo de prova reforçado



Fonte: Acervo do autor (2019).

No ensaio do corpo de prova F8, o rompimento ocorreu fora do terço-médio conforme figura abaixo.

Figura 55– Cálculo da tensão de ruptura quando esta ocorre fora do terço médio



Fonte: NBR 12142 - Concreto

De acordo com as especificações da NBR 12142, caso a ruptura do corpo de prova ocorra fora do terço médio, a uma distância não superior a 5% do comprimento l , a resistência à tração na flexão deve ser calculada utilizando a seguinte fórmula:

$$f = \frac{3 * F * a}{b * d^2}$$

Onde:

- f é a resistência à tração na flexão, expressa em Mpa;
- F é a força máxima registrada na máquina de ensaio, expressa em newtons (N);
- ℓ é a dimensão do vão entre apoios (mm);
- b é a largura média do corpo de prova (mm);
- d é a altura média do corpo de prova (mm);
- a é a distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo (mm).

O corpo de prova, possuía largura de 150 mm, altura de 150 mm e distância de 450 mm entre os apoios. A distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo foi de 120 mm. Esses valores foram utilizados na aplicação da fórmula.:

$$f = \frac{3 * F * a}{b * d^2} = \frac{3 * 78747,4 * 120}{150 * 150^2} = 8,4 \text{ MPa}$$

Portanto, deve-se considerar para ele uma resistência de rompimento de 8,4 MPa.

Figura 56 – Corpo de prova em que a ruptura ocorreu fora do terço médio



Fonte: Acervo do autor (2019).

Para os demais corpos de prova, cuja ruptura ocorreu dentro do terço médio, a norma prevê que os resultados sejam calculados por meio com a seguinte fórmula:

$$f = \frac{(F * \ell)}{b * d^2}$$

Onde:

- f é a resistência à tração na flexão, expressa em Mpa;
- F é a força máxima registrada na máquina de ensaio, expressa em newtons (N);
- ℓ é a dimensão do vão entre apoios (mm);
- b é a largura média do corpo de prova (mm);
- d é a altura média do corpo de prova (mm).

Portanto, obteve-se os seguintes resultados:

- C6: $f = \frac{(40190,2 * 450)}{150 * 150^2} = 5,3 \text{ MPa}$
- C7: $f = \frac{(31773,55 * 450)}{150 * 150^2} = 4,2 \text{ MPa}$
- F7: $f = \frac{(85808,19 * 450)}{150 * 150^2} = 11,4 \text{ MPa}$
- F8: $f = \frac{(3 * 78747,4 * 120)}{150 * 150^2} = 8,4 \text{ MPa}$

Figura 57 – Corpo de prova não reforçado após o ensaio de tração na flexão



Fonte: Acervo do autor (2019).

Figura 58 – Corpo de prova reforçado após o ensaio de tração na flexão



Fonte: Acervo do autor (2019).

Ao calcular-se a média das resistências obtidas, verificou-se que os corpos de prova não reforçados apresentaram um resultado de 4,75 MPa, enquanto os corpos de prova reforçados apresentaram um resultado de 9,9 MPa. Assim, com base nos ensaios realizados, conclui-se que a utilização do reforço estrutural com tecido de fibra de carbono resultou em um aumento de 108,42% na resistência à tração na flexão.

4.4 Análise comparativa

O estudo realizado evidenciou um aumento significativo na resistência à compressão axial (96,92%), resistência à tração simples (112,82%) e resistência à

tração na flexão (108,42%) das peças reforçadas com tecido de fibra de carbono em comparação às não reforçadas, confirmando sua efetividade como material de reforço. Nesse sentido, sugere-se sua aplicação em situações que demandem agilidade, sem aumento de seção e com baixa geração de entulhos. Contudo, é importante ressaltar que a aplicação deve ser realizada por profissionais especializados, uma vez que o resultado final depende de sua habilidade técnica.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os avanços tecnológicos alcançados pela engenharia na construção civil são notáveis. Entretanto, a maioria das estruturas de concreto construídas entre os anos 60 e 80 estão chegando ao fim de sua vida útil, e procedimentos de revitalização e readequação serão necessários para evitar um colapso estrutural generalizado.

Nesse contexto, o uso de compósitos de fibra de carbono surge como uma alternativa promissora frente aos métodos tradicionais de reforço estrutural, devido ao alto desempenho, versatilidade de aplicação, leveza e resistência à corrosão, além do pequeno período de interrupção do uso da estrutura a ser revitalizada.

Ao longo deste trabalho, foi possível constatar que a utilização de compósitos de fibra de carbono em processos de reforço estrutural é uma alternativa que apresenta resultados significativos na melhora de performance da estrutura reforçada. Os ensaios realizados confirmaram o alto desempenho e a versatilidade de aplicação do material.

Os resultados dos ensaios mostraram que a resistência à compressão axial, à tração simples e à tração na flexão praticamente duplicou em relação às peças que não receberam a aplicação da fibra. Houve um aumento de 96,92%, 112,82% e 108,42%, respectivamente, o que comprova a eficácia do uso da fibra de carbono como método de reforço estrutural.

No entanto, é importante destacar que a manta de fibra de carbono é apenas uma das várias variáveis que influenciam no desempenho final da estrutura revitalizada. Dentre elas, podemos citar a taxa de aplicação por m^2 , a espessura da manta, a orientação das tiras e o módulo de elasticidade, além da qualidade do substrato de concreto e dos procedimentos operacionais de aplicação, que devem ser realizados por uma equipe capacitada.

É importante ressaltar que a ancoragem do material compósito de fibra de carbono é um dos aspectos essenciais, uma vez que influencia diretamente nos resultados, posto que a ancoragem consiste em fixar a fibra de carbono à estrutura de concreto existente. Vários estudos relatam a ocorrência de ruína prematura da estrutura reforçada devido ao desprendimento do substrato de concreto, o que gerou receio nos calculistas conservadores e interferiu na velocidade com que a solução ganhava mercado. Por isso, ao se considerar este reforço, é necessário trabalhar com

profissionais que possuam um bom entendimento quanto ao seu comportamento e que saibam atuar com eficiência nessa zona de ligação para extrair os melhores resultados que o material compósito de fibra de carbono pode oferecer.

Portanto, pode-se afirmar que o uso da fibra de carbono é uma alternativa viável e eficiente para reforço estrutural, mas é necessário considerar alguns aspectos importantes antes de sua aplicação. É importante avaliar cuidadosamente as condições do ambiente e as especificações técnicas do material, bem como a capacitação dos profissionais que farão a aplicação no intuito de obter o resultado esperado.

Por fim, ressalta-se que o uso da fibra de carbono não pode ser irrestrito. Dependendo do meio e das situações de intempéries, atenções especiais são necessárias quanto às especificações técnicas da fibra, dos materiais de ancoragem (resinas, primers) ou até soluções de proteção externa (pinturas especiais e proteção anti-impacto). É necessário avaliar cuidadosamente as condições específicas de cada projeto antes de se decidir pelo uso da fibra de carbono.

Diante do exposto, conclui-se que o uso de compósitos de fibra de carbono apresenta uma alternativa viável e eficiente para o reforço estrutural de estruturas de concreto, com resultados que demonstraram a melhoria significativa na resistência das estruturas. No entanto, é importante considerar as condições específicas de cada projeto e aplicação, a fim de garantir a segurança e eficácia do reforço estrutural. A fibra de carbono é uma tecnologia promissora, que deve ser explorada com cautela e responsabilidade pelos profissionais da área.

REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12142:2010 - Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739:2018 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7222:2011 Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.

ARQUEZ, Ana Paula. **Aplicação de laminado de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) inserido em substrato de microconcreto com fibras de aço para reforço à flexão de vigas de concreto armado**. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

BEBER, Andriei José. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçados com compósitos de fibra de carbono**, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

CONCRETE SOCIETY COMMITTEE. **Technical Report nº 55 – Design Guidance for Strengthening Concrete Structures Using Fibre Composite Materials**, 2000.

FERRARI, Vladimir José; PADARATZ, Ivo José; LORIGGIO, Daniel Domingues. **Reforço à flexão em vigas de concreto armado com mantas de fibra de carbono**, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

FONSECA, João Saraiva. **Metodologia da pesquisa científica**, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2002.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**, 4. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

JUVANDES, Luis Felipe. **Reforço e Reabilitação de Estruturas** – Módulo 2. Formação profissional - Ordem dos Engenheiros – Secção Regional da Madeira, 2002.

LUBIN, G. **Handbook of composites**, Nova York: Ed. Van Nostrand Reinhold, 1982.

MACHADO, A. P.; MACHADO, B. **Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Sistemas Compostos FRP**. São Paulo: PINI, 2015.

MACHADO, Ari de Paula. **Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Fibra de Carbono**. São Paulo: PINI, 2002.

MC-BAUCHEMIE. **Manual Técnico MC para infraestrutura, indústria e edificações 2017/18**. São Paulo, 2016. Disponível em: <[https://www.mc-bauchemie.com.br/assets/Brasil/Downloads/Manual%20MC%20para%20Infraestrutu](https://www.mc-bauchemie.com.br/assets/Brasil/Downloads/Manual%20MC%20para%20Infraestrutu%20ra_Indu%CC%81stria_2017-18_web.pdf)
[ra_Indu%CC%81stria_2017-18_web.pdf](https://www.mc-bauchemie.com.br/assets/Brasil/Downloads/Manual%20MC%20para%20Infraestrutu%20ra_Indu%CC%81stria_2017-18_web.pdf)>. Acesso em: 16 jul. 2021.

TRIVIÑOS, A. N. S. **Introdução à pesquisa em ciências sociais: a pesquisa qualitativa em educação**, São Paulo: Atlas, 1987.

http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2008/anais/arquivosEPG/EPG00174_01_O.pdf. Acesso em 8 jun. 2015.

MORIN, Edgar. **Educação e complexidade: os sete saberes e outros ensaios**. São Paulo: Cortez, 2007.

SANTOS, Fernando César Almeida. **Evolução dos cursos de Engenharia de Produção no Brasil**. In: _____. Introdução à Engenharia de Produção. Rio de Janeiro: Elsevier, 2008.

VIAPOL. **Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono**. São Paulo, 2011.

ANEXOS

Anexo A – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão	68
Anexo B – Resultados dos ensaios de compressão.....	69
Anexo C – Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral	70

Anexo A – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão



NBR 12142 - Determinação da resistência à tração na flexão em cp prismático

Dados Cadastrais da Amostra

Amostra: FIBRA DE CARBONO
 Tipo de ensaio: Tração na Flexão - Prismático
 Cliente:
 Responsável:
 Data de Moldagem: 03/05/2019

Dados Complementares

Tensão ruptura prevista:
 Distância fixação extensômetros:

Dados dos Corpos de Prova

Id. CP	Idade	Tensão Ruptura	Carga Ruptura	Tipo
C6	28	1,8 (MPa)	4.090 (kgf)	
C7	28	1,4 (MPa)	3.240 (kgf)	
F7	28	3,8 (MPa)	8.760 (kgf)	
F8	28	-1,0 (MPa)	8.030 (kgf)	

Gráfico dos Ensaios



sexta-feira, 31 de maio de 2019

18:44:45

Anexo B – Resultados dos ensaios de compressão



NBR 5739 - Ensaio de compressão de cp cilíndricos

Dados Cadastrais da Amostra

Amostra: Fibra de Carbono
 Tipo de ensaio: Compressão Axial
 Cliente:
 Responsável:
 Data de Moldagem: 03/05/2019

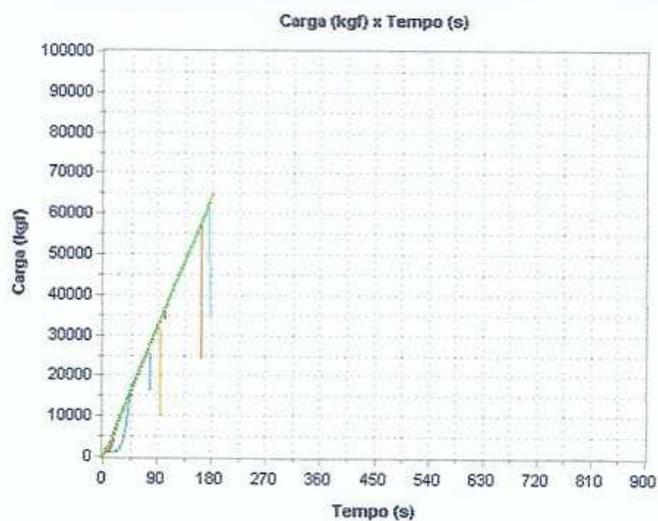
Dados Complementares

Tensão ruptura prevista:
 Distância fixação extensômetros:

Dados dos Corpos de Prova

Id. CP	Idade	Tensão Ruptura	Carga Ruptura	Tipo
C1	28	32,0 (MPa)	25.610 (kgf)	
C2	28	44,7 (MPa)	35.770 (kgf)	
C3	28	40,2 (MPa)	32.170 (kgf)	
F1	28	71,1 (MPa)	56.930 (kgf)	
F2	28	77,8 (MPa)	62.340 (kgf)	
F3	28	81,4 (MPa)	65.230 (kgf)	

Gráfico dos Ensaios



Anexo C – Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral



NBR 7222 - Determinação da resit. à tração por compressão diametral de cp cilíndricos

Dados Cadastrais da Amostra

Amostra: FIBRA DE CARBONO
 Tipo de ensaio: Compressão Diametral
 Cliente:
 Responsável:
 Data de Moldagem: 03/05/2019

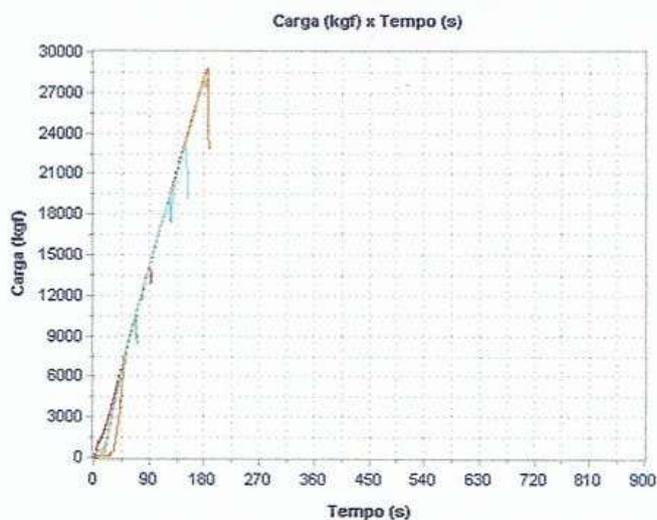
Dados Complementares

Tensão ruptura prevista:
 Distância fixação extensômetros:

Dados dos Corpos de Prova

Id. CP	Idade	Tensão Ruptura	Carga Ruptura	Tipo
C4	28	3,3 (MPa)	10.420 (kgf)	
C5	28	4,5 (MPa)	14.310 (kgf)	
F4	28	8,7 (MPa)	27.960 (kgf)	
F5	28	9,0 (MPa)	28.830 (kgf)	
F6	28	7,2 (MPa)	23.000 (kgf)	

Gráfico dos Ensaio



sexta-feira, 31 de maio de 2019

17:38:44