

**UNIEVANGÉLICA**

**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**FABIO DIAS DE OLIVEIRA**

**LUIZ CARLOS FELIX MAIA**

**MARINA LOPES DE OLIVEIRA**

**WENDEL JOSÉ TELES**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL APLICADA AO ESTUDO DA  
UTILIZAÇÃO DE FIBRAS DE CARBONO PARA REFORÇO  
ESTRUTURAL**

**ANÁPOLIS / GO**

**2022**

**FABIO DIAS DE OLIVEIRA  
LUIZ CARLOS FELIX MAIA  
MARINA LOPES DE OLIVEIRA  
WENDEL JOSÉ TELES**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL APLICADA AO ESTUDO DA  
UTILIZAÇÃO DE FIBRAS DE CARBONO PARA REFORÇO  
ESTRUTURAL**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA**

**ORIENTADOR: AURELIO CAETANO FELICIANO**

**ANÁPOLIS / GO: 2022**

## FICHA CATALOGRÁFICA

OLIVEIRA, FABIO DIAS/ MAIA, LUIZ CARLOS FELIX/ OLIVEIRA, MARINA LOPES/  
TELES, WENDEL JOSÉ

Análise experimental aplicada ao estudo da utilização de fibras de carbono para reforço estrutural

58P, 297 mm (ENC/UNI, Bacharel, Engenharia Civil, 2022.

TCC - UniEVANGÉLICA

Curso de Engenharia Civil.

- |                                       |                       |
|---------------------------------------|-----------------------|
| 1. Fibra de Carbono                   | 2. Reforço Estrutural |
| 3. Ensaio de Resistência a Compressão | 4. Corpo de Prova     |
| I. ENC/UNI                            | II. Bacharel          |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

OLIVEIRA, Fabio Dias; MAIA, Luiz Carlos Felix; OLIVEIRA, Marina Lopes; TELES, Wendel Jose. Análise experimental aplicada ao estudo da utilização de fibras de carbono para reforço estrutural. TCC, Curso de Engenharia Civil, UniEVANGÉLICA, Anápolis, GO, 58p. 2022.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Fabio Dias de Oliveira; Luiz Carlos Felix Maia; Marina Lopes de Oliveira; Wendel José Teles.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: Análise experimental aplicada ao estudo da utilização de fibras de carbono para reforço estrutural.

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil ANO: 2022

É concedida à UniEVANGÉLICA a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

*Fabio Dias de Oliveira*

Fabio Dias de Oliveira

E-mail: fabiof949@gmail.com

*Luiz Carlos Felix Maia*

Luiz Carlos Felix Maia

E-mail: luizcarlos012@gmail.com

*Marina Lopes de Oliveira*

Marina Lopes de Oliveira

E-mail: marinalps-@hotmail.com

*Wendel José Teles*

Wendel José Teles

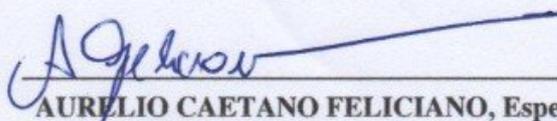
E-mail: jeremias.teles@hotmail.com

**FABIO DIAS DE OLIVEIRA  
LUIZ CARLOS FELIX MAIA  
MARINA LOPES DE OLIVEIRA  
WENDEL JOSÉ TELES**

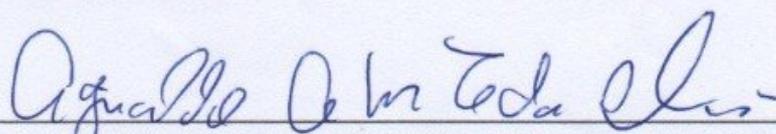
**ANÁLISE EXPERIMENTAL APLICADA AO ESTUDO DA  
UTILIZAÇÃO DE FIBRAS DE CARBONO PARA REFORÇO  
ESTRUTURAL**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE  
ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL**

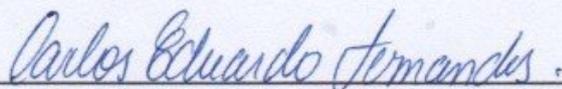
**APROVADO POR:**



**AURELIO CAETANO FELICIANO, Especialista (UniEVANGÉLICA)  
(ORIENTADOR)**



**AGNALDO ANTONIO MOREIRA TEODORO DA SILVA, Mestre  
(UniEVANGÉLICA)  
(EXAMINADOR INTERNO)**



**CARLOS EDUARDO FERNANDES, Mestre (UniEVANGÉLICA)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

**DATA: ANÁPOLIS/GO, 02 de JUNHO de 2022.**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, gostaríamos de agradecer a Deus, que durante toda a duração do curso tem nos sustentado, nos dando força para continuar principalmente nos momentos mais difíceis e desafiadores da graduação, pelas bênçãos derramadas por essa concretização de um dos nossos sonhos. Por ter nos dado a oportunidade de conhecer pessoas maravilhosas em nossos caminhos durante esses 5 anos, que vão ficar eternizados em nossas memórias.

Agradecemos aos nossos familiares por apoio e auxílio, ajudando e incentivado na nossa formação acadêmica. Eles foram nosso principal alicerce durante toda nossa caminhada.

Aos nossos amigos que fizemos ao longo da jornada acadêmica e aos que já estavam ao nosso lado antes, por caminharem conosco a todo momento, sustentando nossas lágrimas nos momentos difíceis e nos fazendo sorrir, mesmo sem ter forças.

E por fim, agradecemos ao nosso orientador e professor, Aurélio Caetano Feliciano, por todo apoio e auxílio nessa última etapa antes da tão sonhada conclusão do curso de Engenharia Civil.

Fabio Dias de Oliveira  
Luiz Carlos Felix Maia  
Marina Lopes de Oliveira  
Wendel José Teles

## RESUMO

Um dos grandes desafios do Brasil é a implementação de novas tecnologias na área da construção civil, como a gestão de resíduos sólidos, utilização de fibras para reforço estrutural e novas formas de gestões organizacionais. O estudo da utilização de fibras como reforço estrutural é de grande importância quando se trata de recuperação estrutural de uma peça. Diante dessa definição, o estudo a seguir tem como objetivo desenvolver e analisar o comportamento e a resistência de dois traços de concreto distintos após uma cura de 28 dias, com ênfase na utilização da fibra de carbono para reforçar uma estrutura fragilizada, que não tenha atingido a resistência esperada em projeto ou caso esteja sendo degradada por questões de intempéries físico, químicas devido ao tempo de vida útil da construção. Para fins de desenvolvimento deste trabalho realizou-se o ensaio de compressão axial do concreto, com o auxílio da ABNT NBR 5739:2018 – Concreto – Ensaio de Compressão de corpos de prova cilíndricos, a fim de obter resultados para o experimento e posteriormente realizar análise comparativa dos corpos de prova sem a fibra com a resistência baixa e com a fibra de carbono. Após o rompimento dos corpos de prova, pode-se observar que o concreto feito com o primeiro traço obteve uma carga média de ruptura de 11,2 MPa, esse mesmo concreto reforçado com uma camada de fibra de carbono obteve uma carga média de ruptura de 23,6 MPa, um aumento de 111% na sua resistência. O concreto feito com o segundo traço sem a fibra obteve uma carga média de ruptura de 14,2 MPa, o mesmo concreto reforçado com uma camada de fibra de carbono apresentou uma carga média de ruptura de 29,0 MPa, demonstrando um aumento de 105% na sua resistência. Por fim, ao romper o concreto feito com o primeiro traço reforçado com duas camadas da fibra de carbono, sua carga média de ruptura foi de 40,8 MPa, um ganho de 264% de resistência em ao concreto sem o reforço.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fibra de Carbono, Reforço Estrutural, Ensaio de Resistência a Compressão, Corpo de prova.

## **ABSTRACT**

One of the great challenges in Brazil is the implementation of new technologies in the area of civil construction, such as solid waste management, use of fibers for structural reinforcement and new forms of organizational management. The study of the use of fibers as structural reinforcement is of great importance when it comes to structural recovery of a part. Given this definition, the following study aims to develop and analyze the behavior and strength of two different concrete mixes after curing for 28 days, with emphasis on the use of carbon fiber to reinforce a weakened structure that has not reached the resistance expected in design or if it is being degraded by physical, chemical weathering issues due to the useful life of the construction. For the purposes of developing this work, the axial compression test of the concrete was carried out, with the aid of ABNT NBR 5739:2018 - Concrete - Compression Testing of cylindrical specimens, in order to obtain results for the experiment and later carry out analysis comparison of specimens without fiber with low strength and with carbon fiber. After the rupture of the specimens, it can be observed that the concrete made with the first mix obtained an average breaking load of 11.2 MPa, this same concrete reinforced with a layer of carbon fiber obtained an average breaking load of 23,6 MPa, an increase of 111% in its resistance. The concrete made with the second mix without the fiber had an average breaking load of 14.2 MPa, the same concrete reinforced with a layer of carbon fiber had an average breaking load of 29.0 MPa, demonstrating an increase of 105 % on your resistance. Finally, when breaking the concrete made with the first trace reinforced with two layers of carbon fiber, its average breaking load was 40.8 MPa, a gain of 264% in strength compared to the concrete without the reinforcement.

**KEYWORD:** Carbon Fiber, Structural Reinforcement, Compression Strength Test, Specimen.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Agregados graúdos .....	25
Figura 2 - Agregados miúdos: areia grossa e media.....	25
Figura 3 - Detalhe da armadura de uma viga.....	27
Figura 4 - Manta de Fibra de Carbono .....	28
Figura 5 – Aplicação da manta de fibra de carbono .....	31
Figura 6 - Sequência executiva do reforço com compósitos CFRP .....	32
Figura 7 - Viga preparada para receber reforço com concreto projetado e pilar já executado o reforço.....	36
Figura 8 - Reforço de pilar com chapas metálicas.....	37
Figura 9 - Definição dos grupos dos corpos-de-prova .....	39
Figura 10 – Fluxograma de métodos e materiais.....	39
Figura 11 - Tecido de fibra de carbono utilizado .....	41
Figura 12 - Resina Epóxi de Laminação .....	42
Figura 13 – Betoneira utilizada para mistura do concreto.....	44
Figura 14 - Adensamento manual dos corpos de prova.....	45
Figura 15 - Aplicação da fibra de carbono no corpo de prova .....	45
Figura 16 - Corpos de prova após a aplicação da fibra de carbono.....	46
Figura 17 - Ruptura do corpo de prova sem fibra de carbono.....	48
Figura 18 - Ruptura de corpo de prova com uma camada fibra de carbono.....	49
Figura 19 - Ruptura de corpo de prova com duas camada fibra de carbono .....	49

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Possíveis causas para o surgimento de manifestações patológicas no concreto ....	34
Quadro 2 - Características e aspectos de instalação de mantas e tecidos de fibra de carbono .	38
Quadro 3 – Dados técnicos da resina epóxi de laminação .....	43

## LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa).....	40
Tabela 2 - Propriedades das fibras de carbono .....	42
Tabela 3 - Tolerância para a idade de ensaio.....	46
Tabela 4 - Fator de correção h/d.....	47
Tabela 5 - Resultado do ensaio à compressão do grupo 1 .....	50
Tabela 6 - Resultado do ensaio à compressão do grupo 2.....	51
Tabela 7 - Resultado do ensaio à compressão do grupo 3.....	51
Tabela 8 - Resultado do ensaio à compressão do grupo 4.....	52
Tabela 9 - Resultado do ensaio à compressão do grupo 5.....	52

## LISTA DE GRÁFCOS

Gráfico 1 - Diagrama Tensão vs. Deformação das fibras.....	30
Gráfico 2 - Gráfico de Sitter.....	35
Gráfico 3 - Média dos resultados obtidos nos grupos 1, 2 e 5.....	53
Gráfico 4 - Média dos resultados obtidos nos grupos 3 e 4.....	54

## **LISTA DE ABREVIATURA E SIGLA**

FRP	Fiber Reinforced Polymer
TRC	Textile Reinforced Polymer
NBR	Norma Brasileira
PRF	Polímeros Reforçados com Fibras
FCK	Resistência Característica do Concreto à Compressão
MPa	Mega Pascal

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>19</b>
1.1 JUSTIFICATIVA.....	20
1.2 OBJETIVOS .....	21
<b>1.2.1 Objetivo geral .....</b>	<b>21</b>
<b>1.2.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>21</b>
1.3 METODOLOGIA .....	22
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	22
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>24</b>
2.1 ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO.....	24
<b>2.1.1 Concreto .....</b>	<b>24</b>
<b>2.1.2 Aço .....</b>	<b>26</b>
2.2 MANTA DE FIBRA DE CARBONO .....	27
<b>2.2.1 Composição do material: fibras e matriz .....</b>	<b>27</b>
<b>2.2.2 Propriedades físicas e mecânicas da fibra.....</b>	<b>29</b>
<b>2.2.3 Técnicas de fabricação e execução .....</b>	<b>30</b>
2.3 MATRIZ EPOXÍDICA.....	32
<b>2.3.1 Principais características físicas e mecânicas .....</b>	<b>32</b>
<b>2.3.2 Resinas epóxi.....</b>	<b>33</b>
2.4 RECUPERAÇÃO E REFORÇO ESTRUTURAL EM CONCRETO ARMADO .....	33
<b>2.4.1 Reforço estrutural com aumento de seção transversal .....</b>	<b>35</b>
<b>2.4.2 Reforço estrutural com chapas metálicas .....</b>	<b>36</b>
<b>2.4.3 Aplicações de reforço estrutural com fibra de carbono.....</b>	<b>37</b>
<b>3 MATERIAIS E METODOS .....</b>	<b>39</b>
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS .....	40
<b>3.1.1 Cimento portland CII-32.....</b>	<b>40</b>
<b>3.1.2 Areia média .....</b>	<b>40</b>
<b>3.1.3 Brita 0 .....</b>	<b>41</b>
<b>3.1.4 Fibra de carbono .....</b>	<b>41</b>
<b>3.1.5 Resina epóxi .....</b>	<b>42</b>
3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	43
<b>3.2.1 Definição dos traços do concreto.....</b>	<b>43</b>
<b>3.2.2 Confeção dos corpos de prova .....</b>	<b>43</b>

<b>3.2.3</b>	<b>Aplicação da fibra de carbono nos corpos de prova .....</b>	<b>45</b>
<b>3.3</b>	<b>ROMPIMENTO DOS CORPOS DE PROVA .....</b>	<b>46</b>
<b>3.3.1</b>	<b>Rompimento dos grupos 1 e 3 .....</b>	<b>48</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Rompimento dos grupos 2 e 4 .....</b>	<b>48</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Rompimento do grupo 5 .....</b>	<b>49</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>50</b>
<b>4.1</b>	<b>RESULTADO DOS ROMPIMENTOS DOS CORPOS DE PROVA .....</b>	<b>50</b>
<b>4.1.1</b>	<b>Rompimento do grupo 1 .....</b>	<b>50</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Rompimento do grupo 2 .....</b>	<b>50</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Rompimento do grupo 3 .....</b>	<b>51</b>
<b>4.1.4</b>	<b>Rompimento do grupo 4 .....</b>	<b>51</b>
<b>4.1.5</b>	<b>Rompimento do grupo 5 .....</b>	<b>52</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>55</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>57</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em quase sua totalidade de existência o ser humano sempre busca inovar e buscar aprimoramento nos seus materiais utilizados. A história da humanidade tem sido marcada pela inquietude do homem no ato contínuo de explorar as potencialidades do universo ao seu redor. Desde cedo, o homem aprendeu a conviver e, em diversas oportunidades a desafiar, as leis da matéria, construindo estruturas cada vez maiores, mais altas e grandiosas (BEBER, 2003b).

Tendo como exemplo a construção do *Pantheon*, em 27 a.C. (reconstruído no século II), que marcou o início da aplicação da *pozzolona*, também conhecida como cimento romano, que se constituiu em uma técnica que revolucionaria a indústria da construção e abriu novos horizontes para a expressão arquitetônica da época. A grande descoberta constituiu no aglomerante que, combinado com areia e pedra, além de proporcionar um material de grande resistência, permitiu a criação e o desenvolvimento de novas formas e tipologias de estruturas, com necessidades funcionais específicas (FIB, 2010).

À medida que o material continuou a evoluir, veio logo a invenção do concreto armado, que remonta ao século XVII, e desde então tornou-se o mais utilizado no mundo devido aos seus materiais de construção de baixo custo (comparado às estruturas metálicas); comportamento e propriedades conhecidos devido a vários estudos; e especificações claras (BOTELHO; MARCHETTI, 2018).

O século XX foi marcado pela consolidação do concreto armado como um dos mais importantes materiais da engenharia estrutural. O desenvolvimento da tecnologia do concreto e suas respectivas técnicas construtivas, em conjunto com a implementação de ferramentas computacionais sofisticadas, capazes de reproduzir com grande precisão o comportamento do concreto e do aço, permitiram explorar, plenamente, suas propriedades (BEBER, 1999a).

Atualmente, muitas estruturas de concreto armado estão atingindo o período de vida útil inicialmente previsto. Nas últimas décadas, em virtude de uma conjunção de fatores, a durabilidade das estruturas de concreto tornou-se alvo de enorme preocupação por parte dos profissionais envolvidos neste importante segmento da economia. Grande parte das dificuldades para a compreensão dos fenômenos e sua relevância no cenário atual está relacionada a pouca importância dispensada pela comunidade, como um todo, as questões relacionadas a durabilidade, manutenção e vida útil destas estruturas. Com efeito, nunca se deu a devida importância aos aspectos relacionados à durabilidade das estruturas, e tem sido colocado em segundo plano, o controle de qualidade da construção do concreto armado (JUVANDES, 1999).

Bastos (2006) apontou-se que embora o concreto armado seja um material de construção com muitas vantagens, também existem algumas desvantagens, como o alto peso e a baixa esbeltez dos elementos estruturais.

Por esses motivos, além de testar novas técnicas construtivas, inovações de materiais são importantes e necessárias para evitar problemas comuns. (SILVA; MACIEL, 2009). Nesta solução técnica, é enfatizada a utilização de materiais compósitos para melhorar o desempenho estrutural através do reforço em estruturas de concreto armado. (GABARDO, 2019).

Fibras compostas podem ser adicionadas à matriz cimentícia do concreto para aumentar sua resistência à tração, retardando a propagação de fissuras, melhorando a tenacidade, resistência ao impacto e resistência à fadiga, além de reduzir a retração do concreto. (NEVILLE *et al.*, 2013).

Em alguns casos, materiais compósitos podem ser usados como reforço externo que requer aumento de resistência ou produção de patologia. Para isso, é comum o uso de Polímero Reforçado com Fibra (PRF) e Polímero Reforçado com Têxtil (TRC), feito de fibra de carbono, vidro ou aramida. (GABARDO; LAZZARI, 2017). Para cada patologia presente na estrutura, recomenda-se um tipo diferente de fibra, classificada de acordo com o dano causado pelo elemento estrutural. (CONTAMINE, 2011).

Diante disto, surgiu o interesse no desenvolvimento do trabalho com o compósito de fibra de carbono, analisando o desempenho do concreto quando reforçado com tecido de fibra de carbono, através de ensaios laboratoriais com corpos de prova.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

No decorrer dos anos a tecnologia na engenharia civil foi evoluindo, principalmente na área de materiais, com a necessidade de obter elementos mais resistentes, leves, baratos e de fácil execução. A necessidade de expandir o conhecimento no uso de fibras de carbono para o reforço de estruturas de concreto armado é importante para conglomerar sabedoria no meio acadêmico e profissional. O uso da manta de fibra de carbono é utilizado para corrigir eventuais falhas de projetos ou execuções da estrutura, uma mudança na utilização da edificação, mau uso da mesma, é até mesmo o desgaste natural da estrutura no decorrer dos anos.

As ações para a reabilitação de estruturas constituem-se em complexo ramo da engenharia, cujo impacto torna-se cada vez maior, na medida em que a demanda por reparos, reforços e manutenção, aumenta a cada dia. Estratégias de reabilitação eficientes e que satisfaçam uma multiplicidade de restrições de projetos e execução representam o grande

desafio a ser enfrentado. Na maioria dos casos, a opção pela reabilitação de uma estrutura representa a melhor alocação dos escassos recursos disponíveis (BEBER, 1999).

De acordo com Juvandes (1999) o concreto tem um período de vida útil elevado, desde que seja feito um bom manuseio e execução, mas com o decorrer do tempo devem ser feitos reparos devido ao aumento de cargas que não foram previstos ou até mesmo por causas de intempéries naturais. Assim, fica no dever do engenheiro saber qual a melhor forma de restaurar determinados elementos estruturais, e é nesses quesitos que a utilização de fibra de carbono pode ser utilizada como um meio mais rápido de execução.

Justifica-se por meio deste trabalho com decorrência do aumento da procura por novos métodos de reparos de estruturas, é necessário um estudo mais aprofundado sobre o uso dos componentes de fibras de carbono, suas vantagens sobre outros tipos de matérias, o tempo empregado na sua execução, seus benefícios apresentados em comparação a outros métodos de recuperação estrutural, e o mais importante o seu ganho de resistência quando aplicado em uma estrutura de concreto armado.

## 1.2 OBJETIVOS

Neste tópico serão propostos os objetivos, em âmbito geral e específico, da análise de corpos de prova de concreto com a fibra de carbono submetidos a ensaios laboratoriais de compressão.

### 1.2.1 Objetivo geral

Analisar por meio de ensaios experimentais de corpos-de-prova de concreto simples a inserção de compósito de fibra de carbono.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Apresentar as propriedades físicas e mecânicas do concreto simples e dos compósitos de fibra de carbono aplicados ao reforço estrutural;
- Expor as vantagens e desvantagens da utilização da fibra de carbono no concreto estrutural frente às demais técnicas construtivas para esta finalidade.

- Promover ensaios de resistência à compressão axial de corpos de prova de concreto simples com a inserção de compósitos de fibra de carbono envoltos aos corpos de prova;

### 1.3 METODOLOGIA

Este trabalho é fundamentado em uma pesquisa experimental através da realização de ensaios laboratoriais com corpos de prova utilizando as normas no Centro Tecnológico da Universidade Evangélica de Goiás – UniEVANGÉLICA na cidade de Anápolis - GO.

Por meio da interpretação e utilização das normas regulamentadoras ABNT NBR 5738:2015 – Moldagem e cura de corpo de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto; ABNT NBR 5739:2018 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos; ABNT NBR 7211:2015 – Agregados para concreto – Especificações, e a NBR NM 67 – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, coletando os dados dos resultados obtidos e comparados com os conceitos associados ao tema do trabalho.

A manta de fibra de carbono utilizada é unidimensional 10 cm x 10 m em formato de tecido (tramado unidimensional), juntamente com a resina epóxi ES260 para fazer a colagem dela no corpo de prova.

### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho será desenvolvido em capítulos, conforme apresentado a seguir:

No primeiro capítulo, é apresentada a introdução ao tema proposto, identificando e destacando os objetivos do trabalho, a importância do tema em questão e a metodologia aplicada para o desenvolvimento do trabalho.

No segundo capítulo, apresentam-se conceitos a respeito de estruturas em concreto armado, manta de fibra de carbono e suas propriedades, recuperação e reforço estrutural em concreto armado, patologias, recuperação estrutural e informações a respeito de resinas epóxi.

No terceiro capítulo, são apresentados os materiais e métodos utilizados para execução da parte experimental do trabalho, juntamente com a definição dos traços de corpos de provas que foram separados em cinco grupos, com e sem o revestimento da fibra de carbono e o rompimento dos mesmos.

No quarto capítulo, os resultados dos rompimentos dos cinco grupos de corpos de prova são apresentados.

No quinto capítulo são apresentadas as conclusões deste estudo e algumas considerações finais.

Por fim, são expostas as referências bibliográficas utilizadas ao longo do trabalho.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO

#### 2.1.1 Concreto

O concreto é o material base e o mais utilizado no mundo, sendo composto por agregados miúdos (areia fina, média ou grossa), agregados graúdos (brita ou seixos), água e cimento. Além desses compostos, podem ser adicionados aditivos de acordo com a finalidade ou agilidade que precisa para a construção. Ele é demasiadamente durável e é capaz de proteger o aço que será unido a ele.

Um dos principais fatores na evolução das tecnologias de construção tem sido orientado pela necessidade de usar materiais que sejam capazes de perdurar longo tempo – que sejam duráveis. Essa é uma das razões para o sucesso do concreto – ele é um material forte e quimicamente muito inerte, que pode durar por séculos (DYER, 2015).

Duas propriedades do concreto que o diferenciam como material de construção são: resistência à água - diferentemente do aço e da madeira, o concreto se deteriora menos quando exposto à água o que explica sua utilização em estruturas de controle, armazenamento e transporte de água - e sua plasticidade - que permite obter formas construtivas inusitadas, como se vê em obras arquitetônicas (IBRACON, 2009).

A estabilidade dimensional do concreto, ou seja, os fenômenos de expansão, retração e fissuração, e a resistência química do concreto, estão diretamente ligados às características físicas e químicas do cimento, tais como finura, expansibilidade, composição potencial, presença de cal livre, de óxido de magnésio, etc., e não à sua resistência mecânica (SOUZA; RIPPER, 2009). Ainda segundo os autores, os tipos de cimento atualmente produzidos no Brasil são o cimento Portland comum, cimento Portland comum com adições, cimento Portland de alto-forno, cimento Portland composto, cimento Portland pozolânico e cimento Portland de alta resistência inicial.

Além do cimento, o concreto é formado por agregados graúdos e miúdos. Os agregados graúdos têm o papel de reduzir a retração e aumentar a resistência aos esforços mecânicos, e só devem ser utilizados quando isentos de substâncias nocivas, como torrões de argila, matérias contendo carbono, material pulverulento e impurezas orgânicas (SOUZA; RIPPER, 2009).

A composição granulométrica tem grande influência sobre a qualidade do concreto, especialmente sobre a compactidade e a resistência aos esforços mecânicos (TEODORO, 2013). A Figura 1 ilustra quatro tipos de agregados graúdos.



**Fonte: VOTORAN, 2007.**

Souza e Ripper (2009) citam que, com relação aos agregados miúdos (que geralmente são areia e cascalho), a baixa densidade indica que o agregado é poroso e pouco resistente. A compactação do agregado miúdo é a relação entre o volume real e o volume aparente, e, quanto maior for a compactação do agregado miúdo empregado em sua fabricação, maior será sua resistência. A Figura 2 apresenta dois tipos de agregados miúdos: areia grossa e média.



**Fonte: VOTORAN, 2007.**

A água também é um importante componente da mistura do concreto, já que é a quantidade de água (fator água/cimento) que determina a resistência final do concreto (IBRACON, 2009). Segundo Souza e Ripper (2009), a influência da água na alteração das propriedades do concreto acontece através das substâncias nela dissolvidas ou em suspensão (argila, silte), e se a quantidade dessas substâncias for elevada, isso poderá impedir a cristalização dos produtos da reação do cimento com a água, com a consequente perda de coesão do concreto final.

O desenvolvimento da tecnologia do concreto, das técnicas construtivas e implementação de sistemas computacionais para a elaboração do projeto estrutural, permitiu que se previsse com maior clareza o comportamento da estrutura (ARAÚJO, 2002).

Os materiais compósitos reforçados com fibra surgiram como alternativa para os casos em que emprego dos materiais tradicionais, aço e concreto, não é adequado (ARAÚJO, 2002). Sendo assim, a pesquisa em análise será exatamente para analisar o comportamento e a durabilidade do concreto armado com a fibra de carbono.

### **2.1.2 Aço**

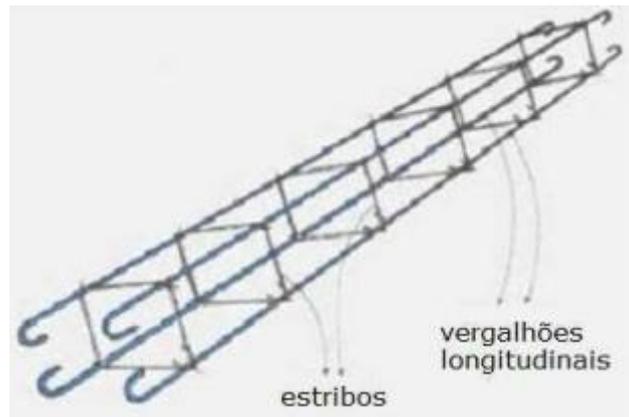
Com o aumento da exploração das florestas e conseqüentemente as indústrias madeireiras foram vetadas por desmatamento, passaram a utilizar madeira de baixo custo fazendo com que a qualidade caísse, deste modo a madeira passou a ser substituída, passando a ser utilizado o aço, isto ocorreu em meados de 1980. Com o fim da Segunda Guerra Mundial, o material em abundância era o aço e a produção do mesmo obteve grandes avanços devido à guerra, assim surgiu o revolucionário e até a atualidade utilizada esta metodologia construtiva (PEDROSO, 2014).

Para Carvalho e Figueiredo Filho (2014), o concreto não é adequado para a utilização isolada de elemento resistente, pois, apesar de possuir uma boa resistência à compressão, pouco resiste à tração (cerca de 1/10 da resistência à compressão), solicitação presente em quase todas as estruturas das construções. Conseqüentemente, para aumentar a resistência da viga, é importante associar o concreto a um material que tenha boa resistência à tração e seja mais deformável.

O aço é o segundo elemento mais importante para a composição do concreto armado. É ele que suporta os esforços de tração nas peças estruturais, no qual o concreto não consegue resistir, pois ele não consegue absorver o suficiente os esforços solicitantes relacionados a tração de uma edificação. Assim, como o aço não consegue suportar os esforços de compressão.

As armaduras de aço podem ser utilizadas longitudinalmente, como reforço a tensões de tração e compressão, e transversalmente, como reforço a tensões cisalhantes, conhecidas com estribos (ABNT, 2004). Dessa forma, o detalhamento e cálculo das armaduras depende do tipo de solicitação à qual o elemento estrutural está submetido. A Figura 3 mostra um posicionamento ilustrativo das armaduras longitudinais e transversais de uma viga.

**Figura 3 - Detalhe da armadura de uma viga**



**Fonte: Vendramini, 2017.**

O aço é um material quimicamente compatível com o concreto, pois ele não corrói devido o ambiente alcalino em que vai estar. Conforme afirmado por Pedroso (2014) o aço é o único material que pode ser reaproveitado diversas vezes e com a vantagem de não perder suas características principais: sua funcionalidade, qualidade e resistência.

## 2.2 MANTA DE FIBRA DE CARBONO

### 2.2.1 Composição do material: fibras e matriz

O advento da tecnologia de compósitos avançados, na década de 1940, veio trazer benefícios incontáveis a vários segmentos industriais, estes que a princípio tiveram seu papel nas áreas bélicas e área aeroespacial. A simples compactação de fibras de reforço sejam naturais ou sintéticas, aglomeradas com um material ligante, na forma de uma resina termorrígida formulada com endurecedores, formava materiais leves e estruturalmente adequados para uma variedade de aplicações. Vários processos de fabricação foram então implementados, adaptados e sendo incorporados à tecnologia de compósitos, como por exemplo, os processos de infusão de resina (PRADO, 2009)

De acordo com Machado (2006), as fibras de carbono resultam da carbonização de fibras precursoras orgânicas, tais como o poliácridonitril (PAN), ou com base no alcatrão derivado do petróleo ou do carvão (PITCH) em um ambiente inerte. O processo de produção conta com uma fase de oxidação das fibras, seguido de tratamento térmico a altas temperaturas, cujo resultado são fibras com átomos de carbono perfeitamente alinhados com extraordinária resistência mecânica (MACHADO, 2006).

A fibra de carbono é um material altamente promissor, baseado na força das ligações carbono-carbono e na leveza do átomo carbono (TAYLOR, 1994 apud BEBER, 2003).

As fibras de carbono são, normalmente, produzidas a partir de três materiais orgânicos: rayon (polímero celulósico), poliacrilonitrila (PAN) e piche (alcatrão de petróleo ou de carvão). Os processos utilizados para fabricação e as características das fibras de carbono produzidas dependerão do material base usado para produzi-las. Em geral, as mesmas apresentam coloração escura e podem ser manipuladas, durante o processo de manufatura, com o objetivo de obter resistências ou módulos de elasticidade mais elevados (GARCEZ, 2007).

Segundo Hancox e Mayer (1994), existem mais de 100 tipos de fibras de carbono disponíveis para utilização em Polímeros Reforçados com Fibras (PRF). Além das aplicações na Engenharia Civil, as fibras de carbono têm inúmeras outras aplicações na indústria aeroespacial e automotiva, assim como em barcos, bicicletas e equipamentos esportivos, onde elevada resistência à tração, aliada a baixo peso, são requisitos fundamentais.

Esse material se destaca principalmente por apresentar maior relação entre resistência e rigidez com seu peso próprio; manter a alta resistência e rigidez sob temperaturas elevadas; quando em temperatura ambiente, não ser afetado pela umidade e ação de vários solventes, ácidos e bases; e apresentar diversidade de características físicas e mecânicas, permitindo que os compósitos apresentem versatilidade de aplicação na construção civil (BEBER, 2003). A Figura 4 mostra uma manta de fibra de carbono.

**Figura 4 - Manta de Fibra de Carbono**



Fonte: Juvandes *et al.*, 2001.

### 2.2.2 Propriedades físicas e mecânicas da fibra

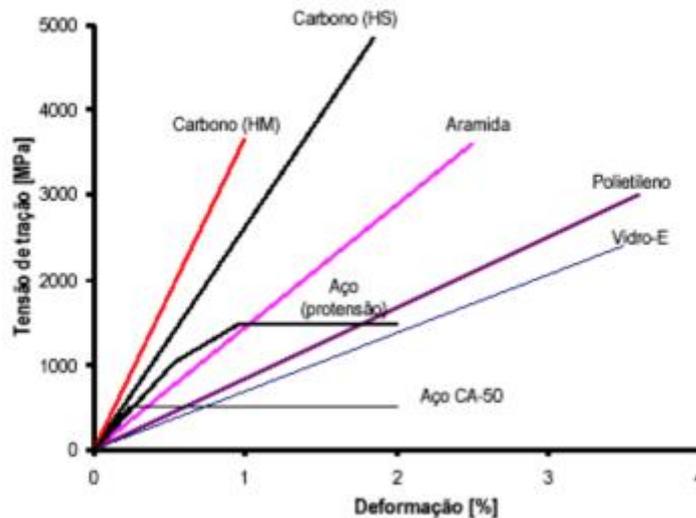
Segundo Callister (2004), a matriz que envolve as fibras de um compósito pode também ser chamada de resina impregnante ou, simplesmente, resina, quando formada por um polímero de elevado peso molecular. Propriedades como a resistência à tração específica e o módulo de elasticidade específico da matriz são importantes para determinação das características do material compósito. Pela regra das misturas, o módulo de elasticidade de um material compósito é obtido pela soma dos módulos de elasticidade da matriz e da fibra multiplicados pelas respectivas porcentagens em volume de cada material. Como um PRF é formado tipicamente por 30% de matriz e 70% de fibras, a matriz por seu baixo percentual não contribuirá decisiva para o módulo de elasticidade do compósito, uma vez que os valores da porcentagem em volume e do módulo de elasticidade das fibras são muito mais elevados que os da matriz. No entanto, como salienta o Consórcio ISIS (2003), a matriz tem importantes funções, tais como proteger as fibras da abrasão e da degradação devido à exposição a meios ambientes agressivos, separar e dispersar as fibras do compósito e fazer a transferência de esforço entre as fibras. É de grande importância que a matriz e as fibras tenham compatibilidade quimicamente e termicamente.

Carvalho (2005) destaca que a eficiência mecânica dos compósitos depende exclusivamente da maximização do teor de fibras em relação ao teor de resina, pois as fibras possuem propriedades mecânicas superiores às matrizes.

De acordo com Machado (2010), a matriz polimérica tem o objetivo de ligar as fibras e transmitir os esforços externos para as fibras através das tensões tangenciais, enquanto o elemento estrutural (fibras de carbono) tem a função de absorver as tensões de tração advindas dos esforços solicitantes.

O Gráfico 1 mostra a relação entre tensão de tração e deformação, entre os diferentes compósitos de fibra mais comumente utilizados. A interpretação do gráfico permite observar que a fibra de carbono apresenta a melhor relação entre tensão e deformação entre os compósitos comparados, justificando sua ampla utilização em diferentes aplicações.

Gráfico 1 - Diagrama Tensão vs. Deformação das fibras



Fonte: Beber, 2003.

### 2.2.3 Técnicas de fabricação e execução

As principais aplicações para o sistema compósito de fibra de carbono são em reforço de vigas à flexão e ao cisalhamento, reforço de lajes à flexão, reforço de pilares e colunas, reforço em chaminés, reforço de tanques, silos e reservatórios. Além dessas aplicações, o compósito de fibra de carbono também pode ser empregado em muros de arrimo, vigas-parede, reforço em tubulações de grande diâmetro e também reforço de túneis (MACHADO, 2002).

As fibras de carbonos são resultado do processo de carbonização de fibras de polímeros, sendo suas características mecânicas diretamente dependentes da estrutura molecular obtida. Dependendo do tipo de tratamento da fibra básica, que inclui carbonização, grafitação e oxidação, é possível fabricar fibras de carbono com diversas configurações de resistência e algumas delas podem chegar a ser muitas vezes mais resistentes que o aço.

A produção dessas fibras exige exposição ao ar das fibras base, seguida de um processamento a altas temperaturas (da ordem de 1000 o C a 1500 o C) de fibras de polímeros orgânicos. Quanto maior a temperatura deste processo, maior será o módulo de elasticidade do material resultante, variando de 100GPa a 300GPa (MACHADO, 2010).

A fibra de carbono é um material baseado na força das ligações carbono-carbono, no grafite e na leveza do átomo de carbono. As fibras de carbono acabam por ser caracterizadas por uma combinação de baixo peso, alta resistência e grande rigidez.

Machado (2010) estabelece que a sequência para a execução dos sistemas compostos estruturados com fibras de carbono pode ser assim resumida, conforme ilustrado na Figura 5 :

a) 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;

b) 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;

c) Aplicação da lâmina de fibra de carbono que vai reforçar o sistema composto;

d) 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;

**Figura 5 – Aplicação da manta de fibra de carbono**

**(a) Preparo da superfície**



**(b) Aplicação do Primer**



**(c) Aplicação da manta**



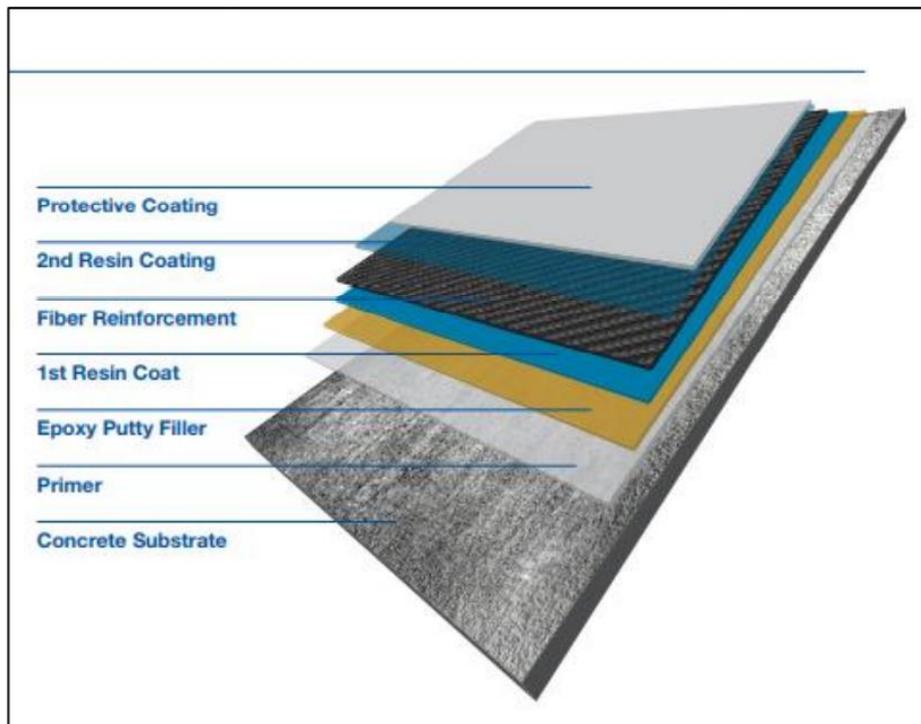
**(d) Aplicação da segunda camada de Primer**



**Fonte: Santos, 2014.**

As mantas flexíveis de fibra de carbono, já impregnadas com resina epóxi que mantem as fibras de carbono orientadas em uma direção. A manta flexível em geral, é fornecida em rolos com variação de comprimento de larguras, possuem proteção plástica que envolve uma de suas faces para facilitar o armazenamento da mesma e também seu manuseio na hora da instalação, podendo ser aplicadas as mais diversas formas de estruturas e possibilitando o incremento da quantidade de camadas desejadas. Para a aplicação da manta, a superfície deve ser regularizada com um disco de desbaste. Na sequência, deve-se fazer a limpeza de todo material solto, aplica-se o primer e, após a cura do primer, aplica-se a manta, retirando ar e regularizando qualquer espaço mal preenchido. A Figura 6 demonstra a ordem correta de aplicação da manta.

**Figura 6 - Sequência executiva do reforço com compósitos CFRP**



Fonte: Catálogo técnico MasterBrace®, 2018.

## 2.3 MATRIZ EPOXÍDICA

### 2.3.1 Principais características físicas e mecânicas

De acordo com Santos (2008), a matriz epoxídica assume o papel de transferir as tensões atuantes no elemento estrutural de concreto armado para o reforço estrutural, como as fibras de carbono por meio da interação atrito e adesão ao substrato. E além de servir como

ponte de ligação entre o elemento estrutural com o reforço estruturante, a matriz epoxídica envolve todas as fibras de carbono proporcionando resistência mecânica e resistência aos agentes agressivos responsáveis pela deterioração do compósito.

Conforme Machado (2002) expõe, a matriz epoxídica abrange em sua constituição as resinas, tais como imprimadores primários, regularizadores de superfície, os saturantes e ainda os revestimentos protetores.

Segundo Machado (2002), qualidades e características básicas necessárias para as resinas são:

- Ter compatibilidade com a superfície a ser reparada e alta resistência de colagem;
- Elevada resistência a altas temperaturas e também águas salgadas;
- Preencher vazios decorrentes do processo;
- Compatibilidade e boa ligação com a fibra de carbono;
- Desenvolvimento de propriedades mecânicas adequadas ao compósito.

### **2.3.2 Resinas epóxi**

As resinas epóxi são bi componentes (resina e endurecedor) formadas pela reação química por elementos constituintes da resina e do endurecedor. Onde qualquer molécula do primeiro componente deve estabelecer ligação com o segundo componente. Sendo ela condicionada ao tempo da mistura, à temperatura e umidade do local. Sua importância está diretamente relacionada a integridade do conjunto (JUVANDES, 1999).

A resina epóxi tem como finalidade atuar como adesivo de alta capacidade de liga e resistência final muito elevada, garantindo a aderência do compósito ao substrato de concreto. O processo visa transferir as tensões tangenciais da resina para o substrato, de modo a estabelecer a integridade do arranjo compósito-epóxi-concreto, além de atuar como selante, para uso com diversos materiais de construção, com durabilidade e elasticidade muito maiores do que os materiais usuais (MACHADO, 2004).

## **2.4 RECUPERAÇÃO E REFORÇO ESTRUTURAL EM CONCRETO ARMADO**

O concreto armado é um dos métodos da construção civil mais utilizados no mundo, suas características principais são a resistência e sua durabilidade. Erros de projetos, má execução e manutenção inadequada são alguns fatores que contribuem para uma menor vida útil. Mas a sua deterioração é um processo natural e que dificilmente pode ser evitado. Sua

interação com o ambiente, composto por agentes agressivos apresentam diferentes níveis de agressividade como ação do tempo, ação de agentes químicos, físicos ou biológico, e até a necessidade de aumento de carga.

Com os avanços dos materiais e dos processos construtivos, acabaram aprimorando no aspecto econômico o dimensionamento de estruturas, tornou-as mais sujeitas a defeitos dos materiais e manifestações patológicas do que as estruturas mais antigas. Esse fato acontece porque esses avanços permitiram o uso de peças mais esbeltas, com uma margem de segurança menor em relação ao que era feito antigamente, esse fato contribui para o aparecimento de patologias. Além disso, processos como o envelhecimento natural da estrutura, erros no dimensionamento, alteração do seu regime de utilização e diferenças entre o projeto original e o que foi construído acabam tornando necessárias intervenções na estrutura (BEBER, 2003). O Quadro 1 demonstra exemplos de possíveis causas de surgimento de patologias no concreto.

**Quadro 1 - Possíveis causas para o surgimento de manifestações patológicas no concreto**

<b>Etapa</b>	<b>Possíveis causas</b>
<b>Concepção da estrutura - projeto-</b>	[1] Elementos de projetos inadequados, má definição das ações atuantes, modelo analítico não apropriado, deficiência no cálculo, etc; [2] Falta de compatibilidade entre a estrutura e a arquitetura, assim como os demais projetos; [3] Especificação inadequada de materiais; [4] Detalhamento insuficiente ou errado; [5] Detalhes construtivos inexequíveis; [6] Falta de padronização das representações (convenções); [7] Erros de dimensionamento.
<b>Execução da estrutura -construção-</b>	[1] Baixa capacitação e falta de experiência dos profissionais; [2] Instalação inadequada do canteiro de obras; [3] Deficiências na confecção de fôrmas, escoramentos; [4] Deficiências no posicionamento e quantidade de armadura; [5] Baixa qualidade dos materiais e componentes; [6] Baixa qualidade do concreto, desde sua fabricação até a cura.
<b>Utilização da estrutura -manutenção-</b>	[1] Utilização inadequada; [2] Falta de um programa de manutenção apropriado.

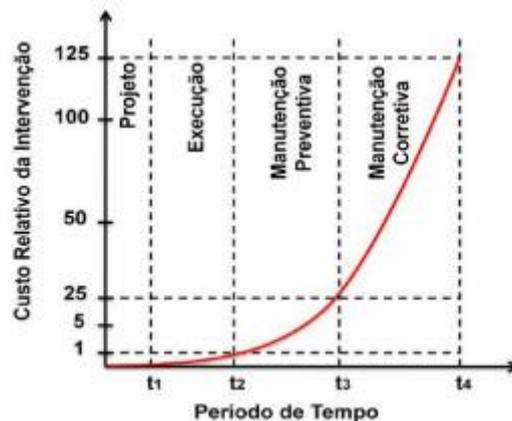
**Fonte: Beber, 2003.**

O reforço estrutural a ser empregado no reparo em uma peça de concreto armado deve possuir como características: elevada durabilidade, baixa permeabilidade, alta resistência

estrutural, ótima aderência ao substrato, baixa retração, fácil aplicação e ainda propriedades similares as do concreto com a finalidade de garantir eficácia no reparo ou reforço (PINTO, 2000).

Os problemas patológicos tendem a evoluir e a se tornarem mais críticos com o passar do tempo. Deste modo, é recomendado que quando detectadas anomalias nas estruturas, se tomem atitudes para sua correção, uma vez que com o passar do tempo o problema tende a piorar. Além de o problema se tornar mais crítico, o custo para reparar a anomalia é incrementado com o passar do tempo (MACHADO 2002). Estas proporções podem ser vistas no gráfico representativo da Lei de Sitter, ilustrado no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Gráfico de Sitter.



Fonte: Adaptado de Machado, 2002.

#### 2.4.1 Reforço estrutural com aumento de seção transversal

Esse tipo de reforço é um dos métodos mais antigos e mais utilizado na construção civil. Esse processo é feito aumentando as dimensões da peça estrutural já existente, esse tipo de reforço consiste no encamisamento da estrutura com adição de concreto armado ou não, à seção transversal do elemento a ser reabilitado. Pode ser executado em vigas, pilares e lajes, isso aumenta a sua rigidez, capacidade de carga, ductilidade etc. Essa execução exige alguns cuidados, como maior atenção ao acréscimo de peso no conjunto estrutural, outro ponto importante e a escolha do concreto que será utilizado, pois uma decisão equivocada pode gerar problemas de aderência entre o concreto e o novo, além da cura inadequada, devido à diferença de umidade entre os dois tipos de concreto. A Figura 7 ilustra uma viga sendo preparada para receber reforço estrutural com concreto.

**Figura 7 - Viga preparada para receber reforço com concreto projetado e pilar já executado o reforço**



**Fonte: Silva, 2006.**

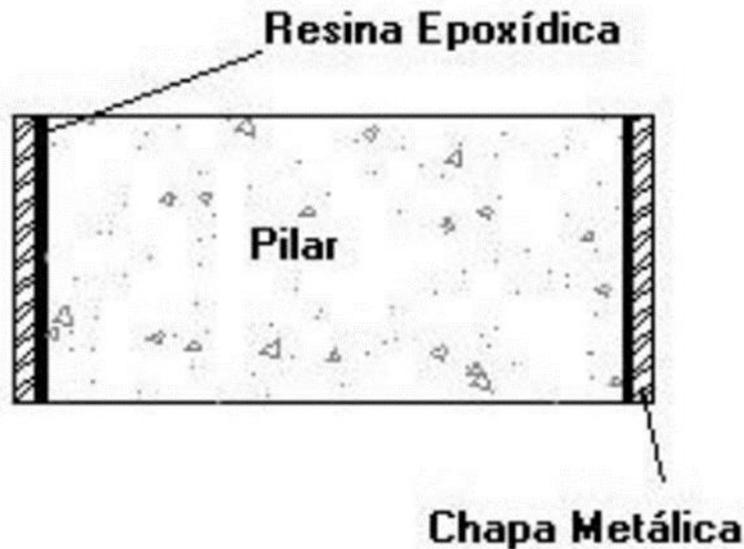
#### **2.4.2 Reforço estrutural com chapas metálicas**

Esse tipo de método também é muito utilizado a vários anos no reforço de estruturas de concreto. Essa técnica consiste na colagem de chapas metálicas na superfície dos elementos de concreto, aplicando colas epóxis. Essa técnica é empregada para reforçar peças de concreto com sua capacidade de resistência afetada por aumentos de cargas, danos causados pelo ambiente e até por corrosão das armaduras.

Trata-se de uma técnica simples e econômica, suas principais vantagens são que o acréscimo da seção da peça é muito pequeno assim não interfere muito na arquitetura existente, é um método rápido e simples de ser aplicado, não há uma sobrecarga grande na peça e há pouca interferência no uso da estrutura durante a execução da reabilitação.

Entretanto deve-se levar em consideração algumas desvantagens com essa técnica, como por exemplo: a sua corrosão, como trata-se de um elemento metálico, se não forem adotados métodos preventivos de manutenção periódicos, altas temperaturas como incêndios podem causar o descolamento das placas, e cuidados na hora da preparação da superfície de concreto e da superfície do elemento metálico que entra em contato com a resina. A Figura 8 demonstra um reforço com chapa metálica.

**Figura 8 - Reforço de pilar com chapas metálicas**



Fonte: Rigazzo, 2003.

### **2.4.3 Aplicações de reforço estrutural com fibra de carbono**

Com a evolução da tecnologia tornou-se possível o descobrimento de novos materiais para substituir as chapas de aço muito usadas no reforço de estruturas de concreto por materiais de alta qualidade. Isso levou a ideia de se utilizar tecidos, mantas ou laminados de fibras unidirecionais e contínuas em matrizes de resina epóxi. Os polímeros reforçados com fibras de carbono ou carbon fibre reinforced polymers (CFRP) se destacam como um dos materiais mais adequados para o reforço estrutural de elementos de concreto armado devido ao alto desempenho mecânico das fibras de carbono, permitindo uma significativa redução nas dimensões dos elementos empregados para este fim (BEBER, 2003). Os compósitos de CFRP destacam-se, especialmente por que:

- As fibras de carbono apresentam as maiores relações entre resistência e rigidez com seu peso próprio;
- As fibras de carbono mantêm a alta resistência e rigidez sob temperaturas elevadas;
- À temperatura ambiente, as fibras de carbono não são afetadas pela umidade e ação de vários solventes, ácidos e bases
- As fibras de carbono apresentam uma diversidade de características físicas e mecânicas, permitindo que os compósitos apresentem grande versatilidade para diversas aplicações em engenharia;

- Os processos de fabricação de fibras e compósitos encontram-se altamente desenvolvidos, são relativamente baratos e apresentam uma excelente relação custo-benefício.

A princípio as fibras de carbono eram utilizadas para o reforço de pilares, mas sua utilização agora se abrange no reforço de vigas, pilares, lajes e até estruturas de pontes. Esses reforços possibilitam limitar a abertura de fissuras e as flechas, além de aumentar a resistência à flexão e à força cortante. Esse tipo de reforço tem uma baixa condutividade térmica transversal e a sua resistência ao fogo é limitada apenas pela instabilidade da resina aplicada, exposta à elevadas temperaturas.

As principais características e aspectos de instalação de sistemas de reforços com tecidos e mantas de fibra de carbono são apresentadas no Quadro 2.

**Quadro 2 - Características e aspectos de instalação de mantas e tecidos de fibra de carbono**

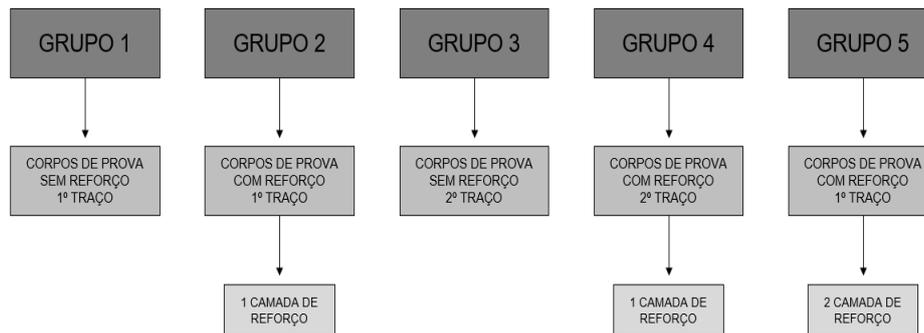
<b>Características</b>	<b>Mantas e tecidos</b>
<b>Sistema de reforço estrutural</b>	Curados in situ
<b>Espessura</b>	0,1 a 0,5 mm
<b>Utilização</b>	Colagem e impregnação das mantas e tecidos com resina
<b>Aspectos típicos da instalação</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Independente da forma da superfície, necessidade de arredondamento dos cantos;</li> <li>✓ Resina de baixa viscosidade para colagem e impregnação;</li> <li>✓ Usa-se frequentemente várias camadas;</li> <li>✓ Aplicação do putty é necessária para prevenir o descolamento por imperfeição da superfície;</li> <li>✓ Versatilidade de aplicação, necessita de rigoroso controle de qualidade;</li> <li>✓ Controle de qualidade (má aplicação e mão-de-obra de baixa qualidade = perda de ação compósita entre o reforço e a estrutura, problemas na integridade do reforço a longo prazo).</li> </ul>

Fonte: Araújo, 2022.

### 3 MATERIAIS E METODOS

Nesse capítulo será detalhado os ensaios realizados no desenvolvimento experimental do trabalho e os materiais usados no mesmo. A Figura 9 demonstra como está organizado o esquema com os grupos do experimento, cujos corpos de prova foram divididos em 5 grupos:

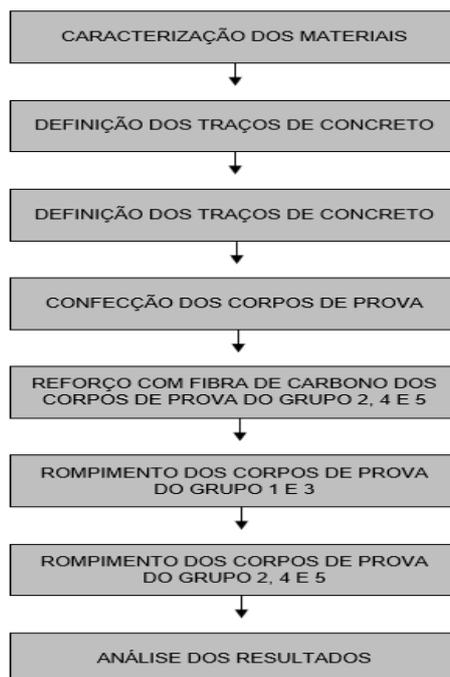
**Figura 9 - Definição dos grupos dos corpos-de-prova**



Fonte: Autor, 2022.

Os materiais e os métodos serão representados em formas de fluxograma conforme a Figura 10.

**Figura 10 – Fluxograma de métodos e materiais**



Fonte: Autor, 2022.

### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Foram utilizados os seguintes materiais para execução do trabalho: cimento, areia e brita para a confecção do concreto. Foram feitos dois traços diferentes de concreto para o reforço utilizando manta de fibra de carbono. Tais materiais, suas características e normas regulamentadoras estão descritas a seguir.

#### 3.1.1 Cimento portland CII-32

O cimento Portland tem função de aglomerante, com intuito de unir os outros componentes para a fabricação do concreto. Nesse experimento utilizou-se o cimento do tipo CP II-F- 32 da marca Tocantins®, especificado segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018), como mostrado na Tabela 1:

**Tabela 1 - Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa)**

<b>Designação normalizada</b>	<b>Sigla</b>	<b>Classe de Resistência</b>	<b>Sufixo</b>	<b>Clínquer + sulfatos de cálcio</b>	<b>Escória granulada de alto-forno</b>	<b>Material pozolânico</b>	<b>Material carbonático</b>
Cimento Portland composto com material carbonático	CP II-F	25, 32 ou 40	RS Ou BC	75 - 89	0	0	11 - 25

**Fonte: (ABNT NBR 16697, 2018) - Adaptado**

#### 3.1.2 Areia média

A areia faz parte da composição do concreto, sendo o agregado miúdo, definido pela norma NBR7211 (ABNT, 2005) de Agregados para concreto – Especificação como “agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 µm, em ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248, com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1” (ABNT, 2005).

### 3.1.3 Brita 0

A Brita 0 é utilizada como agregado graúdo, termo definido, pela NBR 7211 (ABNT, 2005), como “agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, em ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248, com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1” (ABNT, 2005). A brita é inserida no concreto com o objetivo de aumentar a durabilidade e a resistência à abrasão do elemento estrutural (IBRACON, 2009).

### 3.1.4 Fibra de carbono

Para a realização deste estudo o composto utilizado foi o de fibra de carbono unidirecional H12K-UD200 apresentado na Figura 11.

**Figura 11 - Tecido de fibra de carbono utilizado**



**Fonte: Autor, 2022.**

O tecido utilizado no trabalho é unidirecional, com fibras de carbono em apenas uma direção. As fibras de carbono, na cor preta, se prolongam na direção longitudinal do tecido, enquanto na direção perpendicular, fibras de vidro, na cor branca. O reforço à tração com as fibras de carbono é eficiente na direção paralela às fibras de carbono, no sentido longitudinal do tecido.

As especificações e propriedades do material foram apresentadas nas tabelas técnicas disponibilizadas pelos fabricantes das matérias primas. Tais informações estão demonstradas na Tabela 2:

**Tabela 2 - Propriedades das fibras de carbono**

Propriedade	Unidade	Fibra de Carbono
Peso	g/cm <sup>2</sup>	1,76
Espessura	mm	0,111
Elongação até a ruptura	%	1,5
Módulo de Elasticidade	GPa	210
Resistência à Tração	MPa	3000

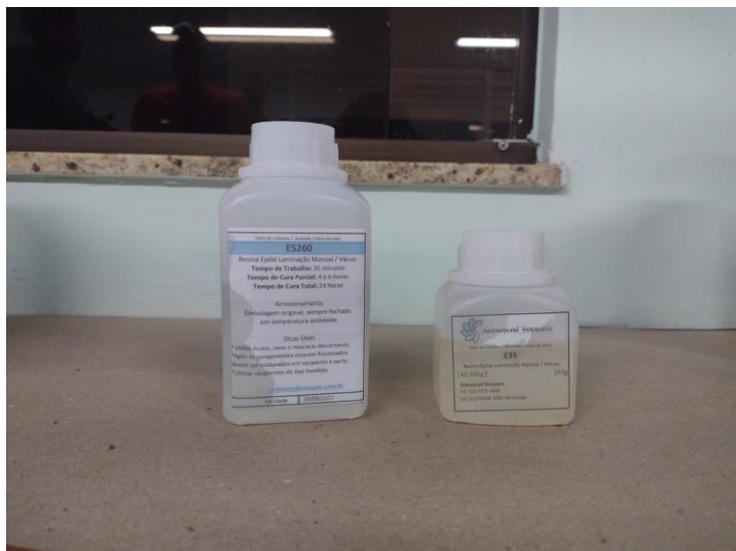
Fonte: (Hanovo, 2012) - Adaptado

### 3.1.5 Resina epóxi

As resinas de base epóxi são as mais utilizadas para a fabricação dos compósitos aplicados na construção civil. Embora seu custo seja elevado, estas resinas apresentam excelentes propriedades mecânicas e elétricas, grande adesividade e, principalmente, possibilidade de cura à temperatura ambiente (GARCEZ, 2017).

Nesse trabalho foi utilizado a resina epóxi de laminação manual ES260 da marca Advanced Vacuum®. Para sua utilização é necessário a mistura do componente A (resina), com o componente B (endurecedor). Ambos estão apresentados na Figura 12.

**Figura 12 - Resina Epóxi de Laminação**



Fonte: Autor, 2022.

Os dados da Resina Epóxi de Laminação estão expostos no Quadro 3, tais dados foram fornecidos pela empresa Advanced Vacuum®.

**Quadro 3 – Dados técnicos da resina epóxi de laminação**

<b>DADOS TÉCNICOS</b>	
Forma física	Líquida
Cor [Gardner]	≤ 2
Densidade a 20°C	1.17 g/cm <sup>3</sup>
Viscosidade a 25°C	11000-16000 MPa
Proporção endurecedor E35	100g – 45g
Tempo de trabalho (Gel Time)	35 minutos
Tempo de cura parcial	4 - 6 horas
Tempo de cura total	24 horas

**Fonte: Advanced Vacuum, 2015.**

## 3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste tópico serão abordados os ensaios realizados no laboratório da UniEVANGÉLICA, em Anápolis-GO. A confecção dos corpos de prova, aplicação da fibra de carbono nos corpos de prova e o ensaio de compressão também serão abordados nesse item.

### 3.2.1 Definição dos traços do concreto

Neste trabalho utilizou-se de dois tipos de traços diferentes, sendo o primeiro traço de 1:3,2:3,8:0,78, ou seja, 1 medida de cimento por 3,2 partes de areia, 3,8 partes de brita e 0,78 de água, desejando assim atingir um fck de 25MPa. No segundo traço utilizado para confecção do concreto foi de 1:2,2:3,2:0,6, ou seja, 1 medida de cimento por 2,2 partes de areia, 3,2 partes de brita e 0,6 partes de água, sendo o fck desejado de 25MPa. Todas as medidas com base em um saco de 50Kg de cimento.

### 3.2.2 Confecção dos corpos de prova

Segundo a NBR 5738 (ABNT, 2015) os moldes dos corpos de prova devem ter altura igual ao dobro do diâmetro, e o diâmetro deve ser de 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm ou 45

cm. Foram confeccionados 8 corpos de prova com o primeiro traço feito e mais 10 corpos de prova com o segundo traço, com moldes cilíndricos de 10cm de diâmetro com 20cm de altura.

Para a mistura do concreto, utilizou-se de uma betoneira de eixo inclinado, como pode ser observada na Figura 13.

**Figura 13 – Betoneira utilizada para mistura do concreto**



**Fonte: Autor, 2022.**

Foi feita a mistura do cimento, brita, areia e água na betoneira, o concreto foi colocado nos moldes em duas camadas com 12 golpes por camada com o adensamento manual, conforme descreve a NBR 5738 (ABNT, 2015) procedimentos para moldagem e cura de corpo de prova. Essa norma determina que os corpos de prova devem ficar armazenados em câmara úmida até o tempo de cura para a realização dos ensaios. A norma também especifica que antes de proceder à moldagem dos corpos de prova, os moldes devem ser convenientemente revestidos internamente com uma fina camada de óleo mineral ou outro lubrificante que não reaja com o cimento para ajudar na hora do desmolde. A Figura 14 demonstra o processo de adensamento manual realizado.

**Figura 14 - Adensamento manual dos corpos de prova**



**Fonte: Autor, 2022.**

### **3.2.3 Aplicação da fibra de carbono nos corpos de prova**

Passados os 28 dias na câmara úmida, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida e levados para local arejado com o objetivo para a secagem do concreto para a aplicação do compósito de fibra de carbono. Para a aplicação da manta de fibra de carbono, foi necessário conferir se a superfície dos corpos de prova se encontrava seca e sem umidade.

Após a secagem e limpeza dos corpos de prova, foi preparada a mistura de resina epóxi com o endurecedor. Com um pincel é feita a aplicação da resina na lateral do corpo de prova, depois é feita a aplicação da manta de fibra de carbono no corpo de prova como mostrado na Figura 15.

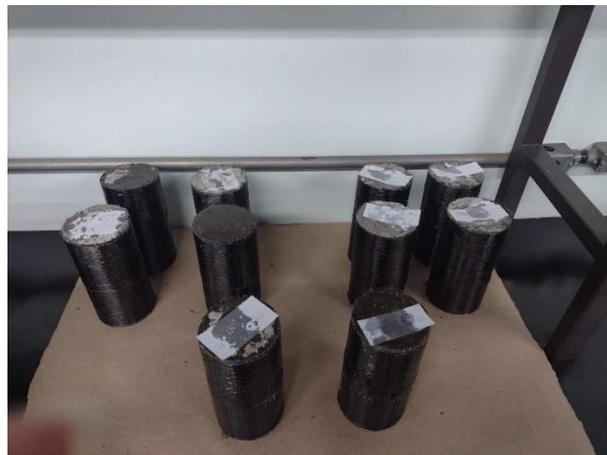
**Figura 15 - Aplicação da fibra de carbono no corpo de prova**



**Fonte: Autor, 2022.**

Depois da aplicação da fibra de carbono foi feita a aplicação da resina epóxi sobre a fibra não aplicando em excesso, pois poderá prejudicar o papel da fibra, essa camada final tem como objetivo garantir um melhor acabamento e proteção. Após a aplicação deve-se esperar o tempo de cura total, que de acordo com o fabricante da resina é de 24 horas, para assim realizar o rompimento dos corpos de prova. A Figura 16 ilustra os corpos de provas revestidos com a fibra de carbono.

**Figura 16 - Corpos de prova após a aplicação da fibra de carbono**



Fonte: Autor, 2022.

### 3.3 ROMPIMENTO DOS CORPOS DE PROVA

O ensaio de compressão dos corpos de prova devem seguir de acordo com a ABNT NBR 5739:2018. Nela está disposto que os corpos de prova devem ser rompidos à compressão em uma dada idade especificada, com as tolerâncias de tempo descritas na Tabela 3.

**Tabela 3 - Tolerância para a idade de ensaio**

<b>Idade de ensaio</b>	<b>Tolerância permitida (h)</b>
24 h	0,5
3 d	2
7 d	6
28 d	24
36 d	36
91 d	48

Fonte: NBR 5739, 2018

Conforme descrito na NBR 5739 (ABNT, 2018):

- Antes de iniciar o ensaio, as faces dos pratos e do corpo de prova ou testemunho devem ser limpas e secas, antes destes serem colocados em posição de ensaio. O corpo de prova ou testemunho deve ser cuidadosamente centralizado no prato inferior, com o auxílio dos círculos concêntricos de referência, observando-se o sentido de moldagem. Quando o topo e a base dos corpos de prova forem submetidos a desgaste por abrasão, indicar a orientação de moldagem do corpo de prova de forma inequívoca.
- O carregamento de ensaio deve ser aplicado continuamente e sem choques, com a velocidade de carregamento de  $(0,45 \pm 0,15)$  MPa/s. A velocidade de carregamento deve ser mantida constante durante todo o ensaio.
- O carregamento só deve cessar quando houver uma queda de força que indique a ruptura.

De acordo com a NBR 5739:2018, a resistência do concreto testado à compressão é dada pela seguinte fórmula:

$$f_c = \frac{4F}{\pi \times D^2} \quad (1)$$

Onde:

$f_c$  = é a resistência à compressão, expressa em megapascals (MPa);

F = é a força máxima alcançada, expressa em newtons (N);

D = é o diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

Caso ocorra de os corpos de prova com relação h/d menor do que 1,94, se faz necessário multiplicar a força F pelo fator de correção correspondente ao h/d encontrado, conforme a Tabela 4.

**Tabela 4 - Fator de correção h/d**

<b>Relação h/d</b>	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00
<b>Fator de correção</b>	1,00	0,98	0,96	0,93	0,86

Fonte: NBR 5739, 2018.

A resistência à compressão dos corpos de prova deve apresentar seus resultados em megapascals (MPa), com três algarismos significativos.

### 3.3.1 Rompimento dos grupos 1 e 3

Os grupos 1 e 3 consistem nos corpos de prova sem o revestimento da fibra de carbono, afim de analisar seu comportamento, aplicou-se uma carga axial de compressão na prensa hidráulica, para que se possa observar a carga que eles resistirão até a sua ruptura. A Figura 17 ilustra o corpo de prova sem revestimento na prensa hidráulica.

**Figura 17 - Ruptura do corpo de prova sem fibra de carbono**



**Fonte: Autor, 2022.**

### 3.3.2 Rompimento dos grupos 2 e 4

Os grupos 2 e 4 consistem nos corpos de prova com uma camada de revestimento da fibra de carbono, afim de analisar seu comportamento, aplicou-se uma carga axial de compressão na prensa hidráulica, para que se possa observar a carga que eles resistirão até a sua ruptura. A Figura 18 ilustra o corpo de prova com revestimento na prensa hidráulica.

**Figura 18 - Ruptura de corpo de prova com uma camada fibra de carbono**



Fonte: Autor, 2022.

### **3.3.3 Rompimento do grupo 5**

O grupo 5 consiste nos corpos de prova com duas camadas de revestimento da fibra de carbono, afim de analisar seu comportamento, aplicou-se uma carga axial de compressão na prensa hidráulica, para que se possa observar a carga que eles resistirão até a sua ruptura. A Figura 19 ilustra o corpo de prova com duas camadas de revestimento na prensa hidráulica.

**Figura 19 - Ruptura de corpo de prova com duas camada fibra de carbono**



Fonte: Autor, 2022.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos com o rompimento dos corpos de prova, através da metodologia descrita anteriormente.

### 4.1 RESULTADO DOS ROMPIMENTOS DOS CORPOS DE PROVA

#### 4.1.1 Rompimento do grupo 1

No rompimento do grupo 1, quatro corpos de prova foram rompidos com o primeiro traço de concreto, de modo a encontrar a resistência a compressão do concreto utilizado sem o reforço da fibra de carbono. Os resultados obtidos estarão expostos na Tabela 5, esse grupo obteve uma resistência média de 11,2 MPa.

**Tabela 5 - Resultado do ensaio à compressão do grupo 1**

<b>ID</b>	<b>Tensão de Ruptura (MPa)</b>	<b>Carga Ruptura (kgf)</b>
1	11,0	8.800
2	11,5	9.190
3	11,1	8.890
4	11,2	8.960

Fonte: Autor, 2022.

#### 4.1.2 Rompimento do grupo 2

No rompimento do grupo 2, quatro corpos de prova foram rompidos com o primeiro traço de concreto, de modo a encontrar a resistência a compressão do concreto utilizado com uma camada de reforço da fibra de carbono. Os resultados obtidos estarão expostos na Tabela 6, esse grupo obteve uma resistência média de 23,6 MPa.

**Tabela 6 - Resultado do ensaio à compressão do grupo 2**

<b>ID</b>	<b>Tensão de Ruptura (MPa)</b>	<b>Carga Ruptura (kgf)</b>
5	26,6	23.680
6	26,8	21.460
7	22,00	17.580
8	19,00	15.240

Fonte: Autor, 2022.

#### 4.1.3 Rompimento do grupo 3

No rompimento do grupo 3, quatro corpos de prova foram rompidos com o segundo traço de concreto, de modo a encontrar a resistência a compressão do concreto utilizado sem o reforço da fibra de carbono. Os resultados obtidos estarão expostos na Tabela 7, esse grupo obteve uma resistência média de 14,2 MPa.

**Tabela 7 - Resultado do ensaio à compressão do grupo 3**

<b>ID</b>	<b>Tensão de Ruptura (MPa)</b>	<b>Carga Ruptura (kgf)</b>
9	13,2	10.570
10	15,00	11.990
11	13,8	11.040
12	14,7	11.810

Fonte: Autor, 2022.

#### 4.1.4 Rompimento do grupo 4

No rompimento do grupo 4, quatro corpos de prova foram rompidos com o segundo traço de concreto, de modo a encontrar a resistência a compressão do concreto utilizado com uma camada de reforço da fibra de carbono. Os resultados obtidos estarão expostos na Tabela 8, esse grupo obteve uma resistência média de 29,0 MPa.

**Tabela 8 - Resultado do ensaio à compressão do grupo 4**

<b>ID</b>	<b>Tensão de Ruptura (MPa)</b>	<b>Carga Ruptura (kgf)</b>
13	31,6	25.270
14	29,1	23.270
15	27,3	21.880
15	28,2	22.880

**Fonte: Autor, 2022.**

#### **4.1.5 Rompimento do grupo 5**

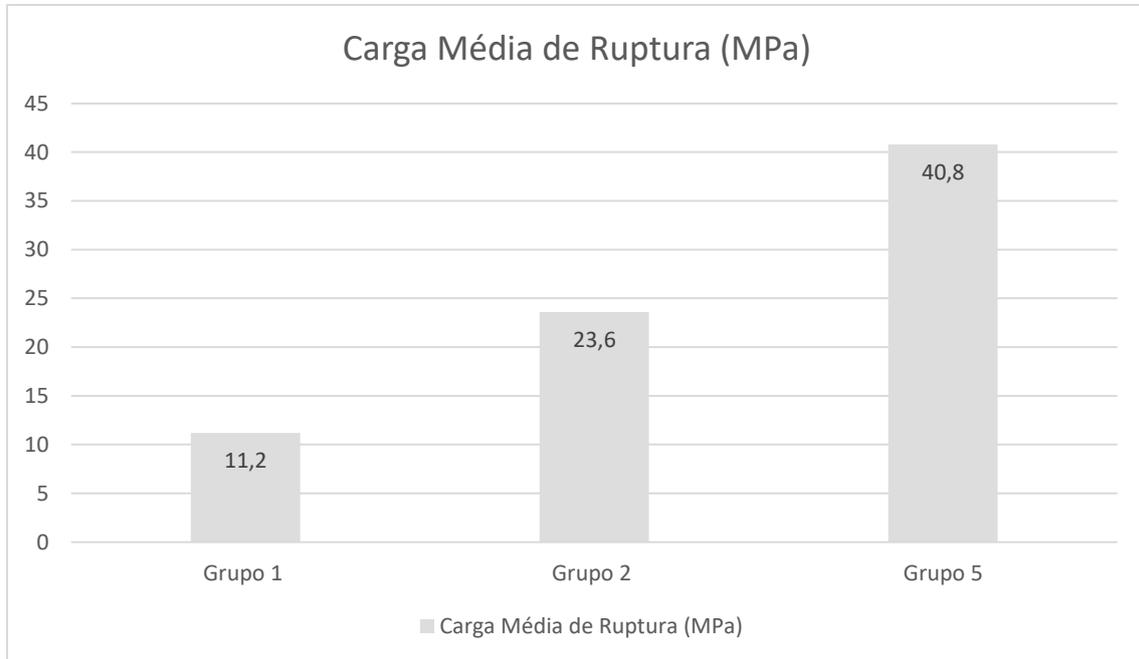
No rompimento do grupo 5, dois corpos de prova foram rompidos com o primeiro traço de concreto, de modo a encontrar a resistência a compressão do concreto utilizado com duas camadas de reforço da fibra de carbono. Os resultados obtidos estarão expostos na Tabela 9, esse grupo obteve uma resistência média de 40,8 MPa.

**Tabela 9 - Resultado do ensaio à compressão do grupo 5**

<b>ID</b>	<b>Tensão de Ruptura (MPa)</b>	<b>Carga Ruptura (kgf)</b>
16	44,5	35.650
17	37,2	29.780

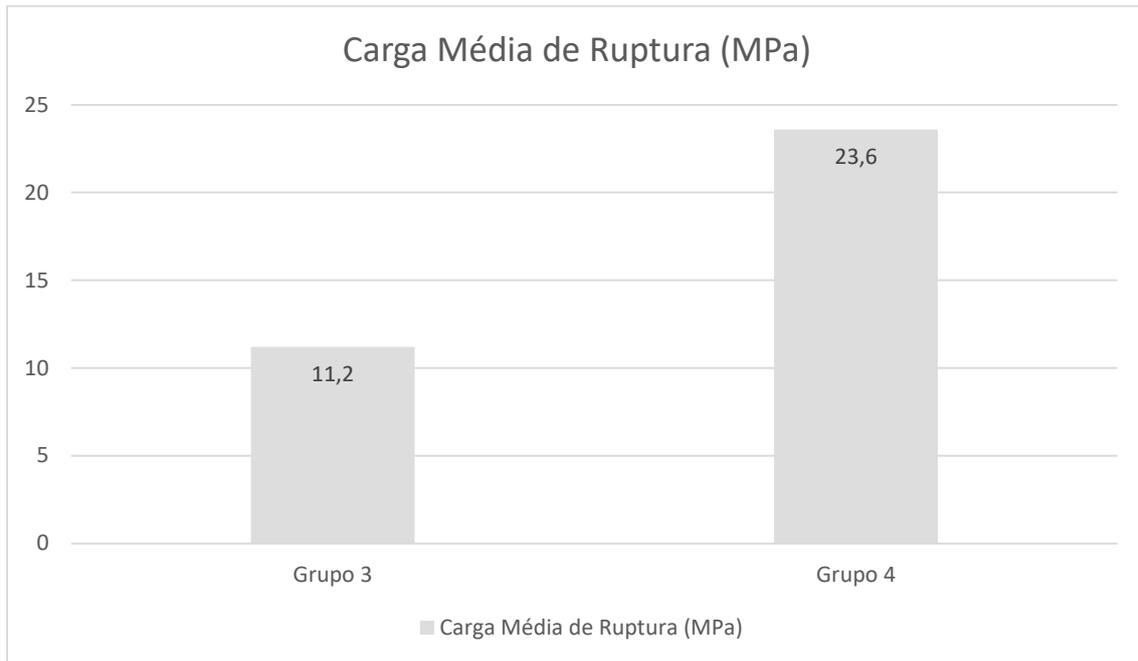
**Fonte: Autor, 2022.**

O Gráfico 3 expressa a média dos resultados obtidos nos grupos 1 (que foi feito com o 1° traço de concreto sem reforço estrutural), 2 (que foi feito com o 1° traço de concreto e com uma camada de reforço estrutural) e 5 (que foi feito com o 1° traço de concreto e com duas camadas de reforço estrutural), demonstrados das Tabelas 5, 6 e 9, para uma melhor visualização da carga média de ruptura desses grupos.

**Gráfico 3 - Média dos resultados obtidos nos grupos 1, 2 e 5.**

**Fonte: Autor, 2022.**

O Gráfico 4 expressa a média dos resultados obtidos nos grupos 3 (que foi feito com o 2º traço de concreto sem reforço estrutural), e 4 (que foi feito com o 2º traço de concreto e com uma camada de reforço estrutural), demonstrados das Tabelas 7 e 8, para uma melhor visualização da carga média de ruptura desses grupos.

**Gráfico 4 - Média dos resultados obtidos nos grupos 3 e 4.**

## 5 CONCLUSÃO

Com o rápido avanço da engenharia civil, cada vez mais nítido fica que os métodos de construção criados estão mais rápidos, eficazes e econômicos para realização de alguma atividade, na área de reforço e recuperação de estruturas os tecidos de fibra de carbono vêm ganhando espaço em comparação aos outros tipos mais convencionais de reforço estrutural utilizados atualmente devido aos seus benefícios, como fácil manejo, aplicação rápida e prática, e o mais importante é sua eficácia em termos estruturais.

Esse trabalho teve como objetivo a análise da fibra de carbono como reforço estrutural em corpos de prova e sua eficácia no aumento da resistência a compressão, com dois tipos de traços de concreto diferentes sem reforço, com uma camada e duas camadas da fibra de carbono.

Analisando os resultados obtidos dos grupos 1 e 2, pode-se observar que os corpos de prova fabricados com o primeiro traço, no rompimento obtiveram uma média de resistência de 11,2 MPa, o mesmo traço com uma camada da manta de fibra de carbono obteve uma média de resistência de 23,6 MPa, notou-se um ganho de 111% em sua resistência a compressão em relação ao corpo de prova sem a fibra de carbono.

Com os resultados obtidos dos grupos 3 e 4, foi possível observar que os corpos de prova fabricados com o segundo traço, no rompimento obtiveram uma média de resistência de 14,2 MPa, o mesmo traço com uma camada da manta de fibra de carbono obteve uma média de resistência de 29,0 MPa, notou-se um ganho de 105% em sua resistência à compressão em relação ao corpo de prova sem a fibra de carbono.

E por fim, ao analisar os resultados obtidos dos grupos 1 e 5, pode-se observar que os corpos de prova fabricados com o primeiro traço, no rompimento obtiveram uma média de resistência de 11,2 MPa, o mesmo traço com duas camadas da manta de fibra de carbono obteve uma média de resistência de 40,8 MPa, sendo um ganho de 264% em sua resistência à compressão em relação ao corpo de prova sem a fibra de carbono.

A diferença do ganho de resistência dos corpos de prova com e sem a fibra foi muito visível, ainda mais na comparação com os corpos de provas com duas camadas da fibra. Assim o uso da fibra de carbono como reforço para combater a compressão permitiu ganhos significativos na capacidade de carga do elemento de concreto.

Conclui-se que, depois de analisados todos os dados, conseguiu-se realizar o objetivo proposto inicialmente que era verificar o ganho de resistência à compressão das peças de concreto, e que a aplicação da fibra de carbono é um método eficaz no reforço de peças estruturais, ainda assim é indicado novas pesquisas para se ter um melhor entendimento, maneiras distintas de aplicação, tipos diferentes de resinas e números de camadas a serem aplicadas.

Como sugestão de trabalhos futuros, propõem-se pesquisas frente a maneiras distintas como da apresentada, ensaios com outros tipos de fibras em conjunto com um comparativo econômico da utilização de cada fibra, ou estruturas reforçadas com mantas bidimensionais.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 440R-96- “*Stat e – of – the – art Report on Fiber Reinforced Plastic Reinforcement for Concrete Structures*”, ACI, USA, 1996.

ARAÚJO, C. M. **Reforço de Vigas de Concreto à Flexão e ao Cisalhamento com Tecidos de Fibra de Carbono**. 2002. 140p. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro: Moderna, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro: Moderna, 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para o concreto - Especificação**. Rio de Janeiro: Moderna, 2005.

BASTOS, P. S. S. **Fundamentos do Concreto Armado. Notas de aula**. UNESP. Bauru, São Paulo, 2006. 98 p.

BEBER, A. J. **Avaliação do desempenho de vigas de concreto armado reforçadas com lâminas de fibra de carbono**. Porto Alegre: CPGEC/UFRGS, 1999. 108p. Dissertação de Mestrado em Engenharia.

BEBER, A. J. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono**. 2003. 289 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

BOTELHO, Manoel Henrique Campos; MARCHETTI, Osvaldemar. **Concreto armado eu te amo**. 9. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 2018.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**: Segundo a NBR 6118:2014. 4. ed. São Carlos: Edufscar, 2014.

CARVALHO, R. F. **Compósitos de fibras de sisal para uso em reforço de estruturas de madeira**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

CONTAMINE, R. **Estudo do comportamento mecânico de compósitos cimento-têxteis: Aplicação na reparação e/ou reforço de vigas em concreto armado submetidas a esforços cisalhantes**. 2011. Tese (Doutorado) - Universidade de Lyon. Lyon, 2011.

DYER, THOMAS. **A durabilidade do concreto**. Rio de Janeiro, Editora Ciência Moderna, p. 536, 2015.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BETÓN. *Structural Concrete: Textbook on behavior, design and performance*. Lausanne, 2010.

GABARDO, B. P. **DESEMPENHO DE CONCRETO COM REFORÇO DE TECIDO DE FIBRA DE CARBONO**. 2019. 69 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina., Joinville, 2019.

GARCEZ, M. R. **Alternativas para Melhoria no Desempenho de Estruturas de Concreto Armado Reforçadas pela Colagem de Polímeros Reforçados com Fibras**. 2007. 241 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

GARCEZ, Mônica Regina. **Alternativas para Melhoria no Desempenho de Estruturas de Concreto Armado Reforçadas pela Colagem de Polímeros Reforçados com Fibras**. 2017. 241 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

HANCOX, N. L. & MAYER, R. M. *Design Data for Reinforced Plastics*. London: Chapman & Hall, 1994. 326p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE CONCRETO (IBRACON). *CONCRETO & CONSTRUÇÕES*. São Paulo: IBRACON, v. 53, jan/mar. 2009.

INTELLIGENT SENSING FOR INNOVATIVE STRUCTURES. *ISIS Educational Modules about FRP*. Winnipeg: ISIS, 2003. ISIS Educational Modules 1 to 4– Intelligent Sensing For Innovative Structures, 2003.

JONES, R. *Mechanics of composite materials*. Washington: Scripta Book, 1975.

JUVANDES, L. **Aplicações de compósitos FRP no reforço de estruturas**. In: Simpósio de materiais de construção, FEUP, Porto, 2001.

JUVANDES, L. F. P. **Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando matérias compósitas de “CFRP”**. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, 1999. 302 p. Tese de Doutorado em Engenharia.

MACHADO, A. de P. **Fibras de Carbono – Manual Prático de Dimensionamento**. Edição BASF, 2006.

MACHADO, A. de P.; **Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono / Ari de Paula Machado**. São Paulo: Editora Pini Ltda., 2002. 282 p.

MACHADO, M. G. **Estudo experimental da ductilidade de vigas em concreto armado reforçadas à flexão utilizando compósitos com tecidos de fibras de carbono**. Dissertação de Mestrado, 301p. Puc-Rio, Rio de Janeiro, 2004.

NANNI, A. *Composites: Coming on Strong*. Concrete Construction, Miami, v.44, n. 3, p.120, Jul-Ago. 1999.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

PEDROSO, S. P. *et al.* **Steel frame na construção civil**. ECCI-12º Encontro Científico Cultural Interinstitucional. Paraná, 2014.

PINTO, Cristina Travessa Martins Pereira. **Reforço à Flexão de Vigas de Concreto com Fibras de Carbono**. 2000. 142p. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2000. Disponível em <<http://www.coc.ufrj.br/index.php/dissertacoes-de-mestrado/100-2000/1733-cristina-travessa-martins-pereira-pinto#download>>. Acesso em 26 de abril de 2022.

Prado, V. J. S., 2009, “*Molding of Composites by the Resin Infusion Process: Property Correlation*”, MSc. Thesis, Technology Institute of Aeronautics, São José dos Campos, SP.

RIGAZZO, A. O. **Reforço em pilares de concreto armado por cintamento externo com mantas flexíveis de fibras de carbono**. Campinas, 2003.

SANTOS, G. S. **APLICAÇÃO DE MANTAS DE POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRA DE CARBONO (PRFC) COMO REFORÇO À PUNÇÃO EM LAJES LISAS DE CONCRETO ARMADO**. 2014. 190 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

SCHWARTZ, M. M. **Composite materials handbook**. New York: McGraw-Hill, 1984.

SILVA, A. B. da; MACIEL, J. C. S. **Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. IGAPÓ, Amazonas, v. 1, p.109-114, 2009.

SILVA, E. A. da. **TÉCNICAS DE RECUPERAÇÃO E REFORÇO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**. 2006. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2006.

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

TAYLOR, G. **Material in construction**. 2.ed. London: Longman Scientific & Technical, 1994. P. 284.

TEODORO, Sabrina Bastos. **Avaliação do uso da areia de britagem na composição do concreto estrutural**. 2013. 65 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2013.

VOTORAN. **Cimento**. 2007. Figuras ilustrativas. Disponível em: <<http://www.solotest.com.br/solotest/solotest.asp>>. Acesso em abril. 2022.