

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

**BIANCA PAOLA GABARDO**

**DESEMPENHO DE CONCRETO COM REFORÇO DE TECIDO DE FIBRA DE  
CARBONO**

Joinville

2019

BIANCA PAOLA GABARDO

**DESEMPENHO DE CONCRETO COM REFORÇO DE TECIDO DE FIBRA DE  
CARBONO**

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientadora: Prof. Msc. Valéria Bennack.

Joinville

2019

**DESEMPENHO DE CONCRETO COM REFORÇO DE TECIDO DE FIBRA DE  
CARBONO**

BIANCA PAOLA GABARDO

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville (SC), 05 de julho de 2019.

Banca Examinadora:

---

Prof.<sup>a</sup> Valéria Benack, Msc.

Orientadora

Universidade Federal de Santa Catarina

---

Eng. Joece Nascimento

Membro da banca

BRASCOLA LTDA.

---

Eng. Alex Sandro Rigo

Membro da banca

Arteris Litoral Sul

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a quem me abriu todas as portas, me deu serenidade, força, e em 2015 me colocou no lugar certo para o início dessa pesquisa. Meu esforço não seria nada sem Ele.

Agradeço aos meus pais, Romano e Claudia, por terem dado todo o suporte ao longo da minha vida acadêmica, por compreenderem e ajudarem nas minhas dificuldades, por comemorarem as minhas conquistas e por me guiarem pelo caminho certo, me ensinando a ser honesta, íntegra e a sempre correr atrás dos meus sonhos. A universidade nem sempre é um mar de rosas, e quando a gravidade estava muito pesada, foram vocês que me seguraram. A vocês, todo o meu amor e minha gratidão.

Aos meus irmãos, Romano, Arthur e Jaqueline, por serem meu porto seguro. Eles que me fizeram rir nas horas mais difíceis, me deram força para superar os desafios, acreditaram em mim e garantiram que nunca houvesse distância entre nós. Um por todos e todos por um!

À minha orientadora, professora e amiga Valéria Bennack, sempre tão presente, que abraçou a pesquisa, me acalmou e foi meu suporte principalmente nesses meses finais da graduação.

À Barbara Marcucci Sansonio, Giovanna Spada Redivo e Maria Eugênia Reinke, que ingressaram na engenharia comigo. Obrigada por dividirem essa fase tão boa da vida comigo, pelo conforto da companhia de vocês e por permanecerem sempre ao meu lado, independentemente de onde.

Aos meus amigos Gabriela Heinzen, Aline Achy, Rubia Meer, Letícia Schwabe, Felipe Souza, Gustavo Ramos e Geandle Fagundes por toda a parceria ao longo desses últimos anos. Vocês me ensinaram a enxergar o lado bom das coisas, transformaram esse caminho árduo em uma viagem repleta de felicidade e me fizeram uma engenheira mais humana. Quem tem amigos tem tudo, e sou eternamente grata por vocês.

À equipe da Arteris Litoral Sul, que não hesitou em ceder o laboratório e os equipamentos necessários para a execução da pesquisa. Um obrigado especial ao Gustavo e ao Fernando, que me ajudaram e acompanharam todas as etapas de perto. Esse trabalho é de vocês também!

Agradeço às empresas Texiglass e Brascola, que acreditam no poder do ensino e do desenvolvimento de pesquisas científicas na universidade. Sem os materiais doados por vocês, não teria sido possível realizar este trabalho. Obrigada!

Não poderia deixar de agradecer à UFSC, por ter sido minha segunda casa durante todos esses anos, e aos professores que me lecionaram com tanta maestria, fazendo com que eu me apaixonasse cada dia mais pela profissão que eu escolhi. A vocês, todo o meu respeito e admiração.

Por último, um agradecimento especial à École Nationale d'Ingénieurs de Saint-Étienne (ENISE) e aos professores Amir Si Larbi e Zyed Mesticou, que me iniciaram no tema de materiais compósitos há 4 anos e inspiraram a ideia dessa pesquisa. Je vous remercie énormément.

## RESUMO

A vida útil de uma estrutura de concreto é afetada de diversas maneiras. O nível de solicitações inicialmente previsto em projeto pode ser alterado, ou a estrutura pode sofrer a ação de agentes externos, reduzindo o desempenho estrutural do material, fazendo com que necessite de reforços ou reparos. Assim, o presente estudo aborda aspectos teóricos e experimentais da aplicação de tecido de fibra de carbono como reforço em estruturas de concreto. O reforço foi realizado com tecido unidirecional de fibra de carbono juntamente com adesivo de resina epóxi, com o intuito de testar o desempenho do concreto reforçado quando submetido à tração na flexão. Essa pesquisa está fundamentada em Beber (2003), Couto (2007), Contamine (2011), entre outros autores. A investigação teve como objetivo analisar de que forma o material compósito contribui para o aumento de resistência à tração em uma estrutura de concreto. A fim de simular o comportamento real, alguns dos corpos de prova foram submetidos ao equipamento de flexão a uma pré carga inferior à carga de ruptura. Após esta pré carga, alguns corpos de prova receberam uma camada do adesivo de resina epóxi junto com uma camada de tecido de fibra de carbono, finalizada com outra camada de resina. O restante dos corpos de prova recebeu duas camadas de tecido intercaladas por camadas de resina. Este trabalho revelou que o reforço feito em uma camada aumentou em cerca de 50% a resistência à tração na flexão do concreto em relação aos corpos de prova referência e, em duas camadas, esse aumento foi de aproximadamente 80%. Notou-se, também, que o pré carregamento realizado em alguns CPs não gerou interferência no desempenho do reforço.

**Palavras-chave:** Reforço estrutural. Concreto. Fibra de carbono. Tração na flexão.

## ABSTRACT

The useful life of a concrete structure is affected by several ways. The level of requests initially foreseen in the project can be changed, or the structure can be affected by the action of external agents, reducing the structural performance of the material, requiring the application of reinforcements or repairs. Therefore, the present work approaches theoretical and experimental aspects of the application of carbon fiber fabric as reinforcement in concrete structures. The reinforcement was made with unidirectional fabric of carbon fiber with epoxy resin adhesive, in order to test the performance of the reinforced concrete when submitted to bending traction. This research is based on the works of Beber (2003), Couto (2007), Contamine (2011), among other authors. The goal of this research was to analyze how the composite material contributes to the increase of tensile strength in a concrete structure. In order to simulate the actual behavior of the material, some of the specimens were submitted to the bending equipment at a preload, lower than the bursting load. After the preload, some specimens received a layer of the epoxy resin adhesive along with a layer of carbon fiber fabric, finished with another layer of resin. The remainder of the specimens received two layers of tissue interspersed with layers of resin. This research showed that the one-layer reinforcement increased the tensile strength in the flexion of concrete by 50% when compared to the reference specimens and that, with a two-layer reinforcement, this increase was of approximately 80%. It was also noted that the preloading performed on some specimens did not interfere with the reinforcement performance.

**Keywords:** Structural reinforcement. Concrete. Carbon fiber. Bending traction.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Agregados graúdos.....  | 19 |
| Figura 2 - Agregados miúdos: areia grossa e média.....   | 20 |
| Figura 3 - Detalhe da armadura de uma viga.....  | 21 |
| Figura 4 – Fibra de vidro em forma de fio, manta ou tecido, respectivamente.....   | 23 |
| Figura 5 – Malha 3D de fibra de aramida.....   | 24 |
| Figura 6 – Fibra de Basalto .....  | 25 |
| Figura 7 – Manta de Fibra de Carbono.....  | 26 |
| Figura 8 – Fixação de chapa metálica .....   | 28 |
| Figura 9 – Reforço com chapa metálica e fixação com resina .....   | 29 |
| Figura 10 – Reforço com chapa metálica e fixação com aplicação de resina em furos .....  | 29 |
| Figura 11 – Escoramento do reforço com chapas metálicas .....  | 30 |
| Figura 12 – Representação esquemática de uma viga protendida externamente .....  | 31 |
| Figura 13 – Passarela protendida em utilização. ....   | 31 |
| Figura 14 – Reforço de pilar por encamisamento .....   | 32 |
| Figura 15 – Reforço de vigas por meio da altura $h$ .....  | 33 |
| Figura 16 – Corpos de prova de concreto pós-rompidos por compressão diametral a) com fibras e b) sem fibras de polipropileno. .... | 34 |
| Figura 17 – Barras de GFRP com ganchos.....  | 35 |
| Figura 18 – Detalhe do reforço de uma viga com TRC.....  | 37 |
| Figura 19 – Exemplos de aplicação externa do TRC em vigas retangulares e em vigas tipo T .....                                     | 37 |
| Figura 20 – Esquema representativo da combinação de fibras e matriz polimérica para formar o compósito FRP .....                   | 38 |
| Figura 21 – Detalhes do reforço de vigas e pilares com compósitos FRP .....  | 39 |
| Figura 22 – Diagrama tensão x deformação de distintos tipos de fibras, aço convencional e aço de protensão.....                    | 40 |
| Figura 23 – Definição dos grupos de Corpos de Prova .....  | 41 |
| Figura 24 – Fluxograma de materiais e métodos.....   | 41 |
| Figura 25 – Tecido de fibra de carbono utilizado como reforço .....  | 44 |
| Figura 26 – Adesivo a base de resina epóxi .....   | 46 |
| Figura 27 – Amostras de a) agregado miúdo e b) agregado graúdo.....  | 47 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 28 – Conjunto de peneiras utilizadas na caracterização granulométrica dos agregados .....                   | 48 |
| Figura 29 – Esquema do ensaio de tração na flexão.....   | 49 |
| Figura 30 – Formas dos corpos de prova.....  | 53 |
| Figura 31 – Etapas de concretagem dos corpos de prova.....   | 54 |
| Figura 32– Ensaio de tração na flexão.....   | 54 |
| Figura 33– Limpeza dos corpos de prova.....  | 56 |
| Figura 34 – Faixas do tecido de fibra de carbono.....  | 57 |
| Figura 35 – Preparação do adesivo de resina epóxi.....   | 57 |
| Figura 36 – Processo de reforço dos corpos de prova com tecido de fibra de carbono .....                           | 58 |
| Figura 37 – Reforço com duas camadas de tecido de fibra de carbono .....   | 59 |
| Figura 38 – Corpos de prova reforçados .....   | 59 |
| Figura 39 – Corpos de prova reforçados com uma camada de fibra de carbono após o ensaio de tração na flexão.....   | 60 |
| Figura 40 – Corpos de prova reforçados com duas camadas de fibra de carbono após o ensaio de tração na flexão..... | 61 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|  |    |
|--|----|
| Gráfico 1 – Tensão-deformação dos materiais suscetíveis à utilização em TRC .....  | 38 |
| Gráfico 2 – Curva granulométrica da areia média .....                              | 52 |
| Gráfico 3 – Curvas granulométricas de classificação de agregados graúdo .....      | 53 |
| Gráfico 4 – Resultados de tração na flexão dos Grupos 2 e 3 e o desvio padrão..... | 62 |

## LISTA DE QUADROS

|  |    |
|--|----|
| Quadro 1 – Tipos de fibras de vidro e suas propriedades.....         | 23 |
| Quadro 2 – Dados Técnicos da Cola Epóxi Premium.....                 | 46 |
| Quadro 3 – Resultados do ensaio de tração na flexão do Grupo 1 ..... | 55 |
| Quadro 4 – Cargas de pré carregamento do Grupo 2 .....               | 55 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Comparação das fibras de alto desempenho .....                        | 25 |
| Tabela 2 – Limites de composição do cimento Portland (porcentagem de massa)..... | 42 |
| Tabela 3 – Limites da distribuição granulométrica de agregados miúdos .....      | 43 |
| Tabela 4 – Propriedades das fibras de carbono .....                              | 44 |
| Tabela 5 – Ficha Técnica do Tecido de Fibra de Carbono .....                     | 45 |
| Tabela 6 – Resultados do ensaio de tração na flexão dos Grupos 2 e 3 .....       | 62 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|           |   |
|-----------|---|
| $f_{ctM}$ | Resistência à tração na flexão                      |
| $p$       | Carga máxima aplicada                               |
| $l$       | Distância entre cutelos de suporte                  |
| $b$       | Largura média do corpo de prova na seção de ruptura |
| $d$       | Altura média do corpo de prova, na seção de ruptura |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – American Concrete Institute

CP – Corpo de Prova

CP II-ZZ – Cimento Portland composto com material pozolânico

CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymer

FRP – Fiber Reinforced Polymer

GFRP – Glass Fibre Reinforced Polymer

IBRACON – Instituto Brasileiro de Concreto

ISIS – Intelligent Sensing For Innovative Structures

TRC – Textile Reinforced Polymer

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO.....</b>  | <b>15</b> |
| 1.1 OBJETIVOS .....   | 17        |
| <b>1.1.1 Objetivo Geral .....</b>   | <b>17</b> |
| <b>1.1.2 Objetivos Específicos .....</b>  | <b>17</b> |
| <b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>   | <b>18</b> |
| 2.1 ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO .....   | 18        |
| <b>2.1.1 Concreto armado.....</b>   | <b>18</b> |
| 2.1.1.1 Concreto .....  | 18        |
| 2.1.1.2 Aço .....   | 20        |
| 2.2 MATERIAIS COMPÓSITOS.....   | 21        |
| <b>2.2.1 Fibras de vidro .....</b>  | <b>22</b> |
| <b>2.2.2 Fibras de Aramida .....</b>  | <b>24</b> |
| <b>2.2.3 Fibras de basalto .....</b>  | <b>25</b> |
| <b>2.2.4 Fibras de carbono.....</b>   | <b>26</b> |
| 2.3 REFORÇO ESTRUTURAL EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO .....   | 27        |
| <b>2.3.1 Reforço Estrutural com colagem de chapas metálicas .....</b>   | <b>28</b> |
| <b>2.3.2 Reforço estrutural com protensão externa .....</b>   | <b>30</b> |
| <b>2.3.3 Reforço estrutural por aumento da seção transversal .....</b>  | <b>32</b> |
| 2.3.4.1 Reforço interno com fibras.....   | 33        |
| <b>2.3.4.1.1 Adição de fibras na matriz de concreto.....</b>  | <b>34</b> |
| <b>2.3.4.1.2 Barras de fibra impregnadas por polímero utilizadas como armadura não metálica</b><br><b>.....</b> | <b>35</b> |
| 2.3.4.2 Reforço externo com fibras .....  | 36        |
| <b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>  | <b>41</b> |
| 3.1 MATERIAIS .....   | 42        |
| <b>3.1.2 Areia Média.....</b>   | <b>42</b> |
| <b>3.1.3 Brita 0 .....</b>  | <b>43</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>3.1.4 Fibra de Carbono .....</b>                              | <b>43</b> |
| <b>3.1.5 Resina Epóxi.....</b>                                   | <b>45</b> |
| <b>3.2.1 Caracterização granulométrica dos agregados.....</b>    | <b>47</b> |
| <b>3.2.2 Definição do traço do concreto .....</b>                | <b>48</b> |
| <b>3.2.3 Confeção dos Corpos de Prova .....</b>                  | <b>48</b> |
| <b>3.2.4 Rompimento do Grupo 1 .....</b>                         | <b>49</b> |
| <b>3.2.5 Pré carregamento do Grupo 2.....</b>                    | <b>50</b> |
| <b>3.2.6 Processo de reforço com fibra nos Grupos 1 e 2.....</b> | <b>50</b> |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>                            | <b>52</b> |
| <b>4.1 CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS .....</b>     | <b>52</b> |
| <b>4.2 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....</b>                   | <b>53</b> |
| <b>4.3 ROMPIMENTO DO GRUPO 1 .....</b>                           | <b>54</b> |
| <b>4.4 PRÉ CARREGAMENTO DO GRUPO 2 .....</b>                     | <b>55</b> |
| <b>4.5 PROCESSO DE REFORÇO COM FIBRA NOS GRUPOS 2 E 3.....</b>   | <b>56</b> |
| <b>4.6 ROMPIMENTO DOS CORPOS DE PROVA DOS GRUPOS 2 E 3.....</b>  | <b>60</b> |
| <b>5 CONCLUSÃO.....</b>  | <b>63</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>  | <b>65</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

As técnicas de construção civil atuais tiveram início há muito tempo. A invenção do concreto armado data do século XVII e, desde então, tornou-se o material construtivo mais utilizado do mundo, devido ao baixo custo de execução (comparado a estruturas metálicas); comportamento e propriedades conhecidos graças a diversos estudos realizados; e normas bem definidas (BOTELHO E MARCHETTI, 2018).

Desde 1849, quando Joseph- Louis Lambot utilizou o concreto reforçado com barras de aço para a construção de um barco, o concreto armado é quase indispensável na construção civil (GRAZIANO, 2005).

Bastos (2006) afirma que, apesar de ser um material construtivo com muitos benefícios, o concreto armado apresenta alguns aspectos negativos, como peso elevado e baixa esbeltez dos elementos estruturais. Além disso, quando o concreto ou a armadura estão patológicos, a estrutura fica comprometida. O aço depende apenas do cobrimento de concreto para que não haja contato com ar e água, o que pode causar carbonatação e corrosão da armadura, e que é agravado pelas fissuras e capilaridade dos elementos estruturais.

Por esses motivos, a inovação dos materiais é de grande importância e necessária para evitar problemas corriqueiros, além de testar novas tecnologias de construção (SILVA E MACIEL, 2009). Dentro desse cenário tecnológico, é destacado o uso de materiais compósitos, no intuito de melhorar o comportamento estrutural através de reforços nas estruturas de concreto armado.

A utilização de materiais compósitos com o concreto armado já é bastante estudada e utilizada na construção civil, principalmente como reforço de estruturas (CONTAMINE, 2011). Fibras de compósitos podem ser agregadas à matriz cimentícia do concreto, aumentando sua resistência à tração pelo retardo da propagação de fissuras, melhorando a tenacidade, a resistência ao impacto e a resistência à fadiga, além de reduzir a retração do concreto (NEVILLE *et al.*, 2013).

Em outra situação, os materiais compósitos podem ser utilizados como reforço externo de uma estrutura que precise aumentar sua resistência ou que apresente patologia. Para esse fim, é comum o uso do *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) e *Textile Reinforced Polymer* (TRC), constituídos por fibra de carbono, vidro ou aramida (GABARDO; LAZZARI, 2017). Para cada patologia existente na estrutura, é recomendado um tipo de fibra diferente, disposta de acordo com o dano causado no elemento estrutural (CONTAMINE, 2011).

Dentre as fibras supracitadas, optou-se, neste estudo, por utilizar as de carbono porque apresentam um módulo de elasticidade mais alto, compatível com as deformações do concreto armado. Além disso, fornecem propriedades mais altas que as demais. As fibras de vidro e de aramida, apesar de serem substancialmente mais baratas, não têm o mesmo desempenho, e as fibras de vidro não resistem ao ataque de materiais alcalinos (MANON, 2008). Em relação à matriz do compósito, a mais compatível com as fibras de carbono demonstrou ser a resina epóxi, pois se aglutina com as fibras, tem maior aderência e apresenta uma cura sem retração, o que é importante para o uso a que vai ser destinada (MANON, 2008).

Dessa forma, faz-se necessário testar e analisar o comportamento das estruturas em concreto reforçadas com fibra de carbono. A análise proposta neste trabalho, feita de forma experimental, consistiu em comparar os resultados de resistência à tração na flexão de corpos de prova de concreto que sofreram carregamentos, simulando uma estrutura em uso, reforçados com uma ou duas camadas de compósito de fibra de carbono e resina epóxi.

Tanto a fibra de carbono quanto o adesivo de resina epóxi foram doados para esses experimentos. A empresa TEXIGLASS, de São Paulo/SP, cedeu o tecido de fibra de carbono unidirecional e a empresa BRASCOLA, de Joinville/SC, doou a resina epóxi bicomponente de cura a frio. Ainda, toda a parte experimental do trabalho foi realizada no laboratório da Arteris Litoral Sul, em Joinville/SC.

Por fim, este trabalho visa apresentar as características dos materiais que vêm sendo utilizados como novas opções de reforço, analisando o desempenho da estrutura quando reforçada com tecido de fibra de carbono e resina epóxi e descrevendo como essa tecnologia construtiva afeta a estrutura.

Considerando o objetivo proposto para este estudo e as questões de investigação que o nortearam, este trabalho se organiza em 4 capítulos. No primeiro, é feita uma revisão bibliográfica sobre métodos de reforço em estruturas de concreto armado, materiais compósitos, estruturas de concreto armado, e são revisados outros trabalhos relacionados ao reforço estrutural com materiais compósitos.

O segundo capítulo detalha os materiais e métodos utilizados para a realização deste estudo. Já no terceiro capítulo são apresentados os resultados e discussões. E, por fim, o último capítulo traz as conclusões, ou seja, uma análise dos principais achados da pesquisa, buscando evidenciar aqueles que foram mais significativos. Ainda nesse item, deixam-se proposições para futuras pesquisas.

## 1.1 OBJETIVOS

Neste tópico serão propostos os objetivos, em âmbito geral e específico, da análise de estruturas submetidas à tração na flexão reforçadas com tecido unidirecional de fibra de carbono e resina epóxi.

### 1.1.1 Objetivo Geral

Analisar o desempenho à tração do concreto com reforço de tecido de fibra de carbono e resina epóxi.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Realizar o reforço dos corpos de prova utilizando resina epóxi e tecido bidimensional de fibra de carbono;
- b) Verificar a resistência de cada viga reforçada com compósito, comparando os corpos de prova pré-carregados com os sem carregamento, e as duplamente reforçadas com as vigas de uma só camada de reforço;
- c) Indicar o comportamento do concreto sujeito à tração na flexão após a utilização do tecido de fibra de carbono com resina epóxi como reforço externo.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo trazer as principais discussões teóricas a respeito dos métodos de reforço em estruturas de concreto armado, materiais compósitos, e apresentar estudos e pesquisas de relevância relacionadas ao reforço estrutural com materiais compósitos.

### 2.1 ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

#### 2.1.1 Concreto armado

De acordo com Barros (2006), o concreto é um material altamente resistente à compressão, porém apresenta baixa resistência à tração (cerca de 10% da sua resistência à compressão). Dessa forma, surgiu a necessidade de se aliar as qualidades do concreto com outro material com alta resistência à tração, como o aço. O composto de concreto e armadura, denominado de concreto armado, absorve tensões de tração através das barras de aço e resiste às tensões de compressão por meio do concreto.

Segundo a NBR 6118:2004, de Projeto de estruturas de concreto armado, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), os elementos de concreto armado são definidos como aqueles cujo comportamento estrutural depende da aderência entre concreto e armadura, e nos quais não se aplicam alongamentos iniciais das armaduras antes da materialização dessa aderência. O concreto armado é um material composto, constituído de cimento, água, agregado miúdo, agregado graúdo e armado com aço, podendo conter ou não adições.

##### 2.1.1.1 Concreto

O concreto é o material construtivo mais utilizado pelo homem. De acordo com o Instituto Brasileiro de Concreto – IBRACON (2009), a combinação de cimento, agregados graúdos e miúdos e água, depois de endurecida, tem uma resistência similar a das rochas naturais e, quando no estado fresco, é um composto plástico pois possibilita sua modelagem em formas e tamanhos variados.

Duas propriedades do concreto que o destacam como material construtivo são: resistência à água – diferente do aço e da madeira, o concreto sofre menor deterioração quando exposto à água, razão de sua utilização em estruturas de controle, armazenamento e transporte

de água – e sua plasticidade – que possibilita obter formas construtivas inusitadas, como se vê nas obras arquitetônicas (IBRACON, 2009).

Arnaldo Forti Battagin, chefe dos laboratórios da Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (2009), em entrevista para o IBRACON, ressalta que em termos de sustentabilidade, o concreto armado consome menos energia que o alumínio, o aço, o vidro e emite proporcionalmente menos gases e partículas poluentes.

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.

Figura 1 – Agregados graúdos

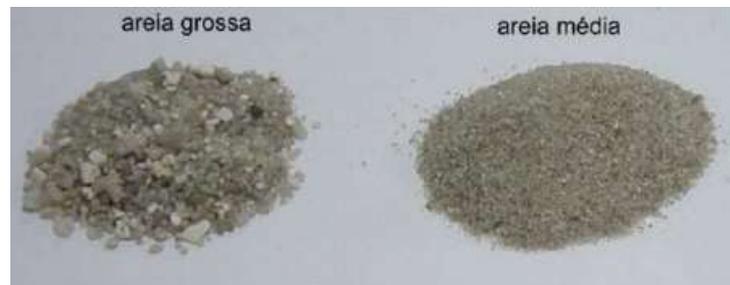


Fonte: VOTORAN (2007).

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.

Figura 2 - 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.

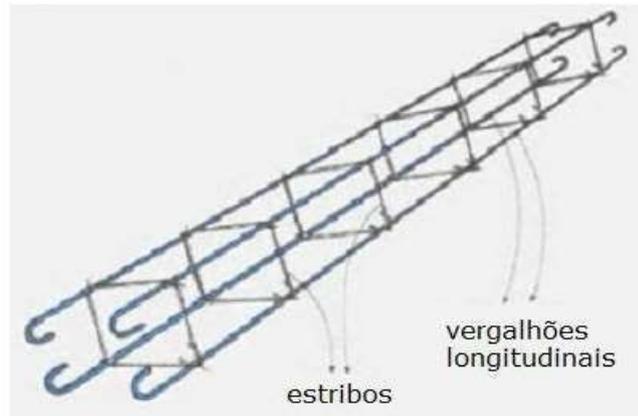
#### 2.1.1.2 Aço

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. Consequentemente, para aumentar a resistência da viga, é importante associar o concreto a um material que tenha boa resistência à tração e seja mais deformável.

A utilização do aço se tornou comum por atender às necessidades do concreto ao ser colocado longitudinalmente na região mais tracionada da peça (CARVALHO; FIGUEIREDO FILHO, 2014). Os autores ainda afirmam que concreto e aço deverão trabalhar solidariamente, o que é possível devido às forças de aderência entre a superfície do aço e concreto, já que a armadura tracionada só funciona quando a aderência dos materiais garante a deformação do aço junto com o concreto que o envolve, caracterizando o concreto armado como material estrutural.

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).

Em questões de dimensionamento, é importante que o projeto inclua, além do cálculo da área de armadura, o detalhamento de cobrimento das mesmas, o espaçamento entre as barras, o sistema de ancoragem e emendas, além dos ângulos de dobramento e curvatura (SOUZA; RIPPER, 2009).

## 2.2 MATERIAIS COMPÓSITOS

Com o decorrer do tempo, a tecnologia aplicada às construções se desenvolveu cada vez mais, refinando técnicas construtivas, variedade de materiais e programas informatizados que auxiliam cálculos e projetos de engenharia (JUVANDES, 1999).

Segundo o *Intelligent Sensing For Innovative Structures – ISIS* (2003), os compósitos são definidos como materiais criados pela combinação de dois ou mais materiais em uma escala macroscópica para formar um material novo e útil com propriedades aprimoradas que são superiores às dos constituintes individuais. Um dos materiais compósitos mais familiares é o concreto, uma mistura de pasta de cimento, areia e pedregulho (ISIS, 2003).

Os compósitos, que inicialmente foram desenvolvidos para aplicações na indústria aeroespacial, automotiva, naval, de equipamentos esportivos e armamentos, passam agora a

ocupar um lugar de destaque como alternativa viável no reforço de estruturas de concreto armado e protendido. Os materiais compósitos podem resolver uma série de problemas no âmbito da reabilitação estrutural, já que a combinação de fibras e polímeros permite que o elemento de reforço seja confeccionado para atender a uma solução particular, tanto em relação à sua geometria quanto às suas propriedades mecânicas (BEBER, 2003).

Dentre as principais virtudes dos compósitos, destacam-se a alta resistência, o baixo peso próprio, a grande durabilidade e a capacidade de assumir formas complexas (NORRIS *et al*, 1997 apud BEBER, 2003). Ainda segundo esse autor, a habilidade de conduzir a completa operação de reforço em períodos muito curtos de tempo, sem que seja necessário interromper completamente a utilização da estrutura, é a maior vantagem dos compósitos.

Vasconcelos (1994) aponta que, observando a natureza, o homem aprendeu que, no contexto de fibras, os fios extremamente finos alcançam resistências altas, e que o aumento da resistência nesses casos é proporcional quando se reduz a área. Bernardi (2003) também complementa que esse comportamento encontra base de explicação na teoria de defeitos, já que fios finos apresentam menores percentagens de defeitos, o que é de ocorrência natural em seções maiores. Nesse contexto, destaca-se a grande utilidade das fibras como material de reforço, visto que suas características se aplicam na definição de fios finos e, por isso, têm maior resistência e menor índice de defeitos (VASCONCELOS, 1994).

### **2.2.1 Fibras de vidro**

As fibras de vidro são largamente utilizadas para aplicações em engenharia civil, principalmente pela excelente relação custo de produção/propriedades mecânicas (ACI, 1996 apud BEBER, 2003).

Segundo Couto (2007), as fibras de vidro são consideradas as mais baratas quando comparadas com as fibras de carbono e aramida. Os tipos de fibra comercialmente disponíveis para o uso na construção civil são: Vidro-E, Vidro álcali resistente e Vidro-S, sendo que essas últimas caracterizam-se pela alta resistência e são amplamente utilizadas na indústria aeroespacial, porém, devido ao alto custo de produção, não são atraentes em aplicações na engenharia civil (BEBER, 2003). O quadro 1 apresenta os tipos de fibra de vidro e suas propriedades.

Quadro 1 – Tipos de fibras de vidro e suas propriedades

| Tipo de fibra | Principal aplicação  |
|---------------|--|
| <i>E</i>      | aplicações usuais, baixo conteúdo de álcalis(< 1%)                               |
| <i>A</i>      | elevado conteúdo de álcalis (10-15%)   |
| <i>C</i>      | excelente resistência à corrosão, utilizado para acabamento de superfícies       |
| <i>E-CR</i>   | livre de boro, boa resistência à corrosão por ácidos                             |
| <i>R, S</i>   | excelentes propriedades mecânicas, utilizados para aplicações de alto desempenho |
| <i>AR</i>     | resistente à ação de álcalis, empregado em concretos reforçados com fibras       |

Fonte: Beber (2003).

De acordo com a norma americana ACI (*American Concrete Institute*) 440 R/ (1996 apud COUTO, 2007), as fibras de vidro reagem com a água, possuem superfície muito ativa e podem ser facilmente danificadas durante o manuseio, logo, um filme protetor deve ser aplicado imediatamente após o processo de fabricação da fibra. Esse filme, além de proteger a fibra contra umidade, também é responsável por aumentar a adesão entre a fibra e a matriz.

Bernardi (2003) comenta que os compósitos de fibra de vidro possuem boas propriedades acústicas e térmicas, entretanto, deve-se salientar que muitas dessas propriedades são controladas pelos componentes da matriz.

A comercialização da fibra de vidro pode ser realizada em forma de fio, de manta ou de tecido, como mostra a figura 4. Porém, o tecido é o mais recomendado para reforços estruturais devido à maior resistência (*American Concrete Institute*, 1996).

Figura 4 – Fibra de vidro em forma de fio, manta ou tecido, respectivamente.



Fonte: *American Concrete Institute* (1996).

### 2.2.2 Fibras de Aramida

A mais popular das fibras orgânicas, a aramida, foi comercialmente introduzida pela *DuPont* em 1965, sendo em seguida aplicada na fabricação do Kevlar™, compósito utilizado na confecção de coletes à prova de balas e em outros materiais (JUVANDES *et al.*, 1996, apud BEBER, 2003).

Hollaway e Leeming (1999 apud BEBER, 2003) apontam que as fibras de aramida são resistentes ao fogo e apresentam excelente desempenho sob elevadas temperaturas, porém, a sua maior virtude é a tenacidade, que contribui para o excelente desempenho em situações de impacto de veículos e cargas.

Figura 5 – Malha 3D de fibra de aramida



Fonte: TKMCE (2017).

Segundo Salaverría *et al.* (1997 apud BERNARDI, 2003), as fibras de aramida não apresentam nenhuma resistência à compressão. Yang (1993) complementa que, com relação à tração, a aramida é proporcionalmente mais resistente que o aço e a fibra de vidro, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Comparação das fibras de alto desempenho

| Denominação | Diâmetro (µm) | Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) | Resistência (GPa) | Resistência específica (GPa) | Módulo (GPa) | Módulo específico (GPa) | Alongamento (%) |
|-------------|---------------|--------------------------------|-------------------|------------------------------|--------------|-------------------------|-----------------|
| Kevlar 29   | 12            | 1,43                           | 2,9               | 8,8                          | 70           | 2,1                     | 3,6             |
| Kevlar 49   | 12            | 1,45                           | 2,9               | 8,8                          | 135          | 3,6                     | 2,8             |
| Kevlar 119  | 12            | 1,44                           | 3,1               | 9,2                          | 55           | 1,6                     | 4,4             |
| Kevlar 129  | 12            | 1,45                           | 3,4               | 10,1                         | 99           | 3,0                     | 3,3             |
| Kevlar 149  | 12            | 1,47                           | 2,3               | 6,9                          | 143          | 4,2                     | 1,5             |
| Nomex       |               | 1,38                           | 0,6               | 1,9                          | 17           | 0,5                     | 22,0            |
| Technora    | 12            | 1,39                           | 3,3               | 10,3                         | 70           | 2,2                     | 4,3             |
| E Glass     | 5-25          | 2,55                           | 2,6               | 4,4                          | 72           | 1,2                     | 3,0             |
| S Glass     | 5-15          | 2,48                           | 4,8               | 8,4                          | 85           | 1,5                     | 5,3             |
| Aço         |               | 7,8                            | 7,6               | 4,2                          | 150          | 0,8                     | 4,8             |

Fonte: Yang (1993).

### 2.2.3 Fibras de basalto

O basalto é um mineral de origem vulcânica, escuro ou negro, e suas rochas são pesadas, tenazes e resistentes. Sua densidade é aproximadamente 5% maior que a do vidro e é a rocha mais abundante da crosta terrestre, já que o fundo dos oceanos é predominantemente composto de basalto (LAPENA; MARINUCCI; CARVALHO, 2014).

O interesse na utilização de fibras contínuas de basalto para o reforço de compósitos tem aumentado significativamente nos últimos anos, devido, principalmente, ao crescimento das aplicações de compósitos de matrizes cerâmicas ou poliméricas (MEDVEDYEV; TSUBULYA, 2004).

Fios micrométricos de basalto podem ser usados para a produção de estruturas 2D ou 3D em compósitos, tecidos de malhas (SCHIAVON, REDONDO E YOSHIDA, 2007). A Figura 6 mostra uma malha de fibra de basalto.

Figura 6 – Fibra de Basalto



Fonte: TKMCE (2017).

A principal vantagem dos materiais produzidos à base de basalto, de acordo com Schiavon, Redondo e Yoshida (2007), está em suas propriedades mecânicas, alta resistência à corrosão e propriedades termofísicas, já que a resistência ao calor de fibras de basalto (- 200 a 700/900 °C) supera a de fibras de vidro (- 60 a 450 °C).

#### 2.2.4 Fibras de carbono

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).

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 7 mostra uma manta de fibra de carbono.

Figura 7 – Manta de Fibra de Carbono



Fonte: Juvandes *et al.* (2001).

É importante ressaltar que o alto módulo de elasticidade  $e$ , de certo modo, a alta resistência da fibra de carbono, dependem do grau de orientação das fibras, ou seja, do paralelismo entre os eixos das fibras (BEBER, 2003).

### 2.3 REFORÇO ESTRUTURAL EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

A construção em concreto armado é uma das técnicas construtivas mais utilizadas na engenharia civil. No começo do século XX, o material foi consolidado como um dos mais importantes do mundo, e após a II Guerra Mundial, iniciou-se o desenvolvimento de tecnologias e ferramentas computacionais sofisticadas que possibilitaram a implantação de estruturas mais esbeltas e arrojadas (JUVANDES, 1999). De acordo com Beber (2003), essa otimização estrutural, apesar de prover diminuição de materiais e de custo, têm causado maior suscetibilidade a patologias do que os métodos mais antigos, que davam ao elemento estrutural um dimensionamento com margem de segurança superior e, conseqüentemente, aumentavam a resistência da estrutura contra agentes agressivos, mecânicos e químicos.

A vida útil de uma estrutura em concreto armado pode ser afetada de diversas formas. Souza & Riepper (1998) citam que além de alterações nas condições iniciais de projeto e a ação de agentes agressivos, pode haver falhas intrínsecas na elaboração de hipóteses de cálculo. Ainda, Beber (1999) coloca que o nível de solicitações inicialmente previsto para aquela estrutura pode aumentar, elevando a carga e exigindo maior resistência da peça. Independente de qual seja a causa, tais mudanças constituem grande perigo no desempenho do serviço estrutural e da segurança oferecida aos usuários, e são tecnicamente chamadas de patologias.

Na presença dessas patologias das construções, é necessária a recuperação ou reforço da estrutura. Nesse sentido, Souza e Ripper (2009) orientam que, quando os serviços a serem executados nessa intervenção não implicarem no aumento ou reconstrução da capacidade portante da estrutura, chamamo-los de trabalhos de recuperação ou de reparo da estrutura, sendo denominados de reforços, em caso contrário.

O reforço é uma intervenção específica quando se deseja aumentar o desempenho de uma estrutura, dotando-a de maior resistência ou rigidez, complementando as propriedades faltantes no elemento estrutural para acréscimo da capacidade portante (BEBER, 2003). Essa definição também é apontada por Nakamura (2009), que afirma que a medida de reforço visa, principalmente, aumentar a capacidade da estrutura de resistir às solicitações a que está submetida.

Teobaldo (2004) ainda cita que o reforço estrutural advém de diversas necessidades de alteração da condição inicial de uma estrutura. Há casos em que é preciso melhorar as condições de carregamento atuantes, ou mesmo aumentar a resistência para que a estrutura suporte maiores solicitações do que as previstas em projeto.

Para essas situações, de acordo com Nakamura (2009), as metodologias vão desde aumentar as seções resistentes de vigas, pilares, lajes e elementos estruturais em geral, até a aplicação de reforços externos por meio da colagem de chapas de aço ou protensão externa. Ainda, pode-se citar a aplicação de materiais compósitos, sobretudo as fibras, que são recursos explorados principalmente em edificações em funcionamento, cuja intervenção não deve comprometer as características estéticas originais, ou quando a velocidade de execução é importante (BEBER, 2003).

Existem algumas especificidades para cada tipo de reforço, de acordo com o objetivo da sua aplicação, as quais são detalhadas a seguir.

### 2.3.1 Reforço Estrutural com colagem de chapas metálicas

A colagem de chapas metálicas como reforço estrutural é uma técnica consagrada devido à grande quantidade de obras que foram realizadas e que atestam sua eficiência (ADORNO *et al.*, 2015). É uma solução eficiente e rápida que permite, dentre outros, o aumento da resistência final com pouca alteração na geometria das peças. A Figura 8 ilustra a fixação por meio de colagem de uma chapa metálica em viga *in loco*.

Figura 8 – Fixação de chapa metálica

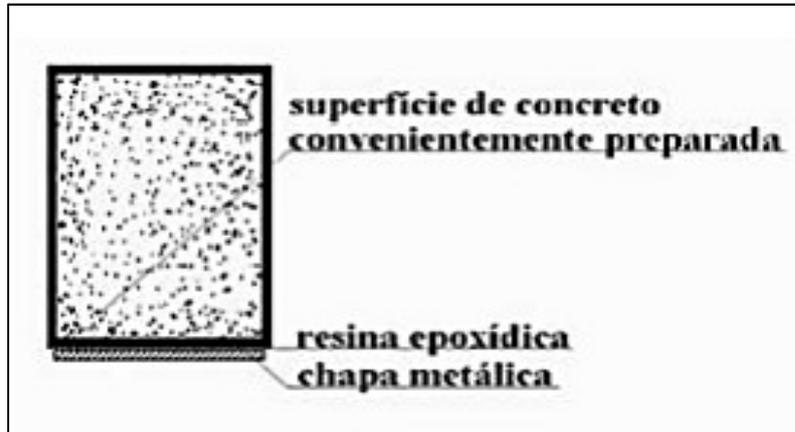


Fonte: Aguiar (2014).

Segundo Souza e Ripper (2009), a ligação desse elemento de reforço à estrutura pode ser feita por meio de colas epoxídicas, obtidas com a mistura e solidificação de polímeros,

resultando em uma cola de alta aderência, ou resinas epoxídicas, como a de poliéster. A Figura 9 mostra a cola aplicada na área de contato da chapa metálica com o concreto, ou através da injeção de resina epoxídica em alguns furos, como apresentado na Figura 10.

Figura 9 – Reforço com chapa metálica e fixação com resina



Fonte: Souza e Ripper (1998).

Figura 10 – Reforço com chapa metálica e fixação com aplicação de resina em furos



Fonte: Souza e Ripper (1998).

Quando há conexão de materiais de naturezas diferentes, é de grande importância que a aderência entre ambos seja boa (SOUTO FILHO, 2002). Ainda, segundo o autor, para garantir a melhor aderência, a superfície de concreto em que a chapa metálica será colada deve ser esmerilhada e limpa, de forma a retirar óleos e gordura. Dessa forma, quando a resina for aplicada, não serão criadas descontinuidades, que formam bolhas de ar localizadas, ocasionando o desprendimento da cola.

Adorno *et al* (2015) atentam para os cuidados que devem ser tomados na fase de dimensionamento do reforço. Independente da solicitação imposta ao elemento estrutural, a ruptura deve ocorrer no concreto, e não na resina. Esse detalhe é garantido no projeto, quando se respeita uma espessura mínima de resina e se utiliza nos cálculos a resistência à tração do concreto (pois a resistência à tração da resina é superior à resistência do concreto).

As chapas metálicas, assim como a superfície de concreto, devem ser submetidas a um tratamento para potencializar a aderência da ligação com a resina. A superfície deve passar por uma limpeza, decapagem com jato abrasivo e, em seguida, ser protegida com uma película autocolante apropriada que deverá ser retirada no momento da colagem *in loco* (ADORNO *et al*, 2015). A colagem é feita por meio de uma fina camada de resina e, após o procedimento, as chapas devem ser escoradas até que a resina esteja totalmente seca, como mostra a Figura 11.

Figura 11 – Escoramento do reforço com chapas metálicas



Fonte: Souza e Ripper (1998).

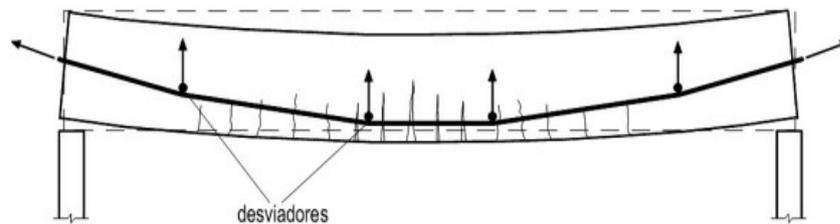
Souza e Ripper (2009) ainda complementam que o tempo de endurecimento da resina depende diretamente das características da cola e da temperatura ambiente, porém não deve ser inferior a 24 horas.

### 2.3.2 Reforço estrutural com protensão externa

O reforço estrutural com protensão externa é uma técnica ainda não muito explorada. De acordo com Mariano (2015), o método consiste na incorporação de cordoalhas externas à estrutura, com o objetivo de reestabelecer as condições originais de resistência ou reforçá-la para que haja suporte para cargas superiores às projetadas.

O objetivo é que, ao serem tensionadas, as cordoalhas comprimam o concreto e eliminem as fissuras (MARIANO, 2015). A Figura 12 apresenta uma ilustração esquemática do reforço, e a Figura 13 uma imagem real.

Figura 12 – Representação esquemática de uma viga protendida externamente



Fonte: Veríssimo e César Junior (1998).

Figura 13 – Passarela protendida em utilização.



Fonte: Mariano (2015).

As forças exercidas pelos cabos de protensão são transferidas para a estrutura apenas nos pontos de ancoragem e nos desviadores. Além disso, não há aderência entre a armadura de protensão e a estrutura, a não ser nos pontos de ancoragem e de desvio dos cabos, onde o atrito é intencionalmente criado para fixar o cabo, ou se faz presente em decorrência do necessário contato do cabo com o dispositivo desviador (REIS, 2003).

Uma das vantagens apresentadas pela protensão externa é a possibilidade de reprotensão dos cabos, de aliviar a protensão já feita ou até mesmo substituir os cabos, caso essas manutenções sejam permitidas no projeto estrutural, visando reduzir as deformações de estruturas suspensas e aumentar sua capacidade portante (REIS, 2003).

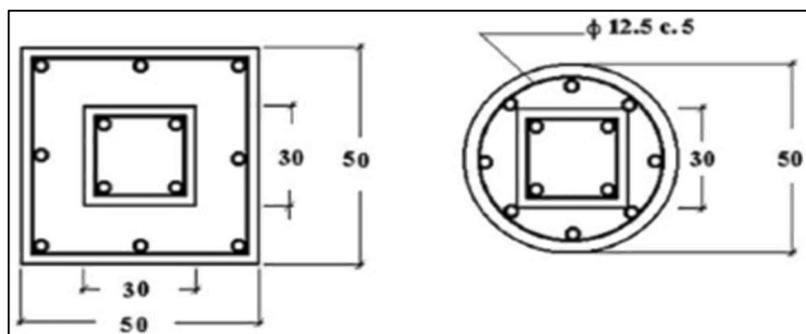
Porém, segundo Camargos (2013), por ser um método externo, é necessária a devida proteção das cordoalhas, normalmente feita com o encapsulamento dos cabos com argamassa, cobrimento com concreto convencional ou projetado.

Num estudo comparativo realizado por Vitorio e Barros (2012), chegou-se à conclusão de que a protensão externa é um método mais econômico em relação ao sistema convencional, o que agrega mais uma vantagem para esse método.

### 2.3.3 Reforço estrutural por aumento da seção transversal

O método de reforço por aumento das seções de concreto e de armadura existentes, também conhecido como reforço por encamisamento, consiste na adição de armaduras de aço (longitudinal e transversal) inseridas numa camada de concreto, tanto em vigas quanto em pilares (SANTOS, 2006). Por não necessitar de mão de obra especializada e ser material comum no mercado, essa técnica de reforço é a mais utilizada no Brasil. Souza e Ripper (2009) destacam que a preferência pelo complemento das seções existentes, com a adição de concreto e de aço, deriva justamente do baixo custo dos materiais de reposição e da tradição de uso dos mesmos. Ainda segundo os autores, o projeto do reforço a ser realizado em pilares consiste no cálculo de um novo pilar cintado que seja capaz de absorver os esforços introduzidos, somados ao carregamento existente. É importante frisar que, de acordo com Souza e Ripper (2009), o reforço transforma o pilar quadrado ou retangular em um pilar de seção transversal circular, como mostra a figura 14, visando maior qualidade do cintamento.

Figura 14 – Reforço de pilar por encamisamento

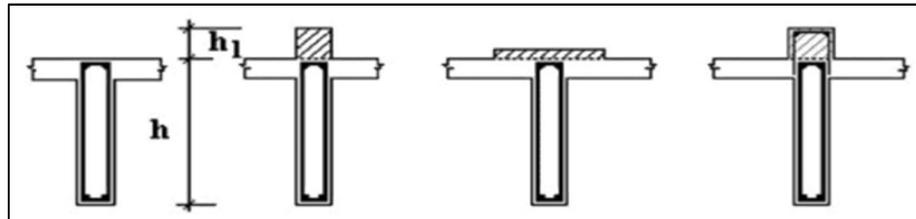


Fonte: Souza e Ripper (2009).

Porém, anterior ao estudo supracitado, Souza e Ripper (1998) defendiam que, quando o elemento estrutural a ser reforçado tratar-se de uma viga, a situação típica de reforço é a caracterizada pelo aumento da altura da seção transversal da mesma por meio do acréscimo de

concreto na face superior. Dessa forma, o braço de alavanca do momento resistente aumenta e, conseqüentemente, a capacidade portante das vigas, conforme a figura 15. Para a execução dessa técnica é comum o descarregamento parcial ou total da viga.

Figura 15 – Reforço de vigas por meio da altura  $h$



Fonte: Souza e Riepper (2009).

Como a técnica fará a conexão entre dois concretos de idades diferentes, Souza e Ripper (2009) acrescentam que esse pode ser o grande fator de encarecimento da técnica de reforço, ou seja, deve-se garantir que haja aderência entre os dois concretos para que a seção de ligação tenha a capacidade de resistir às tensões de deslizamentos existentes

Para evitar o desprendimento entre os concretos, é comum a realização de apicoamentos na estrutura original antes da aplicação da resina epóxi e concretagem, ou, dependendo da técnica, do encaixe dos novos estribos e concretagem, justamente para garantir melhor aderência e resistência do reforço (SANTOS, 2006).

### 2.3.4 Reforço estrutural com o uso de fibras

As fibras, de acordo com Jones (1975, apud BEBER, 2003), são um material filamentar cuja razão entre o comprimento e o diâmetro é no mínimo igual a 100, e com diâmetro máximo de 0,25mm. A evolução da engenharia de materiais e suas tecnologias tornou possível a substituição do reforço externo com chapas metálicas por materiais mais leves, resistentes, mais duráveis e de fácil aplicação, como é o caso das fibras (SOTO, 2013). Além disso, há também a inclusão de pedaços de fibra junto da matriz cimentícia, deixando de ser um reforço externo e se tornando um reforço interno (BERNARDI, 2003).

#### 2.3.4.1 Reforço interno com fibras

Os reforços internos com fibras são tecnologias construtivas que visam a adição de novos materiais no concreto armado desde a sua execução, criando um material com qualidades

superiores desde o início da sua concepção. A seguir, são apresentados alguns exemplos da adição de fibras em estruturas de concreto armado.

#### 2.3.4.1.1 Adição de fibras na matriz de concreto

A adição interna de fibras no concreto cria pequenos caminhos condutores de tensão dentro do elemento estrutural, fazendo melhor distribuição de esforços e diminuindo a área de armadura, como comentam Carvalho e Figueiredo Filho (2014). Ainda segundo os autores, o concreto com fibras é obtido pela adição de fibras metálicas ou poliméricas durante o preparo do concreto, fazendo com que após a secagem e cura, a matriz cimentícia esteja interligada pelas fibras (pontes) que a atravessam em todas as direções.

Esse “efeito ponte”, também citado por Singh *et al.* (2004 apud ROSA FILHO; SILVA; PARISI, 2017), é um efeito de fortalecimento das fibras na matriz, já que dificulta a propagação de fissuras e aumenta a capacidade de absorção de energia. De acordo com Cominol, Failla e Plizzari (2007), existem diversos tipos de fibras de materiais e características geométricas diferentes com capacidade de melhorar as características do concreto, porém as mais comuns são as de aço, de polipropileno e de vidro.

Rosa Filho *et al.* (2017) realizaram um ensaio de resistência à tração na compressão diametral em corpos de prova com e sem a adição de fibras de polipropileno. Segundo os autores, a atuação das fibras é de extrema importância, pois atuam na matriz do concreto de forma intertravada, evitando que a fissura se propague e, até mesmo, controlando seu tamanho. A Figura 16 mostra o resultado do pós-rompimento dos corpos de prova com e sem as fibras.

Figura 16 – Corpos de prova de concreto pós-rompidos por compressão diametral a) com fibras e b) sem fibras de polipropileno.



Fonte: Rosa Filho *et al.* (2017).

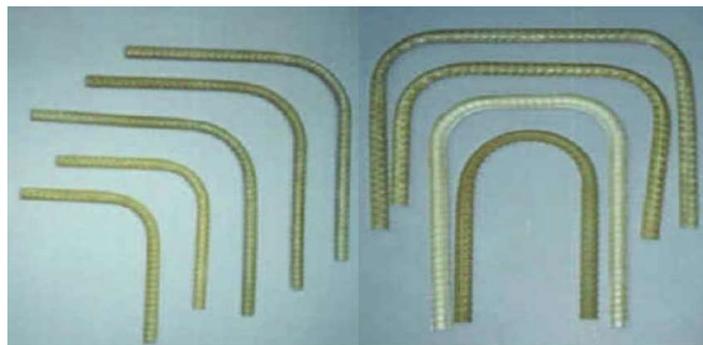
Conforme os resultados obtidos na pesquisa de Rosa Filho *et al.* (2017), as fissuras que se formariam em um concreto sem as fibras se tornaram microfissuras pouco propagadas graças ao efeito ponte ocasionado na estrutura, o que é visível na Figura 16.

#### 2.3.4.1.2 Barras de fibra impregnadas por polímero utilizadas como armadura não metálica

Visto os grandes benefícios propostos pelo uso de materiais compósitos no reforço de estruturas de concreto armado, principalmente de fibras, a ideia de promover a armação dos elementos estruturais com barras de compósitos vem crescendo, inclusive no número de estudos. Krall (2014), Tavares (2006), Couto (2007) e Stoner (2015) realizaram pesquisas no âmbito de analisar a substituição de armaduras de aço por armaduras de fibras compósitas para estruturas de concreto, com intuito de inibir patologias das estruturas causadas pelo aço.

Em sua pesquisa, Couto (2007) analisa a aderência entre o concreto e barras de *Glass Fibre Reinforced Polymer* (GFRP) por meio de ensaios de arrancamento padronizados, segundo o RILEM-FIP-CEB (1973). Para a autora, a justificativa pela escolha em barras não metálicas está no fato de que, além de permitirem cobrimentos menores e possibilitarem menor custo de manutenção, outras vantagens no seu uso podem ser citadas, tais como: pequeno peso específico, alta resistência à tração, não condutibilidade elétrica, térmica e magnética, entre outras (COUTO, 2007). A Figura 17 ilustra barras de GFRP com ganchos.

Figura 17 – Barras de GFRP com ganchos



Fonte: RE-BAR CHILE [s. d.].

Na pesquisa foram consideradas as influências dos parâmetros como resistência à compressão do concreto e o diâmetro da barra de GFRP. Além da análise bibliográfica e de ensaios experimentais, foi realizada a análise numérica da aderência por meio do método dos elementos finitos.

Como resultado, foi determinado que as barras de compósitos têm aderência inferior às barras de aço, portanto, necessitam de maior comprimento de ancoragem. As barras de GFRP apresentaram comportamento tensão *versus* deformação elástico-linear até a ruptura, com ruptura brusca e sem aviso prévio. Além disso, foi concluído que a resistência à compressão do concreto não influenciou de maneira significativa na resistência de aderência entre a barra de GFRP e o concreto. Em comparação às barras de aço, as barras de GFRP modeladas no *software* apresentaram maiores deslocamentos na ruptura que os modelos com barras de aço, atingindo valores até quatro vezes maiores.

#### 2.3.4.2 Reforço externo com fibras

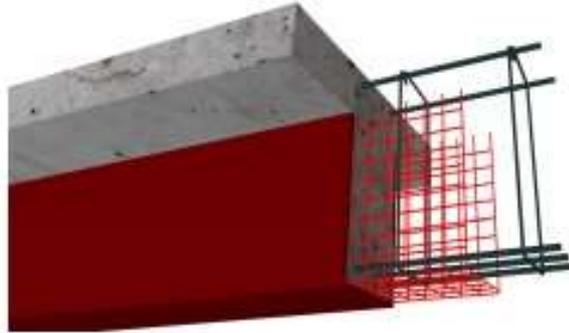
Ao contrário do reforço interno com fibras adicionadas nas estruturas de concreto armado, feito durante a preparação do concreto, o reforço externo é utilizado principalmente em estruturas já existentes e que necessitam de maior resistência, tanto em relação a tensões quanto à corrosão ou diminuição da propagação de fissuras (BEBER, 2003).

Para esse fim, as fibras são utilizadas em forma de tecidos ou malhas, e podem ser aplicadas na estrutura tanto com cimento, chamado de *Textile Reinforced Concrete* (TRC - concreto têxtil) quanto com polímeros, chamados de *Fiber Reinforced Polymer* (FRP - polímero reforçado com fibras).

O TRC teve sua definição proposta pelo professor Naaman (2010) e, mais tarde, complementada por Contamine (2011), como um tipo de concreto que consiste geralmente de uma matriz de cimento hidráulico (ou compósito de matriz cimentícia inorgânica) reforçada por uma ou mais camadas têxteis. Pelo menos uma camada têxtil deve ser colocada perto de cada uma das duas superfícies de extremidade da estrutura, e a matriz de cimento e sua composição devem ser compatíveis com o sistema de têxteis que a matriz se destina a cobrir (CONTAMINE, 2011).

Sendo assim, o TRC é formado por um tecido de fibras imerso em uma placa de concreto, que é colada na superfície da estrutura patológica com resina epóxi (CHASTRE, 2004), como mostrado na figura 18.

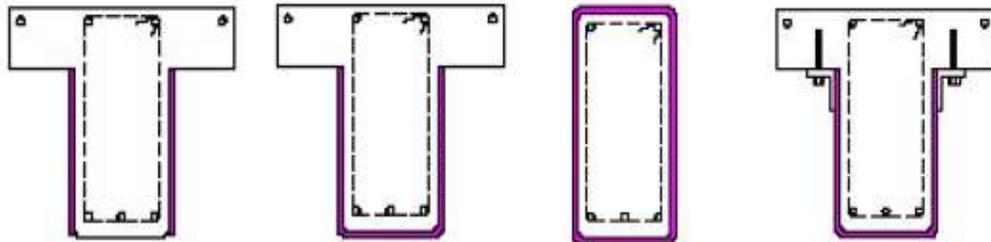
Figura 18 – Detalhe do reforço de uma viga com TRC



Fonte: Chastre (2004).

A aplicação do reforço pode ser realizada de diversas formas, dependendo de quais tensões a estrutura esteja sofrendo (Contamine, 2011). A Figura 19 ilustra alguns exemplos de como o TRC pode ser utilizado:

Figura 19 – Exemplos de aplicação externa do TRC em vigas retangulares e em vigas tipo T



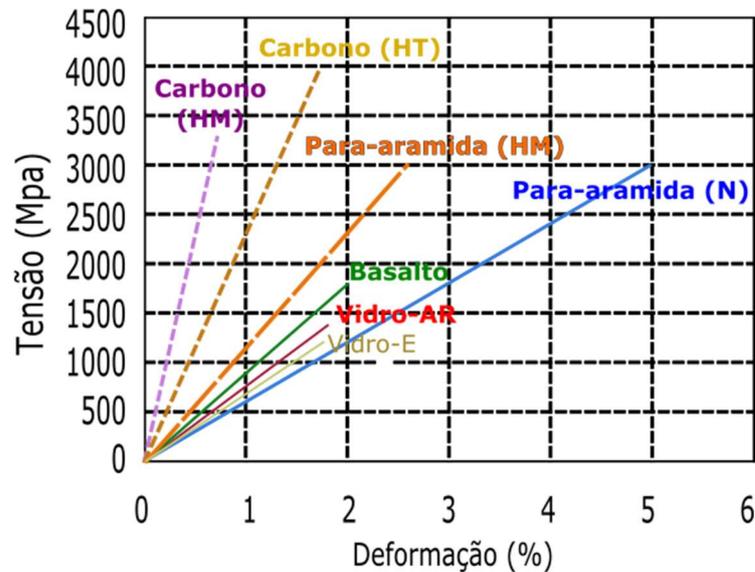
Fonte: Contamine (2011).

A resina epoxídica é sensível à variação de temperatura, resistente à corrosão (por ser insensível à umidade), é aderente a diferentes tipos de substrato, tem cura rápida, elevada resistência mecânica, além de ser muito resistente à retração durante seu endurecimento. Isso faz com que esse tipo de adesivo seja utilizado no lugar de algum outro (RIPPER; SOUZA, 1998). Ainda segundo os autores, é preferível a aplicação da resina em uma temperatura entre 10 °C a 30 °C, porque, caso contrário, a temperatura intervém no processo de polimerização do material.

O objetivo de aplicação do TRC como reforço do concreto armado é resolver os problemas de corrosão e melhorar o desempenho e a durabilidade do aço das estruturas (BRAMESHUBER, 2006). De acordo com Contamine (2011), as principais razões de sua utilização são: facilidade de manuseio, transporte e aplicação; resistência à corrosão e capacidade de orientação das fibras nas direções de aplicação das cargas na estrutura. Além

disso, a utilização de materiais fibrosos permite a construção de elementos esbeltos e leves, com resistência a corrosão, durabilidade e capacidade de carga, melhorando a ductilidade (GRIES *et al.*, 2004). O tecido de fibras pode ser constituído de diversos materiais, porém, os mais comuns são de fibras de carbono, vidro, aramida e basalto. O gráfico 1 apresenta a comparação no desempenho de cada tipo de fibra.

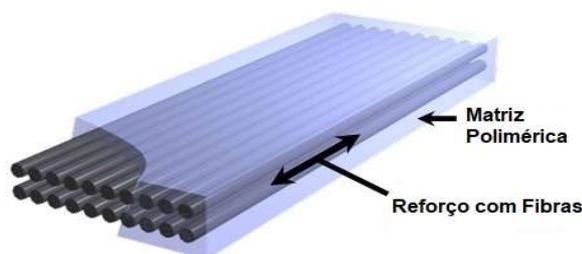
Gráfico 1 – Tensão-deformação dos materiais suscetíveis à utilização em TRC



Fonte: Adaptado de Contamine (2011).

O FRP é um subgrupo da classe de materiais compósitos constituído de fibras de alta resistência incorporadas em uma matriz de polímero (ISIS, 2003), como indica a Figura 20. A matriz polimérica é a pasta do FRP e desempenha muitos papéis importantes que, de acordo com ISIS (2013), inclui unir as fibras, protegê-las da abrasão e da degradação ambiental, separar e dispersar as fibras dentro do compósito, transferir forças entre as fibras individuais e fornecer forma ao componente FRP, sendo que a mais comumente utilizada é a de epóxi.

Figura 20 – Esquema representativo da combinação de fibras e matriz polimérica para formar o compósito FRP

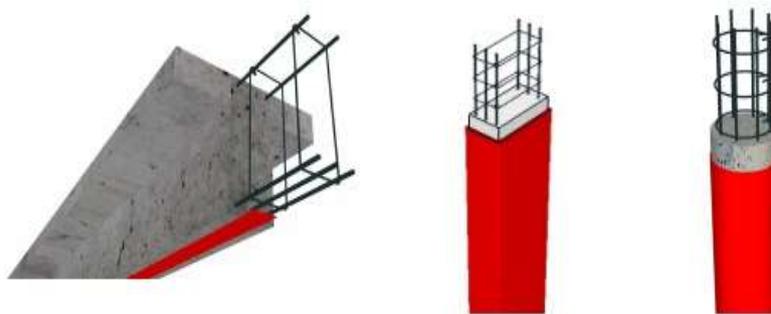


Fonte: Adaptado de ISIS (2013).

De acordo com Menon (2008), o PRF é um sistema constituído por fibras contínuas, com a forma de fios, mantas ou tecidos em estado seco ou pré-impregnado. Transforma-se em compósito de FRP somente após ser polimerizado ou endurecido *in situ* com a adição de uma resina de saturação das fibras que, simultaneamente, é o agente adesivo de ligação ao elemento estrutural sendo reforçado.

Ainda, segundo ISIS (2013), em tecidos e coberturas, as resinas também têm função de colagem, assegurando a fixação das fibras na base e entre as camadas, como mostra a Figura 21. As características necessárias para resinas de epóxi, além de resistência, são uma boa capacidade de adesão à fibra, um longo tempo de cura, o baixo encolhimento durante a cura, uma tensão de ruptura compatível com as fibras e estabilidade contra os produtos químicos (CHASTRE, 2014).

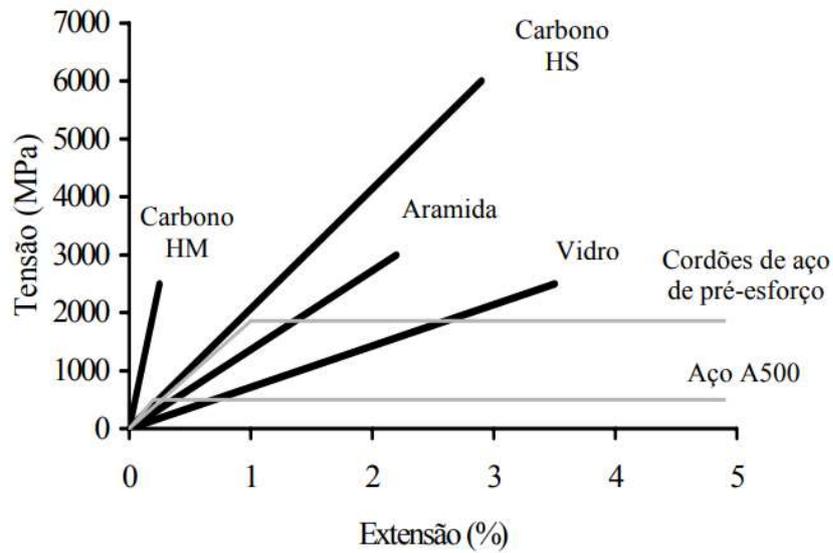
Figura 21 – Detalhes do reforço de vigas e pilares com compósitos FRP



Fonte: Chastre (2014).

Segundo Barros (2004), as fibras mais comumente utilizadas são as de carbono, vidro e aramida e, por proporcionarem força e rigidez ao FRP, é crítico que a matriz polimérica as proteja contra a degradação ambiental. Barros (2004), em sua pesquisa, testou as fibras citadas e chegou às seguintes conclusões: dos três tipos de fibras (vidro, aramida e carbono), as de carbono (chamadas de *Carbon Fiber Reinforced Polymer*, CFRP) possuem a melhor propriedade mecânica, têm maior resistência a ataques químicos, são resistentes à corrosão e não absorvem água; as fibras de vidro têm menor custo e peso específico maior, porém apresentam grande sensibilidade aos meios alcalinos e tem menos resistência às ações de fadiga; as fibras de aramida apresentam dificuldade de modelagem, têm baixa resistência à compressão, são sensíveis à fluência e à ação da radiação ultravioleta e temperaturas elevadas. A Figura 22 apresenta graficamente as características mecânicas de cada tipo de fibra.

Figura 22 – Diagrama tensão x deformação de distintos tipos de fibras, aço convencional e aço de protensão



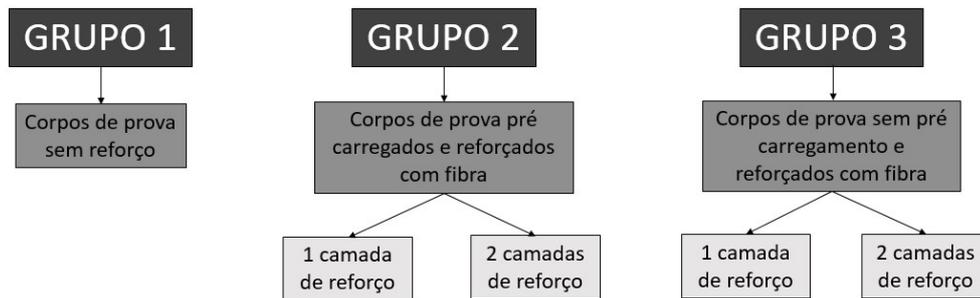
Fonte: Barros (2004).

De acordo com Texiglass (2018), o composto de tecido de fibra de carbono com resina epóxi, além da facilidade de aplicação, pode proporcionar um aumento de até três vezes a resistência à compressão e com até dez vezes menos peso do que a recuperação de viga ou coluna pelo método convencional com ferro e aço.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são detalhados os materiais e os ensaios realizados no desenvolvimento experimental do trabalho. Está organizado a seguir um esquema com as etapas de realização do experimento, cujos corpos de prova foram divididos em três grupos:

Figura 23 – Definição dos grupos de Corpos de Prova



Fonte: Autor (2019).

Tanto os materiais quanto os métodos estão apresentados de forma ordenada na Figura 24.

Figura 24 – Fluxograma de materiais e métodos



Fonte: Autor (2019)

### 3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados neste trabalho foram concreto (cimento, areia e brita), tecido de fibra de carbono e resina epóxi. Tais materiais, suas características e normas regulamentadoras estão descritas a seguir.

#### 3.1.1 Cimento CP II-Z- 32

O cimento, dentro do concreto, tem função de aglomerante, servindo para unir os outros componentes. Neste trabalho foi utilizado o cimento tipo CP II-Z-32 da marca Votoran, especificado segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018), como mostrado na Tabela 2:

Tabela 2 – 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 pozolânico | CP II-ZZ     | 25, 32 ou 40                 | RS ou BC      | 71 - 94                              | 0                                      | 6 - 14                     | 0 - 15                      |

Fonte: Adaptado da NBR 16697 da ABNT (2018).

De acordo com Barroso (2011), a adição de 6% a 14% de material pozolânico modifica a microestrutura do concreto, diminuindo a permeabilidade, aumentando a estabilidade e a durabilidade do concreto. Tais fatores repercutem diretamente no comportamento do concreto, incluindo a diminuição do calor de hidratação, o aumento da resistência em idades avançadas e melhor trabalhabilidade.

#### 3.1.2 Areia Média

A areia é o agregado miúdo do concreto, definido pela norma NBR721 (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  $\mu\text{m}$ ” (ABNT, 2005, p. 3). A tabela a seguir apresenta os limites da distribuição granulométrica dos agregados considerados miúdos.

Tabela 3 – Limites da distribuição granulométrica de agregados miúdos

| Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1) | Porcentagem, em massa, retida acumulada |            |                    |                 |
|--|---|------------|--------------------|-----------------|
|  | Limites inferiores                      |            | Limites superiores |                 |
|  | Zona utilizável                         | Zona ótima | Zona ótima         | Zona utilizável |
| 9,5 mm   | 0                                       | 0          | 0                  | 0               |
| 6,3 mm   | 0                                       | 0          | 0                  | 7               |
| 4,75 mm  | 0                                       | 0          | 5                  | 10              |
| 2,36 mm  | 0                                       | 10         | 20                 | 25              |
| 1,18 mm  | 5                                       | 20         | 30                 | 50              |
| 600 µm   | 15                                      | 35         | 55                 | 70              |
| 300 µm   | 50                                      | 65         | 85                 | 95              |
| 150 µm   | 85                                      | 90         | 95                 | 100             |

NOTAS

- 1 O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.
- 2 O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.
- 3 O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Fonte: NBR 7211, 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” (ABNT, 2005, p. 3). Esse material é inserido 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

O tecido de fibra de carbono utilizado neste trabalho foi fornecido pela TEXIGLASS, empresa especializada em tecidos e fitas de fibra de vidro, carbono e aramida. O composto utilizado foi o tecido de fibra de carbono unidirecional CVU-334-HM-0,50, apresentado na Figura 25.

Figura 25 – Tecido de fibra de carbono utilizado como reforço



Fonte: Autor (2019).

Pode-se observar que o tecido utilizado é unidirecional, ou seja, com fibras de carbono em apenas uma direção. As fibras de carbono, de cor preta, se estendem na direção longitudinal do tecido, enquanto na direção perpendicular, fibras de vidro, de cor branca, realizam o intertravamento das fibras de carbono. 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 de acordo com o processo realizado em fábrica e as tabelas técnicas disponibilizadas pelos fabricantes das matérias primas. Tais informações estão demonstradas na tabela 4:

Tabela 4 – Propriedades das fibras de carbono

| Propriedade             | Unidade           | Fibra de Carbono  |
|-------------------------|-------------------|-------------------|
| Densidade               | g/cm <sup>3</sup> | 1,76              |
| Elongação até a ruptura | %                 | 1,9               |
| Módulo de Elasticidade  | GPa               | 240               |
| Resistência à Tração    | MPa               | 4500              |
| Condutividade Elétrica  | -                 | Ótimo condutor    |
| Resistência aos álcalis | -                 | Alta resistência  |
| Resistência aos ácidos  | -                 | Baixa resistência |
| Efeito ao calor         | -                 | Oxida a > 316°C   |
| Resistência à abrasão   | -                 | Baixa resistência |

Fonte: Adaptado de TEXIGLASS (2014)

A empresa ainda forneceu a ficha técnica do tecido de fibra de carbono, apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 – Ficha Técnica do Tecido de Fibra de Carbono

| <b>Matérias Primas Requeridas</b>  |   |               |                |               |
|------------------------------------|---|---------------|----------------|---------------|
| Material de Urdume                 | Fio de Fibra de Carbono                           |               |                |               |
| Material de Trama                  | Fio Hot Melt                                      |               |                |               |
| <b>Informações de Tecelagem</b>    |   |               |                |               |
| Tipo de Tecelagem: Tela Hot Melt   |   |               |                |               |
| <b>Parâmetros</b>                  | <b>Unidade</b>                                    | <b>Mínimo</b> | <b>Nominal</b> | <b>Máximo</b> |
| Peso                               | g/m <sup>2</sup>                                  | 288           | 320            | 352           |
| Número de Fio de Urdume            | Fios/cm   | 3,6           | 3,8            | 4             |
| Número de Fios de Trama            | Fios/cm   | 1,35          | 1,5            | 1,65          |
| Largura                            | cm  | 49            | 50             | 52            |
| Comprimento do Rolo                | m   | 45            | 50             | 55            |
| Tamanho do Rolo                    | m <sup>2</sup>                                    | 22            | 25             | 28            |
| Espessura                          | mm  | 0,43          | 0,5            | 0,58          |
| Carga de Ruptura de Urdume Teórica | Kgf/cm  | 623           | 779            | 779           |
| Carga de Ruptura da Trama Teórica  | Kgf/cm  | 2,9           | 3,6            | 4             |
| Porcentagem da Resina em Peso      | %   | 0             | 0              | 0             |
| <b>Informações Adicionais</b>      |   |               |                |               |
| Unidirecionalidade                 | U x T   | %             | 94,1 x 5,9     |               |
| Composição do tecido               | 94% Fibra de Carbono + 6% Fibra de Vidro Hot Melt |               |                |               |
| Validade                           | Indeterminada                                     |               |                |               |

Fonte: Adaptado de TEXIGLASS (2018).

### 3.1.5 Resina Epóxi

As resinas epóxi (etoxileno) são as que contêm o grupo epoxílico e são derivadas da epicloridrina, proveniente de gases de petróleo e bisfenol A, oriundo da condensação de fenol com acetona (MENEGHEL, 2005). Ainda de acordo com o autor, as resinas epóxi por si só não apresentam propriedades físicas para utilização prática, devendo ser combinadas com catalisadores que contêm em suas moléculas hidrogênio ativo, que reage com as resinas gerando uma “formulação epóxi”.

Segundo Machado (2004), 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.

Neste trabalho foi utilizada a Aralbrás Profissional Industrial, um adesivo a base de resina Epóxi e Poliaminoamidas fornecida pela empresa Brascola Ltda. De acordo com o boletim técnico, o material é um adesivo epóxi bicomponente de uso industrial, indicado para colagem de alta resistência em materiais como azulejos, madeira, vidro, concreto, borracha vulcânica, fibras naturais, pedras, metais, plástico rígido, entre outros.

O adesivo é bicomponente, ou seja, é constituído de dois componentes: o componente A é a resina e, o componente B, o endurecedor. Ambos estão apresentados na Figura 26.

Figura 26 – Adesivo a base de resina epóxi



Fonte: Autor (2019).

O quadro 2 apresenta os dados técnicos da Cola Epóxi Premium, fornecidos pela empresa Brascola Ltda., fabricante do produto.

Quadro 2 – Dados Técnicos da Cola Epóxi Premium

| DADOS TÉCNICOS                               |                             |
|--|-----------------------------|
| Aparência após mistura                       | Líquido viscoso âmbar claro |
| Tempo de manuseio                            | Aproximadamente 60 minutos  |
| Tempo de cura Total (h)                      | 24                          |
| Dureza Shore A                               | 95                          |
| Resistência à temperatura (°C)               | 80                          |
| Rendimento (g/m <sup>2</sup> )               | 300                         |
| Força de cisalhamento (kgf/cm <sup>2</sup> ) | ≥210                        |
| Validade (meses)                             | 36                          |

Fonte: Adaptado de Brascola (2018).

## 3.2 MÉTODOS

Neste item estão descritos os processos realizados para a confecção dos corpos de prova, colocação do tecido de fibra de carbono no concreto e o ensaio de tração na flexão, apresentados de forma ordenada na Figura 24. Todas as etapas práticas foram realizadas no laboratório da Arteris Litoral Sul, em Joinville/SC.

### 3.2.1 Caracterização granulométrica dos agregados

A granulometria consiste no estudo da distribuição das dimensões de grãos, através da porcentagem de material retido nas peneiras de série normal ou intermediária. O ensaio da composição granulométrica de agregados miúdos e graúdos, para concreto, é normatizado pela NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Para a execução do ensaio foi separada uma amostra de cada agregado, apresentadas na Figura 27, e ambas foram levadas à estufa para que perdessem a umidade. Após a retirada da estufa, as amostras foram esfriadas à temperatura ambiente e pesadas.

Figura 27 – Amostras de a) agregado miúdo e b) agregado graúdo



Fonte: Autor (2019).

As peneiras, que atendem à norma NBR NM ISO-2395 (ABNT, 1997), foram previamente limpas e encaixadas com abertura de malha em ordem crescente da base para o topo, e estão apresentadas na Figura 28.

Figura 28 – Conjunto de peneiras utilizadas na caracterização granulométrica dos agregados



Fonte: Autor (2019).

Os agregados, testados separadamente, foram colocados sobre a peneira superior do conjunto. Em seguida, foi promovida a agitação mecânica das peneiras por cerca de 15 minutos, tempo suficiente para permitir o peneiramento de todos os grãos. Após o processo de agitação, as peneiras foram retiradas individualmente para que o conteúdo retido em cada uma delas fosse pesado. Com a porcentagem de peso acumulado em cada malha é possível traçar as curvas granulométricas dos agregados.

### 3.2.2 Definição do traço do concreto

De acordo com as especificações do cimento Portland CP-II Z, o traço utilizado para a confecção do concreto foi 1:2:3, ou seja, 1 medida de cimento por 2 partes de areia e 3 partes de brita, sendo que o fck esperado é de 25 MPa. Em cada betonada de concreto foram utilizados 24 L de água para 50kg de cimento, compondo uma relação água/cimento de 48%.

### 3.2.3 Confecção dos Corpos de Prova

Foram confeccionadas 8 formas de madeira de pinus, com dimensões de 50cm x 15cm x 15cm, utilizadas, cada uma, duas vezes, objetivando a realização de 16 corpos de prova.

Após a mistura do cimento, brita, areia e água na betoneira, o concreto foi colocado nas formas em duas camadas com 75 golpes por camada para o adensamento manual, como

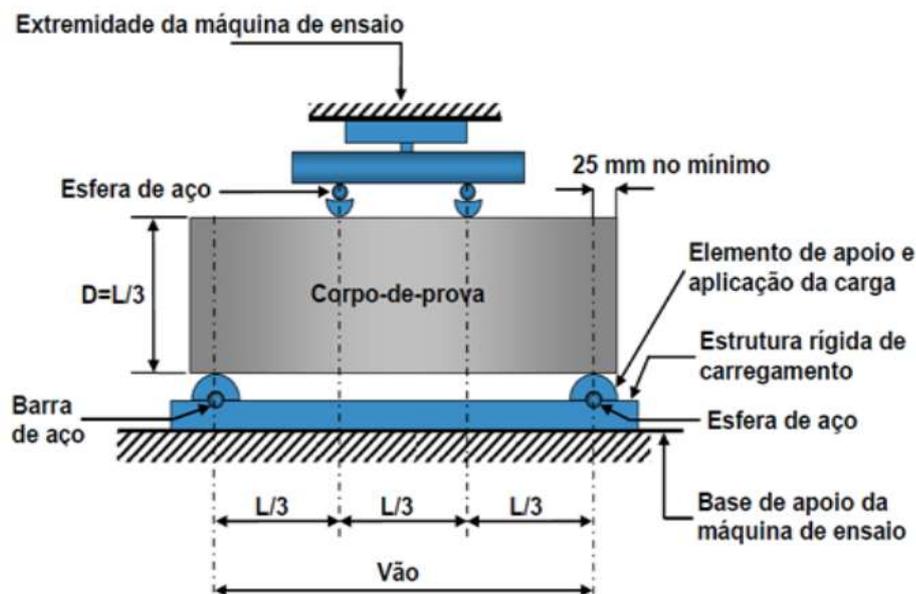
descreve a NBR 5738 (ABNT, 2015) para corpos de prova prismáticos com dimensão  $d$  igual à 150 mm. Essa norma também determina que os corpos de prova devem ficar armazenados em câmara úmida até o tempo de cura para a realização dos ensaios.

### 3.2.4 Rompimento do Grupo 1

Após os 28 dias de cura do concreto, os corpos de prova foram tirados do tanque de água e identificados com números de 1 a 16.

O ensaio de tração na flexão deve ser produzido com flexão em 4 pontos, de acordo com a NBR 12142:1991. Na Figura 29 está esquematizado o dispositivo de flexão e como deve ser posicionado o corpo de prova para a realização do ensaio.

Figura 29 – Esquema do ensaio de tração na flexão



Fonte: Almeida (2002).

Quando o acionamento da carga é feito, de forma manual ou elétrica, o corpo de prova é pressionado aos poucos e tracionado na face inferior, sendo que o valor da carga aplicada (em toneladas) vai aumentando no visor e estabiliza quando o corpo de prova rompe.

Nessa etapa de ensaios, os corpos de prova foram rompidos logo após o tempo de cura e sem aplicação de reforço, com o objetivo simples de testar a resistência do concreto à tração.

De acordo com a NBR 12142:1991, a resistência do concreto testado à tração na flexão é dada pela seguinte fórmula:

$$f_{ctM} = \frac{pl}{bd^2}$$

Onde:

$f_{ctM}$  = resistência à tração na flexão, em MPa

$p$  = carga máxima aplicada, em N

$l$  = distância entre cutelos de suporte, em mm

$b$  = largura média do corpo de prova na seção de ruptura, em mm

$d$  = altura média do corpo de prova, na seção de ruptura, em mm

### 3.2.5 Pré carregamento do Grupo 2

Com o intuito de simular peças estruturais já em utilização, outros 5 corpos de prova foram pré carregados no mesmo equipamento utilizado para o ensaio de tração na flexão. Os Corpos de Prova (CPs) foram posicionados como indicado na Figura 29, porém, como o objetivo era apenas carregar e não romper o CP, a carga foi acionada de forma controlada até atingir cerca de 2/3 da resistência do concreto e, logo em seguida, o equipamento foi descarregado. Esses corpos de prova pré carregados formam o Grupo 2.

### 3.2.6 Processo de reforço com fibra nos Grupos 1 e 2

Para a realização do reforço com o tecido de fibra de carbono, foi utilizado como referência o trabalho de Menon (2008) e o Manual de Reforço de Estruturas de Concreto da empresa Viapol (s/d, *web*).

A primeira etapa do reforço consiste na limpeza da superfície de concreto, para a retirada de partículas de pó ou sujeira que possam interferir na aderência da resina e do tecido. Neste trabalho, a limpeza foi feita com jatos de ar para evitar contato e/ou contaminação da superfície de concreto.

Após a limpeza dos CPs, o tecido de fibra de carbono deve ser cortado em faixas que correspondam à dimensão do CP em que será colado posteriormente. É importante verificar a direção das fibras e, também, a quais tensões o reforço deverá resistir, já que a resistência do material utilizado é na direção longitudinal da fibra.

A preparação da resina, ou seja, a mistura dos dois componentes, deve ser feita quando todos os outros materiais estiverem prontos, devido ao tempo útil de utilização da cola ser

restrito a 60 minutos. Conforme especificado pelo fabricante – no caso, a empresa BRASCOLA –, são misturadas 10 partes do componente A para 8 partes do componente B, sempre com a utilização de luvas. Quando a resina estiver pronta, ela já pode ser aplicada tanto no tecido de fibra de carbono quanto na face tracionada do corpo de prova. Não existe uma ferramenta específica para a aplicação da resina, logo é possível utilizar espátula, pincel, rolo de espuma, entre outros.

O tecido deve ser então impregnado com resina, assim como a face tracionada do CP, sendo colocado sobre a superfície em que deve haver o reforço. Após a aplicação das fibras, deve ser passado um rolo de espuma para a retirada de bolhas de ar e melhor fixação da resina, e colocada mais uma camada de resina para finalização. Nos corpos de prova em que são aplicadas duas camadas de fibra de carbono, o processo se repete: é passada a resina na face tracionada de concreto e na faixa de tecido, o tecido é colado e fixado com o rolo de espuma; em seguida passa-se outra camada de resina sobre o CP e na segunda faixa de tecido, o tecido é colado, fixado com o rolo de espuma e finaliza-se com uma última camada de resina epóxi. É importante ressaltar que na colocação do tecido é imprescindível que as fibras estejam alinhadas com o eixo longitudinal do corpo de prova.

Após esse processo, são necessárias pelo menos 24h de cura para que a resina epóxi alcance sua resistência máxima.

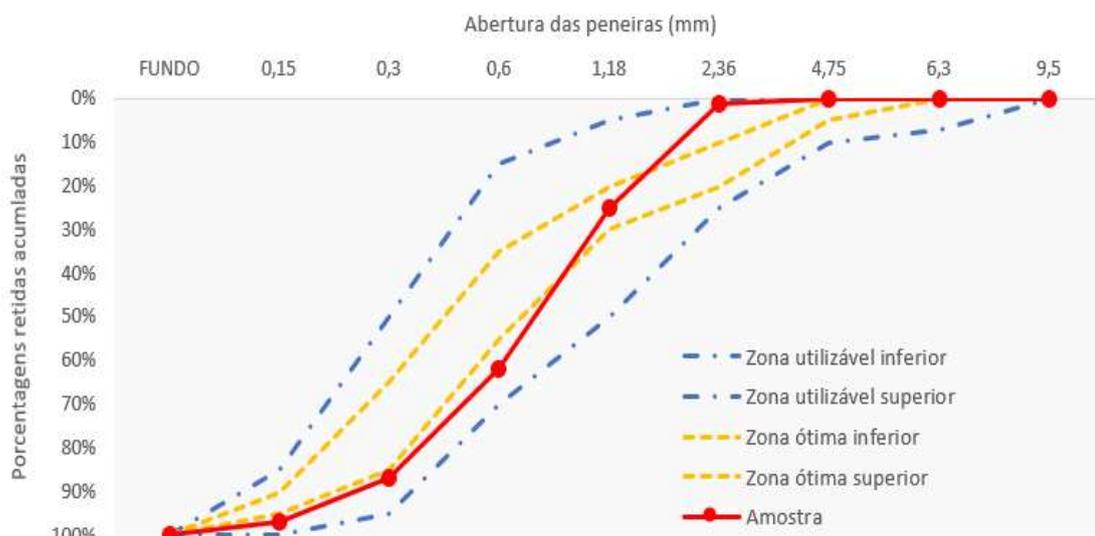
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados os resultados alcançados através da metodologia de trabalho descrita anteriormente.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS

O ensaio de caracterização realizado no agregado miúdo deste trabalho resultou na curva granulométrica apresentada no Gráfico 2, demonstrando que a mesma se encontra dentro da zona utilizável.

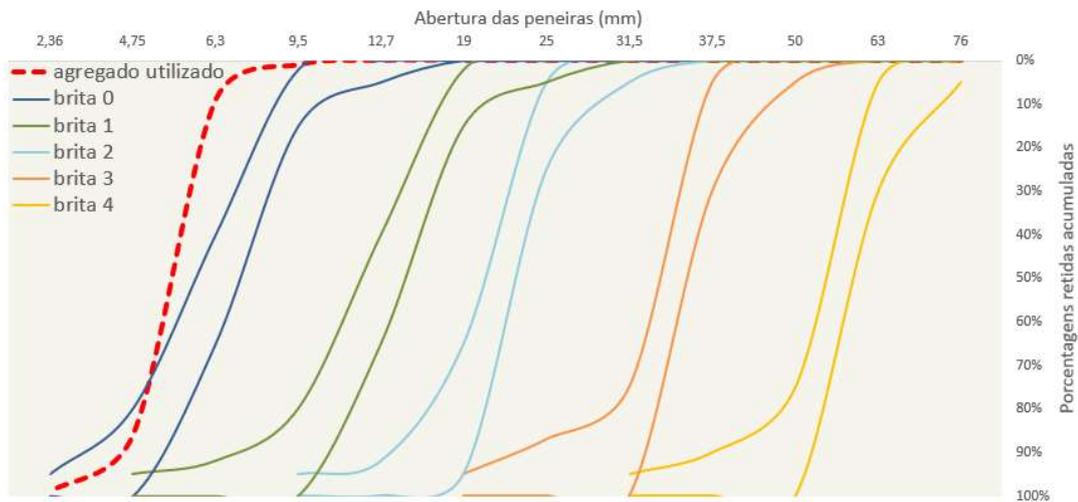
Gráfico 2 – Curva granulométrica da areia média



Fonte: Autor (2019).

O agregado graúdo, assim como o agregado miúdo, foi testado em laboratório de acordo com a norma NBR NM 248:2003. A curva granulométrica encontrada é apresentada no Gráfico 3 e, apesar de não estar dentro dos limites para classificação, a granulometria está próxima da brita 0:

Gráfico 3 – Curvas granulométricas de classificação de agregados graúdo



Fonte: Autor (2019).

#### 4.2 CONFEÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

As formas utilizadas para moldar os corpos de prova foram feitas com madeira de Pinus, com dimensões para vigas com dimensões de 50x15x15cm de modo a atender a norma NBR 5758:2015, conforme a Figura 30:

Figura 30 – Formas dos corpos de prova



Fonte: Autor (2019).

O concreto foi misturado na betoneira, com traço 1:2:3, e despejado dentro das formas em duas camadas para a realização do adensamento manual. Para finalizar, a superfície foi alinhada com uma colher de pedreiro. Na Figura 31 estão apresentadas as etapas de

concretagem dos corpos de prova, sendo: a) concreto, b) adensamento manual em duas camadas, c) alinhamento da superfície superior, e d) corpos de prova concretados.

Figura 31 – Etapas de concretagem dos corpos de prova



Fonte: Autor (2019).

Os 16 corpos de prova foram armazenados em câmara úmida durante o tempo de cura, que totalizaram 28 dias para a primeira leva de 7 CPs.

#### 4.3 ROMPIMENTO DO GRUPO 1

A prensa utilizada foi adaptada às dimensões dos corpos de prova, de forma que a distância dos apoios inferiores até a borda do prisma fosse de 25mm, conforme indicado na NBR 12142:1991. Ainda, o acionamento da carga foi feito de forma manual e com velocidade constante. A Figura 32 apresenta como o corpo de prova foi posicionado.

Figura 32– Ensaio de tração na flexão



Fonte: Autor (2019).

Após a preparação do equipamento, foram rompidos os cinco corpos de prova do Grupo 1 (CPs 1, 2, 3, 4 e 5), de modo a encontrar a resistência do concreto à tração. Os resultados obtidos são representados no Quadro 3 a seguir, e tiveram como média uma resistência de 4,23 MPa:

Quadro 3 – Resultados do ensaio de tração na flexão do Grupo 1

| ID | Status  | Carga máxima de ruptura / carregamento (MPa) |
|----|---------|--|
| 1  | Rompido | 4,43   |
| 2  | Rompido | 4,37   |
| 3  | Rompido | 4,41   |
| 4  | Rompido | 4,11   |
| 5  | Rompido | 3,81   |

Fonte: Autor (2019).

#### 4.4 PRÉ CARREGAMENTO DO GRUPO 2

Após a verificação da resistência à tração do concreto, o Grupo 2 foi submetido a carregamentos para que simulassem estruturas em utilização. A carga aplicada não poderia romper o corpo de prova, e ao mesmo tempo, deveria ser próxima à carga de rompimento. Como o acionamento do equipamento foi feito via manual, a carga à qual os CPs foram submetidos variou de 2,98 MPa a 3,67 MPa, conforme apresentado no Quadro 4.

Quadro 4 – Cargas de pré carregamento do Grupo 2

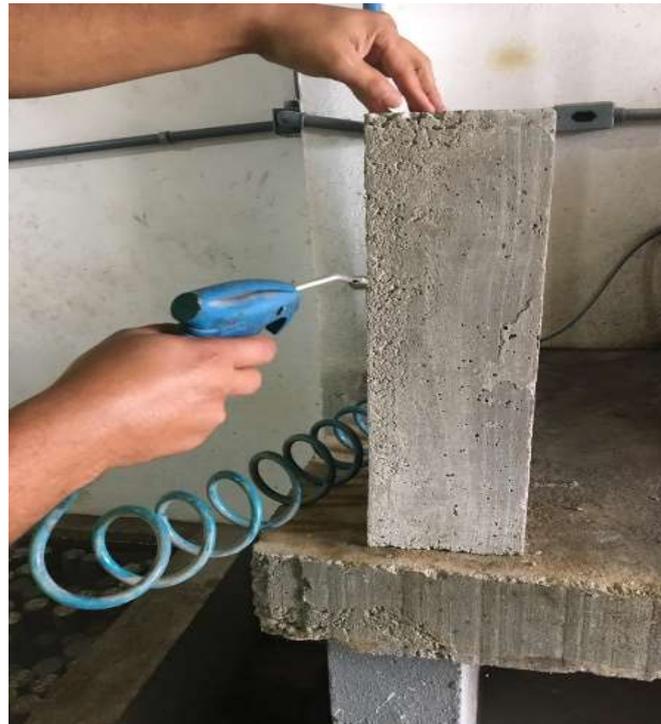
| ID | Status prévio | Carga de Pré Carregamento (MPa) |
|----|---------------|---------------------------------|
| 6  | Pré-Carregado | 3,67                            |
| 7  | Pré-Carregado | 2,98                            |
| 8  | Pré-Carregado | 2,97                            |
| 9  | Pré-Carregado | 3,16                            |
| 10 | Pré-Carregado | 3,33                            |

Fonte: Autor (2019).

#### 4.5 PROCESSO DE REFORÇO COM FIBRA NOS GRUPOS 2 E 3

Após o processo de cura, os corpos de prova foram retirados da água, o Grupo 2 foi pré-carregado e após 15 dias foi iniciado o processo de aplicação da fibra de carbono, pois as superfícies dos corpos de prova já estavam secas. Assim, o Grupo 2 e 3 passaram por jateamento de ar para retirada de impurezas da superfície, como demonstrado na Figura 33.

Figura 33– Limpeza dos corpos de prova



Fonte: Autor (2019).

Em seguida, o tecido de fibra de carbono foi cortado em faixas de aproximadamente 60 cm x 35 cm, tamanho suficiente para cobrir a superfície tracionada do corpo de prova, conforme mostrado na Figura 34. Como seis corpos de prova receberam duas camadas de reforço e as outras cinco receberam apenas uma, foram cortadas 17 faixas.

Figura 34 – Faixas do tecido de fibra de carbono



Fonte: Autor (2019).

Após a limpeza dos corpos de prova e o corte da fibra de carbono, foi preparado o adesivo de resina epóxi. Foram misturados uma unidade do componente A, com 1000g, e uma unidade do componente B, com 800g, respeitando as proporções de 10 partes de resina para 8 de endurecedor. Quando homogeneizada, a mistura adquire uma cor âmbar claro, conforme mostrado na Figura 35. Na figura estão representados: a) componente A - resina; b) componente B - endurecedor; c) início da mistura dos componentes e d) mistura homogênea.

Figura 35 – Preparação do adesivo de resina epóxi



Fonte: Autor (2019).

Com uma espátula e um rolo de espuma, a resina foi aplicada em um dos lados do tecido de fibra de carbono e na superfície inferior do corpo de prova. Como a resina é altamente viscosa, a aplicação na manta teve que ser feita com muito cuidado, em movimentos retilíneos e paralelos às fibras, evitando a separação das mesmas. Em seguida, o tecido foi colocado sobre

o corpo de prova, com as fibras paralelas ao eixo longitudinal do prisma. Para a retirada das bolhas de ar da resina, foi passado um rolo de espuma limpo sobre as fibras e, então, o reforço foi finalizado com uma última camada de resina sobre o tecido. O processo descrito acima está ilustrado na Figura 36, sendo: a) aplicação da resina com espátula; b) tecido impregnado com resina; c) superfície de concreto com resina; d) colocação do tecido sobre o corpo de prova; e) retirada das bolhas de ar com rolo de espuma e f) finalização com resina epóxi.

Figura 36 – Processo de reforço dos corpos de prova com tecido de fibra de carbono



Fonte: Autor (2019).

Alguns corpos de prova receberam duas camadas do tecido de FRP, a nível de comparação de resultados. Nesse caso, a etapa de colagem foi exatamente a mesma, porém adicionando mais uma camada de tecido, também finalizado com resina, conforme apresentado na Figura 37.

Figura 37 – Reforço com duas camadas de tecido de fibra de carbono



Fonte: Autor (2019).

Os corpos de prova reforçados foram armazenados em local seco durante aproximadamente 48h, respeitando o mínimo de 24h de cura da resina epóxi, como demonstra a Figura 38.

Figura 38 – Corpos de prova reforçados



Fonte: Autor (2019).

#### 4.6 ROMPIMENTO DOS CORPOS DE PROVA DOS GRUPOS 2 E 3

Após as 48h de cura, os corpos de prova do Grupo 2 e 3 foram levados para o equipamento de flexão para serem rompidos. O procedimento do ensaio foi o mesmo utilizado com o Grupo 1, respeitando as distâncias dos apoios e a centralização do corpo de prova.

Durante os ensaios, foi percebido um padrão na localização das fissuras dependendo do número de camadas de reforço aplicadas nos corpos de prova. Os corpos de prova reforçados com apenas uma camada de fibra de carbono fissuraram entre os dois pontos de aplicação de carga superiores. Além disso, pôde-se perceber que em alguns corpos de prova houve descolamento do tecido e resina. A Figura 39 indica a localização das fissuras.

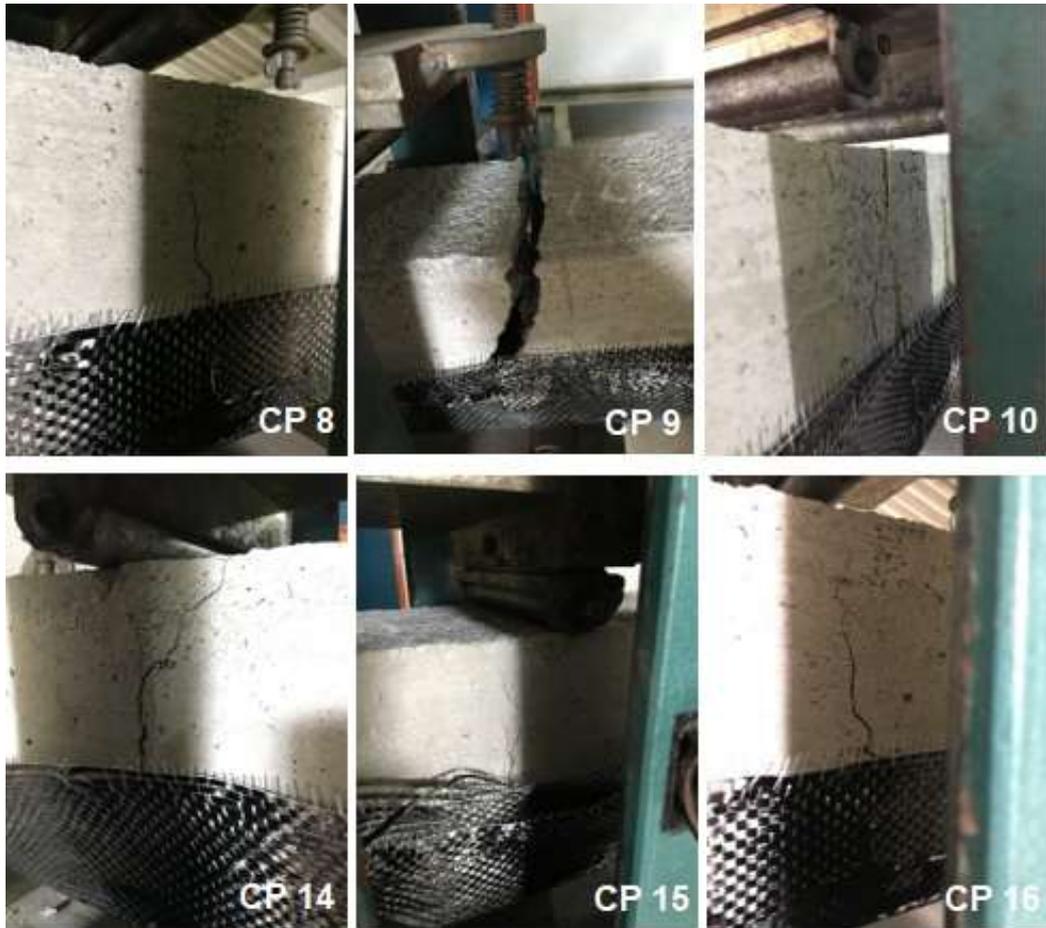
Figura 39 – Corpos de prova reforçados com uma camada de fibra de carbono após o ensaio de tração na flexão



Fonte: Autor (2019).

Nos corpos de prova reforçados com duas camadas, houve primeiro o esmagamento do concreto sob os pontos superiores de aplicação de carga, conforme mostra a Figura 40. Após o esmagamento do concreto, houve a abertura de fissuras sob esses mesmos pontos.

Figura 40 – Corpos de prova reforçados com duas camadas de fibra de carbono após o ensaio de tração na flexão



Fonte: Autor (2019).

Na Tabela 6, abaixo, são apresentados os resultados alcançados.

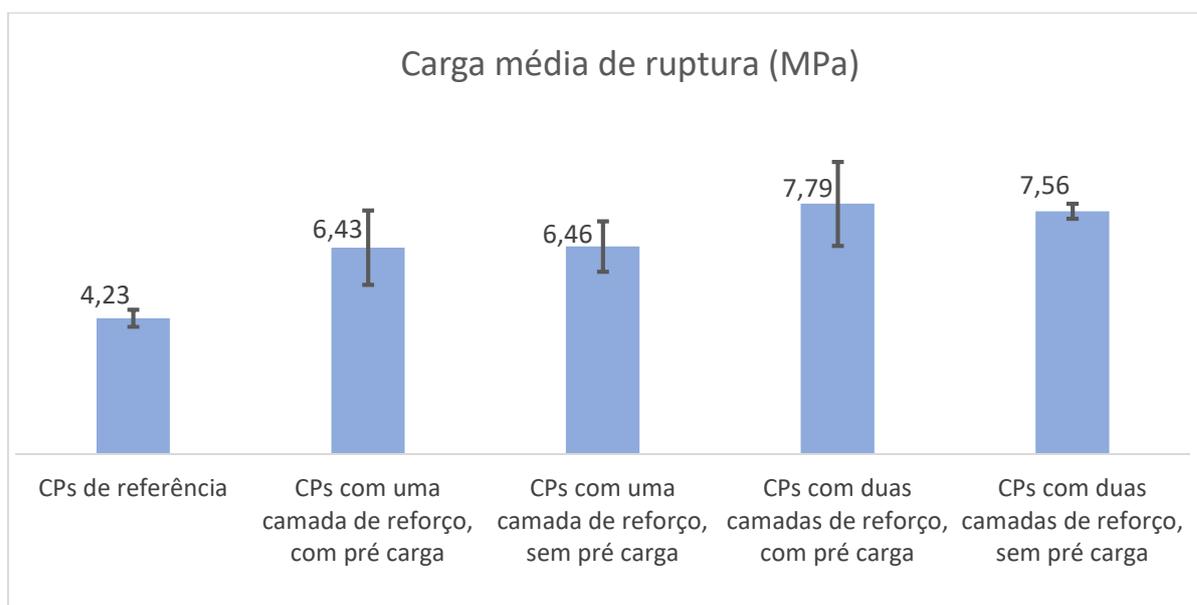
Tabela 6 – Resultados do ensaio de tração na flexão dos Grupos 2 e 3

| ID | Status prévio | Carga de Pré Carregamento | Nº de Camadas de Tecido de Fibra de Carbono | Carga máxima de ruptura / carregamento (MPa) |
|----|---------------|---------------------------|---|--|
| 6  | Pré-Carregado | 3,67                      | 1   | 7,25   |
| 7  | Pré-Carregado | 2,98                      | 1   | 5,61   |
| 8  | Pré-Carregado | 2,97                      | 2   | 7,79   |
| 9  | Pré-Carregado | 3,16                      | 2   | 6,48   |
| 10 | Pré-Carregado | 3,33                      | 2   | 9,09   |
| 11 | Não carregado | -                         | 1   | 5,56   |
| 12 | Não carregado | -                         | 1   | 6,81   |
| 13 | Não carregado | -                         | 1   | 7,01   |
| 14 | Não carregado | -                         | 2   | 7,30   |
| 15 | Não carregado | -                         | 2   | 7,63   |
| 16 | Não carregado | -                         | 2   | 7,74   |

Fonte: Autor (2019).

Os resultados apresentados na Tabela 6 podem ser melhor visualizados no Gráfico 4, em que se observa a carga média de ruptura e o desvio padrão dos CPs de acordo com o número de camadas de reforço e a ocorrência ou não de pré carregamento.

Gráfico 4 – Resultados de tração na flexão dos corpos de prova e o desvio padrão



Fonte: Autor (2019).

## 5 CONCLUSÃO

O reforço de estruturas tem tido, ao longo das últimas décadas, uma importância crescente nas atividades da construção civil. Quando relacionado a patologias ou aumento do desempenho de uma estrutura, o reforço externo apresenta viabilidade, visto que não é necessária a demolição ou retirada dos elementos. Para esse fim, os materiais compósitos TRC e FRP estão sendo cada vez mais estudados e testados, visto que até então têm apresentado ótimos resultados.

Através da pesquisa realizada neste trabalho, percebeu-se que o pré carregamento realizado em alguns corpos de prova não alterou o desempenho final do concreto em relação aos corpos de prova de referência, e o que influenciou no desempenho do concreto à tração na flexão foi a quantidade de camadas de material compósito aplicadas. A situação de reforço desses CPs assimila-se a estruturas escoradas antes do reforço *in loco*, visto que não sofrem carregamentos durante a aplicação dos materiais compósitos.

Quanto ao número de camadas de reforço aplicadas, a diferença no desempenho do concreto foi visível. Os corpos de prova reforçados com apenas uma camada, quando comparados aos CPs de referência, tiveram um aumento de cerca de 52% na resistência à tração na flexão, visto que a resistência média do concreto sem reforço foi de 4,23 MPa contra 6,45 MPa dos CPs reforçados. Já para os CPs que receberam duas camadas de reforço, esse aumento foi de aproximadamente 80%, com uma média de resistência à tração na flexão de 7,67 MPa. Quando comparados os resultados dos reforços com uma e duas camadas de CFRP, há um aumento de 18,9% na resistência dos CPs que receberam duas camadas ao invés de uma.

Além disso, notou-se que a localização das fissuras nos CPs teve um padrão de acordo com a quantidade de camadas de reforço aplicadas. Nos CPs com apenas uma camada de fibra de carbono, as fissuras ocorreram na região situada entre os dois pontos de aplicação de carga do equipamento de flexão, no centro do prisma, indicando ruptura devido à flexão. Em contrapartida, nos CPs com duas camadas de compósitos, a fissuração ocorreu exatamente na região sob os pontos superiores de aplicação da carga, ocorrendo ali o esmagamento do concreto. Tal fato caracteriza uma possível ruptura por cisalhamento devido ao elevado cortante naquele ponto.

Assim, a utilização de compósitos de CFRP como elemento de reforço na região de tração do concreto permitiu aumentos significativos na capacidade de carga do elemento

estrutural, comprovando que o conjunto adesivo mais fibras de carbono elevou a resistência à tração na flexão.

Desta forma, é indicado para futuras pesquisas a análise de viabilidade econômica da aplicação de fibras de carbono comparado a reforços convencionais em estruturas de concreto; análise do reforço estrutural com fibras bidirecionais; análise do desempenho do concreto reforçado com outros tipos de fibra ou então o aprofundamento deste mesmo estudo.

## REFERÊNCIAS

- ADORNO, F. V.; DIAS, F. O.; SILVEIRA, J. C. O. **Recuperação de reforço de vigas de concreto armado**. 2015. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2015.
- ALMEIDA, L. C. **Estruturas IV – Concreto Armado**. Notas de aula FEC Campinas. Unicamp, 2002. 24 p.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440 R – State-of-the-art on fiber reinforced plastic (FRP) reinforcement for concrete structures**. United States, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: Moderna, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: Moderna, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM ISSO-2395**: Peneiras de Ensaio e Ensaio de Peneiramento. Rio de Janeiro: Moderna, 1997.
- BARROSO, Thaís Ribeiro. **Estudo da Atividade Pozolânica e da Aplicação em Concreto de Cinzas do Bagaço de Cana de Açúcar com Diferentes Características Física-Químicas**. 2011. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2011.
- BASTOS, P. S. S. **Fundamentos do Concreto Armado**. Notas de aula. UNESP. Bauru, São Paulo, 2006. 98 p.
- BEBER, A. J. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono**. 2003. 317 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.
- BEBER, A. J. **Reforço de estruturas de concreto com compósitos de fibra de carbono**. Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 1999.
- BERNARDI, S. T. **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aramida kevlar**. 2003. 179 f. Dissertação (Mestrado em 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.
- CAMARGOS, U. A. **Patologia nas obras civis**. Palestra. Belo Horizonte: Instituto IDD, 2013.
- CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado Segundo a NBR 6118:2003**, 3ª. ed. São Carlos: Ed. Edufscar, 2013.

- 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.
- 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.
- COUTO, I. A. **Análise teórica e experimental do comportamento da aderência entre o concreto e barras de fibra de vidro impregnada por polímero**. 2007. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- FREITAS JUNIOR, J. A. **Materiais de construção (TC-031): Agregados**. Material didático. Universidade Federal do Paraná, Departamento de Construção Civil. Curitiba, 2013.
- GRAZIANO, F. P. **Projeto e execução de estruturas de concreto armado**. São Paulo: O Nome da Rosa, 2005.
- GRIES, T.; ROYE, A.; KOLKMANN, A; BARLÉ, M. D.; HANISCH, V., **New Development on Manufacturing Fibers and Textile Structures for Technical Textiles**; International Textile Congress, Terrassa, 2004.
- HOLLAWAY, L. C.; LEEMING, M. B. **Strengthening of reinforced concrete structures using externally bonded FRP composites in structural and civil engineering**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 1999.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE CONCRETO (IBRACON). **CONCRETO & CONSTRUÇÕES**. São Paulo: IBRACON, v. 53, jan./mar. 2009.
- INTELLIGENT SENSING FOR INNOVATIVE STRUCTURES. **Educational Modules about FRP**. Winnipeg: ISIS, 2003. ISIS Educational Modules 1 to 4 – Intelligent Sensing For Innovative Structures, 2003.
- JUVANDES, L. F. P.; MARQUES, A. T.; FIGUEIRAS, J. A. **Materiais compósitos no reforço de estruturas de betão**. Relatório Técnico. 112 p. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1996.
- JUVANDES, L. **Aplicações de compósitos FRP no reforço de estruturas**. In: Simpósio de materiais de construção, FEUP, Porto, 2001.
- KRALL, M. D. **Tests on Concrete Beams with GFRP Flexural and Shear Reinforcements & Analysis Method for Indeterminate Strut-and-Tie Models with Brittle Reinforcements**. 2014. 362 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Civil Engineering, University Of Waterloo, Waterloo, 2014.
- LAPENA, M. H.; MARINUCCI, G.; CARVALHO, O. **Caracterização mecânica de compósito de fibra de basalto unidirecional com matriz epóxi**. In: CBECIMAT – 21º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, Cuiabá, 2014.
- MACHADO, Ari De Paula. **Fibras de Carbono – Manual Prático de Dimensionamento**. Edição BASF, 2006.

- 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.
- MARIANO, José Roberto. **Recuperação estrutural com ênfase no método da protensão externa**. 2015. 50 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.
- MEDVEDYEV O. O.; TSUBULYA Y. L. **Proceedings 49th International Symposiums Exhib. Mater. Proc. Technology**. Long Beach, CA, USA: Society for the Advancement of Material and Process Engineering, 2004.
- MENEGHEL, Juliana Martinelli. **Análise Experimental da Aderência entre o concreto e compósitos com tecido de fibras de carbono**. 2005. 203 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- MENON, Nara Villanova. **Estudo experimental de sistemas de reforço ao cisalhamento em vigas de concreto armado utilizando-se polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC)**. 2008. 332 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- NAAMAN, A. E. **Textile reinforced cement composites: competitive status and research directions**. 2010.
- NAKAMURA, Juliana. **Reparo, reforço e recuperação de concreto**. TÉCHNE, ed. 146, maio 2009. Disponível em: <[techne17.pini.com.br/engenharia-civil/146/artigo285462-1.aspx](http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/146/artigo285462-1.aspx)>. Acesso em: 11 nov. 2017.
- NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- NORRIS, T.; SAADATMANESH, H.; EHSANI, M. R. Shear and flexural strengthening of R/C beams with carbon fiber sheets. **Journal of Structural Engineering**, New York, ASCE. v.123, n.7, July 1997.
- REIS, Francisco José Costa. **Influência do nível de protensão na deformação de estruturas executadas com protensão externa**. 2003. 125 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.
- RE-BAR CHILE. **Barras anticorrosivas de material compuesto com fibra de vidro para refuerzo de homigones sometidos a medio ambientes agressivos**. Chile, s.d.
- RILEM/FIP/CEB. **Bond Teste for Reinforcing Steel, 1. Beam Test (7-11-28D), 2. Pull-Out Test (7-11-128), Tentative Recommendations**, RILEM Journal Materials and Structural, v.6, n. 32, p. 96-105. 1973
- ROSA FILHO, C. D.; SILVA, A. J. C.; PARISI, S. A. **Análise do comportamento mecânico do concreto com adição de fibras de polipropileno e sua atuação no combate às manifestações patológicas**. In: Conferência nacional de patologia e recuperação de estruturas, Recife, 2017.

- SALAVERRÍA, J. H.; CASAS, J. R.; APARICIO, A. C. **Estúdio experimental sobre el uso de fibras de aramidias para reparación y refuerzo de puentes existentes.** IV Congresso Iberoamericano de Patologias das Construções, 1997.
- SANTOS, Euler Wagner Freitas. **Reforço em vigas de concreto armado à flexão por encamisamento parcial.** 2006. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- SILVA, Antonio Bertoldo da; MACIEL, Jussara Cury Socorro. **Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** IGAPÓ, Amazonas, v. 1, p.109-114, 2009.
- SCHIAVON, M. A.; REDONDO, S. U. A.; YOSHIDA, I. V. P.. **Caracterização térmica e morfológica de fibras contínuas de basalto.** Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.
- SOTO, Rafael Cavalcante. **Reforço e recuperação de vigas de concreto armado.**2013. 78 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.
- SOUTO FILHO, Marcello Varella. **Modelagem Numérica de Reforço Estrutural em Vigas de Concreto Armado.** 2002. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.
- SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto.** São Paulo: Pini, 1998.
- STONER, J. G. **Finite Element Modelling of GFRP Reinforced Concrete Beams.** 2015. 360 f. Master of Applied Science in Civil Engineering, University Of Waterloo. Waterloo, 2015.
- TAVARES, D. H. **Análise teórica e experimental de vigas de concreto armadas com barras não metálicas de GFRP.** 2006. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- TAYLOR, G. **Materials in construction: An introduction.** 3. ed. London: Longman Scientific & Technical, 1994.
- TEOBALDO, Izabela Naves Coelho. **Estudo do aço como objeto de reforço estrutural em edificações antigas.** 2004. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
- 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.
- TEXIGLASS. **Tecidos para construção civil.** 2018. Disponível em: <[http://texiglass.com.br/2018/produtos/construcao\\_civil.php](http://texiglass.com.br/2018/produtos/construcao_civil.php)>. Acesso em abr. 2019.
- THANGAL KUNJU MUSALIAR COLLEGE OF ENGINEERING. **Textile Reinforced Concrete.** Karicode, Índia: Dep. Of Civil Engineering, 2017. 27 slides, color.

VERÍSSIMO, G. S.; CÉSAR JÚNIOR, K. M. L. **Concreto Protendido: Fundamentos Básicos**. 4. ed. 78 p. Universidade Federal de Viçosa, Centro de Ciências Exatas, Departamento de Engenharia Civil. nov. 1998.

VIAPOL, **Manual de Reforço em Estruturas de Concreto Armado Reforçado com Fibra de Carbono**. Disponível em: <<http://viapol.com.br/media/97576/manual-fibra-de-carbono.pdf>> Acesso em jun. 2019.

VOTORAN. **Cimento**. 2007. Figuras ilustrativas. Disponível em: <<http://www.solotest.com.br/solotest/solotest.asp>> Acesso em nov. 2017.

YANG, H. H. **Kevlar Aramid Fiber**. Wiley, 1993. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/app.1987.070340406/full>>. Acesso em nov. 2017.

YANG, Y. S.; LEE, L. J. **Microstructure formation in the cure of unsaturated polyester resins**, Polymer, 1988.