

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Kauana Moraes Berton**

**INVESTIGAÇÃO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE VIGAS  
ARMADAS COM BARRAS DE POLÍMERO REFORÇADO COM  
FIBRA DE VIDRO (PRFV) SUBMETIDAS À FLEXÃO**

Santa Maria, RS  
2019

**Kauana Moraes Berton**

**INVESTIGAÇÃO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE VIGAS  
ARMADAS COM BARRAS DE POLÍMERO REFORÇADO COM  
FIBRA DE VIDRO (PRFV) SUBMETIDAS À FLEXÃO**

Trabalho de conclusão apresentado ao  
Curso de Engenharia Civil, da  
Universidade Federal de Santa Maria  
como requisito parcial para obtenção do  
grau de **Bacharel em Engenharia Civil.**

Orientador: Prof. Dr. Almir Barros da Silva Santos Neto

Santa Maria, RS  
2019

**Kauana Moraes Berton**

**INVESTIGAÇÃO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE VIGAS  
ARMADAS COM BARRAS DE POLÍMERO REFORÇADO COM  
FIBRA DE VIDRO (PRFV) SUBMETIDAS À FLEXÃO**

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Civil, da Universidade Federal de Santa  
Maria, como requisito parcial para  
obtenção do grau de **Bacharel em  
Engenharia Civil.**

**Aprovado em 12 de dezembro de 2019:**

---

**Almir Barros da Silva Santos Neto, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/ Orientador)

---

**André Lübeck, Dr. (UFSM)**

---

**Larissa Degliomini Kirchhof, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, RS  
2019

## AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Joana, por ser apoio e abrigo nas horas difíceis, por ser minha melhor amiga e mesmo de longe, fazer-se presente em todos os momentos dessa graduação. Mãe, você foi minha primeira professora, meu exemplo de superação, garra e determinação. Ao meu padrasto, Lucas, por completar nossa família, ser ombro amigo, me apoiar e mostrar que sou capaz.

Aos meus avós, que são a minha base de apoio, meu porto seguro, que sempre estiveram ao meu lado e me ensinaram valores. Vó Matilde, com a senhora aprendi a ser uma mulher forte e determinada, a não ter medo das dificuldades e a amar incondicionalmente. Vô Osvaldo, o senhor foi meu pai, quem me ensinou a ser uma pessoa sensível e de coração gigante.

Aos meus amigos, os quais foram minha família em Santa Maria, em especial à Débora, que desde o primeiro dia na universidade, esteve comigo, choramos nas horas difíceis e superamos as dificuldades, nos divertimos, rimos e fizemos planos, és minha melhor amiga e irmã do coração, obrigada por tornar essa fase da minha vida inesquecível e por trazer a Duda para minha vida. Duda, você é quem está sempre disposta a dar um abraço e me cuidar, tomar mate, conversar, fazer companhia, teu coração gigante me inspira, obrigada por ser tão carinhosa e prestativa. Camila, você foi muito importante durante esses anos, obrigada por se preocupar, por ser parceira de estudo, conversar sobre séries, fazer almoço, dar boas risadas e conselhos. Amo muito vocês.

Aos amigos que fiz durante à graduação, em especial: à Andressa, Gabriela, Eduardo, Justen, Eduarda, Guilherme, Marquezan, Paloma, e às colegas Camila e Jaqueline. Nessa jornada, compartilhamos nossos materiais, ajudamos uns aos outros, torcemos um pelo outro. Vocês foram muito especiais, cada momento compartilhado está guardado em meu coração, torço muito pelo sucesso de vocês e agradeço por fazerem parte desse momento tão especial.

Ao PET Engenharia Civil, o qual tive oportunidade de participar durante 2 anos, agradeço o aprendizado que este grupo me proporcionou e às pessoas que conheci ao longo do caminho. Aos técnicos do LMCC e aos mestrandos Rodrigo e Tobias, que me auxiliaram na realização desta pesquisa, vocês foram essenciais para o sucesso desse estudo.

Aos professores, Almir e André, agradeço pela dedicação, esforço, compreensão e, por acreditarem no meu trabalho. O auxílio e a participação de vocês foram de suma importância nessa pesquisa.

À empresa STRATUS FRP, pela disponibilização do material para estudo e, à cordialidade em conceder todas as informações necessárias.

*“Quem sabe concentrar-se numa coisa e insistir nela como único objetivo, obtém a capacidade de fazer qualquer coisa. ”*

(Mahatma Gandhi).

## RESUMO

### INVESTIGAÇÃO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE VIGAS ARMADAS COM BARRAS DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO (PRFV) SUBMETIDAS À FLEXÃO

**AUTORA:** Kauana Moraes Berton

**ORIENTADOR:** Almir Barros da Silva Santos Neto

O uso de materiais compósitos, como alternativa de reforço, interno ou externo, para as estruturas de concreto vem crescendo significativamente ao longo dos anos, tendo grande aplicabilidade na engenharia civil. Com o avanço da tecnologia de materiais, há uma grande disponibilidade de PRF (Polímero Reforçado com Fibras), comercializados tanto como malhas, quanto em perfis ou vergalhões. Os vergalhões de PRFV (Polímero Reforçado com Fibra de Vidro), apresentam características de resistência à corrosão e não condutividade elétrica, as quais quando empregadas em ambientes agressivos acarretam não só na diminuição do custo de manutenção, como também no aumento da durabilidade da estrutura. Esse estudo tem como objetivo analisar o comportamento teórico e experimental de vigas de concreto armadas com reforço de PRFV, segundo as diretrizes da ACI 440.1R-2015. Foram adotadas três taxas de armadura, a fim de configurar a ruína pela ruptura do reforço de PRFV, ruína pelo esmagamento do concreto e ruína segundo a condição balanceada. A experimentação iniciou com o estudo de dosagem do concreto e ensaios de caracterização da barra de PRFV. As vigas moldadas segundo as três taxas de armadura foram ensaiadas à flexão a quatro pontos, sendo essas de dimensões 20 x 20 x 135 cm e instrumentadas por meio de *strain gauges* e LVDTs (*Linear Variable Differential Transformer*). Os resultados encontrados expõem os deslocamentos encontrados para cada taxa de armadura, as deformações dos materiais ao longo da aplicação do carregamento, bem como a capacidade de suporte das vigas. Esses resultados validam a previsão teórica do comportamento e evidenciam a influência do baixo módulo de elasticidade do PRFV nas deformações das vigas.

**Palavras-chave:** Materiais compósitos. PRFV. Polímero Reforçado com Fibra de Vidro. Concreto reforçado com fibras.

## **ABSTRACT**

### **THEORETICAL-EXPERIMENTAL INVESTIGATION**

**AUTHOR: Kauana Moraes Breton**

**ADVISOR: Almir Barros da Silva Santos Neto**

The use of composite materials as an internal or external reinforcement alternative for concrete structures has been growing significantly over the years and has great applicability in civil engineering. With the advancement of materials technology, there is a great availability of FRP (Fiber Reinforced Polymer), marketed both as meshes and in profiles or rebars. FRP rebars present characteristics of corrosion resistance and non-electrical conductivity, which, when used in aggressive environments, cause not only a reduction in maintenance costs, but also an increase in the durability of the structure. This study aims to analyze the theoretical and experimental behavior of reinforced concrete beams with FRP strengthening, according to the ACI guidelines 440.1R-2015. Three reinforcement rates were adopted in order to configure the ruin by the rupture of the reinforcement of GRP, ruin by the crushing of the concrete and ruin according to the balanced condition. The experimentation began with the study of concrete dosage and characterization assays of the GRP. The beams molded according to the three reinforcement rates were tested to four point bending, which were 20 x 20 x 135 cm and instrumented by strain gauges and LVDTs (Linear Variable Differential Transformer). The results show the displacements found for each reinforcement rate, the deformations of the materials during the loading application, as well as the support capacity of the beams. These results validate the theoretical prediction of the behavior and show the influence of the low elastic modulus of the FRP on the beams deformations.

**Keywords:** Composite materials. FRP. Fiberglass Reinforced Polymer. Fiber reinforced concrete.



## LISTA DE SÍMBOLOS

### Símbolos da ACI 440.1R-15

$A_f$  - Área do reforço de PRF (mm<sup>2</sup>)

$A_{f,bar}$  - Área da barra de PRF (mm<sup>2</sup>)

$b$  - Largura de uma seção retangular (mm)

$C_b$  - Distância da fibra extrema de compressão à linha neutra (mm)

$d$  - Distância da fibra extrema de compressão ao centroide da tensão do reforço (mm)

$E_c$  - Módulo de elasticidade do concreto (MPa)

$E_f$  - Módulo de elasticidade de PRF (MPa)

$f_c'$  - Resistência à compressão do concreto (MPa)

$f_f$  - Tensão na barra de PRF (MPa)

$f_{fu}$  - Tensão de cálculo do reforço de PRF,  $f_{fu} = f_f \cdot C_E$  - onde  $C_E$ : coeficiente de redução ambiental

$M_n$  - Momento nominal (N.mm)

$\epsilon_{cu}$  - Deformação específica do concreto na ruptura

$\epsilon_{fu}$  - Deformação específica do PRF na ruptura

$\rho_f$  - Taxa de reforço de PRF

$\rho_{fb}$  - Taxa de reforço de PRF que produz a condição balanceada

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

ACI – American Concrete Institute

LVDT – Linear Variable Differential Transformer

PRF – Polímero Reforçado com Fibras

PRFV – Polímero Reforçado com Fibra de Vidro

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
1.1 JUSTIFICATIVA.....	13
1.2 OBJETIVOS.....	14
1.2.1 Objetivo Geral.....	14
1.2.2 Objetivos Específicos.....	14
<b>2 MATERIAIS COMPÓSITOS.....</b>	<b>16</b>
2.1 POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS (PRF) .....	16
2.1.1 Matriz Polimérica.....	16
2.1.2 Fibras.....	16
2.1.3 Propriedades Físicas e Mecânicas.....	17
2.1.4 Aplicações na Engenharia Civil.....	19
2.1.5 Durabilidade.....	21
<b>3 ESTRUTURAS ARMADAS COM BARRAS DE PRF.....</b>	<b>22</b>
3.1 VERIFICAÇÃO TEÓRICA DA CARGA DE RUPTURA.....	22
3.1.1 Falha governada pela ruptura do reforço de PRF.....	23
3.1.2 Falha governada pelo esmagamento do concreto.....	24
3.1.3 Falha segundo a condição balanceada.....	24
<b>4 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>27</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....	27
4.1.1 Cimento.....	27
4.1.2 Brita.....	28
4.1.2 Abatimento.....	28
4.2 TRAÇO DO CONCRETO.....	29
4.3 TRAÇO DO CONCRETO.....	29
4.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS BARRAS DE PRFV.....	30
4.2.1 Área da Seção Transversal.....	31
4.2.2 Ensaio de Resistência à Tração.....	31
4.5 ROTEIRO EXPERIMENTAL.....	33
4.6 ANÁLISE TEÓRICA.....	33
<b>5 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>43</b>

5.1 ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS.....	43
5.2 ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA.....	48
5.3 CARGA DE RUPTURA.....	52
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>54</b>
<b>7. SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>55</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>56</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>57</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>58</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o aço é o material para reforço de estruturas de concreto mais utilizado no Brasil, no entanto, o seu emprego nem sempre é o mais adequado. Adverso à ciência dos materiais, a qual está em constante avanço tecnológico, a implementação de novos materiais de construção civil, mesmo que lentamente, vem proporcionando uma gama de produtos alternativos para este segmento como por exemplo, os polímeros reforçados com fibras, que de acordo com as propriedades descritas na ACI 440.1R-15, possuem propriedades de elevada resistência à tração, resistência à corrosão e a ataques químicos.

Silva e Garcez (2010) explicam que as fibras podem ser utilizadas tanto como reforço externo quanto reforço interno, em estruturas de concreto. Para o reforço externo, as variações de fibras utilizadas são: tecido e mantas. Além disso, a união da fibra com uma matriz polimérica resulta em um composto denominado Polímero Reforçado com Fibras, o qual pode ser comercializado como perfis ou vergalhões.

Conforme a ACI 440.1R-2015 – *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars*, após a Segunda Guerra Mundial, os materiais compósitos vêm sendo inseridos no mercado, devido a necessidade da disponibilidade de materiais de fabricação simplificada e rápida, para atender a demanda da época. O processo de pultrusão, é utilizado para a fabricação de materiais compósitos, como barras de PRF (Polímero Reforçado com Fibras), que permite a produção contínua de barras de uma mesma seção transversal (NANNI, DE LUCA, ZADEH, 2014).

As barras de PRF são constituídas de uma matriz polimérica envolvidas por uma resina, em que as fibras têm a função de suportar as cargas e a resina deve possuir a capacidade de manter as fibras unidas e protegidas do meio externo. Fibras de aramida, carbono e vidro são as mais utilizadas na fabricação de barras de PRF. A resina empregada na constituição da barra pode ser de origem epóxi, poliéster ou vinil-éster.

O comportamento mecânico dos vergalhões FRP difere do comportamento dos vergalhões de aço convencionais. Os compósitos de PRFV são anisotrópicos, lineares e elásticos até a falha e são caracterizados por alta resistência à tração somente na direção das fibras, sem ceder. Um membro de concreto flexionado, reforçado com vergalhões de PRF geralmente experimenta fissuras extensas e grandes deflexões antes da falha, o que é, tipicamente, repentino e catastrófico. (NANNI, DE LUCA, ZADEH, 2014, p. 5-6).

Um dos grandes problemas que afeta a durabilidade de estruturas de concreto é a corrosão das armaduras, principalmente, quando as estruturas estão situadas em regiões com classe de agressividade ambiental elevada. As barras de PRF, apresentam características de resistência à íons clorídricos e ataques químicos, alta resistência à tração, baixo peso por metro e não condutividade elétrica.

A ACI 440.1R-2015 evidencia as diferenças entre vergalhões de PRF e aço. Inicialmente, analisando o comportamento à ruína, o PRF se mantém elástico até a ruptura, no entanto, o aço escoá. Além disso, a resistência à tração do PRF é superior ao aço, contudo, o dimensionamento de estruturas armadas com barras de PRF é conduzido, geralmente, pelo limite de serviço, em virtude do baixo módulo de elasticidade desse material.

## **1.1 Justificativa**

Devido aos problemas decorrentes à durabilidade das estruturas de concreto armado, convencionalmente reforçadas com barras de aço, surge a necessidade de estudos e aprimoramento de materiais, além de técnicas alternativas, a fim de amenizar alguns danos recorrentes, como a corrosão, presente principalmente em ambientes de classe de agressividade ambiental elevada.

Os polímeros reforçados com fibras estão sendo utilizados de diversas formas em estruturas, como malha, barras, tanto como em armadura principal como em reforços de emergência. Para o emprego desses materiais, é primordial que ocorra a discussão e a análise de alguns fatores, entre eles, as propriedades físicas e mecânicas, as composições químicas, o comportamento frente a ambientes agressivos e à altas temperaturas.

No Brasil, ainda não há norma vigente para estruturas construídas com PRFV, fator este que reforça a relevância da pesquisa e a experimentação dos materiais comercializados no país, a fim de, posteriormente, serem desenvolvidas normas e

métodos de dimensionamento, aplicados ao material disponível no mercado brasileiro. Além disso, dispendo do domínio do comportamento desses materiais empregados em estruturas, surgirá a possibilidade de originar parâmetros e exigências de qualidade dos fabricantes.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivos Gerais**

Aplicar o procedimento de cálculo da capacidade de suporte de vigas armadas com barras de PRFV, submetidas a flexão, considerando diferentes taxas de armadura, segundo a ACI 440.1R-15.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Avaliar as propriedades mecânicas, como a resistência à tração e o módulo de elasticidade de barras de Polímero Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV);
- Avaliar experimentalmente o comportamento à flexão em vigas de concreto armado, considerando os tipos de ruína preconizados pela ACI 440.1R-2015;
- Comparar os resultados experimentais com os valores calculados teoricamente, em termos de deslocamento, deformação específica e carga de ruptura.

## 2 MATERIAIS COMPÓSITOS

### 2.1 POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS (PRF)

#### 2.1.1 Matriz Polimérica

As matrizes poliméricas que compõe as barras de PRF são resinas termofixas, dentre elas, epóxi, vinil éster e poliéster, as quais possuem boa capacidade de processo e resistência química. (WU e EAMON, 2017).

O Quadro 1 é composto pelo resumo das propriedades das resinas de acordo com Nanni et. al (2014):

**Quadro 1: Resumo das características das matrizes poliméricas.**

TIPO DE RESINA	VANTAGENS	DESVANTAGENS
<b>Epóxi</b>	Elevada resistência mecânica, boa aderência a diferentes tipos de fibras, alta resistência à corrosão	Alto custo e longo processo de cura.
<b>Vinil Éster</b>	Boa resistência a álcalis, boa adesão à fibra de vidro, resistência a ataques químicos e alta resistência.	Baixa resistência ao impacto.
<b>Poliéster</b>	Boas propriedades mecânica e química, estabilidade dimensional.	Utilização limitada devido à baixa resistência química.

FONTE: elaborado pela autora.

#### 2.1.2 Fibras

Os compósitos de PRF consistem em dois constituintes principais: um constituinte de carga, ou seja, as fibras e uma matriz polimérica, utilizada como ligante e elemento de proteção das fibras. No processo de fabricação dos vergalhões, normalmente os três tipos de fibras mais utilizadas em PRF são: aramida, carbono e vidro, salientando que ambas,



possuem propriedades elásticas. (WU e EAMON, 2017). Seguem, as principais características das fibras, conforme o Quadro 2.

**Quadro 2: Resumo das propriedades das fibras.**

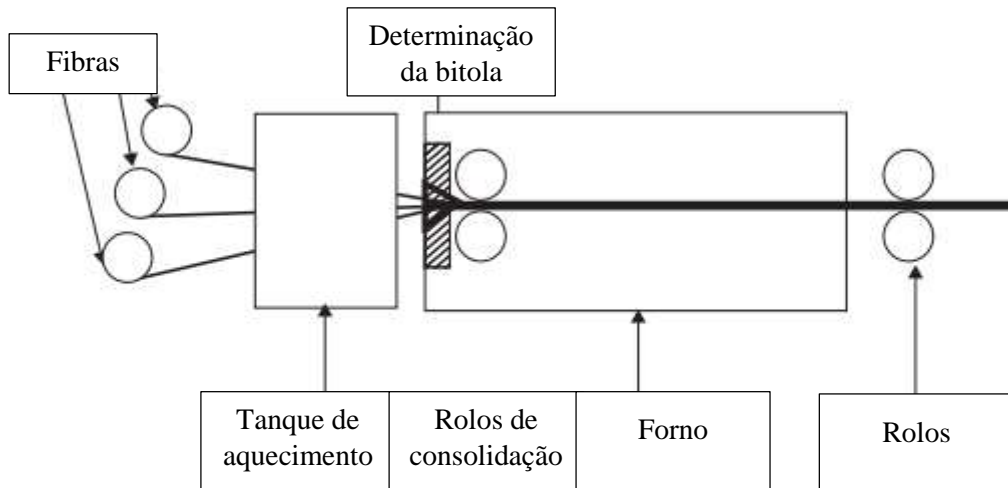
TIPO DE FIBRA	CARACTERÍSTICAS	
<b>Fibra de Vidro</b>	I. E-glass (electrical)	Alto isolamento elétrico, baixa suscetibilidade à umidade, alta resistência mecânica.
	II. S-glass (high-strength)	Alta resistência à tração e módulo de elasticidade, entretanto possui alto custo.
	III. AR-glass (alkali-resistance)	Alta resistência ao ataque de álcali.
<b>Fibra de Carbono</b>	Alta resistência à fadiga, ao ataque de alcáli ou ácido, baixo coeficiente de expansão térmica, contudo possui baixa resistência ao impacto e alta condutividade elétrica.	
<b>Fibra de Aramida</b>	Possui baixa densidade, alta dureza, alta resistência ao impacto, bom isolante de eletricidade e calor, entretanto é sensível à luz ultravioleta e a umidade.	

FONTE: elaborado pela autora.

### 2.1.3 Processo de Fabricação de Barras de PRF

Dentre os processos de fabricação de vergalhões de PRF, a pultrusão pode ser considerado como um dos processos mais usuais. Trata-se de um processo contínuo de fabricação, onde o comprimento é praticamente ilimitado e garante uma superfície lisa à barra e/ou perfil (BIRON, 2018). Esse processo de fabricação pode ser utilizado para todos os tipos barras com fibras longas. A Figura 1 apresenta um *layout* do processo de fabricação por meio da pultrusão.

**Figura 1: Processo de pultrusão.**



FONTE: (Biron, 2018).

Biron (2018) descreve o processo de pultrusão de resinas termofixas nas seguintes etapas:

- A fibra passa por um tanque onde é envolta pela matriz polimérica;
- A seção (diâmetro) é obtida por meio de um molde;
- O composto é consolidado em um forno aquecido;
- Um grupo de tração garante a movimentação da barra ou perfil.

Os sistemas adicionais possibilitam curvar o perfil, mas a forma da seção criada pela matriz é equivalente em todo o comprimento. Os pultrudados podem ser cortados nas dimensões pré-determinadas em projeto ou armazenados em bobinas. Esse sistema torna-se vantajoso pela continuidade do processo fabril e pela redução do desperdício na execução de obras.

A Figura 2 exemplifica vergalhões de PRFV fabricados pelo processo de pultrusão. A superfície das barras é assinalada pelas nervuras compostas pelas fibras e a resina. A coloração das barras varia de acordo com os materiais componentes, nesse caso, a combinação utilizada é de fibras de vidro e resina éster-vinílica.

**Figura 2: Detalhes de vergalhões de PRFV.**



FONTE: elaborado pela autora.

#### **2.1.4 Aplicações na Engenharia Civil**

O emprego de barras de Polímero Reforçadas com Fibras (PRF) utilizado como reforço no concreto, em substituição ao aço, justifica-se em função da diminuição do risco de corrosão, principalmente em estruturas localizadas em ambientes agressivos, como áreas marinhas ou locais expostos à saís de degelo (NANNI, DE LUCA, ZADEH, 2014).

De acordo com a ACI 440.1R-15, o reforço com barras de PRF vem se tornando usual em países como, Estados Unidos, Japão, Canadá, entre outros, principalmente em construções à beira-mar e em tabuleiros de pontes. As Figuras 3 e 4 apresentam exemplos de obras em que barras de PRF foram utilizadas como armadura principal.

**Figura 3: Emma Park Bridge Utah. (EUA).**



Fonte – ACI 440.1R-15.

**Figura 4: Cookshore-Eaton – Quebec (CAN).**



Fonte: (NANNI, 2014.)

Conforme a empresa “STRATUS FRP”, fabricante de perfis e vergalhões de PRFV e parceira desse estudo, no Brasil, a utilização desses materiais ainda é restrito e está em fase de expansão. Contudo, de acordo com o acervo de obras da empresa, os vergalhões de PRFV foram utilizados nas seguintes obras:

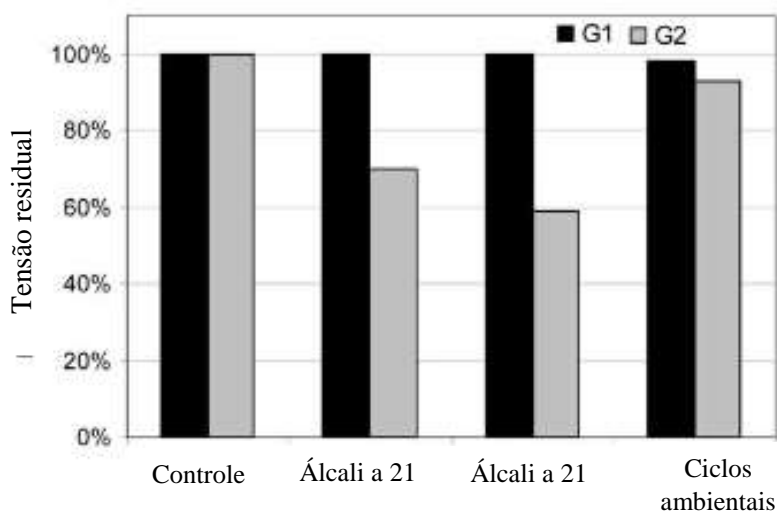
- Metrô de Fortaleza, os vergalhões foram empregados na pregagem de linha de frente de escavação e na confecção das lamelas da parede diafragma para produção da técnica de *Soft Eye*, a construtora responsável foi o consórcio Cetenco – Acciona;
- Metrô de São Paulo, o vergalhão foi empregado na pregagem de linha de frente das linhas lilás e verde, a construtora responsável foi a Queirós Galvão;
- Rodovia Dom Pedro, o vergalhão foi empregado nas praças de pedágio onde existem sensores do Sem Parar, o responsável foi a concessionária Rota das Bandeiras;
- Rodoanel, o vergalhão foi empregado na enfilagem de linha de frente da escavação dos túneis do Rodoanel pela empresa Toniolo.

### 2.1.5 Durabilidade

De acordo com Micelli e Nanni (2004), a exposição à umidade e ao meio alcalino podem produzir perda de resistência e rigidez nos PRF. A fim de analisar o comportamento frente às condições adversas, diferentes composições PRF foram expostas a: ambiente alcalino, situação de gelo e degelo, umidade, variação de temperatura e raios UV.

Quanto as barras de PRFV, a Figura 5 apresenta os resultados obtidos considerando barras de PRFV compostas por *E-glass* e matrizes termoplástica (G1) e poliéster (G2). Submetidas a soluções alcalinas e à ambiente agressivo, as barras constituídas de resina termoplástica praticamente não sofreram perda de resistência e de maneira oposta, nas barras com matriz composta por resina poliéster verificou-se perda de até 30% da resistência.

**Figura 5: Redução da resistência em função do meio.**

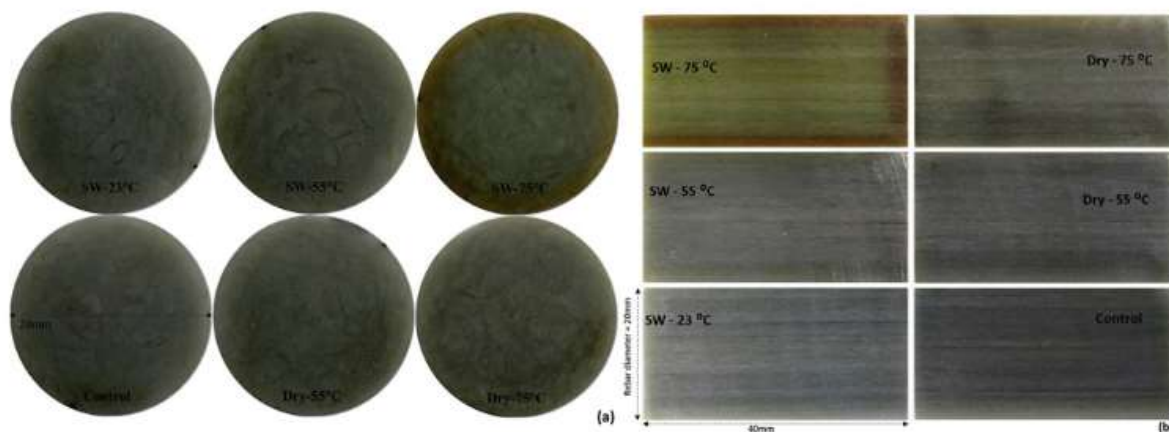


FONTE: Micelli e Nanni (2004).

A durabilidade de barras de PRFV condicionadas à água do mar e na condição seca foi investigada por Swapan (2019), em que as amostras de diâmetro 20 mm foram expostas a essas condições e à variação de temperatura: 23, 55 e 75°C, por períodos de 0, 8 e 20 meses. Verificou-se que a resistência ao cisalhamento transversal diminuiu quando as amostras foram condicionadas em água do mar à temperatura elevada. Houve a

plastificação e a deterioração na interface fibra/matriz da barra de PRFV, como resultado da imersão das amostras na água do mar e a exposição a diferentes temperaturas.

**Figura 6: Deterioração do PRFV.**



FONTE: Swapan (2019).

### 3 ESTRUTURAS ARMADAS COM BARRAS DE PRFV

De acordo com a ACI 440.1R-15, a falha de estruturas de concreto armado pode ocorrer devido a ruptura do reforço, neste caso a ruptura do PRFV, ao esmagamento do concreto ou devido a falha balanceada, ou seja, a ruptura simultânea dos materiais. O binário resistente é constituído pela força exercida pelo concreto e pela força exercida pela armadura de PRF (Polímero Reforçado com Fibras).

No Quadro 3, pode-se visualizar as três formas de ruína em estruturas de concreto armado, com reforço de PRF:

**Quadro 3: Formas de ruptura de uma estrutura com reforço PRF.**

	<p>Falha governada pelo esmagamento do concreto</p>
	<p>Falha na condição balanceada</p>
	<p>Falha governada pela ruptura da barra de PRF</p>

FONTE: Adaptado de ACI440.1R-15.

### 3.1 Verificação Teórica da Carga De Ruptura

De modo a configurar as três formas de ruína descritas na ACI 440-1R-15, o processo de cálculo da armadura de flexão foi elaborado de forma inversa ao método convencional. Nesse caso, adotou-se as taxas de armadura a serem utilizadas, classificando a estrutura conforme à forma ruína e posteriormente, calculou-se os momentos fletores atuantes.

A taxa de armadura de PRF ( $\rho_f$ ) é determinada por meio da Equação 1, a qual expressa a relação entre a área de armadura ( $A_f$ ) e a área de concreto da seção transversal ( $b.d$ ).

$$\rho_f = \frac{A_f}{b \cdot d} \quad (1)$$

A distribuição de tensões do diagrama parábola-retângulo pode ser aproximada por um retângulo de largura  $0,85 \cdot f_c'$ . b.a, em que  $f_c'$  é a resistência à compressão do concreto,  $b$  é a largura da seção. A profundidade da parábola-retângulo é representada por  $\beta_1 \cdot c$ , em que  $\beta_1$  é um fator de resistência do concreto e  $c$  é a distância entre a fibra extrema de compressão e a linha neutra, como definido na seção 7.2.1 da ACI 440.1R-15. Para as resistências iguais ou maiores que 28 MPa,  $\beta_1$  assume o valor de 0,85. No entanto, para as resistências menores que 28 MPa, esse fator é reduzido continuamente 0,05 a cada 7 MPa. Contudo, o fator de correção ( $\beta_1$ ) não deve assumir valores inferiores à 0,65.

Por meio da Equação 2, obtém-se a taxa de armadura, correspondente à condição de falha balanceada ( $\rho_{fb}$ ), considerando a resistência à compressão do concreto ( $f_c'$ ), a resistência à tração de cálculo do PRF ( $f_{fu}$ ), o módulo de elasticidade do PRF ( $E_f$ ) e a deformação específica de encurtamento do concreto na ruptura ( $\epsilon_{cu}$ ).

$$(2) \quad \rho_{fb} = 0,85 \cdot \beta_1 \cdot \frac{f_c'}{f_{fu}} \cdot \frac{E_f \cdot \epsilon_{cu}}{E_f \cdot \epsilon_{cu} + f_{fu}}$$

O Quadro 4, denota a classificação em relação à falha da estrutura, de acordo com a ACI 440.1R-15:

**Quadro 4: Classificação da ruína da estrutura.**

$\rho_f > \rho_{fb}$	Falha por esmagamento do concreto
$\rho_f < \rho_{fb}$	Falha por ruptura da barra
$\rho_{fb} < \rho_f < 1,4 \rho_{fb}$	Condição de falha balanceada

FONTE: adaptado de ACI 440.1R-15.

**3.1.1 Falha governada pela ruptura do reforço de PRF**

Quando a ruína da estrutura for caracterizada pela ruptura do reforço de PRF, será fundamental a verificação da solicitação de tensão atuante nas barras ( $f_f$ ). Esse valor de tensão deverá ser igual ou inferior à resistência característica das barras ( $f_{fu}$ ).



$$f_f = \left( \sqrt{\frac{(E_f \cdot \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0,85 \cdot \beta_1 \cdot f'_c}{\rho_f} \cdot E_f \cdot \varepsilon_{cu}} - 0,5 E_f \cdot \varepsilon_{cu} \right) \leq f_u \quad (3)$$

Verificada a relação estabelecida na Equação 3, há a possibilidade de determinar o valor do momento nominal ( $M_n$ ), em uma seção de largura  $b$  e altura  $d$ . Sendo que  $\rho_f$  é a taxa de reforço de PRFV e  $f_f$  é a tensão na barra de PRFV.

$$M_n = \rho_f \cdot f_f \cdot \left( 1 - 0,59 \cdot \frac{\rho_f \cdot f_f}{f'_c} \right) \cdot b \cdot d^2 \quad (4)$$

### 3.1.2 Falha governada pelo esmagamento do concreto

A Equação 6, permite o cálculo do momento nominal atuante na estrutura, quando a ruína ocorre através do esmagamento do concreto, nesse caso, a taxa de armadura de PRF ( $\rho_f$ ) é menor do que a armadura para atender a condição balanceada ( $\rho_{fb}$ ). Dessa forma, considerando  $c_b$  que é a distância entre a fibra mais comprimida e a linha neutra, conforme a Equação 5. Considerando  $\varepsilon_{fu}$  como sendo a deformação específica do PRFV na ruptura.

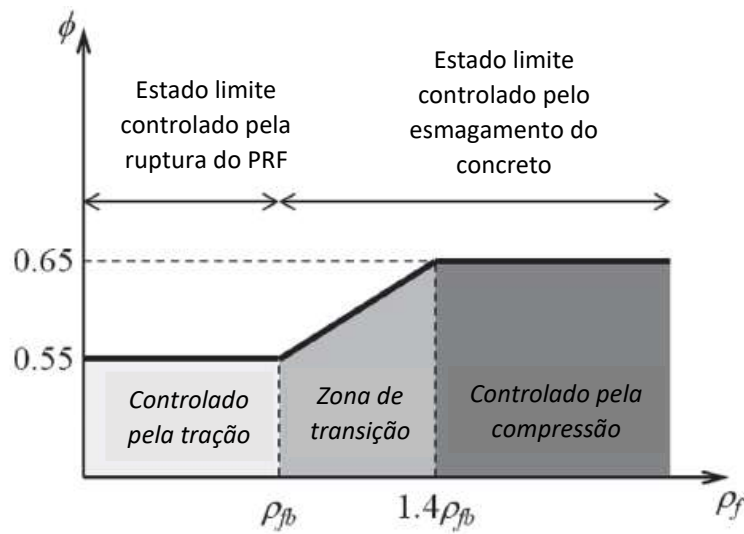
$$c_b = \left( \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \right) \cdot d \quad (5)$$

$$M_n = A_f \cdot f_{fu} \cdot \left( d - \frac{\beta_1 \cdot c_b}{2} \right) \quad (6)$$

### 3.1.3 Falha segundo a condição balanceada

A ocorrência da falha balanceada corresponde à relação expressa no Quadro 4, ou seja, a taxa de armadura de PRF ( $\rho_f$ ), deve estar entre os limites de  $\rho_{fb}$  e  $1,4 \rho_{fb}$ . Conforme a Figura 7, a falha balanceada está incluída na região controlada pelo esmagamento do concreto, isto é, o momento nominal ( $M_n$ ) para essa condição pode ser determinado pela Equação 6.

**Figura 7: Fator de redução da resistência.**



FONTE: ACI 440.1R-15.

O fator de redução da resistência à flexão ( $\phi$ ), deve ser utilizado, a fim de aumentar a resistência do elemento estrutural, visto que, os vergalhões de PRF não possuem comportamento dúctil. Os valores adotados para  $\phi$ , variam de acordo com a zona de tensão, em que a estrutura se encontra, conforme a Equação 7.

$$\phi = \begin{cases} 0,55 \text{ para } \rho_f \leq \rho_{fb} \\ 0,3 + 0,25 \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \text{ para } \rho_{fb} < \rho_f < 1,4 \rho_{fb} \\ 0,65 \text{ para } \rho_f \geq 1,4 \rho_{fb} \end{cases} \quad (7)$$

## 4 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL

Os ensaios de caracterização dos agregados e da barra de PRFV, bem como a instrumentação e o ensaio das vigas foi realizado no Laboratório de Materiais e Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal de Santa Maria.

A investigação experimental seguiu o roteiro ilustrado na Figura

ROTEIRO EXPERIMENTAL	
I)	Investigação do traço do concreto;
II)	Ensaio de caracterização da barra de PRFV;
III)	Montagem das fôrmas e armaduras;
IV)	Instrumentação das barras de PRFV com <i>strain gauges</i> ;
V)	Concretagem das vigas;
VI)	Instrumentação do concreto com <i>strain gauges</i> ;
VII)	Instrumentação das vigas com LVDTs;
VIII)	Ensaio das vigas.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

#### 4.1.1 Cimento

Para a dosagem do concreto foi utilizado: cimento CP II – Z 40, da marca Votorantim, com as seguintes características, conforme a Tabela 1.

**Tabela 1: Propriedades do cimento.**

CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO	
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,98

Fonte: elaborado pela autora.

#### 4.1.2 Areia

O agregado miúdo, utilizado no concreto, é proveniente da região de Santa Maria/RS. O ensaio de caracterização, foi realizado segundo a NBR/NM 52:2009. Sendo que a granulometria ocorreu conforme o procedimento, descrito na NBR/NM 248:2003, de acordo com a Tabela 2:

**Tabela 2: Propriedades do agregado miúdo.**

CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO	
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,62
Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,39
Módulo de Finura	2,24
Dimensão Máxima Característica (mm)	

Fonte: elaborado pela autora.

#### 4.1.3 Brita

O ensaio de determinação das propriedades físicas, do agregado graúdo, foi realizado, segundo a norma NBR/NM 45:2006 e a granulometria, conforme procedimento descrito na NBR/NM 248:2003, consoante a Tabela 3.

**Tabela 3: Propriedades da brita.**

CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO	
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,51
Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,41
Módulo de Finura	1,01
Diâmetro Máximo Característico (mm)	19,00

Fonte: elaborado pela autora.

#### 4.1.4 Abatimento

Para o concreto utilizado nas vigas, determinou-se um abatimento de 80 mm (+/- 2). Parâmetro este que foi controlado por meio do *Slump Test* ou Ensaio de Tronco de Cone, como pode ser visto na Figura 8.

**Figura 8: *Slump Test*.**



FONTE: elaborado pela autora.

#### 4.2 TRAÇO DO CONCRETO

De acordo com HELENE e TERZIAN (1993), para a definição de um traço de interesse é recomendado, primeiramente, a elaboração de três traços de referência, utilizando os materiais selecionados para o estudo.

Esses traços consistem em diferentes teores, de materiais secos, conforme o Quadro 5.

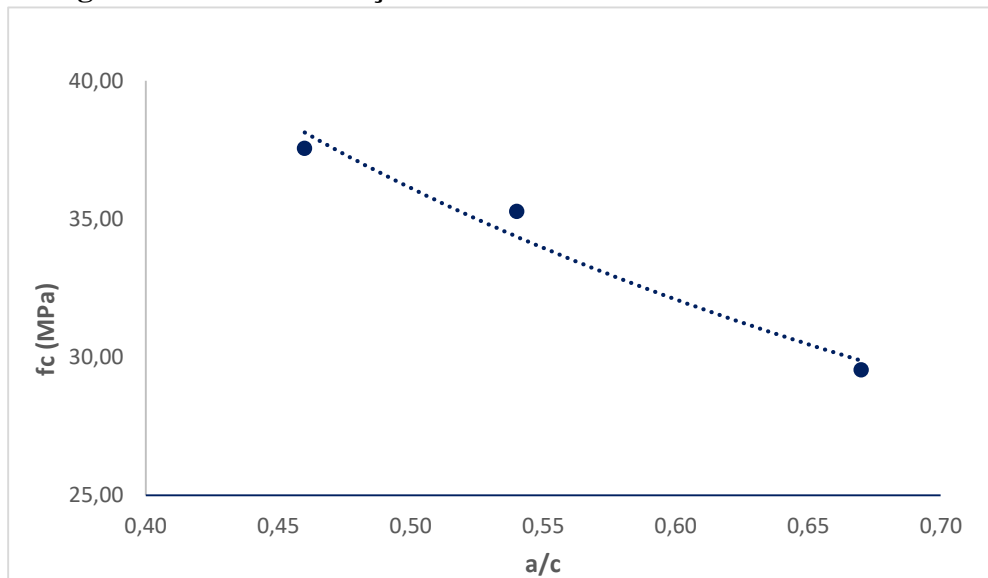
**Quadro 5: Traços de referência.**

TEOR DE MATERIAIS SECOS	DENOMINAÇÃO
3,5	Traço rico
5,0	Traço médio
6,5	Traço pobre

FONTE: elaborado pela autora.

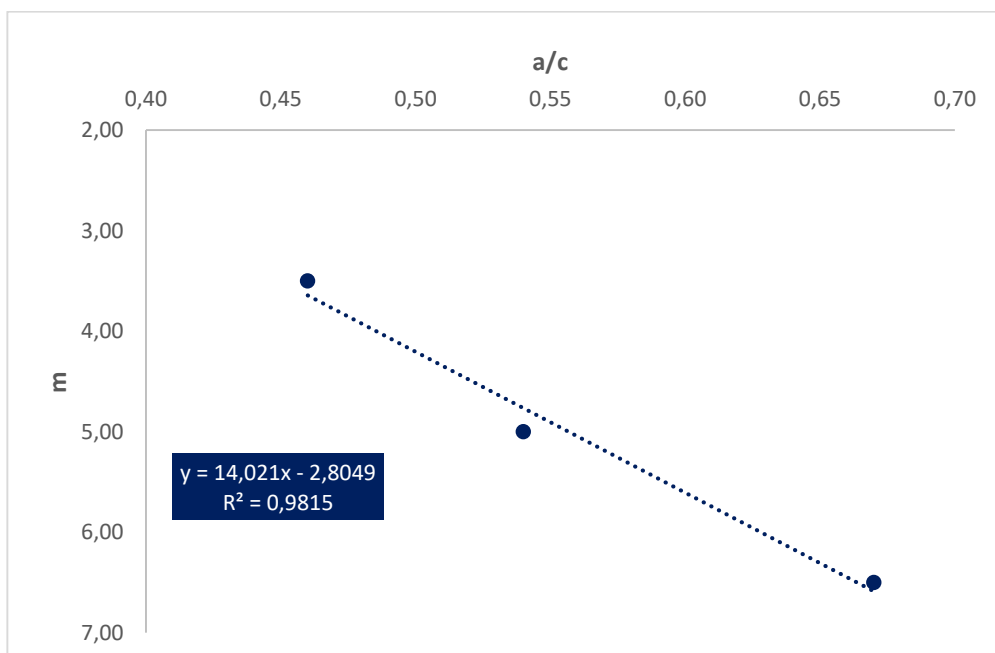
A Figura 9 ilustra a relação entre a resistência à compressão do concreto ( $f_c$ ) a relação água/cimento ( $a/c$ ), considerando os teores de argamassa testados. A partir da equação da reta, obtém-se a relação  $a/c$  para a resistência estabelecida e na sequência, encontra-se o teor de materiais secos ( $m$ ), por meio da Figura 10.

**Figura 9: Estudo do traço - Resistência x  $a/c$ .**



FONTE: elaborado pela autora.

**Figura 10: Estudo do traço - Teor de materiais secos.**



FONTE: elaborado pela autora.

Para a moldagem das vigas em estudo, foi adotada uma resistência, característica do concreto de  $f_{cm} = 35 \text{ MPa}$ . Através das Figuras 9 e 10, obteve-se a relação água/cimento e o teor de materiais secos, respectivamente, considerando a resistência de 35 MPa. A Tabela 4 apresenta o teor de argamassa, o teor de materiais secos e o traço unitário do concreto desenvolvido.

**Tabela 2: Propriedades do Concreto.**

PROPRIEDADES DO CONCRETO	
Teor de argamassa	52 %
Teor de materiais secos (m)	4,8
Traço Unitário	1 : 1,955 : 2,728

FONTE: elaborado pela autora.

### 4.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS BARRAS DE PRFV

As barras Polímero Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV), empregadas nesse estudo foram doadas pela empresa STRATUS FRP, fabricante de vergalhões e perfis pultrudados.

#### 4.3.1 Área da Seção Transversal

A área da seção transversal foi determinada por meio do Princípio de Arquimedes, descrito na ASTM D7205/D7205M – 2006. Esse ensaio é relevante devido a variações na seção transversal pela presença das nervuras. A área da seção transversal ( $A_{f,bar}$ ) é obtida pela relação entre a coluna de água deslocada ( $\Delta H$ ) e comprimento da amostra ( $H_{total}$ ), conforme a Equação 9:

$$A_{f,bar} = \frac{\Delta H}{H_{total}} \quad (9)$$

Após, conhecida a área da seção transversal, calculou-se o diâmetro nominal da barra, conforme a Equação (10), descrita na norma ASTM D7205/D7205M – 2006.

$$D = 2 \cdot \sqrt{\frac{A_{f,bar}}{3,1416}} \quad (10)$$

**Figura 11: Aplicação do Método de Arquimedes.**



FONTE: elaborado pela autora.

De acordo, com a aplicação do método de Arquimedes (Figura 11), obteve-se o diâmetro nominal de 8 mm, para a barra de PRFV em estudo.

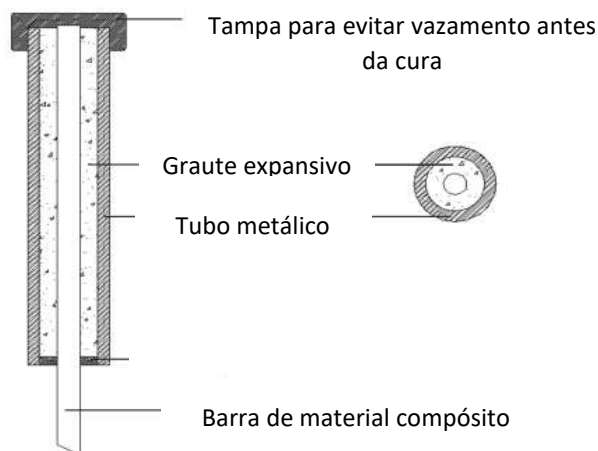
#### **4.2.2 Ensaio de Resistência à Tração**

Para o ensaio de resistência à tração, das barras de PRFV, observou as recomendações do “Apêndice A” da ACI 440.3R-04.

A ancoragem das amostras, foi realizada por meio de tubos de aço, nas extremidades da barra (ver Figura 12). O diâmetro do tubo de aço deve ser superior ao diâmetro da barra. Para garantir a solidarização entre o tubo de aço e a barra PRFV, utilizou-se uma resina epóxi, de acordo com o esquema da Figura 12. De forma que a barra e o tubo de aço, permaneçam concêntricos.



**Figura 12: Ancoragem da barra de PRF.**



FONTE: Nanni (2014).

Durante o ensaio de tração, utilizou-se um extensômetro, com o objetivo de obter os dados do alongamento da barra, conforme a variação da carga aplicada, possibilitando a determinação do módulo de elasticidade das barras de PRFV. O Quadro 6 resume as propriedades físicas e mecânicas das barras de PRFV, sendo que as informações da classe do vidro, tal como, o tipo de resina, foram fornecidas pelo fabricante.

**Quadro 6: Propriedades mecânicas do vergalhão de PRFV.**

CLASSE DO VIDRO	RESINA	DIÂMETRO DA BARRA	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	MÓDULO DE ELASTICIDADE
Vidro E-CR	Epóxy Éster Vinílico	8 mm	939,01 MPa	63,90 GPa

FONTE: elaborado pela autora.

Através dos dados experimentais de resistência à tração e módulo de elasticidade, pode-se prever a deformação específica da barra PRFV na ruptura. A Lei de Hooke, demonstrada na Equação 11, permite estimar esse valor.

$$\varepsilon = \frac{f_f}{E} = \frac{939,01 \text{ MPa}}{63,9 \cdot 10^3 \text{ MPa}} = 14,7 \text{ ‰} \quad (11)$$

## 4.5 COMPORTAMENTO TEÓRICO

De acordo, com as propriedades da barra de PRFV, descritas no Quadro 6 e a fim de configurar as possíveis falhas em estruturas descritas no Quadro 4, atribuiu-se três taxas de armadura, para o modelo. Como se trata de uma análise experimental, a análise teórica conduziu-se de forma contrária ao dimensionamento. Foram atribuídas três taxas de armadura, as quais originaram, o cálculo das capacidades resistentes dessas (ver Quadro 8).

**Quadro 7: Resumo das Armaduras.**

NÚMERO DE BARRAS	ÁREA DE ARMADURA	TAXA DE ARMADURA EFETIVA	TAXA DE ARMADURA NA CONDIÇÃO BALANCEADA	TIPO DE RUÍNA	NÚMERO DE VIGAS ENSAIADAS
2	100,53 mm <sup>2</sup>	0,003028	0,004297	Ruptura da fibra	3
3	150,80 mm <sup>2</sup>	0,004542	0,004297	Falha Balanceada	3
4	201,06 mm <sup>2</sup>	0,006056	0,004297	Esmagamento do concreto	3

Fonte: elaborado pela autora.

O modelo em estudo, trata-se de uma viga de seção quadrada (20 x 20 cm), com comprimento de 135 cm, como ilustrado nas Figuras 13, 14 e 15. As barras de PRFV foram empregadas como armadura de flexão. No entanto, para o esforço cortante e a armadura construtiva negativa utilizou-se aço CA50.

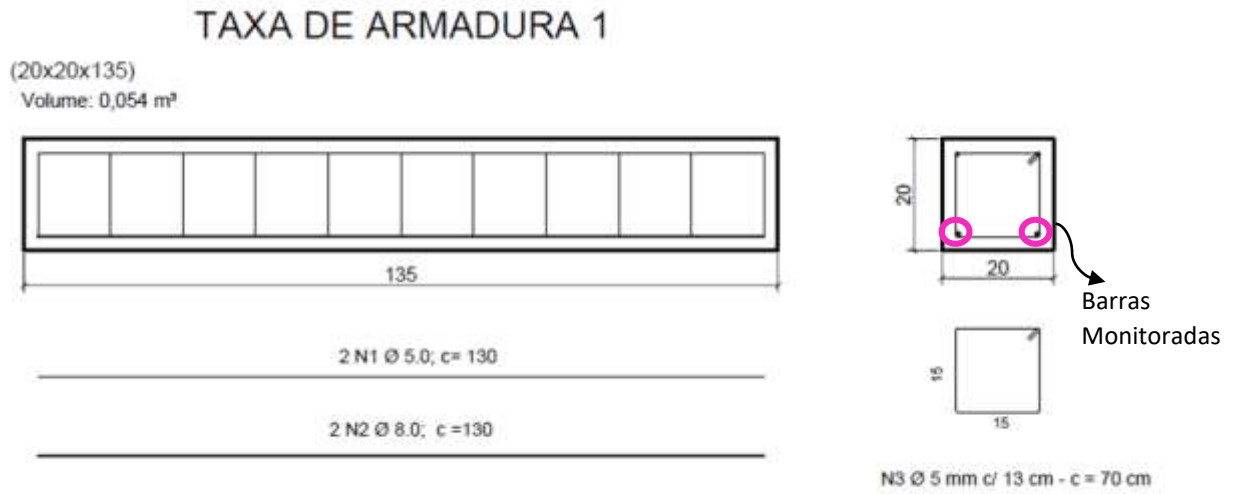
O Quadro 9 apresenta os momentos fletores e as cargas de ruptura obtidas para cada taxa de armadura, de acordo com as equações demonstradas no Capítulo 3. O cálculo está demonstrado no “Apêndice A” desse trabalho.

**Quadro 8: Resumo dos Momentos e Cargas de Ruptura.**

QUANTIDADE DE BARRAS	TENSÃO NA BARRA	MOMENTO RESISTENTE	CARGA DE RUPTURA
2	939,01 MPa	11,20 kN.m	56,00 kN
3	926,07 MPa	21,87 kN.m	109,36 kN
4	790,45 MPa	24,63 kN.m	123,15 kN

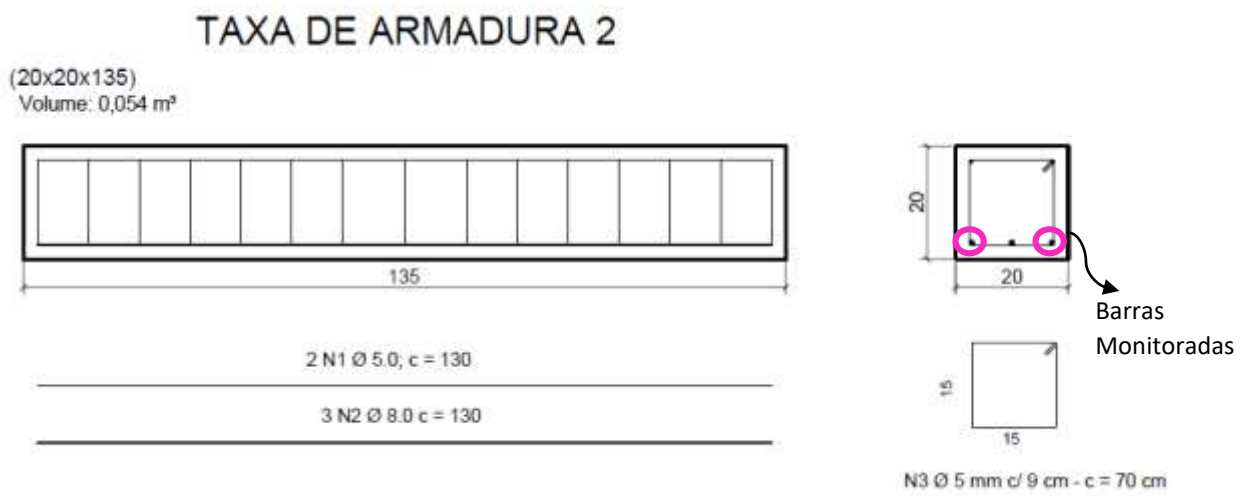
FONTE: elaborado pela autora.

**Figura 13: Detalhamento da Taxa de Armadura 1.**



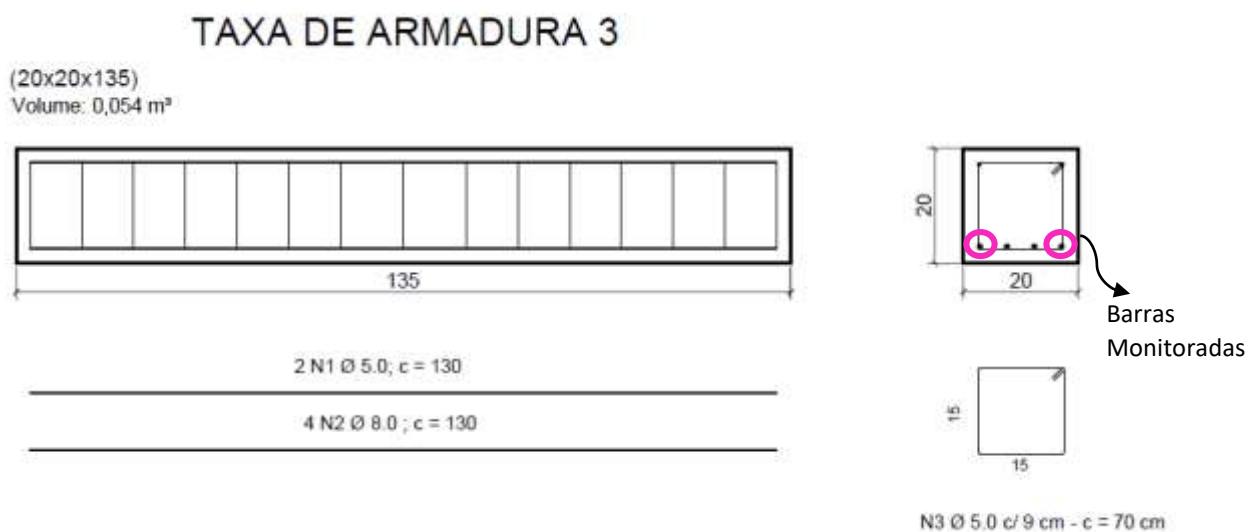
FONTE: elaborado pela autora.

**Figura 14: Detalhamento da Taxa de Armadura 2.**



FONTE: elaborado pela autora.

**Figura 15: Detalhamento da Taxa de Armadura 3.**



FONTE: elaborado pela autora.

Na reprodução dos tipos de ruína, para cada taxa de armadura, três vigas foram concretadas, sendo que para todas as taxas de armadura, as barras das extremidades foram monitoradas com *strain gauges*, conforme os detalhamentos das Figuras 13, 14 e 15.

Para a instrumentação das vigas, utilizou-se extensômetros elétricos, do tipo *Strain Gauges*, fixados nas barras e no concreto, a fim de obter a deformação dos materiais. Previamente ao ensaio, fixou-se os *LVDTs* (*Linear Variable Differential Transformer*) nas vigas, com o objetivo de obter os deslocamentos verticais no meio do vão, em função da variação do carregamento.

As fôrmas foram confeccionadas de material compensado e gravatas de madeira (ver Figura 16). Os *strain gauges* foram fixados nas barras de PRFV antes do lançamento do concreto, conforme a Figura 16. Realizou-se proteção dos *strain gauges* utilizando uma película de silicone envolta por fita isolante, a fim de evitar o contato com a umidade do concreto.

**Figura 16: Formas das vigas.**



FONTE: Elaborado pela autora.

**Figura 17: Detalhe das armaduras instrumentadas.**



FONTE: Elaborado pela autora.

Em cada *strain gauge* soldou-se um fio condutor, responsável por transmitir às leituras dos sensores ao programa. A concretagem das vigas foi realizada em duas camadas, conforme a Figura 18. Executou-se o adensamento das vigas por meio de um vibrador mecânico do tipo agulha (ver Figura 19).

**Figura 17: Concretagem das vigas.**



FONTE: elaborado pela autora.

**Figura 18: Adensamento do concreto.**

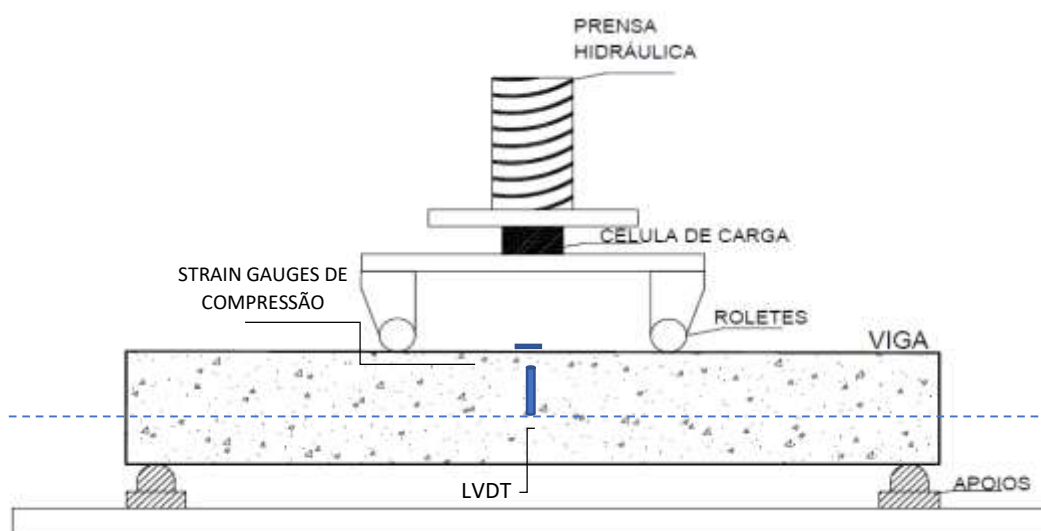


FONTE: elaborado pela autora.

Após a concretagem, as vigas passaram por um processo de cura ao ar, em ambiente de laboratório, durante 28 dias, sendo então realizado o ensaio de flexão. O esquema de apoio e de aplicação de carga está ilustrado na Figura 20, em que os apoios foram considerados à uma distância de cinco centímetros das extremidades do corpo de prova.

As vigas foram submetidas à flexão a quatro pontos, em que, os pontos de aplicação da carga foram definidos como  $(L/3)$  e  $(2L/3)$  considerando  $L =$  comprimento da viga.

**Figura 19: Esquema de ensaio: Flexão à quatro pontos.**



FONTE: elaborado pela autora.

Como ilustrado na Figura 17, os *strain gauges* de tração foram fixados nas barras de PRFV previamente à concretagem. Os *strain gauges* de compressão foram instalados na face superior da viga, no terço central da viga, colados anteriormente ao ensaio. Sendo assim, utilizou-se dois *strain gauges* de tração e dois de compressão, totalizando quatro leituras.

De acordo com a instrumentação, ilustrada nas Figuras 21 e 22, para cada viga instalou-se um LVDT por face do elemento. O aparato para os LVDTs consistiu em barras roscadas transpassando a seção transversal, as quais serviram de apoio à uma régua metálica onde estes foram fixados. Após a fixação, instalou-se os fios condutores nos *strain gauges* e nos LVDTs, os quais foram conectados no aparelho de aquisição de

dados. Os deslocamentos apontados são expressos em milímetros. Os LVDTs foram retirados quando se atingiu 70% da carga de ruptura, a fim de não danificar o aparelho.

**Figura 20: Viga durante a instrumentação.**



FONTE: elaborado pela autora.

**Figura 21: Detalhe do LVDT durante o ensaio.**



FONTE: elaborado pela autora.



As vigas receberam camadas de tinta branca, a fim de destacar as fissuras. As Figuras 23 e 24 relatam o comportamento das vigas durante o ensaio de flexão, em que grandes deslocamentos e abertura de fissuras foram observados até atingirem a ruptura.

**Figura 22: Fissuras na viga, durante o ensaio.**



FONTE: elaborado pela autora.

**Figura 24: Ruptura da viga**



FONTE: elaborado pela autora.

A Figura 25 ilustra o detalhe da ruptura da barra de PRFV, na qual é possível observarmos a quebra da união entre a resina e as fibras.

**Figura 23: Detalhe da ruptura da barra de PRFV.**



FONTE: elaborado pela autora.

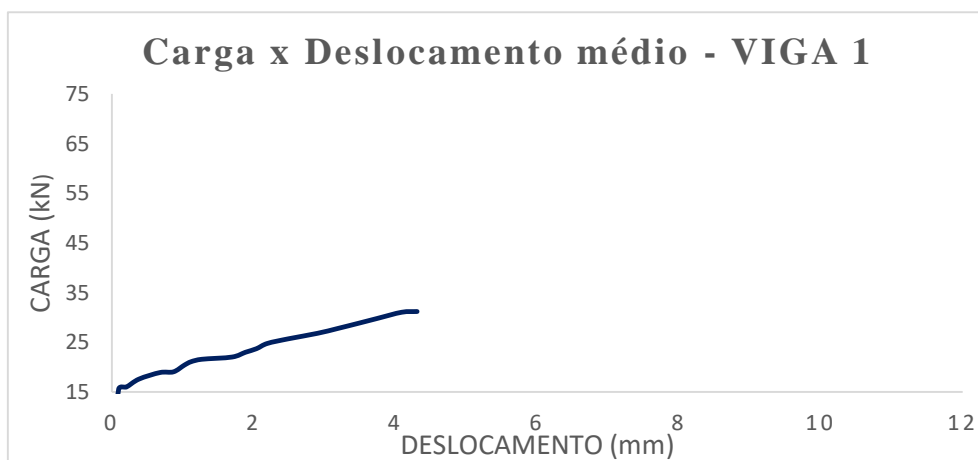
## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 5.1 ANÁLISE DO DESLOCAMENTO

#### 5.1.1 Taxa de Armadura 1

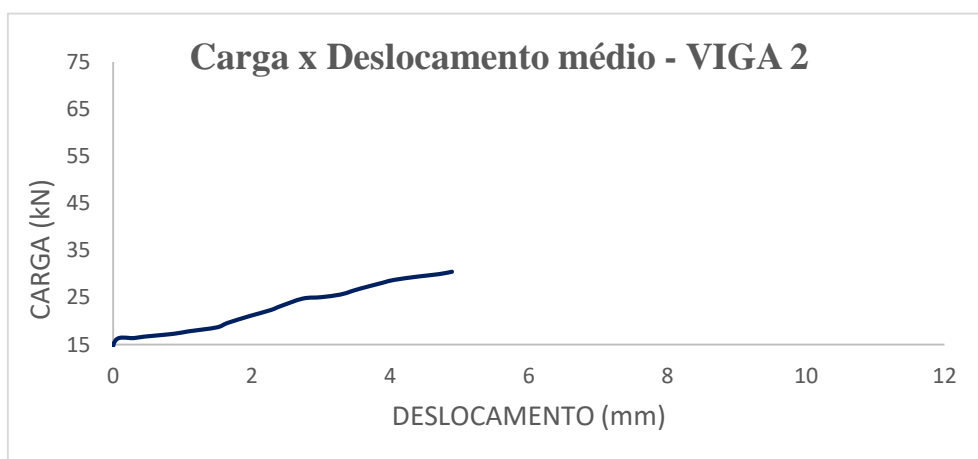
As Figuras 26, 27 e 28 apresentam os diagramas carga x deslocamento médio no meio do vão para as vigas com taxa de armadura 1.

**Figura 24: Carga x Deslocamento médio - V1.**



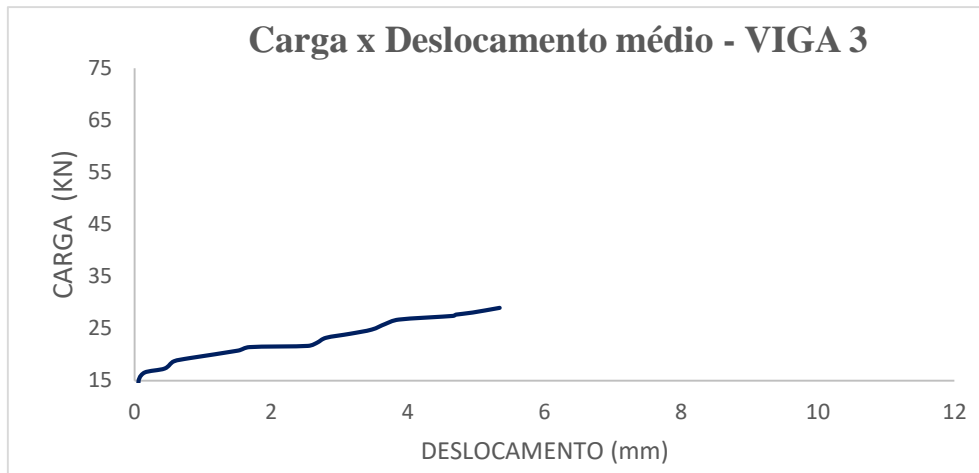
FONTE: elaborado pela autora.

**Figura 25: Carga x Deslocamento médio – V2.**



FONTE: elaborado pela autora.

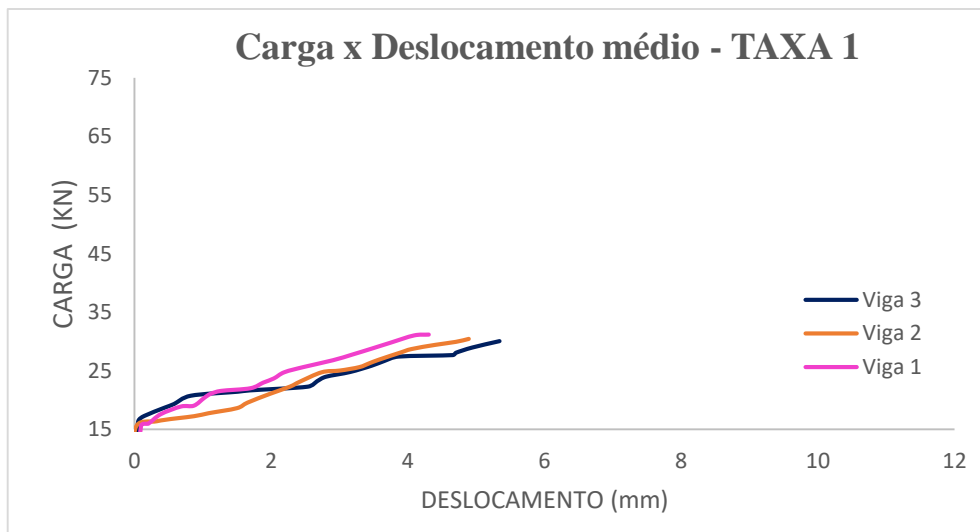
**Figura 28: Carga X Deslocamento médio – V3.**



FONTE: elaborado pela autora.

A Figura 29 apresenta uma comparação entre os modelos, considerando o deslocamento médio, no meio do vão, para cada viga.

**Figura 29: Carga X Deslocamento médio – T1.**



FONTE: elaborado pela autora.

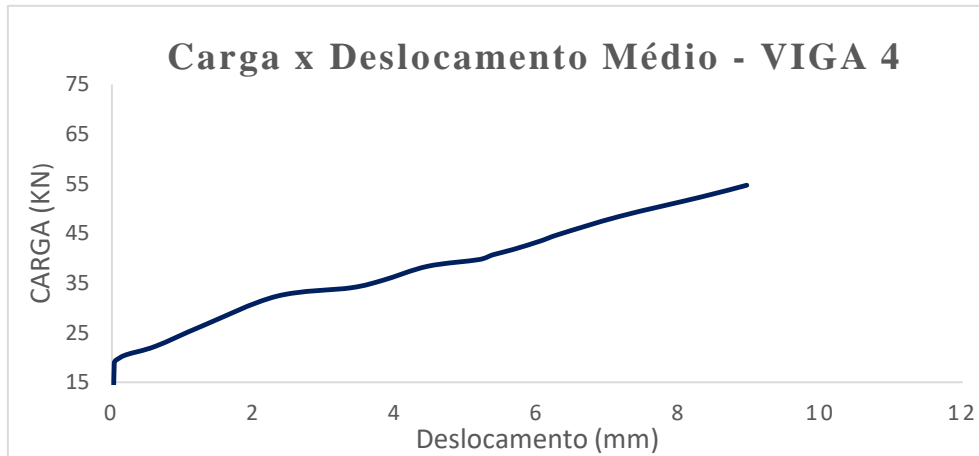
### 5.1.2 Taxa de Armadura 2

A instrumentação das vigas da taxa de armadura 2, seguiu os mesmos moldes da taxa de armadura 1. Nesse caso, para a análise dos dados obtidos dos LVDTs, foi

considerado somente dois modelos, visto que, os resultados do terceiro modelo destoou dos demais.

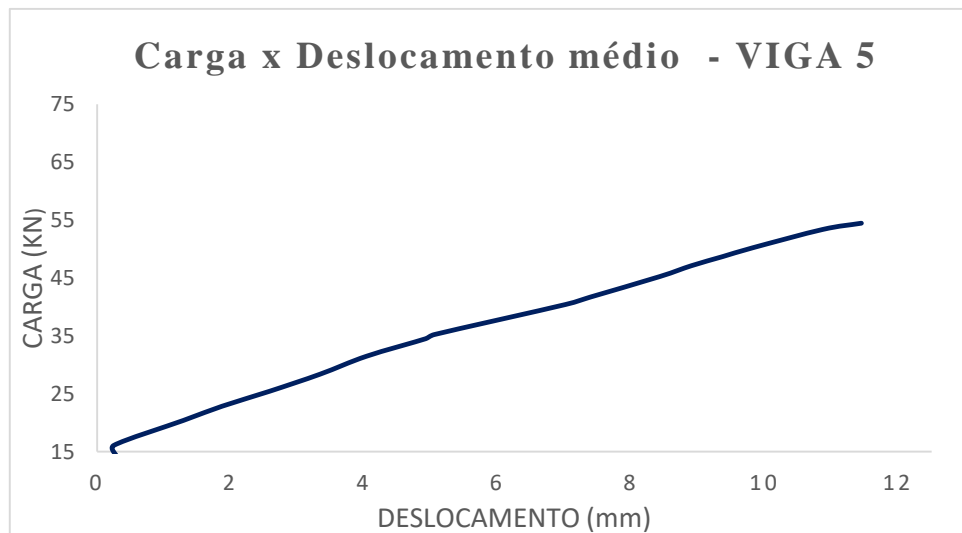
Essa taxa de armadura, é constituída por três barras de PRFV, sendo que somente duas barras foram monitoradas por meio de *strain gauges*.

**Figura 30: Carga X Deslocamento – V4.**



FONTE: elaborado pela autora.

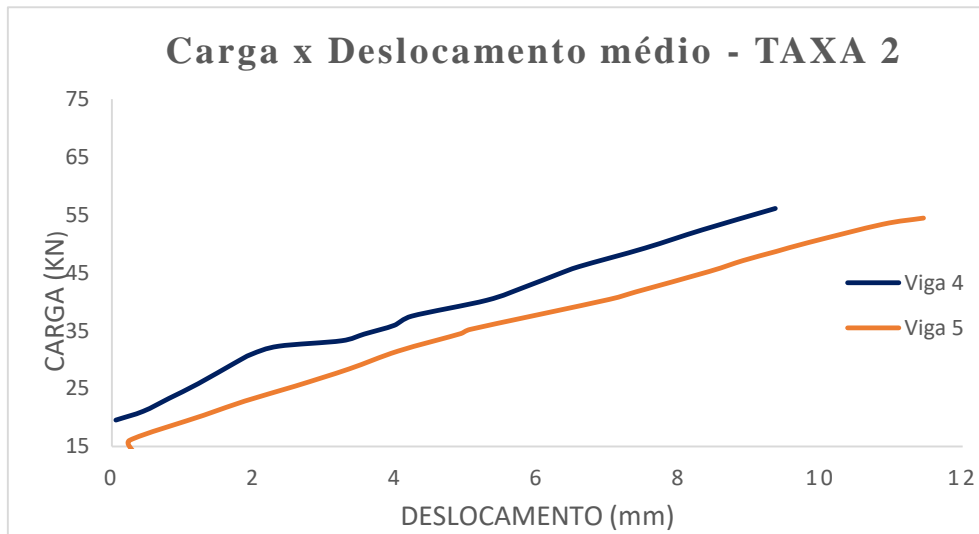
**Figura 31: Carga x Deslocamento médio – V5.**



FONTE: elaborado pela autora.

A comparação entre as vigas analisadas está representada na Figura 31:

**Figura 32: Carga x Deslocamento médio – T2.**



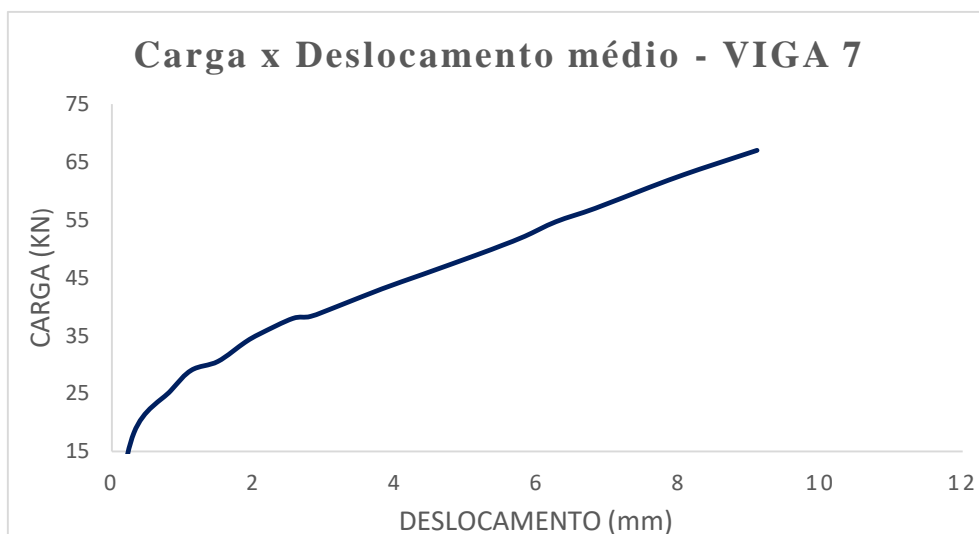
FONTE: elaborado pela autora.

### 5.1.3 Taxa de Armadura 3

Dentre as taxas de armadura, a terceira taxa é a que possui a armadura mais densa, composta por 4 barras de PRFV. Conforme os modelos anteriores, somente as duas barras da extremidade foram monitoradas por *strain gauges*.

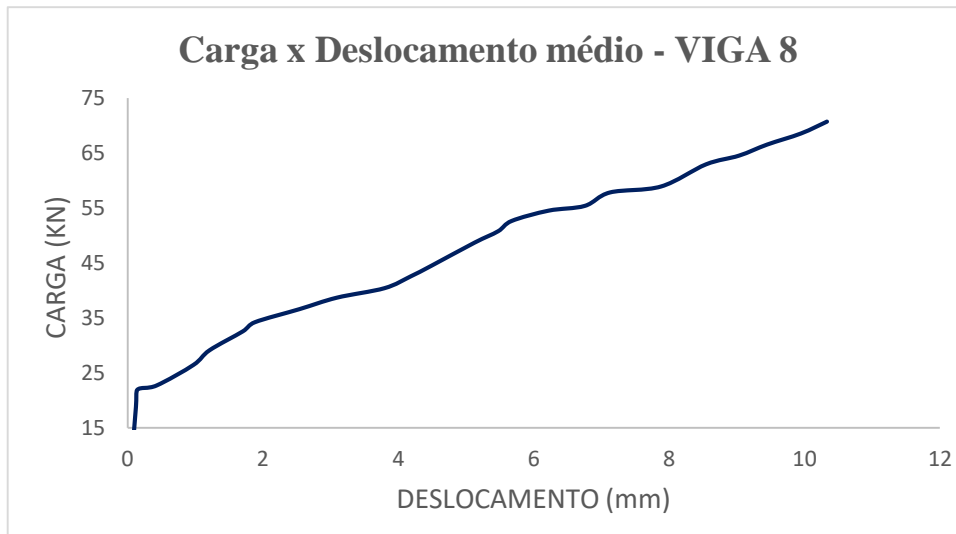
As Figuras dizem respeito à Carga x Deslocamento de V7, V8, e V9, respectivamente-

**Figura 33: Carga x Deslocamento médio – V7.**



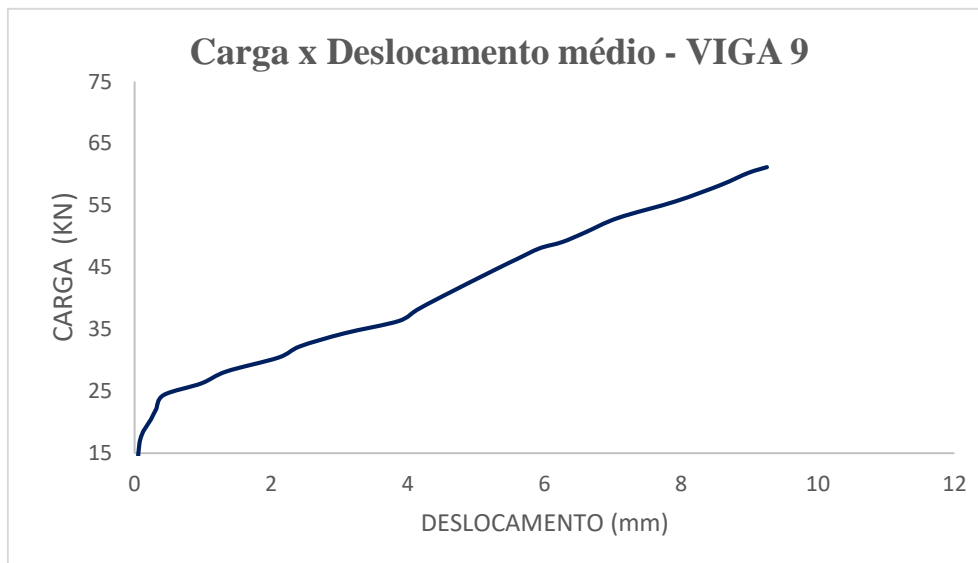
FONTE: elaborado pela autora.

**Figura 34: Carga x Deslocamento médio – V8.**



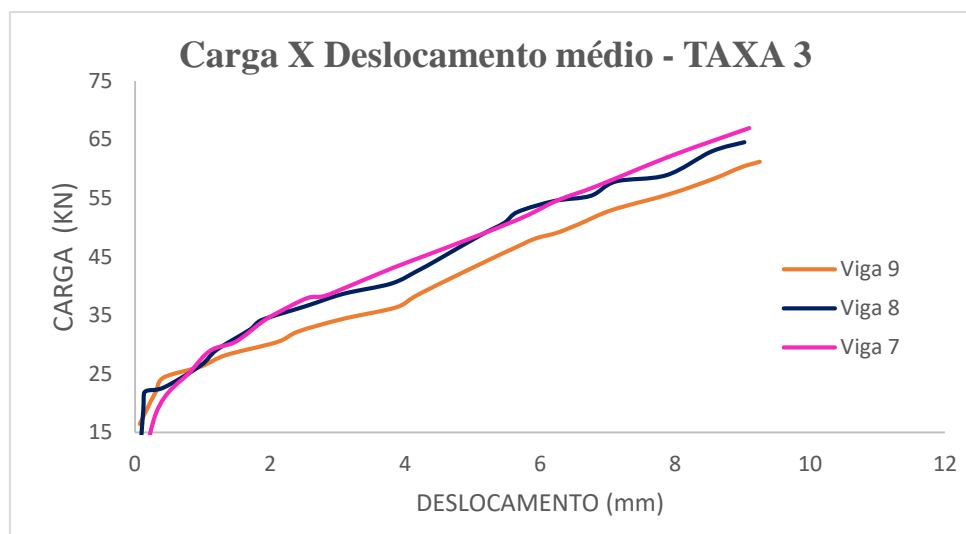
FONTE: elaborado pela autora.

**Figura 35: Carga Deslocamento médio – V9.**



FONTE: elaborado pela autora.

**Figura 36: Carga x Deslocamento médio – T3.**



FONTE: elaborado pela autora.

## 5.2 ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS

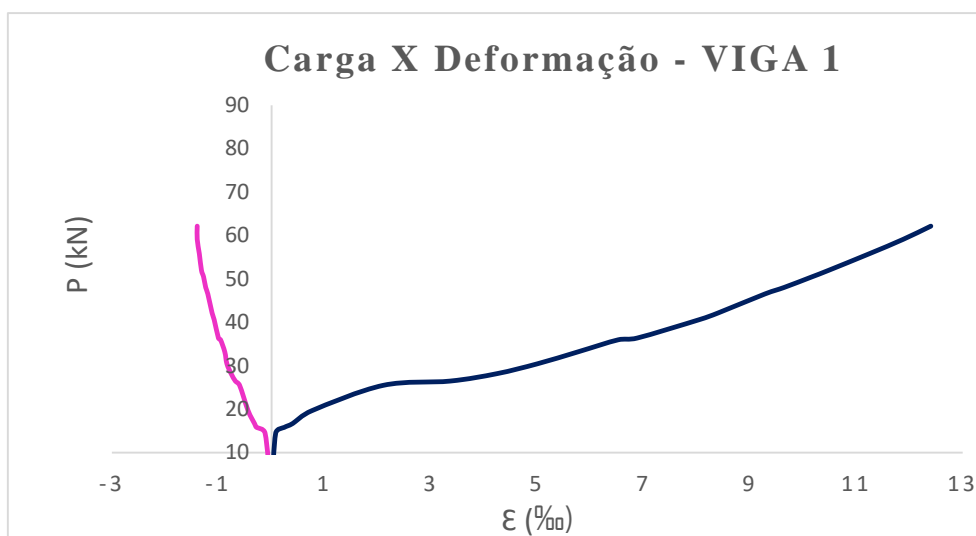
### 5.2.1 Taxa de Armadura 1

As vigas pertencentes a taxa de armadura 1, foram condicionadas à ruptura do reforço de PRFV. Dentre as vigas ensaiadas, uma apresentou problema na leitura dos *strain gauges*, dessa forma, as análises foram efetuadas de acordo com os dados obtidos de duas vigas.

O concreto apresentou deformação menor do que a 3,0‰ (deformação específica de encurtamento do concreto na ruptura), considerado pela norma americana. A deformação específica do PRFV, na ruptura, atingiu valores próximos à 13‰. O valor de deformação encontrado vem corroborar com a deformação obtida no ensaio de tração direta do material, 14,7‰. A diferença dessas deformações, pode ser justificada pela divergência de esforços em que a barra foi submetida, sendo que, quando inseridas como reforço das vigas, foram submetidas à flexão, e não à tração direta. As Figuras 37 e 38 ilustram as afirmações:

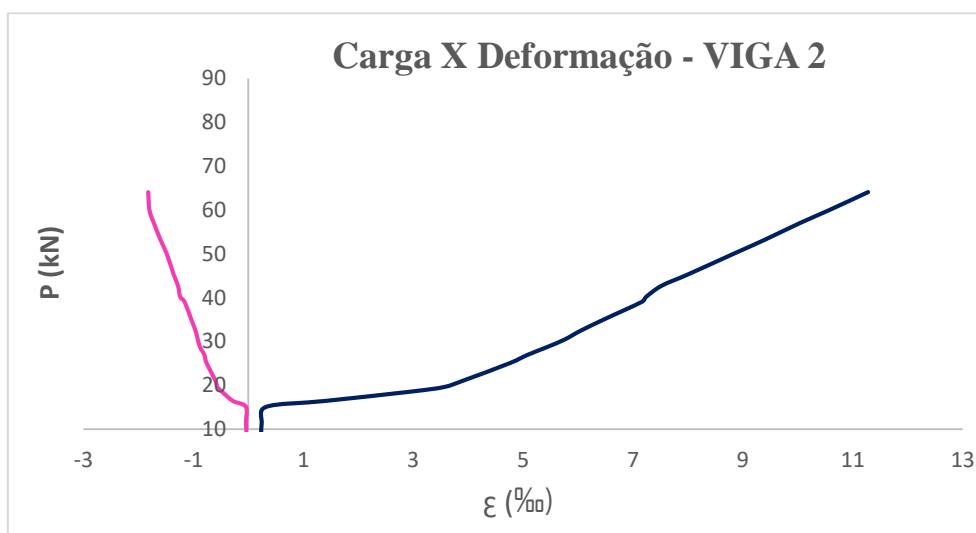


**Figura 37 – Diagrama carga x deformação específica para a viga 1.**



FONTE: elaborado pela autora.

**Figura 38 – Diagrama carga x deformação específica para a viga 2.**

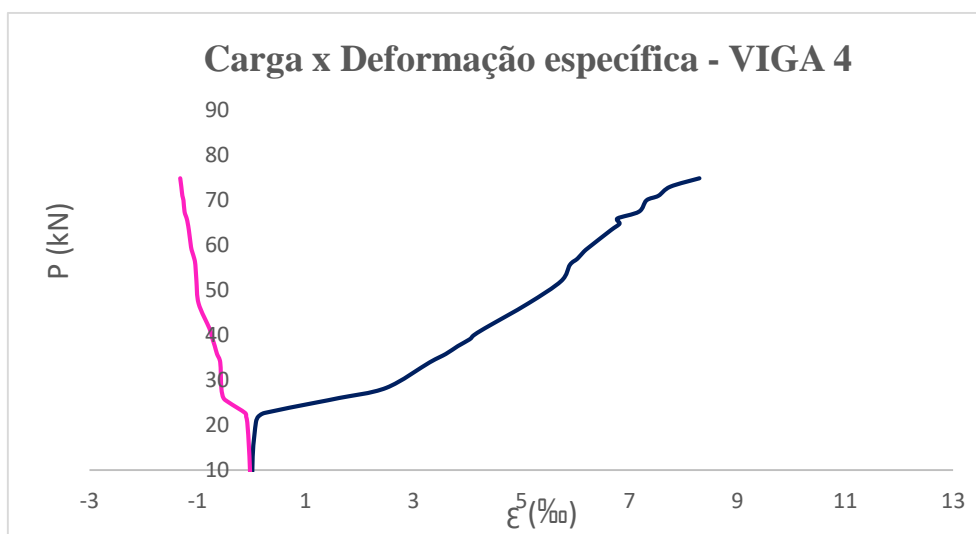


FONTE: elaborado pela autora.

### 5.2.2 Taxa de Armadura 2

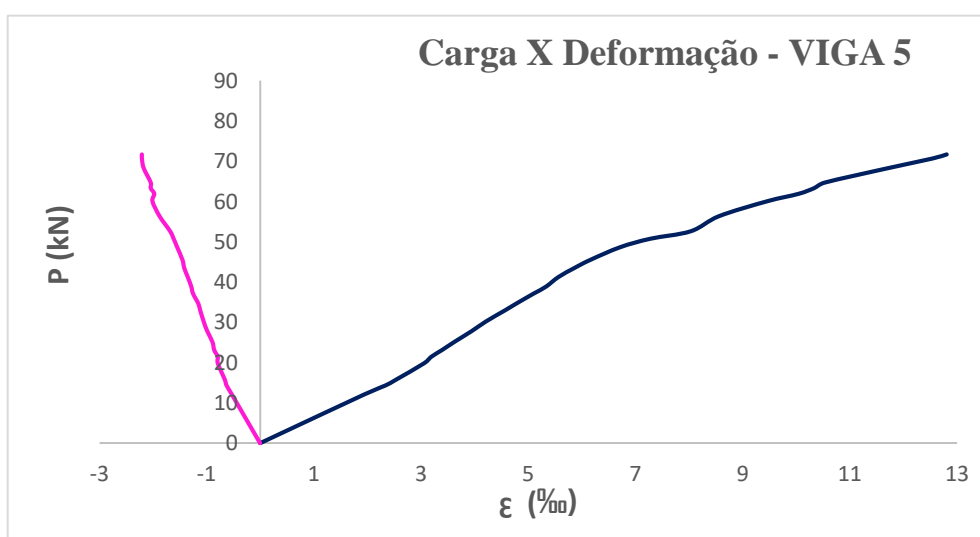
Os modelos ensaiados referentes à taxa de armadura 2, foram compostos por três barras de PRFV, sendo que, somente as barras das extremidades foram monitoradas. É o que ilustram as Figuras 39 e 40, respectivamente.

**Figura 39 – Diagrama carga x deformação específica para a viga 4.**



FONTE: elaborado pela autora.

**Figura 40 – Diagrama carga x deformação específica para a viga 5.**



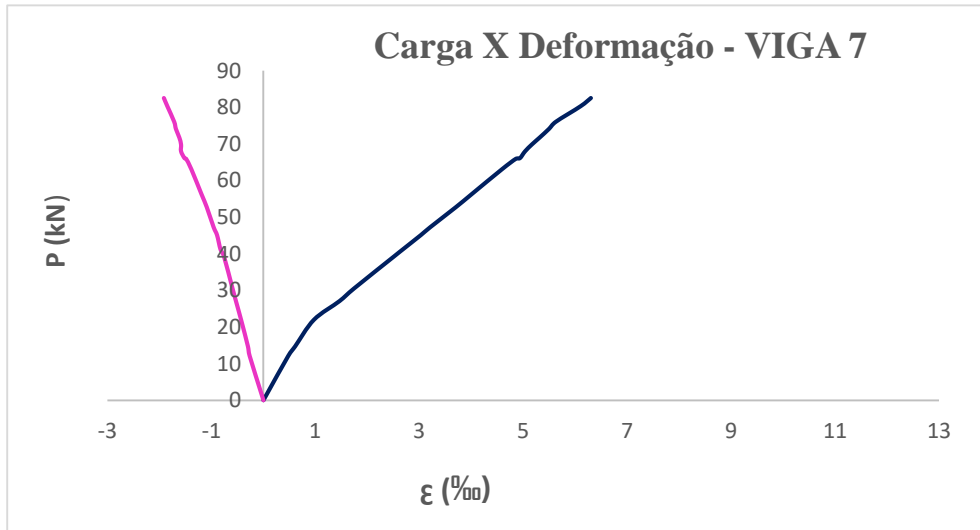
FONTE: elaborado pela autora.

### 5.2.3 Taxa de Armadura 3

A terceira taxa de armadura, foi integrada por vigas com reforço de quatro barras de PRFV e, seguiu o monitoramento aplicado às demais taxas. Essa taxa, foi calculada prevendo a falha por esmagamento do concreto, aumentando-se a densidade de armadura.

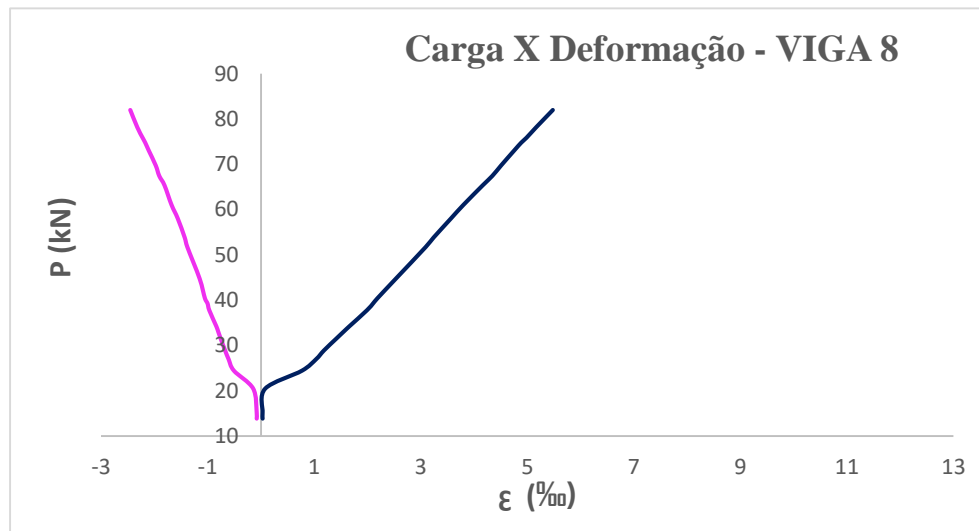
Podemos entender compreender observando as Figuras:

**Figura 41 – Diagrama carga x deformação específica para a viga 7.**



FONTE: elaborado pela autora.

**Figura 42 – Diagrama carga x deformação específica para a viga 8.**

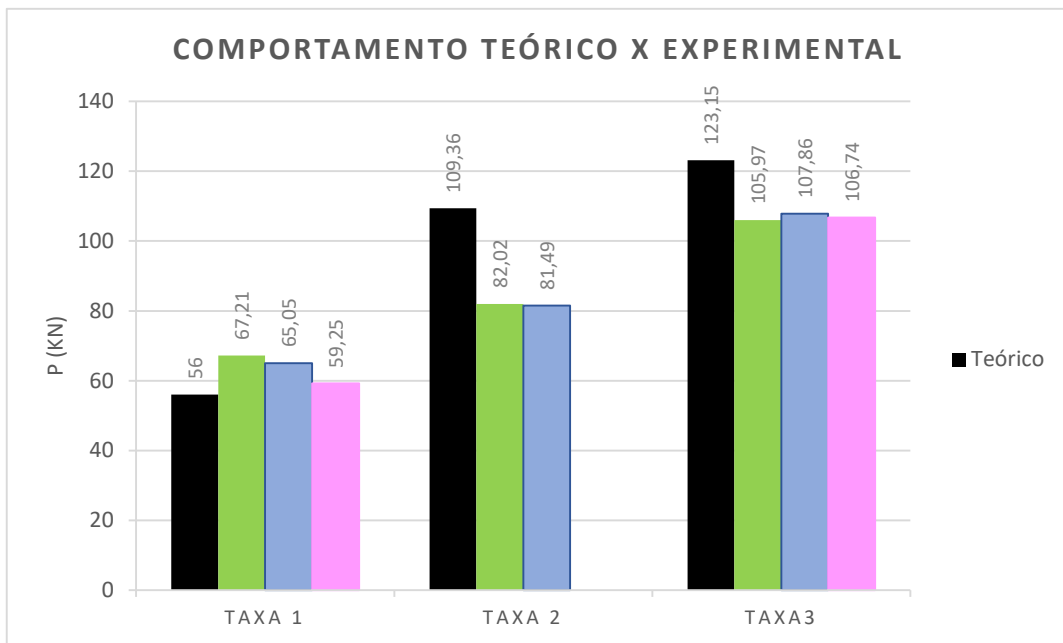


FONTE: elaborado pela autora.

### 5.3 CARGA DE RUPTURA

A Figura 50 apresenta a comparação entre a capacidade de suporte teórica e, as cargas de ruptura de cada elemento, ordenado por taxas, sendo que as colunas azul, verde e rosa são representadas pelos modelos experimentais. Pode-se observar que, as cargas de ruptura das vigas ensaiadas, para a Taxa de Armadura 1, atingiram valores próximos, mas superiores a carga teórica.

**Figura 50 – Comparação entre o comportamento teórico e experimental.**



FONTE: elaborado pela autora

Nas Taxas de Armadura 2 e 3, as cargas de suporte calculadas foram superiores às obtidas em ensaio, sendo que a maior variação foi observada na Taxa de Armadura 2, onde os elementos foram condicionados à ruptura balanceada.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do presente estudo, possibilitou a análise das propriedades físicas e mecânicas dos vergalhões de Polímero Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV).

Foram estabelecidas, três Taxas de Armadura, a fim de simular a ruína governada pelo reforço de PRFV, a ruína governada pela condição balanceada e a ruína governada pelo esmagamento do concreto. O procedimento de cálculo da capacidade, portanto, para cada Taxa de Armadura, foi descrito de acordo com a ACI 400.1R-15.

O desenvolvimento do item experimental iniciou com o estudo do traço do concreto. Os ensaios de caracterização das barras de PRFV, evidenciaram a alta resistência à tração do material e um baixo módulo de elasticidade, quando comparado com o aço. Além disso, verificou-se o comportamento elástico das barras de PRFV, até a ruptura.

De acordo com a Tabela 4.2.1 da ACI 440.1R-15, a qual, apresenta parâmetros para as deformações de barras PRF. Para vergalhões reforçados com fibra de vidro, a deformação específica na ruptura, varia entre 12‰ e 31 ‰. Logo, a deformação específica obtida experimentalmente para a barra de PRFV foi de 14,7‰, corroborando com os parâmetros estabelecidos pela norma.

Durante o ensaio de flexão à quatro pontos das vigas, validou-se o comportamento elástico evidenciado na caracterização das barras. Devido ao seu baixo módulo de elasticidade, aliado ao comportamento elasto-plástico do concreto, tornaram os deslocamentos claramente visíveis com a variação do carregamento aplicado. Em situações pontuais, em que a carga foi reduzida ou retirada, a viga retorna à sua geometria inicial, ou seja, sua posição indeformada.

As deformações dos materiais, atingiram os resultados esperados, sendo que, a Taxa de Armadura 1, atingiu a deformação de ruptura do PRFV,  $\xi=13\%$ , atestando a falha por ruptura do reforço e o concreto não atingiu  $\xi=2\%$ , isto é, a deformação do início do patamar plástico do concreto. Na Taxa de Armadura 2, os materiais não atingiram a deformação de ruptura. Pôde-se observar que, na Taxa de Armadura 3, condicionada à ruptura por esmagamento do concreto, a deformação específica do concreto atingiu valores próximos à deformação de ruptura,  $\xi=13\%$ , de acordo com a ACI 440.1R-15, entretanto, o reforço de PRFV, apresentou a menor deformação entre as taxas, cerca de  $\xi=6\%$ .

As cargas de ruptura apresentaram valores semelhantes aos previstos teoricamente, sendo que, para a Taxa 1, os valores experimentais superaram o calculado, contudo, as Taxas 2 e 3, revelaram cargas de ruptura menores do que à carga teórica, visto que, a maior variação ocorreu na Taxa 2.

A ruptura das vigas da Taxa de Armadura 1 ocorreram após grandes deslocamentos e aberturas de fissuras, indicando a iminência da ruptura. A Taxa de Armadura 2 também apresentou deslocamentos e fissuração, mas com uma amplitude menor, comparado à taxa 1. No entanto, a Taxa de Armadura 3, ou seja, a taxa com a armadura mais densa, foi levada a ruína por meio do esmagamento do concreto, em que as fissuras e o deslocamento foram consideravelmente menores e a ruptura súbita.

## **7 SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Analisar o comportamento de vigas armadas com barras de Polímero Reforçado com Fibra de Vidro expostas a altas temperaturas;
- Analisar o comportamento de vigas armadas com barras de PRFV submetidas a condições de ambientes agressivo variando o cobrimento;
- Simular o comportamento de vigas com reforço de PRFV por meio de software de análise estrutural e comparar com resultados experimentais.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR/NM 2048:2003. Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR/NM 45:2006.** Agregados - Determinação da massa unitária e volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR/NM 52:2009.** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440.1R-2015: Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP bars.** Nova York, EUA, 2015.

\_\_\_\_\_. **ACI 440.1R-2006: Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures.** EUA, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 3039/D 3039 M – 1995: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.** Pensilvânia, EUA, 1995.

\_\_\_\_\_. **ASTM D7205/D7205M – 2006: Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars.** Pensilvânia, EUA, 2006.

BIRON, M. **Thermoplastics and Thermoplastic Composites.** 3ª ed. EUA: Elsevier, 2018.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto.** São Paulo, Pini, 1992.

MICELLI, F.; NANNI, A. **Durability of FRP rods for concrete structures.** Construction and Building Materials, vol. 18, num. 07, p. 491-503. 2004.

NANNI, A.; DE LUCA, A.; ZADEH, A. J. **Reinforced Concrete with FRP Bars – Mechanics and Design.** Boca Raton, FL, 2014.

SILVA FILHO, L. C. P.; GARCEZ, M. R. **Materiais de Construção Civil.** Cap. 5. Ed: São Paulo, IBRACON: 2010.

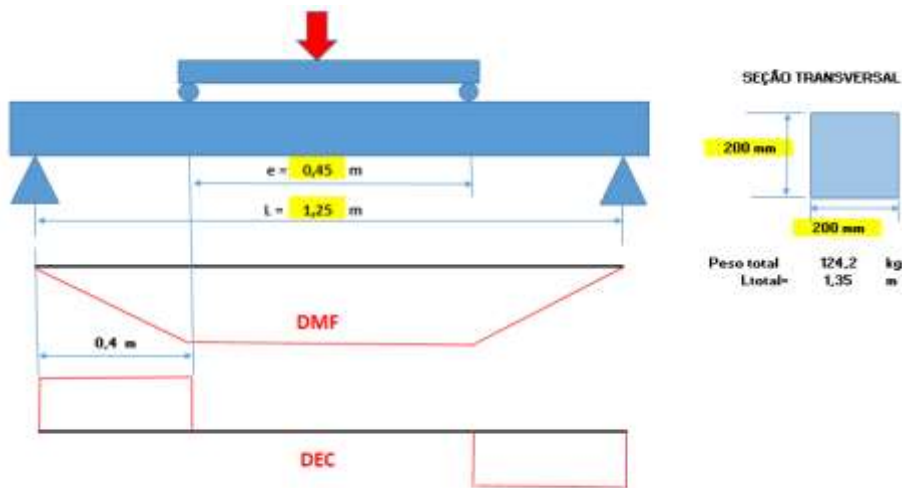
SWAPAN, M. A. **Shear properties and durability of GFRP reinforcement bar aged in seawater.** Polymer Testing, 2019.

WU, H.C.; EAMON, C. D. **Strengthening of Concrete Structures Using Fiber Reinforced Polymers (FRP).** Detroit, Elsevier: 2017.

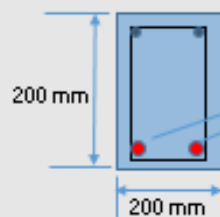


## APÊNDICE A

Demonstração do cálculo da capacidade de carga das vigas com reforço de barras de PRFV, para as Taxas de Armadura 1,2 e 3, em que, as equações apresentadas no presente trabalho, referentes a AC1 440.1R-15, foram inseridas em uma Tabela Excel, a fim de facilitar os cálculos.



$f'_c = 35 \text{ MPa}$	Fazer ensaio para garantir a resistência e a forma de ruptura	
$f^*_{fu} = 939,01 \text{ MPa}$	$ffu = 939,01 \text{ MPa}$	
$E_f = 63900 \text{ MPa}$		
$E_c = 33130,047 \text{ MPa}$		
DIMENSÕES		
$b = 200 \text{ mm}$	estribo = $5,0 \text{ mm}$	$\phi$ inicial = $8,0 \text{ mm}$
$h = 200 \text{ mm}$	$C = 25,0 \text{ mm}$	
$d = 166,0 \text{ mm}$		
DIMENSIONAMENTO - CAPACIDADE NOMINAL À FLEXÃO		
Escolha da taxa geométrica de armadura		Situação de esmagamento do concreto e rompimento da fibra simultâneo
$\rho_f = \frac{A_f}{b \cdot d}$		
$\rho_{fb} = 0,85 \cdot \beta_1 \cdot \frac{f'_c}{f_{fu}} \cdot \frac{E_f \cdot \epsilon_{cu}}{E_f \cdot \epsilon_{cu} + f_{fu}}$		
$\rho_f < \rho_{fb}$	→ Modo de ruptura das fibras	
$\rho_f > \rho_{fb}$	→ Modo de ruptura por esmagamento do concreto	
$E_f \cdot \epsilon_{cu} = 0,003 \cdot 63900 = 191,7 \text{ MPa}$		
$\rho_{fb} = \frac{191,7}{939,01} = 0,0043$		



2  $\phi$  8,0 mm

$$A_f = 100,531 \text{ mm}^2$$

$$\rho_f = 0,00302804$$

### EQUACIONAMENTO

Esmagamento do concreto  $\rho_f > \rho_{fb}$

$$f_f = \left( \sqrt{\frac{(E_f \cdot \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0,85 \cdot \beta_1 \cdot f'_c}{\rho_f} \cdot E_f \cdot \varepsilon_{cu}} - 0,5 E_f \cdot \varepsilon_{cu} \right) \leq f_u$$

$$M_n = \rho_f \cdot f_f \cdot \left( 1 - 0,59 \cdot \frac{\rho_f \cdot f_f}{f'_c} \right) \cdot b \cdot d^2$$

**CARGA NECESSÁRIA RUPTURA =**

Ruptura da fibra  $\rho_f < \rho_{fb}$

$$M_n = A_f \cdot f_{fu} \cdot \left( d - \frac{\beta_1 \cdot c_b}{2} \right)$$

11200105 N.mm  
11,20010 kN.m

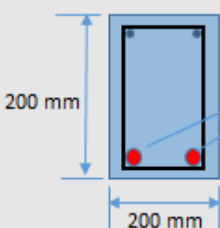
$$c_b = \left( \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \right) \cdot d$$

111,4218788 mm

$$\varepsilon_{fu} = \frac{f_{fu}}{E_f} = 0,014695$$

**CARGA NECESSÁRIA RUPTURA = 56,00052 kN**

**5600,1 kgf**



3  $\phi$  8,0 mm

$$A_f = 150,796 \text{ mm}^2$$

$$\rho_f = 0,004542062$$

### EQUACIONAMENTO

Esmagamento do concreto  $\rho_f > \rho_{fb}$

$$f_f = \left( \sqrt{\frac{(E_f \cdot \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0,85 \cdot \beta_1 \cdot f'_c}{\rho_f} \cdot E_f \cdot \varepsilon_{cu}} - 0,5 E_f \cdot \varepsilon_{cu} \right) \leq f_u$$

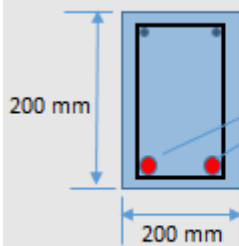
941,68 MPa

$$M_n = \rho_f \cdot f_f \cdot \left( 1 - 0,59 \cdot \frac{\rho_f \cdot f_f}{f'_c} \right) \cdot b \cdot d^2$$

2,18726E+07 N.mm  
21,87265 kN.m

**CARGA NECESSÁRIA RUPTURA = 109,363238 kN**

**10936,3 kgf**



4 φ 8,0 mm

$$A_f = 201,062 \text{ mm}^2$$

$$\rho_f = 0,006056082$$

#### EQUACIONAMENTO

Esmagamento do concreto  $\rho_f > \rho_{fb}$

$$f_f = \left( \sqrt{\frac{(E_f \cdot \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0,85 \cdot \beta_1 \cdot f'_c}{\rho_f} \cdot E_f \cdot \varepsilon_{cu}} - 0,5 E_f \cdot \varepsilon_{cu} \right) \leq f_u$$

803,95 MPa

$$M_n = \rho_f \cdot f_f \cdot \left( 1 - 0,59 \cdot \frac{\rho_f \cdot f_f}{f'_c} \right) \cdot b \cdot d^2$$

2,46306E+07 N.mm  
24,63060 kN.m

CARGA NECESSÁRIA RUPTURA = 123,1529956 kN

12315,3 kgf

## APÊNDICE B

Figuras de Carga x Deslocamento para as vigas ensaiadas, considerando a leitura dos dois LVDTs.

