

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA EFICIÊNCIA DE VIGAS DE CONCRETO  
ARMADO REFORÇADAS À FLEXÃO COM BARRAS DE AÇO E ARGAMASSA  
POLIMÉRICA PELO MÉTODO *NEAR SURFACE MOUNTED* (NSM)**

**LAURA GOMES PINTO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

BRASÍLIA / DF: FEVEREIRO – 2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA EFICIÊNCIA DE VIGAS DE  
CONCRETO ARMADO REFORÇADAS À FLEXÃO COM BARRAS DE  
AÇO E ARGAMASSA POLIMÉRICA PELO MÉTODO NEAR  
SURFACE MOUNTED (NSM)**

**LAURA GOMES PINTO**

ORIENTADOR: MARCOS HONORATO DE OLIVEIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

PUBLICAÇÃO:  
BRASÍLIA-DF  
FEVEREIRO 2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA EFICIÊNCIA DE VIGAS DE  
CONCRETO ARMADO REFORÇADAS À FLEXÃO COM BARRAS DE  
AÇO E ARGAMASSA POLIMÉRICA PELO MÉTODO *NEAR SURFACE  
MOUNTED* (NSM)**

**LAURA GOMES PINTO**

DISSERTAÇÃO DE Mestrado submetido ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Estruturas e Construção Civil.

**APROVADA POR:**

---

**Prof. Marcos Honorato de Oliveira, D.Sc (UnB)**  
(Orientador)

---

**Prof. Rodrigo de Melo Lameiras, D.Sc (UnB)**  
(Examinador interno)

---

**Prof. Maurício de Pina Ferreira, D.Sc (UFPA)**  
(Examinador externo)

BRASÍLIA/DF, 14 DE FEVEREIRO DE 2023

## FICHA CATALOGRÁFICA

PINTO, LAURA GOMES

**Avaliação Experimental da Eficiência de Vigas de Concreto Armado Reforçadas à Flexão com Barras de Aço e Argamassa Polimérica pelo Método *Near Surface Mounted* (NSM)** [Distrito Federal] 2023.

xxiii, 128p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2023)  
Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- |                                      |                         |
|--------------------------------------|-------------------------|
| 1. Reforço Estrutural                | 2. Argamassa Polimérica |
| 3. <i>Near Surface Mounted</i> (NSM) | 4. Barras de Aço        |
| I. ENC/FT/UnB                        | II. Título (Mestre)     |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PINTO, L.G. (2023). Avaliação Experimental da Eficiência de Vigas de Concreto Armado Reforçadas à Flexão com Barras de Aço e Argamassa Polimérica pelo Método *Near Surface Mounted* (NSM). Dissertação de Mestrado em Estruturas, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 128p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: Laura Gomes Pinto.

TÍTULO: Avaliação Experimental da Eficiência de Vigas de Concreto Armado Reforçadas à Flexão com Barras de Aço e Argamassa Polimérica pelo Método *Near Surface Mounted* (NSM).

GRAU: Mestre em Estruturas ANO: 2023

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de Mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de Mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito da autora.

---

Laura Gomes Pinto  
Quadra 209 Lote 08 Bloco A Apt. 1604  
CEP: 71.930-750 Brasília – DF – Brasil  
e-mail: [laura.gomesp@gmail.com](mailto:laura.gomesp@gmail.com)

## DEDICATÓRIA

*Dedico esse trabalho à minha família, por todo o incentivo e apoio na minha trajetória*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à MC Bauchemie e Ciplan Cimento pelo fornecimento de parte dos materiais utilizados nesse programa experimental, assim como à Kali Engenharia, pelo apoio na execução do reforço das vigas e desenvolvimento da pesquisa.

Deixo a minha gratidão ao Grupo de Estudos de Tecnologias em Engenharia Civil (GETEC-UnB) e ao NUMEA-UFPR pelo auxílio na execução dos ensaios e aprofundamento das análises.

Ainda, agradeço ao meu orientador Marcos Honorato de Oliveira, pelas incontáveis horas dedicadas à essa pesquisa e pelo seu incentivo, que foi fundamental para a conclusão do projeto.

## RESUMO

### AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA EFICIÊNCIA DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS À FLEXÃO COM BARRAS DE AÇO E ARGAMASSA POLIMÉRICA PELO MÉTODO *NEAR SURFACE MOUNTED* (NSM)

Autor: Laura Gomes Pinto

Orientador: Marcos Honorato de Oliveira

Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, 14 de fevereiro de 2023

Com o intuito de avaliar a viabilidade de aplicação de barras de aço e argamassa polimérica no reforço à flexão de vigas de concreto armado pela técnica NSM, foi elaborado um programa experimental de doze espécimes, com taxa de armadura de flexão variável, para investigar o comportamento desse tipo de reforço e compará-lo ao método mais tradicional, que utiliza laminados de CFRP e resina epóxi.

Os resultados experimentais indicaram que as vigas reforçadas com barras de aço e laminados de CFRP tiveram um comportamento muito similar, sendo ambas as soluções eficientes para aumentar a capacidade resistente dos elementos. Ainda, ao aumentar a taxa de armadura de flexão das vigas, o acréscimo de carga proporcionado pelo reforço reduz, visto que para fornecer incrementos de capacidade resistente mais significativos, seriam necessárias quantidades elevadas de reforço, que não são aplicáveis na prática, dada as limitações geométricas do dimensionamento indicadas pelas normas.

Comparando os resultados estimados pelas formulações teóricas do ACI 440.2R (2017) e do *fib* Bulletin 90 (2019) com os resultados experimentais, observa-se que ambas apresentaram resultados adequados na estimativa da carga última e do modo de ruptura das vigas.

**Palavras-chave:** reforço à flexão, *Near Surface Mounted* (NSM), laminados de PRFC, barras de aço, adesivo de base cimentícia.

## ABSTRACT

### EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF REINFORCED CONCRETE BEAMS STRENGTHED IN FLEXION WITH STEEL BARS AND POLYMERIC MORTAR BY THE NEAR SURFACE MOUNTED (NSM) METHOD

Author: Laura Gomes Pinto

Supervisor: Marcos Honorato de Oliveira

Postgraduate Program in Structures and Civil Construction

Brasília, February 14<sup>th</sup>, 2023

In order to evaluate the feasibility of applying steel bars and cement-based adhesive in the flexural strengthening of reinforced concrete beams using the NSM technique, an experimental program of twelve specimens was designed with variable flexural reinforcement ratios, to investigate the behavior of this type of strengthening and compare it to the more traditional method, which uses laminates of CFRP and epoxy-based resin.

The experimental results indicated that the beams strengthened with steel bars and CFRP laminates had a very similar behavior, being both efficient solutions to increase the strength of the elements. Also, by increasing the flexural reinforcement ratio of the beams, the increase in load provided by the strengthening decreases, since high amounts of strengthening would be required to provide more significant increments of strength, which are not applicable in practice, given the geometric limitations of the design indicated by the codes.

Comparing the results from the theoretical formulations of ACI 440.2R (2017) and *fib* Bulletin 90 (2019) with the experimental results, it is observed that both presented adequate results in estimating the ultimate load and failure mode of the beams.

**Keywords:** flexural strengthening; Near Surface Mounted (NSM); CFRP laminates; steel bars; cement-based adhesive.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	1
1.2. MOTIVAÇÃO .....	4
1.3. JUSTIFICATIVA.....	5
1.4. OBJETIVOS.....	6
1.4.1. Objetivo Geral .....	6
1.4.2. Objetivos Específicos .....	6
1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	7
1.6. METODOLOGIA .....	8
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>9</b>
2.1. MATERIAIS COMPÓSITOS.....	9
2.1.1. COMPOSIÇÃO.....	9
2.1.1.1. Componente Matricial .....	9
2.1.1.2. Componente Disperso.....	10
2.1.2. POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS.....	10
2.2. NEAR SURFACE MOUNTED (NSM).....	12
2.3. COMPORTAMENTO À FLEXÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS PELO MÉTODO NSM.....	14
2.4. PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DAS VIGAS REFORÇADAS PELO MÉTODO NSM.....	16
2.4.1. TAXA DE ARMADURA DE FLEXÃO .....	16
2.4.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO.....	16
2.4.3. ALTURA ÚTIL DA VIGA .....	16
2.4.4. TAXA DE REFORÇO .....	16
2.4.5. POSICIONAMENTO DO REFORÇO .....	17
2.5. MODOS DE RUPTURA .....	18

2.6. PESQUISAS SOBRE VIGAS REFORÇADAS À FLEXÃO PELO MÉTODO NSM COM BARRAS DE AÇO .....	22
2.6.1. Hosen, Jumaat, Darain e Islam (2014) .....	22
2.6.2. Hosen, Jumaat, Alengaram e Islam (2016) .....	22
2.6.3. Patel, Tank, Vasanwala e Modhera (2019) .....	23
2.7. PESQUISAS SOBRE VIGAS REFORÇADAS À FLEXÃO PELO MÉTODO NSM COM ADESIVO COM BASE CIMENTÍCIA .....	24
2.7.1. Saeed, Al-Mahaidi, Al-Attar e Al-Shathr (2017) .....	24
2.7.2. Al-Abdwais e Al-Mahaidi (2020) .....	25
2.8. PRINCIPAIS TRABALHOS SOBRE VIGAS REFORÇADAS À FLEXÃO UTILIZANDO O MÉTODO NSM COM PRFC .....	26
2.8.1. Fortes, Barros & Padaratz (2002) .....	26
2.8.2. Yost, Gross, Dinehart & Mildenberg (2007) .....	28
2.8.3. Dias, Barros & Azevedo (2012) .....	29
2.8.4. Billota, Ceroni, Nigro & Pecce (2015) .....	31
2.8.5. Seo, Choi, Kwon, & Lee (2016) .....	32
2.9. RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS .....	34
2.9.1. ACI 440.2R (2017) .....	34
2.9.2. <i>fib</i> Bulletin 90 (2019) .....	40
<b>3. PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>43</b>
3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	43
3.2. CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS .....	44
3.2.1. Dimensões geométricas .....	44
3.2.2. Detalhamento das armaduras .....	45
3.2.3. Disposição do reforço NSM .....	47
3.2.4. Resistência à flexão das vigas .....	49
3.2.4.1. Vigas de referência .....	49

3.2.4.2. Vigas reforçadas com lâminas de PRFC .....	49
3.2.4.3. Vigas reforçadas com barras de aço .....	51
3.2.5. Resistência ao cisalhamento das vigas .....	51
3.3. PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS .....	52
3.3.1. Fôrmas .....	52
3.3.2. Concreto .....	54
3.3.2.1. Especificações do concreto .....	54
3.3.2.2. Processo de cura .....	56
3.3.2.3. Propriedades mecânicas do concreto .....	56
3.3.3. Aço .....	57
3.3.3.1. Especificações do aço .....	57
3.3.3.2. Propriedades mecânicas do aço .....	58
3.3.3.3. Ensaio do aço à tração .....	58
3.3.4. Argamassa de reparo estrutural .....	58
3.3.4.1. Especificações da argamassa de reparo estrutural .....	58
3.3.4.2. Propriedades mecânicas da argamassa de reparo estrutural .....	58
3.3.5. Polímero reforçado com fibra de carbono (PFRC).....	59
3.3.6. Resina .....	59
3.4. INSTRUMENTAÇÃO .....	59
3.4.1. Deslocamentos verticais .....	59
3.4.2. Deformações nas armaduras de flexão e de cisalhamento .....	60
3.4.2.1. Disposição dos extensômetros .....	60
3.4.2.2. Processo de instrumentação das barras de aço .....	61
3.4.3. Deformações no reforço .....	62
3.4.3.1. Disposição dos extensômetros .....	62
3.4.3.2. Processo de instrumentação do reforço .....	63
3.4.4. Deformações no concreto .....	64

3.4.4.1. Disposição dos extensômetros no concreto .....	64
<b>3.5. PROCESSO EXECUTIVO DO REFORÇO DAS VIGAS .....</b>	<b>64</b>
3.5.1. Abertura das ranhuras das vigas .....	64
3.5.2. Posicionamento das vigas .....	66
3.5.3. Fixação do reforço de barras de aço com grampos .....	66
3.5.4. Corte do laminado de PRFC .....	67
3.5.5. Execução do reforço .....	68
3.5.5.1. Vigas reforçadas com PRFC .....	68
3.5.5.2. Vigas reforçadas com barras de aço .....	70
<b>3.6. SISTEMA DE ENSAIO .....</b>	<b>71</b>
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>74</b>
4.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS .....	74
4.1.1. Aço .....	74
4.1.2. Concreto .....	74
4.1.3. Argamassa .....	76
4.2. CARGAS ÚLTIMAS E MODO DE RUPTURA DAS VIGAS .....	77
4.3. DESLOCAMENTOS VERTICAIS DAS VIGAS .....	80
4.4. DEFORMAÇÕES NAS ARMADURAS DE FLEXÃO .....	89
4.5. DEFORMAÇÕES NAS ARMADURAS DE CISALHAMENTO .....	98
4.6. DEFORMAÇÕES NO REFORÇO .....	105
4.7. DEFORMAÇÕES NO CONCRETO .....	111
<b>5. AVALIAÇÃO DAS RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS .....</b>	<b>118</b>
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>122</b>
6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	123
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>124</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela</b>	<b>Página</b>
Tabela 2.1: Modos de ruptura em elementos fletidos reforçados com PRF .....	19
Tabela 2.2: Valores experimentais de cargas de ruptura e serviço de FORTES <i>et al.</i> (2002). 27	27
Tabela 2.3: Resultados experimentais de YOST <i>et al.</i> (2007) .....	29
Tabela 2.4: Resultados experimentais obtidos de DIAS <i>et al.</i> (2012) .....	30
Tabela 2.5: Resultados experimentais de BILLOTA <i>et al.</i> (2015) .....	32
Tabela 2.6: Resultados experimentais de SEO <i>et al.</i> (2016) .....	33
Tabela 2.7: Resultados experimentais de HOSEN <i>et al.</i> (2016) .....	23
Tabela 2.8: Resultados experimentais de PATEL <i>et al.</i> (2019) .....	24
Tabela 2.9: Resultados experimentais de Saeed <i>et al.</i> (2017) .....	25
Tabela 2.10: Resultados experimentais de Al-Abdwais e Al-Mahaidi (2020) .....	26
Tabela 3.1: Detalhes das vigas propostas .....	43
Tabela 3.2: Dimensionamento das vigas de referência .....	49
Tabela 3.3: Dimensionamento das vigas reforçadas com PRFC – ACI 440.2R (2017) .....	50
Tabela 3.4: Dimensionamento das vigas reforçadas com PRFC – <i>fib Bulletin</i> 90 (2019) .....	50
Tabela 3.5: Dimensionamento das vigas reforçadas com barras de aço .....	51
Tabela 3.6: Cálculo da resistência ao cisalhamento .....	52
Tabela 4.1: Propriedades mecânicas do aço utilizado nas vigas .....	74
Tabela 4.2: Propriedades mecânicas do concreto .....	75
Tabela 4.3: Propriedades mecânicas da argamassa de reparo estrutural .....	76
Tabela 4.4: Resultados experimentais das vigas ensaiadas .....	77
Tabela 5.1: Estimativa da capacidade resistente à flexão das vigas reforçadas de acordo com as prescrições do ACI 440.2R (2017) .....	119
Tabela 5.2: Estimativa da capacidade resistente à flexão das vigas reforçadas de acordo com as prescrições do <i>fib Bulletin</i> 90 (2019) .....	119

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
Figura 1.1: Comparação das técnicas de reforço estrutural [Coelho <i>et al</i> (2011)].....	2
Figura 1.2: Diagrama tensão-deformação de fibras [Machado e Machado (2015)] .....	3
Figura 2.1: Representação de um PRF [Nanni (2005) – Adaptado] .....	11
Figura 2.2: Tipos de fibras [ <a href="https://www.slideshare.net/nickgupta33/fiber-reinforced-plastics-by-sairam">https://www.slideshare.net/nickgupta33/fiber-reinforced-plastics-by-sairam</a> ].....	12
Figura 2.3: Viga reforçada com PRFC pelo método NSM .....	13
Figura 2.4: Mecanismo de ruptura de vigas de concreto armado reforçadas pelo método NSM .....	15
Figura 2.5: Gráfico de Acréscimo de Carga x Porcentagem de reforço de PRFC [Dias <i>et al</i> (2012)].....	17
Figura 2.6 – Comparação da carga última em relação a razão da profundidade da ranhura e seu espaçamento .....	18
Figura 2.7: Ruptura dada pelo esmagamento do concreto antes do escoamento do aço (CC). 19	
Figura 2.8: Ruptura dada pelo escoamento do aço seguida pelo esmagamento do concreto (CC) .....	20
Figura 2.9: Ruptura dada pelo escoamento do aço seguida pela ruptura do PRF (RF) .....	20
Figura 2.10: Ruptura dada delaminação do cobrimento (FL) .....	21
Figura 2.11: Ruptura dada pelo descolamento do PRF (DE).....	21
Figura 2.12: Seção transversal das vigas (Fonte: Fortes <i>et al</i> , 2002).....	27
Figura 2.13: Geometria e distribuição do reforço das vigas (Fonte: Yost <i>et al</i> , 2007) .....	28
Figura 2.14: Seção transversal das vigas reforçadas (Fonte: Dias <i>et al</i> , 2012).....	30
Figura 2.15: Seções transversais das vigas (Fonte: Billota <i>et al</i> , 2015).....	31
Figura 2.16: Geometria das vigas (Fonte: Seo <i>et al</i> , 2016).....	33
Figura 3.1: Representação das vigas propostas no programa experimental.....	45
Figura 3.2: Detalhamento longitudinal das armaduras das vigas ensaiadas .....	45
Figura 3.3: Detalhamento transversal das armaduras das vigas ensaiadas .....	46
Figura 3.4: Detalhe do sistema de ancoragem adotado nas vigas do programa experimental. 46	
Figura 3.5: Detalhamento do reforço das vigas ensaiadas .....	47

Figura 3.6: Dimensões mínimas das ranhuras [Fonte: ACI 440.2R (2017)].....	47
Figura 3.7: Dimensões das ranhuras das vigas reforçadas: .....	48
Figura 3.8: Disposição das ranhuras das vigas:.....	48
Figura 3.9: Armaduras posicionadas nas fôrmas antes da concretagem .....	53
Figura 3.10: Processo de soldagem das chapas metálicas de ancoragem mecânica .....	53
Figura 3.11: Fôrmas de aço .....	54
Figura 3.12: Fôrmas de corpos de prova de concreto e materiais utilizados para o teste de abatimento de cone.....	55
Figura 3.13: Amostra de concreto submetida ao ensaio de abatimento do tronco de cone ....	55
Figura 3.14: Vigas encobertas com lonas plásticas durante a cura .....	56
Figura 3.15: Ensaio de caracterização do concreto: (a) Resistência à tração (b) Resistência à compressão (c) Módulo de elasticidade .....	57
Figura 3.16: Posicionamento dos LVDTs .....	60
Figura 3.17: Posicionamento dos extensômetros nas armaduras de flexão e de cisalhamento	61
Figura 3.18: Posicionamento dos extensômetros na barra de flexão (a) Vista lateral (b) Vista superior .....	61
Figura 3.19: Etapas do processo de colagem dos extensômetros.....	62
Figura 3.20: Posicionamento dos extensômetros no reforço.....	63
Figura 3.21: Posicionamento dos extensômetros no laminado de PRFC.....	63
Figura 3.22: Posicionamento dos extensômetros no concreto .....	64
Figura 3.23: Ranhuras nas vigas reforçadas com lâminas de PRFC .....	65
Figura 3.24: Ranhuras nas vigas reforçadas com barras de aço.....	65
Figura 3.25: Vigas posicionadas para a execução do reforço. ....	66
Figura 3.26: Posicionamento dos ganchos para fixação das barras de aço .....	67
Figura 3.27: Execução dos furos para posicionamento dos ganchos de fixação do reforço ....	67
Figura 3.28: Preparo do laminado de PRFC .....	68
Figura 3.29: Procedimento da execução do reforço das vigas com PRFC .....	69
Figura 3.30: Procedimento da execução do reforço das vigas com barra de aço.....	71
Figura 3.31: Representação do esquema estático de carregamento das vigas .....	72
Figura 3.32: Representação do diagramas de momento fletor e esforço cortante das vigas....	72
Figura 4.1: Vista frontal do trecho central da viga VREF10 após o ensaio.....	78
Figura 4.2: Vista frontal do trecho central da viga VREF16 após o ensaio.....	78
Figura 4.3: Vista frontal do trecho central da viga VREF20 após o ensaio.....	78

Figura 4.4: Vista frontal do trecho central da viga VC10 após o ensaio.....	79
Figura 4.5: Vista frontal do trecho central da viga VC16 após o ensaio.....	79
Figura 4.6: Vista frontal do trecho central da viga VC20 após o ensaio.....	79
Figura 4.7: Vista frontal do trecho central da viga VA10 após o ensaio .....	79
Figura 4.8: Vista frontal do trecho central da viga VA16 após o ensaio .....	80
Figura 4.9: Vista frontal do trecho central da viga VA20 após o ensaio .....	80
Figura 4.10: Deslocamentos verticais da viga VREF10 .....	81
Figura 4.11: Deslocamentos verticais da viga VREF12,5 .....	81
Figura 4.12: Deslocamentos verticais da viga VREF16 .....	82
Figura 4.13: Deslocamentos verticais da viga VREF20 .....	82
Figura 4.14: Deslocamentos verticais da viga VC10 .....	83
Figura 4.15: Deslocamentos verticais da viga VC12,5 .....	83
Figura 4.16: Deslocamentos verticais da viga VC16 .....	84
Figura 4.17: Deslocamentos verticais da viga VC20 .....	84
Figura 4.18: Deslocamentos verticais da viga VA10.....	85
Figura 4.19: Deslocamentos verticais da viga VA12,5.....	85
Figura 4.20: Deslocamentos verticais da viga VA16.....	86
Figura 4.21: Deslocamentos verticais da viga VA20.....	86
Figura 4.22: Deslocamento vertical central LVDT4 das vigas V10 .....	87
Figura 4.23: Deslocamento vertical central LVDT4 das vigas V12,5 .....	87
Figura 4.24: Deslocamento vertical central LVDT4 das vigas V16 .....	88
Figura 4.25: Deslocamento vertical central LVDT4 das vigas V20 .....	88
Figura 4.26: Deformações na armadura de flexão da viga VREF10 .....	90
Figura 4.27: Deformações na armadura de flexão da viga VREF12,5 .....	90
Figura 4.28: Deformações na armadura de flexão da viga VREF16 .....	91
Figura 4.29: Deformações na armadura de flexão da viga VREF20 .....	91
Figura 4.30: Deformações na armadura de flexão da viga VC10 .....	92
Figura 4.31: Deformações na armadura de flexão da viga VC12,5 .....	92
Figura 4.32: Deformações na armadura de flexão da viga VC16 .....	93
Figura 4.33: Deformações na armadura de flexão da viga VC20 .....	93
Figura 4.34: Deformações na armadura de flexão da viga VA10.....	94
Figura 4.35: Deformações na armadura de flexão da viga VA12,5.....	94
Figura 4.36: Deformações na armadura de flexão da viga VA16.....	95

Figura 4.37: Deformações na armadura de flexão da viga VA20 .....	95
Figura 4.38: Deformações do extensômetro EF1 das vigas V10 .....	96
Figura 4.39: Deformações do extensômetro EF1 das vigas V12,5 .....	97
Figura 4.40: Deformações do extensômetro EF1 das vigas V16 .....	97
Figura 4.41: Deformações do extensômetro EF1 das vigas V20 .....	98
Figura 4.42: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VREF10 .....	99
Figura 4.43: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VREF12,5 .....	99
Figura 4.44: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VREF16 .....	100
Figura 4.45: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VREF20 .....	100
Figura 4.46: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VC10 .....	101
Figura 4.47: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VC12,5 .....	101
Figura 4.48: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VC16 .....	102
Figura 4.49: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VC20 .....	102
Figura 4.50: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VA10 .....	103
Figura 4.51: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VA12,5 .....	103
Figura 4.52: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VA16 .....	104
Figura 4.53: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VA20 .....	104
Figura 4.54: Deformações no reforço da viga VC10 .....	105
Figura 4.55: Deformações no reforço da viga VC12,5 .....	106
Figura 4.56: Deformações no reforço da viga VC16 .....	106
Figura 4.57: Deformações no reforço da viga VC20 .....	107
Figura 4.58: Deformações no reforço da viga VA10 .....	107
Figura 4.59: Deformações no reforço da viga VA12,5 .....	108
Figura 4.60: Deformações no reforço da viga VA16 .....	108
Figura 4.61: Deformações no reforço da viga VA20 .....	109
Figura 4.62: Deformações no reforço da vigas reforçadas com laminado de PRFC .....	110
Figura 4.63: Deformações no reforço da vigas reforçadas com barras de aço .....	110
Figura 4.64: Deformações na superfície do concreto da viga VREF10 .....	111
Figura 4.65: Deformações na superfície do concreto da viga VREF12,5 .....	112
Figura 4.66: Deformações na superfície do concreto da viga VREF16 .....	112
Figura 4.67: Deformações na superfície do concreto da viga VREF20 .....	113
Figura 4.68: Deformações na superfície do concreto da viga VC10 .....	113
Figura 4.69: Deformações na superfície do concreto da viga VC12,5 .....	114

Figura 4.70: Deformações na superfície do concreto da viga VC16 .....	114
Figura 4.71: Deformações na superfície do concreto da viga VC20 .....	115
Figura 4.72: Deformações na superfície do concreto da viga VA10 .....	115
Figura 4.73: Deformações na superfície do concreto da viga VA12,5 .....	116
Figura 4.74: Deformações na superfície do concreto da viga VA16 .....	116
Figura 4.75: Deformações na superfície do concreto da viga VA20 .....	117
Figura 4.76: Seção de esmagamento do concreto na viga VA10.....	118
Figura 5.1: Aumento de capacidade resistente proporcionada pelo reforço .....	121

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
$A_f$	Área dos elementos de polímero reforçado com fibras utilizado no reforço;
$A_s$	Área da seção transversal das barras de aço tracionadas;
$A'_s$	Área da seção transversal das barras de aço comprimidas;
$a$	Distância entre o apoio e o ponto de aplicação da carga;
$b_g$	Largura do sulco encravado na viga para receber o PRF;
$b_w$	Largura da viga;
$c$	Altura do bloco retangular de distribuição de tensões do concreto equivalente;
$c_p$	Distância entre os pontos de aplicação da carga no ensaio de ruptura das vigas;
$d$	Distância do ponto comprimido mais extremo da viga ao centroide da armadura inferior;
$d'$	Distância do ponto comprimido mais extremo da viga ao centroide da armadura superior;
$d_f$	Profundidade efetiva do PRF aplicado no reforço à flexão;
$E_c$	Módulo estático de elasticidade à compressão do concreto;
$E_s$	Módulo de elasticidade do aço;
$E_f$	Módulo de elasticidade da fibra de reforço;
$f_c$	Resistência à compressão do concreto;
$f'_c$	Resistência específica à compressão do concreto (abordagem – ACI 318:2011);
$f_{cd}$	Tensão de resistência de projeto do concreto à compressão;
$f_{ck}$	Tensão de resistência característica do concreto à compressão;
$f_{ys}$	Tensão de escoamento do aço da armadura inferior;
$f'_{ys}$	Tensão de escoamento do aço da armadura superior;
$f_{fe}$	Resistência efetiva à tração no PRF;
$f_s$	Tensão no aço da armadura inferior;

$f'_s$	Tensão no aço da armadura superior;
$F_c$	Força de compressão atuante no concreto;
$F_f$	Força de tração atuante na fibra;
$F_s$	Força de tração atuante na armadura inferior;
$F'_s$	Força de tração atuante na armadura superior;
$h$	Altura total da viga;
$h_f$	Altura da lâmina de PRFC;
$h_g$	Altura do sulco encaixado na viga para receber o PRF;
$L$	Comprimento total da viga;
$l_b$	Distância entre a extremidade da fibra de reforço e o ponto de aplicação da carga;
$M_U$	Momento último experimental;
$M_R$	Momento resistente teórico;
$n$	Quantidade total de lâminas de reforço com PRF;
$P_{u,exp}$	Carga última experimental;
$P_{u,teo}$	Carga última teórica;
$P_{serv}$	Carga de serviço experimental;
$t_f$	Espessura da lâmina de PRF;
$x$	Altura da linha neutra em relação à fibra mais comprimida;
$a_1$	Fator multiplicador do $f'_c$ para determinar a intensidade de um bloco retangular de distribuição de tensões do concreto equivalente;
$b_1$	Razão entre a profundidade do bloco de tensões retangular equivalente e a profundidade do eixo neutro;
$d_g$	Fator redutor da profundidade da linha neutra para o bloco de tensões equivalente;
$g_f$	Coeficiente de minoração da deformação de projeto da fibra;
$\Upsilon$	Razão entre a profundidade do bloco de tensões equivalente e da linha neutra;

$Y_f$	Fator de redução da resistência do PRF;
$e_{ys}$	Deformação de escoamento do aço;
$e_s$	Deformação efetiva do aço da armadura inferior;
$e'_s$	Deformação efetiva do aço da armadura superior;
$e_c$	Deformação no concreto;
$e'_c$	Deformação máxima no concreto não confinado, correspondendo à $f'_c$ ;
$e_{cu}$	Deformação última do concreto;
$e_f$	Deformação no reforço de PRF;
$e_{fd}$	Deformação de descolamento no reforço de PRF aderido externamente;
$e_{fe}$	Deformação efetiva no reforço de PRF;
$e_{fu}$	Deformação de projeto de ruptura no reforço de PRF;
$e_{bi}$	Deformação no substrato de concreto no momento de aplicação do reforço de PRF;
$K_m$	Coefficiente adimensional dependente da forma de ligação para a flexão;
$\rho$	Taxa de armadura de flexão total da viga antes do reforço;
$\rho'$	Taxa de armadura de flexão da viga na parte comprimida;
$\rho_b$	Taxa de armadura balanceada da viga;
$\rho_f$	Taxa de reforço de PRF;
$\rho_r$	Taxa de armadura de aço equivalente após o reforço.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O concreto é atualmente o material mais consumido na construção civil, possuindo uma grande importância na composição do sistema dorsal de infraestrutura mundial.

Conforme destacado por Machado e Machado (2015), a ação deletéria do meio ambiente, os defeitos estruturais provocados por erros de projeto, erros de execução da obra e erros de especificação de materiais, os danos proporcionados devido à sobrecarga da estrutura, a efeitos naturais (terremotos) e a acidentes (incêndio) e a deterioração causada pela corrosão ou ataque de sulfato, podem prejudicar a vida útil e a situação de serviço dos elementos dentro de sua finalidade inicial.

Frente à estes fatores, é perceptível que muitos elementos estruturais de concreto armado já passaram ou irão passar por um processo de reabilitação. Uma forma de reabilitar uma estrutura é por meio do reforço, que caracteriza-se como uma atividade específica para os casos em que se deseja elevar o desempenho observado, dotando a estrutura de maior resistência e/ou rigidez.

Dada a necessidade deste tipo de intervenção, foram desenvolvidas diversas técnicas para a execução do reforço estrutural, utilizando os mais variados materiais. De forma mais recente, tem ganhado visibilidade a utilização de técnicas que visam a aplicação dos materiais de reforço externamente ao elemento estrutural, por se tratarem de métodos não invasivos e de fácil aplicação.

Dentre estas técnicas de reforço estrutural externamente aderidos, podemos citar duas principais: o *Externally Bonded Reinforcement* (EBR) e a sua variação, o *Near Surface Mounted* (NSM).

A técnica EBR consiste em aderir o material, na forma de manta ou laminado, externamente ao elemento estrutural a ser reforçado, utilizando uma resina adesiva para a colagem. Já a técnica NSM consiste na instalação de barras ou lâminas em ranhuras abertas longitudinalmente na superfície do elemento reforçado, prevendo também a utilização de resinas, que devem preencher toda a ranhura após a instalação do reforço.

Visando comparar a utilização destas técnicas, Coelho *et al* (2011) realizou um estudo experimental no qual mostrou as vantagens do NSM em relação aos demais métodos, como ilustra a Figura 1.1.

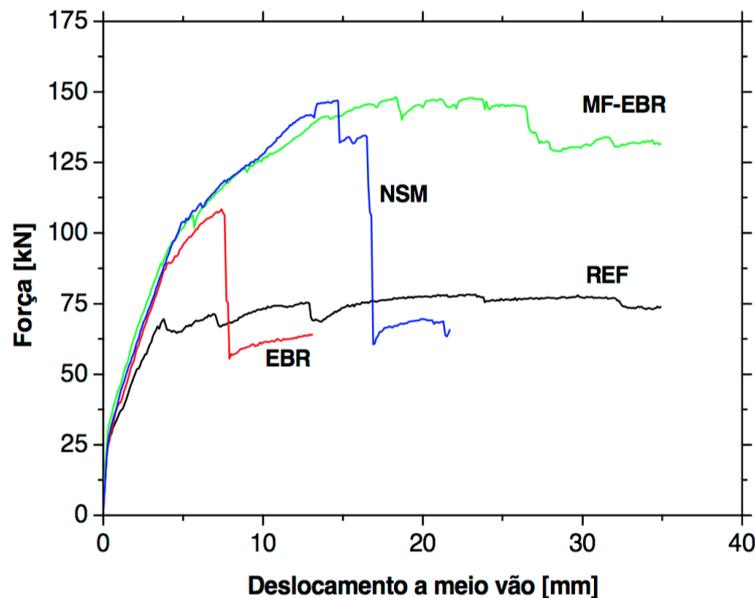


Figura 1.1: Comparação das técnicas de reforço estrutural [Coelho *et al.* (2011)]

Dessa forma, neste trabalho será abordada a avaliação de vigas de concreto armado reforçadas pelo método *Near Surface Mounted* (NSM).

O estudo da técnica NSM para reforço estrutural é extremamente relacionado à aplicação dos polímeros reforçados com fibras (PRF). Estes polímeros combinam a aplicação de componentes estruturais e componentes matriciais nos reforços estruturais, compondo um material não homogêneo, anisotrópico e heterogêneo, que apresenta um comportamento elástico linear até a ruptura.

As fibras que compõem o elemento estrutural deste material compósito podem ser fabricadas em diversos formatos – como lâminas, barras e tecidos – e materiais – como carbono, aramida e vidro.

Dentre estes materiais tem ganhado destaque o polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC), devido a sua elevada resistência, em comparação aos demais materiais, o que pode ser verificado a partir do digrama de tensão-deformação apresentado na Figura 1.2.

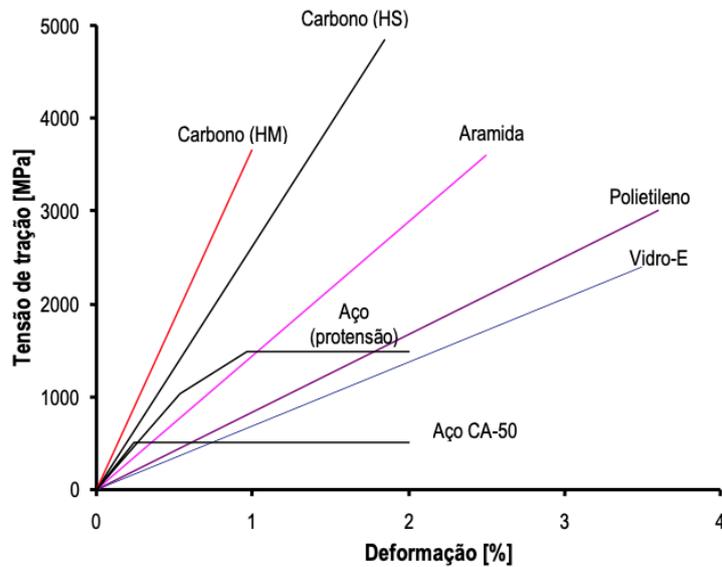


Figura 1.2: Diagrama tensão-deformação de fibras [Machado e Machado (2015)]

Assim, Machado e Machado (2015) indicam que a aplicação de polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC) no reforço estrutural proporciona diversas vantagens ao processo, pois além da sua elevada resistência, este material é extremamente leve, versátil e apresenta baixa suscetibilidade a processos de deterioração, como a corrosão.

Contudo, o custo deste material ainda é considerado elevado, se comparado à materiais amplamente utilizados na construção civil, como o aço. Assim, o preço elevado das fibras de carbono ainda representa um grande problema para a sua ampla aplicação no meio técnico, combinado com a escassez de profissionais e equipes técnicas com domínio executivo para a sua utilização, dada a baixa aplicabilidade deste material em projetos.

Com isso, tem sido proposta no meio científico a utilização de materiais mais baratos e de aplicabilidade mais conhecida para a composição do reforço pela técnica NSM. Um exemplo é a utilização das barras de aço como substituto das fibras, conforme já avaliado por Hosen et al. (2014), Hosen et al. (2016) e Patel et al. (2019).

Por mais que o aço seja um material altamente suscetível à corrosão, a sua correta aplicação na técnica NSM pode contornar este problema. Como esta técnica prevê que o elemento estrutural do polímero seja totalmente recoberto pelo elemento matricial, podem ser utilizadas resinas com propriedades anticorrosivas combinadas ao aço.

A durabilidade e adequação da aplicação de resina à base epóxi para reforço estrutural já foi

questionada por algumas pesquisas. Castro (1994) avaliou a manutenção de vigas de concreto armado e ao avaliar resinas à base epóxi percebeu que a diferença de potencial existente entre o concreto e a resina epóxi gerou um efeito de carbonatação do concreto do cobrimento, o que provocou uma transferência de íons e criou uma pilha de corrosão que acelerou a degradação da armadura de flexão.

Dessa forma, para evitar os problemas de durabilidade da resina epóxi, é prevista a utilização de argamassas especiais, como uma argamassa cimentícia polimérica, um material para reparos estruturais com agente adesivo integrado e inibidor de corrosão. Esta inovação proposta ao método NSM pode estimular a sua aplicação em situações reais de projeto, por tratar de materiais mais conhecidos pelo mercado, além de contribuir para o meio científico da Engenharia Civil, ao avaliar novas possibilidades de reforço estrutural. Alguns autores como Saeed et al. (2017) e Al-Abdwais (2020) já avaliaram a utilização de adesivos à base cimentícia para reforço estrutural pela técnica NSM, contudo, nenhum deles avaliou a combinação desses adesivos com barra de aço.

Ainda, houve o incentivo da Kali Engenharia para avaliar a técnica NSM com barras de aço e argamassa polimérica, visto que esta empresa tem realizado testes com soluções similares e gostaria de explorar cientificamente o seu comportamento e aplicabilidade em projetos reais.

Assim, este trabalho abordará vigas de concreto armado reforçadas com barras de aço e argamassa polimérica, visando comparar a sua eficiência e aplicabilidade com as vigas de concreto armado reforçadas com polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC) e resina epóxi, um método já conhecido e validado no meio científico.

## **1.2. MOTIVAÇÃO**

A utilização de métodos de reforço externamente aderidos têm sido cada vez mais aplicada em situações de projeto, mostrando-se uma técnica prática e eficiente, principalmente ao utilizar polímeros reforçados com fibras. Porém, observando o mercado de construção civil, percebe-se que ainda existe bastante resistência na utilização de materiais poliméricos como a fibra de carbono, dado o seu elevado custo e a falta de profissionais capacitados e com experiência para trabalhar com este material. Ainda, existem indicações científicas de que a resina epóxi possui

baixa durabilidade para o reforço estrutural de elementos de concreto armado e pode até acelerar a corrosão da armadura de flexão dos elementos.

Além disso, a Kali Engenharia, empresa de grande relevância e experiência no mercado de reforço estrutural do Distrito Federal, já vem explorando novas possibilidades de aplicação do reforço estrutural pela técnica NSM, focando na utilização de barras de aço combinadas com argamassa polimérica.

Assim, de forma a validar essa aplicação de materiais menos convencionais para a técnica NSM, considera-se explorar a utilização de barras de aço combinadas com argamassas especiais, que possuem proteção contra a corrosão. Nesta pesquisa será estudada a aplicação de uma argamassa cimentícia polimérica, um material para reparos estruturais com agente adesivo integrado e inibidor de corrosão. Esta alternativa de aplicação da técnica NSM com barras de aço é pouco explorada no meio científico e técnico, mas possui grande potencial de aplicação em projetos de reforço.

Deste modo, a motivação do trabalho está em desenvolver pesquisas experimentais que avaliem a efetividade e aplicabilidade da técnica de reforço NSM utilizando barras de aço com uma argamassa cimentícia polimérica, buscando explorar uma alternativa de reforço estrutural ainda pouco estudada, porém muito promissora e inovadora.

### **1.3. JUSTIFICATIVA**

A tendência de utilizar materiais mais versáteis e métodos menos invasivos para o reforço estrutural deu maior destaque no meio científico às técnicas de reforço colados externamente, como o NSM com utilização de polímeros reforçados com fibras (PRF) e resina à base epóxi. Porém, a sua aplicação em uma situação real de projeto ainda apresenta resistência por parte de muitos profissionais, principalmente em mercados mais conservadores que não possuem muitos profissionais com experiência relevante na utilização de PRF, um material ainda considerado caro na construção civil. Ainda, existem evidências científicas de que a utilização de adesivos à base epóxi para o reforço estrutural podem acelerar o processo de corrosão da armadura de flexão, prejudicando a sua durabilidade.

Para lidar com estas desvantagens e atender às solicitações reais da Kali Engenharia, que busca avaliar a aplicabilidade de novas soluções de reforço estrutural em seus projetos, é realizada a

proposta de avaliar a eficiência de projetos de reforço estrutural que utilizam a técnica NSM com materiais diferenciados, ou seja, barras de aço para o componente estrutural e argamassa cimentícia polimérica para o componente matricial.

A avaliação deste programa experimental irá permitir avaliar a eficiência e aplicabilidade de reforço pelo método NSM com barras de aço combinadas com argamassa e comparar o seu comportamento à aplicação do método NSM com laminados de PRFC e resina epóxi, uma solução mais usual e já validada no meio técnico e científico.

Neste sentido, esta pesquisa irá contribuir para a elaboração de um banco de dados com análises paramétricas de elementos reforçados com barras de aço e argamassa polimérica pela técnica NSM, trazendo mais informação ao meio técnico-científico brasileiro a respeito dessa interessante técnica de reforço.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. Objetivo Geral**

Este trabalho de dissertação de mestrado tem como objetivo principal avaliar o comportamento experimental de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com barras de aço e argamassa polimérica pela técnica NSM, comparando-as com vigas reforçadas com laminados de PRFC e resina epóxi, uma solução mais usual da técnica NSM. A partir das vigas ensaiadas em laboratório busca-se avaliar os parâmetros que influenciam de maneira considerável no seu comportamento mecânico e também as formulações existentes para a estimativa de capacidade resistente.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

Em relação aos objetivos específicos deste trabalho, busca-se ensaiar e avaliar o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com barras de aço e argamassa polimérica, utilizando a técnica NSM, com a finalidade de:

- Avaliar a utilização de argamassa cimentícia polimérica combinada às barras de aço para o NSM e avaliar a sua eficiência, comparada à utilização de lâminas de PRFC combinadas com resina epóxi, que é uma técnica já conhecida e validada no meio técnico e científico;

- Avaliar a influência de parâmetros como a variação da taxa de armadura de flexão no comportamento das vigas reforçadas;
- Avaliar os métodos teóricos propostos pelo ACI 440.2R (2017) e *fib* Bulletin 90 (2019) para a estimativa de capacidade resistente.

## **1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO**

O trabalho está dividido em 6 capítulos.

O presente Capítulo 1 introduz o leitor nos assuntos abordados no trabalho.

No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica, apresentando alguns fundamentos teóricos acerca do tema, assim como trabalhos de autores que já abordaram os assuntos tratados nesta pesquisa, evidenciando suas conclusões e outras considerações pertinentes. Também são apresentados os parâmetros responsáveis por exercer influência sobre o comportamento das vigas de concreto armado reforçadas, os modos de ruptura evidenciados na análise destes elementos e os modelos de cálculo e recomendações das prescrições normativas ACI 440.2R (2017) e *fib* Bulletin 90 (2019).

Já no Capítulo 3 temos uma descrição detalhada do programa experimental, apresentado as características das vigas e dos materiais utilizados, assim como uma descrição do processo de execução do reforço e ensaio das vigas.

No Capítulo 4 são expostos os resultados obtidos, apresentando o comportamento de diversos aspectos analisados nas vigas, como as cargas últimas, modos de ruptura, deslocamentos verticais e deformações dos elementos. Assim, este capítulo traz tanto as análises realizadas como a interpretação dos resultados obtidos, buscando apresentar uma compreensão maior do comportamento das vigas reforçadas com a técnica NSM.

O Capítulo 5 é reservado para a avaliação das recomendações normativas do ACI 440.2R (2017) e do *fib* Bulletin 90 (2019), avaliando se os seus modelos de cálculo foram adequados no dimensionamento das vigas, confrontando os resultados teóricos previstos pelas normas com os resultados experimentais observados no programa experimental.

Por fim, o Capítulo 6 traz as conclusões do trabalho.

## **1.6. METODOLOGIA**

Para a realização deste trabalho foram ensaiadas 12 vigas no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília (LABEST-UnB), sendo 4 vigas de referência e 8 vigas reforçadas pelo método NSM, sendo 4 com laminados de PRFC e resina epóxi e 4 com barras de aço e argamassa polimérica. Todas as vigas possuem as mesmas dimensões e taxa de reforço, variando-se a taxa de armadura de flexão e o tipo de reforço.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. MATERIAIS COMPÓSITOS**

Machado e Machado (2015) descrevem que, na busca por alternativas de novos materiais para aplicação em engenharia, começaram a ser desenvolvidos estudos envolvendo materiais compósitos, que são formados a partir da união de materiais de naturezas diversas, visando obter um produto final de maior qualidade.

Conforme indicado por Meneghetti (2007), o produto final é construído artificialmente e possui propriedades que representam uma parcela de cada elemento que o constitui, dependendo da natureza, quantidades, funções e geometria de cada um destes componentes.

#### **2.1.1. COMPOSIÇÃO**

Conforme descrito por Beber (2003), os materiais compósitos são provenientes da união de dois tipos de elementos, sendo eles normalmente denominados como componentes matriciais e componentes dispersos.

##### **2.1.1.1. Componente Matricial**

Feltre (2005) indica que os componentes matriciais são responsáveis por dar forma ao compósito e melhorar as propriedades do produto final, permitindo a transferência e distribuição de esforços para os componentes dispersos e entre eles, visto que representam um elemento contínuo que envolve completamente os demais componentes.

Ainda, esses componentes também possuem a função de proteger os componentes dispersos contra danos superficiais, em decorrência de abrasão mecânica ou de reações químicas com o ambiente. De forma geral, segundo Hollaway (1993), o material escolhido para compor a matriz polimérica deve:

- Transferir integralmente as tensões para os componentes dispersos por atrito ou adesão;
- Unir os componentes dispersos e proteger suas superfícies durante o manuseio, fabricação e ao longo de toda sua vida útil;

- Dispersar e separar os componentes dispersos com o objetivo de evitar a propagação de fissuras e conseqüente ruptura do compósito;
- Ser compatível com os demais componentes do compósito, em termos químicos e térmicos.

No âmbito do reforço estrutural, a componente matricial é comumente representada pelas resinas, sendo a mais comum a resina epóxi com aditivos. Machado e Machado (2015) indicam que as resinas epóxi apresentam alta aderência a diversos tipos de fibras e componentes estruturais, sendo resistentes a ações químicas e apresentando baixa retração durante a cura.

Contudo, conforme apresentado por Castro (1994), a utilização de resina epóxi afeta a durabilidade das vigas de concreto armado, pois ocorrem reações químicas que aceleram a corrosão da armadura de flexão.

#### **2.1.1.2. Componente Disperso**

Feltre (2005) indica que os componentes dispersos são aqueles responsáveis por determinar a estrutura interna do compósito e proporcionar força e rigidez ao material, podendo ser representados por partículas, fibras ou elementos estruturais. Dessa forma, a depender do tipo de componente disperso identificado na mistura, pode-se classificar o material compósito como particular, fibroso ou estrutural.

De forma a exemplificar os materiais compósitos, podemos citar o concreto, que constitui um compósito particular, dado pela interação entre as partículas de agregados de diversos tamanhos e a matriz de pasta de cimento, conforme descrito por Callister Jr. (1997). Ainda, Beber (1999) destaca que o próprio concreto armado representa um material compósito, combinando as propriedades de resistência à compressão do concreto com a rigidez e resistência à tração das barras de aço.

#### **2.1.2. POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS**

Ao tratar de reforço estrutural damos destaque aos materiais compósitos fibrosos, visto que estes, segundo Callister Jr. (1997), possuem maior importância tecnológica e potencial de inovação que os demais. Isso ocorre pois o formato das fibras faz com que elas apresentem melhores propriedades de resistência e rigidez que os demais materiais, se tornando

extremamente vantajosa em aplicações de reforço estrutural, conforme apresentado por Beber (2003).

Assim, de forma mais específica, Machado e Machado (2015) destacam que têm chamado atenção no meio da engenharia estrutural os polímeros reforçados com fibra (PRF), do inglês *fibre reinforced polymer* (FRP). Estes materiais são dados pela união entre fibras contínuas de diversos polímeros – como carbono, vidro e aramida – e alguma espécie de matriz polimérica – como a resina epóxi.

De forma geral, a estrutura de um PRF pode ser representada pela Figura 2.1.

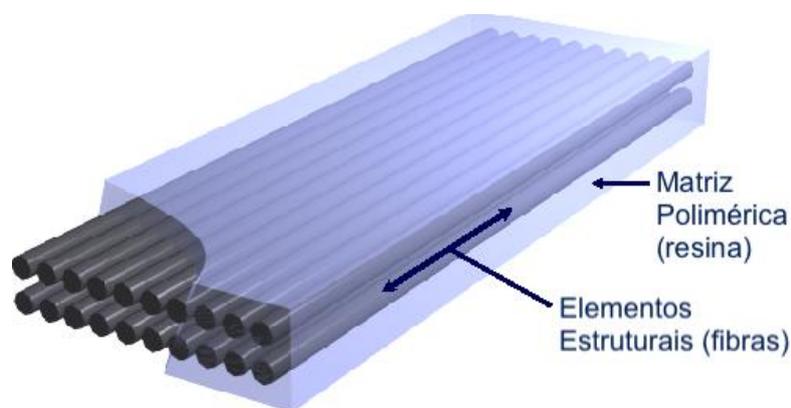


Figura 2.1: Representação de um PRF [Nanni (2005) – Adaptado]

Nanni (2005) indica que os polímeros reforçados com fibras apresentam características inerentes de cada um dos seus constituintes e novas propriedades intermediárias, provenientes das propriedades iniciais das fibras e da matriz polimérica e da união destes materiais por meio da formação da região interfacial, que permite a relação entre eles. Assim, temos um material não homogêneo, anisotrópico e heterogêneo, que apresenta um comportamento elástico linear até a ruptura.

As fibras que compõem o PRF podem ser fabricados em diversos formatos, sendo os tipos mais comuns no mercado apresentados pela Figura 2.2.



a) Lâminas de fibra de carbono



b) Barra de carbono



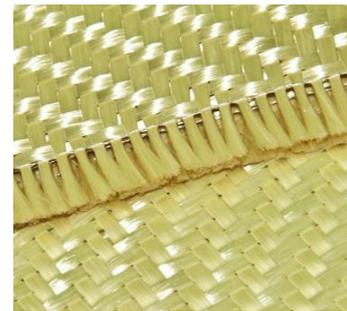
c) Manta de fibra de carbono



d) Fibra de polietileno



e) Tecido de fibra de vidro



f) Tecido de fibra de aramida

Figura 2.2: Tipos de fibras [<https://www.slideshare.net/nickgupta33/fiber-reinforced-plastics-by-sairam>]

Machado e Machado (2005) destacam algumas vantagens das fibras, indicam que são materiais muito leves, com excelentes propriedades mecânicas e de fácil aplicação e adaptação às superfícies, visto que apresentam uma elevada versatilidade quanto a sua aparência e formato, podendo ser concebida na forma de mantas, lâminas, barras e laminados. Devido à estas características, elas são extremamente vantajosas para aplicação em situações de reforço estrutural.

Contudo, as fibras são materiais caros e poucos aplicados no mercado da construção civil, visto que não há muita mão de obra especializada disponível. Assim, este trabalho explora a utilização de materiais menos convencionais para o reforço com a técnica NSM, mais especificamente as barras e aço combinadas à argamassa polimérica, com o intuito de comparar esta solução à utilização de PRF combinado com resina epóxi.

## 2.2. NEAR SURFACE MOUNTED (NSM)

Conforme descrito por Machado e Machado (2015), a técnica NSM consiste na instalação de barras ou lâminas internamente ao elemento fletido, por meio da fixação destes materiais

compósitos no interior de aberturas longitudinais realizadas na peça estrutural. Estes elementos de reforço são embebidos em uma resina, geralmente à base epóxi, que quando endurecidas proporcionam a sua fixação ao elemento reforçado.

Desta forma, a Figura 2.3 apresenta o esquema de uma viga de concreto armado reforçada à flexão com PRFC pelo método NSM, tanto com a utilização de barras circulares como lâminas.

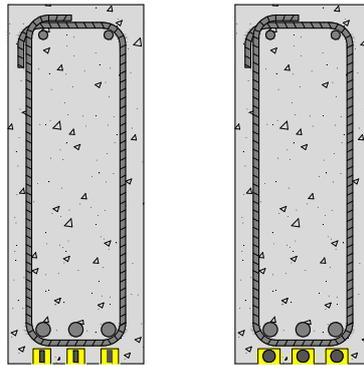


Figura 2.3: Viga reforçada com PRFC pelo método NSM

Coelho *et al.* (2011) destaca que, ao reforçar um elemento de concreto armado, deve-se atentar para as condições em que o substrato apresenta-se, visto que estas características influenciam o comportamento final dos membros reforçados.

O ACI 440.2R (2017) destaca que deve-se trabalhar com elementos que apresentam um substrato saudável e uma superfície descontaminada. Para isto, a norma americana indica que a superfície do concreto deve atender às especificações do método de reforço selecionado e, para a situação de reforço à flexão de vigas de concreto armado pelo método NSM, a superfície dos elementos reforçados exigem uma preparação de aplicação de colagem crítica, pois necessitam de uma colagem eficiente entre o elemento de reforço e o concreto. Ainda, o concreto do elemento reforçado deve possuir uma resistência mínima de 17 MPa.

Ao falar sobre o procedimento de execução do NSM, Barros *et al.* (2007) indica que para aplicações adequadas da técnica, a superfície que receberá a aplicação do reforço deve apresentar uma exposição recente, o que é obtido a partir do lixamento ou do jateamento abrasivo. Esta superfície também não pode apresentar vazios aparentes e, caso existam, estes devem ser preenchidos com argamassa polimérica adequada e qualquer rugosidade excessiva deve ser desbastada. Além disso, qualquer tipo de revestimento, pintura, sujeira e substâncias

oleosas devem ser removidas da superfície, pois podem atrapalhar a eficiência do sistema de colagem. Por fim, caso a instalação do reforço não seja imediata, a superfície do elemento a ser reforçado deve ser protegida até a instalação do sistema e receber uma limpeza adequada.

Após preparar a superfície do elemento a ser reforçado e garantir uma boa condição das suas armaduras, devem ser entalhadas as ranhuras na sua superfície. Machado e Machado (2015) indicam que as ranhuras devem ser confeccionadas com cuidado, a fim de evitar qualquer dano proporcionado à armadura de aço do elemento. Assim, indica-se a utilização de um pacômetro para verificar o cobrimento real do elemento e evitar que os estribos sejam rompidos durante o corte.

Como as ranhuras são entalhadas com o auxílio de uma serra, ocorre a geração de uma grande quantidade de resíduo, que deve ser cuidadosamente limpo em cada abertura antes da instalação do reforço. O ACI 440.2R (2017) e o *fib* Bulletin 90 (2019) indicam que a limpeza deve ser realizado com jato de ar comprimido ou até mesmo aspirador de pó.

Em seguida, as recomendações normativas do ACI 440.2R (2017) e o *fib* Bulletin 90 (2019) indicam que as ranhuras devem ser parcialmente preenchidas com o adesivo especificado pelo fornecedor do sistema e, por fim, devem ser inserido o elemento de reforço.

Com isso, é possível observar que o uso da técnica NSM exige um grande cuidado com o processo de abertura das ranhuras, dada a dificuldade de manter a planicidade do corte, que não pode atingir os estribos durante a sua realização. Contudo, se comparado com a técnica EBR, que prevê o uso de mantas, o NSM exige menor esforço no preparo dos elementos de reforço, já que as barras e lâminas apresentam tratamento prévio e necessitam apenas de um corte no tamanho adequado para o reforço.

### **2.3. COMPORTAMENTO À FLEXÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS PELO MÉTODO NSM**

É possível comparar o comportamento de vigas reforçadas com fibras ao comportamento de vigas simples de concreto armado, sem reforço externo. Machado e Machado (2015) reforçam que a diferença entre o comportamento dessas vigas fletidas consiste em uma parcela adicional de força nas vigas reforçadas, proveniente da contribuição da fibra na resistência à tração e que causa uma alteração na altura da linha neutra, como mostra a Figura 2.4.



## **2.4. PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DAS VIGAS REFORÇADAS PELO MÉTODO NSM**

### **2.4.1. TAXA DE ARMADURA DE FLEXÃO**

A taxa de armadura de flexão é dada pela razão entre a área de aço da armadura e a área de concreto. Visto que o mecanismo de ruptura das vigas de concreto armado reforçadas depende da deformação das armaduras, a taxa de armadura de flexão influencia na resistência à flexão dessas vigas.

### **2.4.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO**

Existe uma relação direta entre a resistência à compressão do concreto e o momento resistente teórico de uma viga de concreto armado, visto que quanto maior a resistência à compressão do elemento, maior o tamanho do bloco de compressão. Como a definição da altura da linha neutra depende diretamente deste parâmetro, ele influencia no valor do momento resistente teórico.

### **2.4.3. ALTURA ÚTIL DA VIGA**

Quanto maior a altura útil ( $d$ ) de uma viga, maior a sua resistência à flexão, visto que ela será capaz de suportar uma carga superior. Isso ocorre pois valores maiores de altura útil do elemento tornam o braço de alavanca entre as resultantes de forças internas maior, proporcionando um momento resistente superior.

### **2.4.4. TAXA DE REFORÇO**

A taxa de reforço de uma viga de concreto armado é dada pela relação entre a área de reforço e a área de concreto do elemento. Esse parâmetro influencia a capacidade resistente à flexão de vigas de concreto armado reforçadas, visto que o mecanismo de ruptura está diretamente relacionado com a deformação deste material.

Esse comportamento foi verificado por Dias *et al.* (2012), que realizou ensaios em vigas reforçadas à flexão com laminados de PRFC, mantendo a taxa de armadura de flexão constante e a taxa de reforço variada. O objetivo deste experimento foi obter uma análise direta da influência do aumento da taxa de reforço no acréscimo da capacidade resistente, ilustrada na Figura 2.5.

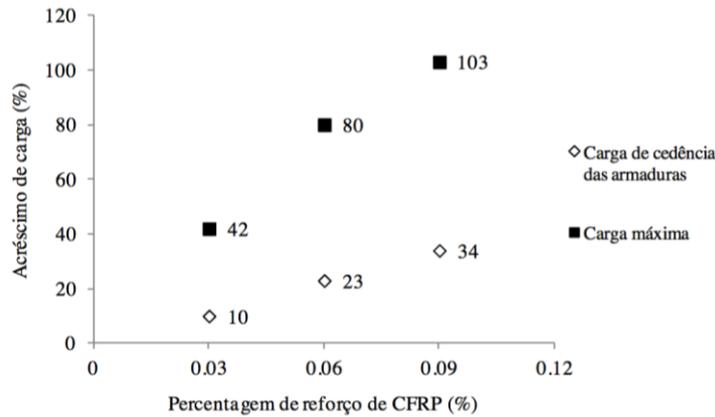


Figura 2.5: Gráfico de Acréscimo de Carga x Porcentagem de reforço de PRFC [Dias *et al* (2012)]

Pode-se observar por meio destes resultados que quanto maior a taxa de reforço com PRFC, maior o acréscimo de carga.

#### 2.4.5. POSICIONAMENTO DO REFORÇO

Na aplicação do reforço pelo método NSM, deve-se garantir que haja um espaçamento mínimo entre as ranhuras adjacentes e entre a borda e a ranhura mais externa. Este cuidado é necessário para garantir que os reforços possam atuar de maneira independente, visto que o seu posicionamento influencia no seu comportamento.

Conforme evidenciado por Kang *et al.* (2005), a relação entre a profundidade da ranhura e seu espaçamento influencia na capacidade resistente à flexão da viga reforçada, uma vez que pode haver interferência entre os reforços. Ainda, dependendo da distância do reforço até a borda do elemento de concreto, pode haver influência do cobrimento no comportamento. Os resultados encontrados pelos autores estão ilustrados na Figura 2.6 e evidenciam a influência da disposição do reforço no elemento.

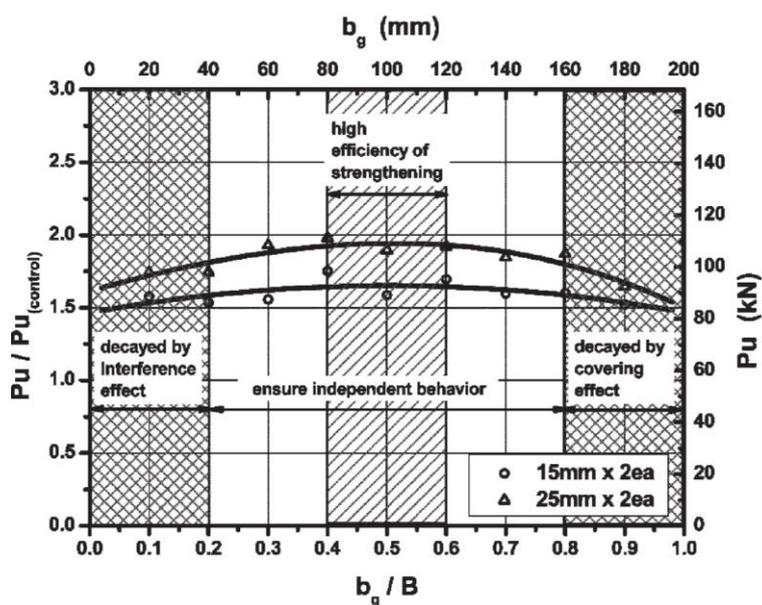


Figura 2.6 – Comparação da carga última em relação a razão da profundidade da ranhura e seu espaçamento

## 2.5. MODOS DE RUPTURA

Os mecanismos de ruptura de uma viga de concreto armado reforçada à flexão podem limitar o aumento da sua capacidade resistente. Alguns modos de ruptura ocorrem de maneira frágil e outros de maneira mais dúctil, sendo os mecanismos frágeis os mais indesejados e aqueles que devem ser inicialmente verificados no processo de dimensionamento do reforço.

Desta forma, para compreender o comportamento dos elementos reforçados com materiais compósitos e dimensioná-los de forma adequada, segura e efetiva, é necessário conhecer os mecanismos de ruptura do sistema de reforço aplicado.

Para avaliar as vigas deste trabalho, serão utilizados como base os modos de ruptura considerados pelo ACI 440.2R (2017). Segundo esta recomendação, a resistência à flexão de uma seção depende do controle do modo de ruptura e, baseado nos trabalhos de Gangarao e Vijay (1998), o ACI define cinco modos de ruptura que devem ser analisados para uma seção reforçada com PRF, os quais são apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Modos de ruptura em elementos fletidos reforçados com PRF

Modo de Ruptura	Sigla
Ruptura por esmagamento do concreto por compressão antes do escoamento do aço	CC
Ruptura por escoamento do aço seguida pelo esmagamento do concreto	
Ruptura por escoamento do aço seguida pela ruptura do sistema PRF	RF
Ruptura por delaminação por cisalhamento/tração da cobertura de concreto, com o destacamento do PRF (Delaminação do cobrimento)	FL
Ruptura por descolamento do PRF do substrato de concreto (Descolamento do PRF)	DE

Segundo esta classificação, os modos de ruptura que consideram um escoamento prévio do aço caracterizam um comportamento dúctil da viga analisada, o que é desejável. Já para os demais modos de ruptura, que ocorrem antes do escoamento do aço, observa-se uma estrutura de comportamento frágil, o que deve ser evitado.

Um comportamento dúctil é desejável pois, nestes casos, o elemento dá avisos antes de atingir a ruptura, visto que este sofre uma grande deformação, devido ao escoamento do aço das armaduras. Por outro lado, um comportamento frágil proporciona modos de ruptura repentinos, os quais mostram-se mais perigosos e devem ser evitados no dimensionamento.

No caso da verificação de esmagamento do concreto, o modo de ruptura ocorre pois a deformação do concreto ( $\epsilon_c$ ) atinge o seu valor máximo ( $\epsilon_{cu}$ ), que varia de 3‰ para o ACI até 3,5‰ para a NBR. O modo de ruptura por esmagamento do concreto antes do escoamento do aço (CC) pode ser evidenciado no esquema da Figura 2.7.

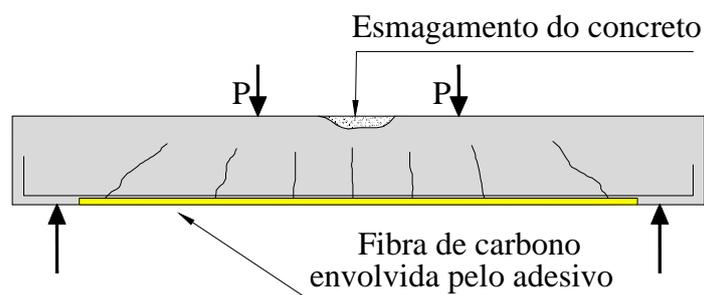


Figura 2.7: Ruptura dada pelo esmagamento do concreto antes do escoamento do aço (CC)

De forma análoga ao modo de ruptura anterior, temos o caso em que o escoamento do aço ocorre antes do esmagamento do concreto, ou seja, o valor máximo de deformação utilizável

do concreto é atingido após o aço atingir a sua deformação de escoamento. Este modo de ruptura é representado na Figura 2.8.

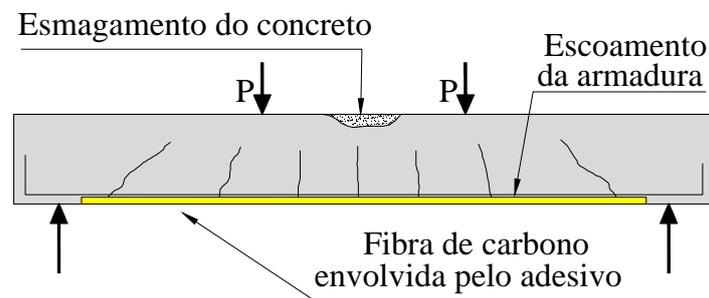


Figura 2.8: Ruptura dada pelo escoamento do aço seguida pelo esmagamento do concreto (CC)

Outra situação pode ocorrer quando verifica-se o escoamento do aço seguido pela ruptura do sistema PRF, ou seja, quando o aço já atingiu a sua deformação de escoamento e o PRF atinge a sua deformação máxima, ocasionando a sua ruptura. Essa situação deve ocorrer antes que o concreto atinja a sua deformação máxima. A Figura 2.9 representa este modo de ruptura.

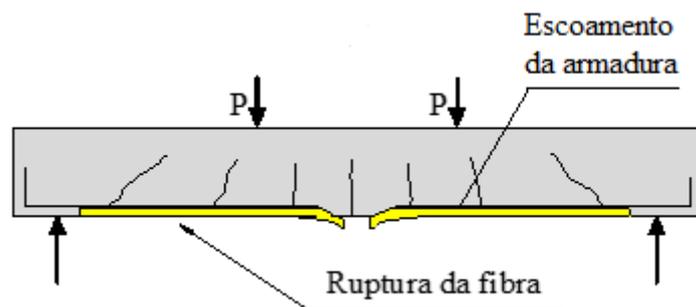


Figura 2.9: Ruptura dada pelo escoamento do aço seguida pela ruptura do PRF (RF)

Ainda podem ser observados os modos de ruptura controlados pela delaminação do cobrimento ou a descolamento do PRF, que ocorrem em que casos em que o substrato de concreto não é capaz de resistir aos esforços provenientes do PRF.

Como o concreto é o componente mais fraco da ligação concreto/PRF, a qualidade desse substrato e sua resistência à tração servirão de limite para a eficiência do reforço e, caso ela seja ultrapassada, pode ocorrer a ruptura por delaminação do cobrimento, como mostrado na Figura 2.10.

Por sua vez, o comportamento de descolamento da fibra pode ser causado por diversos motivos, como a presença de irregularidades, descontinuidade do substrato devido às fissuras de flexão ou excesso de aspereza da superfície do substrato. Este modo de ruptura é representado pela Figura 2.11.

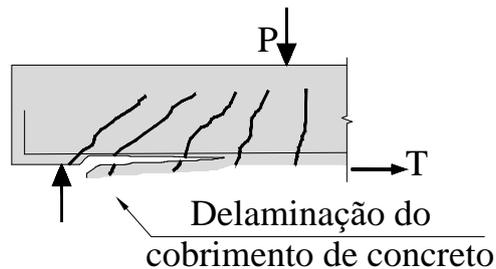


Figura 2.10: Ruptura dada delaminação do cobrimento (FL)



Figura 2.11: Ruptura dada pelo descolamento do PRF (DE)

Cabe ressaltar que além dos modos de ruptura observados pelo ACI 440.2R (2017), Rizkalla e Hassan (2002), observaram dois tipos diferentes de modos de ruptura, ocasionados por descolamento e/ou destacamento do PRF. Assim, pode-se observar uma ruptura pela fissura do epóxi, onde a cobertura de epóxi fatura como resultado de altas tensões de tração na interface PRF-epóxi e forma uma fissura longitudinal no cobrimento do epóxi.

Outro modo de ruptura observado foi a fissuração do concreto em torno do adesivo de epóxi, o qual acontece quando as tensões de tração na interface concreto-epóxi alcançam a resistência à tração do concreto.

## **2.6. PESQUISAS SOBRE VIGAS REFORÇADAS À FLEXÃO PELO MÉTODO NSM COM BARRAS DE AÇO**

### **2.6.1. Hosen, Jumaat, Darain e Islam (2014)**

Hosen, Jumaat, Darain e Islam apresentaram um estudo realizado em vigas de concreto armado reforçadas com barras de aço pela técnica NSM. O programa experimental era composto por quatro vigas com taxas de armadura longitudinal constantes e taxa de reforço variada. Uma das vigas ensaiadas era de referência (CB), sem reforço, enquanto as demais eram reforçadas com barras de aço (NSM1, NSM2 e NSM3).

Para a realização do ensaio, as vigas foram submetidas ao ensaio de carregamento em quatro pontos, até atingir a ruptura.

Com base nos resultados obtidos pelos autores, foi possível observar que, em relação à viga de referência, as vigas reforçadas apresentaram uma carga de fissuração superior, aumentando em 7,98%, 26,98% e 39,68% para as vigas NSM1, NSM2 e NSM3, respectivamente. Assim, observou-se que o reforço proporcionou um aumento de rigidez para as vigas, em comparação com a viga de referência.

A carga de escoamento também aumentou em 15,38%, 38,46% e 53,85% para as vigas NSM1, NSM2 e NSM3, respectivamente. Já em relação à carga última foi observado um ganho de resistência de 7,57%, 35,81% e 53,02% para as vigas NSM1, NSM2 e NSM3, respectivamente.

Após estas observações, o estudo concluiu que a execução do reforço com barras de aço utilizando a técnica NSM é de grande eficiência, visto que todas as vigas reforçadas apresentaram um aumento significativo nas suas capacidades de carga, bem como melhora na ductilidade.

### **2.6.2. Hosen, Jumaat, Alengaram e Islam (2016)**

Hosen, Jumaat, Alengaram e Islam apresentaram um estudo em vigas de concreto armado reforçadas à flexão com barras de aço pela técnica NSM. O programa experimental era composto por cinco vigas, com taxas de armadura longitudinal constantes e taxa de reforço variada. Uma das vigas ensaiadas era de referência (CB), sem reforço, enquanto as demais eram reforçadas com barras de aço (N-1, N-2, N-3 e N-4).

Para a realização do ensaio, as vigas foram submetidas ao ensaio de carregamento em quatro pontos, até atingir a ruptura. A Tabela 2.2 apresenta os resultados obtidos nesse programa experimental.

Tabela 2.2: Resultados experimentais de HOSEN *et al.* (2016)

Viga	Reforço	Carga última (kN)	Acréscimo de carga última (%)	Carga de fissuração (kN)	Acréscimo de carga de fissuração (mm)
CB	-	74,37	-	15,75	-
N-1	2 barras de aço de Ø8 mm	106,24	26,98	20,00	42,85
N-2	2 barras de aço de Ø10 mm	117,75	33,33	21,00	58,33
N-3	1 barra de aço de Ø16 mm	109,56	52,38	24,00	47,32
N-4	2 barras de aço de Ø12 mm	136,75	68,89	26,60	83,88

Com base nos resultados obtidos pelos autores, foi possível observar que, em relação à viga de referência, as vigas reforçadas apresentaram uma carga de fissuração superior, aumentando em 27%, 33%, 52% e 69% para as vigas N-1, N-2, N-3 e N-4, respectivamente. Após a realização dos ensaios, identificou-se que as vigas reforçadas apresentaram mais fissuras do que a viga de referência, sendo estas mais finas.

Reforçando a observação de que o uso da técnica NSM com barras de aço é bastante viável financeiramente, os autores ainda indicam que, de acordo com o estudo realizado, a técnica também é eficiente para elevar a capacidade de flexão das vigas de concreto armado. Notou-se que um aumento na taxa de reforço, de 100 mm<sup>2</sup> para 226 mm<sup>2</sup>, proporcionava um aumento da carga de fissuração e da carga última.

### 2.6.3. Patel, Tank, Vasanwala e Modhera (2019)

Trata-se de um programa experimental de vigas de concreto armado reforçadas à flexão pelo método do NSM, onde os autores buscaram avaliar a eficiência do reforço utilizando três tipos de barras diferentes: polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV), polímero reforçado com fibra de basalto (PRFB) e Aço. Todas as vigas eram de 200 mm x 270 mm x 2000 mm, compostas por dois porta-estribos de 10 mm de diâmetro e três barras de flexão de 12 mm de diâmetro.

Para cada tipo de reforço foram ensaiadas três vigas e, como os resultados e comportamentos foram parecidos, no artigo os autores apresentaram somente o melhor resultado de cada tipo. Como em todas as vigas a ruptura se deu da mesma forma (end debonding), os autores

selecionaram a viga com a barra de PRFB, uma vez que ela teve o melhor resultados das demais, e ensaiaram mais elementos. A Tabela 2.3 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 2.3: Resultados experimentais de PATEL *et al.* (2019)

Viga	Reforço	Carga última (kN)	Deslocamento último (mm)
NSF	-	130,23	25,5
SF-1	Barra de PRFV (Ø12 mm)	136,37	6,64
SF-2	Barra de aço (Ø12 mm)	146,82	14,26
SF-3	Barra de PRFB (Ø12 mm)	162,57	16,16
SF-4	Barra de PRFB (Ø12 mm) com grampo de CFRP	173,33	19,96

Como todas as rupturas ocorreram na zona de interface entre o cobrimento de concreto e as barras de aço da armadura de flexão, os autores observaram que a aderência entre o material de reforço e o adesivo e entre o adesivo e o substrato de concreto foi maior do que a aderência observada entre a armadura de flexão e o concreto. Contudo, perceberam que ao utilizar elementos de reforço mais compridos, permeando toda a superfície das vigas até os apoios, o efeito de deslocamento do cobrimento foi reduzido, permitindo que a viga atingisse níveis maiores de deformação e resistência e que a ruptura ocorresse por esmagamento do concreto.

Assim, os autores observaram que modos de ruptura dúcteis podem ser atingidos, basta utilizar os materiais e as técnicas de reforço adequadas para garantir deslocamento vertical e deformações controladas.

## 2.7. PESQUISAS SOBRE VIGAS REFORÇADAS À FLEXÃO PELO MÉTODO NSM COM ADESIVO COM BASE CIMENTÍCIA

### 2.7.1. Saeed, Al-Mahaidi, Al-Attar e Al-Shathr (2017)

Com o intuito de avaliar a eficiência da utilização de adesivos à base cimentícia para o reforço estrutural, os autores Saeed, Al-mahaidi, Al-Attar e Al-shathr realizaram um programa experimental composto por quatro vigas de concreto armado reforçadas à flexão pela técnica do NSM. Foram ensaiadas quatro vigas de 2700 mm de comprimento, 140 mm de largura e 26 mm de altura, sendo uma viga de referência, uma reforçada com laminado de PRFC de superfície lisa, uma reforçada com laminado de PRFC de superfície rugosa e uma reforçada com barra de PRFC de superfície rugosa. Os resultados obtidos nos ensaio estão apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Resultados experimentais de Saeed *et al.* (2017)

Viga	$P_{cr}$ (kN)	$P_y$ (kN)	$P_u$ (kN)	$\delta_{cr}$ (mm)	$\delta_u$ (mm)	Modo de ruptura
C	56,4	79,15	99,8	10,8	68,8	Esmagamento do concreto depois do escoamento da armadura de flexão
SL	60,9	93,9	114,5	7,8	35,7	Esmagamento do concreto depois do descolamento entre a fibra e adesivo
RL	68,4	127,93	140,9	8,1	22,9	Esmagamento do concreto depois do descolamento entre a fibra e adesivo
RB	70,5	120,91	146,9	10,6	29	Esmagamento do concreto depois do descolamento entre a fibra e adesivo

Os autores observaram que o padrão de fissuração de todas as vigas reforçadas foi similar ao da viga de referência e que todas as vigas apresentaram incrementos significativos de capacidade resistente, quando comparadas à viga de referência, com valores de 15% para a viga SL, 42% para a viga RL e 48% para a viga RB.

Foi ressaltado que, antes da fissuração do concreto, a rigidez das vigas reforçadas não foi muito afetada pelo reforço e que, após a fissuração, tanto a rigidez como a carga de escoamento foram maiores nas vigas reforçadas do que na viga de referência.

Ainda, os autores mediram as deformações nas fibras de reforço e observaram que as vigas se comportaram como vigas compósitas, visto que o aumento de carga proporcionou um aumento da tensão na fibra até o momento da ruptura.

### 2.7.2. Al-Abdwais e Al-Mahaidi (2020)

Os autores Al-Abdwais e Al-Mahaidi executaram um programa experimental com o intuito de avaliar a eficiência do reforço NSM à flexão, variando o tipo de adesivo utilizado (resina à base epóxi e base cimentícia) e o tipo de PRFC utilizado (manta e laminado). O programa experimental foi composto por sete vigas de concreto armado de 140 mm x 260 mm com 2700 mm de comprimento, sendo uma viga era de referência e as demais reforçadas.

Dentre as vigas reforçadas, foram elaborados dois grupos principais, cada um composto por três vigas. Para o primeiro grupo, o reforço foi executado com quatro tiras de manta de PRFC com seção transversal de 1,5 mm x 2,3 mm, sendo duas com adesivo à base cimentícia e uma com resina à base epóxi. Já para o segundo grupo, o reforço foi executado com três tiras de laminado de PRFC com seção transversal de 10 mm x 1,4 mm, sendo duas com adesivo à base

cimentícia e uma com resina à base epóxi. A Tabela 2.5 apresenta os resultados obtidos pelos autores.

Tabela 2.5: Resultados experimentais de Al-Abdwais e Al-Mahaidi (2020)

<b>Viga</b>	<b>Tipo</b>	<b>Carga Última (kN)</b>	<b>Ruptura</b>
BR	Referência	124,5	Escoamento da armadura de flexão seguido pelo esmagamento do concreto
BTC-a	Manta-argamassa	153,5	Ruptura da fibra seguido pelo esmagamento do concreto
BTC-b	Manta-argamassa	154,3	Ruptura da fibra seguido pelo esmagamento do concreto
BTE	Manta-epóxi	158,0	Ruptura da fibra seguido pelo deslocamento do cobrimento de concreto
BLC-a	Laminado-argamassa	157,5	Descolamento na interface fibra-adesivo seguido pelo esmagamento do concreto
BLC-b	Laminado-argamassa	161,3	Descolamento na interface fibra-adesivo seguido pelo esmagamento do concreto
BLE	Laminado-epóxi	160,3	Delaminação do cobrimento de concreto

A carga última das vigas reforçadas com adesivo à base cimentícia e epóxi foi muito similar, sendo que os valores obtidos para as vigas que utilizaram a argamassa foi de 97% a 99% dos valores obtidos nas vigas reforçadas com adesivo à base epóxi. Ainda, os autores observaram maior ductilidade nas vigas reforçadas com resina à base epóxi, independentemente do tipo de reforço utilizado.

Com base nos resultados obtidos, os autores observaram que o uso da argamassa modificada para o reforço de vigas de concreto armado à flexão pelo método NSM foi eficaz tanto para aplicações com manta de PRFC como laminado de PRFC.

## **2.8. PRINCIPAIS TRABALHOS SOBRE VIGAS REFORÇADAS À FLEXÃO UTILIZANDO O MÉTODO NSM COM PRFC**

### **2.8.1. Fortes, Barros & Padaratz (2002)**

Fortes, Barros e Padaratz (2002) elaboraram um programa experimental composto de oito vigas de concreto armado, quatro de referência e quatro reforçadas com laminados de PRFC pelo método NSM, distribuídas em quatro séries de dois exemplares cada, tendo cada série diferentes taxas de armadura longitudinal.

As oito vigas tinham seção retangular de 100 mm de largura, altura entre 170 e 180 mm, comprimento de 1600 mm e vão de 1500 mm. A armadura transversal era composta por estribos de 6 mm de diâmetro nas regiões entre as cargas e os apoios e de 3 mm na região central.

Ao dimensionar estas vigas, os autores buscaram definir que a capacidade de carga das vigas reforçadas fosse o dobro da viga de referência correspondente. A Figura 2.12 apresenta as seções transversais e os detalhes do sistema de reforço.

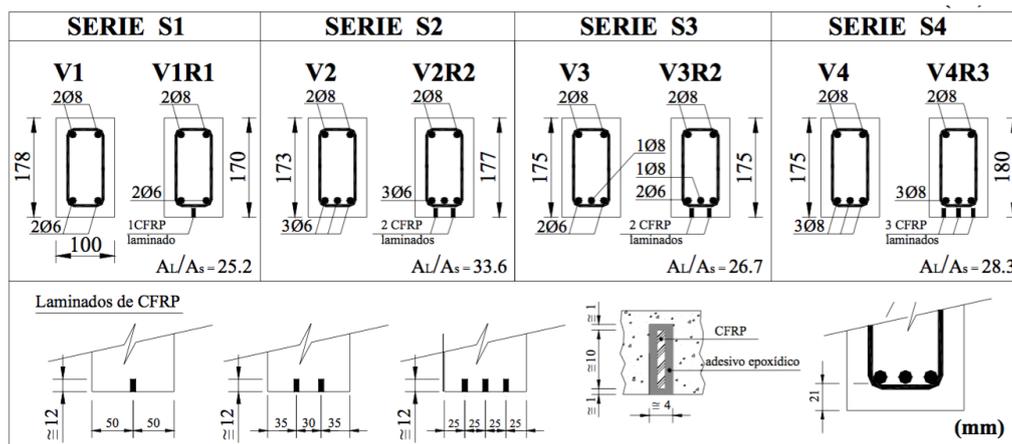


Figura 2.12: Seção transversal das vigas (Fonte: Fortes *et al.*, 2002)

As vigas de referência (V1, V2, V3 e V4) apresentaram uma ruptura dúctil com escoamento da armadura longitudinal, sem ocorrência de esmagamento do concreto comprimido nem ruptura por cisalhamento. Já as vigas reforçadas apresentaram ruptura dada pelo rompimento do concreto da região tracionada, ao longo da extensão do laminado, exceto a viga V1R1, que optou-se por interromper o ensaio quando esta apresentava uma flecha muito elevada. A Tabela 2.6 apresenta os valores de carga de ruptura e de serviço observados.

Tabela 2.6: Valores experimentais de cargas de ruptura e serviço de FORTES *et al.* (2002)

Série	Viga	$P_u$ (exp) (kN)	$P_u$ (VR) / $P_u$ (V)	$P_{serv}$ (kN)	$P_{serv}$ (VR) / $P_{serv}$ (V)
S1	V1	28,2	1,78	18,6	1,22
	V1R1	50,3		22,7	
S2	V2	41,0	1,91	21,7	1,45
	V2R2	78,5		31,4	
S3	V3	41,3	1,98	23,8	1,38
	V3R2	81,9		32,8	
S4	V4	48,5	1,96	32,3	1,25
	V4R3	94,9		40,4	

Os resultados dos experimentos comprovaram que, assim como indicado no dimensionamento, todas as vigas reforçadas apresentaram valores de carga de ruptura próximos ao dobro dos valores das vigas correspondentes sem reforço.

As análises realizadas no trabalho permitiram concluir que a técnica de reforço NSM permite mobilizar quase toda a capacidade resistente do laminado, com segurança e economia. Ainda, foi verificado um aumento da capacidade resistente das vigas reforçadas, sendo este de aproximadamente 100% quando comparada a respectiva viga de referência, alcançando-se valores experimentais próximos aos valores teóricos calculados pelos autores.

Cabe ressaltar também que este trabalho indicou que as vigas reforçadas mostraram-se mais rígidas que as respectivas vigas de referência.

### 2.8.2. Yost, Gross, Dinehart & Mildenberg (2007)

Yost, Gross, Dinehart e Mildenberg (2007) buscaram avaliar o comportamento à flexão de vigas de concreto armado reforçadas com lâminas de PRFC pelo método NSM através de um programa experimental composto por quinze vigas de concreto armado, com seção transversal de largura variável (52,4 mm, 229 mm e 305 mm) e altura constante de 190 mm. Os autores buscaram avaliar a influência da taxa de armadura de flexão e taxa de reforço. Dessa maneira, as quinze vigas foram separadas em três grupos onde a taxa de armadura de flexão era constante e variava-se a taxa de reforço. A geometria das vigas e a distribuição do reforço é apresentada na Figura 2.13.

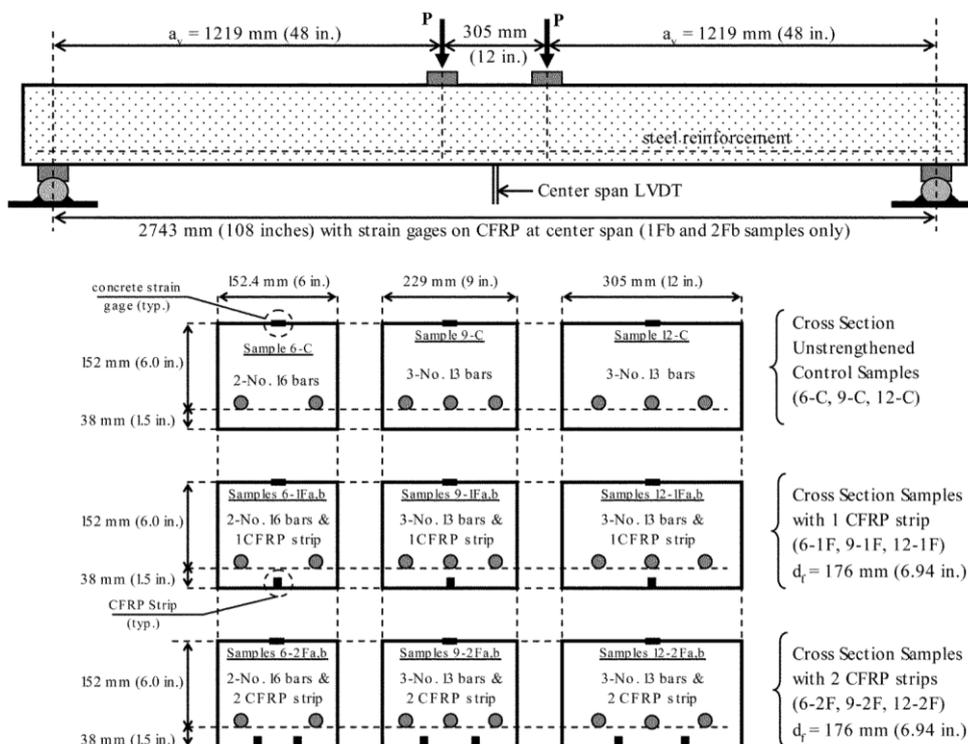


Figura 2.13: Geometria e distribuição do reforço das vigas (Fonte: Yost *et al*, 2007)

Cada grupo possui uma viga de referência e quatro vigas reforçadas, sendo duas vigas de cada tipo especificado, ou seja, duas vigas reforçadas com uma lâmina de PRFC e outras duas vigas reforçadas com duas lâminas. Assim, as vigas identificadas com *a* e *b* são espécimes duplicados.

Os resultados experimentais são apresentados na Tabela 2.7.

Tabela 2.7: Resultados experimentais de YOST *et al.* (2007)

Nome	Teórico	Experimental		
	P <sub>n</sub> (kN)	P <sub>y</sub> (kN)	P <sub>max</sub> (kN)	Ruptura
6-C (Referência)	18,9	19,0	21,1	SY/CC
6-1Fa	21,8	20,9	24,8	CC
6-1Fb		21,3	23,2	
6-2Fa	23,9	24,4	25,0	
6-2Fb		24,7	26,9	
9-C (Referência)	20,6	22,4	25,3	
9-1Fa	25,6	25,3	28,2	CC
9-1Fb		24,5	27,9	CC
9-2Fa	29,0	27,7	37,1	CC
9-2Fb		25,0	35,8	CC
12-C (Referência)	21,2	21,5	23,5	SY/CC
12-1Fa	27,9	24,7	29,6	TR
12-1Fb		25,9	31,0	TR
12-2Fa	32,8	26,5	33,8	CC
12-2Fb		28,0	41,8	CC

O modo de ruptura designado como “SY” refere-se ao escoamento do aço, “CC” ao esmagamento do concreto e “TR” à ruptura do PRFC.

Os autores observaram que nenhuma viga do programa experimental apresentou a ruptura pelo descolamento do PRFC e que todas as vigas reforçadas apresentaram carga última superior às suas respectivas vigas de referência. Além disso, os autores observaram que a técnica NSM mostrou-se adequada para garantir a transferência de força entre o PRFC, a resina epóxi e o concreto, permitindo o desenvolvimento da resistência à tração total das lâminas de PRFC.

### 2.8.3. Dias, Barros & Azevedo (2012)

Dias, Barros e Azevedo (2012) elaboraram um programa experimental composto de quatro vigas de concreto armado, a fim de analisar o comportamento à flexão de vigas reforçadas com laminado de PRFC utilizando a técnica do NSM. As vigas apresentaram seção transversal retangular de 150 mm x 300 mm e 2600 mm de comprimento.

Dentre as quatro vigas do programa experimental, uma era de referência e as outras três eram reforçadas com laminados de PRFC com dimensões de 1,4 mm de espessura, 10 mm de largura

e 2300 mm de comprimento. As seções transversais das vigas reforçadas são apresentadas na Figura 2.14.

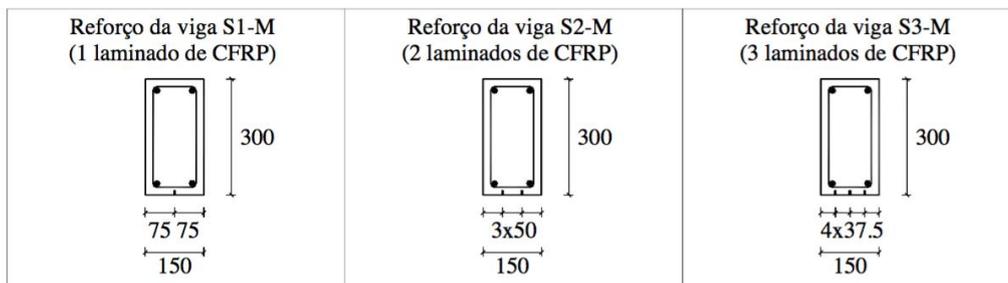


Figura 2.14: Seção transversal das vigas reforçadas (Fonte: Dias *et al*, 2012)

Todas as vigas foram armadas com duas barras de aço nervurado com 8 mm de diâmetro para a armadura longitudinal de compressão e duas barras de aço nervurado com 10 mm de diâmetro para a armadura longitudinal de tração. A fim de evitar a ruptura por cisalhamento, em todas as vigas foram colocados estribos de aço verticais (dois ramos) com barras de aço nervurado de 6 mm de diâmetro, espaçados de 75 mm. Os resultados experimentais obtidos estão descritos na Tabela 2.8.

Tabela 2.8: Resultados experimentais obtidos de DIAS *et al*. (2012)

Viga	$F_{cr}$ (kN)	$F_{sy}$ (kN)	Acréscimo de carga de cedência das armaduras (%)	$F_{max}$ (kN)	Acréscimo de carga máxima (%)	$u_{Fmax}$ (mm)
REF-M	20,1	56,6	-	62,3	-	45,1
S1-M	21,0	62,4	10	88,4	42	41,2
S2-M	22,2	69,5	23	111,9	80	43,6
S3-M	24,0	76,0	34	126,6	103	38,9

O modo de ruptura observado na viga REF-M foi dado pelo esmagamento do concreto na zona comprimida após o escoamento das armaduras longitudinais. A viga reforçada S1-M teve uma ruptura associada ao esgotamento da capacidade resistente à tração do PRFC (ruptura do PRFC), enquanto que nas vigas S2-M e S3-M verificou-se a ocorrência do destacamento do PRFC.

Com base nos resultados, pode-se concluir que o reforço utilizado, independentemente da percentagem de CFRP, permitiu aumentar a capacidade de carga das vigas. As soluções de reforço de PRFC testadas proporcionaram acréscimos de carga entre os 10% e os 34%, e também proporcionaram acréscimos de carga máxima que variaram entre os 42% e os 103%.

Em relação aos valores de carga últimas das vigas reforçadas, pode-se concluir que os ganhos de resistência obtidos foram proporcionais à percentagem de PRFC, ou seja, maiores taxas de reforço propiciaram um maior aumento da capacidade resistente.

O valor da deformação máxima registada nos laminados instrumentados das vigas ensaiadas variou entre os 14,9‰ para a viga reforçada com a maior taxa de refoço e 17,9‰ para viga menor taxa de reforço. Estes valores demonstram o elevado nível de aproveitamento do reforço de PRFC com laminados instalados pela técnica NSM, uma vez que foram atingidas grandes deformações.

#### 2.8.4. Billota, Ceroni, Nigro & Pecce (2015)

Billota, Ceroni, Nigro e Pecce (2015) estudaram o reforço de vigas de concreto armado com PRFC, aplicando as técnicas NSM e EBR. Para isso, os autores elaboraram um programa experimental com dez vigas retangulares, com seção transversal com 160 mm de altura e 120 mm de largura, sendo duas vigas de referência e oito vigas reforçadas, onde metade dessas vigas foram ensaiadas com aplicação de carregamento concentrado e a outra metade com carregamento distribuído.

As vigas propostas possuíam vão livre de 2100 mm e foram armadas longitudinalmente com duas barras de 10 mm de diâmetro e com estribos de 6 mm de diâmetro espaçados em 200 mm. A Figura 2.15 ilustra as seções transversais e longitudinais destes elementos e a Tabela 2.9 apresenta os resultados experimentais observados nos ensaios de todas as vigas.

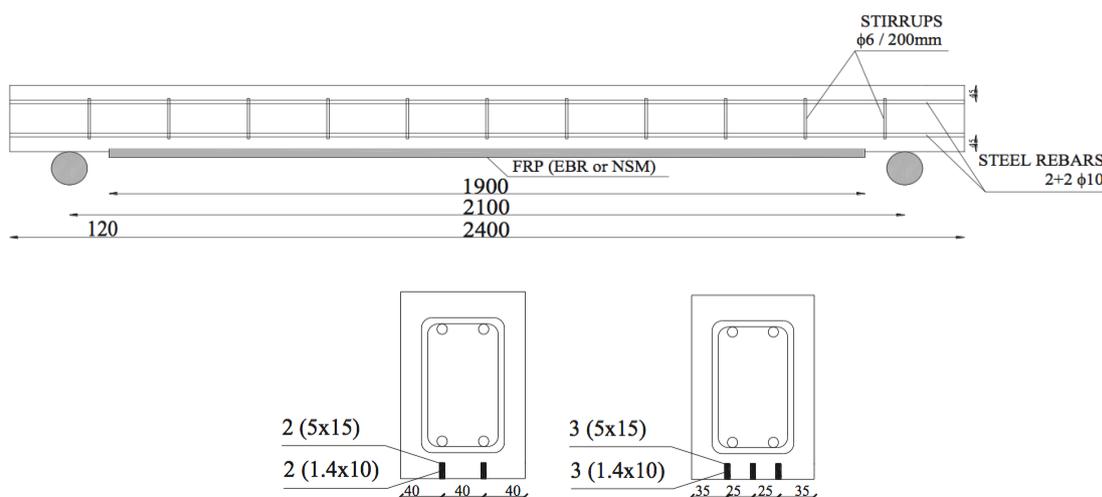


Figura 2.15: Seções transversais das vigas (Fonte: Billota *et al*, 2015)

Tabela 2.9: Resultados experimentais de BILLOTA *et al.* (2015)

Nome do espécime	Tipo de Ruptura	F <sub>max,exp</sub> (kN)	F <sub>max,exp,m</sub> (kN)	DF <sub>max,exp,m</sub> (%)
Ref_c_no_1	CC+SY	20.1	20,1	-
Ref_d_no_1	CC+SY	46.1	46,1	-
EBR_c_1.4x40_1	ED-ID	36.5	35,8	+81
EBR_c_1.4x40_2	CDCD-CCS	35.2		+75
EBR_d_1.4x40_1	ED-CCS	75.1	70,0	+63
EBR_d_1.4x40_2	ED	64.8		+40
NSM_c_2x1.4x10_1	CDCD	32.3	32.3	+61
NSM_d_2x1.4x10_1	SH	71.3	71.3	+55
NSM_c_3x1.4x10_1	CDCD-CCS	33.3.	33.3	+66
NSM_d_3x1.4x10_1	SH	67.6	67.6	+47

Os resultados obtidos pelos autores permitiram observar que as vigas reforçadas com NSM e ensaiadas com carregamento concentrado apresentaram acréscimo de resistência de 61% e 66% em relação à viga de referência, para a aplicação de duas e três lâminas, respectivamente. Dessa maneira, pode-se concluir que o aumento da taxa de reforço não se mostrou eficiente para aumentar a capacidade resistente à flexão das vigas. Isso se deve, principalmente, por causa da fraqueza do cobrimento de concreto.

Além disso, os autores concluíram que a eficiência da técnica NSM é de fato maior que aquelas que foram reforçadas com o EBR, pois as cargas ultimas de ambas foram próximas e área transversal de PRFC utilizada na técnica NSM é bem menor.

Ressalta-se também que os autores observaram que as lâminas de PRFC são menos efetivas em aumentar a rigidez das vigas e são menos sensíveis ao fenômeno de descolamento do reforço.

#### 2.8.5. Seo, Choi, Kwon, & Lee (2016)

Seo, Choi, Kwon e Lee realizaram um programa experimental de vigas reforçadas com lâminas de PRFC pelo método EBR e pelo NSM com diferentes comprimentos de aderência.

O programa experimental era composto por dez vigas, sendo uma viga de referência, uma reforçada com lâminas de PRFC pelo método EBR e as demais reforçadas pelo método NSM. Todas as vigas eram retangulares e possuíam seção transversal de 200 mm x 400 mm e 1800 mm de comprimento. A geometria das vigas ensaiadas está ilustrada na Figura 2.16.

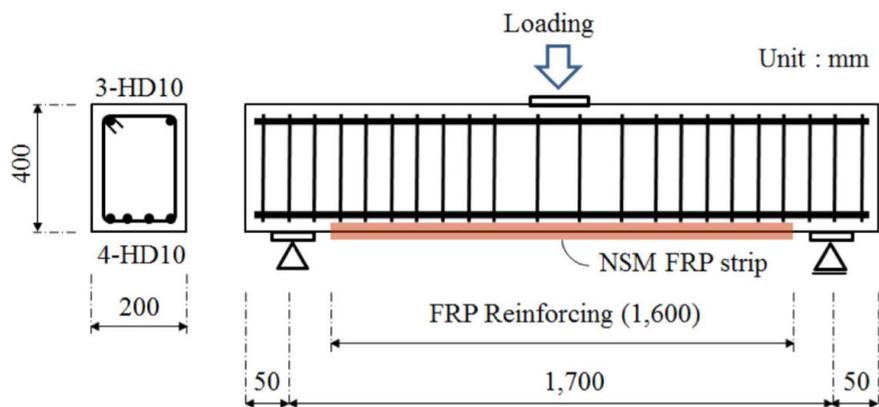


Figura 2.16: Geometria das vigas (Fonte: Seo *et al*, 2016)

Como um dos objetivos dos autores era avaliar a aderência da fibra, as lâminas de PRFC estão parcialmente descoladas das ranhuras, mais especificamente na sua porção central, na maioria das vigas apresentando apenas duas vigas reforçadas pelo método NSM com as lâminas completamente coladas ao substrato (CP1600-1 e CP1600-3).

A Tabela 2.10 apresenta os resultados obtidos para todas as vigas ensaiadas do programa experimental.

Tabela 2.10: Resultados experimentais de SEO *et al*. (2016)

Espécime	$P_{cr}$ (kN)	Escoamento		Último		$\mu$ ( $\delta_u/\delta_y$ )	$\Delta P$ (kN)	$P_n$ (kN)	Tipo de Ruptura
		$P_y$ (kN)	$\delta_y$ (mm)	$P_u$ (kN)	$\delta_u$ (mm)				
BC2000	42,65	143,18	6,03	190,24	79,61	13,20	-	109,65	Ruptura dúctil
BP1600	56,93	167,20	5,97	190,25	10,12	1,70	45,6	186,97	Descolamento do PRF
CP1600-1	66,20	200,55	6,72	225,55	15,98	2,38	72,08	206,32	Ruptura do PRF
CP1600-3	46,58	173,58	6,63	233,40	26,13	3,94	72,08	206,32	
CP500-1	42,17	161,32	6,35	208,39	19,06	3,00	54,92	193,10	
CP500-3	53,45	162,79	6,04	233,40	26,13	4,33	72,08	206,32	
CP400-1	52,50	163,50	-	225,00	-	-	-	185,81	
CP400-3	41,19	151,02	6,60	224,08	29,67	4,50	59,82	206,32	
CP300-1	40,21	154,95	6,63	194,17	19,16	2,89	40,7	177,23	
CP300-3	53,94	145,14	6,70	212,31	24,46	3,65	52,95	203,93	

Baseado nos resultados trabalho, foram feitas algumas observações. Em relação ao deslocamento das vigas, foi possível observar que, para a mesma quantidade de reforço, as vigas reforçadas pelo método NSM apresentaram cargas maiores para a deslocamento máximo quando comparadas à viga reforçada pelo método EBR. Isto se deve ao fato da aderência do reforço ser mais efetiva na técnica NSM, pois o concreto gera uma situação de confinamento em torno da lâmina. Já em relação a quantidade de ranhuras, foi possível observar que ao

distribuir as lâminas de PRFC em três ranhuras distintas houve um aumento na resistência propiciado pela melhoria da ancoragem do material.

Além disso, nas vigas onde havia uma região não aderida na parte central, observou-se uma melhoria na capacidade de deformação do membro. Isso pode ser explicado devido à tensão no FRP não ser concentrada no centro, mas ser estendida uniformemente na região não aderida.

Por fim, os autores calcularam a carga resistente das vigas reforçadas pelas previsões do ACI 440.2R (2017) e observaram que os resultados obtidos foram adequados e consideraram os métodos de ruptura observados.

## **2.9. RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS**

Para realizar o cálculo do momento último de ruptura à flexão das vigas contidas no banco de dados foram utilizadas duas recomendações normativas: ACI 440.2R (2017) e *fib* Bulletin 90 (2019).

### **2.9.1. ACI 440.2R (2017)**

O ACI 440.2R (2017) é uma norma norte-americana que apresenta recomendações para o dimensionamento de estruturas reforçadas com polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC). As recomendações desta norma baseiam-se principalmente em estudos realizados por Teng *et al* (2001) e Teng *et al* (2004), que permitiram realizar uma análise sobre a eficiência do reforço em elementos fletidos.

De acordo com a norma norte-americana, para calcular a resistência à flexão de uma viga reforçada com PRFC pelo NSM deve-se utilizar um método iterativo de cálculo que envolve diversas etapas:

- Primeiro adota-se uma profundidade para a linha neutra;
- Com esse valor calcula-se a deformação em cada material, por meio da compatibilidade de deformações;
- Em seguida, calcula-se a tensão em cada material;
- Por fim, verifica-se o equilíbrio das forças internas.

Assim, para calcular a resistência à flexão em questão deve-se, primeiramente, estimar a altura da linha neutra do elemento e, com isso, pode-se estimar as deformações de cada parcela de força envolvida no mecanismo de ruptura da peça. Essa estimativa das deformações é realizada a partir da compatibilidade entre as deformações desenvolvidas em cada material da seção transversal do elemento fletido. A Equação 2.1 determina o valor de deformação do PRFC a partir da compatibilidade de deformações.

$$e_{fe} = e_{cu} \cdot \left( \frac{h - x}{x} \right) - e_{bi} < e_{fd} \quad \text{Equação 2.1}$$

Onde:

$e_{fe}$  é a deformação efetiva no PRFC;

$e_{cu}$  é a deformação de ruptura do concreto (igual à 0,003 para o ACI 440.2R (2017));

$h$  é a altura da viga;

$x$  é a posição da linha neutra;

$e_{bi}$  é a deformação encontrada no cobrimento da armadura de tração na viga antes do reforço

Temos então que a deformação efetiva na fibra deve ser inferior ao valor limite de deformação na fibra pré-definido pela Equação 2.2. Se o comportamento da viga for controlado pelo lado esquerdo da inequação indicada na Equação 2.1, a ruptura do elemento é controlada pelo esmagamento do concreto, pois a deformação última do concreto (3,0%) foi atingida. Por outro lado, se prevalecer o lado direito, a ruptura é controlada pelo PRF, seja pela sua ruptura ou descolamento.

Assim, de forma a prevenir uma ruptura por descolamento, a deformação efetiva do PRF deve ser limitada usando um fator de redução. A norma norte-americana utiliza a Equação 2.2 para limitar o valor dessa deformação.

$$e_{fd} = k_m \times e_{fu} \quad \text{Equação 2.2}$$

Onde:

$e_{fd}$  é o valor limite de deformação da fibra a ser adotado no dimensionamento e verificação do reforço para evitar rupturas prematuras da fibra;

$e_{fu}$  é a deformação última observada na fibra no momento da ruptura.

$k_m$  é o coeficiente adimensional dependente da forma de ligação para a flexão.

Baseado em estudos existentes sobre o reforço com NSM, como os trabalhos de Hassan e Rizkalla (2003), De Lorenzis *et al* (2004) e Kotynia (2005), o ACI recomenda o uso da relação  $\varepsilon_{fd} = 0,7 \cdot \varepsilon_{fu}$  para os elementos de concreto armado reforçados com PRF pelo NSM, adotando assim o valor de  $k_m = 0,7$ .

Como o trabalho é voltado para a verificação da capacidade de carga de vigas ensaiadas à flexão, busca-se simular, pelo procedimento de cálculo, o estado limite último real, com os valores de tensão e deformação efetivamente atuantes nos elementos. Assim, para a deformação efetiva na fibra serão utilizados valores experimentais, coletados por meio de extensômetros instalados no reforço das vigas ensaiadas. Com a definição desta deformação, deve-se prosseguir para a determinação das demais deformações, a partir do equilíbrio da seção.

Como assume-se que não há pré-fissuração nos elementos fletidos e que, conseqüentemente,  $e_{bi} = 0$ , é possível calcular a tensão na fibra a partir do valor de deformação efetiva obtido. Para isto utiliza-se a Equação 2.3, a qual baseia-se na Lei de Hooke, visto que o ACI 440.2R (2017) considera um comportamento linear elástico até a ruptura para o material.

$$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe} \quad \text{Equação 2.3}$$

Onde:

$f_{fe}$  é a tensão efetiva do PRFC;

$E_f$  é o módulo de elasticidade da fibra;

$\varepsilon_{fe}$  é a deformação efetiva da fibra.

Seguindo o processo de compatibilidade de deformações da seção transversal do elemento fletido e assumindo um diagrama de tensão deformação elástico-perfeitamente plástico é

possível determinar os valores de deformações e tensões das armaduras de aço, como mostra a Equação 2.4 e Equação 2.5.

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left( \frac{d - c}{d_f - c} \right) \quad \text{Equação 2.4}$$

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y \quad \text{Equação 2.5}$$

Onde:

$\varepsilon_s$  é a deformação na armadura;

$\varepsilon_{fe}$  é a deformação efetiva no PRFC;

$\varepsilon_{bi}$  é a deformação da peça no momento do reforço;

$d$  é a altura útil da viga;

$d_f$  é a distância da face superior da viga até o centroide do laminado de PRF (“altura útil do PRF”);

$c$  é a profundidade da linha neutra;

$f_s$  é a tensão no aço da armadura;

$E_s$  é o módulo de elasticidade do aço da armadura;

$f_{ys}$  é a tensão de escoamento da armadura tracionada

Com os valores de tensão obtidos para cada parcela atuante no elemento é possível verificar se a altura da linha neutra adotada inicialmente realmente corresponde ao estado de equilíbrio, a partir da Equação 2.6.

$$x = \frac{(A_s \times f_s) + (A_f \times f_{fe}) - (A'_s \times f'_s)}{b_1 \times a_1 \times f_c \times b_w} \quad \text{Equação 2.6}$$

Onde:

$A_s$  é a área de aço da armadura inferior;

$A_f$  é a área do reforço aplicado na viga;

$A'_s$  é a área de aço da armadura superior;

$f_s$  é a tensão no aço da armadura inferior;

$f'_s$  é a tensão no aço da armadura superior;

$f_{fe}$  é a tensão efetiva do PRFC;

$f_c$  é a resistência à compressão do concreto;

$b_w$  é a largura da viga;

$a_1$  é o fator multiplicador do  $f'_c$  para determinar a intensidade de um bloco retangular de distribuição de tensões do concreto equivalente;

$b_1$  é o coeficiente que determina a aproximação da curva da resultante de compressão do concreto a um retângulo.

Os termos  $\alpha_1$  e  $\beta_1$  são parâmetros que definem o bloco de tensão retangular equivalente a distribuição não-linear de tensão. Se a ruptura se der pelo esmagamento do concreto (seja antes ou depois do escoamento do aço)  $\alpha_1$  e  $\beta_1$  podem ser tomados como os valores associados ao bloco de Whitney, ou seja, de acordo com o ACI 318-M (2014),  $\alpha_1 = 0,85$  e  $\beta_1$  depende do valor da resistência característica à compressão do concreto. Assim, para  $f'_c$  entre 17 e 27,5 MPa,  $\beta_1 = 0,85$  e, para valores de resistência superiores,  $\beta_1$  sofre um decréscimo linear de 0,05 para cada 6,9 MPa que excedam a resistência de 27,5 MPa, obedecendo a regra de que  $\beta_1$  não deve ser menor que 0,65.

Por outro lado, se a ruptura do elemento for dada pela delaminação do cobrimento de concreto, descolamento do PRF ou ruptura do PRF, teremos resultados mais acurados ao utilizar a Equação 2.7 e a Equação 2.8 para calcular os valores de  $\alpha_1$  e  $\beta_1$ .

$$a_1 = \frac{3 \times e'_c \times e_c - e_c^2}{3 \times (e'_c)^2 \times b_1} \quad \text{Equação 2.7}$$

$$b_1 = \frac{4 \times e'_c - e_c}{6 \times e'_c - 2 \times e_c} \quad \text{Equação 2.8}$$

Onde,

$f_c$  é a resistência à compressão do concreto;

$E_c$  é o módulo de elasticidade do concreto;

$e'_c$  é a deformação máxima no concreto não confinado, dada pela Equação 2.9.

$$e'_c = \frac{1,71 \times f_c}{E_c} \quad \text{Equação 2.9}$$

$e_c$  é a deformação no concreto, dada pela Equação 2.10.

$$e_c = (e_{fd} + e_{bi}) \cdot \left( \frac{x}{h - x} \right) \quad \text{Equação 2.10}$$

Como neste caso a ruptura é controlada pelo PRF, a deformação do concreto é inferior à 3,0 ‰ e deve ser determinada pela Equação 2.10.

Conforme já indicado, o ACI 440.2R (2017) recomenda a utilização de um método iterativo para verificar o posicionamento da linha neutra, que possibilita estabelecer uma correlação entre a posição da linha e o somatório das componentes das forças resistentes na seção transversal da viga. Essa correlação é dada pelo estado de equilíbrio da seção transversal do elemento, representado pela Equação 2.11.

$$F_f + F_s + F_c + F'_s = 0 \quad \text{Equação 2.11}$$

Onde:

$F_f = f_{fe} \cdot A_f$  é a força de tração atuante na fibra;

$A_s = f_s \cdot A_s$  é a força de tração atuante na armadura inferior;

$F_c = a_1 \cdot b_1 \cdot f_c \cdot b_w \cdot x$  é a força de compressão atuante no concreto;

$F'_s = f'_s \cdot A'_s$  é a força de compressão atuante na armadura superior.

Como todos os elementos da Equação 2.11 dependem da altura da linha neutra, torna-se possível determinar um valor de  $x$  para o qual o somatório das forças de tração e compressão atuantes na seção transversal do elemento seja igual à zero.

Por fim, com a posição da linha neutra corrigida é possível determinar o momento resistente ( $M_R$ ) da viga reforçada a partir da Equação 2.12.

$$M_R = A_s \cdot f_s \cdot \left( d - \frac{\beta_1 \cdot x}{2} \right) + A_f \cdot f_{fe} \cdot \left( h - \frac{\beta_1 \cdot x}{2} \right) + A'_s \cdot f'_s \cdot \left( \frac{\beta_1 \cdot x}{2} - d' \right) \quad \text{Equação 2.12}$$

### 2.9.2. *fib* Bulletin 90 (2019)

De acordo com o *fib* Bulletin 90 (2019), a deformação máxima a ser admitida na fibra para a determinação da capacidade resistente à flexão é dada pela Equação 2.13.

$$\varepsilon_{fRd,max} = \eta \frac{f_{fk}}{\gamma_f E_f} = \frac{f_{fd}}{E_f} \quad \text{Equação 2.13}$$

Onde,

$\gamma_f$  é o fator de segurança para a resistência do FRP que depende se a carga aplicada é permanente ou variável. Para cargas permanentes seu valor é de 1,25 e para cargas variáveis seu valor é de 1;

$\eta$  é a razão entre a deformação *in loco* da fibra e a deformação obtida no ensaio de tração uniaxial. Normalmente o valor dessa razão é 1, uma vez que não é esperado que a resistência *in-situ* seja diferente da obtida no ensaio. Porém, limitar a deformação de ruptura da fibra pode ser considerada como uma alternativa de simplificar o modelo de dimensionamento. Dessa maneira, no estado limite último a deformação da fibra é limitada ao invés de verificar os modos de ruptura. Nesse caso, o comitê recomenda adotar  $\eta = 0,8$ , que é um valor é tomado com base em evidências experimentais.

Assim, limitando a deformação da fibra de acordo com essa equação, pode-se considerar contribuição total da fibra sem fazer verificações em relação ao *intermediate crack debonding*. Porém, o descolamento perto das extremidades no FRP ainda deve ser verificado.

Para determinar a capacidade resistente da viga reforçada deve-se primeiro calcular a profundidade da linha neutra da seção transversal no estado limite último através da compatibilidade de deformações e equilíbrio das forças internas e, assim, o momento resistente é obtido através do equilíbrio dos momentos.

Dessa maneira, pelo equilíbrio das forças internas, temos a Equação 2.14.

$$k_1 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} = A_{s1} \cdot \sigma_{s1} + A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f \quad \text{Equação 2.14}$$

Onde,

$f_{cd}$  é a resistência à compressão de cálculo do concreto;

$E_f$  é o módulo de elasticidade do PRF;

$x$  é a altura da linha neutra;

$b$  é a largura da viga;

$A_f$  é a área da seção transversal do PRF;

$A_{s1}$  é a área da seção transversal da armadura de flexão;

$A_{s2}$  é a área da seção transversal da armadura de flexão;

$\varepsilon_f$  é a deformação no PRF, dada pela Equação 2.15.

$$\varepsilon_f = \varepsilon_c \frac{h-x}{x} - \varepsilon_0 \quad \text{Equação 2.15}$$

$\sigma_{s1}$  é tensão na armadura de flexão, dada pela Equação 2.16.

$$\sigma_{s1} = \min \left( \varepsilon_c \frac{d_{s1}-x}{x}, \frac{f_{yd}}{E_s} \right) E_s \quad \text{Equação 2.16}$$

$\sigma_{s2}$  é a tensão na armadura de compressão, dada pela Equação 2.17.

$$\sigma_{s2} = \min \left( \varepsilon_c \frac{x-d_{s2}}{x}, \frac{f_{yd}}{E_s} \right) E_s \quad \text{Equação 2.17}$$

$k_1$  é o fator para a tensão média do bloco de compressão determinado em função da deformação no concreto dada pela Equação 2.18.

$$k_1 = \begin{cases} 1000\varepsilon_c \left( 0,5 - \frac{1000}{12} \varepsilon_c \right) & \varepsilon_c \leq 0,002 \\ 1 - \frac{2}{3000\varepsilon_c} & 0,002 \leq \varepsilon_c \leq 0,0035 \end{cases} \quad \text{Equação 2.18}$$

$k_2$  é o fator para o braço de alavanca da distribuição parábola-retângulo da tensão do concreto determinado em função da deformação no concreto, dado pela Equação 2.19.

$$k_2 = \begin{cases} \frac{8 - 1000\varepsilon_c}{4(6 - 1000\varepsilon_c)} & \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{1000\varepsilon_c (3000\varepsilon_c - 4) + 2}{2000\varepsilon_c (3000\varepsilon_c - 2)} & 0,002 \leq \varepsilon_c \leq 0,0035 \end{cases} \quad \text{Equação 2.19}$$

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O programa experimental em questão consiste em uma avaliação do desempenho de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com barras de aço e argamassa polimérica, pela técnica do *Near Surface Mounted*. Neste estudo foi avaliada a influência da taxa de armadura de flexão, da taxa de armadura de reforço e do tipo de reforço na resistência à flexão dos elementos, comparando a aplicabilidade das barras de aço e argamassa com laminados de PRFC e resina epóxi.

O programa experimental completo é composto por 18 vigas de concreto armado, divididas em duas séries distintas, que compõe duas dissertações de mestrado. A série I faz parte da dissertação de mestrado da aluna Renata Piazza Dal Pont e é composta de vigas com taxa de reforço ( $\rho_f$ ) variável e taxa de armadura de flexão constante ( $\rho$ ). A série II, que faz parte desta dissertação, é composta de vigas com taxa de armadura de flexão variável ( $\rho$ ) e taxa de reforço ( $\rho_f$ ) constante.

Ambas as séries foram divididas em três grupos, sendo o grupo I composto pelas vigas de referência (sem reforço externo), o grupo II pelas vigas reforçadas com lâminas de PRFC com resina epóxi e o grupo III pelas vigas reforçadas com barras de aço e argamassa Zentrifix CR. Os detalhes desta proposta são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Detalhes das vigas propostas

Série	Vigas			Armadura de Flexão	Reforço PRFC / Reforço Aço
	Grupo I (Referência)	Grupo II (Lâminas de Carbono)	Grupo III (Barras de Aço)		
I	VREF – 12,5	VC – 12,5 – A	VA – 12,5 – A	3 $\Phi$ 12,5	2 lâminas / 2 barras $\Phi$ 8
I/II		VC – 12,5 – B	VA – 12,5 – B		3 lâminas / 3 barras $\Phi$ 8
I		VC – 12,5 – C	VA – 12,5 – C		4 lâminas / 4 barras $\Phi$ 8
I		VC – 12,5 – D	VA – 12,5 – D		5 lâminas / 3 barras $\Phi$ 10
II	VREF – 10	VC – 10 – B	VA – 10 – B	3 $\Phi$ 10	3 lâminas / 3 barras $\Phi$ 8
	VREF – 16	VC – 16 – B	VA – 16 – B	3 $\Phi$ 16	3 lâminas / 3 barras $\Phi$ 8
	VREF – 20	VC – 20 – B	VA – 20 – B	3 $\Phi$ 20	3 lâminas / 3 barras $\Phi$ 8

A série II, proposta para este trabalho, contará com 12 vigas, visto que as vigas VREF – 12,5, VC – 12,5 – B e VA – 12,5 – B, executadas e ensaiadas ainda na série I, também serão utilizadas

nas análises desta dissertação de mestrado. Isto ocorre pois os parâmetros avaliados nestas três vigas atendem às duas análises, permitindo dividir a proposta total em duas concretagens distintas, com 9 vigas em cada.

O objetivo da série II é avaliar a influência da variação da armadura de flexão no desempenho das vigas e a eficiência dos diferentes tipos de reforço. Para isso, foram coletados dados durante a realização dos ensaios, referentes aos valores de carga concentrada aplicada, deformação da armadura de flexão e cisalhamento, deformação do concreto, deformação do reforço (PRFC e aço), deslocamento da viga e fissuração.

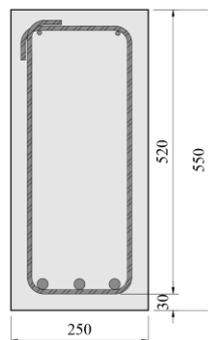
Ressalta-se que este trabalho contou com o apoio da Kali Engenharia, que prestou contribuições técnicas, bem como o apoio financeiro na aquisição dos materiais e mão de obra especializada para a execução do reforço.

## 3.2. CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS

### 3.2.1. Dimensões geométricas

As vigas de deste programa possuem seção transversal retangular de largura igual à 250 mm e altura de 550 mm, com cobrimento de 30 mm, atendendo ao valor especificado pela NBR 6118:2014 para vigas sujeitas a classe de agressividade ambiental II. Essas dimensões foram escolhidas de forma a respeitar os parâmetros de espaçamento entre os elementos de reforço apresentados no ACI 440.2R (2017).

A seção longitudinal das vigas apresentam comprimento total de 4400 mm, com distância de 200 mm da extremidade da viga até o apoio e 1500 mm entre o apoio e o ponto de aplicação de carga. A Figura 3.1 traz uma representação da seção transversal e longitudinal padrão das vigas propostas.



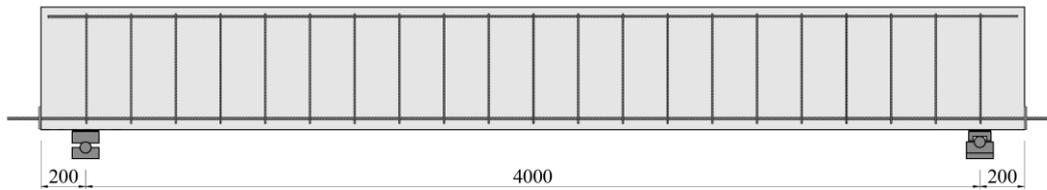


Figura 3.1: Representação das vigas propostas no programa experimental

### 3.2.2. Detalhamento das armaduras

Na série em questão, as armaduras de flexão são variáveis e foram definidas previamente, buscando adotar valores próximos aos convencionais de projeto, sempre obedecendo aos limites inferiores e superiores de taxa de armadura. Assim, foram adotadas taxas de 0,19%, 0,29%, 0,48% e 0,75%, a fim de avaliar a sua influência com relação à capacidade resistente à flexão das vigas reforçadas e os modos de ruptura apresentados.

As vigas possuíam armadura de flexão variável, sempre composta três barras CA50, com diâmetros entre 10 mm e 20 mm e 4700 mm de comprimento. Na zona de compressão, foi utilizada uma armadura longitudinal composta por duas barras CA50 com diâmetro igual a 8 mm, para assumir a função de porta-estribo. Para a armadura de cisalhamento foram utilizados estribos verticais de 8 mm de diâmetro, espaçados a cada 20 cm.

Seguindo as indicações dos itens 6.4 e 7.4 da NBR 6118:14, foi utilizado um cobrimento de 30 mm para a armadura, valor especificado para ambiente interno ou externo de agressividade média, em área urbana ou rural. A Figura 3.2 e Figura 3.3 ilustram o detalhamento das armaduras das vigas.

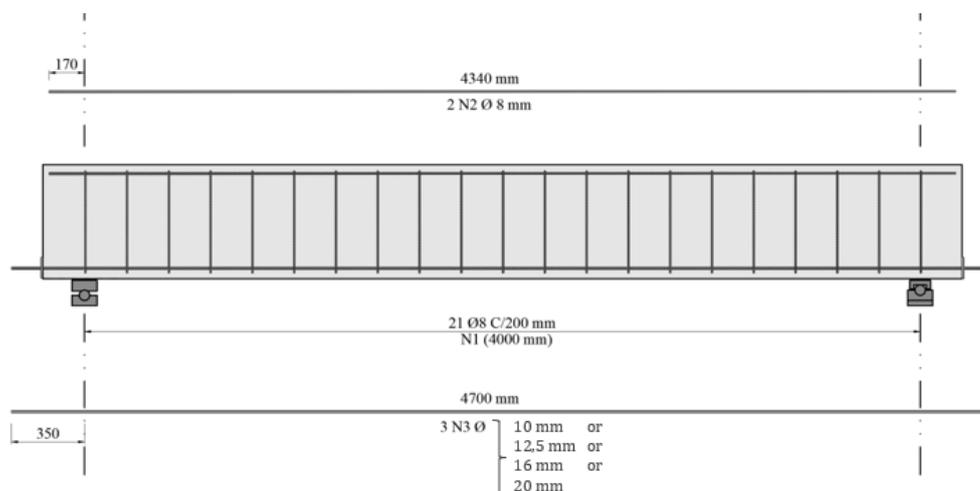


Figura 3.2: Detalhamento longitudinal das armaduras das vigas ensaiadas

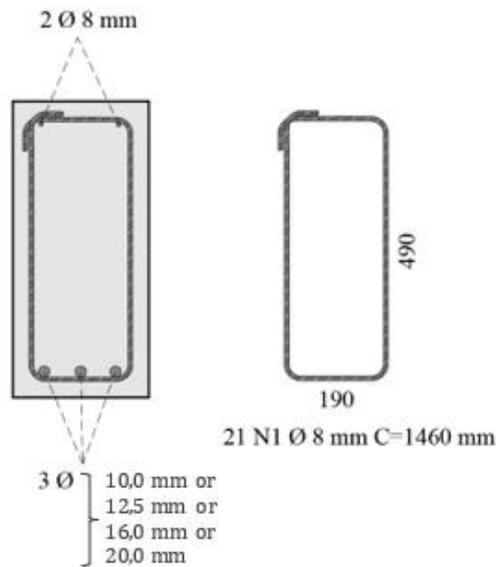


Figura 3.3: Detalhamento transversal das armaduras das vigas ensaiadas

Em relação a ancoragem da armadura longitudinal, optou-se por um sistema que permitisse a fixação adequada das barras, evitando o seu deslizamento durante a concretagem. Ainda, como os diâmetros dessas barras eram elevados seria difícil sobrá-las de forma eficiente e, dessa forma, optou-se por um sistema que dispensa a necessidade de dobra. Assim, foram utilizadas barras mais compridas que as vigas, deixando uma sobra de cerca de 180 mm para fora, de cada lado. Essas barras foram soldadas em chapas de aço de dimensões 250 mm x 200 mm, com espessura de 9 mm, que foram fixadas nas extremidades das fôrmas das vigas antes da concretagem e que possuíam furos com a dimensão exata de cada barra.

Conforme verificado em ensaios prévios realizados no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília, esse procedimento de ancoragem apresenta resultados adequados, além de estar previsto no item 9.4.5.4 da NBR 6118:14, como “ancoragem por meio de dispositivos mecânicos”. A Figura 3.4 apresenta um detalhe do sistema de ancoragem utilizado.

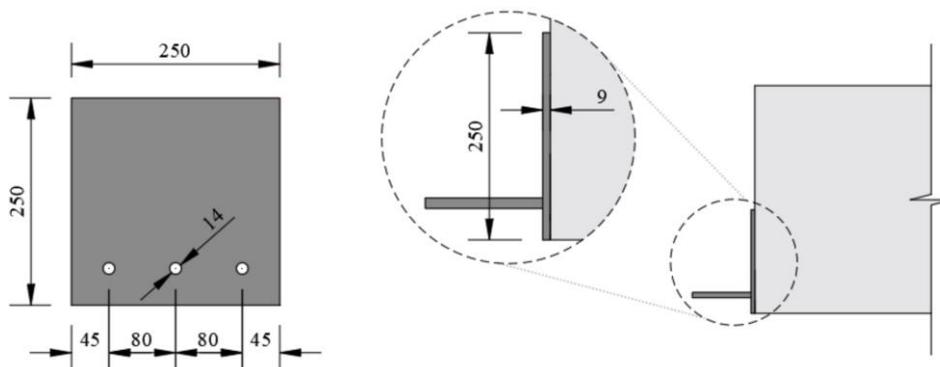


Figura 3.4: Detalhe do sistema de ancoragem adotado nas vigas do programa experimental

### 3.2.3. Disposição do reforço NSM

O reforço foi aplicado à flexão, utilizando a técnica NSM. Em relação a seção longitudinal, tanto as barras de aço com as lâminas de PRFC possuíam um comprimento de 3680 mm, de forma manter uma distância de 100 mm da face do apoio, como mostra a Figura 3.5.

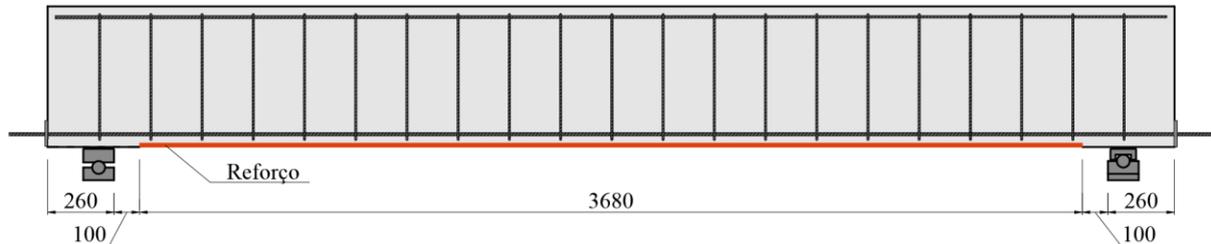


Figura 3.5: Detalhamento do reforço das vigas ensaiadas

A disposição do reforço foi definida com base nas recomendações normativas do ACI 440.2R (2017) para o reforço de vigas pela técnica NSM. A seção transversal da viga possui 25 cm e foi dimensionada para conceber a instalação de até 5 ranhuras, visto que respeitando os espaçamentos mínimos entre elas e a distância necessária até a face do elemento seria necessária uma seção de pelo menos 24 cm de largura.

Já as ranhuras, por sua vez, foram dimensionadas de acordo com as dimensões do tipo de reforço utilizado, seja as lâminas de PRFC ou as barras de aço.

Para o caso de reforço executado com barras, a recomendação americana indica que a ranhura deve apresentar largura e profundidade mínima de pelo menos 1,5 vezes o diâmetro das barras ( $d_b$ ), enquanto que para reforços executados com lâminas retangulares, a ranhura deve apresentar largura mínima de 3 vezes a espessura da lâmina ( $a_b$ ) e profundidade mínima de 1,5 vezes a altura da lâmina ( $b_b$ ), como mostra a Figura 3.6.

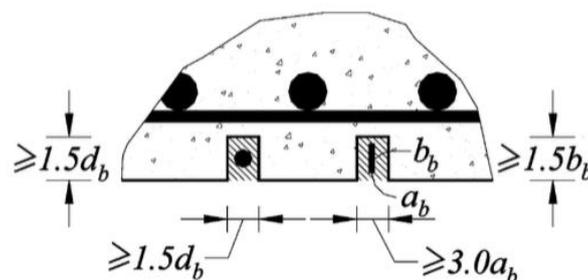


Figura 3.6: Dimensões mínimas das ranhuras [Fonte: ACI 440.2R (2017)]

As lâminas de PRFC utilizadas possuíam espessura ( $a_b$ ) igual a 1,2 mm e altura ( $b_b$ ) igual a 5mm e, dessa forma, foram executadas ranhuras com 15 mm de profundidade e 5 mm de largura para essas vigas. Já nas vigas reforçadas com barra de aço foram executadas ranhuras com 15 mm de largura e 15 mm de profundidade, suficiente para receber as barras de aço de diâmetro de 8 mm. A Figura 3.7 mostra as ranhuras adotadas para as vigas reforçadas com PRFC e barras de aço.

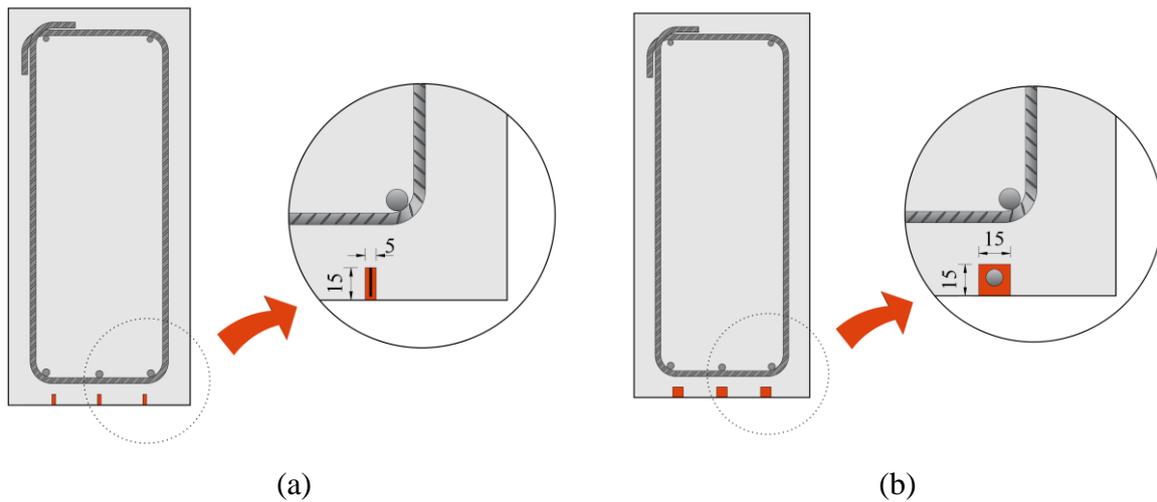


Figura 3.7: Dimensões das ranhuras das vigas reforçadas:

(a) lâminas de PRFC (b) barras de aço

O ACI 440.2R (2017) ainda traz algumas especificações de espaçamentos das ranhuras, de forma a minimizar os efeitos de borda e a sobreposição das tensões de tração em volta dos elementos de reforço. Assim, indica-se que a distância entre a ranhura e a borda da viga deve ser no mínimo 4 vezes a profundidade da ranhura e o espaçamento entre ranhuras deve ser de pelo menos 2 vezes a profundidade das ranhuras. Dessa forma, foi proposta a disposição dos elementos de reforço apresentado na Figura 3.8.

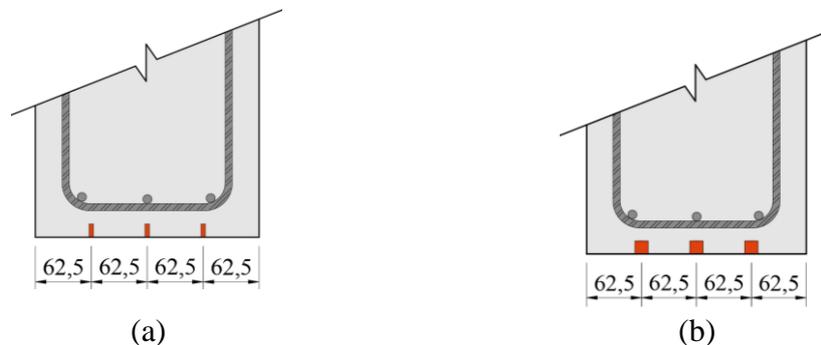


Figura 3.8: Disposição das ranhuras das vigas:

(a) lâminas de PRFC (b) barras de aço

### 3.2.4. Resistência à flexão das vigas

As vigas foram dimensionadas com base no modo de ruptura esperado, de modo a garantir que as dimensões e as taxas de armadura de flexão adotadas eram suficientes para evitar uma ruptura frágil, causada pelo esmagamento do concreto antes do esgotamento da capacidade resisteste do reforço.

Para realizar o cálculo da resistência à flexão foram adotados coeficientes de segurança unitários, resistência característica à compressão do concreto igual a 30 MPa, armaduras de aço CA50, com tensão de escoamento de 500 MPa, módulo de elasticidade de 210 GPa e cobrimento de 30 mm.

#### 3.2.4.1. Vigas de referência

Primeiramente foram calculadas as quatro vigas de referência, seguindo as recomendações da ABNT NBR 6118:2014, conforme apresentado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Dimensionamento das vigas de referência

PREVISÃO NBR 6118 (2014)										
Vigas	$\epsilon_c$	$\epsilon_s$	$\epsilon_s'$	$f_{fe}$	$f_s$	$f_c$	$f_s'$	X	$M_R$	$P_U$
				(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)			
VREF – 10	0,0010	0,0115	0,0002	2079	500	30,0	37	39,54	58,20	77,61
VREF – 12,5	0,0012	0,0115	0,0004	2079	500	30,0	79	48,36	89,74	119,66
VREF – 16	0,0016	0,0114	0,0010	2079	500	30,0	200	63,05	144,69	192,92
VREF – 20	0,0023	0,0113	0,0015	2079	500	30,0	298	83,49	221,16	294,89

#### 3.2.4.2. Vigas reforçadas com lâminas de PRFC

Em seguida foram calculadas as quatro vigas reforçadas com lâminas de PRFC, seguindo as recomendações do ACI 440.2R (2017) e do *fib* Bulletin 90 (2019). Os dados principais do cálculo destas vigas são mostrados na Tabela 3.3 e na Tabela 3.4, de acordo com cada norma.

Tabela 3.3: Dimensionamento das vigas reforçadas com PRFC – ACI 440.2R (2017)

PREVISÃO ACI 440.2R (2017)													
Vigas	$\epsilon_{fu}$	$\epsilon_{fe}$	$\epsilon_c$	$\epsilon_s$	$\epsilon_s'$	$f_{fe}$	$f_s$	$f_c$	$f_s'$	X	$M_R$	$P_U$	Modo Ruptura Teórico
						(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)				
VC – 10 – B	0,0180	0,013	0,0012	0,0115	0,0005	2079	500	30,0	91	49,47	91,31	121,74	DE/FL
VC – 12,5 – B	0,0180	0,013	0,0015	0,0115	0,0008	2079	500	30,0	164	57,83	122,57	163,43	DE/FL
VC – 16 – B	0,0180	0,013	0,0019	0,0114	0,0013	2079	500	30,0	250	72,03	176,82	235,76	DE/FL
VC – 20 – B	0,0180	0,013	0,0026	0,0113	0,0016	2079	500	30,0	329	93,06	251,67	335,56	DE/FL

Tabela 3.4: Dimensionamento das vigas reforçadas com PRFC – *fib* Bulletin 90 (2019)

PREVISÃO <i>fib</i> Bulletin 90 (2019)													
Vigas	$\epsilon_{fu}$	$\epsilon_{fe}$	$\epsilon_c$	$\epsilon_s$	$\epsilon_s'$	$f_{fe}$	$f_s$	$f_c$	$f_s'$	X	$M_R$	$P_U$	Modo Ruptura Teórico
						(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)				
VC – 10 – B	0,0180	0,013	0,0014	0,0115	0,0006	2079	500	30,0	130	53,58	91,24	121,66	DE/FL
VC – 12,5 – B	0,0180	0,013	0,0016	0,0115	0,0010	2079	500	30,0	200	63,06	122,39	163,19	DE/FL
VC – 16 – B	0,0180	0,013	0,0021	0,0114	0,0014	2079	500	30,0	283	79,48	175,99	234,65	DE/FL
VC – 20 – B	0,0180	0,013	0,0029	0,0112	0,0018	2079	500	30,0	357	103,65	249,22	332,29	DE/FL

### 3.2.4.3. Vigas reforçadas com barras de aço

Um dos objetivos do programa experimental é comparar a eficiência entre os diferentes tipos de reforço utilizados e, para isso, é necessário que as vigas reforçadas com barras de aço apresentem um momento último equivalente ao das vigas reforçadas com PRFC. Assim, para definir as dimensões e quantidades das barras de aço, foi calculada a área de aço equivalente à área de PRFC, a fim de obter a mesma resistência final para os elementos.

Assim, estas vigas foram dimensionadas por meio de um processo iterativo, em que foi definida a área de aço equivalente para garantir a mesma capacidade resistente e modo de ruptura das vigas reforçadas com PRFC. A Tabela 3.5 apresenta os parâmetros utilizados neste cálculo, que seguiram as recomendações da ABNT NBR 6118:2014.

Tabela 3.5: Dimensionamento das vigas reforçadas com barras de aço

Viga	d	b <sub>w</sub>	M	A <sub>s,long</sub>	R <sub>cc</sub>	R <sub>st</sub>	A <sub>s,ref</sub>	Desbitolagem		Reforço em aço	
	mm	mm	kN.mm	mm <sup>2</sup>			(mm <sup>2</sup> )	φ =8	φ =10	Qt. barras	φ (mm)
VA-10-B	507	250	91308	235	180742	180742	126	2,5	1,6	3	8
VA-12,5-B	506	250	122570	368	247243	247243	126	2,5	1,6	3	8
VA-16-B	504	250	176820	603	366790	366790	130	2,6	1,7	3	8
VA-20-B	502	250	251670	942	541476	541476	140	2,8	1,8	3	8

### 3.2.5. Resistência ao cisalhamento das vigas

A armadura de cisalhamento foi dimensionada para evitar a ruptura das vigas por cisalhamento após o reforço à flexão, ou seja, de forma a garantir uma capacidade resistente ao cisalhamento superior a capacidade resistente à flexão. Em busca de garantir esta condição, optou-se por adotar uma capacidade resistente ao esforço cortante pelo menos 60% superior à capacidade resistente à flexão.

Para a verificação da capacidade resistente, foi considerada uma armadura de cisalhamento de aço CA50, com tensão de escoamento de 500 MPa e módulo de elasticidade de 210 GPa, além de uma resistência característica à compressão do concreto de 30MPa.

Os valores foram calculados de acordo com a ABNT NBR 6118:2014, sendo adotados estribos verticais de 8 mm a cada 20 cm para todas as vigas. Na Tabela 3.6 são apresentados os valores

da parcela de resistência ao esforço cortante devido a mecanismos complementares ao de treliça, da parcela resistida pela armadura transversal e o valor total da capacidade resistente.

Tabela 3.6: Cálculo da resistência ao cisalhamento

Vigas	$V_c$	$V_s (\alpha=90^\circ)$	$V_u$	$P_{u,cisalhamento}$	$P_{U\ ACI}$	$P_{U\ fib}$	Espaçamento	$\Phi$
	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(cm)	(mm)
VREF - 10	110,14	114,68	224,82	449,64	38,80	38,65	20	8,0
VREF - 12,5	109,87	114,40	224,26	448,53	59,83	59,77	20	8,0
VREF - 16	109,49	114,00	223,49	446,98	96,46	96,21	20	8,0
VREF - 20	109,05	113,55	222,60	445,20	147,44	146,24	20	8,0
VA - 10 - B VC - 10 - B	110,14	114,68	224,82	449,64	60,87	60,83	20	8,0
VA - 12,5 - B VC - 12,5 - B	109,87	114,40	224,26	448,53	81,71	81,60	20	8,0
VA - 16 - B VC - 16 - B	109,49	114,00	223,49	446,98	117,88	117,33	20	8,0
VA - 20 - B VC - 20 - B	109,05	113,55	222,60	445,20	167,78	166,14	20	8,0

Observa-se que a carga última estimada para uma ruptura por cisalhamento ( $P_{u,cisalhamento} = 2V_u$ ) é maior que a carga última teórica à flexão das vigas reforçadas.

### 3.3. PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

#### 3.3.1. Fôrmas

Foram utilizadas fôrmas metálicas para esse programa experimental, aproveitando a base de algumas fôrmas já existentes no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília e realizando as adequações necessárias. A base dessas fôrmas é composta por chapas metálicas de perfil “U” e espessura de 5 mm, enquanto as laterais são chapas de 3 mm de espessura, que foram soldadas na base para ajustá-la ao formato desejado.

Para finalização, as fôrmas foram pintadas, com o intuito de evitar a corrosão das peças e proporcionar maior durabilidade.

Antes da concretagem, as fôrmas foram recobertas internamente com uma demão de DESMOL CD, da marca VEDACIT, para facilitar a desforma das vigas, visto que este produto impede a aderência entre a fôrma e o concreto endurecido. Este tratamento foi realizado na noite anterior

a concretagem, permitindo o preparado prévio das fôrmas, com o posicionamento adequado das armaduras. A Figura 3.9 apresenta as armaduras já posicionadas nas fôrmas.



Figura 3.9: Armaduras posicionadas nas fôrmas antes da concretagem

Por fim, foi realizada a ancoragem mecânica das barras de flexão que, conforme já descrito, tratava-se de um sistema composto por chapas de aço soldadas na face lateral das fôrmas. Essas chapas possuíam dimensões 250 mm x 200 mm, com espessura de 9 mm e furos de tamanho variável de 12 mm a 22 mm, a depender da bitola das barras da armadura de flexão. A Figura 3.12 mostra o processo de solda das chapas de ancoragem, enquanto a Figura 3.11 mostra as fôrmas já preparadas para a concretagem.



Figura 3.10: Processo de soldagem das chapas metálicas de ancoragem mecânica



(a) Vista lateral



(b) Vista frontal



(c) Vista superior

Figura 3.11: Fôrmas de aço

### 3.3.2. Concreto

#### 3.3.2.1. Especificações do concreto

Todas as vigas foram fabricadas utilizando concreto usinado bombeado, com resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ) desejada de 30 MPa, utilizando como agregado brita 1 calcária e cimento CII plus. Este material foi doado pela Kali Engenharia e fornecida pela empresa Ciplan Cimento Planalto SA.

No dia da concretagem foi preparada uma área do laboratório para realizar o recebimento do concreto e a fabricação dos corpos de prova de caracterização deste material, conforme mostra a Figura 3.12.



Figura 3.12: Fôrmas de corpos de prova de concreto e materiais utilizados para o teste de abatimento de cone

Seguindo as recomendações da ABNT NBR 16889:2020, no momento do recebimento do concreto foi realizado o ensaio de determinação da consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone. A norma indica que o valor de abatimento de tronco de cone desejado é igual a  $10 \pm 2$  cm e o resultado obtido no ensaio foi de 12 cm, como mostra a Figura 3.15. Dessa forma, o concreto foi aceito e deu-se prosseguimento à concretagem.



Figura 3.13: Amostra de concreto submetida ao ensaio de abatimento do tronco de cone

### 3.3.2.2. Processo de cura

A cura do concreto foi realizada por 7 dias com o auxílio de tecidos de algodão e poliéster, que foram colocados sobre a superfície exposta do concreto e eram umedecidos 3 vezes ao dia. Ainda, com o intuito de aumentar a eficiência do processo de cura, os espécimes foram recobertos com lonas plásticas, que reduzem a perda de água por evaporação, como mostra a Figura 3.14.



Figura 3.14: Vigas encobertas com lonas plásticas durante a cura

### 3.3.2.3. Propriedades mecânicas do concreto

Conforme indicado anteriormente, durante a concretagem foram moldados quarenta e cinco corpos de prova para realizar os ensaios de caracterização das propriedades mecânicas do concreto. Esses corpos de prova (CPs) eram cilíndricos, com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura e foram divididos em cinco grupos, com nove CPs cada. O primeiro grupo de CPs foi tomado após a concretagem das duas primeiras vigas, o segundo grupo foi tomado após a concretagem da terceira e quarta viga, o terceiro grupo foi tomado após a concretagem da quinta e da sexta viga, o quarto grupo foi tomado após a concretagem da sétima e oitava viga e o quinto grupo foi tomado após a concretagem da nona e última viga.

Assim como as vigas, os corpos de prova também foram curados por 7 dias, recobertos com lonas plásticas e irrigados 3 vezes ao dia.

Para obter as propriedades do concreto, os CPs foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão uniaxial, tração por compressão diametral e determinação do módulo de

elasticidade, conforme especificações da ABNT NBR 7222 (2011), ABNT NBR 5739 (2007) e ABNT NBR 8522 (2008), respectivamente.

Os ensaios foram realizados no Campus de Samambaia do Instituto Federal de Brasília (IFB), utilizando uma prensa EMIC modelo DL 30000, com capacidade para 2000 kN. Conforme mostra a Figura 3.15.

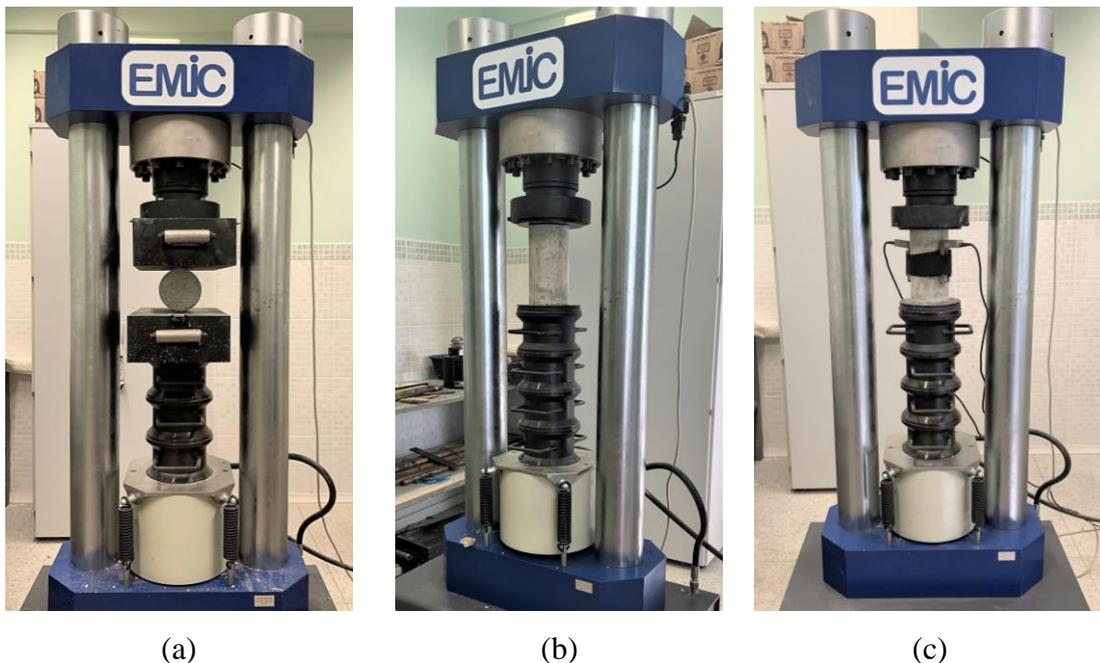


Figura 3.15: Ensaio de caracterização do concreto: (a) Resistência à tração  
(b) Resistência à compressão (c) Módulo de elasticidade

Para realizar o ensaio de determinação do módulo de elasticidade, o corpo de prova foi conectado a um extensômetro duplo do mesmo fabricante da prensa, cuja função consistia em mensurar as deformações axiais.

### 3.3.3. Aço

#### 3.3.3.1. Especificações do aço

Todas as barras de aço utilizadas na confecção das armaduras de flexão, porta-estribos, estribos e reforço foram de aço CA50, fabricadas pela Arcelor Mittal, com superfície nervurada e bitolas de 8 mm, 10 mm, 12,5mm, 16 mm e 20 mm. De acordo com as especificações do fabricante, as barras de aço seguem as prescrições normativas da ABNT NBR 7480 e apresentam uma

resistência característica ao escoamento ( $f_{yk}$ ) igual a 500 MPa e resistência última à tração igual a 540 MPa.

### **3.3.3.2. Propriedades mecânicas do aço**

#### **3.3.3.3. Ensaio do aço à tração**

As propriedades mecânicas das barras de aço foram investigadas por meio da execução de ensaios de tração à temperatura ambiente, seguindo as recomendações da ABNT NBR 6892:2013. Para isso, foram coletadas 3 amostras de 600 mm de comprimento, com 500 mm de comprimento livre, para cada diâmetro de barra de aço (8 mm, 10mm, 12,5 mm, 16 mm e 20 mm), totalizando 15 corpos de prova.

Os ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório de Materiais da Universidade Federal do Pará (UFPA), no campus de Tucuruí, com auxílio de uma prensa EMIC modelo DL 30000, com capacidade para 300 kN, conectada a um extensômetro eletrônico EMIC modelo EE09.

### **3.3.4. Argamassa de reparo estrutural**

#### **3.3.4.1. Especificações da argamassa de reparo estrutural**

A argamassa de reparo estrutural utilizada no reforço das vigas com barra de aço é uma argamassa polimérica cimentícia com agente adesivo integrado, inibidor de corrosão e consistência tixotrópica. Ela é fabricada pela MC Bauchemie e comercializada com o nome Nafufill CR.

De acordo com as especificações do fabricante, esse material apresenta resistência à compressão superior a 60 MPa, resistência à tração na flexão superior a 9 MPa, módulo de elasticidade de 31 GPa e aderência superior a 2 MPa, aos 28 dias.

#### **3.3.4.2. Propriedades mecânicas da argamassa de reparo estrutural**

Assim como para o concreto, as propriedades mecânicas da argamassa de reparo estrutural foram investigadas por meio da execução de ensaios de resistência à compressão uniaxial, tração por compressão diametral e determinação do módulo de elasticidade, conforme especificações da ABNT NBR 7222 (2011), ABNT NBR 5739 (2007) e ABNT NBR 8522

(2008), respectivamente. Para isso, foram coletados 9 CPs de 100 mm diâmetro e 200 mm de altura, tomados durante a execução do reforço com barra de aço.

Os ensaios foram realizados no Campus de Samambaia do Instituto Federal de Brasília (IFB), utilizando uma prensa EMIC modelo DL 30000, com capacidade para 2000 kN.

### **3.3.5. Polímero reforçado com fibra de carbono (PFRC)**

O laminado de fibra de carbono utilizado para o reforço das vigas é produzido pela MC Bauchemie e comercializado com o nome MC CarbonFiber Lamella. O material é um compósito de matriz em resina epóxi, reforçados com fibra de carbono unidirecional por pultrusão.

Esse material não foi ensaiado, sendo utilizadas as especificações apontadas pelo fabricante. Assim, foi indicado que o compósito apresenta um valor médio de resistência à tração de 2800 MPa, módulo de elasticidade igual a 160 GPa, deformação última igual a 1,7% e o teor de fibra em volume de 74%.

### **3.3.6. Resina**

A resina utilizada no reforço das vigas com PRFC também é produzida pela MC Bauchemie, comercializada pelo nome MC-Carbosolid 1300 TX. Esse adesivo é indicado pela fabricante para a colagem do laminado utilizado e trata-se de um adesivo estrutural de pega normal, bicomponente, a base de epóxi de consistência pastosa.

Esse material também não foi ensaiado, sendo consideradas as especificações do fabricante, que apontam uma resistência à compressão superior a 60 MPa, aos 7 dias, e uma aderência de 2 MPa.

## **3.4. INSTRUMENTAÇÃO**

### **3.4.1. Deslocamentos verticais**

Conforme ilustrado na Figura 3.16, os deslocamentos verticais das vigas foram acompanhados em seis pontos distintos por meio da utilização de deflectômetros do tipo LVDT, fabricados pela HBM com capacidade de até 50 mm e precisão de 0,01 mm.

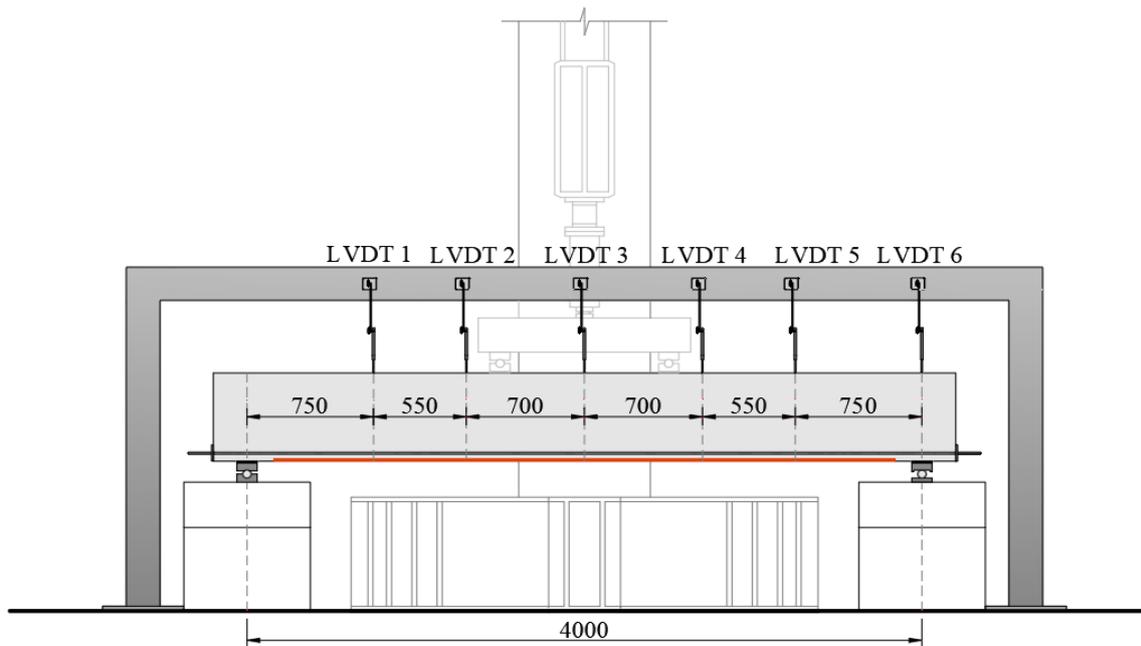


Figura 3.16: Posicionamento dos LVDTs

Os LVDTs 1 e 5 foram posicionados a 750 mm do apoio com o intuito de medir os deslocamentos no meio do trecho com cisalhamento da viga. Os LDVTs. 2, 3 e 4 foram posicionados no trecho de flexão pura. Já o LVDT 6 foi posicionado sobre o apoio, para verificar se ocorreram deslocamentos significativos nesse ponto durante o ensaio.

### 3.4.2. Deformações nas armaduras de flexão e de cisalhamento

As deformações específicas das armaduras de flexão e de cisalhamento foram aferidas através de extensômetros elétricos modelo KFGS-5-120-C1-11 fabricados pela *Kyowa Electronic Instruments*, com resistência igual a  $120 \pm 0,2 \Omega$ . A disposição e o processo de instalação destes elementos são descritos a seguir.

#### 3.4.2.1. Disposição dos extensômetros

O extensômetro EF1 foi posicionado no meio da viga, enquanto os extensômetros EF2, EF3 e ET1 foram posicionados na região do vão de cisalhamento, que se localiza entre o ponto de aplicação de carga e o eixo do apoio. O posicionamento dos extensômetros é ilustrado na Figura 3.17.

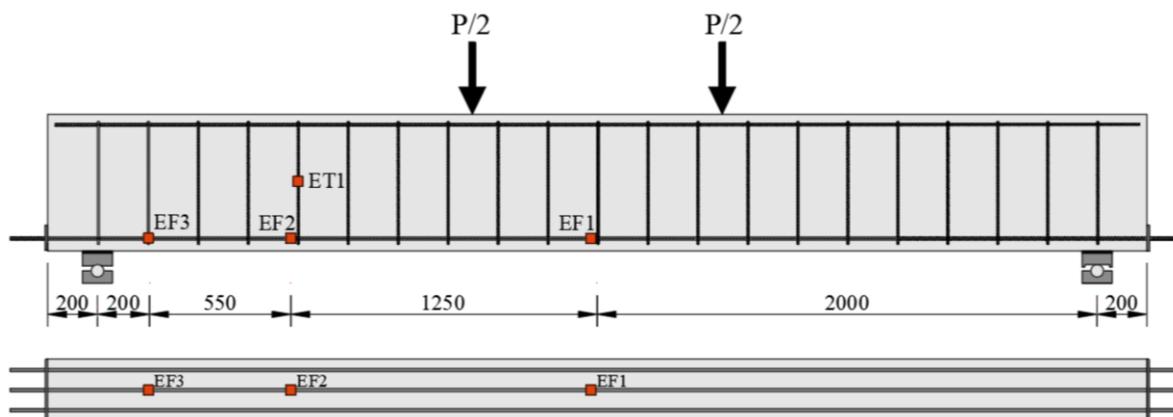


Figura 3.17: Posicionamento dos extensômetros nas armaduras de flexão e de cisalhamento

Conforme ilustrado na Figura 3.18, cada ponto de medição apresenta dois extensômetros e o resultado da medição é obtido através da média das leituras dos dois extensômetros.

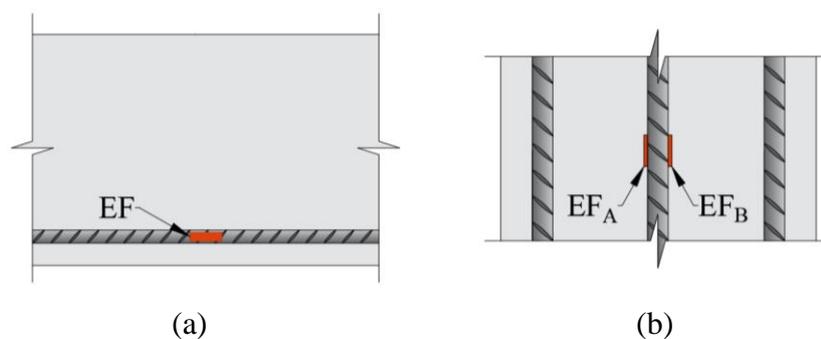


Figura 3.18: Posicionamento dos extensômetros na barra de flexão (a) Vista lateral  
(b) Vista superior

### 3.4.2.2. Processo de instrumentação das barras de aço

Para garantir a confiabilidade dos resultados indicados pelos extensômetros é necessário realizar uma instrumentação adequada, proporcionando a fixação adequada entre os elementos.

O processo inicia-se pelo tratamento das barras de aço, que são limadas e lixadas para remover as nervuras e imperfeições sem reduzir a seção transversal da barras. Com a superfície lisa e tratada deve ser realizada a limpeza do ponto de aplicação, com a utilização de algodão embebido em álcool isopropílico.

Após a limpeza, a superfície está pronta para receber os extensômetros, que são colados na barra de aço com um adesivo cianoacrilático (*Super Bonder*). Em seguida, os terminais do

extensômetro são soldados à ponta de um cabo paralelo flexível, com diâmetro de 1,5 mm, preso à barra por meio de abraçadeiras plásticas.

De forma a proteger os dispositivos elétricos durante o processo de ancoragem e garantir o seu funcionamento, é necessário revesti-los com uma camada de resina epóxi, seguida de uma camada de silicone e de uma camada de fita isolante de auto fusão. A Figura 3.19 mostra as etapas do processo de colagem dos extensômetros.

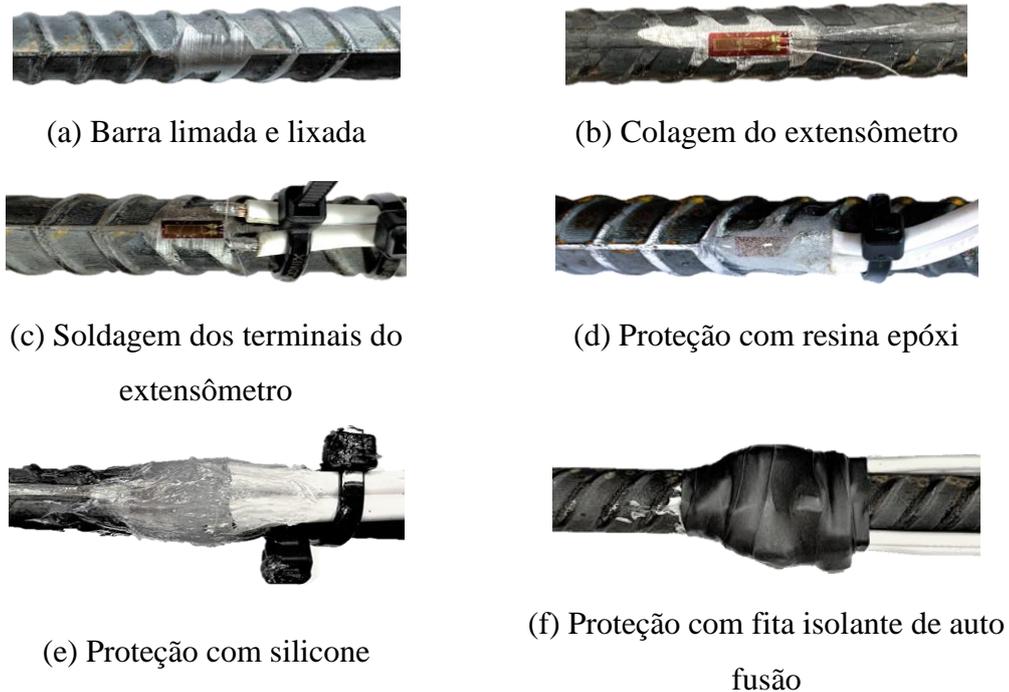


Figura 3.19: Etapas do processo de colagem dos extensômetros

### 3.4.3. Deformações no reforço

As deformações específicas dos laminados de PRFC e barras de aço utilizados no reforço foram aferidas através de extensômetros elétricos modelo KFGS-5-120-C1-11 fabricados pela *Kyowa Electronic Instruments*, com resistência igual a  $120 \pm 0,2 \Omega$ .

#### 3.4.3.1. Disposição dos extensômetros

A instrumentação foi realizada em dois elementos de reforço, visto que o tamanho reduzido da ranhura impossibilitava a colagem de dois extensômetros no mesmo ponto de medição, como foi feito nos pontos de medição de deformação das armaduras de cisalhamento e flexão. Assim, foram

instrumentados três pontos distintos com um único extensômetro, em dois elementos de reforço (central e em um de borda). A Figura 3.20 ilustra o posicionamento desses extensômetros.

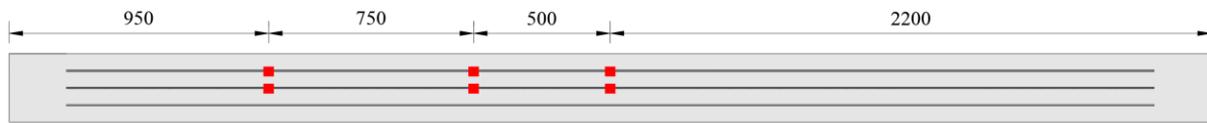


Figura 3.20: Posicionamento dos extensômetros no reforço

### 3.4.3.2. Processo de instrumentação do reforço

Nessa seção é descrito apenas o processo de instrumentação das lâminas de PRFC, visto que as barras de aço utilizadas no reforço foram instrumentadas seguindo o mesmo procedimento indicado para as armaduras de flexão e cisalhamento.

No caso do PRFC não é necessária uma preparação prévia da superfície, sendo necessário apenas realizar a limpeza do elemento com o auxílio de algodões embebidos em álcool isopropílico e, em seguida, realiza-se a colagem dos extensômetros diretamente sobre a superfície do laminado com um adesivo cianoacrilático (*Super Bonder*). Após a colagem é realizada a soldagem dos terminais do extensômetro a ponta de um cabo paralelo flexível paralelo com diâmetro de 1,5 mm, que foi preso à barra por meio de abraçadeiras plásticas.

Por fim, para garantir o funcionamento dos dispositivos elétricos após a execução do reforço, o conjunto foi revestido por uma camada de resina epóxi. A Figura 3.21 mostra todas as etapas desse processo de colagem dos extensômetros.



Figura 3.21: Posicionamento dos extensômetros no laminado de PRFC

### 3.4.4. Deformações no concreto

O concreto foi instrumentado na superfície superior do meio do vão da viga, com extensômetros elétricos fabricados pela *Kyowa Electronic Instruments* de resistência de 120  $\Omega$  modelo KC-70-120-A1-11, com o objetivo de medir as deformações do concreto durante o ensaio.

#### 3.4.4.1. Disposição dos extensômetros no concreto

No concreto foram utilizados apenas dois pontos de medição, ambos localizados na seção central das vigas. A Figura 3.22 apresenta os pontos de medição do concreto.

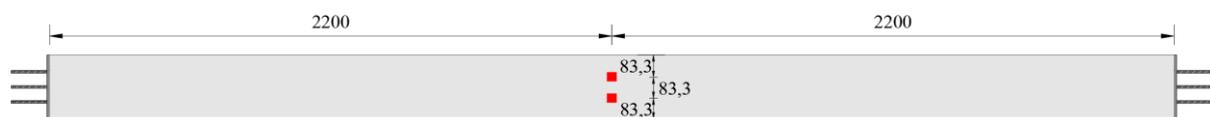


Figura 3.22: Posicionamento dos extensômetros no concreto

## 3.5. PROCESSO EXECUTIVO DO REFORÇO DAS VIGAS

### 3.5.1. Abertura das ranhuras das vigas

A execução do reforço das vigas inicia-se com a abertura das ranhuras na superfície. Para facilitar o processo de marcação e execução das ranhuras, as vigas foram posicionadas de cabeça para baixo, apoiadas em caibros de madeira, para proteger a sua superfície superior.

Com as vigas devidamente posicionadas, foi realizada a demarcação das ranhuras, seguindo as dimensões e espaçamentos definidos durante o dimensionamento das vigas.

A abertura das ranhuras foi realizada em etapas, a depender do tipo de reforço. Para as vigas reforçadas com PFRC, as ranhuras foram executadas com a utilização de uma serra mármore, da marca Makita, cuja espessura da lâmina era suficiente para abrir a ranhura na largura correta. Contudo, as regiões de posicionamento dos extensômetros do laminado exigiam aberturas maiores e, para isso, foi necessário entalhar um detalhe na ranhura nos três pontos de instrumentação. Após a utilização da serra, foi utilizado um compressor de ar para retirar o excesso de resíduos de dentro da ranhura. A Figura 3.23 mostra o processo de abertura de ranhuras para as vigas reforçadas com PRFC.



(a) Abertura da ranhura com serra



(b) Limpeza das ranhuras



(b) Detalhe da abertura das ranhuras para os extensômetros

Figura 3.23: Ranhuras nas vigas reforçadas com lâminas de PRFC

Já para as ranhuras das vigas reforçadas com barras de aço foi necessário um processo mais trabalhoso e detalhado. Nesse caso, foram realizados dois cortes com a serra mármore, um em cada face da ranhura e, com o auxílio de uma marreta e talhadeira, foi necessário remover a parte interna entre os dois cortes. Para garantir que as ranhuras teriam a profundidade desejada, foi utilizado um martetele com uma broca de 8mm para detalhar as ranhuras. A Figura 3.24 mostra esse procedimento.



(a) Abertura da ranhura com talhadeira



(b) Detalhamento com martetele

Figura 3.24: Ranhuras nas vigas reforçadas com barras de aço

### 3.5.2. Posicionamento das vigas

Para garantir que a execução do reforço ocorresse em condições reais, as vigas foram giradas novamente após a finalização da abertura das ranhuras. Dessa forma, o processo de execução foi realizado contra o efeito da gravidade, como ocorreria em uma situação real de reforço.

As vigas foram giradas e posicionadas em blocos de concreto, de forma que ficassem a uma altura adequada do chão, permitindo trabalhar embaixo delas para a execução do reforço. A Figura 3.27 mostra as vigas já posicionadas.

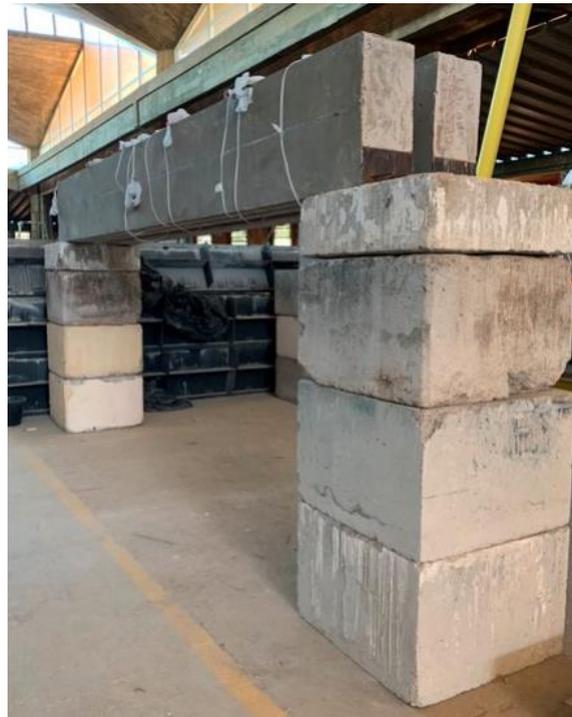


Figura 3.25: Vigas posicionadas para a execução do reforço.

### 3.5.3. Fixação do reforço de barras de aço com grampos

As vigas reforçadas com barras de aço exigem uma fixação do elemento de reforço, visto que a argamassa de reparo estrutural não possui resistência suficiente para fixar a barra, dado o seu peso. Assim, foi necessário aplicar ganchos metálicos para garantir a fixação da barra embutida. Esses ganchos possuem diâmetro de 5 mm e os seus pontos de aplicação e detalhes da fixação são apresentados na Figura 3.26.

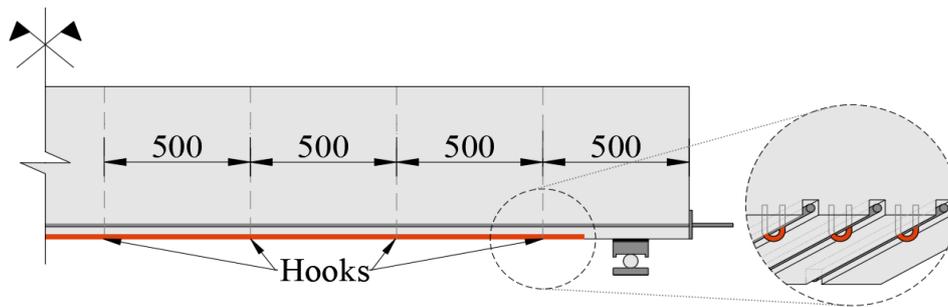


Figura 3.26: Posicionamento dos ganchos para fixação das barras de aço

Assim, após a abertura das ranhuras, foram demarcados os pontos de aplicação dos ganchos em cada viga, com o intuito de realizar dois furos com o auxílio de uma furadeira com broca de 6mm. A Figura 3.27 mostra a execução desses furos.



Figura 3.27: Execução dos furos para posicionamento dos ganchos de fixação do reforço

#### 3.5.4. Corte do laminado de PRFC

Conforme as especificações do dimensionamento, os laminados de PRFC utilizados nesse programa experimental possuíam largura de 10 mm. Contudo, esse material é comercializado apenas na largura padrão de 50 mm e de 100 mm, o que tornou necessário cortá-lo na largura desejada. Assim, como foi adquirido o laminado de 1,2 mm de espessura e 50 mm de largura, foram feitas 5 tiras de 10 mm cada.

O processo de corte foi realizado com o auxílio de um estilete. Primeiramente, o laminado foi marcado e cortado no comprimento desejado, de 3680 mm, para facilitar o seu manuseio e posicionamento sobre a bancada. Em seguida, foram demarcadas as linhas dos cortes de 10 mm

de espessura, com um auxílio de um gabarito e régua. A Figura 3.28 mostra o processo de marcação e corte.



(a) Marcação das dimensões do PRFC



(b) Corte dos laminados

Figura 3.28: Preparo do laminado de PRFC

### 3.5.5. Execução do reforço

#### 3.5.5.1. Vigas reforçadas com PRFC

Antes de iniciar a execução do reforço é preciso garantir que o substrato esteja nas condições adequadas. Dessa forma, foi necessário limpar as ranhuras com o auxílio de um compressor de ar, para retirar os resquícios de poeira e partículas soltas da superfície. Também foi realizada a limpeza dos laminados de PRFC, para garantir que não haviam resíduos na sua superfície.

Com o substrato devidamente limpo, foi realizada a preparação da resina, para iniciar a colagem. O preparo seguiu as recomendações do fabricante, que comercializa a resina em dois recipientes separados e pré-dosados, sendo um composto por uma base e outro por um endurecedor. Primeiramente, cada recipiente foi homogeneizado separadamente, com o auxílio de uma espátula e, em seguida, os componentes foram misturados no mesmo recipiente e, com o auxílio de um misturador mecânico de baixa rotação, foram homogeneizados até obter uma pasta.

Com a resina devidamente preparada iniciou-se o preenchimento das ranhuras, com o auxílio de espátulas. As resinas foram completamente recobertas antes da inserção do laminado, para

garantir o seu preenchimento adequado. Com a inserção do laminado é necessário realizar o acabamento do elemento, visto que nesse processo parte da resina é expulsa da ranhura e precisa ser retirada, garantindo que o laminado esteja completamente inserido na ranhura e que esta esteja adequadamente preenchida.

Os procedimentos de execução do reforço das vigas com laminados de PRFC são ilustrados na Figura 3.29.



(a) Limpeza do laminado



(b) Limpeza do substrato



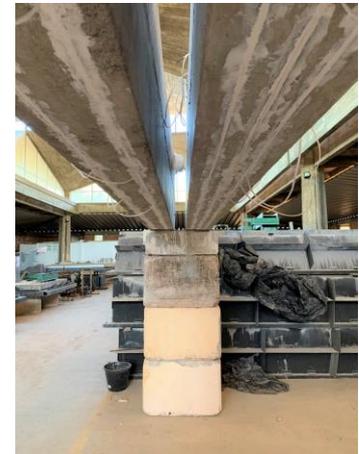
(c) Homogeneização dos componentes da resina



(d) Mistura dos dois componentes da resina



(e) Preenchimento da ranhura com a resina



(f) Inserção da fibra, acabamento e aspecto final do reforço

Figura 3.29: Procedimento da execução do reforço das vigas com PRFC

### **3.5.5.2. Vigas reforçadas com barras de aço**

Na execução do reforço das vigas com barras de aço também foi realizada a limpeza das ranhuras com o auxílio de um compressor de ar, visto que, assim como nas vigas reforçadas com laminados de PRFC, o substrato precisa estar limpo e sem resíduos.

Contudo, para utilizar a argamassa de reparo estrutural são exigidas algumas outras condições do substrato. De acordo com as recomendações do fabricante, o substrato deve estar úmido, na condição saturado-seco e, para garantir esse estado, as ranhuras foram molhadas com o auxílio de uma mangueira até atingir o ponto indicado.

Com o substrato devidamente tratado, foi realizado o preparo da argamassa Nafuffil CR. Visto que este material é comercializado como um monocomponente, basta adicionar água nas proporções indicadas e realizar a mistura. Assim, foram seguidas as recomendações do fabricante, que indicava a utilização de 8 kg do monocomponente da argamassa para cada 1,1 litros de água. Foi utilizada uma balança para verificar as quantidades adequadas dos componentes e, com isso, realizou-se a mistura com o auxílio de um misturador mecânico de baixa rotação, durante 3 a 5 minutos, até o material atingir uma consistência homogênea.

Nesse caso a execução foi mais complexa que a das vigas reforçadas com laminados de PRFC. Primeiramente, com o auxílio de uma espátula, era preenchida metade da ranhura com a argamassa. Em seguida, a barra era posicionada e inserida na ranhura e, enquanto três pessoas a seguravam na posição adequada, outra pessoa realizava a instalação dos ganchos metálicos nos pontos já demarcados, com o auxílio de uma marreta. Com as barras de aço devidamente fixadas pelos ganchos, era realizado o preenchimento do restante da ranhura e feito o acabamento final.

Os procedimentos de execução do reforço das vigas com barras de aço são ilustrados na Figura 3.30.



(a) Limpeza do substrato



(b) Umidificação do substrato até a condição saturado-seco



(c) Mistura da argamassa polimérica



(d) Preenchimento da metade da ranhura com a argamassa polimérica.



(e) Posicionamento dos ganchos nos furos executados previamente.



(f) Preenchimento da ranhura e acabamento final.

Figura 3.30: Procedimento da execução do reforço das vigas com barra de aço.

Ainda, cabe destacar que a argamassa de reparo estrutural exigia cura úmida e, dessa forma, as ranhuras foram irrigadas 3 vezes ao dia, durante 7 dias.

### 3.6. SISTEMA DE ENSAIO

Todas as vigas desse programa experimental possuem seção transversal retangular, com largura de 250 mm, altura total de 550 mm, comprimento total de 4400 mm e vão livre de 4000 mm, como mostrou a Figura 3.3.

O método de ensaio selecionado baseia-se na aplicação de duas cargas concentradas simétricas, aplicadas a 1500 mm dos apoios, com auxílio de uma viga metálica de distribuição. A Figura 3.31 apresenta o esquema estático de carregamento dos ensaios propostos.

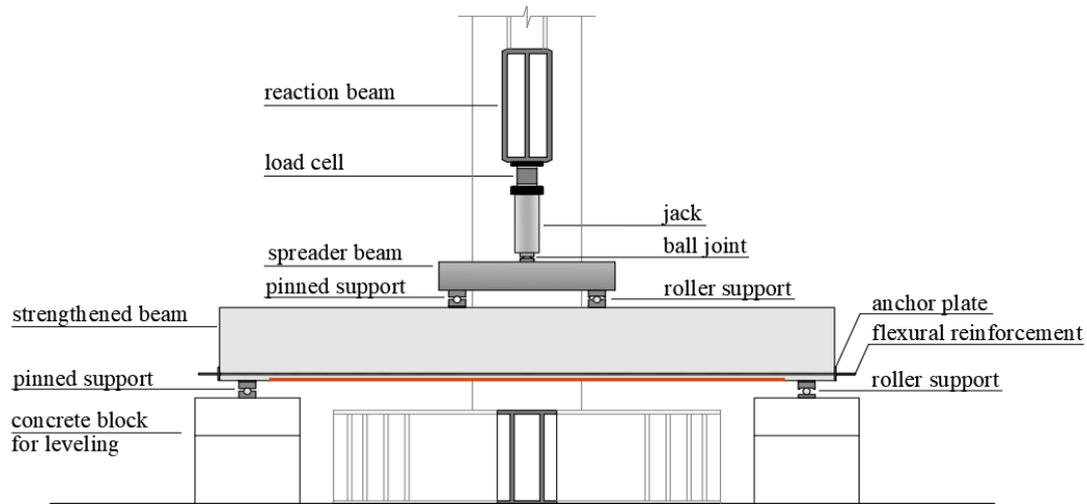


Figura 3.31: Representação do esquema estático de carregamento das vigas

A Figura 3.32 apresenta os diagramas de momento fletor e de esforço cortante, utilizados no dimensionamento das vigas.

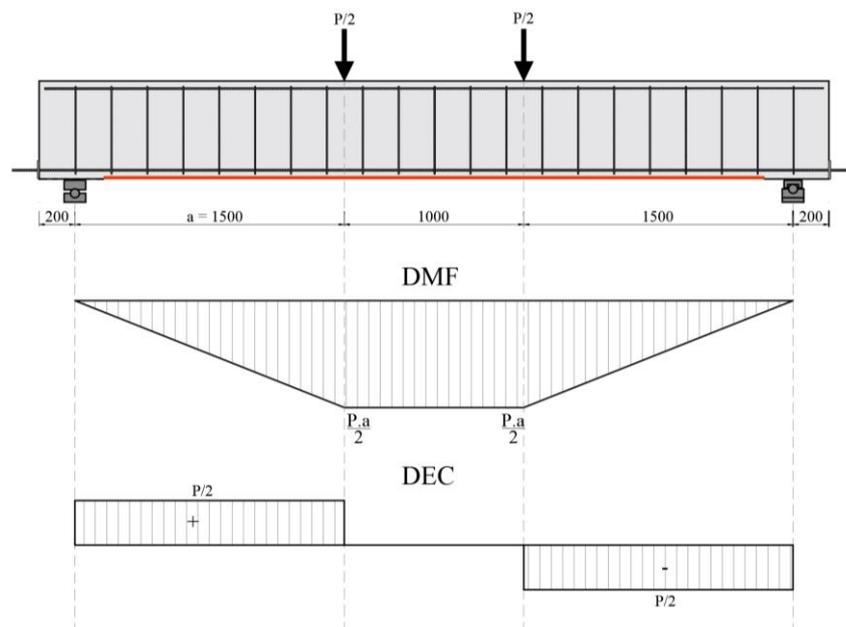


Figura 3.32: Representação do diagramas de momento fletor e esforço cortante das vigas.

Durante os ensaios a carga foi aplicada por um cilindro hidráulico da marca *Enerpac*, com capacidade de 500 kN. O cilindro era apoiado em uma viga metálica de distribuição, que distribuiu a carga em dois pontos de aplicação na viga ensaiada.

Para o monitoramento da carga durante o ensaio foi utilizada uma célula de carga da marca HBM, com capacidade de 500 kN. Já para as leituras de todos os extensômetros, LVDTs e da célula de carga foi utilizado o *Spider 8*, um sistema de aquisição de dados da marca HBM.

Ainda, o processamento e armazenamento dos dados foram feitos de forma automática, numa frequência de uma leitura por segundo, pelo programa *Catman*, que converte as leituras de acordo com uma calibração feita previamente e armazenada no programa.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS

#### 4.1.1. Aço

Conforme descrito anteriormente, foram coletados três corpos de prova para cada diâmetro de barra de aço utilizada no programa experimental e, para a determinação das suas propriedades mecânicas, estas amostras foram submetidas ao ensaio de tração uniaxial.

Cabe ressaltar que após a realização dos ensaios das barras de 10 mm e 12,5 mm foi verificado um problema no extensômetro utilizado para a leitura das deformações e, dessa forma, só temos resultados para um corpo de prova de cada uma dessas bitolas. Os resultados obtidos no ensaio são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Propriedades mecânicas do aço utilizado nas vigas

Amostra	$\phi$	$f_{ys}$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	$E_s$ (GPa)	$\epsilon_s$ (%)
CP1	8	542,2	687,3	187,0	2,9
CP2		543,8	685,7	187,5	2,9
CP3		536,1	680,2	191,5	2,8
<b>Média</b>		<b>540,7</b>	<b>684,4</b>	<b>188,7</b>	<b>2,9</b>
CP3	10	544,1	789,3	194,3	2,8
<b>Média</b>		<b>544,1</b>	<b>789,3</b>	<b>194,3</b>	<b>2,8</b>
CP3	12,5	548,2	687,3	195,8	2,8
<b>Média</b>		<b>548,2</b>	<b>687,3</b>	<b>195,8</b>	<b>2,8</b>
CP1	16	561,7	726,0	194,1	2,9
CP2		559,4	721,9	206,6	2,7
CP3		564,3	725,6	201,5	2,8
<b>Média</b>		<b>561,8</b>	<b>724,5</b>	<b>200,7</b>	<b>2,8</b>
CP1	20	562,9	730,5	201,0	2,8
CP2		565,2	734,9	201,9	2,8
CP3		561,3	733,7	200,5	2,8
<b>Média</b>		<b>563,1</b>	<b>733,0</b>	<b>201,1</b>	<b>2,8</b>
<b>Obs:</b> $f_{ys}$ – Tensão de escoamento $f_u$ – Tensão máxima $E_s$ – Módulo de elasticidade longitudinal do aço $\epsilon_s$ – Deformação de escoamento					

#### 4.1.2. Concreto

Ao todo foram moldados quarenta e cinco corpos de prova de concreto, divididos em cinco grupos de nove CPs cada. Para caracterizar o concreto de cada grupo foram ensaiados três CPs à compressão, três CPs à tração e três CPs para obtenção do módulo de elasticidade. Contudo,

como o ensaio de módulo de elasticidade não provoca a ruptura dos CPs, esses espécimes também foram ensaiados à compressão. A Tabela 4.2 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 4.2: Propriedades mecânicas do concreto

Corpo de prova	Grupo	$E_{c,med}$ (GPa)	$f_c$ (MPa)	$f_{ct}$ (MPa)
CP1	1	-	44,94	-
CP2		-	39,96	-
CP3		-	36,65	-
CP4		26,19	37,44	-
CP5		29,33	39,06	-
CP6		24,84	40,55	-
CP7		-	-	2,89
CP8		-	-	2,92
CP9		-	-	3,88
CP10	2	-	38,86	-
CP11		-	40,45	-
CP12		-	40,08	-
CP13		30,62	36,69	-
CP14		30,03	40,75	-
CP15		31,97	38,58	-
CP16		-	-	3,36
CP17		-	-	4,40
CP18		-	-	4,08
CP19	3	-	38,3	-
CP20		-	37,56	-
CP21		-	42,74	-
CP22		31,56	36,54	-
CP23		34,64	36,94	-
CP24		28,87	42,02	-
CP25		-	-	3,47
CP26		-	-	4,06
CP27		-	-	3,62
CP28	4	-	41,93	-
CP29		-	39,25	-
CP30		-	41,6	-
CP31		34,86	44,95	-
CP32		38,64	43,06	-
CP33		34,12	34,47	-
CP34		-	-	4,08
CP35		-	-	4,40
CP36		-	-	3,58

Tabela 4.2: Propriedades mecânicas do concreto (continuação)

Corpo de prova	Grupo	$E_{c,med}$ (GPa)	$f_c$ (MPa)	$f_{ct}$ (MPa)
CP37	5	-	33,23	-
CP38		-	36,95	-
CP39		-	44,35	-
CP40		35,28	42,36	-
CP41		36,80	41,16	-
CP42		27,07	40,63	-
CP43		-	-	3,59
CP44		-	-	4,04
CP45		-	-	2,96
<b>Média</b>		-	<b>31,64</b>	<b>39,78</b>
<b>Obs.:</b> $E_{c,med}$ – Módulo de elasticidade médio $f_{ctm}$ – Resistência à tração média $f_{cm}$ – Resistência à compressão média				

### 4.1.3. Argamassa

Ao todo foram moldados nove corpos de prova de argamassa, dos quais três CPs foram ensaiados à compressão, três CPs ensaiados à tração e três CPs ensaiados para obtenção do módulo de elasticidade. Contudo, como o ensaio de módulo de elasticidade não provoca a ruptura dos CPs, esses espécimes também foram ensaiados à compressão. A Tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 4.3: Propriedades mecânicas da argamassa de reparo estrutural

Corpo de prova	Grupo	$E_{c,med}$ (GPa)	$f_c$ (MPa)	$f_{ct}$ (MPa)
CP1	1	-	44,92	-
CP2		-	66,07	-
CP3		-	34,80	-
CP4		55,55	52,84	-
CP5		60,93	60,91	-
CP6		66,70	*	-
CP7		-	-	5,60
CP8		-	-	3,23
CP9		-	-	3,51
<b>Média</b>	-	<b>60,93</b>	<b>52,89</b>	<b>3,51</b>
<b>Obs.:</b> $E_{c,med}$ – Módulo de elasticidade médio $f_{ctm}$ – Resistência à tração média $f_{cm}$ – Resistência à compressão média * Problemas no equipamento impediram a conclusão do ensaio de compressão para esta amostra				

## 4.2. CARGAS ÚLTIMAS E MODO DE RUPTURA DAS VIGAS

Os resultados de capacidade de carga e modo de ruptura obtidos com os ensaios das vigas são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Resultados experimentais das vigas ensaiadas

Viga	Reforço	$\rho_s$ (%)	$\rho_f$ (%)	$\varepsilon_{c,máx}$ (‰)	$\varepsilon_{s,máx}$ (‰)	$\varepsilon_{f,máx}$ (‰)	$M_u$ (kN)	$M_u/M_{ref}$	Modo de Ruptura	
VREF10	-	0,19	-	3,15	23,85	-	75	-	Flexão – deformação excessiva do aço e esmagamento do concreto	
VREF12,5	-	0,29	-	0,85	16,85	-	115	-		
VREF16	-	0,48	-	2,97	15,71	-	172	-		
VREF20	-	0,75	-	2,29	3,40	-	284	-		
VC10	3 laminados PRFC	0,19	0,03	1,53	24,07	16,72	114	1,51		
VC12,5	3 laminados PRFC	0,29	0,03	2,13	11,70	16,89	154	1,34		
VC16	3 laminados PRFC	0,48	0,03	2,30	14,89	16,34	201	1,17		
VC20	3 laminados PRFC	0,75	0,03	2,08	15,33	13,40	301	1,06		
VA10	3 barras de aço Ø8 mm	0,19	0,12	1,45	4,03	24,34	120	1,59		
VA12,5	3 barras de aço Ø8 mm	0,29	0,12	2,24	13,30	13,80	156	1,36		
VA16	3 barras de aço Ø8 mm	0,48	0,12	1,95	8,82	24,08	204	1,19		
VA20	3 barras de aço Ø8 mm	0,75	0,12	2,78	5,49	20,87	307	1,08		
<b>Obs:</b> - Dimensões de todas as vigas: altura ( $h$ ) = 55 cm e largura ( $b_w$ ) = 25 cm $P_u$ : carga última $P_u/P_{ref}$ : razão entre a carga última da viga e a carga última da viga de referência										

Observa-se que todas as vigas reforçadas apresentaram um acréscimo de carga significativo quando comparadas às suas respectivas vigas de referência, com valores de 6% a 51% para as vigas reforçadas com laminados de PRFC e de 8% a 59% para as barras de aço.

Ainda, as vigas reforçadas pelos dois métodos apresentaram acréscimos de carga muito próximos entre si, para cada tipo de armadura de flexão utilizada. Esse comportamento era esperado, visto que as vigas reforçadas com laminados de PRFC e com barras de aço foram dimensionadas para possuírem uma quantidade de reforço equivalente, sendo possível comparar a efetividade dos dois métodos.

Ao comparar os dois métodos de reforço, observa-se que todas as vigas reforçadas com barras de aço apresentaram cargas últimas um pouco superiores àquelas das vigas equivalentes reforçadas com laminados de PRFC. Contudo, os valores ficaram bem próximos, com uma diferença máxima de 6% entre VA10 e VC10 e de cerca de 2% para as vigas VA12,5 e VC12,5, VA16 e VC16, VA20 e VC20.

Conforme observado, todas as vigas apresentaram ruptura por deformação excessiva das armaduras de flexão, seguida pelo esmagamento do concreto. Foram alcançadas a deformação última dos laminados de CFRP, nas vigas reforçadas com NSM laminados de PRFC, e a deformação de escoamento do aço, nas vigas reforçadas com NSM barras de aço.

Durante os ensaios também foi acompanhado o padrão de fissuração de todas as vigas e a Figura 4.1 a Figura 4.9 traz as imagens da vista frontal dos espécimes após os ensaios.



Figura 4.1: Vista frontal do trecho central da viga VREF10 após o ensaio



Figura 4.2: Vista frontal do trecho central da viga VREF16 após o ensaio

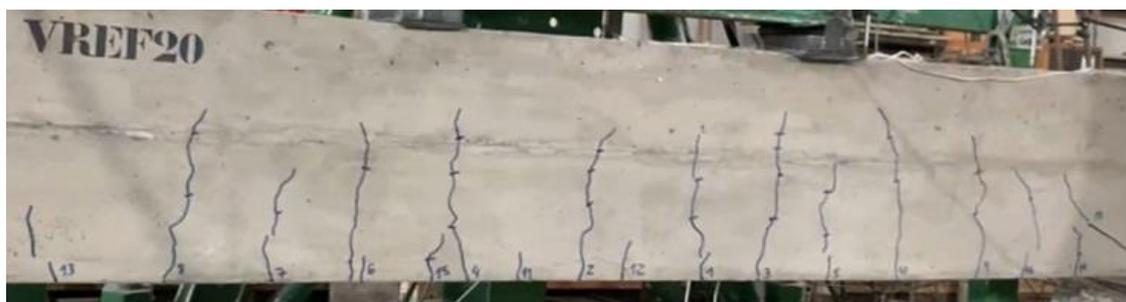


Figura 4.3: Vista frontal do trecho central da viga VREF20 após o ensaio



Figura 4.4: Vista frontal do trecho central da viga VC10 após o ensaio

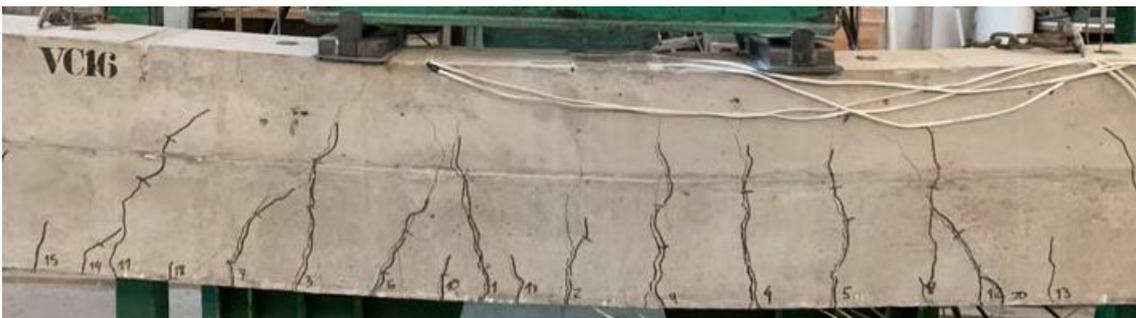


Figura 4.5: Vista frontal do trecho central da viga VC16 após o ensaio



Figura 4.6: Vista frontal do trecho central da viga VC20 após o ensaio

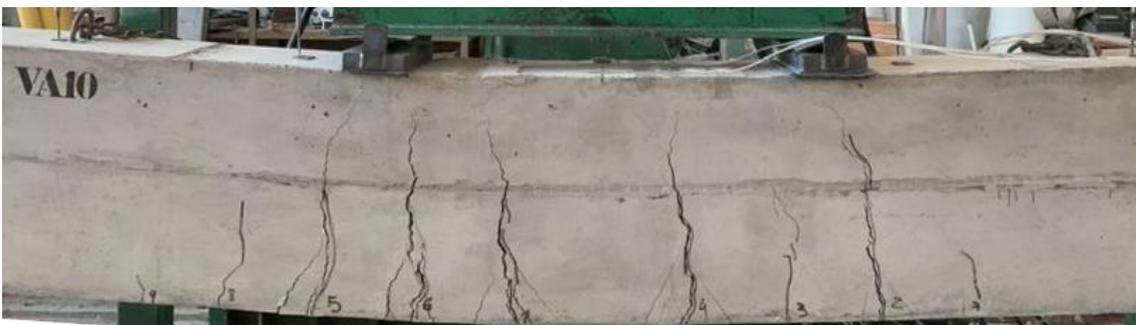


Figura 4.7: Vista frontal do trecho central da viga VA10 após o ensaio



Figura 4.8: Vista frontal do trecho central da viga VA16 após o ensaio



Figura 4.9: Vista frontal do trecho central da viga VA20 após o ensaio

O padrão de fissuração de todas as vigas ensaiadas foi muito similar. Ao acompanhar a fissuração durante o ensaio observou-se que primeiramente ficaram visíveis as fissuras verticais, entre os dois pontos de aplicação de carga e, com o aumento da carga aplicada, o comprimento e abertura dessas fissuras foi aumentando, além de ser possível observar o surgimento de fissuras inclinadas no vão de cisalhamento, na região entre o apoio da viga testada e o ponto de aplicação de carga. Conforme esperado, a maior parte das fissuras se concentraram próximas aos pontos de aplicação de carga, cabendo ressaltar que nas vigas armadas com barras de aço de diâmetro igual a 20 mm (VREF20, VC20 e VA20) os estribos escoaram e, dessa forma, as fissuras do vão de cisalhamento foram mais aparentes, mas ainda estavam distantes do apoio da viga e não comprometeram o seu comportamento.

### **4.3. DESLOCAMENTOS VERTICAIS DAS VIGAS**

Conforme descrito no item 3.4.1, o acompanhamento dos deslocamentos verticais foi realizado em seis pontos de medições nas vigas. A Figura 4.10 a Figura 4.21 mostram os valores das leituras obtidos nesses pontos, para cada viga.

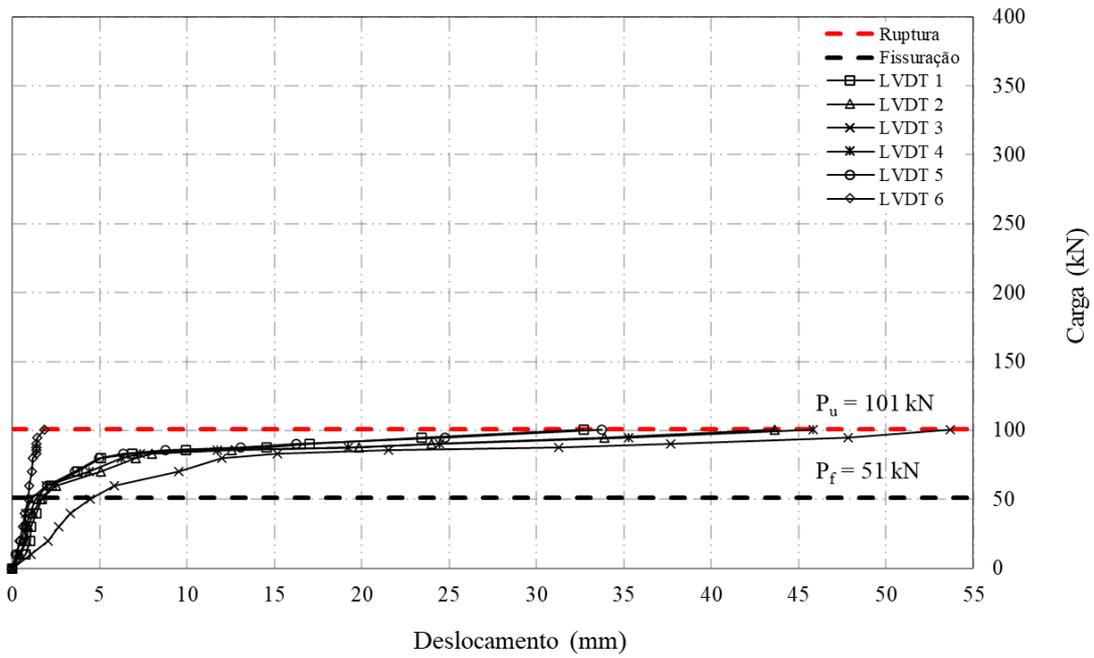


Figura 4.10: Deslocamentos verticais da viga VREF10

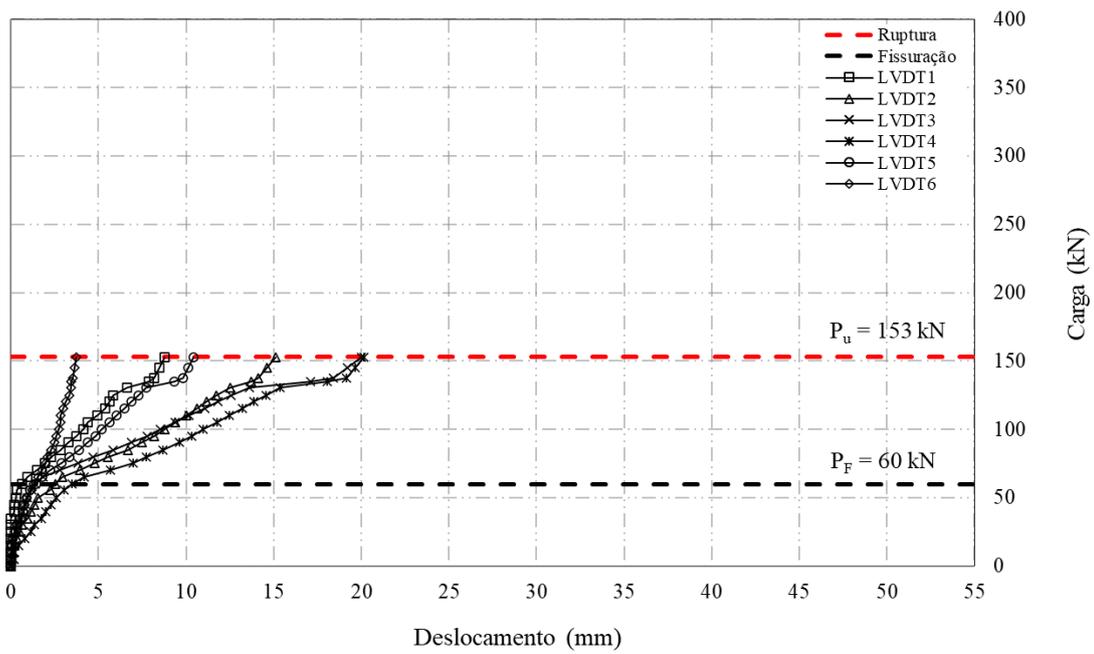


Figura 4.11: Deslocamentos verticais da viga VREF12,5

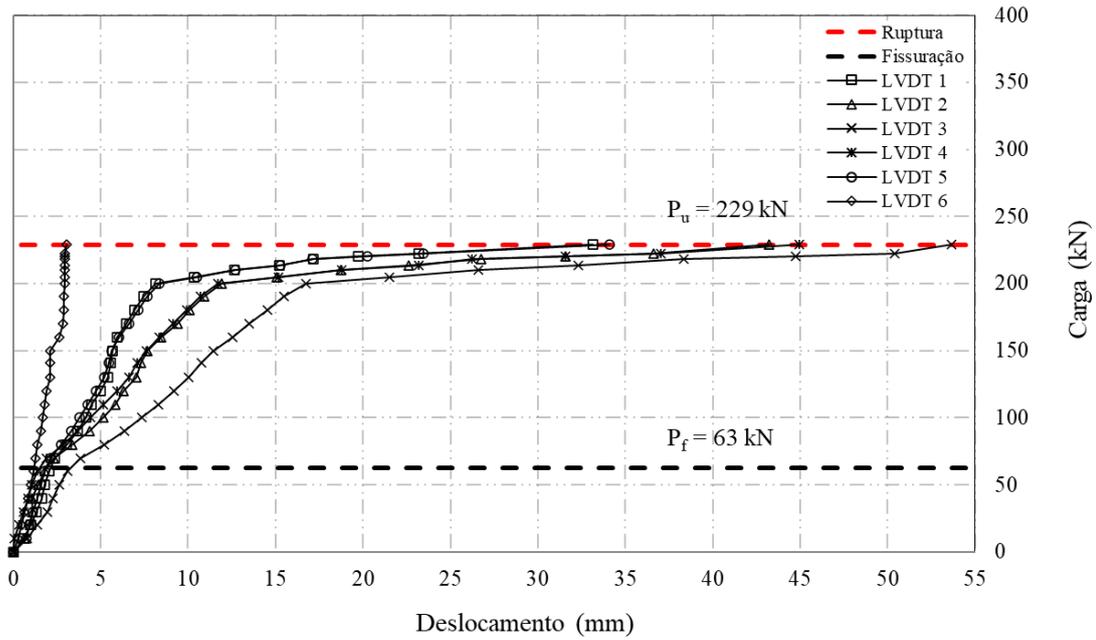


Figura 4.12: Deslocamentos verticais da viga VREF16

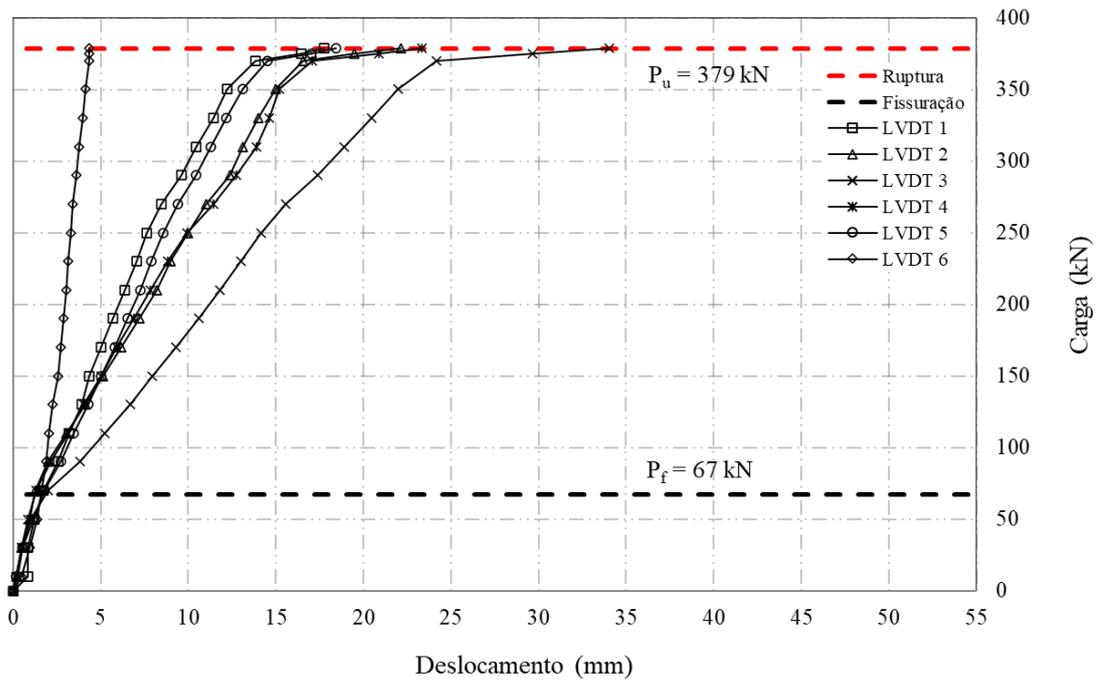


Figura 4.13: Deslocamentos verticais da viga VREF20

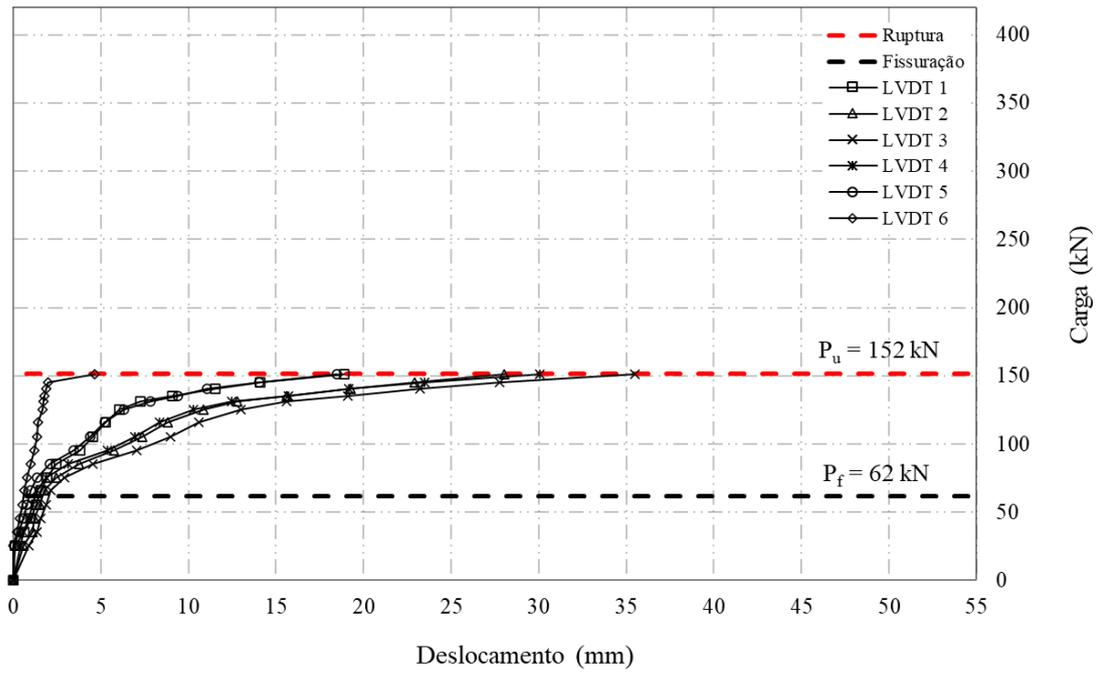


Figura 4.14: Deslocamentos verticais da viga VC10

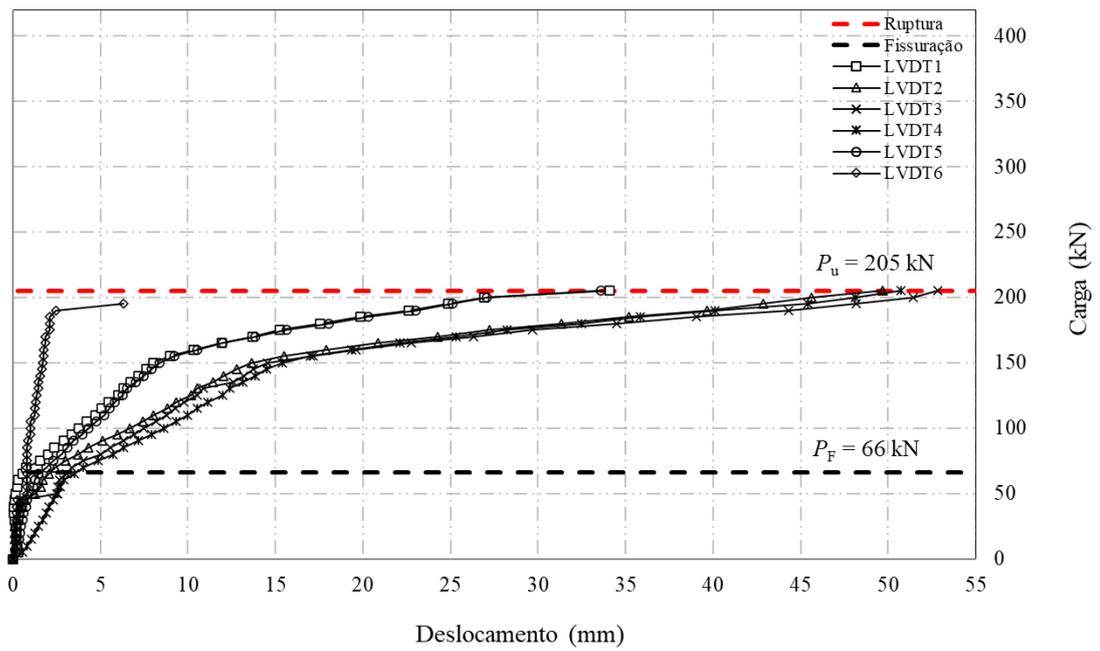


Figura 4.15: Deslocamentos verticais da viga VC12,5

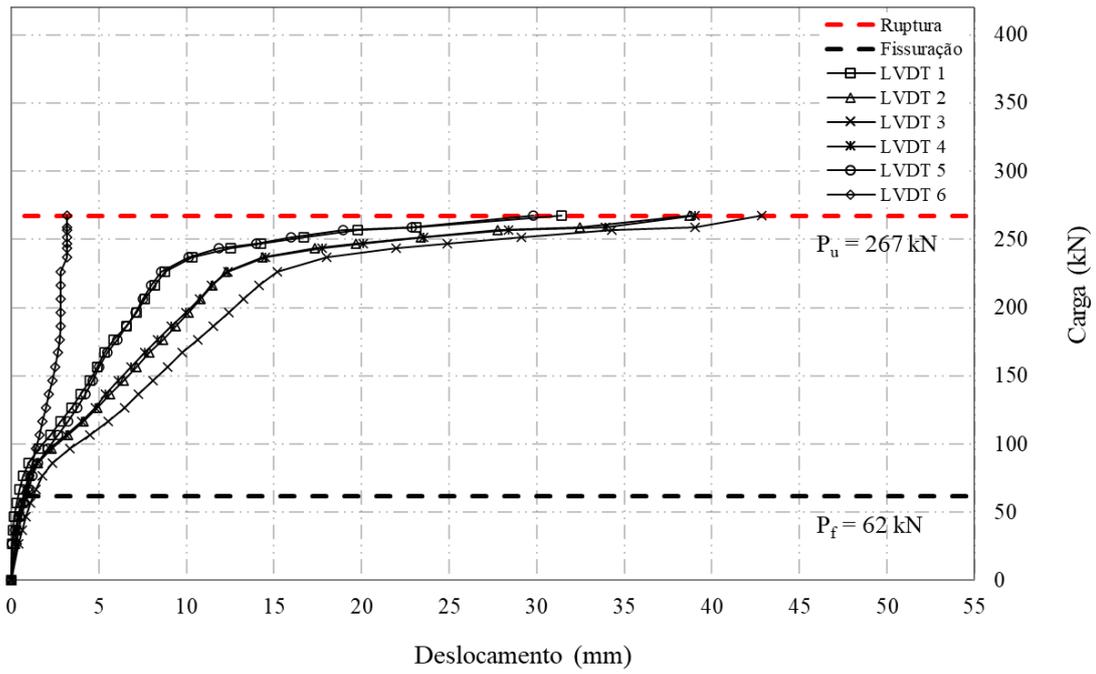


Figura 4.16: Deslocamentos verticais da viga VC16

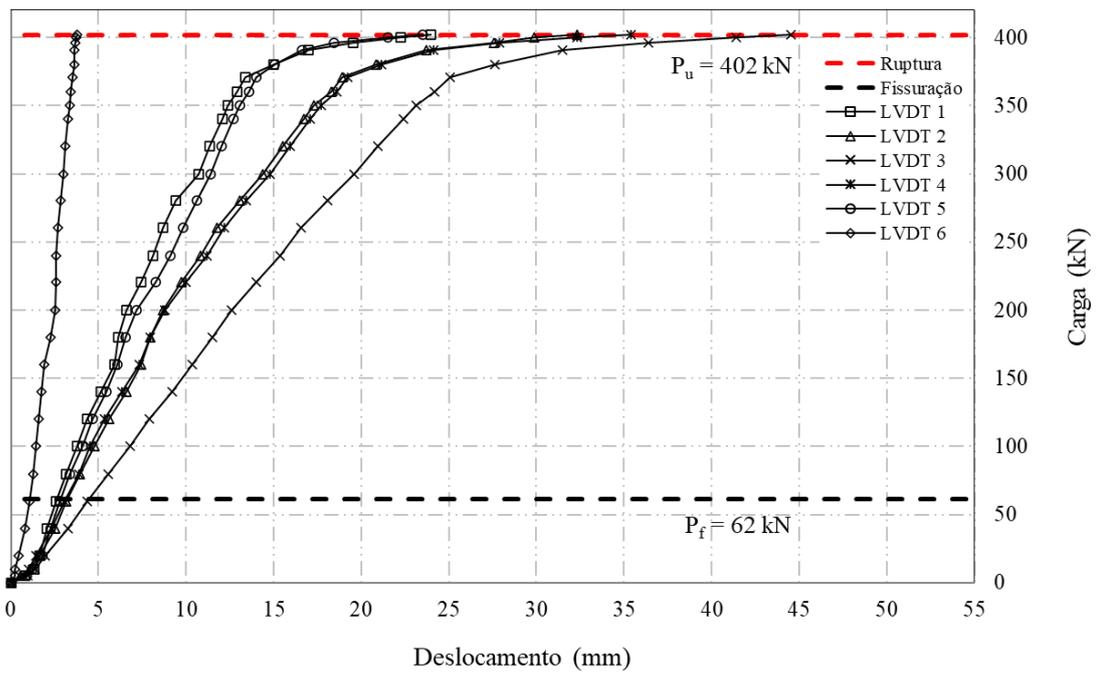


Figura 4.17: Deslocamentos verticais da viga VC20

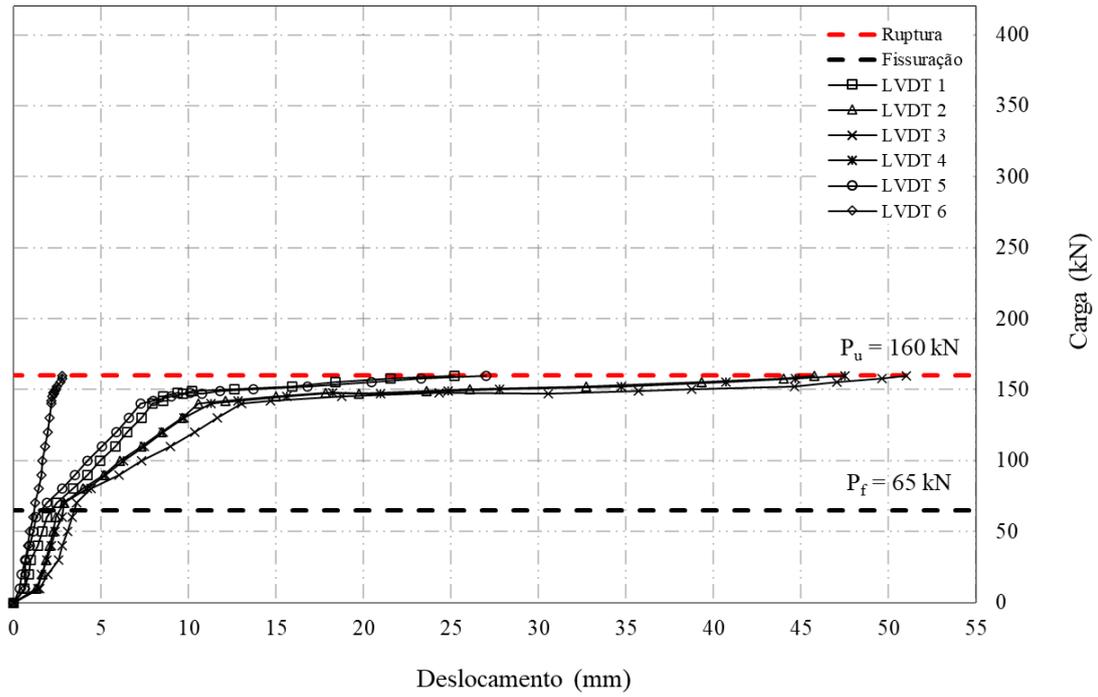


Figura 4.18: Deslocamentos verticais da viga VA10

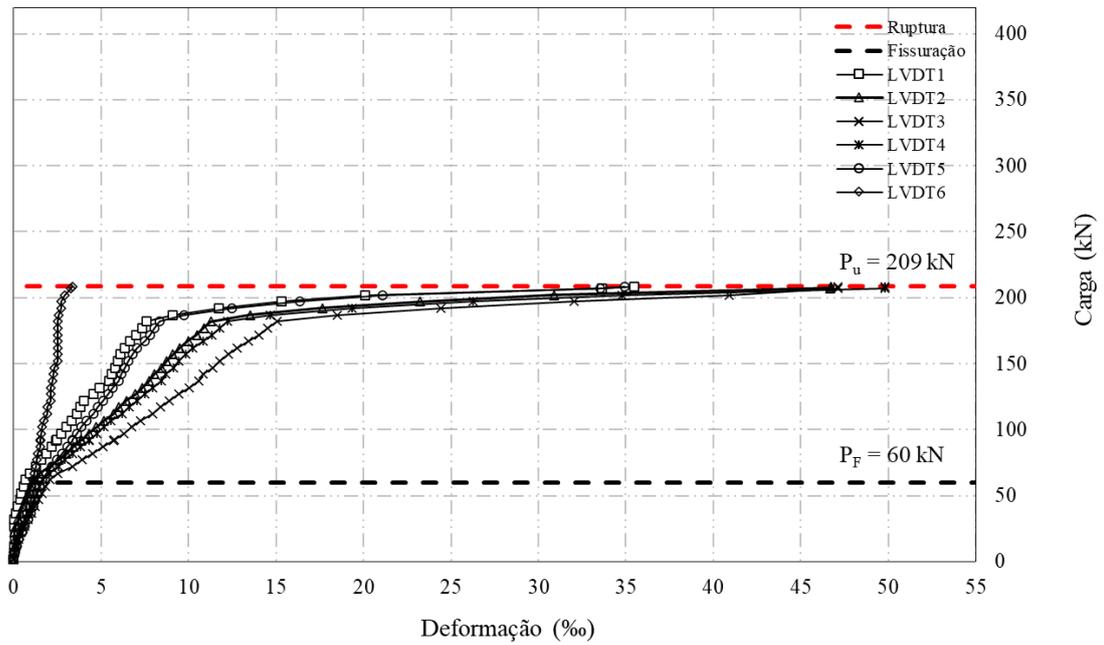


Figura 4.19: Deslocamentos verticais da viga VA12,5

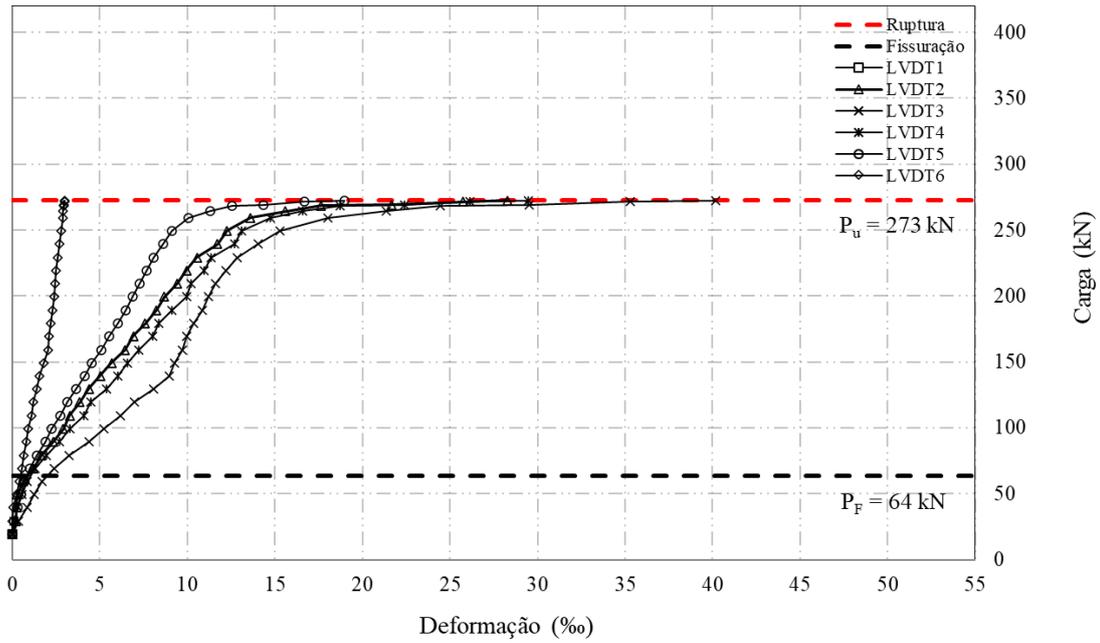


Figura 4.20: Deslocamentos verticais da viga VA16

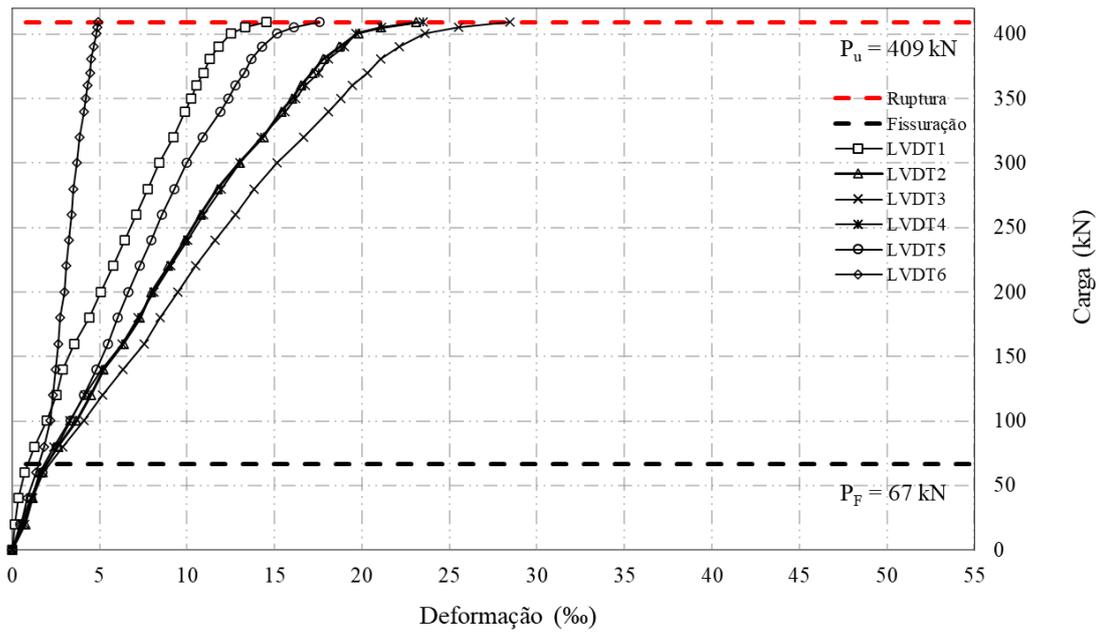


Figura 4.21: Deslocamentos verticais da viga VA20

Os gráficos permitem observar três fases de comportamento da curva carga-deslocamento: a primeira fase ocorre antes da fissuração do concreto, a segunda fase ocorre com o concreto já fissurado na região de flexão pura e antes do escoamento da armadura de flexão e a terceira

fase ocorre após o escoamento da armadura de flexão até a ruptura da viga. As fases 1 e 2 correspondem à situação de serviço.

De forma a comparar o impacto da taxa de armadura de flexão na curva carga-deformação das vigas, a Figura 4.22 a Figura 4.25 apresentam os gráficos para cada grupo de taxa ensaiado, considerando a deformação do LVDT4, localizado na seção central da viga.

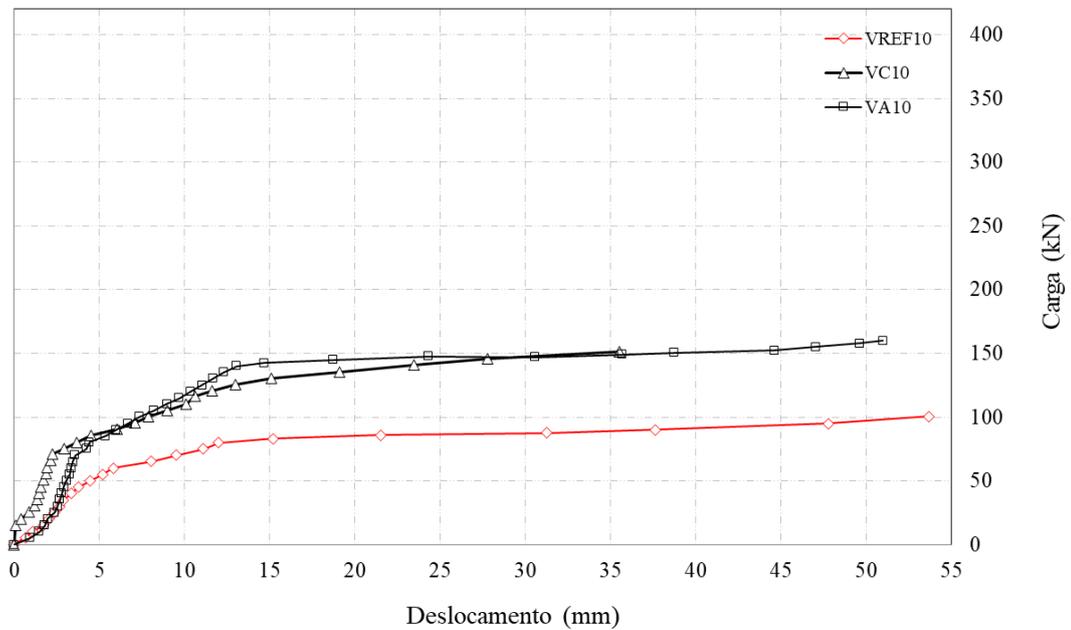


Figura 4.22: Deslocamento vertical central LVDT4 das vigas V10

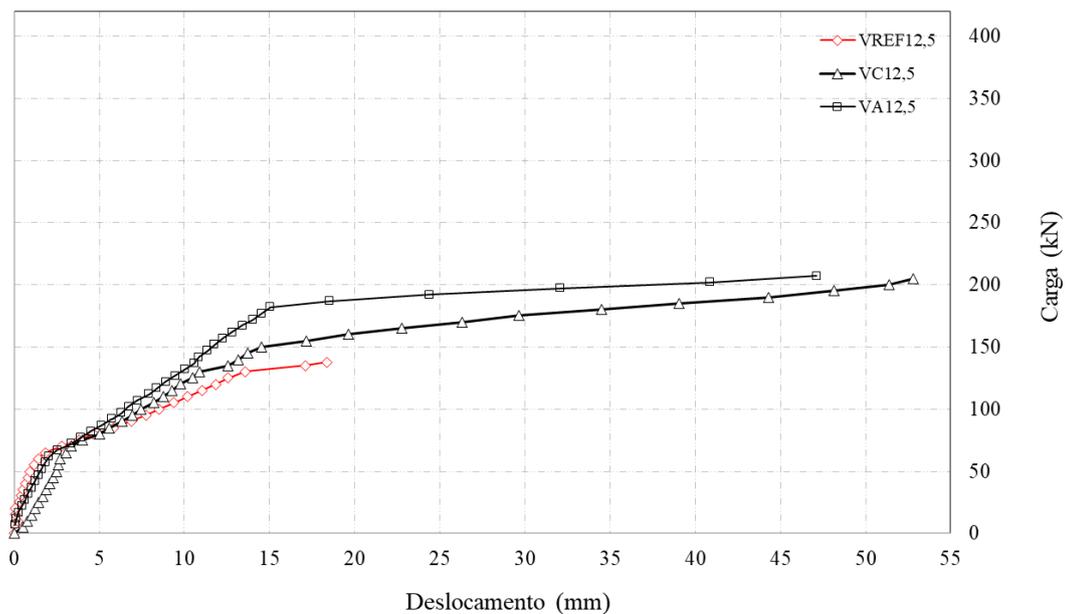


Figura 4.23: Deslocamento vertical central LVDT4 das vigas V12,5

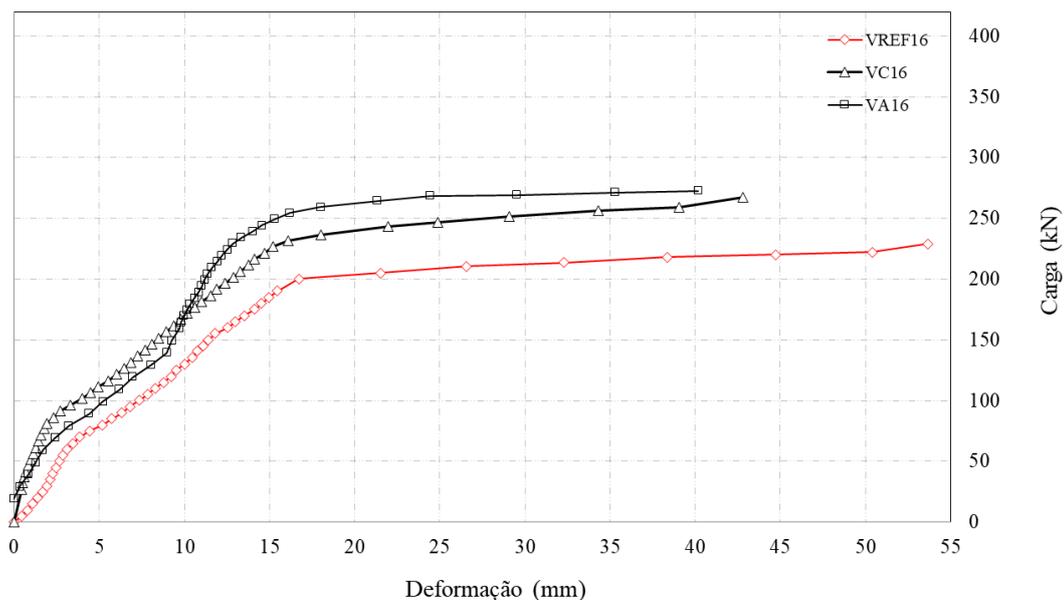


Figura 4.24: Deslocamento vertical central LVDT4 das vigas V16

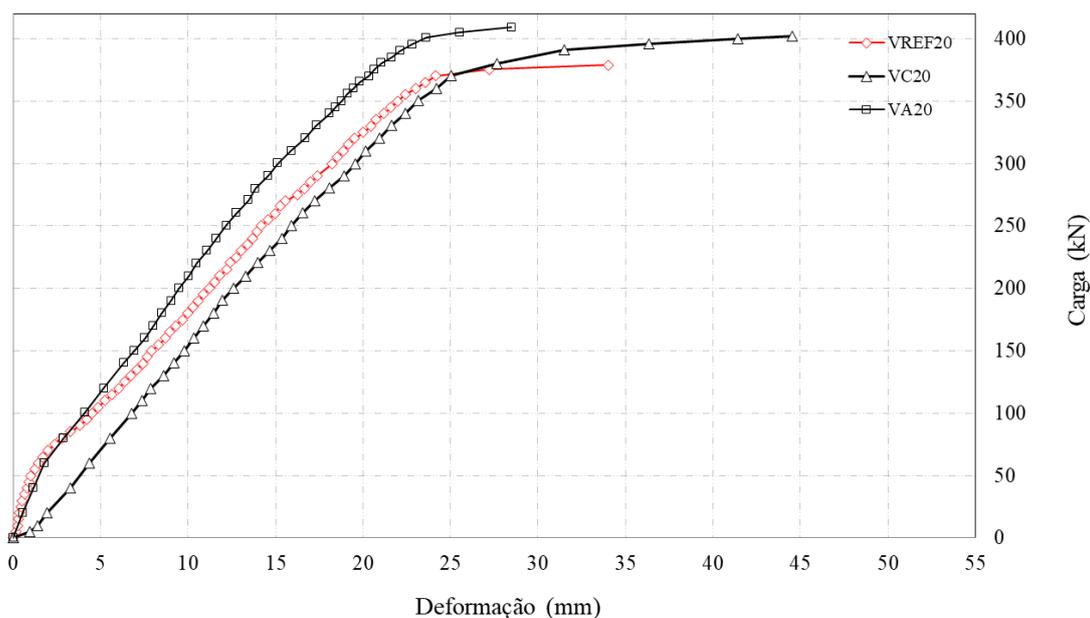


Figura 4.25: Deslocamento vertical central LVDT4 das vigas V20

Percebe-se que o padrão de fissuração foi similar para todas as vigas com as quatro taxas de armadura de flexão avaliadas. Inclusive, observa-se que o reforço com laminados de PRFC não interfere de forma significativa no comportamento das vigas nas fases 1 e 2, havendo um maior distanciamento das curvas das vigas VREF e VC apenas na fase 3. Assim, constata-se que a

contribuição desse reforço para a capacidade resistente da viga apenas torna-se notável a partir do escoamento das armaduras de flexão.

Já para as vigas reforçadas com barras de aço observa-se uma diferenciação do comportamento das vigas reforçadas com as vigas de referência a partir da fase 2, tornando-se mais rígido com o aumento da taxa de reforço. Nesse caso, verifica-se que a parcela resistente do reforço é mobilizada juntamente com a armadura de flexão a partir da fase 2, escoando juntas a partir da fase 3.

Ou seja, em relação a comparação dos tipos de reforço, é possível observar que o desempenho em serviço das vigas reforçadas com barras de aço é melhor que o das vigas reforçadas com laminados de PRFC, visto que existe uma diferença de rigidez e de mobilização da resistência do reforço.

Contudo, as capacidades últimas resistentes das vigas para os dois tipos de reforço foram similares, sendo observada uma relação carga-deslocamento menor na fase 2 para as vigas reforçadas com aço, o que é favorável para avaliações dos deslocamentos em situações de projeto, permitindo que este método de reforço seja utilizado para restaurar a capacidade resistente em vigas de concreto armado. Essa observação corrobora com os resultados observado nos experimentos de Almusallam *et al.* (2013), ressaltando a diferença de que estes autores utilizaram adesivo de resina epóxi.

#### **4.4. DEFORMAÇÕES NAS ARMADURAS DE FLEXÃO**

Conforme descrito no item 3.4.2, a barra central da armadura de flexão foi instrumentada em três pontos distintos, cada um deles contendo dois extensômetros diametralmente opostos. Os gráficos da Figura 4.26 a Figura 4.37 apresentam os resultados de deformação obtidos para os três pontos de instrumentação, sendo que cada linha mostra a média das leituras indicadas pelos dois extensômetros em cada um dos pontos ou, em casos onde as leituras diferem mais de 20%, foi tomado o maior valor.

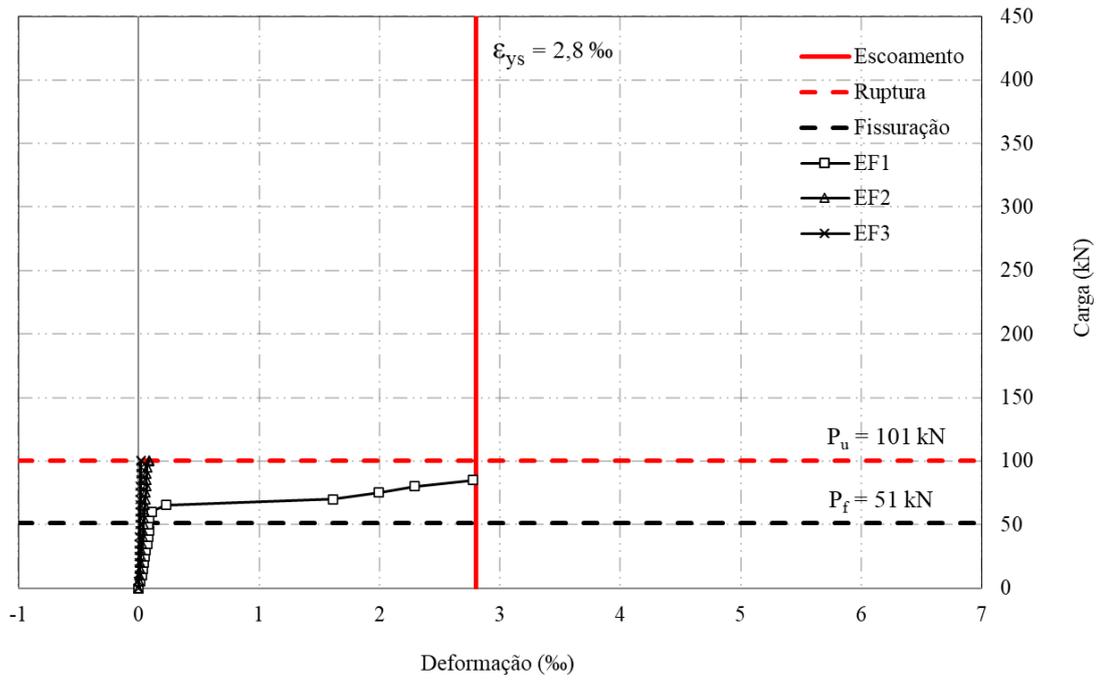


Figura 4.26: Deformações na armadura de flexão da viga VREF10

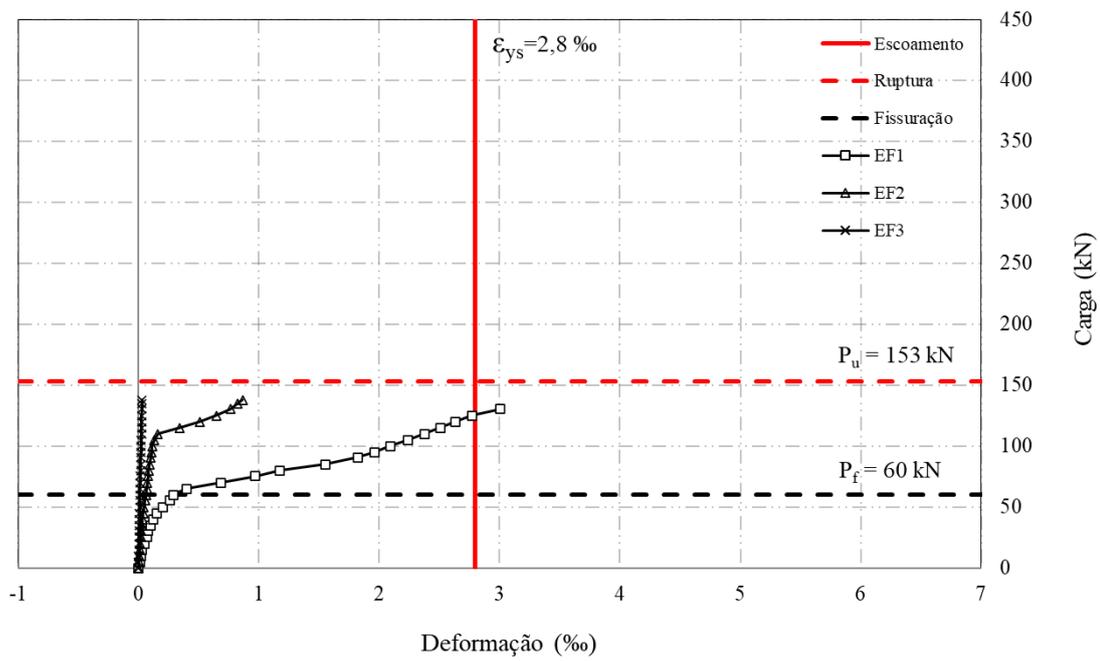


Figura 4.27: Deformações na armadura de flexão da viga VREF12,5

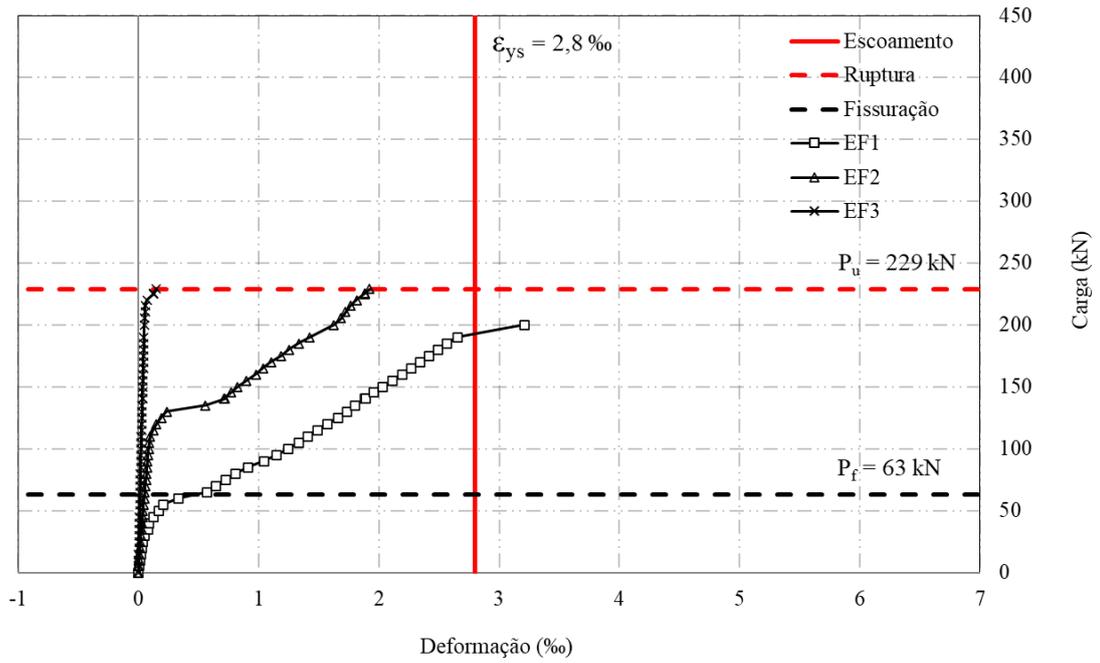


Figura 4.28: Deformações na armadura de flexão da viga VREF16

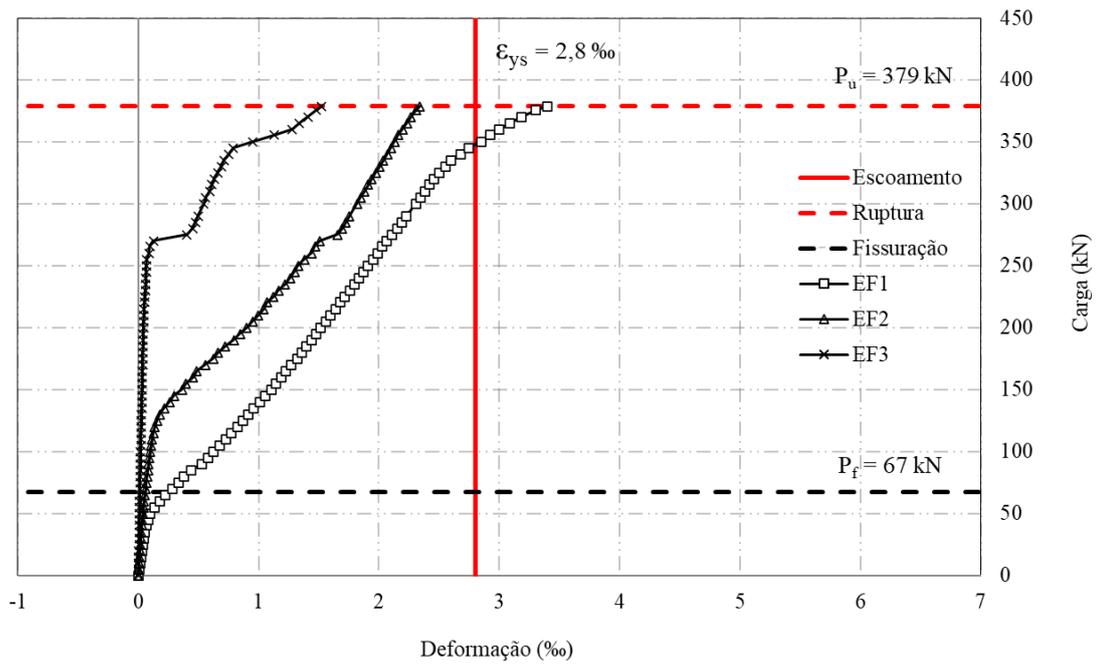
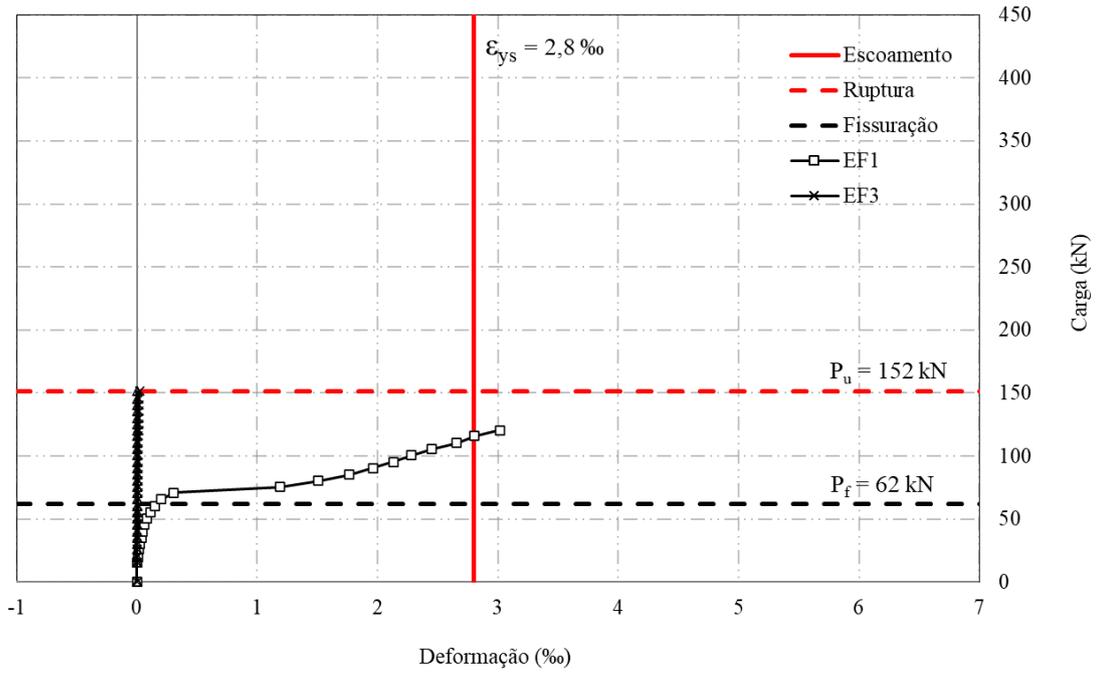


Figura 4.29: Deformações na armadura de flexão da viga VREF20



\* O extensômetro EF2 não funcionou

Figura 4.30: Deformações na armadura de flexão da viga VC10

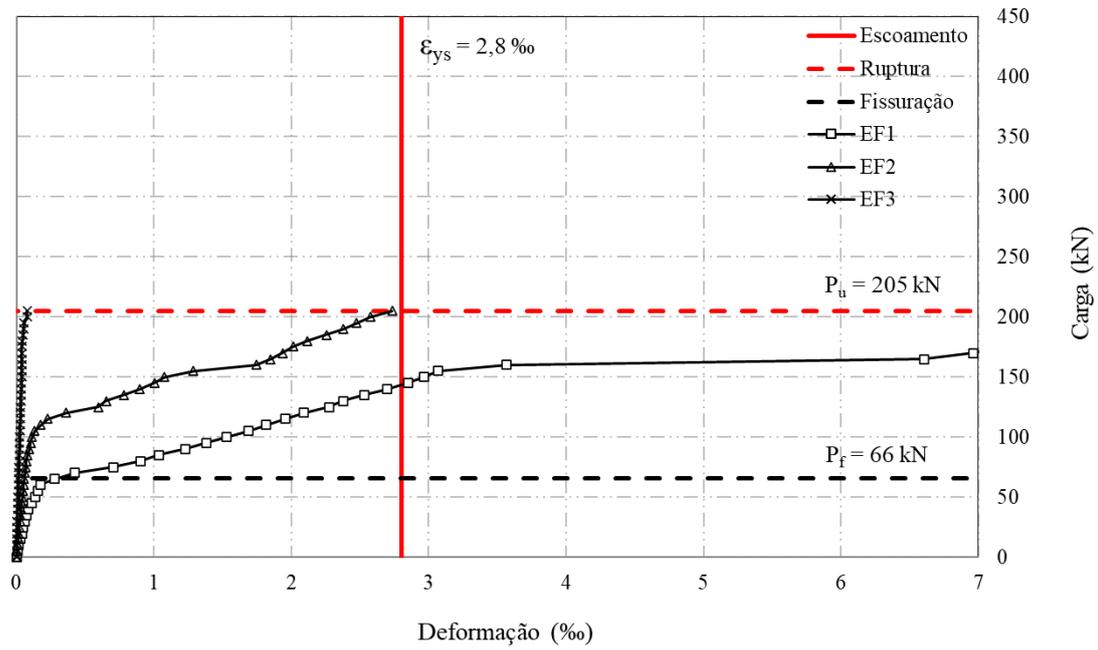


Figura 4.31: Deformações na armadura de flexão da viga VC12,5

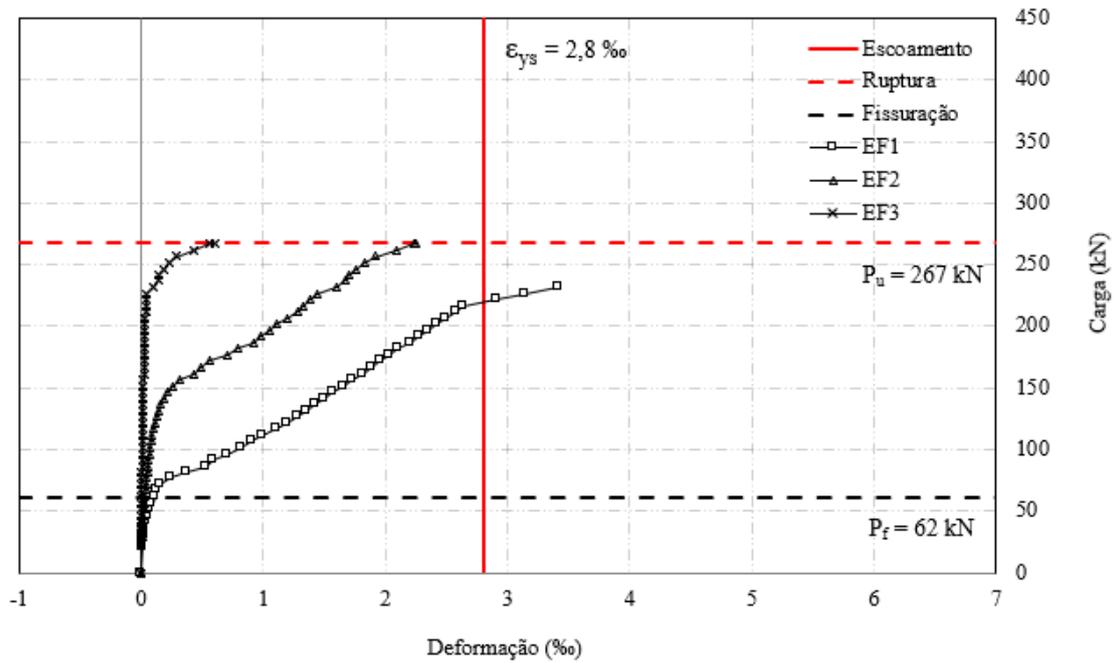


Figura 4.32: Deformações na armadura de flexão da viga VC16

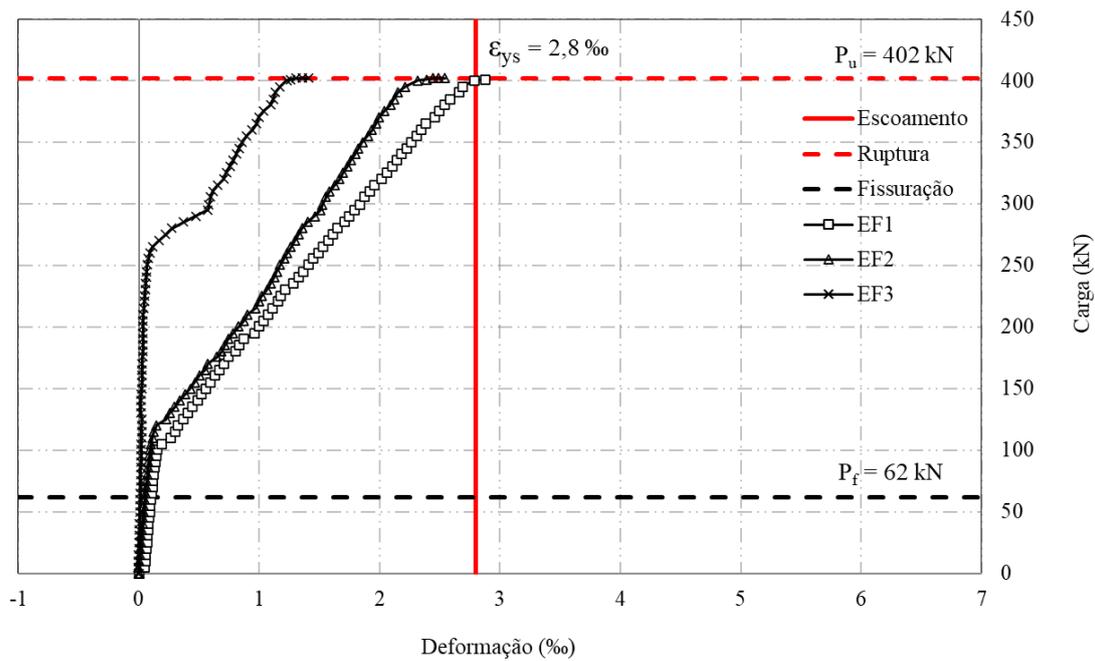
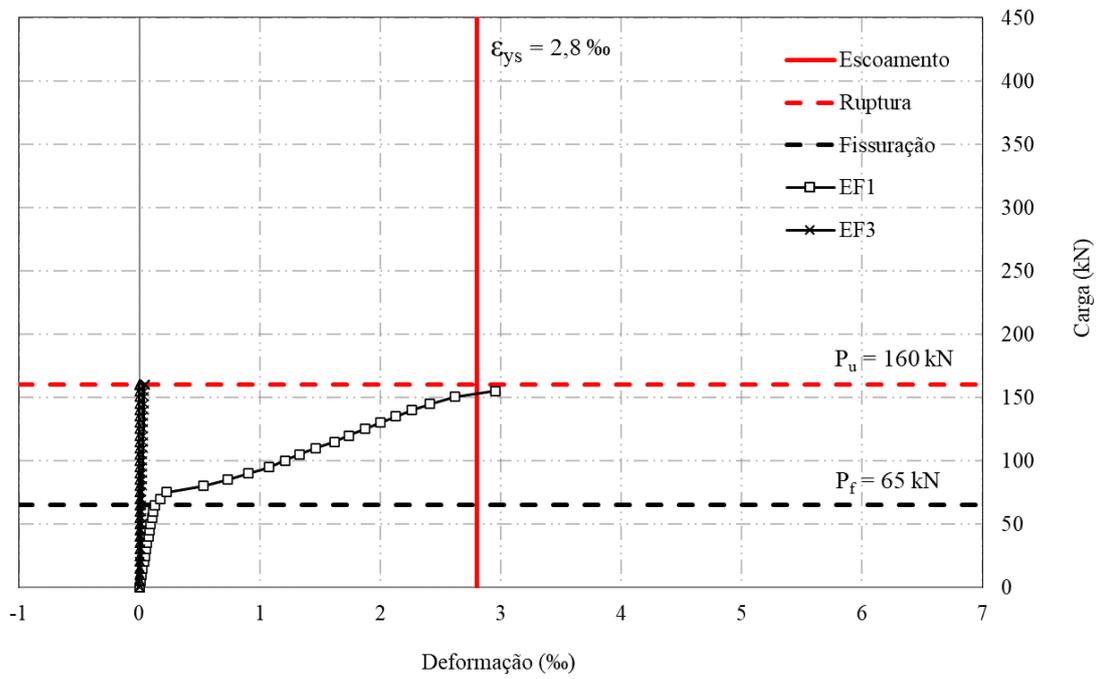


Figura 4.33: Deformações na armadura de flexão da viga VC20



\* O extensômetro EF2 não funcionou

Figura 4.34: Deformações na armadura de flexão da viga VA10

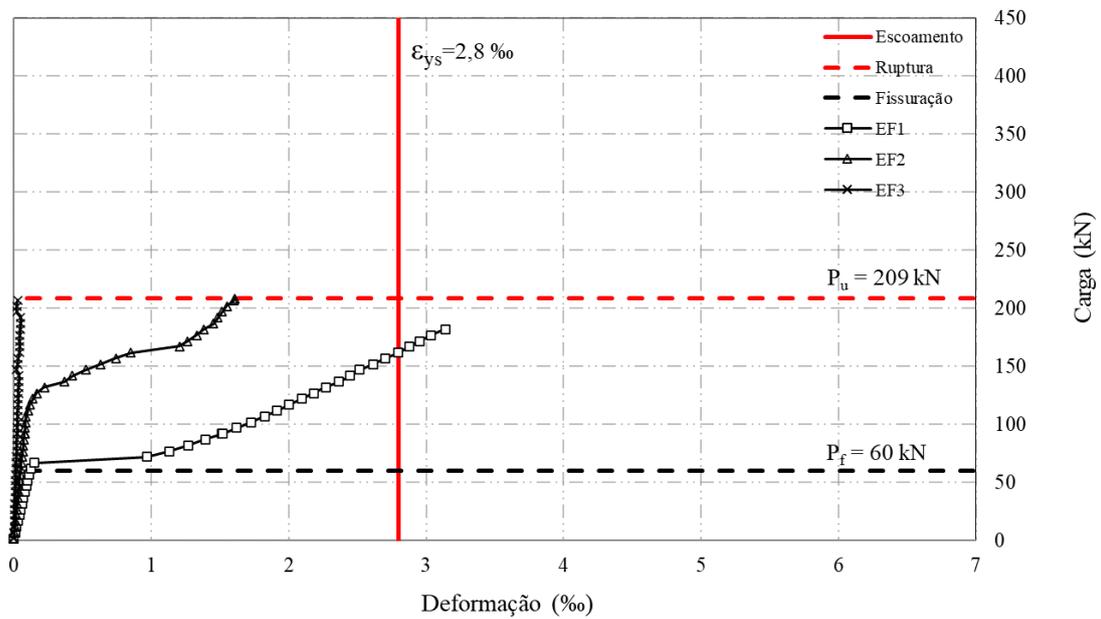


Figura 4.35: Deformações na armadura de flexão da viga VA12,5

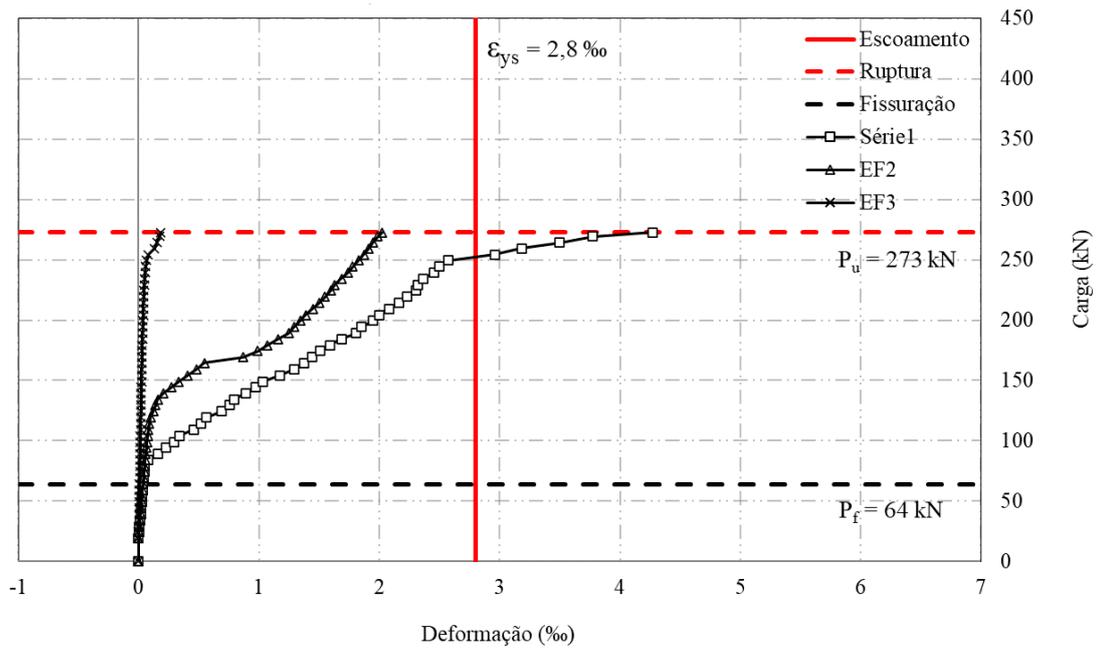


Figura 4.36: Deformações na armadura de flexão da viga VA16

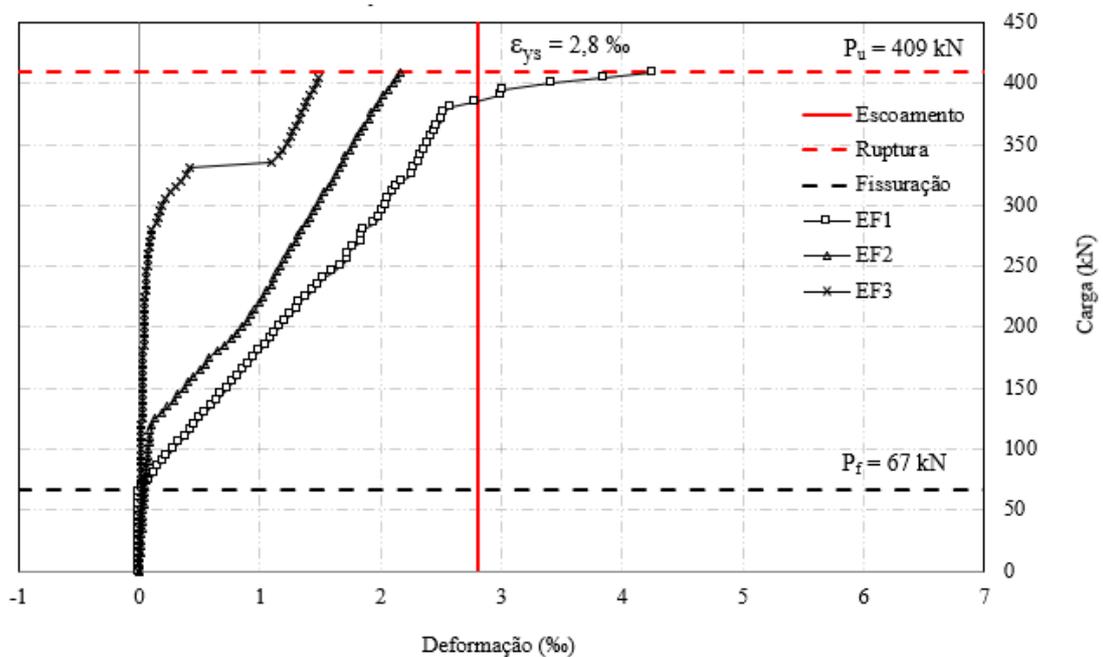


Figura 4.37: Deformações na armadura de flexão da viga VA20

Conforme esperado pelo dimensionamento, todas as vigas alcançaram o escoamento da armadura de flexão, fazendo com que os modos de ruptura observados fossem dúcteis, ou seja, com aberturas de fissuras maiores que 3 mm e deslocamentos superiores a 50 mm.

Ao comparar as vigas reforçadas aos espécimes de referência, observou-se que a aplicação do reforço não impediu o escoamento da armadura de flexão e, dessa forma, não foi suficiente para

aumentar excessivamente a rigidez do elemento. Esse é o tipo de comportamento esperado para o dimensionamento do reforço em vigas de concreto armado.

Em relação às vigas VC20 e VA20 foram identificadas quebras na curva carga-deformação do extensômetro EF3, que coincidem com o momento em que ocorreu a abertura das fissuras de cisalhamento nessas vigas, em torno da carga 300 kN para VC20 e 330 kN para VA20.

De forma a confrontar o tipo de reforço utilizado, são colocados no mesmo gráfico os valores de deformação obtidos para os extensômetros EF1 das vigas com a mesma taxa de armadura de flexão. A Figura 4.38 a Figura 4.41 mostra os resultados obtidos.

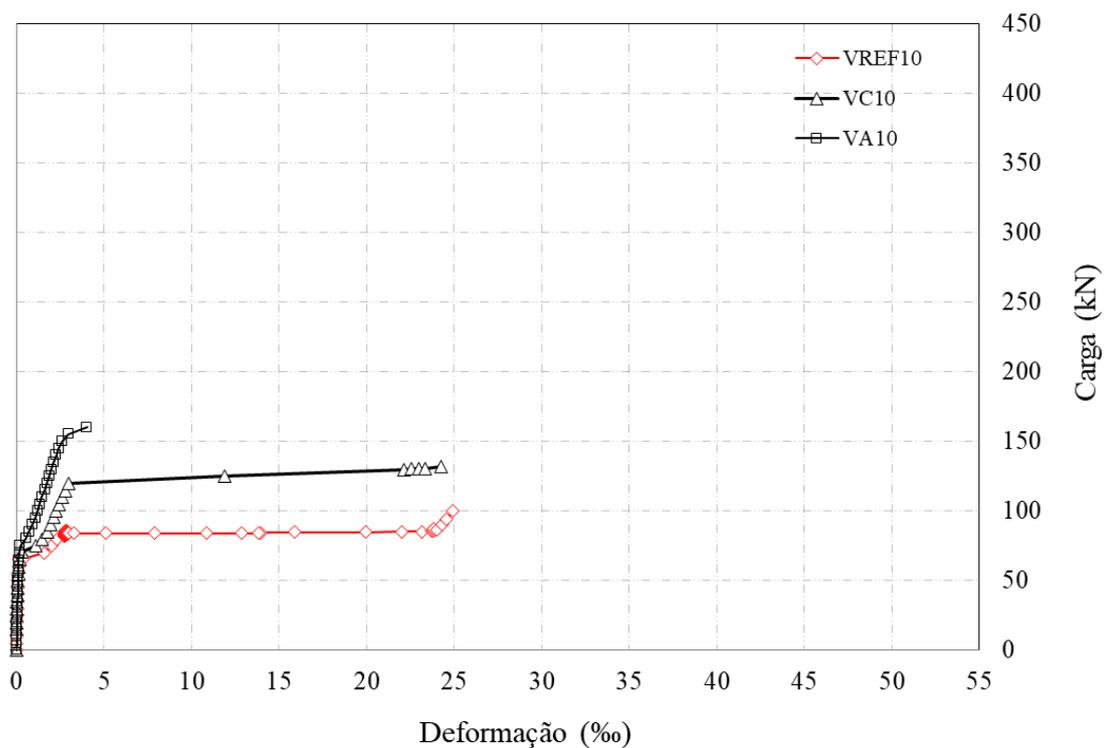


Figura 4.38: Deformações do extensômetro EF1 das vigas V10

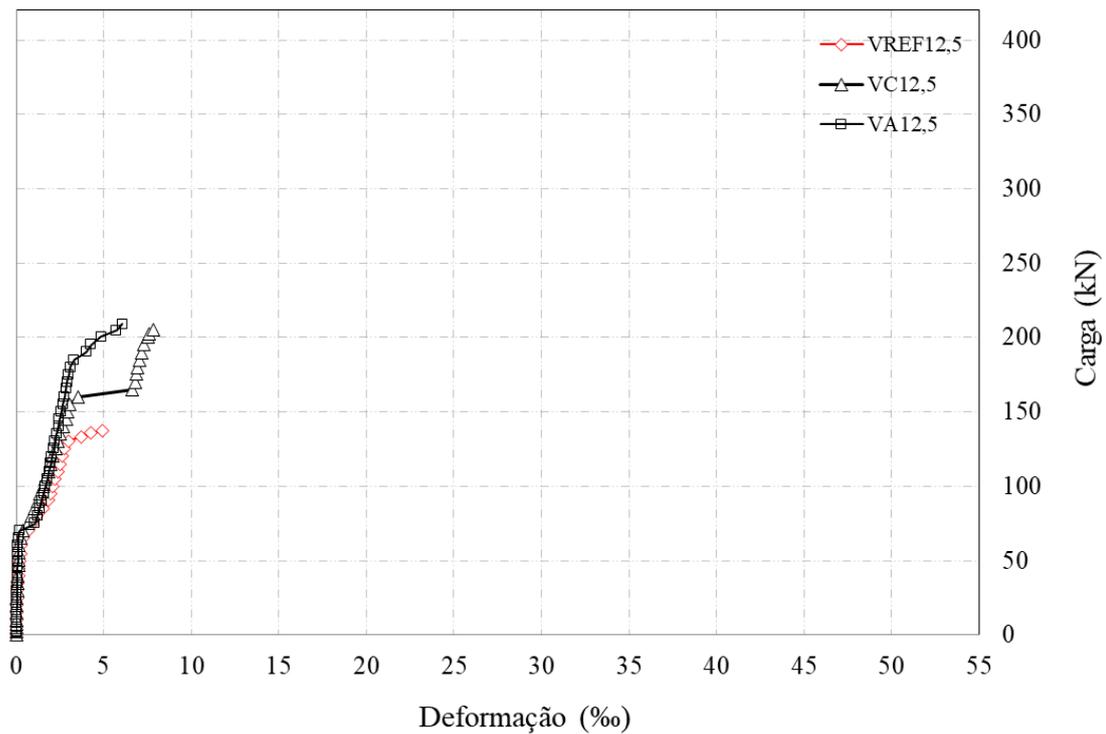


Figura 4.39: Deformações do extensômetro EF1 das vigas V12,5

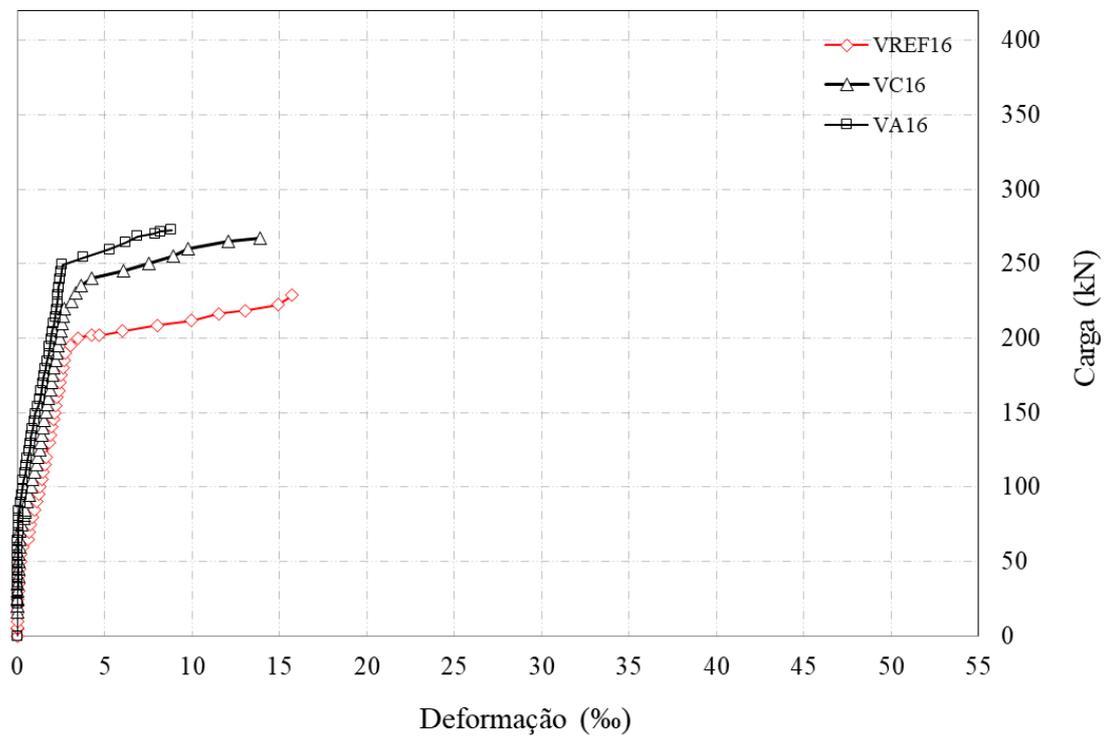


Figura 4.40: Deformações do extensômetro EF1 das vigas V16

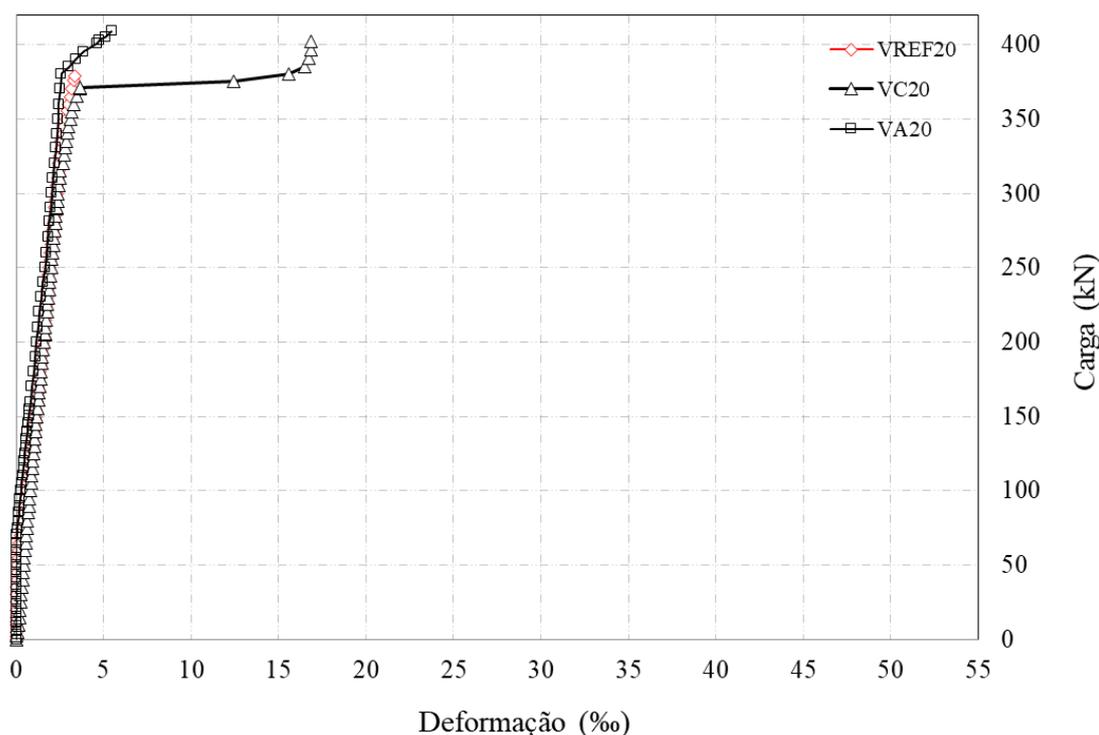


Figura 4.41: Deformações do extensômetro EF1 das vigas V20

Observa-se que as vigas reforçadas com aço apresentaram um comportamento mais rígido que as vigas reforçadas com PRFC, semelhante ao que foi observado por Almusallam et al. (2013) em seus experimentos.

Ao comparar os dados de momento fletor e deformação da armadura de flexão das vigas, observa-se que a carga de escoamento das vigas reforçadas com barras de aço foi superior à das vigas reforçadas com laminados de PRFC, com cargas de 8% a 42% maiores. Esse comportamento indica um aumento de rigidez dos elementos reforçados com aço, o que fica evidenciado nos gráficos da Fig. 13 e assemelha-se ao estado observado nos experimentos de Almusallam et al. (2013).

#### 4.5. DEFORMAÇÕES NAS ARMADURAS DE CISALHAMENTO

Conforme descrito no item 3.4.2, foram instrumentados os estribos do meio do vão de cisalhamento, mais precisamente em um ponto médio da altura da perna do estribo, com dois extensômetros diametralmente opostos. Os gráficos da Figura 4.42 a Figura 4.53 apresentam os resultados de deformação obtidos para os estribos, sendo utilizado o valor médio dos dois

extensômetros em cada ponto ou, em casos onde as leituras diferem mais de 20%, foi tomado o maior valor.

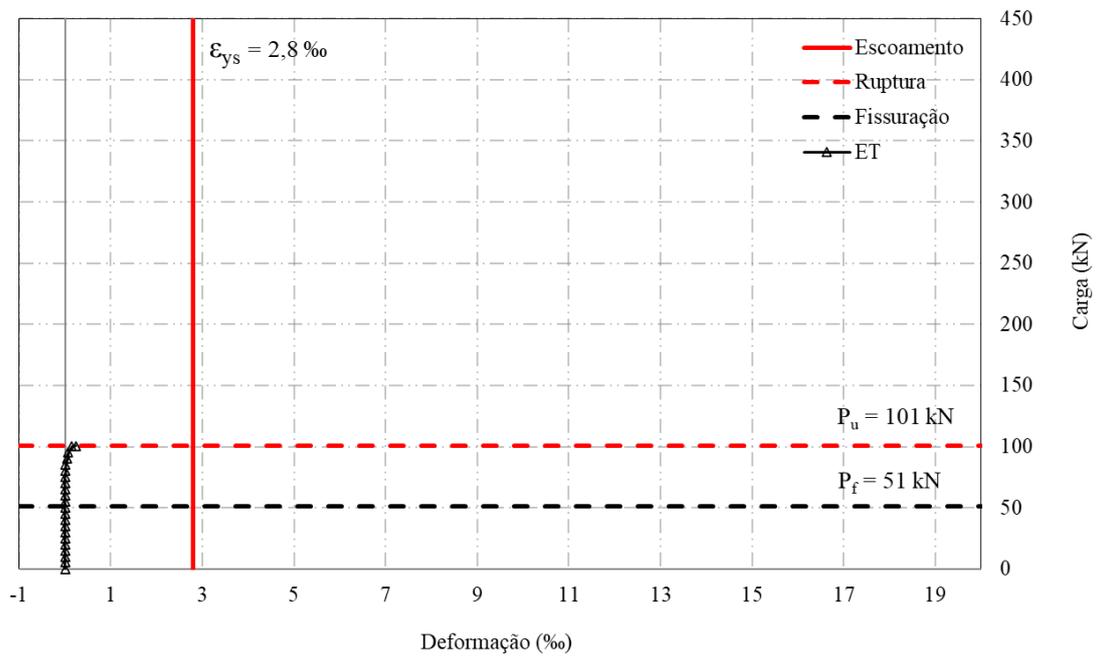


Figura 4.42: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VREF10

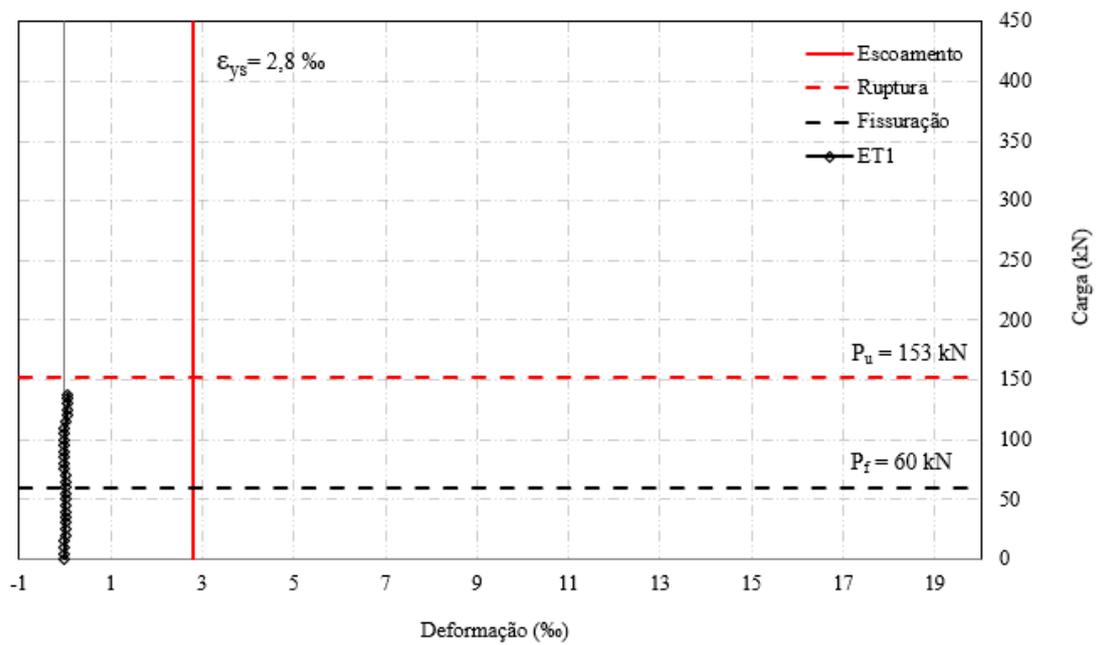


Figura 4.43: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VREF12,5

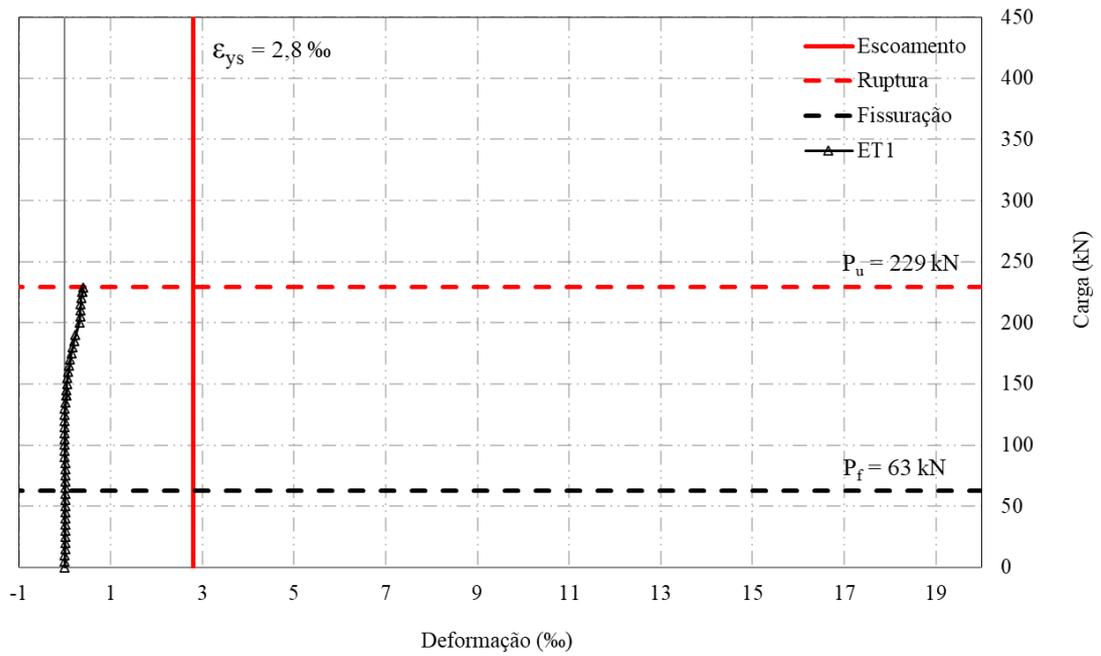


Figura 4.44: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VREF16

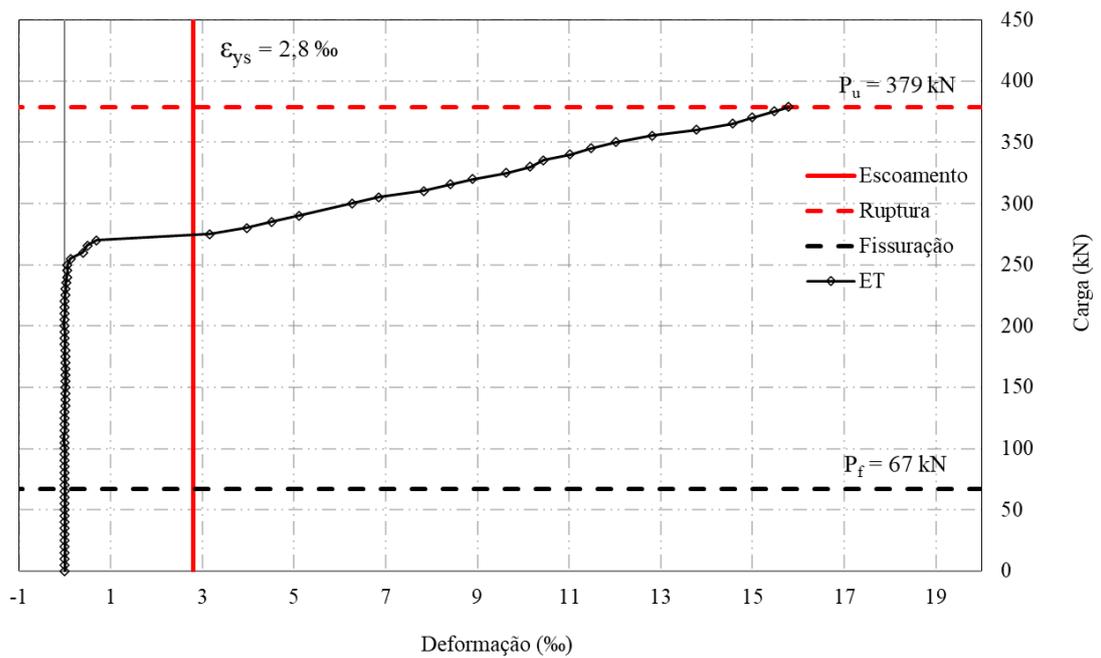


Figura 4.45: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VREF20

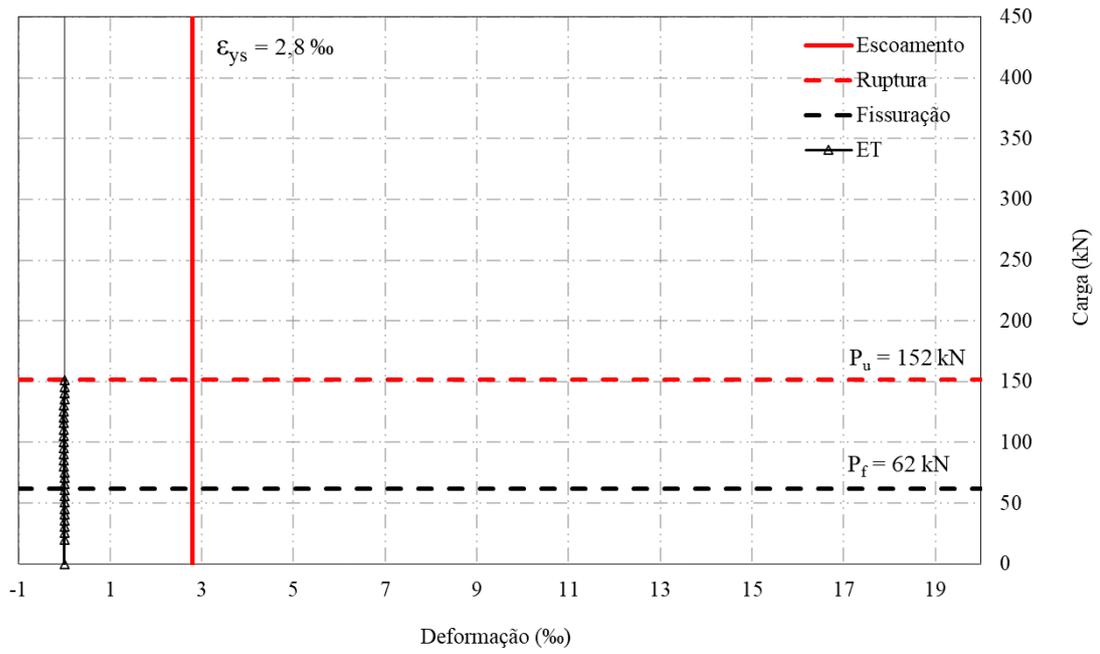


Figura 4.46: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VC10

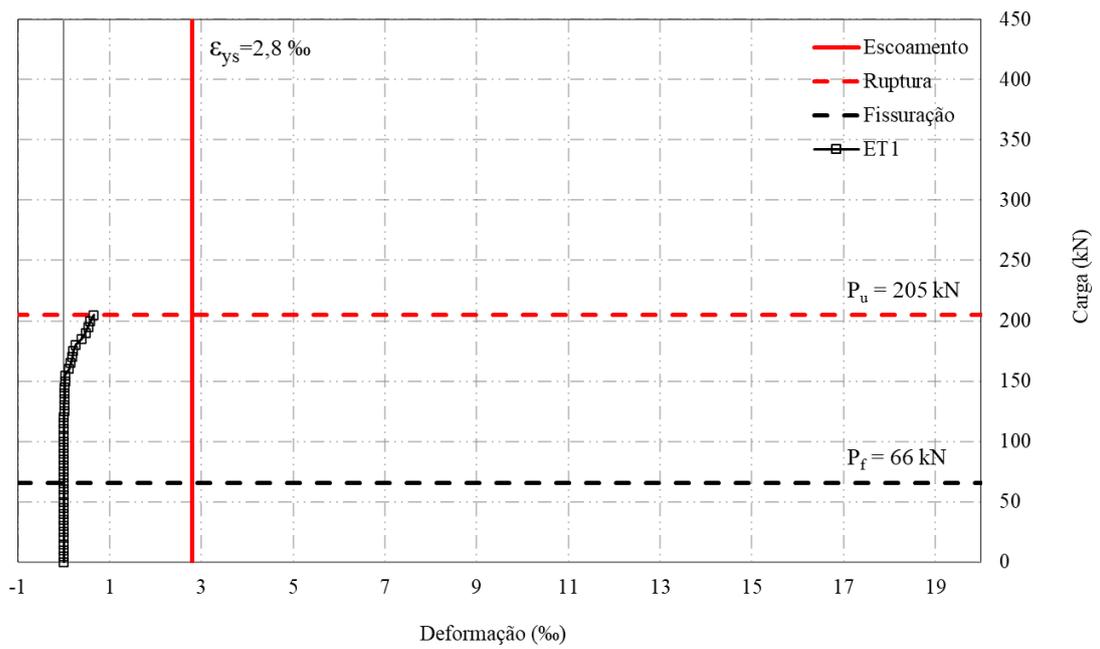


Figura 4.47: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VC12,5

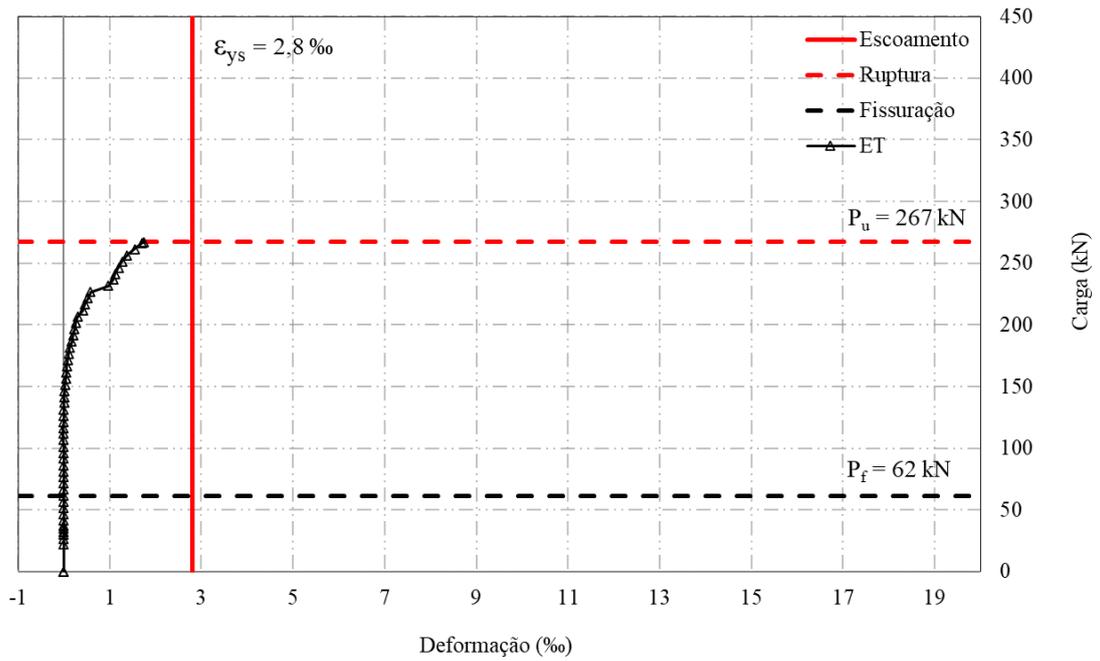


Figura 4.48: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VC16

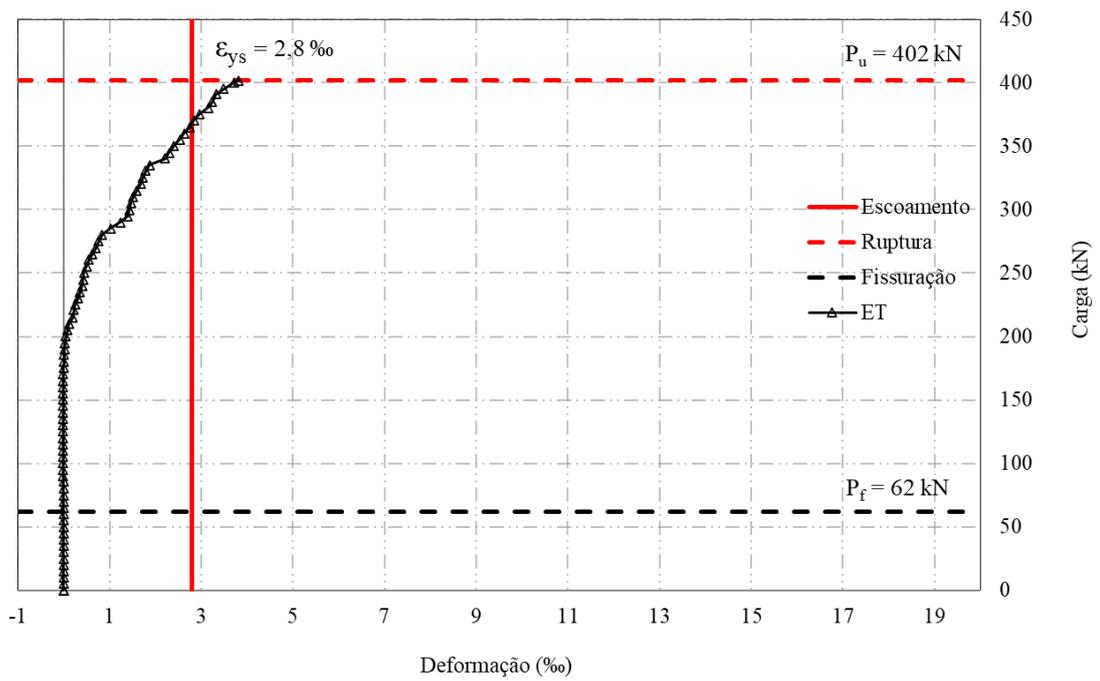


Figura 4.49: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VC20

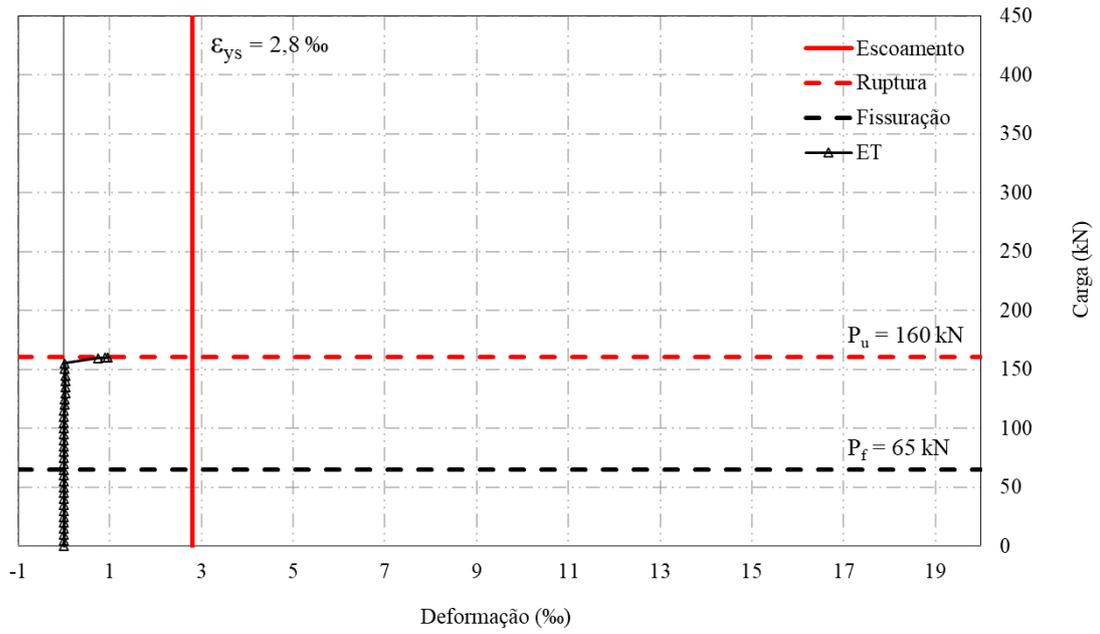


Figura 4.50: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VA10

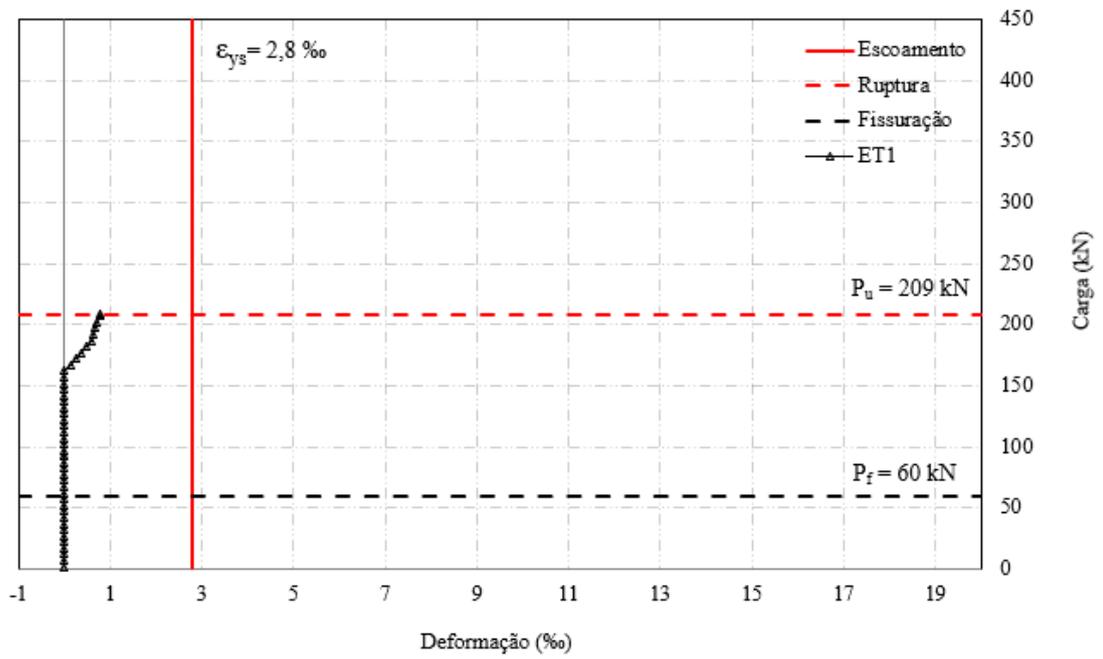


Figura 4.51: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VA12,5

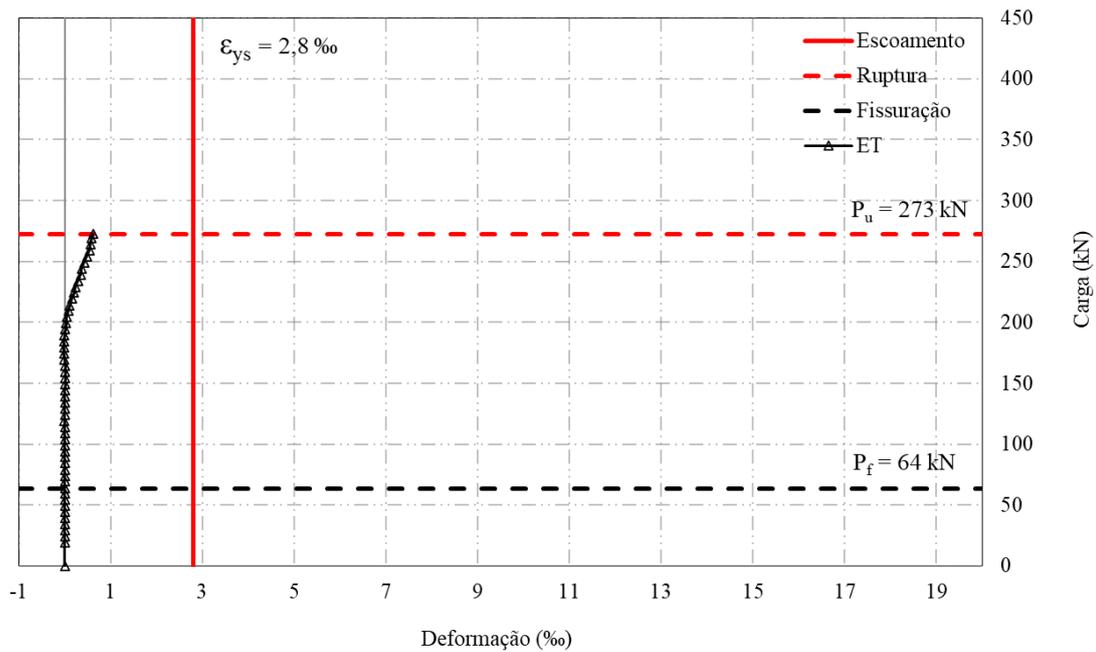


Figura 4.52: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VA16

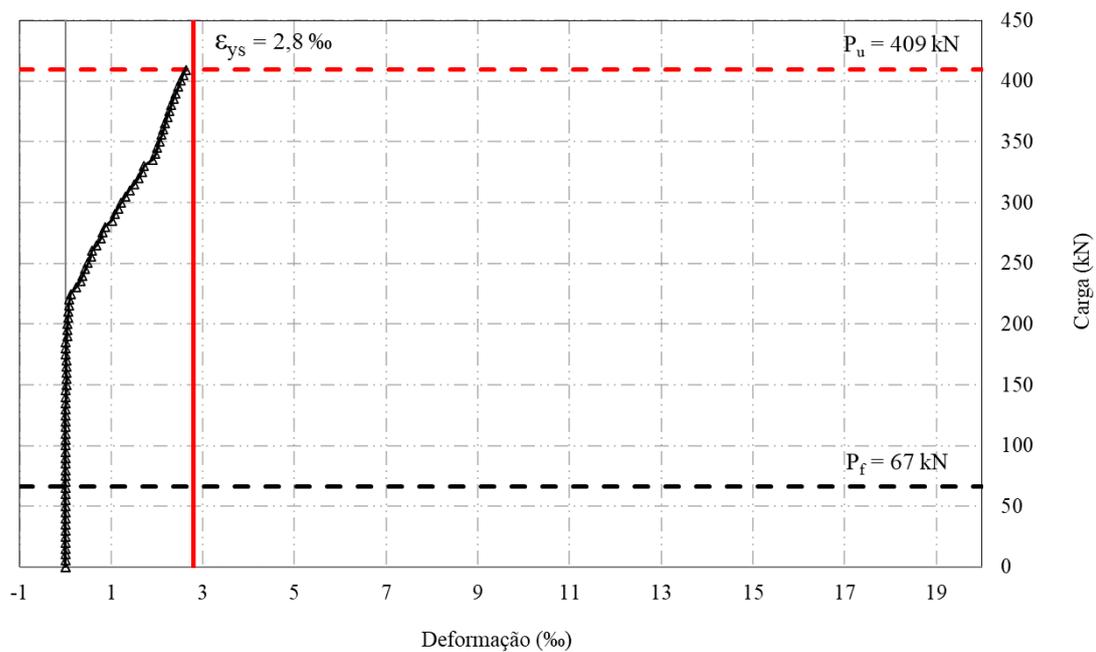


Figura 4.53: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VA20

Conforme observado nos gráficos, a armadura de cisalhamento alcançou a tensão de escoamento apenas para as vigas com armadura de flexão de 3 barras de 20 mm. Como era esperado, o momento de escoamento dos estribos coincidiu com o aparecimento das primeiras fissuras de cisalhamento nessas vigas, que foram identificadas mais próximas ao apoio.

Contudo, essas fissuras não chegaram a apresentar uma largura ou comprimento significativos e, dessa forma, não comprometeram o modo de ruptura dos elementos.

Para todas as demais vigas não foi atingida a tensão de escoamento na armadura de cisalhamento, indicando que a relação  $a/d$  considerada foi suficiente para garantir a ruptura por flexão.

#### 4.6. DEFORMAÇÕES NO REFORÇO

Conforme descrito no item 3.4.3, os laminados de PRFC e as barras de aço do reforço foram instrumentados em três pontos distintos e, dada a limitação de tamanho das ranhuras, foi utilizado apenas um extensômetro em cada ponto. Assim, foram instrumentados dois elementos de reforço, o central e um da extremidade, de forma a garantir duas leituras para o mesmo ponto. Os gráficos da Figura 4.54 a Figura 4.61 apresentam os resultados de deformação obtidos para os elementos de reforço, sendo utilizado o valor médio dos dois extensômetros em cada ponto de leitura (laminados ou barras de aço diferentes) ou, em casos onde as leituras diferem mais de 20%.

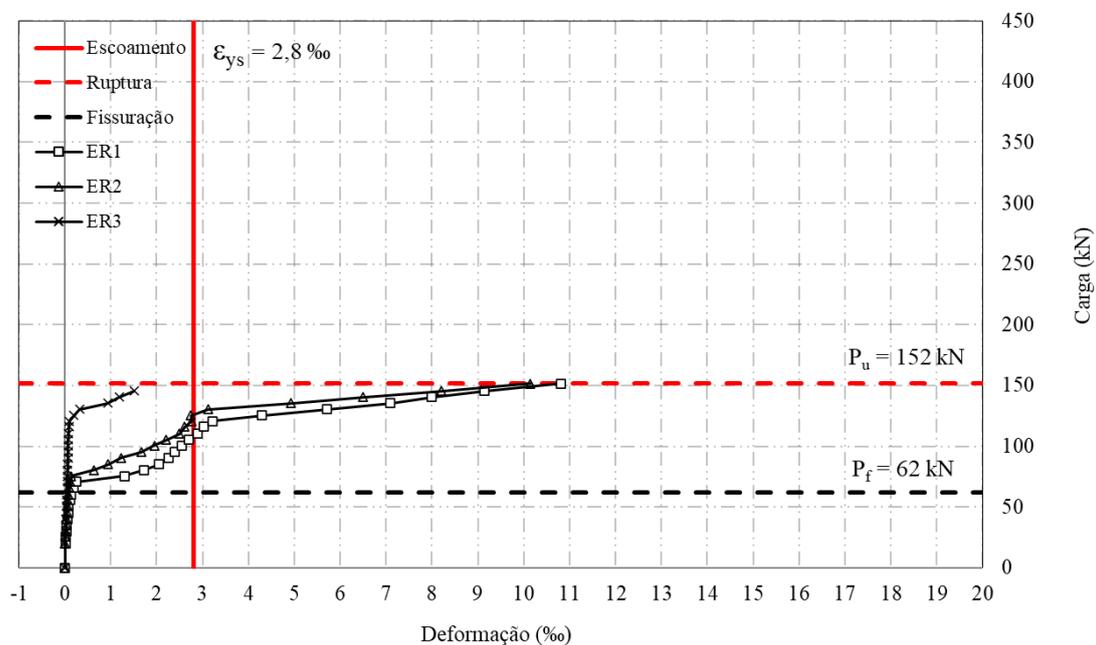


Figura 4.54: Deformações no reforço da viga VC10

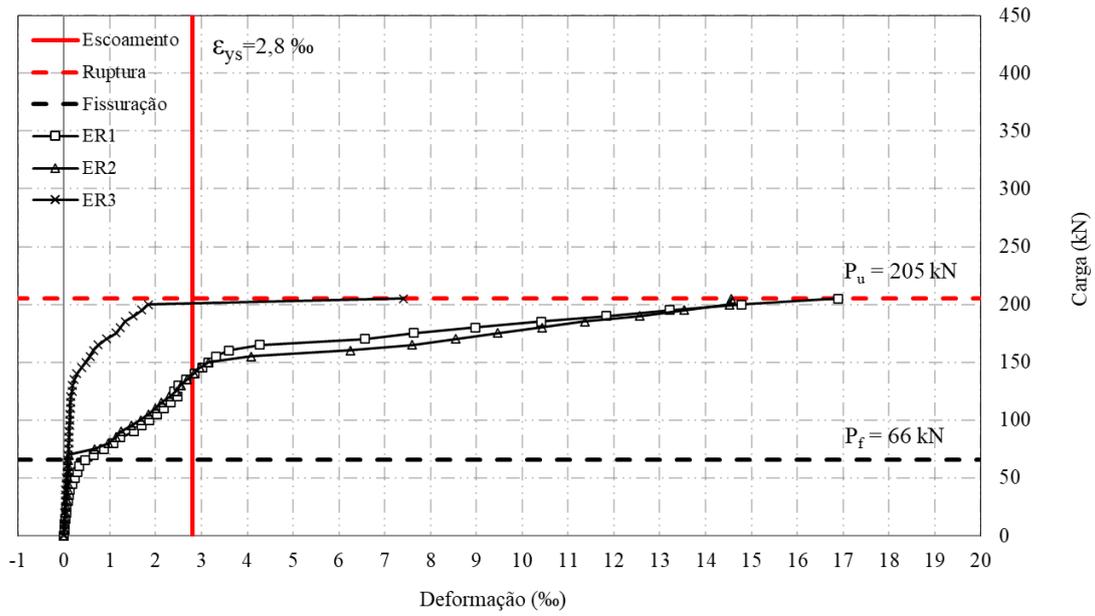


Figura 4.55: Deformações no reforço da viga VC12,5

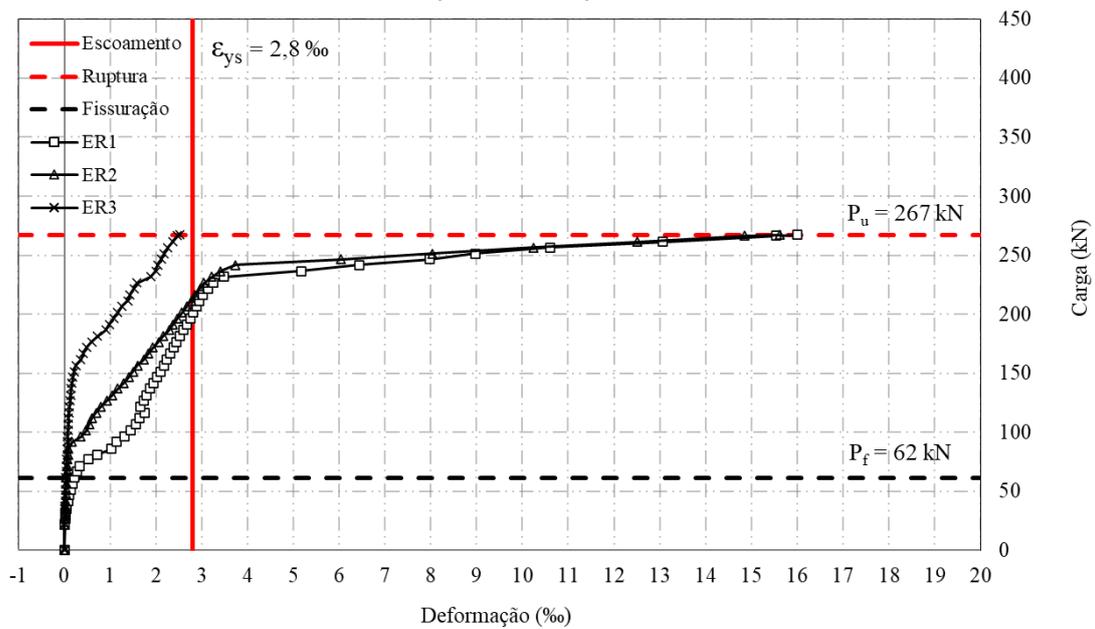


Figura 4.56: Deformações no reforço da viga VC16

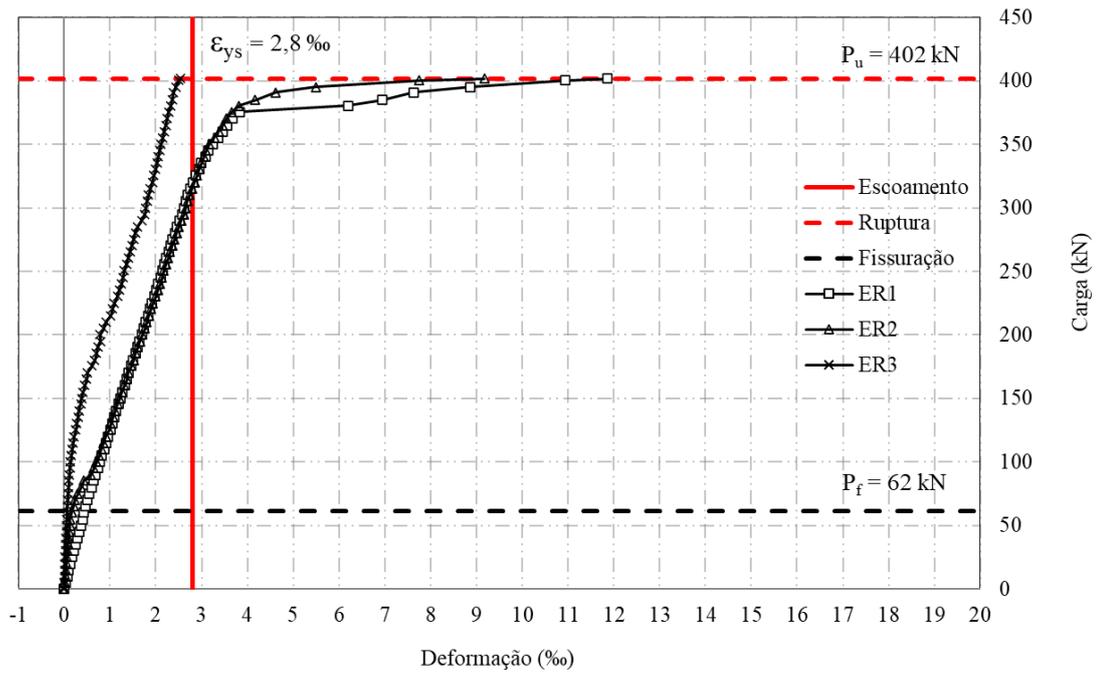


Figura 4.57: Deformações no reforço da viga VC20

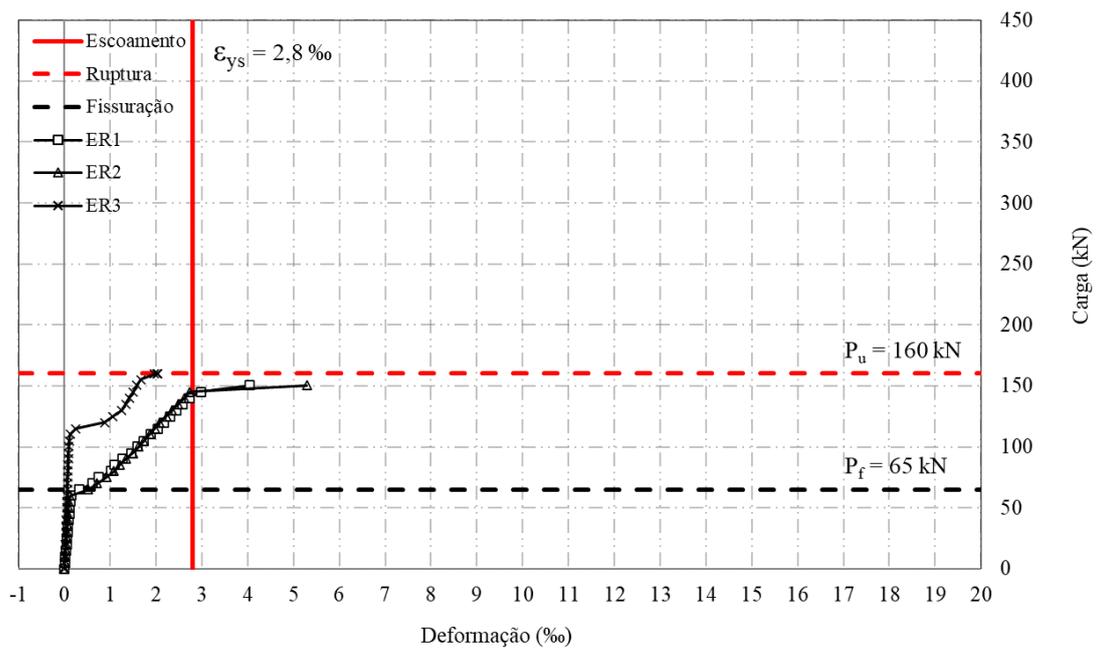


Figura 4.58: Deformações no reforço da viga VA10

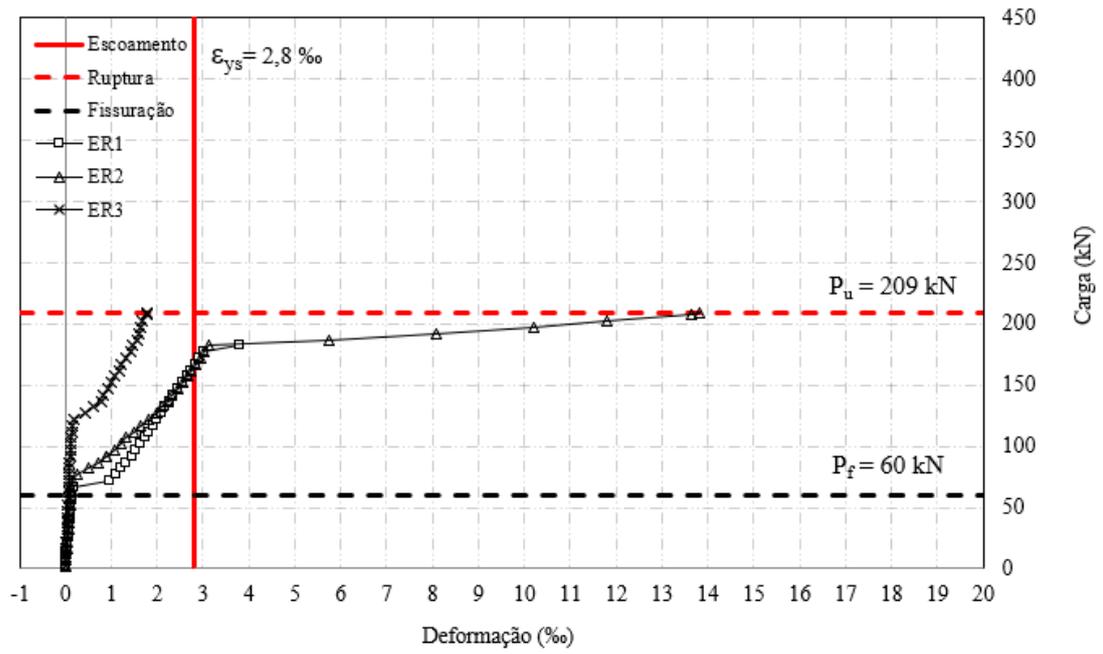


Figura 4.59: Deformações no reforço da viga VA12,5

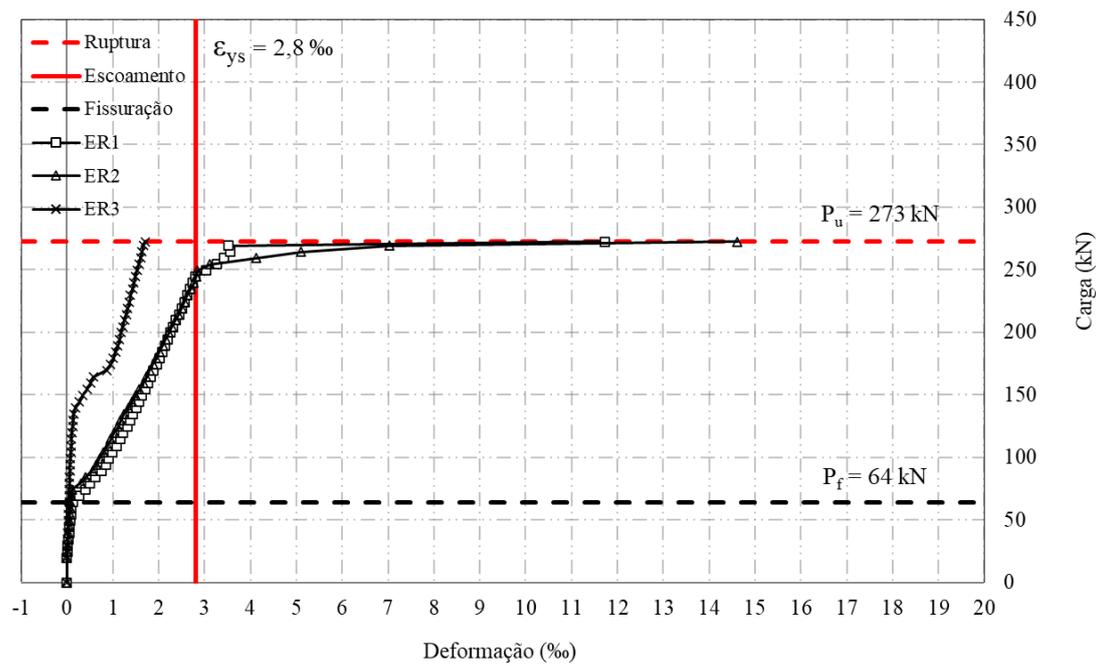


Figura 4.60: Deformações no reforço da viga VA16

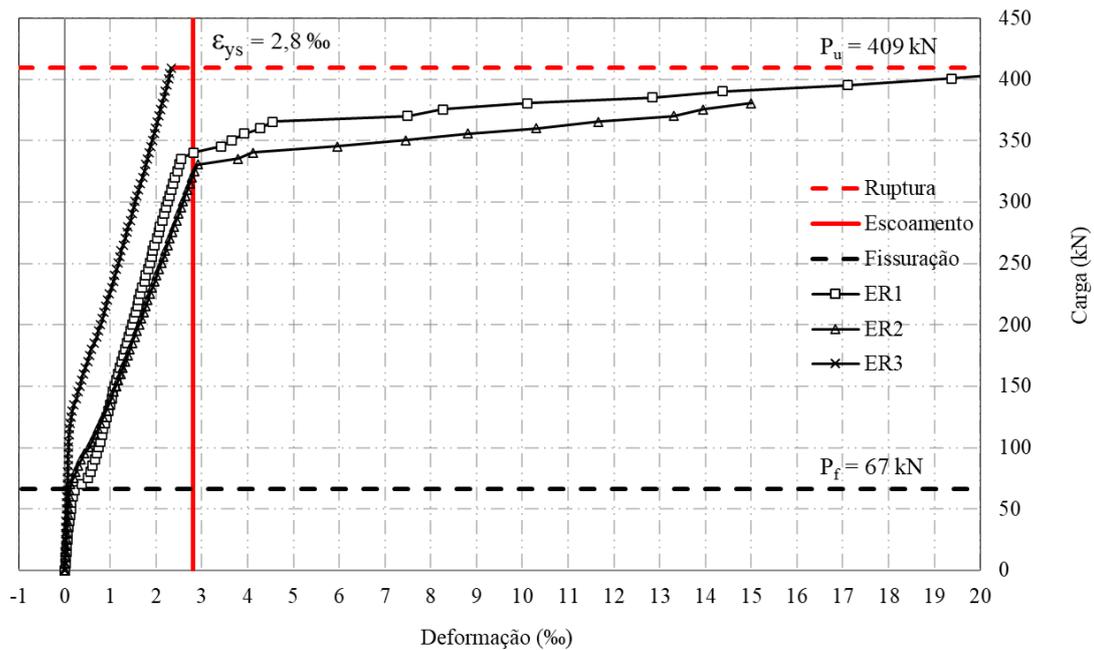


Figura 4.61: Deformações no reforço da viga VA20

Conforme as leituras obtidas, observa-se que todas as barras de aço utilizadas no reforço atingiram o escoamento, permitindo que as vigas reforçadas com barras de aço e argamassa de reparo estrutural apresentassem um modo de ruptura dúctil.

Ainda, é possível observar que todas as curvas de momento - deformação apresentam um padrão muito similar, variando apenas a sua amplitude, devido ao acréscimo de carga última proporcionado pelo aumento da armadura de flexão. Resumidamente, o padrão de curva observado conta com 4 fases: a primeira fase representa o comportamento elástico-linear dos elementos, quando é evidenciado um pequeno acréscimo de deformação, visto que o concreto ainda encontra-se na fissurado; com o aumento de carga e a fissuração da viga inicia-se a segunda fase, na qual ocorre um aumento significativo do esforço na armadura flexão e no reforço, provocando um acréscimo na deformação; em seguida, na terceira fase, verifica-se um comportamento quase linear até o escoamento da armadura de flexão; e por fim, na quarta fase, ocorre uma diminuição significativa da inclinação da curva, dado o escoamento da armadura de flexão, que provoca um acréscimo significativo de deformação do reforço até a ruptura da viga. Para as vigas reforçadas com barras de aço, a quarta fase representa também o momento de escoamento do próprio reforço e, por isso, essa parte da curva apresenta um comportamento praticamente horizontal (inclinação próxima a 0) até a ruptura do elemento.

De forma a comparar o tipo de reforço utilizado, a Figura 4.62 a Figura 4.63 apresentam os resultados de deformação para as vigas reforçadas com laminados de PRFC e barras de aço, respectivamente.

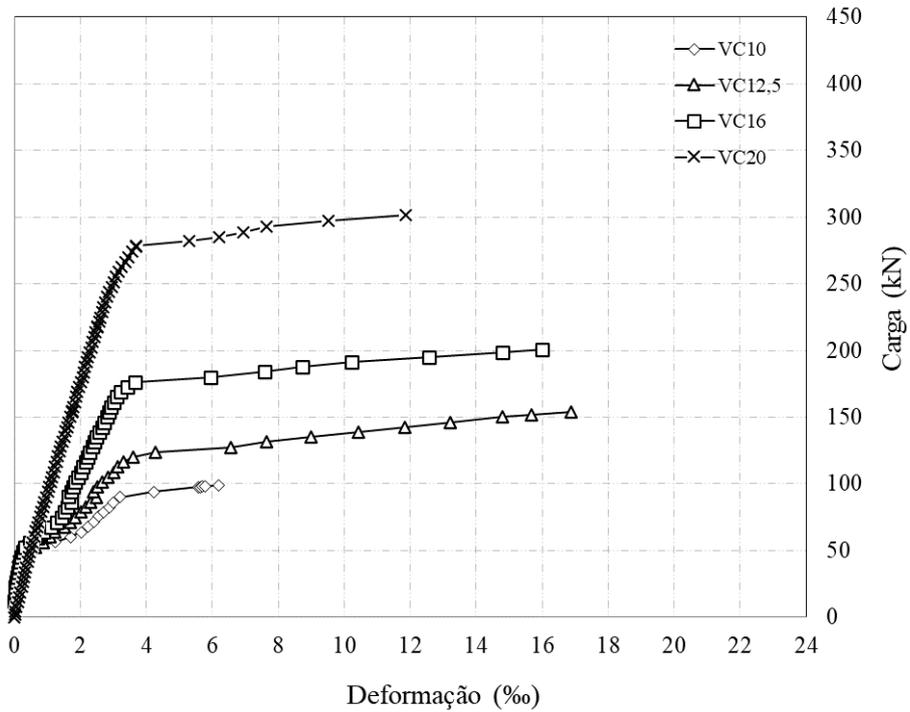


Figura 4.62: Deformações no reforço da vigas reforçadas com laminado de PRFC

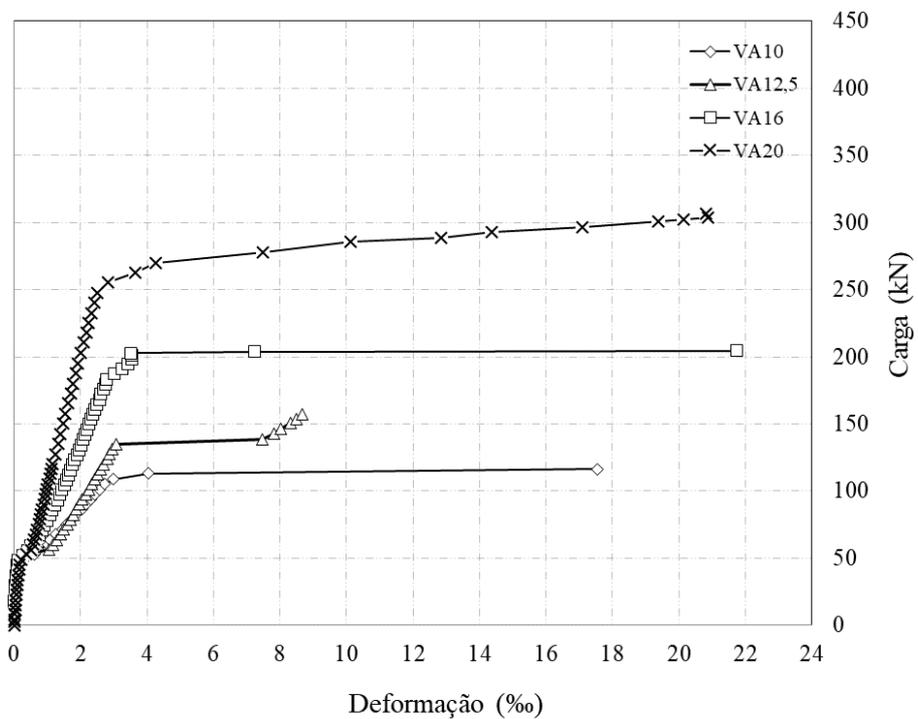


Figura 4.63: Deformações no reforço da vigas reforçadas com barras de aço

Por meio desses gráficos observa-se que as vigas reforçadas com PRFC e barras de aço se comportaram de forma similar. Contudo, nota-se que a partir da segunda fase da curva há uma pequena diferença nas deformações atingidas pelas vigas, sendo que aquelas reforçadas com laminados de PRFC apresentaram deformações maiores que as vigas reforçadas com barras de aço, ou seja, apresentaram um comportamento relativamente mais dúctil. Já na terceira fase, evidencia-se um comportamento praticamente todo plástico para as vigas reforçadas com aço, enquanto o reforço de PRFC ainda foi capaz de mobilizar resistência crescente.

Como observado nos gráficos, a variação da taxa de armadura de flexão não impactou de forma significativa os níveis de deformação atingidos pelo reforço. As diferenças começaram a ser observadas nas vigas VC20 e VA20, que apresentaram uma deformação última menor que as demais vigas com o mesmo tipo de reforço, com valores cerca de 14% menores para VA20 e 20% menores para VC20. Isso se deve ao fato destas vigas serem mais rígidas que as demais e, nesse caso, o reforço é ativado mais tarde, indicando que a sua aplicação em vigas com taxas de armadura de flexão maiores é menos eficiente.

#### 4.7. DEFORMAÇÕES NO CONCRETO

Conforme descrito no item 3.4.4, a superfície do concreto de todas as vigas foi instrumentada em dois pontos localizados no meio do vão. A Figura 4.64 a Figura 4.75 mostram os valores das leituras obtidos por esses dois extensômetros, para cada viga.

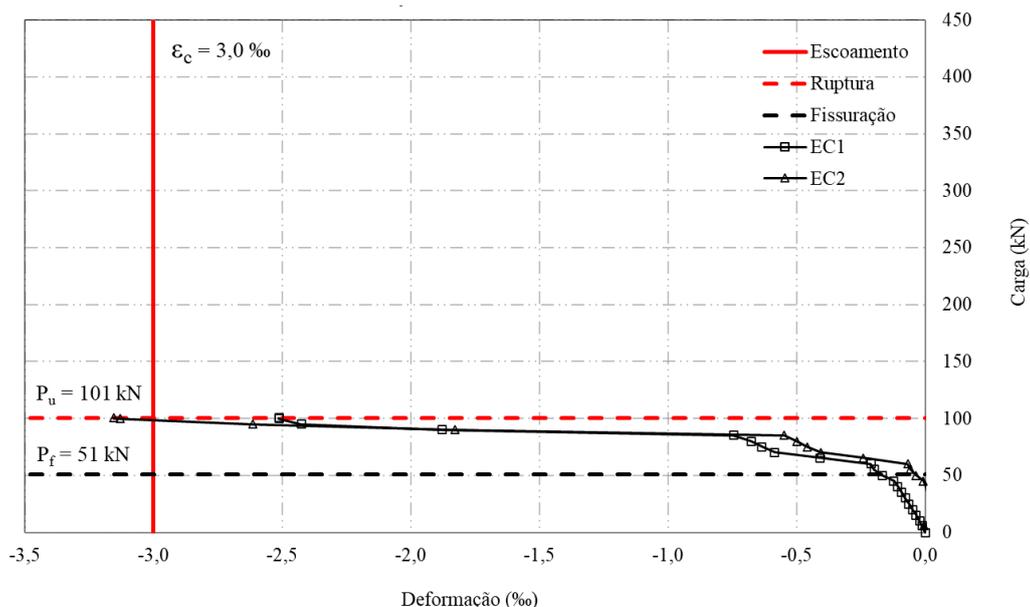


Figura 4.64: Deformações na superfície do concreto da viga VREF10

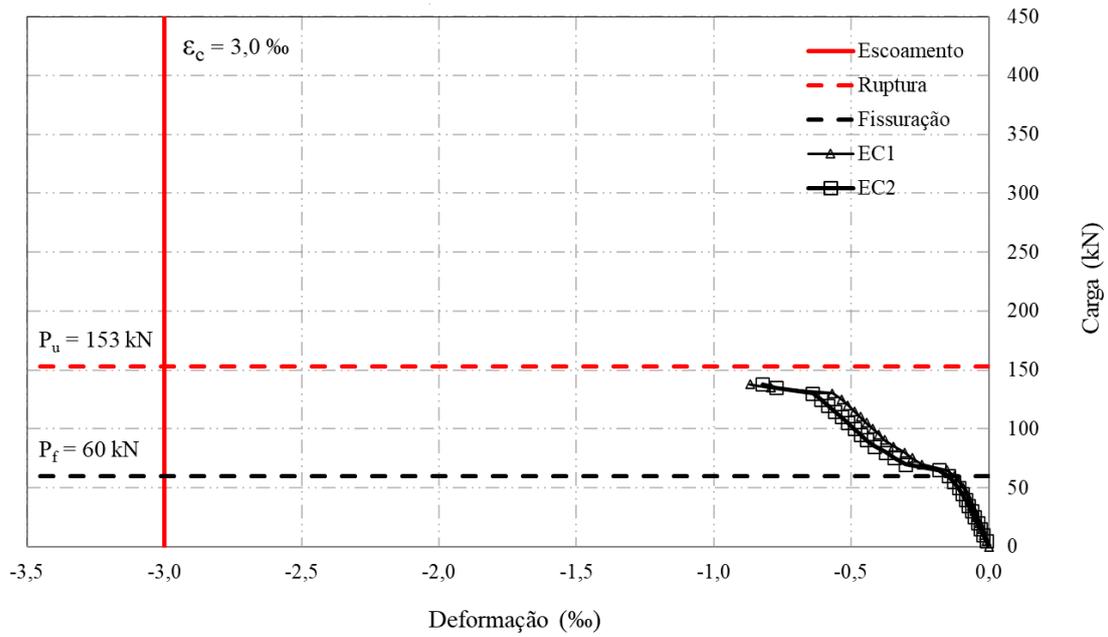


Figura 4.65: Deformações na superfície do concreto da viga VREF12,5

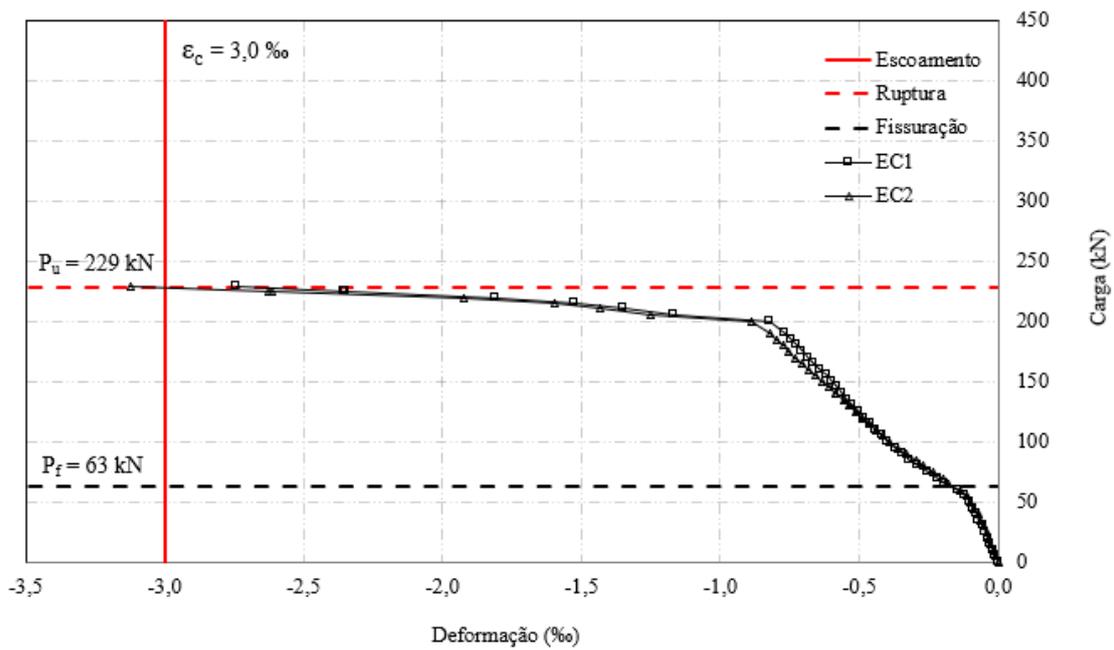


Figura 4.66: Deformações na superfície do concreto da viga VREF16

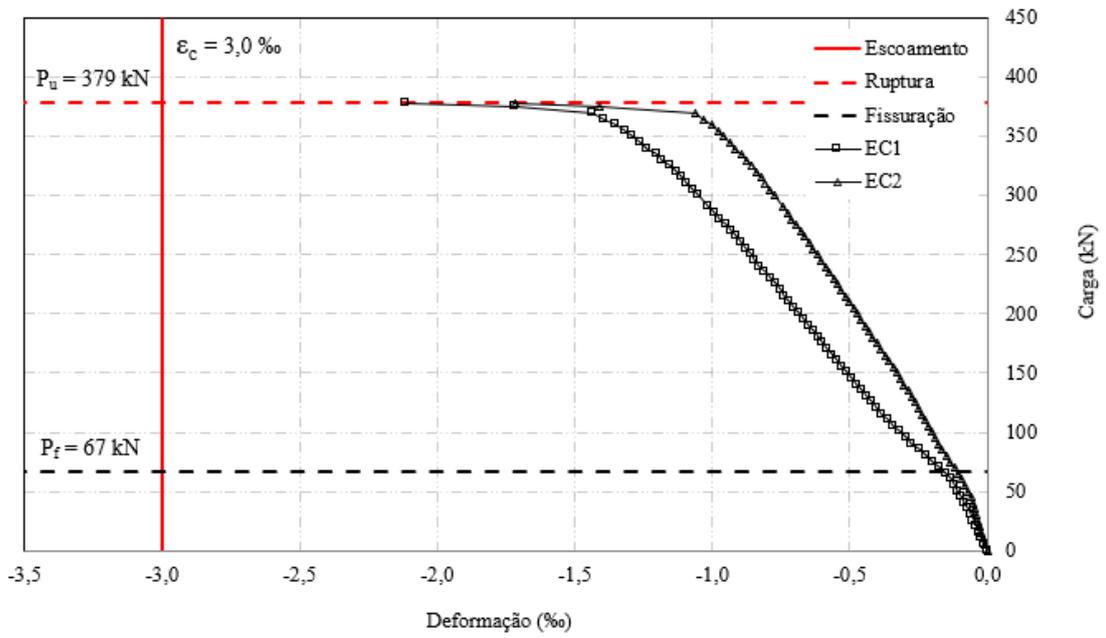


Figura 4.67: Deformações na superfície do concreto da viga VREF20

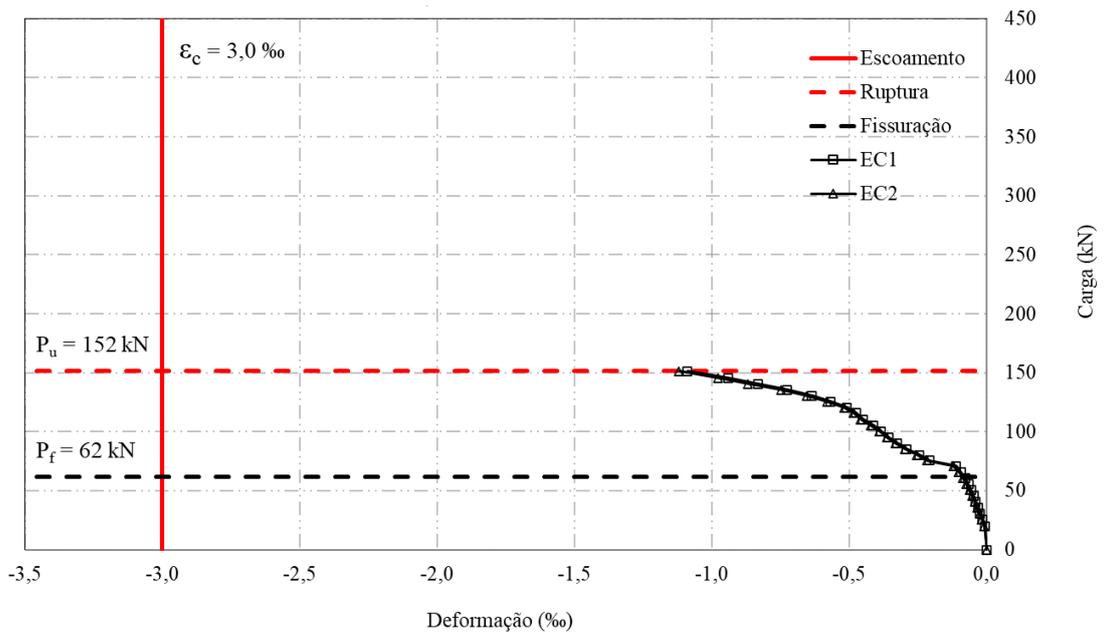


Figura 4.68: Deformações na superfície do concreto da viga VC10

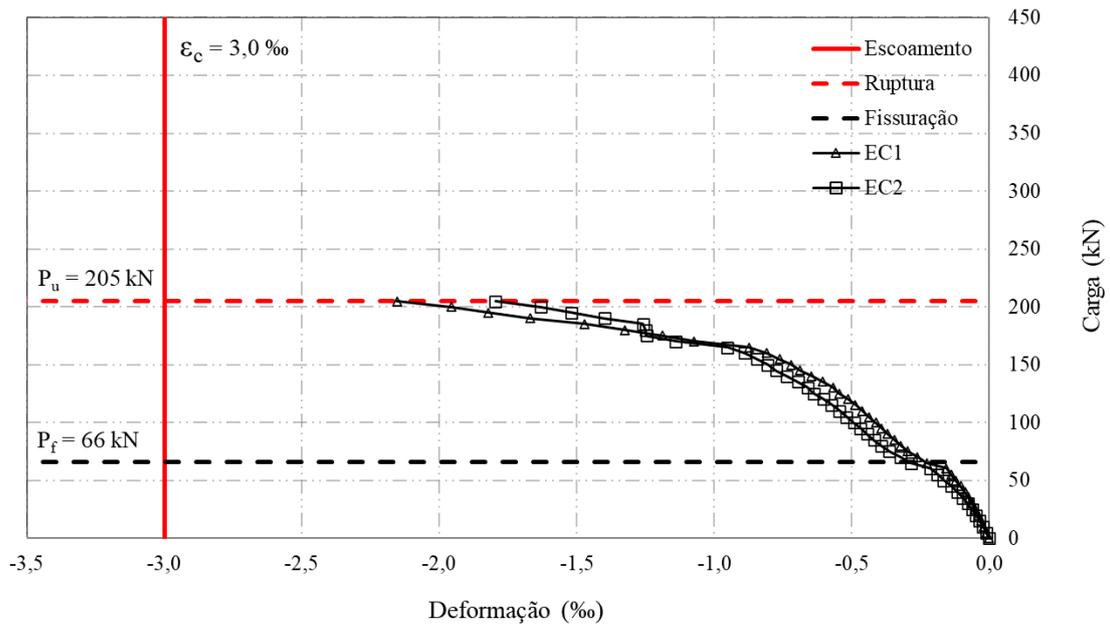


Figura 4.69: Deformações na superfície do concreto da viga VC12,5

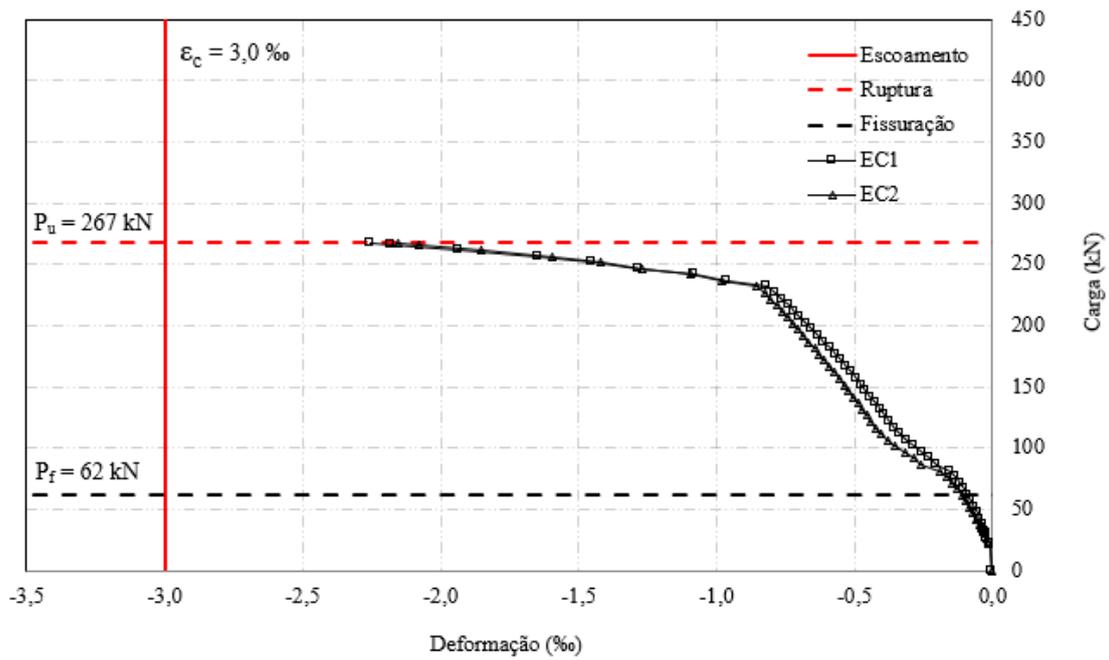


Figura 4.70: Deformações na superfície do concreto da viga VC16

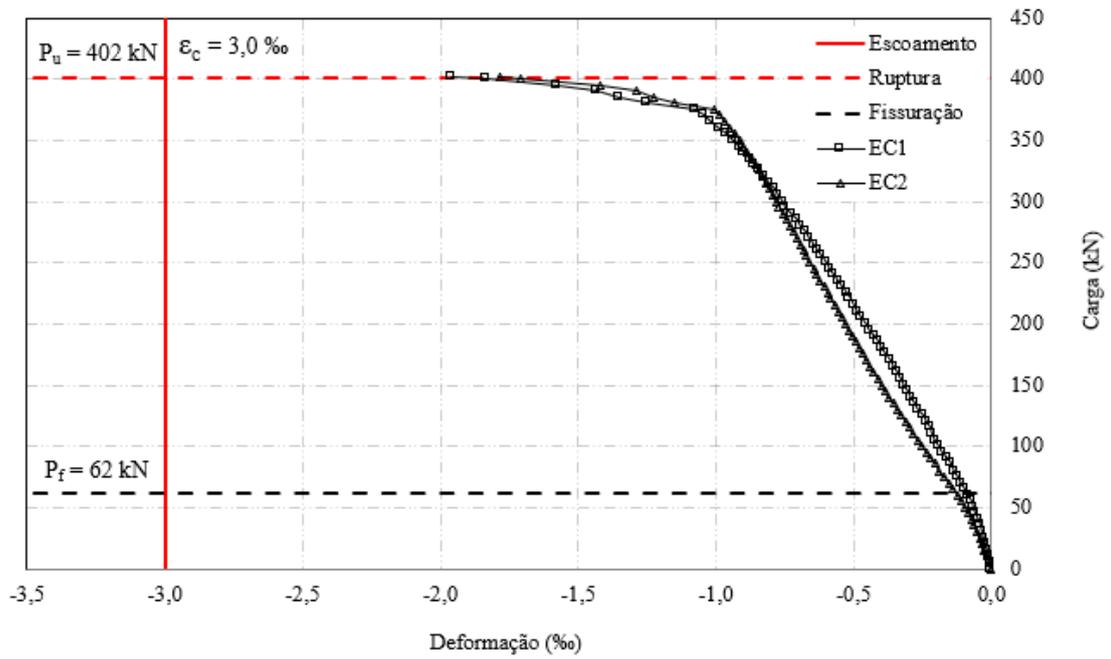


Figura 4.71: Deformações na superfície do concreto da viga VC20

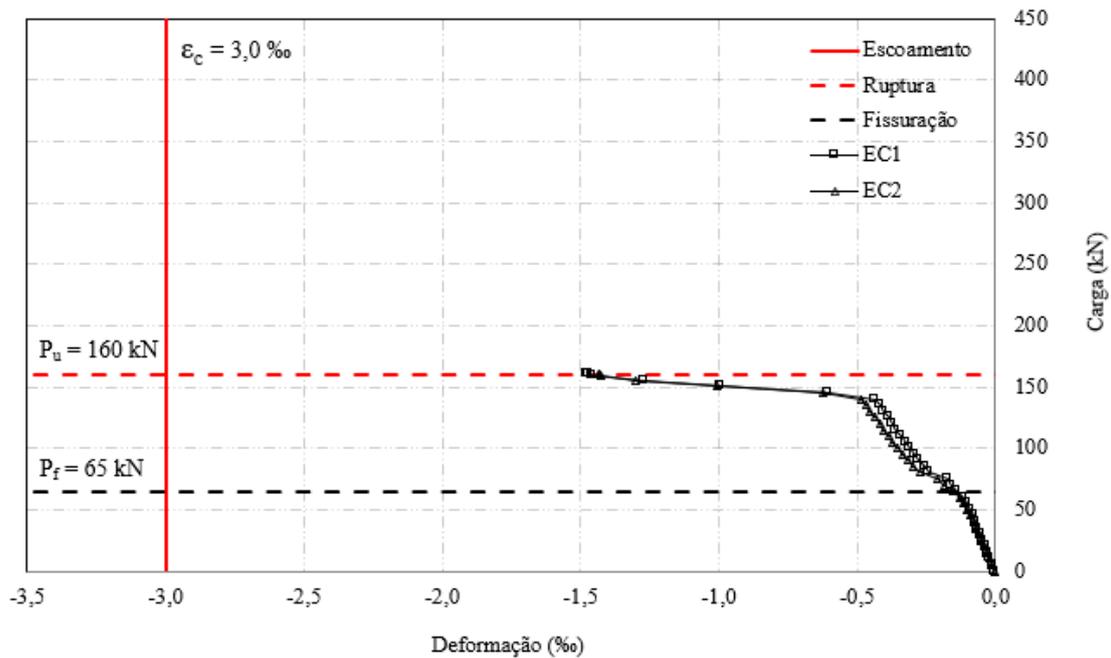


Figura 4.72: Deformações na superfície do concreto da viga VA10

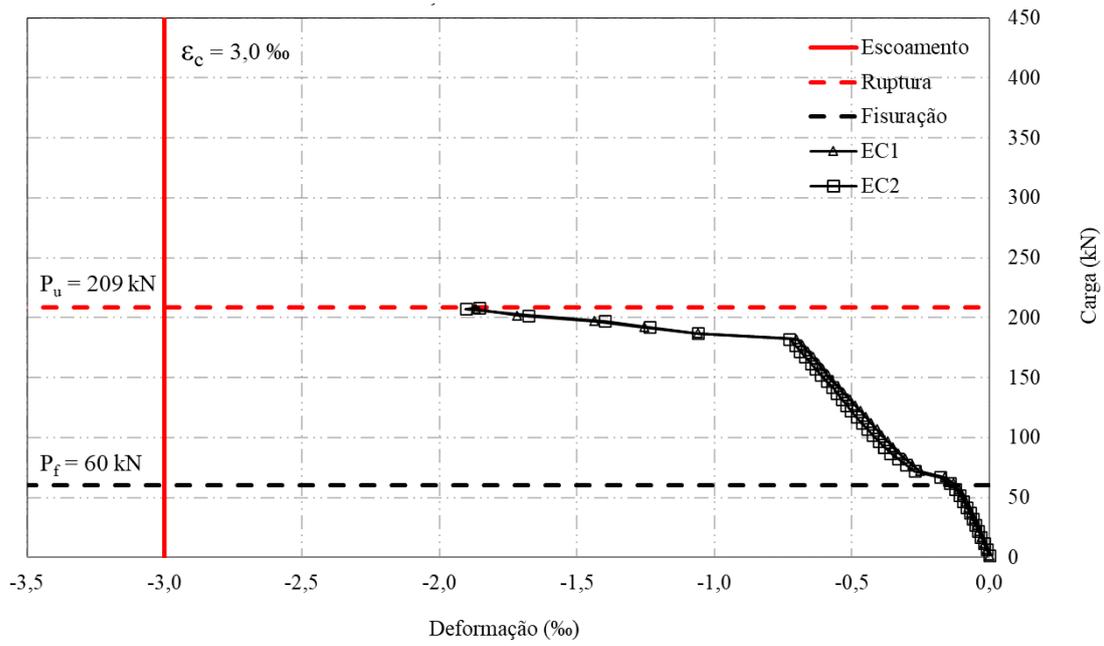


Figura 4.73: Deformações na superfície do concreto da viga VA12,5

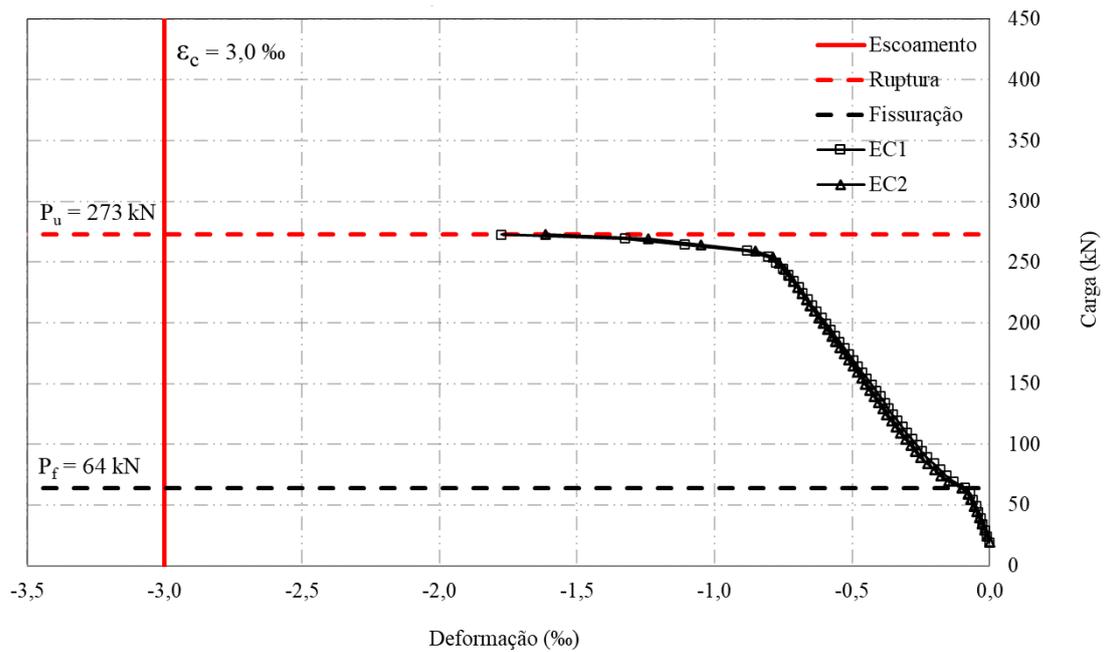


Figura 4.74: Deformações na superfície do concreto da viga VA16

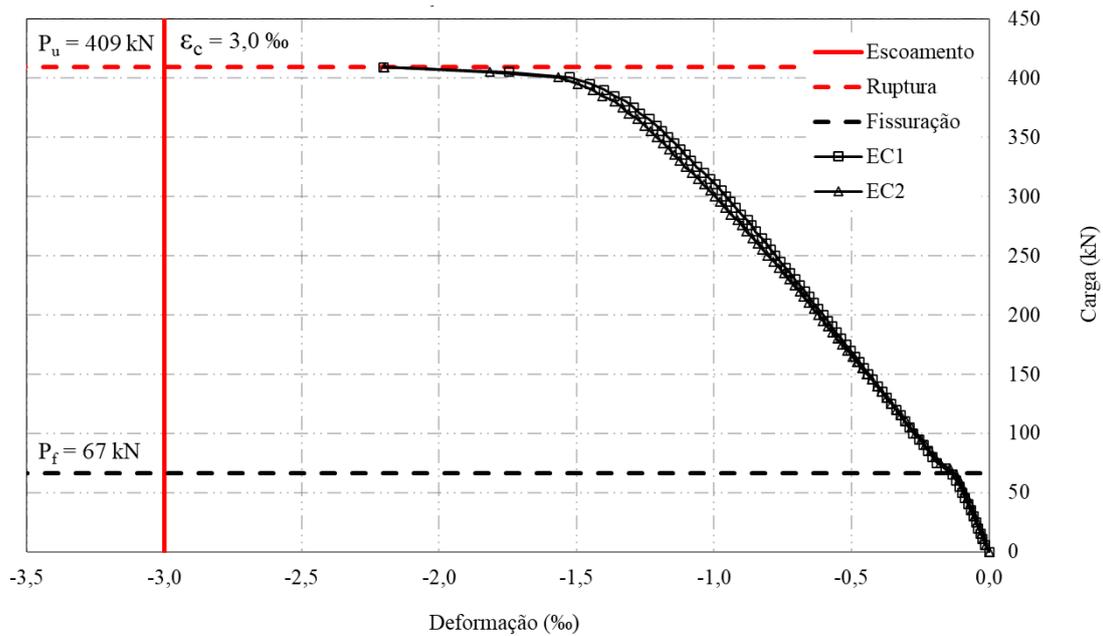


Figura 4.75: Deformações na superfície do concreto da viga VA20

Durante os ensaios, o esmagamento do concreto foi identificado em todas as vigas. Contudo, conforme observado nos gráficos acima, os extensômetros identificaram que o concreto atingiu a deformação última apenas nas vigas VREF10 e VREF16. Isso foi verificado pois o esmagamento não ocorreu no meio do vão e sim em locais deslocados, mais próximos de um dos pontos de aplicação de carga e, assim, é possível que os valores de deformação observados nos extensômetros não correspondam aos valores máximos de deformação do concreto dentro da região de momento fletor máximo.

A situação descrita pode ser verificada na Figura 4.76, que mostra a superfície superior da viga VA10, claramente afetada pelo esmagamento do concreto. Contudo, conforme observado no gráfico dessa viga, não foi identificada a ruptura do concreto, o que é possível identificar na imagem, que mostra o extensômetro intacto.



Figura 4.76: Seção de esmagamento do concreto na viga VA10

## 5. AVALIAÇÃO DAS RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS

Com o intuito de verificar se os modelos teóricos do ACI 440.2R (2017) e do *fib* Bulletin 90 (2019) apresentam uma estimativa adequada da capacidade resistente de vigas reforçadas a flexão com a técnica NSM, foram feitas comparações dos resultados experimentais com os resultados teóricos destas recomendações normativas. Para realizar essa estimativa de resistência foi considerado que as vigas reforçadas não possuíam nenhum tipo de carregamento aplicado e foram utilizadas as propriedades do concreto e do aço obtidas experimentalmente e as propriedades dos laminados de PRFC fornecidas pelo fabricante.

Cabe ressaltar que as recomendações utilizadas prescrevem o dimensionamento de elementos reforçados pelo NSM com PRF e, dessa forma, foi necessário realizar algumas adaptações para estimar a capacidade resistente das vigas reforçadas com barras de aço. Em relação a deformação limite do reforço, foi considerado que o aço do reforço possui um valor limite de 10‰, para ambas as recomendações normativas, além de adotar a tensão de escoamento como a tensão máxima desenvolvida no reforço.

A Tabela 5.1 e Tabela 5.2 apresentam um resumo das estimativas de capacidade resistente obtidas pelo ACI 440.2R (2017) e pelo *fib* Bulletin 90 (2019), respectivamente.

Tabela 5.1: Estimativa da capacidade resistente à flexão das vigas reforçadas de acordo com as prescrições do ACI 440.2R (2017)

Viga	x (mm)	Bloco de compressão do concreto		Forças				M <sub>ACI</sub> (kN)	Modo de ruptura experimental	M <sub>exp</sub> /M <sub>ACI</sub>
		$\alpha_1$	$\beta_1$	F <sub>f</sub> (kN)	F <sub>s</sub> (kN)	F <sub>c</sub> (kN)	F' <sub>s</sub> (kN)			
VA10	50,9	0,58	0,70	82,0	128,1	-206,8	-3,4	106,3	Flexão – deformação excessiva do aço e esmagamento do concreto	1,13
VA12,5	57,5	0,62	0,70	82,7	201,8	-278,5	-6,0	141,7		1,10
VA16	73,7	0,77	0,72	84,4	337,4	-409,1	-12,7	205,1		1,00
VA20	91,9	0,87	0,74	85,2	532,7	-597,2	-20,7	293,0		1,05
VC10	45,8	0,61	0,70	68,5	128,2	-195,0	-1,7	99,5		1,14
VC12,5	52,1	0,65	0,71	68,5	201,8	-265,8	-4,6	134,7		1,14
VC16	67,6	0,80	0,73	68,5	337,4	-394,0	-12,0	197,6		1,01
VC20	85,4	0,90	0,76	68,5	532,7	-580,1	-21,2	285,5		1,06
<b>Média</b>									<b>1,08</b>	
<b>C.V.</b>									<b>0,05</b>	

Tabela 5.2: Estimativa da capacidade resistente à flexão das vigas reforçadas de acordo com as prescrições do *fib* Bulletin 90 (2019)

Viga	x (mm)	Bloco de compressão do concreto		Forças				M <sub>ACI</sub> (kN)	Modo de ruptura experimental	M <sub>exp</sub> /M <sub>ACI</sub>
		$\alpha_1$	$\beta_1$	F <sub>f</sub> (kN)	F <sub>s</sub> (kN)	F <sub>c</sub> (kN)	F' <sub>s</sub> (kN)			
VA10	59,0	0,49	0,35	82,0	128,2	-203,6	-6,6	105,5	Flexão – deformação excessiva do aço e esmagamento do concreto	1,14
VA12,5	65,4	0,53	0,36	82,7	201,8	-275,3	-9,2	140,7		1,11
VA16	84,9	0,64	0,37	84,4	337,4	-404,2	-17,6	203,0		1,01
VA20	105,2	0,72	0,39	85,2	532,7	-590,9	-27,1	289,0		1,06
VC10	51,5	0,55	0,36	78,3	128,2	-201,6	-4,9	104,1		1,09
VC12,5	57,3	0,59	0,36	78,3	201,8	-272,2	-8,0	139,1		1,10
VC16	75,1	0,70	0,38	78,3	337,4	-397,8	-18,0	201,0		1,00
VC20	94,4	0,77	0,40	78,3	532,7	-581,3	-29,7	287,2		1,05
<b>Média</b>									<b>1,07</b>	
<b>C.V.</b>									<b>0,05</b>	

Os resultados demonstram que as estimativas de capacidade resistente à flexão das vigas reforçadas obtidos pelo ACI e pelo *fib* foram muito próximas, observando relações um pouco maiores de  $M_{exp}/M_{theo}$  para os resultados das vigas reforçadas com laminados de PRFC obtidos pelo ACI. Isso ocorre, pois, a recomendação americana considera uma deformação limite menor para o laminado de PRFC.

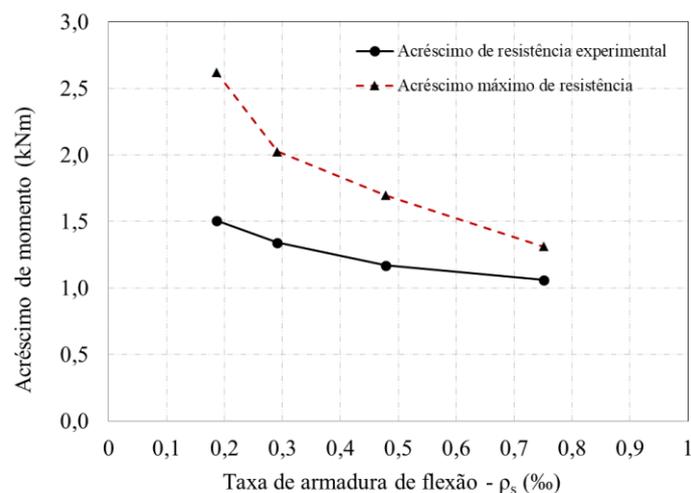
Todos os resultados encontrados foram considerados a favor da segurança, com resultados da relação  $M_{exp}/M_{teo}$  acima de 1,0.

Além dos valores próximos obtidos para as capacidades resistentes experimentais e teóricas, os modos de ruptura previstos pelas normas foram verificados nos ensaios. Dessa forma, pode-se concluir que, para as taxas de armadura de flexão utilizadas e os tipos de reforço aplicados, as adaptações de cálculo feitas em ambas as prescrições normativas foram suficientes para obter estimativas seguras.

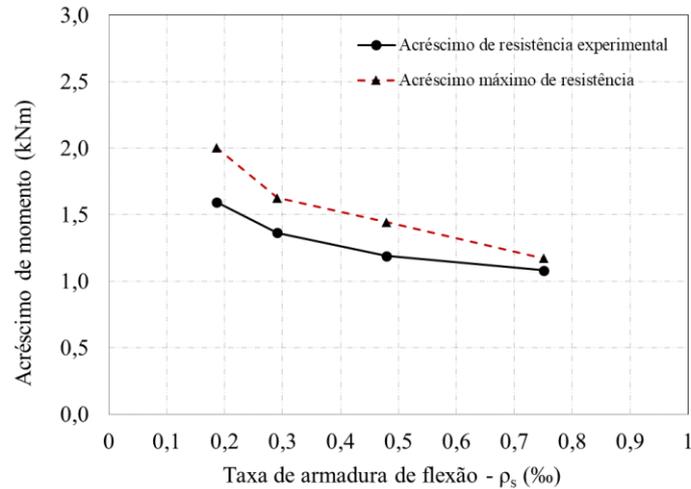
Ainda, conforme observado no trabalho, temos uma menor eficiência do reforço para vigas com maiores taxas de armadura de flexão, visto que o aumento da capacidade resistente proporcionado pelo NSM com barras de aço e NSM com laminados de PRFC torna-se cada vez menor. Isso ocorre, pois, elementos com maiores taxas de armadura de flexão exigem uma quantidade maior de reforço para garantir o mesmo incremento de carga.

Contudo, ao aumentar a quantidade de reforço para garantir o acréscimo de carga esperado, começam a surgir limitações geométricas no detalhamento das vigas, visto que as recomendações normativas trazem especificações de espaçamentos e dimensões mínimas para o projeto das ranhuras.

Para o programa experimental em questão, dada as dimensões das vigas, poderíamos aplicar uma quantidade máxima de quatro barras de 10 mm de diâmetro para as vigas reforçadas com barras de aço e cinco laminados de 2,4 mm de espessura para as vigas reforçadas com laminados de PRFC. Considerando esse cenário de reforço máximo, a Figura 5.1 traz os acréscimos de carga que seriam obtidos para as vigas das diferentes taxas de armadura de flexão (V10, V12,5, V16 e V20).



(a) Laminados de PRFC



(b) Barras de aço

Figura 5.1: Aumento de capacidade resistente proporcionada pelo reforço

Os gráficos indicam que, ao aplicar a quantidade máxima de reforço permitida pelas limitações geométricas das vigas, é possível obter acréscimos de carga maiores do que os observados no programa experimental, que considerou uma taxa de reforço fixa para todas as vigas. Contudo, verifica-se que, mesmo com a quantidade máxima de reforço, o aumento da taxa de armadura de flexão limita o acréscimo de carga proporcionado pelo reforço com barras de aço e laminados de CFRP.

Assim, observa-se que o aumento da taxa de armadura de flexão reduz a eficiência do reforço nas vigas, mesmo para maiores quantidades de reforço, sendo observado que para as vigas armadas com três barras de 20 mm de diâmetro ( $\rho_s = 0,75\%$ ) o acréscimo proporcionado permanece quase inalterado com o aumento da taxa de reforço.

## 6. CONCLUSÕES

Esse estudo experimental avaliou o comportamento à flexão de vigas de concreto armado reforçadas pelo método NSM, com a utilização de laminados de CFRP e barras de aço. A pesquisa abrangeu a análise experimental de 12 vigas, buscando avaliar a influência da taxa de armadura de flexão e do tipo de reforço no comportamento e na capacidade resistente dos elementos, comparando os resultados do dimensionamento das estimativas teóricas com os resultados experimentais.

Os principais pontos observados neste estudo foram:

- A técnica NSM para reforço à flexão de vigas de concreto armado mostrou-se eficaz para todos os elementos ensaiados, independentemente do tipo de reforço e da taxa de armadura de flexão, atingindo acréscimos de carga de 6% a 51% para as vigas reforçadas com laminados de PRFC e de 8% a 59% para as vigas reforçadas com barras de aço;
- Para as taxas de armadura de flexão mais altas foram observados acréscimos reduzidos da capacidade resistente, visto que para atingir incrementos mais significativos seria necessário utilizar uma quantidade maior de reforço. Contudo, dada as limitações geométricas para o detalhamento do reforço nas vigas, observa-se que mesmo ao utilizar a taxa máxima de reforço permitida para o dimensionamento, os acréscimos não se mostram relevantes para as vigas com taxas de armadura maior, sendo limitados a 31% para as vigas reforçadas com laminados de PRFC e 17% para as vigas reforçadas com barras de aço;
- Para todas as taxas de armadura de flexão avaliadas, o tipo de reforço não influenciou no padrão de fissuração das vigas e, dessa forma, todas as vigas com a mesma armadura de flexão, reforçadas ou não, apresentaram um comportamento similar até a fissuração do concreto;
- Comparando os tipos de reforço, as vigas reforçadas com barras de aço apresentaram um comportamento mais rígido do que as vigas reforçadas com laminados de PRFC;
- Em relação à capacidade resistente, não foram observadas diferenças significativas entre os tipos de reforço, sendo a carga última das vigas reforçadas com barras de aço de 2% a 6% maiores que a das vigas reforçadas com laminados de PRFC;

- A utilização de adesivo à base cimentícia e barras de aço para o reforço pela técnica NSM mostrou-se eficiente, demonstrando uma aderência forte e suficiente entre os elementos para fazer com que a viga reforçada apresentasse um comportamento similar ao de uma viga com armadura simples, visto que o reforço escoa junto com a armadura de flexão;
- As estimativas teóricas do *fib* e do ACI foram adequadas para estimar a carga e o modo de ruptura das vigas reforçadas com laminados de PRFC, apresentando resultados eficientes e seguros. Ainda, para as vigas reforçadas com barras de aço, foi necessário realizar algumas adaptações nas formulações teóricas de ambas as prescrições normativas e, conforme os resultados obtidos, elas foram suficientes para uma boa estimativa da capacidade resistente e modo de ruptura.

## 6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Pensando em trabalhos futuros, são apresentadas as seguintes sugestões:

- Avaliação experimental de vigas de concreto armado reforçadas à flexão pelo método do NSM com taxas de armadura de flexão maiores, a fim de investigar o impacto do aumento dessa taxa na eficiência do reforço;
- Avaliação experimental de vigas de concreto armado reforçadas à flexão pelo método do NSM com PRFC utilizando a argamassa de reparo estrutural como adesivo;
- Ensaios de aderência do reforço pelo método do NSM utilizando barra de aço e a argamassa de reparo estrutural, visando a inclusão deste tipo de reforço nas recomendações normativas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMUSALLAN, T.H.; ELSANADEDY, H.M.; AL-SALLOUM, Y.A.; ALSAYED, S.H., A. *Experimental and numerical investigation for the flexural strengthening of RC beams using near-surface mounted steel or GFRP bars*. Construction and Building Materials, Reino Unido. v.40, p.145-161, Março. 2013.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318 – *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. Farmington Hills, EUA, 2011.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 440.2R. *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*. Detroit, EUA, 2017.

AMERICA'S CEMENT MANUFACTURERS (PCA), disponível em <<http://www.cement.org>> . Acesso em: 11 de maio de 2018.

ARDUINI, M.; Di TOMMASO, A.; NANNI, A. *Brittle failure in FRP plates and sheet bonded beams*. ACI Structural Journal, Detroit, v.94, n.4, p.363-370, Julho-Agosto. 1997.

ASPLUND, S. Q. *Strengthening bridge slabs with grouted reinforcement*. ACI Journal, 52(6), 397–406, 1949.

BAKIS, C.E.; BANK, L.C.; BROWN, V.L.; COSENZA, E.; DAVALOS, J.F.; LESKO, J.J.; MACHIDA, A.; RIZKALLA, S.H.; TRIANTIFILLOU, T.C. *Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction-State-of-the-Art Review*. Journal of Composites in Construction, V. 6, No. 2, pp. 73-87, 2002.

BARROS, J.A.O.; DIAS, S.J.E.; LIMA, J.L.T. *Efficacy of CFRP- based techniques for the flexural and shear strengthening of concrete beams*. J. Cem. Concrete Composites. 29 203–217, Portugal, 2007.

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

BEEBY, A.W.; ETMAN, E. *Repair of reinforced concrete beams with corroded reinforcement using CFRP plates*. International Conference Structural Faults and Repair. Londres, Inglaterra, 1999.

BILOTTA, A.; CERONI, F.; NIGRO, E.; PECCE, M. *Efficiency of CFRP NSM strips and EBR plates for flexural strengthening of RC beams and loading pattern influence*. Composite Structures, 2014.

BUYUKOSTURK, O.; HEARING, B. *Failure behavior of pre cracked concrete retrofitted with fiber-reinforced plastic laminates*. International Conference on Structural Faults and Repair, Londres, Inglaterra, 1997.

CASTRO, E.K. *Desenvolvimento de Metodologia para Manutenção de Estruturas de Concreto Armado*. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília. 1994.

CASTRO, E.K. *Reforço em Vigas “T” de Concreto Armado com Vários Tipos de Compósitos em Entalhes no Cobrimento de Concreto (CEC)*. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília. 2005.

COELHO, M.; SILVA, L.; SENA-CRUZ, J.M.; BARROS, J. *Estudo comparativo de diferentes técnicas no reforço à flexão de vigas de betão armado com recurso a CFRP's sob acções monotónicas e de fadiga*. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, Portugal, 2011.

COLLINS, M.P. *Evaluation of shear design procedures for concrete structures*. CSA Technical Committee on Reinforced Concrete Design, Canadá, 2001.

DE LORENZIS, L.; TENG, J. G. *Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures*. Composites Part B Engineering, 38(2), 119–143, 2007.

DE LORENZIS, L.; LUNDGREN, K.; RIZZO, A. *Anchorage Length of Near-Surface-Mounted FRP Bars for Concrete Strengthening—Experimental Investigation and Numerical Modeling*. ACI Structural Journal, V. 101, No. 2, pp. 269-278, Março-Abril, 2004.

DIAS, S.J.E.; BARROS, J.A.O.; AZEVEDO, C. *Comportamento de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos*. Encontro Nacional Betão Estrutural 2012, Lisboa, Portugal, 2012.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. *fib Bulletin 90. Externally Bonded FRP Reinforcement for Concrete Structures*. Lausanne, Suíça, 2019.

FELTRE, Ricardo. *Fundamentos da Química. Química, Tecnologia e Sociedade*. Editora Moderna. São Paulo, Brasil, 2005.

FLEMING, C. J.; KING, G. E. M. *The Development of Structural Adhesives for Three Original Uses in South Africa*. RILEM International Symposium, Synthetic Resins in Building Construction, pp. 75-92, Paris, 1967.

FORTES, A.S.; BARROS, J.A.O. *Desempenho de três técnicas de reforço à flexão de vigas de betão armado com CFRP*. Encontro Nacional Betão Estrutural 2002, Lisboa, Portugal, pp. 233-242, 2002.

GANGARAO, H. V. S.; VIJAY, P. V. *Bending Behavior of Concrete Beams Wrapped with Carbon Fabric*. Journal of Structural Engineering, V. 124, No. 1, pp. 3-10, 1998.

HASSAN, T.; RIZKALLA, S. *Flexural Strengthening of Prestressed Bridge Slabs with FRP Systems*. PCI Journal, V. 47, No. 1, pp. 76-93, 2002.

HASSAN, T.; RIZKALLA, S. *Investigation of Bond in Concrete Structures Strengthened with Near Surface Mounted CFRP Strips*. Journal of Composites for Construction, ASCE, V. 7, No. 3, pp. 248-257, 2003.

HOSEN, A.; JUMAAT, M.Z.; ALENGARAM, U.J.; ISLAM, A.B.M.S; HASHIM, H. *Near Surface Mounted Composites for Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams*. Journal Polymers, MDPI, Suíça, Março, 2016.

IBRAHIM, W.; FATTAH, W.A.; KOTB, A.; MJEED, M.A. *Flexural behavior of RC beams strengthened with CFRP strips*. The 7th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, CICE 2014, August 20–22, Vancouver, Canadá, 6 pp, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO. *Concreto: Material Construtivo Mais Consumido no Mundo*. Revista Concreto e Construções n.53, Brasil, 2009.

KANG, J.Y.; PARK, Y.H.; PARK, J.S.; YOU, Y.J.; JUNG, W.T. *Analytical evaluation of RC beams strengthened with near surface mounted CFRP laminates*. 7th International Symposium, Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS7), Cidade do Kansas, Estados Unidos, pp. 779– 794, 2005.

KHALIFA, A.M. *Flexural performance of RC beams strengthened with near surface mounted*

*CFRP strips*. Alexandria Engineering Journal, Alexandria, Egito, 2016.

KIM, Y.J.; HMIDAN, A.; YAZDANI, S. *Variable Shear Span-Depth Ratios for Reinforced Concrete Beams Strengthened with Various Carbon Fiber-Reinforced Polymer Configurations*. ACI Structural Journal, Vol. 112, No. 5, 2015.

KOTYNIA, R. *Strain Efficiency of Near-Surface Mounted CFRP-Strengthened Reinforced Concrete Beams*. International Conference on Composites in Construction, Lyon, França, Julho 11-13, 2005.

LIM, D.H. *An Experimental Study of Flexural Strengthening Method of Reinforced Concrete Beams with Near Surface Mounted CFRP Strips*. Journal of the Korea Society of Civil Engineers, Vol. 33, No. 1, p.131-136, 2013.

MACHADO, A. P.; MACHADO, B. A. *Reforço de estruturas de concreto armado com sistemas compostos FRP: teoria e prática*. São Paulo: Editora Pini, 2015.

MEIER, U. *Bridge Repair with High Performance Composite Materials*. Material und Technik, V. 4, pp. 125-128, Alemanha, 1987.

MOON, D.Y.; OH, H.S.; ZI, G.S. *Assessment of Flexural Strengthening Behavior Using the Stirrup-Cutting Near Surface Mounted (CNSM) CFRP strip*. Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol. 16, No. 6, pp.102-112, 2005.

MORAES NETO, B. N. *Comportamento à punção de lajes lisas em concreto reforçado com fibras de aço sob carregamento simétrico*. Tese de doutorado em estruturas e construção civil departamento de engenharia civil e ambiental. 2013.

NANNI, A. *Concrete Repair with Externally Bonded FRP Reinforcement*. Concrete International, V. 17, No. 6, pp. 22-26, Junho, 1995.

ROSTASY, F. S. *Bonding of Steel and GFRP Plates in the Area of Coupling Joints*. Talbrücke Kattenbusch. Research Report No. 3126/1429, Federal Institute for Materials Testing, Braunschweig, Alemanha, 1987.

SAADATMANESH, H.; EHSANI, M. R. *RC beams strengthened with GRFP plates*. Journal of Structural Engineering, ASCE, v.117, n.11, p.3417-3433, Nova Iorque, Estados Unidos, Novembro, 1991.

SENA-CRUZ, J.; BARROS, J.; BIANCO, V.; BILOTTA, A.; BOURNAS, D.; CERONI, F.; DALFRÉ, G.; KOTYNIA, R.; MONTI, G.; NIGRO<sup>[1]</sup>AND, E.; TRIANTAFILLOU, T. Design Procedures<sup>[1]</sup>for the Use of Composites in Strengthening of Reinforced Concrete Structures,<sup>[1]</sup>RILEM State-of-the-Art, Reports 19, Chapter 8, 2016.

SEO, S.; CHOI, K.; KWON, Y.; LEE, K. *Flexural Strength of RC Beam Strengthened by Partially De-bonded Near Surface-Mounted FRP Strip*. International Journal of Concrete Structures and Materials Vol.10, No.2, p.149–161, 2016.

STRATEGIC DEVELOPMENT COUNCIL. *A Vision for the Concrete Repair, Protection and Strengthening Industry*. Vision 2020, Baltimore, Estados Unidos, 2006.

TENG, J. G.; SMITH, S. T.; YAO, J.; CHEN, J. F. *Intermediate Crack Induced Debonding in RC Beams and Slabs*. Construction and Building Materials, V. 17, No. 6-7, pp. 447-462, 2001.

TENG, J. G.; LU, X. Z.; YE, L. P.; JIANG, J. J. *Recent Research on Intermediate Crack Induced Debonding in FRP Strengthened Beams*. Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Composite Materials for Bridges and Structures, Calgary, Canadá, 2004.

TRIANANTAFILLOU, T. *Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy-bonded FRP composites*. ACI Structural Journal, Detroit, v.95, n.2, p.107-115, Março-Abril, 1998.

WOLF, R.; MIESSLER, H. J. *HLV-Spannglieder in der Praxis*. Erfahrungen Mit Glasfaserverbundstaben, Beton, 2, pp. 47-51, Alemanha, 1989.

YAMAGUCHI, T; KATO, Y.; NISHIMURA, T.; UOMOTO, T. *Creep Rupture of FRP Rods Made of Aramid, Carbon and Glass Fibers*. Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), V. 2, pp 179-186, Japan Concrete Institute, Tóquio, Japão, 2001.

YOST, J.R.; GROSS, S.P.; DINEHART, D.W.; MILDENBERG, J.J. *Flexural Behavior of Concrete Beams Strengthened with Near-Surface-Mounted CFRP Strips*. ACI Structural Journal, Vol. 104, No. 4, 2007.