

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA DE VIGAS DE CONCRETO
ARMADO REFORÇADAS À FLEXÃO COM PRFC E BARRAS DE AÇO PELO
MÉTODO *NEAR SURFACE MOUNTED* (NSM)**

RENATA SOARES PIAZZA DAL PONT

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

BRASÍLIA / DF: JANEIRO – 2023

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

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA DE VIGAS DE
CONCRETO ARMADO REFORÇADAS À FLEXÃO COM PRFC E
BARRAS DE AÇO PELO MÉTODO *NEAR SURFACE MOUNTED* (NSM)**

RENATA SOARES PIAZZA DAL PONT

ORIENTADOR: MARCOS HONORATO DE OLIVEIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

PUBLICAÇÃO:
BRASÍLIA-DF
JANEIRO 2023

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

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA DE VIGAS DE CONCRETO
ARMADO REFORÇADAS À FLEXÃO COM PRFC E BARRAS DE AÇO
PELO MÉTODO *NEAR SURFACE MOUNTED* (NSM)**

RENATA SOARES PIAZZA DAL PONT

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. Guilherme Sales Soares de Azevedo Melo, *Ph.D* (UnB)
(Examinador interno)

Prof. Monica Regina Garcez, *D.Sc* (UFRGS)
(Examinador externo)

BRASÍLIA/DF, 31 DE JANEIRO DE 2023

FICHA CATALOGRÁFICA

DAL PONT, RENATA SOARES PIAZZA

Análise Experimental da Resistência de Vigas de Concreto Armado Reforçadas à Flexão com PRFC e Barras de Aço pelo Método *Near Surface Mounted* (NSM) [Distrito Federal] 2022.

xxiv, 115p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2022)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|-----------------------------|-------------------------|
| 1. NSM | 2. Reforço à flexão |
| 3. Vigas de concreto armado | 4. Análise Experimental |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (Mestre) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DAL PONT, R.S.P. (2022). Análise Experimental da Resistência de Vigas de Concreto Armado Reforçadas à Flexão com PRFC e Barras de Aço pelo Método *Near Surface Mounted* (NSM). Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 93p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Renata Soares Piazza Dal Pont

TÍTULO: Análise Experimental da Resistência de Vigas de Concreto Armado Reforçadas à Flexão com PRFC e Barras de Aço pelo Método *Near Surface Mounted* (NSM)

GRAU: Mestre em Estruturas e Construção Civil ANO: 2023

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final 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.

Renata Soares Piazza Dal Pont
SQSW 303 Bloco A Apartamento 201
CEP: 70.673-301 Brasília – DF – Brasil
e-mail: renatapiazza3@hotmail.com

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a Deus e a minha família

*“Se perdes o sentido sobrenatural da tua vida,
a tua caridade será filantropia;
a tua pureza, decência;
a tua mortificação, bobice;
as tuas disciplinas, látigo;
e todas as tuas obras, estéreis.”*

São Josemaria Escrivá

AGRADECIMENTOS

Essa dissertação de mestrado é fruto de uma longa caminhada, repleta de desafios, os quais só foram superados com a ajuda de pessoas incríveis que estiveram ao meu lado nesses longos anos de pesquisa.

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus. Ele que nunca me abandonou, me deu a Graça de continuar firme nessa jornada, me levantou quando eu mais precisei. Toda honra e toda glória a Ti!

Agradeço a minha família: meu pai Valnei, minha mãe Lucivânia e minha irmã Gabriela. Vocês sempre foram minha base! Obrigada por sempre estarem ao meu lado e me ajudarem em todas as inúmeras tarefas desse mestrado... seja me acompanhar a noite para ir molhar as vigas ou para levar uma marmita para mim no laboratório. Sem o apoio de vocês com certeza teria sido muito mais difícil. Obrigada sempre por todo o cuidado e amor, vocês são o meu maior presente.

Agradeço ao meu orientador, Marcos Honorato de Oliveira, com quem eu tive a oportunidade e o prazer de trabalhar desde a graduação. Foram muito obstáculos superados nesses oito anos que trabalhamos juntos, que com certeza são aprendizados de uma vida inteira! Obrigada pela paciência, por escutar os desabafos (que não foram poucos) e por toda a sua ajuda.

Agradeço também às parceiras de laboratório mais incríveis que pude ter: Brunna, Juçara, Kleiça, Laura e Lorrayne. Só a gente sabe o que viveu naquele laboratório! Com certeza foi a parte mais desafiadora desse mestrado e, por isso, palavras nunca serão suficientes para agradecer o que vocês fizeram por mim! Eu, com certeza, não estaria aqui escrevendo esses agradecimentos se não tivesse tido o apoio, amizade e parceria de vocês durante todo o programa experimental. Muito obrigada!

Agradeço também aos meus amigos Patrícia, Rafael, Isabela, Luiz, Luna, Ana, Bruna, Sophia, Felipe, Victor, Marcos, Bianca, Ana Paula, Manoel e Nataniel. Esse pessoal também lutou junto comigo! Me ajudaram cada um da forma que podiam, seja numa faxina no laboratório, na hora da concretagem, terminar de preparar uma viga, ou até mesmo naquele colo amigo. Quando eu gritei, eles sempre me salvaram! Sou muito grata por ter amigos tão incríveis como vocês! Muito obrigada!

Agradeço também ao Grupo de Estudos de Tecnologias da Engenharia Civil (GETEC-UnB) por todas as oportunidades que me proporcionou dentro e fora do ambiente universitário e amizades que fiz e também aos meus queridos filhotes (Federico, Malu, Vini, Marcelo e Lael), que me ajudaram e muito a crescer como profissional! Vocês sempre terão um lugar muito especial no meu coração.

Por último, agradeço a MC Bauchemie pela doação dos materiais para a execução do reforço, a Ciplan Cimento pela doação do concreto e ao Eng. Renato Cortopassi, dono da Kali Engenharia, pelas contribuições técnicas, bem como o apoio financeiro na aquisição dos materiais e mão de obra especializada para a execução do reforço.

RESUMO

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA RESISTÊNCIA DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS À FLEXÃO COM PRFC E BARRAS DE AÇO PELO MÉTODO *NEAR SURFACE MOUNTED* (NSM)

Autor: Renata Soares Piazza Dal Pont

Orientador: Marcos Honorato de Oliveira

Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, 31 de janeiro de 2023

Um programa experimental foi realizado para investigar o comportamento a flexão de vigas reforçadas pela técnica do NSM usando barras de aço e adesivo de base cimentícia e laminados de PRFC e resina de base epóxi. Nove vigas foram ensaiadas, sendo uma de referência, quatro vigas reforçadas com aço e quatro vigas reforçadas com PRFC, variando a taxa de reforço e mantendo a taxa de armadura de flexão constante. Os resultados experimentais mostram que ambos os tipos de reforços apresentaram acréscimos de capacidade resistente muito semelhantes, porém as vigas reforçadas com aço tiveram um comportamento mais rígido, apresentando cargas de escoamento maiores que as vigas reforçadas com CRFP. Além disso, ao aumentar a taxa de reforço, houve o aumento da capacidade resistente da viga e da rigidez. Comparando os resultados experimentais com os resultados estimados pelas formulações teóricas do ACI 440.2R (2017) e do *fib* Bulletin 90 (2019), pode-se concluir que ambas apresentaram resultados satisfatórios tanto para prever o modo de ruptura quanto para a carga última da viga.

Palavras-chave: laminados de PRFC; barras de aço; reforço à flexão; vigas de concreto armado; Adesivo de base cimentícia; Resultados experimentais.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE FLEXURAL RESISTANCE OF RC BEAMS STRENGTHENED WITH PRFC AND STEEL BARS USING THE NEAR SURFACE MOUNTED METHOD (NSM)

Author: Renata Soares Piazza Dal Pont
Supervisor: Marcos Honorato de Oliveira
Postgraduate Program in Structures and Civil Construction
Brasília, January 31st, 2023

Experimental tests were performed to investigate the flexural behavior of beams strengthened with the NSM technique, using steel bars and cement-based adhesive and PRFC laminates with epoxy-based resin. Nine beams were tested, one beam was used as reference, four beams were flexurally strengthened using different percentages of steel bars, and four beams were flexurally strengthened with varying rates of PRFC laminates. The experimental results show that both types of strengthening presented similar increases in strength. However, the beams strengthened with steel bars had a stiffer behavior, offering higher yield loads than those strengthened with CRFP. In addition, by raising the strengthening ratio, there was an increase in the strength and stiffness of the beam. Comparing the experimental results with the results estimated using the equations of ACI 440.2R (2017) and *fib* Bulletin 90 (2019), it can be concluded that both could estimate the failure mode and the ultimate load of the tested beams satisfactorily.

Keywords: PRFC laminates; Steel bars; Flexural strengthening; RC beams; Cement-based Adhesive; Experimental results

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2. MOTIVAÇÃO	4
1.3. OBJETIVOS.....	5
1.4. METODOLOGIA	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1. PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DAS VIGAS REFORÇADAS PELO MÉTODO NSM.....	6
2.1.1. Taxa de armadura de flexão	6
2.1.2. Taxa de reforço.....	6
2.1.3. Resistência à compressão do concreto	7
2.1.4. Altura útil da viga.....	7
2.1.5. Disposição do reforço.....	7
2.2. MECANISMOS DE DESCOLAMENTO PARA SISTEMAS DE FRP PELO MÉTODO NSM	8
2.3. MECANISMO DE RUPTURA À FLEXÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS PELO MÉTODO NSM.....	10
2.4. MODOS DE RUPTURA DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS À FLEXÃO PELO MÉTODO NSM	11
2.5. PESQUISAS SOBRE VIGAS REFORÇADAS À FLEXÃO PELO MÉTODO NSM COM PRFC	15
2.5.1. FORTES <i>et al.</i> (2002).....	15
2.5.2. YOST <i>et al.</i> (2007).....	17
2.5.3. DIAS <i>et al.</i> (2012).....	18
2.5.4. BILLOTA <i>et al.</i> (2015)	20

2.5.5. SEO <i>et al.</i> (2016).....	22
2.6. PESQUISAS SOBRE VIGAS REFORÇADAS À FLEXÃO PELO MÉTODO NSM COM BARRAS DE AÇO	24
2.6.1. CASTRO (2005).....	24
2.6.2. PATEL <i>et al.</i> (2019).....	26
2.6.3. HOSEN <i>et al.</i> (2016).....	27
2.6.4. ALMUSSALAM <i>et al.</i> (2012)	29
2.7. PESQUISAS SOBRE VIGAS REFORÇADAS À FLEXÃO PELO MÉTODO NSM COM ADESIVO DE BASE CIMENTÍCIA	32
2.7.1. SAEED <i>et al.</i> (2018).....	32
2.7.2. AL-ABDWAIS e AL-MAHAIDI (2020).....	33
2.8. RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS.....	35
2.8.1. ACI 440.2R (2017).....	35
2.8.2. <i>fib</i> Bulletin 90 (2019)	37
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	42
3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	42
3.2. CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS	43
3.2.1. Detalhamento das armaduras das vigas.....	44
3.2.2. Disposição do reforço das vigas	46
3.2.3. Resistência à flexão das vigas	48
3.2.3.1. Viga de Referência	48
3.2.3.2. Vigas reforçadas com PRFC.....	49
3.2.3.3. Vigas reforçadas com barra de aço.....	49
3.2.4. Resistência ao cisalhamento das vigas	50
3.3. PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS	51
3.3.1. Formas	51
3.3.2. Ancoragem mecânica das barras de flexão	52

3.3.3. Concreto	52
3.3.3.1. Características do concreto e do processo de cura.....	52
3.3.3.2. Propriedades mecânicas do concreto	53
3.3.4. Aço	55
3.3.4.1. Especificações do aço	55
3.3.4.2. Ensaio do aço à tração	55
3.3.5. Polímero reforçado com fibra de carbono (PFRC).....	55
3.3.6. Argamassa de reparo estrutural	56
3.3.6.1. Especificações do Fabricante.....	56
3.3.6.2. Propriedades mecânicas da argamassa de reparo estrutural	56
3.3.7. Resina	56
3.4. INSTRUMENTAÇÃO.....	57
3.4.1. Deslocamentos verticais	57
3.4.2. Deformações nas armaduras de flexão e de cisalhamento	57
3.4.2.1. Disposição dos extensômetros das armaduras de flexão e cisalhamento	57
3.4.2.2. Processo de colagem dos extensômetros nas armaduras de flexão e cisalhamento	58
3.4.3. Deformações no reforço	59
3.4.3.1. Disposição dos extensômetros no reforço	59
3.4.3.2. Processo de colagem dos extensômetros no reforço.....	60
3.4.4. Deformações no concreto	61
3.4.4.1. Disposição dos extensômetros no concreto	61
3.5. PROCESSO EXECUTIVO DO REFORÇO DAS VIGAS	61
3.5.1. Abertura das ranhuras das vigas	61
3.5.2. Corte do laminado de PRFC.....	65
3.5.3. Execução do reforço das vigas com PRFC.....	66
3.5.4. Execução do reforço das vigas com barra de aço.....	67

3.6. SISTEMA DE ENSAIO	69
4. RESULTADOS.....	71
4.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS	71
4.1.1. Aço	71
4.1.2. Concreto	72
4.1.3. Argamassa	72
4.2. CARGAS ÚLTIMAS E MODO DE RUPTURA DAS VIGAS	73
4.3. DEFORMAÇÕES NAS ARMADURAS DE FLEXÃO	78
4.4. DEFORMAÇÕES NAS ARMADURAS DE CISALHAMENTO.....	84
4.5. DEFORMAÇÕES NO REFORÇO.....	88
4.6. DEFORMAÇÕES NO CONCRETO.....	93
4.7. DESLOCAMENTOS VERTICAIS DAS VIGAS	97
5. AVALIAÇÃO DAS RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS.....	103
6. CONCLUSÕES	106
6.1. INFLUÊNCIA DO TIPO DE REFORÇO	106
6.2. INFLUÊNCIA DA TAXA DE REFORÇO	107
6.3. COMPARAÇÃO ENTRE AS ESTIMATIVAS TEÓRICAS E OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	107
6.4. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	108
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
Tabela 2.1: Valores experimentais de cargas de ruptura e serviço de FORTES <i>et al.</i> (2002).	16
Tabela 2.2: Resultados experimentais de YOST <i>et al.</i> (2007).....	18
Tabela 2.3: Resultados experimentais obtidos de DIAS <i>et al.</i> (2012).....	19
Tabela 2.4: Dados do programa experimental de BILLOTA <i>et al.</i> (2015).....	20
Tabela 2.5: Resultados experimentais de BILLOTA <i>et al.</i> (2015).....	21
Tabela 2.6: Dados do programa experimental de SEO <i>et al.</i> (2016).....	22
Tabela 2.7: Resultados experimentais de SEO <i>et al.</i> (2016).....	23
Tabela 2.8: Resultados experimentais de CASTRO (2005).....	25
Tabela 2.9: Resultados experimentais de PATEL <i>et al.</i> (2019).....	27
Tabela 2.10: Resultados experimentais de HOSEN <i>et al.</i> (2016).....	28
Tabela 2.11: Resultados experimentais de HOSEN <i>et al.</i> (2016).....	30
Tabela 2.12: Resultados experimentais de SAEED <i>et al.</i> (2018).....	32
Tabela 2.13: Resultados experimentais de ABDWAIS e AL-MAHAIDI (2020).....	34
Tabela 3.1: Programa experimental proposto.	42
Tabela 3.2: Cálculo da resistência à flexão da viga de referência de acordo com as prescrições da ABNT NBR 6118 (2014).....	48
Tabela 3.3: Cálculo da resistência à flexão das vigas reforçadas com PRFC de acordo com as prescrições do ACI 440.2R (2017).....	49
Tabela 3.4: Cálculo da resistência à flexão das vigas reforçadas com PRFC de acordo com as prescrições do <i>fib</i> Bulletin 90 (2019).....	49
Tabela 3.5: Cálculo da resistência à flexão das vigas reforçadas com aço de acordo com as prescrições do ACI 440.2R (2017).....	50
Tabela 3.6: Cálculo da resistência à flexão das vigas reforçadas com aço de acordo com as prescrições do <i>fib</i> Bulletin 90 (2019).....	50
Tabela 3.7: Cálculo da resistência ao cisalhamento.....	50
Tabela 4.1: Propriedades mecânicas do aço utilizado nas vigas.....	72
Tabela 4.2: Propriedades mecânicas do concreto utilizado nas vigas.....	72
Tabela 4.3: Propriedades mecânicas da argamassa polimérica utilizada nas vigas.	73
Tabela 4.4: Resultados experimentais das vigas ensaiadas.....	73
Tabela 4.5: Resultados experimentais das vigas ensaiadas.....	93

Tabela 5.1: Estimativa da capacidade resistente à flexão das vigas reforçadas de acordo com as prescrições do ACI 440.2R (2017).....	104
Tabela 5.2: Estimativa da capacidade à flexão das vigas reforçadas de acordo com as prescrições do fib Bulletin 90 (2019).....	104

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1.1: Diagramas de tensão e deformação para diferentes tipos de PRF unidirecionais e aço [<i>fib</i> Bulletin 90 (2019)].	1
Figura 1.2: Viga reforçada à flexão com técnica EBR [http://techniques.com.br/].	2
Figura 1.3: Laje reforçada com técnica NSM [<i>fib</i> Bulletin 90 (2019)].	2
Figura 1.4: Comparação das técnicas de reforço estrutural [COELHO <i>et al.</i> (2011)].	3
Figura 2.1: Gráfico de Acréscimo de Carga x Porcentagem de reforço de PRFC [DIAS <i>et al.</i> (2012)].	6
Figura 2.2 : Relação da carga última e a razão da profundidade da ranhura e seu espaçamento [Kang <i>et al.</i> (2005)].	8
Figura 2.3: Descolamento na interface epóxi-FRP.	9
Figura 2.4: Descolamento na interface epóxi-concreto.	9
Figura 2.5: Fendilhamento do epóxi.	10
Figura 2.6: Ruptura do concreto na borda [<i>fib</i> Bulletin 90 (2019)].	10
Figura 2.7: Mecanismo de ruptura de vigas de concreto armado reforçadas pelo método NSM - Adaptado do ACI 440.2R (2017)].	10
Figura 2.8: Ruptura dada pelo esmagamento do concreto antes do escoamento do aço [Pinto (2018)].	12
Figura 2.9: Ruptura dada pelo escoamento do aço seguida pelo esmagamento do concreto [Pinto (2018)].	12
Figura 2.10: Ruptura dada pelo escoamento do aço seguida pela ruptura do PRF [Pinto (2018)].	13
Figura 2.11: Ruptura dada pelo descolamento do PRF [Pinto (2018)].	13
Figura 2.12: Ruptura dada pela delaminação do cobrimento [Pinto (2018)].	13
Figura 2.13: Seção transversal das vigas de FORTES <i>et al.</i> (2002)	15
Figura 2.14: Detalhamento da seção longitudinal das vigas de FORTES <i>et al.</i> (2002).	16
Figura 2.15: Geometria e distribuição do reforço das vigas de YOST <i>et al.</i> (2007).	17
Figura 2.16: Geometria das vigas propostas por DIAS <i>et al.</i> (2012)	18
Figura 2.17: Seção transversal das vigas reforçadas de DIAS <i>et al.</i> (2012)	19
Figura 2.18: Seções transversais das vigas de BILLOTA <i>et al.</i> (2015)	21
Figura 2.19: Geometria das vigas de SEO <i>et al.</i> (2016)	22

Figura 2.20: Geometria das vigas de CASTRO (2005)	25
Figura 2.21: Características do programa experimental de HOSEN <i>et al.</i> (2016).....	28
Figura 2.22: Esquema de carregamento das vigas ensaiadas	29
Figura 2.23: Seção transversal das vigas ensaiadas	30
Figura 2.24: Características das vigas de SAEED <i>et al.</i> (2018).....	32
Figura 2.25: Carga <i>vs</i> deslocamento das vigas ensaiadas por SAEED <i>et al.</i> (2018).	33
Figura 2.26: Características das vigas ensaiadas por ABDWAIS e AL-MAHAIDI (2020)...	34
Figura 2.27: Fluxograma para o cálculo da capacidade resistente à flexão de vigas reforçadas com PRF pelo NSM de acordo com as prescrições do <i>fib</i> Bulletin 90 (2019).....	40
Figura 3.1: Seção transversal e longitudinal das vigas ensaiadas.	44
Figura 3.2: Detalhamento longitudinal das armaduras das vigas ensaiadas.	44
Figura 3.3: Detalhamento transversal das armaduras das vigas ensaiadas.	45
Figura 3.4: Detalhe do sistema de ancoragem adotado nas vigas do programa experimental.	45
Figura 3.5: Detalhamento do reforço das vigas ensaiadas.	46
Figura 3.6: Dimensões mínimas das ranhuras [Fonte: ACI 440.2R (2017)]......	46
Figura 3.7: Dimensões das ranhuras das vigas reforçadas. (a) lâminas de PRFC (b) barras de aço.	47
Figura 3.8: Disposição das ranhuras das vigas.....	48
Figura 3.9: Formas utilizadas para a concretagem dos espécimes.....	51
Figura 3.10: Soldagem da chapa de ancoragem mecânica.....	52
Figura 3.11: Resultado do ensaio de determinação da consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone.	53
Figura 3.12: Cura das vigas do programa experimental.....	53
Figura 3.13: Ensaio de caracterização do concreto.	54
Figura 3.14: Ensaio de determinação do módulo de elasticidade do concreto.	54
Figura 3.15: Posicionamento dos LVDTs.	57
Figura 3.16: Posicionamento dos extensômetros nas armaduras de flexão e de cisalhamento.	58
Figura 3.17: Posicionamento dos extensômetros na barra de flexão	58
Figura 3.18: Etapas do processo de colagem dos extensômetros.....	59
Figura 3.19: Posicionamento dos extensômetros no reforço.....	60
Figura 3.20: Posicionamento dos extensômetros no laminado de PRFC.....	61
Figura 3.21: Posicionamento dos extensômetros no concreto.	61

Figura 3.22: Abertura das ranhuras nas vigas.	62
Figura 3.23: Abertura da ranhura para o posicionamento do extensômetro do laminado de PRFC.	62
Figura 3.24: Abertura das ranhuras das vigas reforçadas com barra de aço.	63
Figura 3.25: Disposições dos ganchos para a fixação das barras do reforço.	63
Figura 3.26: Execução dos furos para posicionamento dos ganchos para fixação da barra durante o reforço.	64
Figura 3.27: Aspecto final das ranhuras para a execução do reforço. (a)	
Vigas reforçadas com barras de aço (b) Vigas reforçadas com laminado de PRFC.	64
Figura 3.28: Vigas posicionadas para a execução do reforço.	65
Figura 3.29: Corte do laminado para obtenção de tiras de 10 mm de largura.	66
Figura 3.30: Procedimento da execução do reforço das vigas com PRFC.	67
Figura 3.31: Procedimento da execução do reforço das vigas com barra de aço.	69
Figura 3.32: Representação do esquema estático de carregamento das vigas	70
Figura 3.33: Representação dos diagramas de momento fletor e esforço cortante das vigas. .	71
Figura 4.1: Vista frontal do trecho central da viga VR1 após o ensaio.	74
Figura 4.2: Vista frontal do trecho central da viga VC2 após o ensaio.	74
Figura 4.3: Vista frontal do trecho central da viga VC3 após o ensaio.	74
Figura 4.4: Vista frontal do trecho central da viga VC4 após o ensaio.	74
Figura 4.5: Vista frontal do trecho central da viga VC5 após o ensaio.	75
Figura 4.6: Vista frontal do trecho central da viga VA2 após o ensaio.	75
Figura 4.7: Vista frontal do trecho central da viga VA3 após o ensaio.	75
Figura 4.8: Vista frontal do trecho central da viga VA4 após o ensaio.	75
Figura 4.9: Vista frontal do trecho central da viga VA5 após o ensaio.	76
Figura 4.10: Ranhuras da viga VA5 após o ensaio.	77
Figura 4.11: Deslocamento da argamassa em regiões sem fissuras.	77
Figura 4.12: Deslocamento da argamassa próximo ao apoio da viga.	77
Figura 4.13 – Efeito da taxa de reforço no aumento da capacidade resistente	78
Figura 4.14: Deformações na armadura de flexão da viga VR1.	78
Figura 4.15: Deformações na armadura de flexão da viga VC2.	79
Figura 4.16: Deformações na armadura de flexão da viga VC3.	79
Figura 4.17: Deformações na armadura de flexão da viga VC4.	79
Figura 4.18: Deformações na armadura de flexão da viga VC5.	80

Figura 4.19: Deformações na armadura de flexão da viga VA2.....	80
Figura 4.20: Deformações na armadura de flexão da viga VA3.....	80
Figura 4.21: Deformações na armadura de flexão da viga VA4.....	81
Figura 4.22: Deformações na armadura de flexão da viga VA5.....	81
Figura 4.23: Deformações do extensômetro EF1 das vigas reforçadas com barras de aço.	82
Figura 4.24: Deformações do extensômetro EF1 das vigas reforçadas com PRFC.....	82
Figura 4.25: Deformações do extensômetro EF1 das vigas VA2 e VC2.....	83
Figura 4.26: Deformações do extensômetro EF1 das vigas VA3 e VC3.....	83
Figura 4.27: Deformações do extensômetro EF2 das vigas VA4 e VC4.....	83
Figura 4.28: Deformações do extensômetro EF1 das vigas VA5 e VC5.....	84
Figura 4.29: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VR1.....	85
Figura 4.30: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VC2.....	85
Figura 4.31: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VC3.....	85
Figura 4.32: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VC4.....	86
Figura 4.33: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VC5.....	86
Figura 4.34: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VA2.....	86
Figura 4.35: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VA3.....	87
Figura 4.36: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VA4.....	87
Figura 4.37: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VA5.....	87
Figura 4.38: Deformações no reforço da viga VC2.....	88
Figura 4.39: Deformações no reforço da viga VC3.....	89
Figura 4.40: Deformações no reforço da viga VC4.....	89
Figura 4.41: Deformações no reforço da viga VC5.....	89
Figura 4.42: Deformações no reforço da viga VA2.....	90
Figura 4.43: Deformações no reforço da viga VA3.....	90
Figura 4.44: Deformações no reforço da viga VA4.....	90
Figura 4.45: Deformações no reforço da viga VA5.....	91
Figura 4.46: Deformações no reforço das vigas reforçadas com barra de aço.....	91
Figura 4.47: Deformações no reforço das vigas reforçadas com laminado de PRFC.....	92
Figura 4.48: Deformações na superfície do concreto da viga VR1.....	93
Figura 4.49: Deformações na superfície do concreto da viga VC2.....	94
Figura 4.50: Deformações na superfície do concreto da viga VC3.....	94
Figura 4.51: Deformações na superfície do concreto da viga VC4.....	94

Figura 4.52: Deformações na superfície do concreto da viga VC5.	95
Figura 4.53: Deformações na superfície do concreto da viga VA2.	95
Figura 4.54: Deformações na superfície do concreto da viga VA3.	95
Figura 4.55: Deformações na superfície do concreto da viga VA4.	96
Figura 4.56: Deformações na superfície do concreto da viga VA5.	96
Figura 4.57: Deslocamentos verticais da viga VR1.	97
Figura 4.58: Deslocamentos verticais da viga VC2.	97
Figura 4.59: Deslocamentos verticais da viga VC3.	98
Figura 4.60: Deslocamentos verticais da viga VC4.	98
Figura 4.61: Deslocamentos verticais da viga VC5.	98
Figura 4.62: Deslocamentos verticais da viga VA2.	99
Figura 4.63: Deslocamentos verticais da viga VA3.	99
Figura 4.64: Deslocamentos verticais da viga VA4.	99
Figura 4.65: Deslocamentos verticais da viga VA5.	100
Figura 4.66: Deslocamentos verticais das vigas reforçadas com barra de aço.	100
Figura 4.67: Deslocamentos verticais das vigas reforçadas com PRFC.	101
Figura 5.1: Comparação entre os valores experimentais e teóricos das vigas ensaiadas	105

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
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 da ranhura 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 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;
δ_g	Fator redutor da profundidade da linha neutra para o bloco de tensões equivalente;
g_f	Coefficiente de minoração da deformação de projeto da fibra;
Ψ	Razão entre a profundidade do bloco de tensões equivalente e da linha neutra;
Ψ_f	Fator de redução da resistência do PRF;

ε_{ys}	Deformação de escoamento do aço;
ε_s	Deformação efetiva do aço da armadura inferior;
ε_s'	Deformação efetiva do aço da armadura superior;
ε_c	Deformação no concreto;
ε_c'	Deformação máxima no concreto não confinado, correspondendo à f_c' ;
ε_{cu}	Deformação última do concreto;
ε_f	Deformação no reforço de PRF;
ε_{fd}	Deformação de descolamento no reforço de PRF aderido externamente;
ε_{fe}	Deformação efetiva no reforço de PRF;
ε_{fu}	Deformação de projeto de ruptura no reforço de PRF;
ε_{bi}	Deformação no substrato de concreto no momento de aplicação do reforço de PRF;
κ_m	Coefficiente adimensional dependente da forma de ligação para a flexão;
ρ	Taxa de armadura de flexão total da viga antes do reforço;
ρ'	Taxa de armadura de flexão da viga na parte comprimida;
ρ_b	Taxa de armadura balanceada da viga;
ρ_f	Taxa de reforço de PRF;
ρ_r	Taxa de armadura de aço equivalente após o reforço.

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Em estruturas de concreto armado, a deterioração de elementos estruturais, erros de projeto e/ou execução e alterações de sobrecarga de utilização são algumas das causas que podem gerar a necessidade da realização de um reforço estrutural, a fim de garantir níveis adequados de desempenho em serviço. Devido a frequência da necessidade deste tipo de intervenção, ao longo dos anos foram desenvolvidas diversas técnicas e materiais para realizar o reforço estrutural de elementos de concreto de modo a tornar a execução mais simples, rápida e eficiente.

Dessa maneira, os elementos de polímeros reforçados com fibra (PRF) se tornaram um grande atrativo, uma vez que estes são elementos leves, de fácil e rápida instalação, com alta resistência à tração e durabilidade, alta capacidade de deformação e apresentam diversos tamanhos, geometrias e dimensões, possibilitando, assim, sua aplicação em diversas situações e elementos. A Figura 1.1 mostra um comparativo entre os diagramas de tensão-deformação de PRFs e aço.

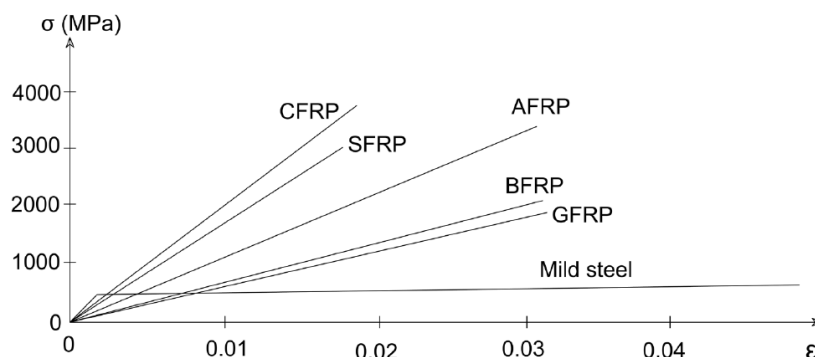


Figura 1.1: Diagramas de tensão e deformação para diferentes tipos de PRF unidirecionais e aço [fib Bulletin 90 (2019)].

Dentre as diversas técnicas de reforço estrutural que surgiram com a utilização de polímero reforçado com fibra de carbono, podemos citar duas principais: o *Externally Bonded Reinforcement* (EBR) e a sua variação, o *Near Surface Mounted* (NSM).

A técnica EBR consiste em colar o PRF, seja em manta ou laminado, externamente ao elemento estrutural a ser reforçado com o auxílio de uma resina adesiva, como mostra a Figura 1.2.



Figura 1.2: Viga reforçada à flexão com técnica EBR [<http://techniques.com.br/>].

A técnica do NSM consiste na instalação de barras ou lâminas de PRF no interior de aberturas longitudinais realizadas na peça estrutural. Estes elementos de reforço são embebidos em uma resina, geralmente à base epóxi, que, no estado endurecido, garante aderência entre este elemento e o substrato de concreto, conforme mostra a Figura 1.3.



Figura 1.3: Laje reforçada com técnica NSM [*fib* Bulletin 90 (2019)].

A aderência entre o elemento de reforço e o substrato de concreto é um ponto chave para a eficiência do método. Esta pode ser afetada pela geometria e dimensões da ranhura, pelas propriedades mecânicas do concreto e do adesivo, além da rugosidade da superfície do substrato, conforme foi observado em ensaios de aderência realizados por Cruz e Barros (2002) e De Lorenzis e Nanni (2002).

Comparando-se as duas técnicas, pode-se concluir que a técnica do EBR, por não conseguir mobilizar toda a resistência à tração devido ao descolamento prematuro, apresenta um desempenho inferior que ao da técnica do NSM. Para melhorar o desempenho da técnica EBR

e evitar esse descolamento prematuro, pode-se utilizar sistemas de ancoragens. A Figura 1.4 apresenta os resultados experimentais realizados por Coelho *et al.* (2011), comparando as técnicas NSM, EBR, EBR com sistema de ancoragem (MF-EBR) e a viga de referência.

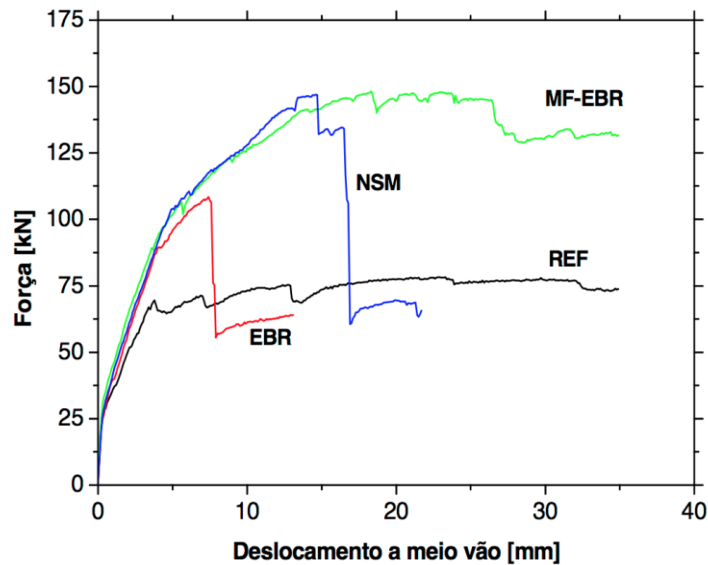


Figura 1.4: Comparação das técnicas de reforço estrutural [COELHO *et al.* (2011)].

Além disso, outra vantagem da técnica do NSM em relação a técnica do EBR é que o concreto em volta do laminado ou barra usada no reforço acaba protegendo este contra danos do ambiente, térmicos e mecânicos.

Ressalta-se que apesar das vantagens do uso do PRF como material de reforço, a barra de aço é uma opção importante a ser considerada devido ao seu baixo custo, alta disponibilidade, boa aderência, ductilidade. Além disso, sua durabilidade quanto à corrosão é um problema que pode ser contornado através de tratamentos disponíveis no mercado. Dessa forma, pesquisas testando reforços com barras de aço pelo método NSM têm sido realizadas, como as Patel *et al.* (2019), Hosen *et al.* (2016) e Almussalan *et al.* (2012).

Outra desvantagem do PRF está relacionada com o seu coeficiente de expansão térmica, que é bem diferente do coeficiente do concreto, podendo reduzir o desempenho conjunto dos materiais em situações de incêndio. Nesse contexto, o uso do FRP como material de reforço deve ser avaliado de uma forma criteriosa considerando-se suas vantagens e desvantagens para cada cenário de aplicação.

A resina à base epóxi, que é normalmente utilizada como o adesivo deste tipo de reforço, de acordo com Al-Bayati *et al.* (2017) e Al-Abdwais e Al-Mahaidi (2020), também apresenta

algumas desvantagens do seu uso, tais como: emissão de vapores tóxicos durante a cura, inflamabilidade, mistura impermeável, irritação da pele dos trabalhadores e perda das propriedades mecânicas da matriz epóxi em temperaturas maiores que a de transição de vidro (60 a 70 °C).

Normalmente esse tipo de adesivo é utilizado devido a sua boa aderência, boa trabalhabilidade e propriedades tixotrópicas, facilitando a execução do reforço, além de, no caso de seu uso combinado com barras de aço, proteger as barras contra a corrosão. Porém, de acordo com Castanheira (1997), que avaliou experimentalmente o melhor sistema de reparos em estruturas contaminadas por cloretos, onde este íon agressivo não pode ser totalmente eliminado, a resina a base epóxi não apresentou um bom desempenho, indicando que seu uso não é aconselhável em ambientes úmidos. Por outro lado, o reparo realizado com argamassa com microssilica e inibidor de corrosão, foi o sistema que apresentou o melhor desempenho.

Dessa forma, o uso de um adesivo de base cimentícia com propriedades tixotrópicas, que dispense o uso de ponte de aderência, com alta resistência inicial e inibidor de corrosão, se mostra uma boa opção de material para o preenchimento da ranhura no NSM.

Neste contexto, este trabalho apresenta resultados de ensaios experimentais em vigas de concreto armado reforçadas à flexão através do método NSM utilizando PRFC e resina à base epóxi e também com barras de aço e adesivo de base cimentícia.

1.2. MOTIVAÇÃO

A utilização de métodos de reforço externamente aderidos tem sido uma prática recorrente, mostrando-se uma técnica simples e eficiente, principalmente ao utilizar polímeros reforçados com fibras.

A respeito da técnica NSM, foram verificadas poucas pesquisas acerca do tema e uma base de ensaios reduzidos sobre o cálculo de elementos utilizando esta técnica de reforço. Portanto, a pesquisa em questão busca trazer mais informações ao meio técnico-científico, a respeito dessa técnica de reforço de execução simples e eficiente.

Além disso, pelo fato da resina a base epóxi e o laminado da fibra de carbono, que são os materiais normalmente utilizados nesta técnica, apresentarem o custo bastante elevado, estes

podem tornar o reforço inviável financeiramente. Por esse motivo, neste trabalho será proposto um novo tipo de reforço pela técnica NSM utilizando barras de aço e argamassa de reparo estrutural.

1.3. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar o comportamento à flexão de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com PRFC e barras de aço utilizando a técnica *Near Surface Mounted* (NSM). Em específico os objetivos podem ser citados como:

- Avaliar experimentalmente o comportamento à flexão de vigas reforçadas pelo método NSM usando barras de aço e argamassa de reparo estrutural como ponte de aderência.
- Avaliar a influência da taxa de reforço de fibra de carbono e de barras de aço embutidas no reforço no comportamento à flexão das vigas.
- Análise comparativa entre as estimativas de capacidade resistente obtidas pelas formulações propostas do ACI 440.2R (2017) e *fib Bulletin* 90 (2019) e os resultados experimentais.

1.4. METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho foram ensaiadas 9 vigas no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília (LABEST-UnB), sendo uma viga de referência e 8 vigas reforçadas pelo método NSM. Todas as vigas possuem as mesmas dimensões e taxa de armadura de flexão, variando-se: taxa de reforço e tipo de reforço.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DAS VIGAS REFORÇADAS PELO MÉTODO NSM

2.1.1. Taxa de armadura de flexão

A taxa de armadura de flexão da viga, dada pela razão entre a área de aço da armadura e a área de concreto influencia na resistência à flexão de vigas de concreto armado reforçadas, uma vez que o mecanismo de ruptura depende da deformação nas armaduras.

Ressalta-se que embora a área da armadura usada como porta-estribo, apenas para fins construtivos, seja desconsiderada no dimensionamento de vigas de concreto armado simples, ela irá influenciar nas deformações e na posição da linha neutra e, por isso, neste trabalho irá ser considerada sua contribuição.

2.1.2. Taxa de reforço

A taxa de reforço com PRFC (ρ_f), dada pela relação entre a área de reforço de fibra e a área de concreto, influencia a capacidade resistente à flexão de vigas de concreto armado reforçadas o mecanismo de ruptura está diretamente relacionado com a deformação deste material.

Dias *et al.* (2012) realizou ensaios em vigas reforçadas à flexão com laminados de PRFC, nas quais a taxa de armadura de flexão foi mantida constante e a taxa de reforço foi variada, de modo a obter uma análise direta da influência do aumento da taxa de reforço no acréscimo da capacidade resistente, ilustrada na Figura 2.1.

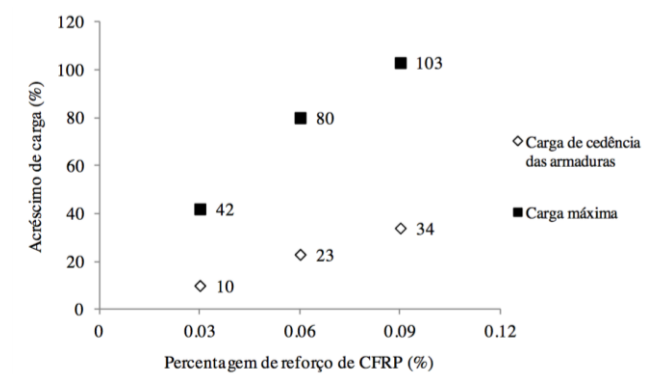


Figura 2.1: Gráfico de Acréscimo de Carga x Porcentagem de reforço de PRFC [DIAS *et al.* (2012)].

Dessa forma, observa-se que a relação entre o acréscimo de carga e o aumento da taxa de reforço ocorrem de forma diretamente proporcional. Além disso, o aumento da taxa de reforço também acarretou um acréscimo da carga de escoamento, proporcionando um maior trecho que atendesse às condições de serviço das vigas, porém em proporção diferente do acréscimo da capacidade resistente.

Ressalta-se que o aumento da taxa de reforço pode levar a uma ruptura prematura da viga por descolamento do reforço, destacamento do cobrimento do reforço ou esmagamento do concreto. Dessa forma, para taxas de reforço altas ou vigas superarmadas, o aumento da taxa de reforço pode não acarretar um acréscimo de capacidade resistente, como observado em Fortes *et al.* (2002).

2.1.3. Resistência à compressão do concreto

A resistência à compressão do concreto está diretamente relacionada às limitações de deformações estabelecidas, além do tamanho do bloco de compressão. De maneira geral, quanto maior a resistência à compressão do concreto, maior será a compressão resistida pelo bloco de compressão. Visto que a definição da altura da linha neutra depende diretamente deste parâmetro, este irá influenciar no valor do momento resistente teórico.

2.1.4. Altura útil da viga

É intuitivo que uma viga de altura útil (d) maior suporte uma carga superior e, dessa forma, apresente uma resistência à flexão superior. Assim, valores maiores de altura útil do elemento proporcionam um momento resistente superior, pois tornam o braço de alavanca entre as resultantes de forças internas maior.

2.1.5. Disposição do reforço

Kang *et al.* (2005) em seu estudo concluíram que 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. Além disso, os autores também observaram que pode haver influência do cobrimento de concreto dependendo da distância do reforço à borda. Os resultados encontrados pelos autores estão ilustrados na Figura 2.2.

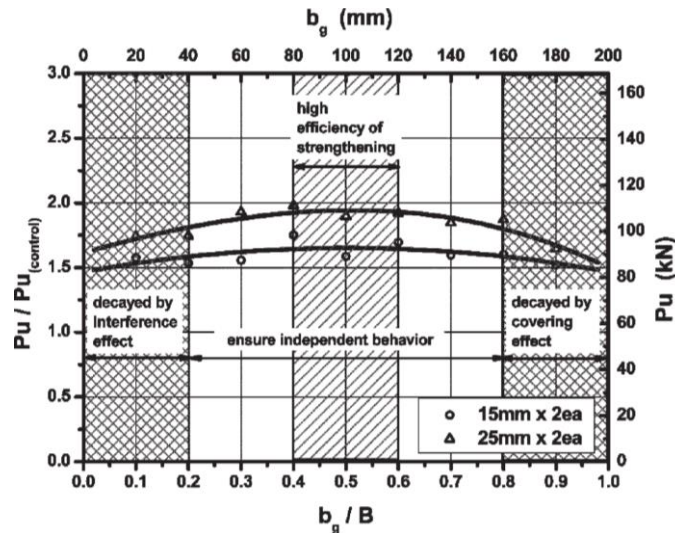


Figura 2.2 : Relação da carga última e a razão da profundidade da ranhura e seu espaçamento [Kang *et al.* (2005)].

Dessa maneira, recomenda-se que haja um espaçamento mínimo entre duas ranhuras adjacentes e uma distância mínima entre a borda e o reforço para que os reforços possam atuar de maneira independente.

2.2. MECANISMOS DE DESCOLAMENTO PARA SISTEMAS DE FRP PELO MÉTODO NSM

Diversos de testes de aderência em elementos de concreto reforçados pelo método NSM com barras ou laminados de FRP foram realizados por diversos pesquisadores, que evidenciaram diferentes tipos de mecanismos de descolamento do FRP, a depender do comprimento aderido, configuração da superfície e geometria (barra circular, barra quadrada ou laminado retangular).

Com base nesses resultados experimentais, o *fib* Bulletin 90 (2019) descreve quatro mecanismos de descolamento do FRP, sendo estes:

- Descolamento na interface epóxi-FRP;
- Descolamento na interface epóxi-concreto;
- Fendilhamento do epóxi;
- Fendilhamento do cobrimento de concreto.

Com relação ao descolamento na interface epóxi-FRP, esse modo de ruptura pode ocorrer tanto por uma ruptura interfacial pura ou por um cisalhamento na coesão do epóxi, conforme mostra

a Figura 2.3. A primeira é crítica para barras lisas ou com pouca rugosidade, ou seja, onde a ancoragem vai depender da adesão entre a barra e o epóxi. Já o segundo é observado em laminados com uma superfície rugosa e em superfícies lisas, especialmente onde o comprimento de ancoragem é menor que o comprimento efetivo de ancoragem. Se o comprimento de ancoragem é maior que o efetivo, esse tipo de ruptura é muito raro para os adesivos estruturais usados atualmente na prática.

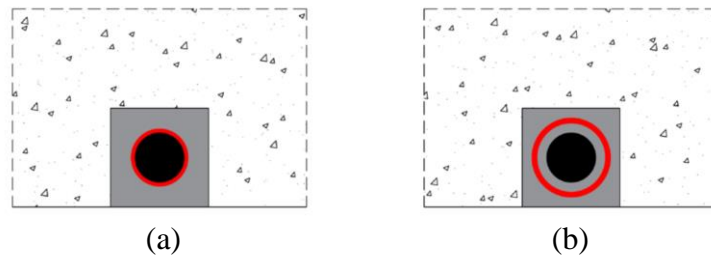


Figura 2.3: Descolamento na interface epóxi-FRP.

(a) ruptura interfacial pura (b) cisalhamento na coesão do epóxi [fib Bulletin 90 (2019)].

O descolamento na interface epóxi-concreto pode ocorrer por uma ruptura interfacial pura ou pelo cisalhamento na coesão do concreto. O primeiro foi observado como crítico em ranhuras pré-moldadas, o que não ocorre em situações práticas e, em geral, para ranhuras com superfícies lisas. Para o segundo tipo de ruptura, ele é mais comum em ranhuras com superfícies rugosas e com comprimento suficiente de aderência. A Figura 2.4 mostra esse tipo de ruptura.

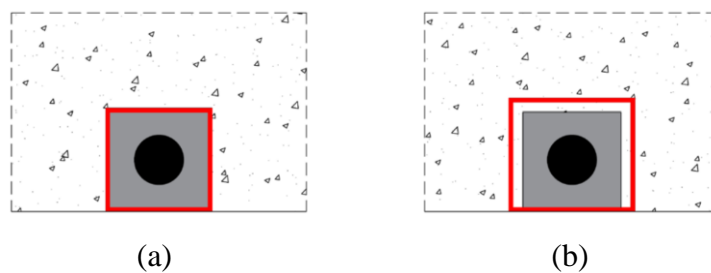


Figura 2.4: Descolamento na interface epóxi-concreto.

(a) ruptura interfacial pura (b) cisalhamento na coesão do concreto [fib Bulletin 90 (2019)].

O fendilhamento do epóxi trata-se do aparecimento de fissuras longitudinais no adesivo epóxi acompanhado ou não de fissuras em planos inclinados no concreto ao redor da ranhura. Geralmente esse tipo de ruptura ocorre em elementos reforçados com barras redondas com nervuras e concreto de resistência moderada e menos provável de ocorrer em elementos reforçados com laminados. A Figura 2.5 mostra esse modo de ruptura.

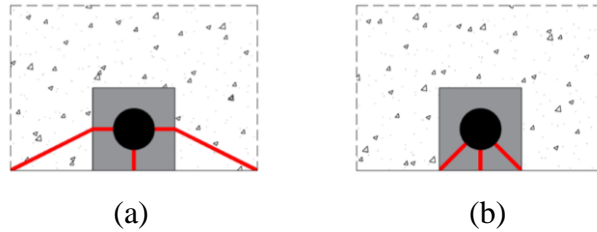


Figura 2.5: Fendilhamento do epóxi.

(a) com a fissuração do concreto em planos inclinados (b) sem a fissuração do concreto [fib Bulletin 90 (2019)].

Quando o reforço está próximo da borda do elemento de concreto, pode haver o fendilhamento do concreto na borda, como mostra a Figura 2.6. Além disso, esse tipo de ruptura é comum em elementos com concreto de baixa resistência.

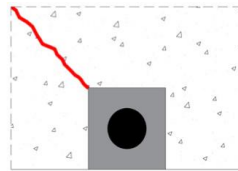


Figura 2.6: Ruptura do concreto na borda [fib Bulletin 90 (2019)].

2.3. MECANISMO DE RUPTURA À FLEXÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS PELO MÉTODO NSM

Ao analisar o comportamento de vigas fletidas, pode-se comparar o comportamento de vigas reforçadas com PRF com vigas simples de concreto armado, onde a diferença consiste em uma parcela adicional nas vigas reforçadas proveniente da contribuição do PRF na resistência à tração e que causa uma alteração na altura da linha neutra, como mostra a Figura 2.7.

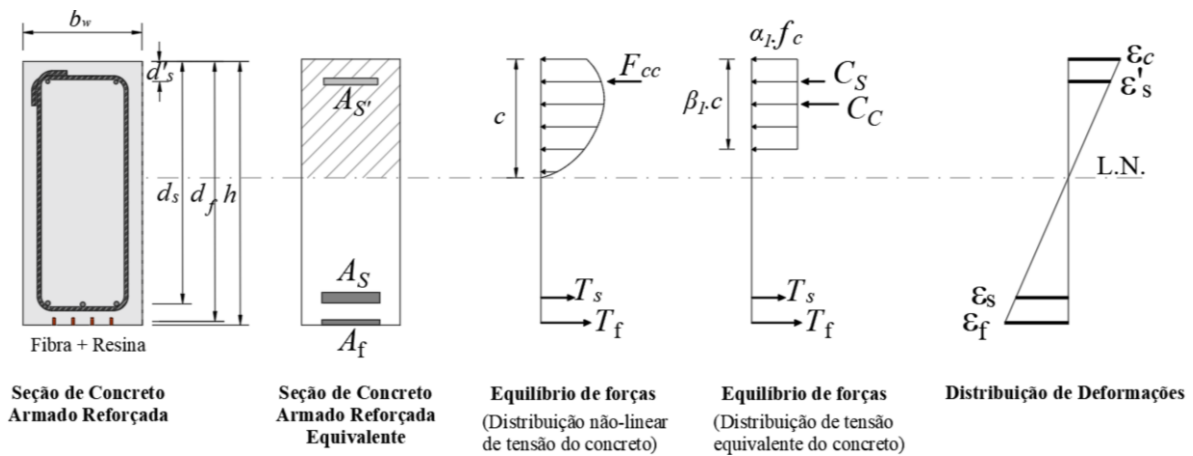


Figura 2.7: Mecanismo de ruptura de vigas de concreto armado reforçadas pelo método NSM

- Adaptado do ACI 440.2R (2017)].

Ressalta-se que para o cálculo da resistência à flexão de uma estrutura de concreto armado reforçado com PRF pelo método NSM além das hipóteses adotadas para o cálculo de vigas de concreto armado convencionais, deve-se seguir algumas considerações, como:

- A aderência entre o reforço e o substrato de concreto deve ser considerada perfeita;
- Deve-se considerar uma deformação linear no sistema composto FRP até a ruptura.

Assim como para as vigas convencionais de concreto armado, as vigas reforçadas também serão dimensionadas na condição de ruptura. Dessa maneira, através de um processo iterativo, arbitrase a profundidade da linha neutra e o modo de ruptura (pelo esgotamento da capacidade resistente da fibra ou do concreto) e assim, determina-se a deformação de cada material através da linearidade do diagrama de tensões. Determinadas as deformações, pode-se calcular as tensões em cada material e, assim, pode-se verificar o equilíbrio interno das forças. Caso o equilíbrio não seja verificado, o procedimento deve ser realizado novamente com uma nova profundidade da linha neutra e, assim por diante, até que haja equilíbrio das forças internas.

Os valores limites de deformação para cada material e outros parâmetros envolvidos nos modelos de cálculos vão depender da recomendação normativa escolhida para a verificação da capacidade resistente.

2.4. MODOS DE RUPTURA DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS À FLEXÃO PELO MÉTODO NSM

Para compreender o comportamento de um elemento estrutural e poder estimar sua capacidade resistente de maneira correta, é necessário conhecer todos os possíveis modos de ruptura deste elemento. De acordo com o ACI 440.2R (2017), elementos fletidos reforçados com PRF apresentam cinco modos de rupturas possíveis, os quais são:

- Esmagamento do concreto antes do escoamento do aço;
- Escoamento do aço seguida pela ruptura do laminado de PRF;
- Escoamento do aço seguido pelo esmagamento do concreto;
- Delaminação por tração/cisalhamento do cobrimento de concreto;
- Descolamento do PRF do substrato de concreto.

Em estruturas de concreto armado, as peças são dimensionadas para que, caso a ruptura venha a ocorrer, ela ocorra de maneira dúctil, possibilitando que o usuário perceba que a estrutura não é mais segura antes do colapso. Assim sendo, os modos de ruptura nos quais ocorrem um escoamento prévio do aço, são os modos de ruptura desejáveis para a situação de projeto. 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 no dimensionamento.

É considerado que houve o esmagamento do concreto se a deformação de compressão do concreto (ϵ_c) atingir o seu valor máximo estabelecidos pelas normas (ϵ_{cu}), sendo de 3‰ para o ACI e 3,5‰ para a NBR e *fib*.

Da mesma maneira, a ruptura do sistema PRF é considerada como atingida quando a deformação do material alcançar a deformação máxima limitada pelas prescrições normativas.

O modo de ruptura por esmagamento do concreto antes do escoamento do aço pode ser observado como representado no esquema da Figura 2.8.

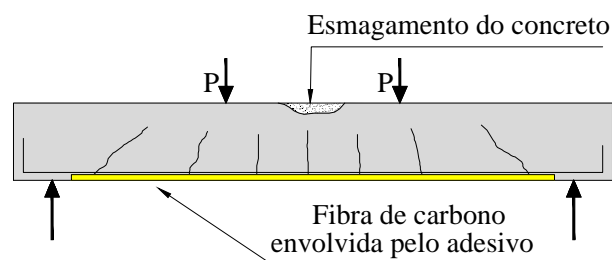


Figura 2.8: Ruptura dada pelo esmagamento do concreto antes do escoamento do aço [Pinto (2018)].

Caso a deformação limite do concreto seja atingida após o aço atingir a sua deformação de escoamento, a ruptura irá ocorrer por um esmagamento do concreto após o escoamento do aço, como mostra a Figura 2.9.

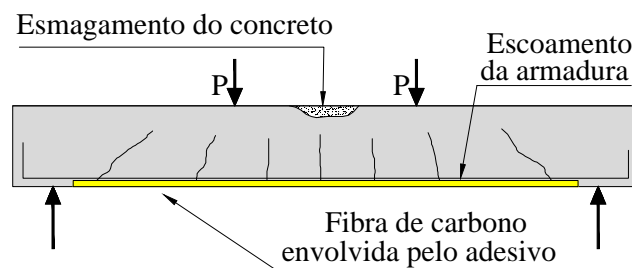


Figura 2.9: Ruptura dada pelo escoamento do aço seguida pelo esmagamento do concreto [Pinto (2018)].

A ruptura por escoamento do aço seguida pela ruptura do sistema PRF ocorre quando o aço já atingiu a sua deformação de escoamento e a deformação do PRF atinge o valor máximo de deformação de ruptura da fibra antes que o concreto atinja a sua deformação máxima. A Figura 2.10 representa este modo de ruptura.

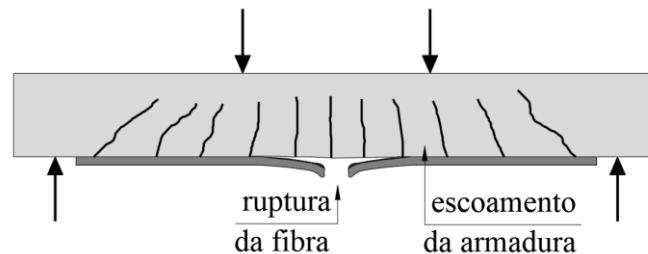


Figura 2.10: Ruptura dada pelo escoamento do aço seguida pela ruptura do PRF [Pinto (2018)].

Caso o substrato de concreto não resista aos esforços provenientes do PRF, a ruptura poderá ocorrer pela delaminação do cobrimento. Normalmente, o componente mais fraco da ligação concreto/FRP é o concreto, portanto a qualidade desse substrato e sua resistência à tração servirão de limite para a eficiência do reforço.

O comportamento de descolamento da fibra pode ser causado por diversos motivos, dentre eles: descontinuidade do substrato devido às fissuras de flexão e irregularidade ou excesso de aspereza da superfície do substrato. Esse tipo de ruptura é representado pela Figura 2.11 e a ruptura pela delaminação do cobrimento é dada pela Figura 2.12.



Figura 2.11: Ruptura dada pelo descolamento do PRF [Pinto (2018)].

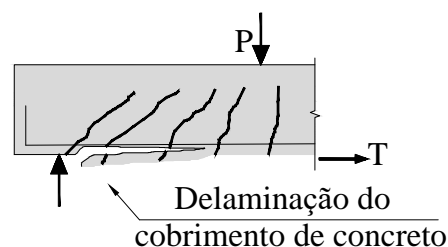


Figura 2.12: Ruptura dada pela delaminação do cobrimento [Pinto (2018)].

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 fissura como resultado de altas tensões de tração na interface PRF-epóxi e forma uma fissura longitudinal no revestimento do epóxi. O 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.

Ainda com relação aos modos de ruptura por descolamento em vigas reforçadas à flexão pelo NSM, o *fib* Bulletin 90 (2019) apresenta que a probabilidade desse tipo de ruptura ocorrer vai depender da taxa de armadura de flexão, taxa da armadura de reforço, geometria da seção transversal e configuração da superfície do elemento de reforço, resistência à tração do epóxi e do concreto e o padrão de carregamento. Baseado em evidências experimentais existentes, o *fib* Bulletin 90 (2019) apresenta que os tipos de ruptura por descolamento em vigas reforçadas à flexão pelo NSM são:

- Descolamento na interface epóxi-PRF ou epóxi-concreto;
- Destacamento do revestimento de concreto.

Com relação ao descolamento na interface do reforço, normalmente esses ocorrem de modo similar aos observados em testes de aderência com o mesmo tipo de barra. Porém, por se tratar de um elemento fletido, pode ocorrer da fissura de flexão interceptar o adesivo, danificando-o e, dessa forma, favorecer o descolamento ou o fendilhamento do epóxi.

Já o destacamento do revestimento de concreto é mais provável de ocorrer com a proximidade das ranhuras e com a redução da resistência à tração do concreto. Dentro desse tipo de ruptura, existem cinco possibilidades, que vão variar dependendo do tipo de padrão de fissuração, os quais são:

- Destacamento do revestimento da extremidade da tira de PRF;
- Destacamento do revestimento localizado;
- Destacamento do revestimento induzido pela formação de fissuras de flexão;
- Destacamento do revestimento induzido pela formação de fissuras de flexão e cisalhamento;
- Destacamento do revestimento da extremidade da viga.

2.5. PESQUISAS SOBRE VIGAS REFORÇADAS À FLEXÃO PELO MÉTODO NSM COM PRFC

2.5.1. FORTES *et al.* (2002)

Os autores 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 ensaiadas tinham seção retangular de 100 mm de largura, variando a altura entre 170 a 180 mm, comprimento de 1600 mm e vão de 1500 mm. Ao dimensionar estas vigas, os autores buscaram que a capacidade de carga das vigas reforçadas fosse o dobro da viga de referência correspondente. Para o reforço das vigas foram utilizados um, dois e três laminados. A Figura 2.13 apresenta as seções transversais e os detalhes do sistema de reforço.

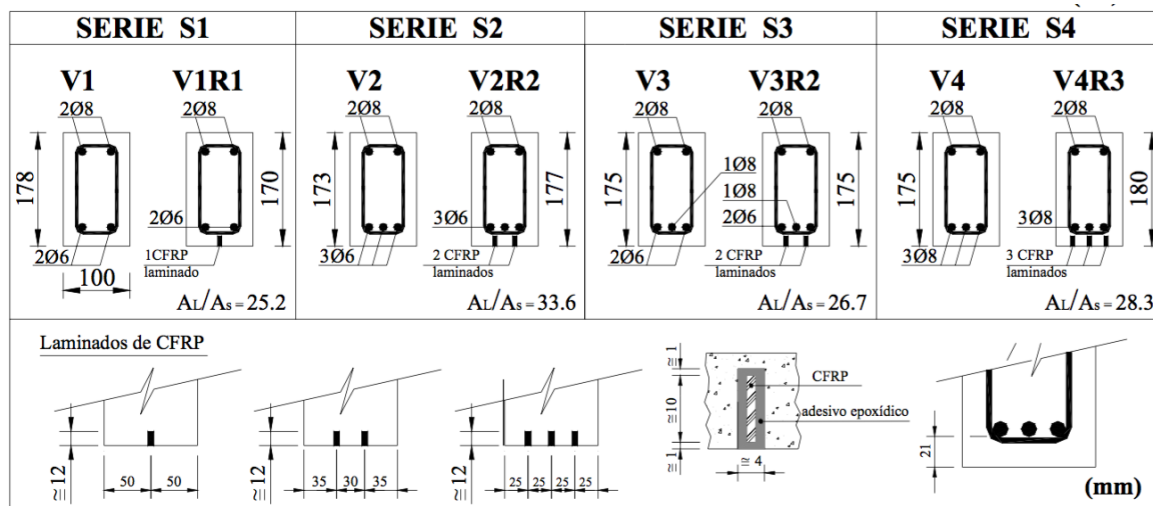


Figura 2.13: Seção transversal das vigas de FORTES *et al.* (2002)

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. A Figura 2.14 apresenta a seção longitudinal das vigas.

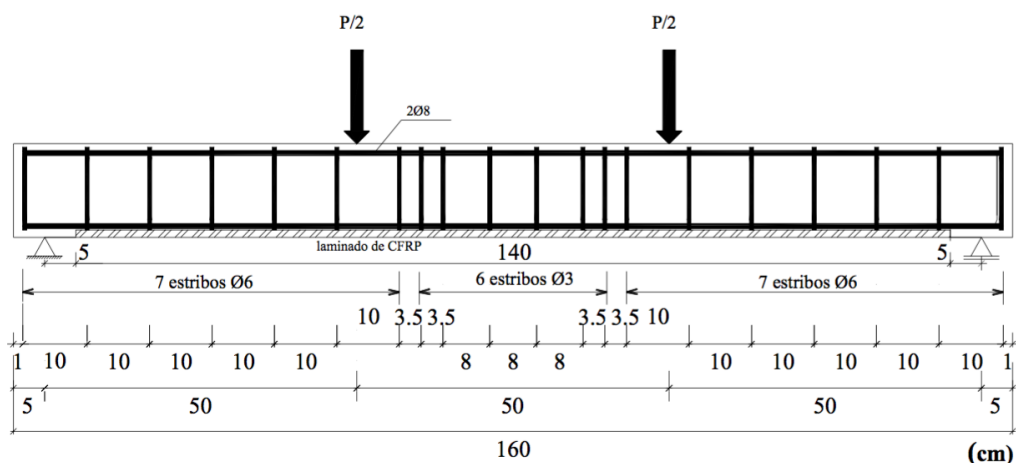


Figura 2.14: Detalhamento da seção longitudinal das vigas de FORTES *et al.* (2002)

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 se optou por interromper o ensaio quando esta apresentava uma flecha muito elevada.

Como esperado pelo dimensionamento realizado pelos autores, todas as vigas reforçadas apresentaram valores de carga de ruptura próximos ao dobro dos valores das vigas correspondentes sem reforço. A Tabela 2.1 apresenta os valores de carga de ruptura e de serviço observados.

Tabela 2.1: 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	

Onde:
VR é viga reforçada e V é a viga de referência

Assim, com base nas análises realizadas, as principais conclusões apresentadas pelos autores foram:

- A técnica de reforço NSM permite mobilizar quase toda a capacidade resistente do laminado, com segurança e economia;

- O aumento da capacidade resistente das vigas reforçadas foi aproximadamente 100% quando comparada a respectiva viga de referência, alcançando-se valores experimentais próximos aos valores teóricos calculados pelos autores;
- As vigas reforçadas mostraram-se mais rígidas que as respectivas vigas de referência;

2.5.2. YOST *et al.* (2007)

Os autores 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 2.15.

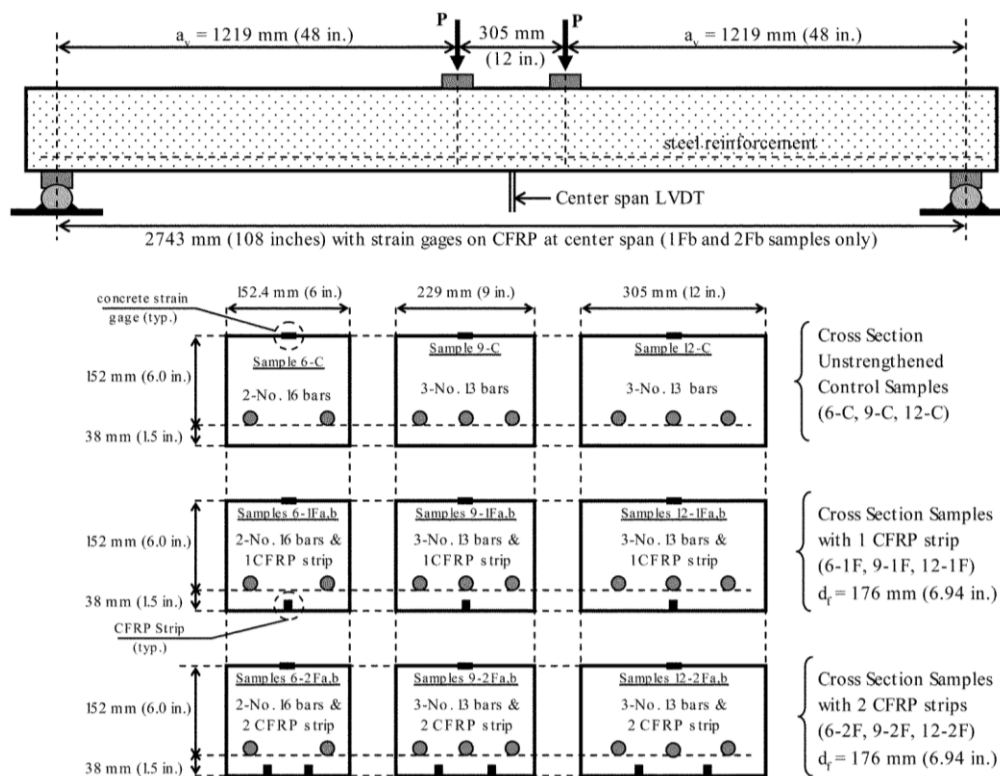


Figura 2.15: Geometria e distribuição do reforço das vigas de YOST *et al.* (2007)

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 2 vigas

reforçadas com duas lâminas. Assim, as vigas identificadas com *a* e *b* são espécimes duplicados. Os resultados experimentais são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Resultados experimentais de YOST *et al.* (2007)

Viga	Teórico	Experimental		
	P_n (kN)	P_y (kN)	P_{max} (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	SY/CC
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.

2.5.3. DIAS *et al.* (2012)

Os autores elaboraram um programa experimental composto de quatro vigas de concreto armado a fim de analisar o comportamento à flexão de vigas de concreto armado 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, como mostrado na Figura 2.16.

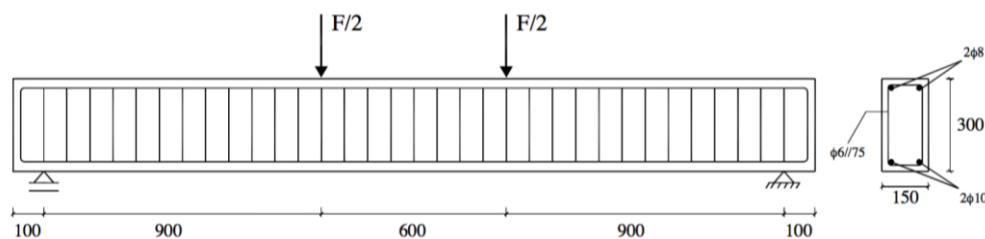


Figura 2.16: Geometria das vigas propostas por DIAS *et al.* (2012)

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 2.17.

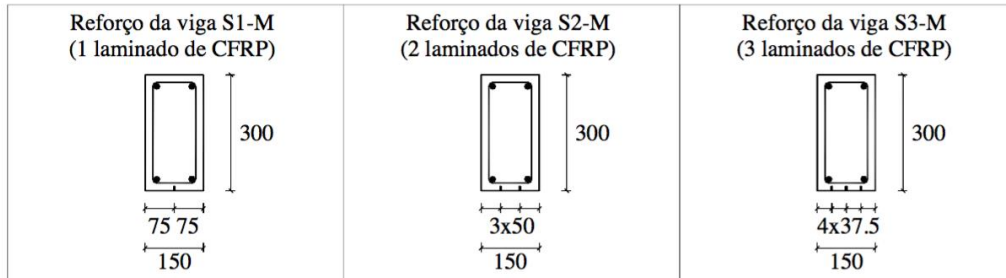


Figura 2.17: Seção transversal das vigas reforçadas de DIAS *et al.* (2012)

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 (2 ramos) com barras de aço nervurado de 6 mm de diâmetro, espaçados de 75 mm. Os resultados experimentais obtidos estão descritos na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: 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 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 PRFC, 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.

2.5.4. BILLOTA *et al.* (2015)

BILLOTA *et al.* (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. A Tabela 2.4 apresenta alguns dos dados do programa experimental proposto pelos autores.

Tabela 2.4: Dados do programa experimental de BILLOTA *et al.* (2015)

Viga	Tipo de reforço	Área do reforço (mm ²)	Tipo de carregamento
Ref_c_no_1	-	-	Concentrado
Ref_d_no_1	-	-	Distribuído
EBR_c_1.4x40_1	EBR	56	Concentrado
EBR_c_1.4x40_2			Concentrado
EBR_c_1.4x40_1			Distribuído
EBR_c_1.4x40_2			Distribuído
NSM_c_2x1.4x10_1	NSM	28	Concentrado
NSM_d_2x1.4x10_1			Distribuído
NSM_c_3x1.4x10_1		42	Concentrado
NSM_d_3x1.4x10_1			Distribuído

As vigas 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 2.18 ilustra as seções transversais e longitudinais destes elementos e a Tabela 2.5 apresenta os resultados experimentais observados nos ensaios de todas as vigas.

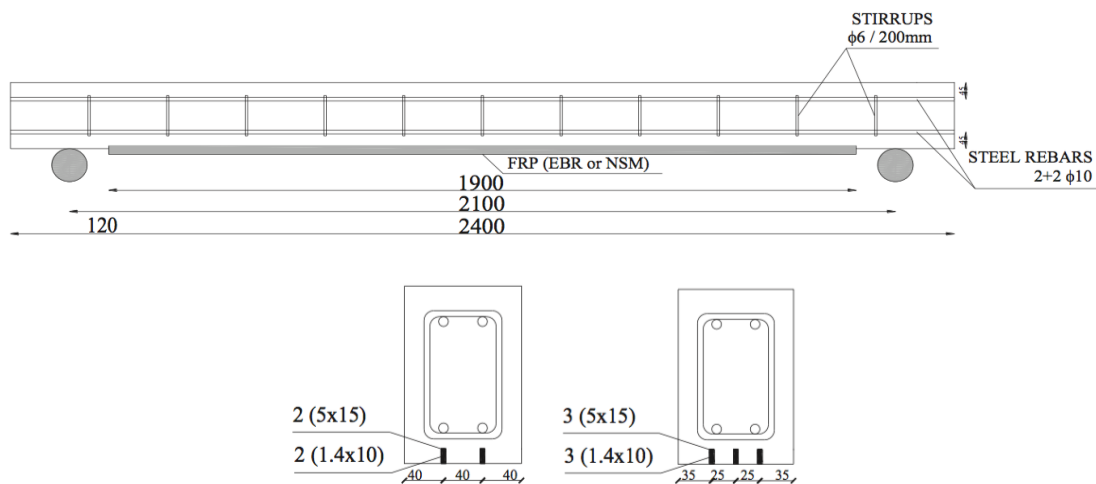


Figura 2.18: Seções transversais das vigas de BILLOTA *et al.* (2015)

Tabela 2.5: Resultados experimentais de BILLOTA *et al.* (2015)

Viga	Tipo de Ruptura	F _{max,exp} (kN)	F _{max,exp,m} (kN)	DF _{max,exp,m} (%)
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

O modo de ruptura designado como “CC” refere-se ao esmagamento do concreto, “SY” ao escoamento do aço, “SH” à ruptura por cisalhamento, “ED” ao descolamento do reforço nas extremidades, “ID” ao descolamento intermediário, “CDCD” ao descolamento devido à fissuração diagonal crítica e CCS à separação do cobrimento de concreto.

Observa-se então 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 últimas 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.

2.5.5. SEO *et al.* (2016)

Trata-se de 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 2.19 e a Tabela 2.6 apresenta as características de cada espécime ensaiado.

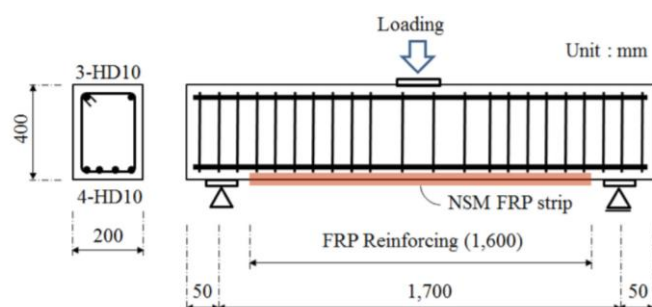


Figura 2.19: Geometria das vigas de SEO *et al.* (2016)

Tabela 2.6: Dados do programa experimental de SEO *et al.* (2016)

Viga	Método do reforço	Comprimento colado (mm)	Comprimento não-colado (mm)	Dimensões da tira (mm x mm)
BC2000	-	-	-	-
BP1600	EBR	-	-	50 x 1,2
CP1600-1	NSMR	1600	-	3,6 x 16
CP1600-3				1,2 x 16
CP500-1				3,6 x 16
CP500-3		500 em cada extremidade	600	1,2 x 16
CP400-1		400 em cada extremidade	800	3,6 x 16
CP400-3		1,2 x 16		
CP300-1		300 em cada extremidade	1000	3,6 x 16
CP300-3		1,2 x 16		

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 2.7 apresenta os resultados obtidos para todas as vigas ensaiadas do programa experimental.

Tabela 2.7: Resultados experimentais de SEO *et al.* (2016)

Viga	P _{cr} (kN)	Escoamento		Último		μ (δ_u/δ_y)	ΔP (kN)	P _n (kN)	Tipo de Ruptura
		P _y (kN)	δ_y (mm)	P _u (kN)	δ_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	

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 de a 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.

Além disso, os autores também calcularam a carga resistente das vigas reforçadas pelas previsões do ACI 440.2R e observaram que os resultados obtidos foram adequados e consideraram os métodos de ruptura observados.

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

2.6.1. CASTRO (2005)

Trata-se de um programa experimental composto de 19 vigas de concreto armado de seção transversal “T” reforçadas à flexão com vários tipos de compósitos (laminado, barra e manta de PRFC e barra de PRFV) e barras de aço.

A autora comparou vários tipos de compósitos utilizando a técnica NSM e a técnica EBR utilizando manta de PRFC, mantendo constante o produto da área da seção transversal do reforço e o módulo de elasticidade. Todas as vigas ensaiadas possuem seção transversal em “T”, tendo largura da mesa $b_f = 550$ mm, largura da alma $b_w = 150$ mm, altura total $h = 400$ mm, altura da mesa $h_f = 100$ mm, comprimento total de $L = 4400$ mm e vão livre de 4000 mm.

As vigas foram divididas em duas séries em função da taxa de armadura longitudinal existente antes do reforço ($\rho = A_s/A_c$). As vigas da série I eram armadas com duas barras de 20 mm de diâmetro ($\rho = 0,63\%$) e as da série II com cinco barras de 20 mm de diâmetro ($\rho = 1,57\%$). Cada série foi dividida em seis grupos, conforme o tipo de material e a técnica de reforço, como mostra a Figura 2.20. A Tabela 2.8 apresenta a carga e o modo de ruptura das vigas do programa experimental.

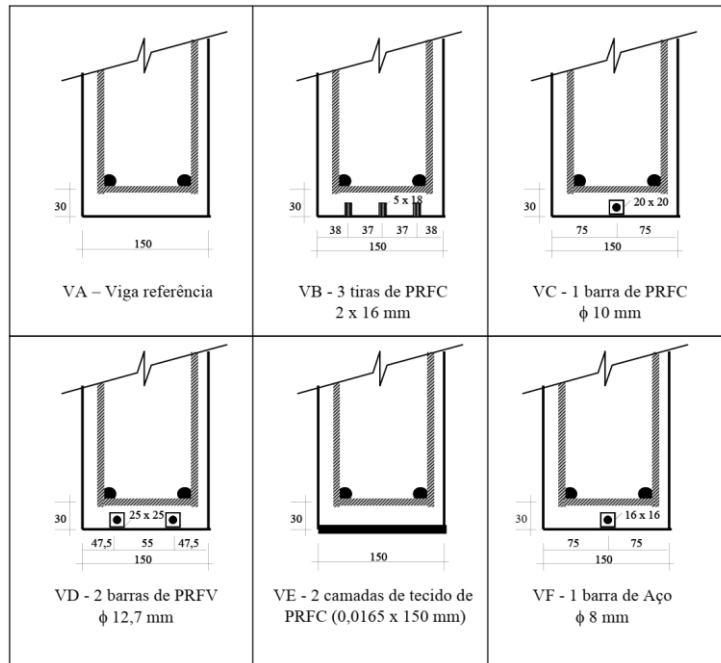


Figura 2.20: Geometria das vigas de CASTRO (2005)

Tabela 2.8: Resultados experimentais de CASTRO (2005)

Viga	Reforço	Carga de ruptura	Modo de ruptura
VA 2.1	-	163*	A
VA 2.2		185	A seguido de B
VA 5.1		398*	A
VA 5.2		398	A seguido de B
VB 2.1		3 tiras de PRFC (2 x 16 mm)	246
VB 2.2	250		D
VB 5.1	500		B seguido de D
VC 2.1	1 barra de PRFC (Ø10 mm)	253	C
VC 2.2		250	C
VC 5.1		456	B seguido de C
VD 2.1	3 barras de PRFV (Ø12,7 mm)	250	D
VD 2.2		227	D
VD 5.1		480	B seguido de D
VE 2.1	2 camadas de tecido de PRFC (0,0165 x 150 mm)	206	E
VE 2.2		215	E
VE 5.1		479	E
VF 2.1	1 barra de aço (Ø8 mm)	199	A seguido de B
VF 2.2		195	A
VF 5.1		416	A seguido de B

- As armaduras de todas as vigas escoaram antes de ser atingido a carga última
* Ensaio interrompido antes de um possível esmagamento do concreto
A – Deformação plástica excessiva
B – Esmagamento do concreto
C – Ruptura do reforço
D – Destacamento do reforço
E – Descolamento do reforço

Com base nos resultados, nota-se que a técnica NSM mostrou-se mais eficiente do que a técnica EBR no caso das vigas com menor taxa de armadura ($\rho = 0,63\%$), mas teve desempenho igual no caso das vigas mais armadas ($\rho = 1,57\%$), no caso de reforço com PRF. Além disso, a técnica de reforço não influenciou no aumento de rigidez no estágio pós fissuração.

Os modos de ruptura das vigas reforçadas com PRF foram frágeis para as duas técnicas de reforço (destacamento, descolamento ou ruptura do reforço) para o caso das vigas com maior taxa de armadura longitudinal e esmagamento do concreto acompanhado de destacamento, descolamento ou ruptura do reforço para o caso das vigas com maiores taxas.

Conclui-se também que os adesivos a base epóxi usados nesta pesquisa para a técnica NSM foram eficientes para a colagem de tiras de PRFC e barras de PRFV, mas não totalmente eficientes para as barras de PRFC que apresentaram deslizamento no decorrer dos ensaios.

Por fim, as vigas reforçadas com barra de aço apresentaram a ruptura mais preferível para situações de projeto, uma vez que houve o escoamento da armadura seguido do esmagamento do concreto. Por outro lado, o acréscimo de resistência foi pequeno (6,4% na média para a série I e 4,5% para a série II). Isso se deu pelo critério adotado para a elaboração do programa experimental que foi igualar a rigidez axial A.E (produto da área pelo módulo de elasticidade) de todos os reforços. Dessa forma, as vigas com reforço de barra de aço só foram comparáveis com as demais até o início do escoamento do aço, por esse apresentar um patamar de escoamento. A partir desse ponto as vigas reforçadas com PRF ainda suportavam aumento de resistência sem grande aumento de deformação, o que não ocorre com as vigas reforçadas com barra de aço.

2.6.2. PATEL *et al.* (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 pelo destacamento do cobrimento do concreto na extremidade do reforço, os autores selecionaram a viga com a barra de PRFB, uma vez que ela teve o melhor resultados das demais, e ensaiaram um espécime com o acréscimo de um “U” de 5cm de laminado de PRFC na extremidade do reforço para melhorar a ancoragem do reforço e evitar a ruptura prematura do reforço. A Tabela 2.9 apresenta os resultados experimentais dos ensaios realizados pelos autores.

Tabela 2.9: 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 PRFC	173,33	19,96

Outro fator observado pelos autores é que quanto mais rígido o reforço utilizado, mas rígido foi o comportamento da viga. Dessa forma, a viga SF-3, que é a viga que foi reforçada com barra de PRFB, apresentou uma ruptura mais frágil que as demais.

Como não houve um descolamento entre o reforço e o adesivo, nem entre o adesivo e o substrato, pode-se considerar que houve uma boa aderência entre esses elementos.

No caso da viga SF-4 os grampos de PRFC foram suficientes para prevenir a ruptura por descolamento e, dessa forma, a ruptura se deu pelo esmagamento do concreto. Como o modo de ruptura prematuro foi evitado com o uso dos grampos, essa viga obteve um acréscimo de carga de 33% contra os 25% sem o uso do gancho.

2.6.3. HOSEN *et al.* (2016)

Os autores montaram um programa experimental composto de 6 vigas, sendo uma viga de referência e quatro reforçadas com barra de aço e uma reforçada com barras de PRFC. A Figura 2.21 apresenta a geometria, disposição do reforço, condições de apoio e carregamento das vigas ensaiadas pelos autores e a Tabela 2.10 apresenta os resultados experimentais.

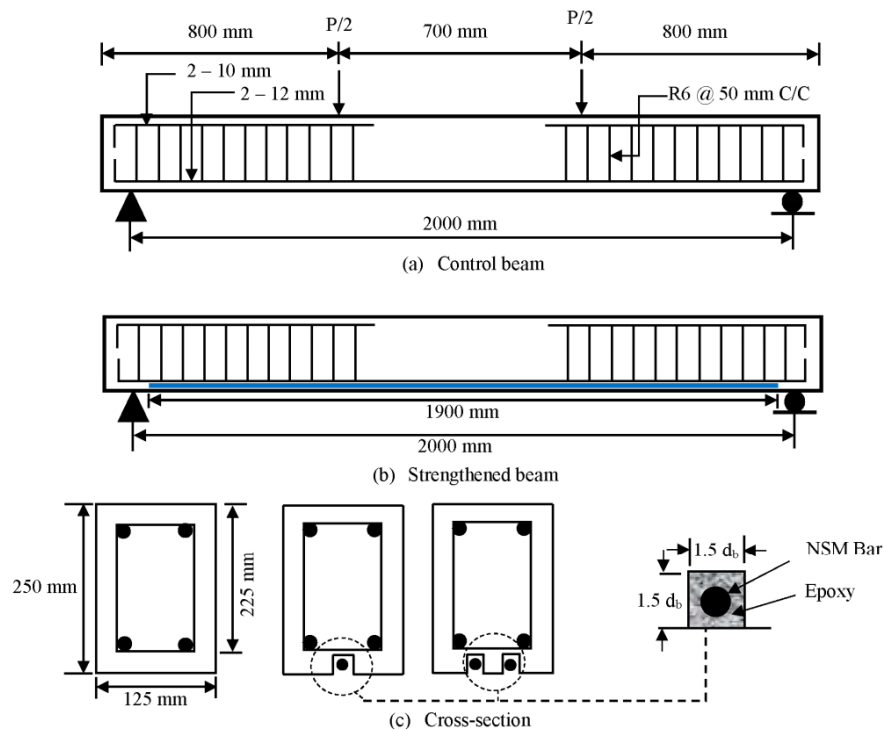


Figura 2.21: Características do programa experimental de HOSEN *et al.* (2016)

Tabela 2.10: 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 (%)
CB	-	74,37	-	15,75	-
N-1	2 barras de aço de Ø8 mm	106,24	42,85	20,00	26,98
N-2	2 barras de aço de Ø10 mm	117,75	58,33	21,00	33,33
N-3	1 barra de aço de Ø16 mm	109,56	47,32	24,00	52,38
N-4	2 barras de aço de Ø12 mm	136,75	83,88	26,60	68,89
N-5	2 barras de PRFC de Ø12 mm	143,03	92,32	25,00	58,73

Todas as vigas romperam prematuramente por delaminação do cobrimento de concreto. Dessa forma, mesmo aumentando a taxa de reforço, não houve um acréscimo de capacidade resistente, uma vez que nenhuma viga atingiu o esgotamento da capacidade resistente do reforço, uma vez que a ruptura foi regida pela resistência à tração do concreto.

Isso fica ainda mais evidente quando se concentrou o reforço em apenas uma das ranhuras, como é o caso da N-3. Comparando essa viga com a viga N-1, dobrou-se a taxa de reforço e manteve-se esse reforço concentrado em apenas uma ranhura, o que acarretou uma capacidade resistente muito próxima da viga com a taxa de reforço menor.

Os autores usaram esses resultados experimentais para validar um modelo analítico para prever a carga de ruptura por delaminação do cobrimento, deslocamento e espaçamento entre fissuras, que apresentou resultados satisfatórios.

Com relação à técnica do NSM com barras de aço pode-se concluir que esta apresenta um custo-benefício muito bom para aumentar a capacidade resistente à flexão de vigas de concreto armado.

Além disso, todas as vigas reforçadas apresentaram uma resposta bi-linear em relação ao carregamento, caracterizado pela fissuração e estado de ruptura.

Além de aumentar a carga de fissuração, o reforço alterou o padrão de fissuração das vigas, fazendo com as fissuras fossem mais finas e com um espaçamento menor, quando comparado ao padrão de fissuração da viga de referência.

2.6.4. ALMUSSALAM *et al.* (2012)

Trata-se de um programa experimental composto de 16 vigas, no qual foram ensaiadas duas vigas iguais de cada modelo proposto. Todas as vigas tinham a mesma seção transversal de 150 x 200 mm, 2200 mm de comprimento com um vão efetivo de 2000 mm e foram dimensionadas como subarmadas. A Figura 2.22 apresenta o esquema de carregamento das vigas, a Figura 2.23 apresenta a seção transversal das vigas indicando suas respectivas armações e reforços e a Tabela 2.11 apresenta as características gerais das vigas e os resultados experimentais.

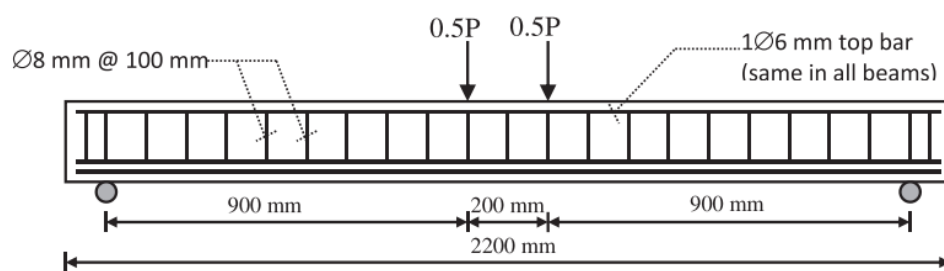


Figura 2.22: Esquema de carregamento das vigas ensaiadas

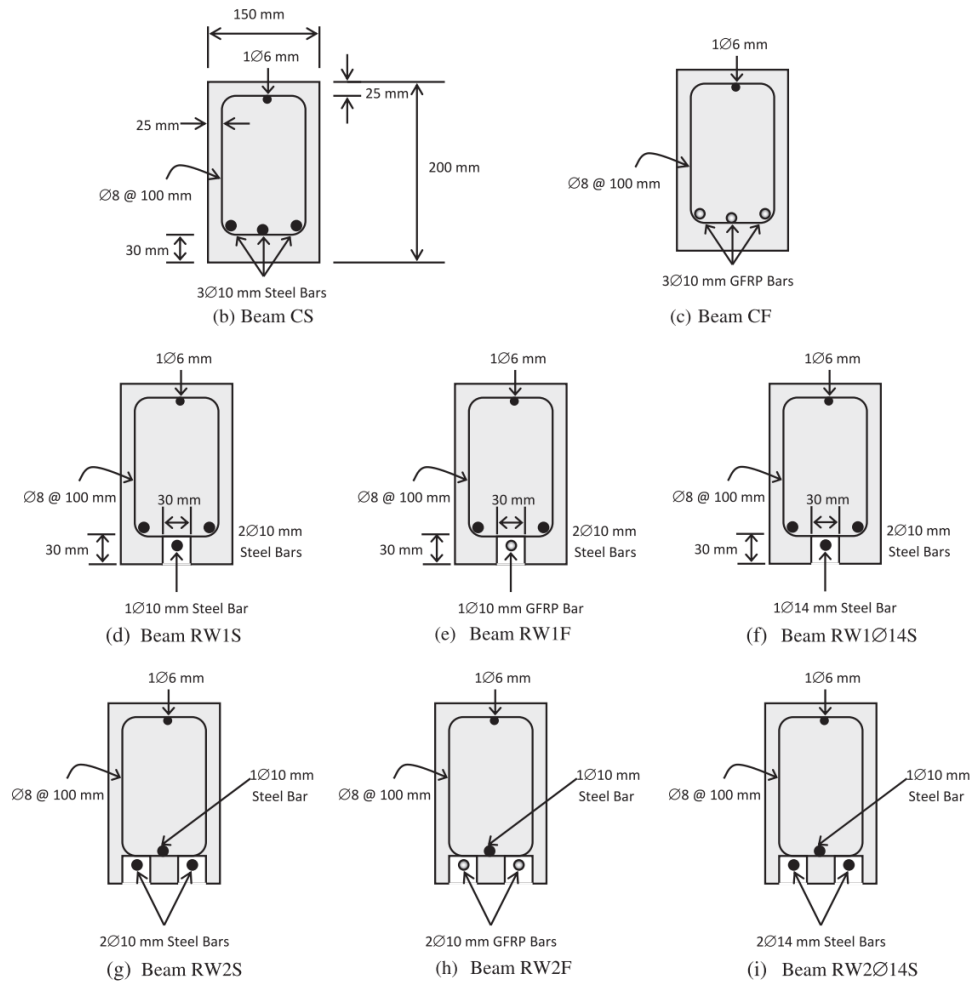


Figura 2.23: Seção transversal das vigas ensaiadas

Tabela 2.11: Resultados experimentais de HOSEN *et al.* (2016)

Viga	Reforço	Reforço	Carga última (kN)
CS	3 barras de aço de Ø10 mm	-	40,54
CF	3 barras de PRFV de Ø10 mm	-	52,83
RW1S	2 barras de aço de Ø10 mm	1 barra de aço de Ø10 mm	41,93
RW1Ø14S		1 barra de aço de Ø14 mm	57,54
RW1F	1 barra de aço de Ø10 mm	1 barra de PRFV de Ø10 mm	48,53
RW2S		2 barras de aço de Ø10 mm	45,75
RW2Ø14S	1 barra de aço de Ø10 mm	2 barras de aço de Ø14 mm	79,03
RW2F		2 barras de PRFV de Ø10 mm	51,17

Todas as vigas do programa experimental romperam por deformação excessiva do reforço seguido pelo esmagamento do concreto.

Com base nos resultados experimentais, pode-se concluir que o uso de barras de aço pelo NSM pode ser considerado como uma técnica satisfatória para restaurar a capacidade resistente de vigas com armaduras corroídas. Isso fica evidente comparando os resultados das vigas CS,

RW1S, RW2S, uma vez que todas tinham a mesma área de aço, mudando apenas configuração do reforço e apresentaram cargas próximas. Dessa forma, a aderência entre o reforço e o adesivo e entre o adesivo e o substrato foram suficientes para que o aço posicionado nas ranhuras não perdesse sua capacidade de mobilização de carga e assim garantir a mesma capacidade resistente da viga.

Com o aumento da taxa de reforço das vigas reforçadas com barras de aço, tanto a capacidade resistente à flexão da viga quanto a rigidez antes do escoamento aumentaram. Dessa forma, deve-se atentar para não exceder os limites determinados pelas prescrições normativas e ter uma condição de uma viga superarmada.

As barras de PRFV também podem ser consideradas como uma solução eficiente para manter a capacidade resistente de vigas com armadura de flexão corroída. Porém, em caso de uso de barras com um módulo baixo, a rigidez efetiva da viga após o reforço irá ser reduzida e poderá acarretar flechas maiores em serviço.

Como não foi observado nos ensaios um deslizamento das barras do reforço, foi assumida uma aderência perfeita entre as barras e o substrato de concreto nos cálculos. Para o cálculo das vigas reforçadas com barra de aço os autores utilizaram o ACI 318-11 e para as vigas reforçadas com PRFV o ACI 440.1R-06 e o ACI 318-11 considerando uma taxa homogeneizada.

As duas prescrições normativas, considerando o fator de redução da resistência igual a um, apresentaram resultados conservadores. Para as vigas reforçadas com aço, as estimativas teóricas foram de 11 a 30% menores que as cargas experimentais e para as vigas reforçadas com PRFV esse valor foi de 16 a 24%.

Ressalta-se que o uso de PRFV deve ser feito com ressalvas, devido o problema de sua ruptura por fluência, o que pode reduzir sua tensão máxima permissível. Além disso, as barras de PRFV podem se degradar no ambiente alcalino fornecido pelo concreto.

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

2.7.1. SAEED *et al.* (2018)

Os autores propuseram um programa experimental composto por quatro vigas de concreto armado reforçadas à flexão utilizando a técnica do NSM, onde buscaram avaliar a eficiência da utilização de um adesivo com base cimentícia, variando o tipo de reforço utilizado. Para isso, os autores ensaiaram 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. A Figura 2.24 mostra as características das vigas ensaiadas pelos autores e os resultados obtidos nos ensaios estão apresentados na Tabela 2.12.

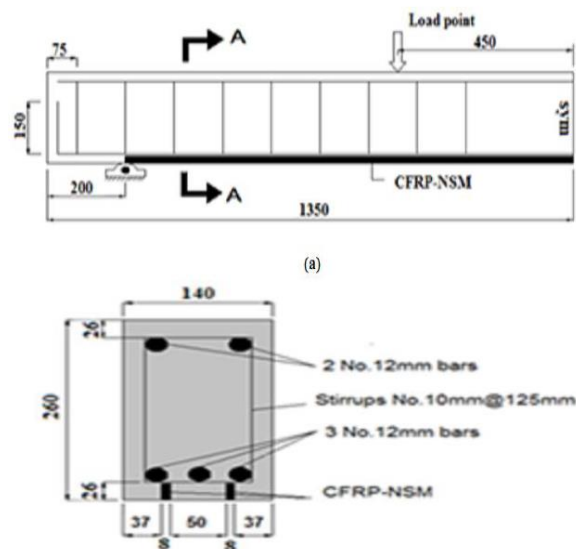


Figura 2.24: Características das vigas de SAEED *et al.* (2018)

Tabela 2.12: Resultados experimentais de SAEED *et al.* (2018)

Viga	P_{cr} (kN)	P_y (kN)	P_u (kN)	δ_{cr} (mm)	δ_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

De uma maneira geral, o padrão de fissuração de todas as vigas reforçadas foi bastante similar ao da viga de referência, apesar de essas vigas fissurarem com uma carga maior. Além disso, todas apresentaram também incrementos significativos de capacidade resistente quando comparadas a viga de referência (15% para a viga SL, 42% para a viga RL e 48% para a viga RB).

Ressalta-se também que a rigidez das vigas reforçadas foi pouco afetada pelo reforço antes da fissuração do concreto. Porém, depois de fissurado, a rigidez e a carga de escoamento foram maiores que a da viga de referência, sendo essa contribuição ainda maior nas vigas reforçadas com as fibras de superfície rugosa, como pode ser observado na Figura 2.25.

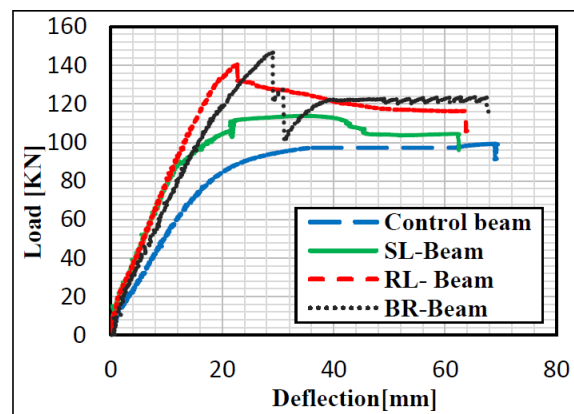


Figura 2.25: Carga vs deslocamento das vigas ensaiadas por SAEED *et al.* (2018).

Os autores também mediram as deformações na fibra em quatro pontos e com isso, observaram que as vigas se comportaram como vigas compósitas, uma vez 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 propuseram um programa experimental, onde buscaram 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 era composto por sete vigas de concreto armado de 140 mm x 260 mm com 2700 mm de comprimento, onde uma viga era de referência e as outras seis foram reforçadas. As vigas reforçadas eram:

- Três vigas reforçadas com doze 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;
- Três vigas reforçadas 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 Figura 2.26 mostra os outros detalhes das vigas ensaiadas pelos autores e a Tabela 2.13 apresenta os resultados experimentais obtidos.

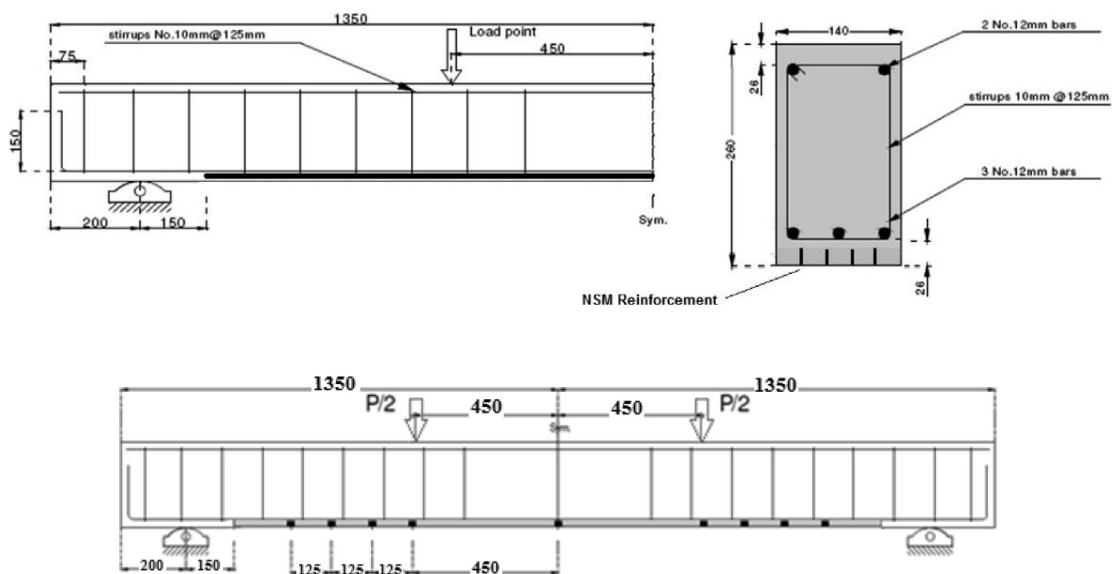


Figura 2.26: Características das vigas ensaiadas por ABDWAIS e AL-MAHAIDI (2020).

Tabela 2.13: Resultados experimentais de ABDWAIS e AL-MAHAIDI (2020).

Viga	Tipo	Carga Última (kN)	Ruptura
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

O valor alcançado de carga última das vigas reforçadas com adesivo à base cimentícia foi de 97% a 99% aos valores obtidos pelas vigas reforçadas com adesivo à base epóxi, independentemente do tipo de PRFC utilizado. Além disso, tanto nas vigas reforçadas com manta quanto as com laminado, os autores observaram uma ductilidade maior das vigas com resina à base epóxi. Além disso, comparando as deformações medidas no PRFC entre a viga reforçada com adesivo à base cimentícia e a com resina à base epóxi, pode-se observar que os valores foram bem próximos.

Dessa maneira, a partir dos resultados obtidos pelos autores, pode-se dizer que o uso da argamassa modificada para o reforço de vigas de concreto armado à flexão pelo método NSM foi eficaz tanto para o uso da manta de PRFC quanto do laminado.

2.8. RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS

2.8.1. ACI 440.2R (2017)

Para a determinação da capacidade resistente da viga reforçada utiliza-se um método iterativo de cálculo que envolve adotar uma profundidade linha neutra (c), calcular a deformação em cada material usando a compatibilidade de deformações, calcular a tensão em cada material e verificar o equilíbrio das forças internas. Se as forças internas não forem equilibradas, a profundidade da linha neutra deve ser revista e o procedimento deve ser repetido.

Para qualquer profundidade da linha neutra, a deformação no FRP pode ser calculada por:

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \frac{d_f - c}{c} - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad \text{Equação 2-1}$$

Onde,

ε_{cu} é a deformação limite no concreto;

ε_{bi} é a deformação da peça no momento do reforço;

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;

Se o lado esquerdo da inequação prevalecer, a seção rompe por esmagamento do concreto. Caso seja o lado direito, a ruptura é dada pelo FRP (ruptura ou descolamento). Para prevenir uma

ruptura por descolamento, a deformação efetiva do FRP deve limitada usando um fator de redução. Para o NSM, o valor de ε_{fd} pode variar entre $0,6 \varepsilon_{fu}$ a $0,9 \varepsilon_{fu}$ dependendo de vários fatores, tais como, dimensões do elemento, taxa de armadura de flexão e de reforço e rugosidade do FRP. Baseado num banco de dados de pesquisas existentes (BIANCO *et al.* 2014), o comitê recomenda o uso de $0,7 \varepsilon_{fu}$.

A tensão efetiva no FRP pode ser obtida pela deformação no FRP, assumindo o comportamento perfeitamente elástico:

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad \text{Equação 2-2}$$

Usando a compatibilidade de deformações, temos que as deformações nas armaduras podem ser determinadas por:

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{d-c}{d_f-c} \right) \quad \text{Equação 2-3}$$

$$\varepsilon'_s = (\varepsilon_c) \left(\frac{c-d'_s}{c} \right) \quad \text{Equação 2-4}$$

A tensão no aço é determinada pela deformação no aço assumindo um diagrama de tensão-deformação elástico-perfeitamente plástico:

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y \quad \text{Equação 2-5}$$

$$f'_s = E'_s \varepsilon'_s \leq f_y \quad \text{Equação 2-6}$$

Com as tensões no FRP e nas armaduras de aço determinadas para a profundidade de linha neutra assumida, o equilíbrio das forças internas pode ser obtido por:

$$\alpha_1 f'_c \beta_1 b c = A_s f_s + A_f f_{fe} \quad \text{Equação 2-7}$$

Os termos α_1 e β_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) α_1 e β_1 podem ser tomados como os valores associados ao bloco de Whitney (ACI 318). Ou seja, $\alpha_1 = 0,85$ e $\beta_1 = 0,85$ para f'_c entre 2500 e 4000 psi (17 e 27MPa) e β_1 é reduzido linearmente um valor de 0,05 para cada 1000 psi (7 MPa) para concretos que excedam a resistência de 27 MPa. β_1 não deve ser menor que 0,65.

Se a ruptura é dada pela ruptura do FRP, descolamento ou delaminação do cobrimento, α_1 e β_1 podem ser calculados por:

$$\alpha_1 = \frac{3\varepsilon'_c \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1 \varepsilon_c^2} \quad \text{Equação 2-8}$$

$$\beta_1 = \frac{4\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6\varepsilon'_c - 2\varepsilon_c} \quad \text{Equação 2-9}$$

Onde, os termos ε'_c e ε_c são dados por:

$$\varepsilon'_c = \frac{1,7 \cdot f'_c}{E_c} \quad \text{Equação 2-10}$$

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{c}{d_f - c} \right) \quad \text{Equação 2-11}$$

Com o equilíbrio das forças internas satisfeito, pode-se calcular o momento resistente pela Equação 2-8.

$$M_R = A_s \cdot f_s \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot x}{2} \right) + A_f \cdot f_{fe} \cdot \left(h - \frac{\beta_1 \cdot x}{2} \right) + A'_s \cdot f'_s \cdot \left(\frac{\beta_1 \cdot x}{2} - d' \right) \quad \text{Equação 2-12}$$

2.8.2. *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 seguinte expressão:

$$\varepsilon_{fRd,max} = \eta \frac{f_{fk}}{\gamma_f E_f} = \frac{f_{fd}}{E_f} \quad \text{Equação 2-13}$$

Onde,

γ_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;

η 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:

$$k_1 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} = A_{s1} \cdot \sigma_{s1} + A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f \quad \text{Equação 2-14}$$

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;

ε_f é a deformação no PRF, dada por:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_c \frac{h-x}{x} - \varepsilon_0 \quad \text{Equação 2-15}$$

σ_{s1} é tensão na armadura de flexão, dada por:

$$\sigma_{s1} = \min \left(\varepsilon_c \frac{d_{s1}-x}{x}, \frac{f_{yd}}{E_s} \right) E_s \quad \text{Equação 2-16}$$

σ_{s2} é a tensão na armadura de compressão, dada por:

$$\sigma_{s2} = \min \left(\varepsilon_c \frac{x - d_{s2}}{x}, \frac{f_{yd}}{E_s} \right) E_s \quad \text{Equação 2-17}$$

k_1 é o fator para a tensão média do bloco de compressão determinado em função da deformação no concreto dada por:

$$k_1 = \begin{cases} 1000\varepsilon_c \left(0,5 - \frac{1000}{12} \varepsilon_c \right) & \varepsilon_c \leq 0,002 \\ 1 - \frac{2}{3000\varepsilon_c} & 0,002 \leq \varepsilon_c \leq 0,0035 \end{cases} \quad \text{Equação 2-18}$$

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;

$$k_2 = \begin{cases} \frac{8 - 1000\varepsilon_c}{4(6 - 1000\varepsilon_c)} & \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{1000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c - 4) + 2}{2000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c - 2)} & 0,002 \leq \varepsilon_c \leq 0,0035 \end{cases} \quad \text{Equação 2-19}$$

Como o procedimento de cálculo trata-se de um processo iterativo, ele está apresentado no fluxograma da Figura 2.27 para um melhor entendimento.

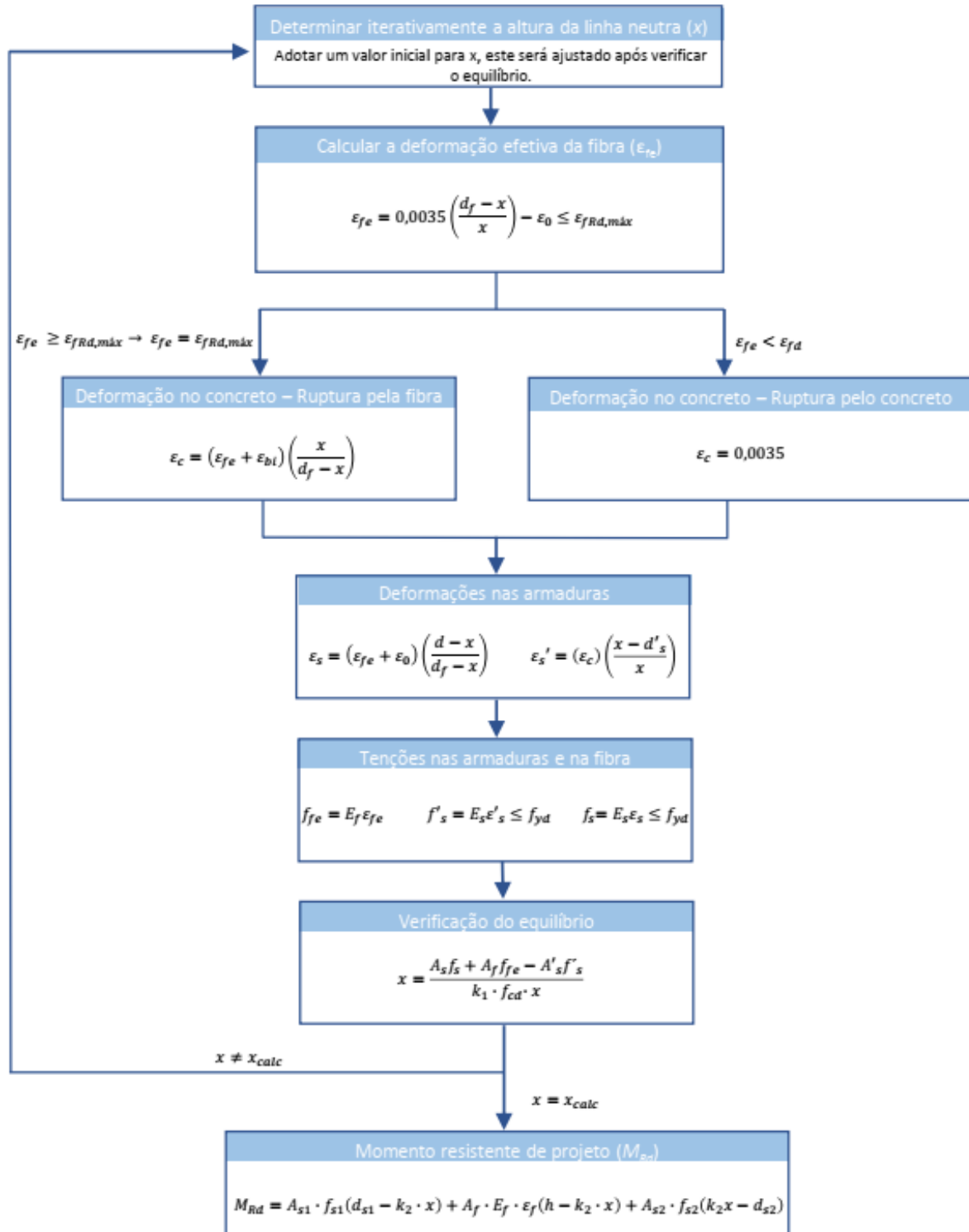


Figura 2.27: Fluxograma para o cálculo da capacidade resistente à flexão de vigas reforçadas com PRF pelo NSM de acordo com as prescrições do *fib* Bulletin 90 (2019)

Para as equações apresentadas na Figura 2.27, temos que:

$\varepsilon_{FRd,max}$ é a deformação máxima de projeto do PRF;

f_{fk} é a tensão última característica do PRF;

f_{jd} é a tensão última de cálculo do PRF;

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

d é a altura útil da viga;

d'_s é a distância da face superior da viga até o centroide da armadura de compressão;

ε_0 é a deformação da peça reforçada no momento da instalação do PRF;

ε_c é a deformação no concreto;

ε_s é a deformação na armadura de flexão;

ε'_s é a deformação na armadura de compressão;

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

E'_s é o módulo de elasticidade do aço da armadura de compressão;

f_s é a tensão na armadura de flexão;

f'_s é a tensão na armadura de compressão;

f'_s é a tensão na armadura de compressão;

f_{fe} é a tensão efetiva no FRP;

f_{yd} é a tensão de escoamento de cálculo do aço;

M_{Rd} é o momento resistente de cálculo da peça;

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Este trabalho consiste em uma investigação experimental do desempenho à flexão de vigas reforçadas com PRFC e barras de aço utilizando a técnica do *Near Surface Mounted*, onde foram avaliadas a influência da taxa de armadura de flexão, a taxa de armadura de reforço e o tipo de reforço.

O programa experimental proposto é composto de nove vigas de concreto armado, sendo uma viga de referência, quatro vigas reforçadas com PRFC e quatro vigas reforçadas com barra de aço e argamassa de reparo estrutural. Como o objetivo principal do trabalho é avaliar experimentalmente a eficiência do reforço utilizando barras de aço e argamassa de reparo estrutural, as vigas reforçadas com aço e PRFC foram dimensionadas para a mesma capacidade resistente à flexão.

Além disso, também se avaliou a influência da taxa de reforço. Assim, variou-se a taxa de reforço (ρ_r) de modo a alcançar acréscimos de resistência de cerca de 25%, 40%, 50% e 65% e taxa de armadura de flexão ($\rho_f = 0,29\%$) foi mantida constante. A série proposta está detalhada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Programa experimental proposto.

Série	Viga	Armadura de flexão	Reforço
I	VR1	3 ϕ 12,5	-
	VC2		2 lâminas PRFC
	VC3		3 lâminas PRFC
	VC4		4 lâminas PRFC
	VC5		5 lâminas PRFC
	VA2		2 barras ϕ 8
	VA3		3 barras ϕ 8
	VA4		4 barras ϕ 8
	VA5		3 barras ϕ 10

A nomenclatura das vigas foi dada de acordo com o tipo de reforço utilizado, assim, as vigas “VC” são as vigas reforçadas com a fibra de carbono e as vigas “VA” são as vigas reforçadas com barra de aço. O numeral presente na nomenclatura das vigas refere-se ao número de lâminas de PRFC e sua equivalente em barras de aço para a mesma capacidade resistente. Assim sendo, a VA2 e a VC2 foram dimensionadas para apresentarem a mesma carga de ruptura, assim como a VA3 e VC3, VA4 e VC4 e, por fim, a VA5 e VC5.

Para a realização das análises foram coletados durante a realização dos ensaios dados da carga concentrada aplicada, deformação da armadura de flexão e cisalhamento, deformação do concreto, deformação do reforço (PRFC e aço), deslocamento da viga e foi realizado um mapeamento das fissuras.

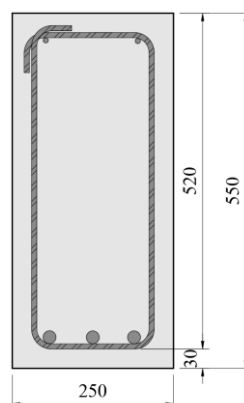
Ressalta-se que este trabalho contou com contribuições técnicas, bem como o apoio financeiro na aquisição dos materiais e mão de obra especializada para a execução do reforço da Kali Engenharia.

3.2. CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS

O programa experimental foi composto de 9 vigas de concreto armado com seção transversal retangular, reforçadas à flexão com tiras de laminado de PRFC e com barras de aço.

As dimensões das vigas foram definidas de forma a respeitar os parâmetros de espaçamento mínimos entre os elementos de reforço apresentados no ACI 440.2R (2017). Assim, as vigas tinham seção transversal igual a 250 mm x 550 mm, com cobrimento de 30 mm, atendendo ao valor especificado pela NBR 6118:2014 para vigas sujeitas a classe de agressividade ambiental II.

Em relação à seção longitudinal, as vigas tinham comprimento total de 4400 mm, com uma distância de 200 mm da extremidade da viga até o eixo do apoio, tendo assim um vão livre de 4000 mm. A Figura 3.1 traz uma representação da seção transversal e longitudinal padrão das vigas ensaiadas.



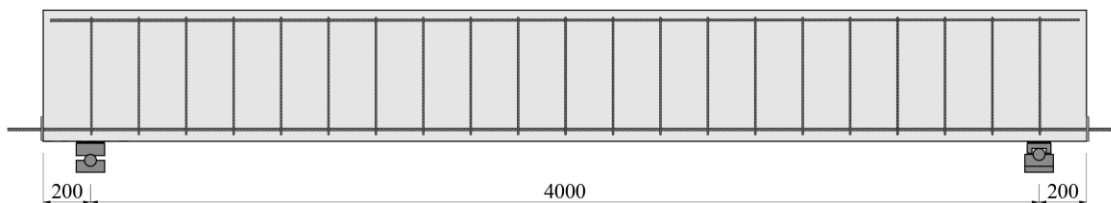


Figura 3.1: Seção transversal e longitudinal das vigas ensaiadas.

3.2.1. Detalhamento das armaduras das vigas

Para as vigas que compõe o programa experimental deste trabalho, a taxa de armadura de flexão foi mantida constante, sendo esta composta de três barras de aço CA50 de 12,5 mm de diâmetro com 4700 mm de comprimento.

Para a armadura de cisalhamento foram utilizados estribos verticais de 8,0 mm de diâmetro, espaçados a cada 20 cm, com porta-estribo também de 8,0 mm de diâmetro, ambos de aço CA50. O cobrimento da armadura foi de 30 mm, de acordo com os itens 6.4 e 7.4 da NBR 6118:14, para ambiente interno ou externo de agressividade média, em área urbana ou rural. As Figuras 3.2 e 3.3 ilustram o detalhamento das armaduras das vigas.

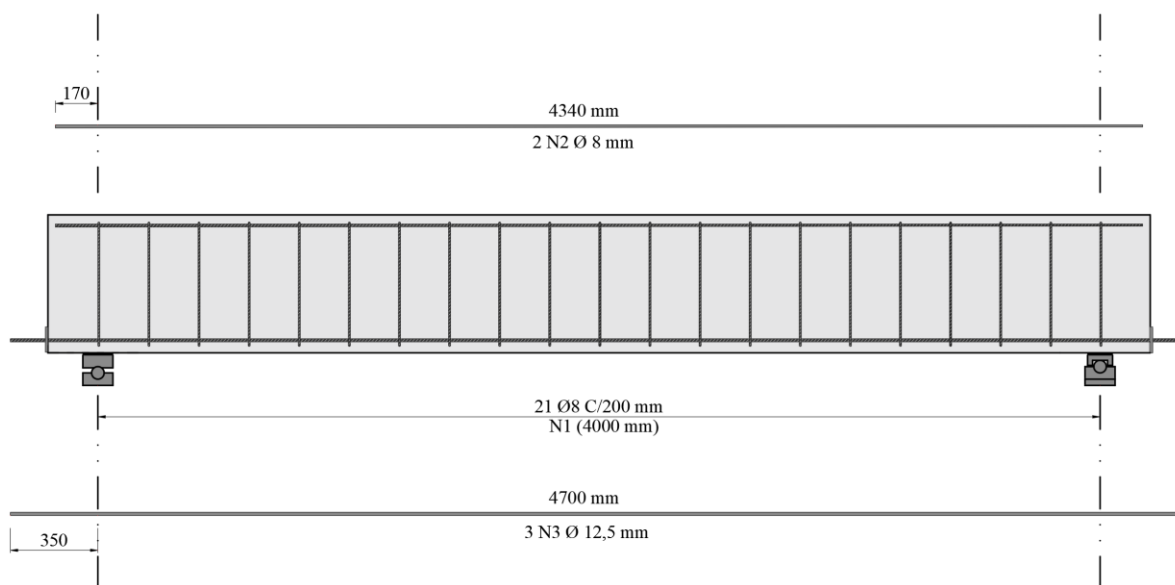


Figura 3.2: Detalhamento longitudinal das armaduras das vigas ensaiadas.

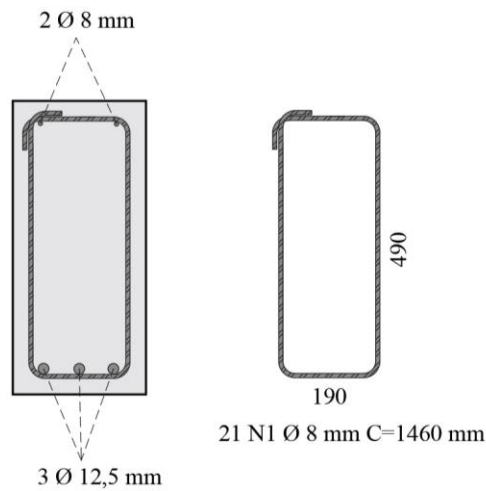


Figura 3.3: Detalhamento transversal das armaduras das vigas ensaiadas.

Como as barras longitudinais de flexão das vigas do programa experimental apresentam diâmetros elevados, optou-se por um tipo de ancoragem que impedisse, de forma eficiente, o deslizamento das barras, sem que fosse necessário o dobramento das mesmas. Dessa maneira, foi adotado um sistema de ancoragem utilizando chapas de aço de dimensões 250 mm x 200 mm, com espessura de 9 mm. Nessas chapas foram abertos furos para que as barras longitudinais fossem soldadas às chapas. Esse procedimento de ancoragem está previsto no item 9.4.5.4 da NBR 6118:14, como “ancoragem por meio de dispositivos mecânicos”. Este procedimento de ancoragem apresenta resultados satisfatórios comprovados em ensaios realizados no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília nas últimas décadas. A Figura 3.4 apresenta um detalhe do sistema de ancoragem utilizado.

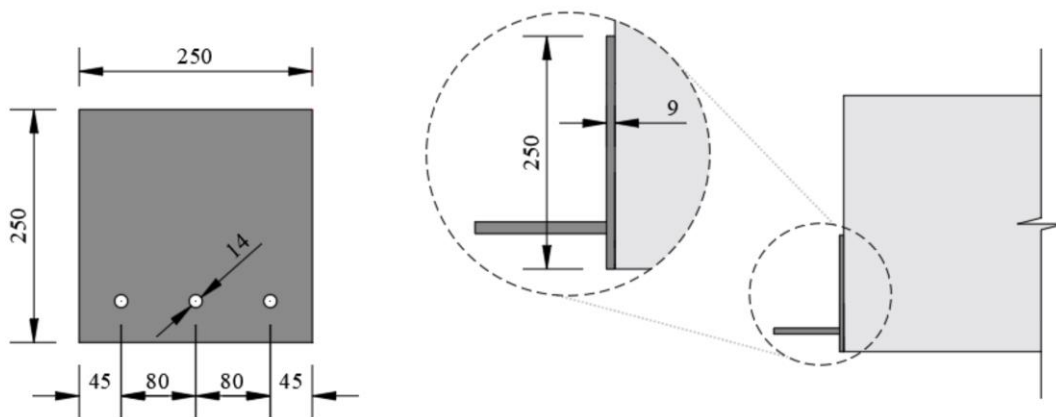


Figura 3.4: Detalhe do sistema de ancoragem adotado nas vigas do programa experimental.

3.2.2. Disposição do reforço das vigas

Para o comprimento das barras de aço e lâminas de PRFC do reforço adotou-se o valor de 3680 mm de modo a manter uma distância de 100 mm da face do apoio, como mostra a Figura 3.5.

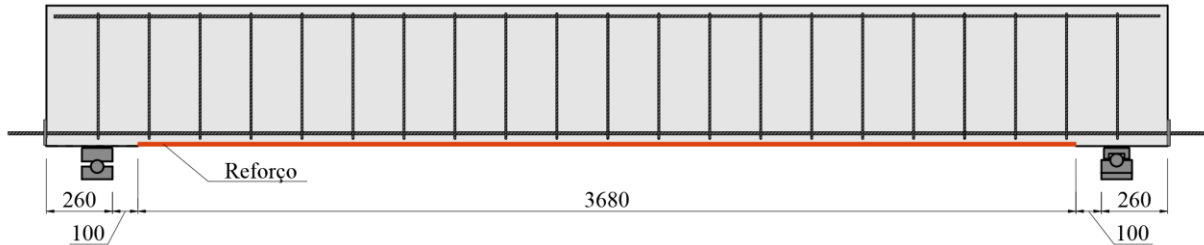


Figura 3.5: Detalhamento do reforço das vigas ensaiadas.

Para definir as dimensões das ranhuras que recebem as lâminas e as barras de reforço e o espaçamento entre elas e, assim, definir a largura necessária das vigas, foram seguidas as recomendações do ACI 440.2R (2017) para vigas reforçadas pelo método NSM. Para esta norma, para o caso de reforço executado com barras, a ranhura deve apresentar largura e profundidade mínima de pelo menos 1,5 vezes o diâmetro das barras (d_b), enquanto 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.

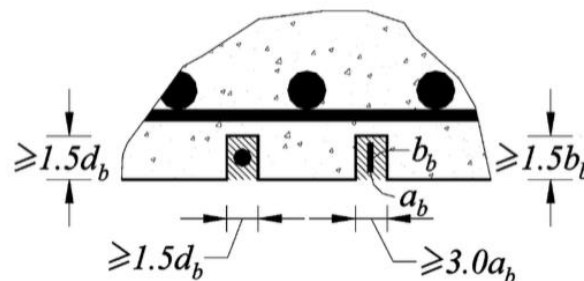


Figura 3.6: Dimensões mínimas das ranhuras [Fonte: ACI 440.2R (2017)].

Dessa maneira, para as vigas reforçadas com lâminas de fibra de carbono, optou-se por executar ranhuras com 15 mm de profundidade e 5 mm de largura, uma vez que as lâminas utilizadas no reforço tinham espessura (a_b) igual a 1,2 mm e altura (b_b) igual a 5mm. Já para as vigas reforçadas com barra de aço foram executadas ranhuras com 15 mm de largura e 15 mm de profundidade, uma vez que o maior diâmetro da barra de reforço utilizada era de 10 mm. A Figura 3.7 mostra as ranhuras adotadas para as vigas reforçadas com PRFC e barras de aço.

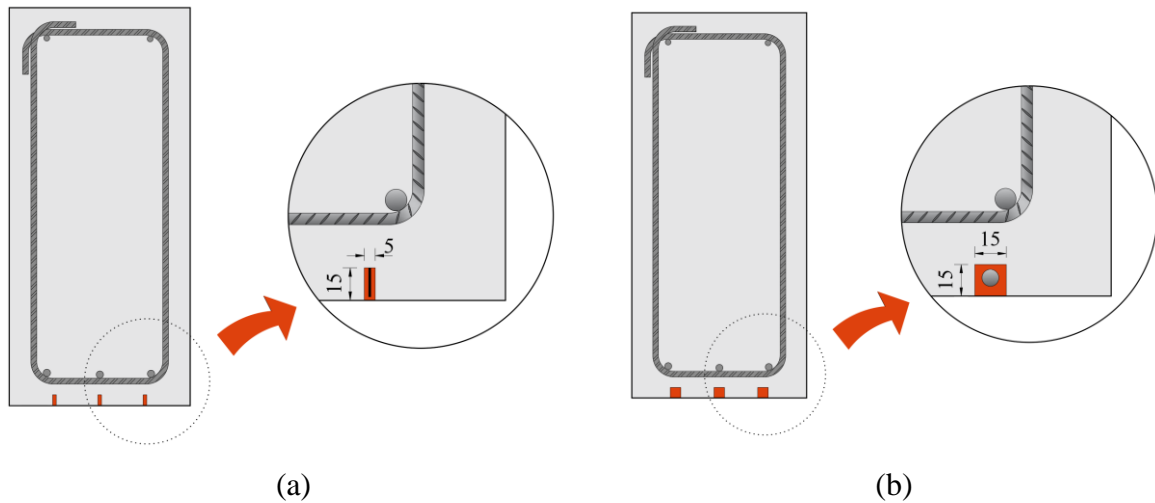
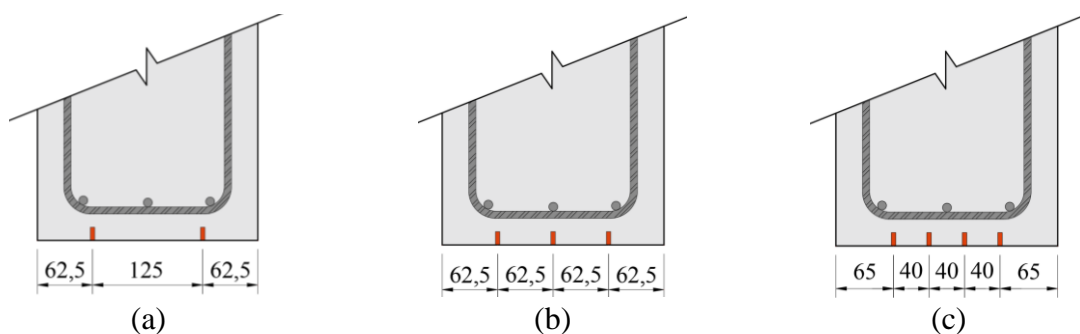


Figura 3.7: Dimensões das ranhuras das vigas reforçadas. (a) lâminas de PRFC (b) barras de aço.

A fim de minimizar os efeitos de borda e a sobreposição das tensões de tração em volta dos elementos de reforço, 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 maneira, a viga VC5, por apresentar uma quantidade maior de ranhuras, foi determinante para a escolha das larguras das vigas necessitando de uma largura mínima de 24 cm. Por razões construtivas optou-se por executar todas as vigas com 25 cm de largura, conforme foi citado anteriormente.

Assim, foi possível definir a disposição dos elementos de reforço nas vigas propostas no programa experimental. A Figura 3.8 apresenta os cortes da seção transversal e os detalhes das ranhuras que foram executadas.



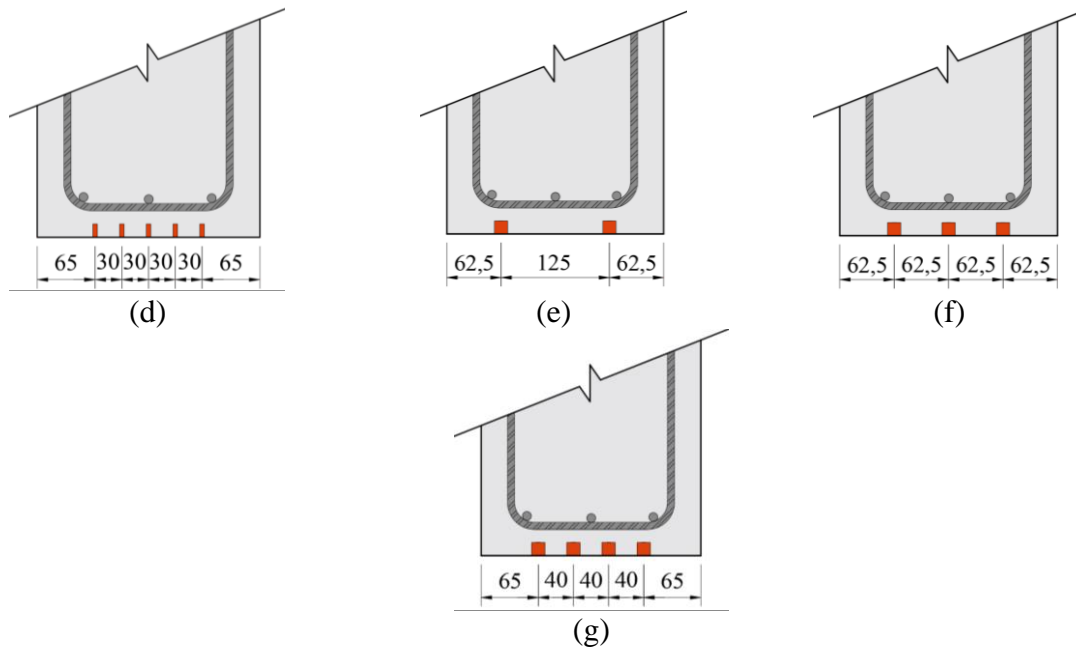


Figura 3.8: Disposição das ranhuras das vigas.

(a) VC2 (b) VC3 (c) VC4 (d) VC5 (e) VA2 (f) VA3 e VA5 (g) VA4

3.2.3. Resistência à flexão das vigas

O cálculo da resistência à flexão das vigas foi feito adotando-se 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 e módulo de elasticidade de 210 GPa e cobrimento de 30 mm.

3.2.3.1. Viga de Referência

Primeiramente foi calculada a resistência à flexão da viga de referência, seguindo as recomendações ABNT NBR 6118:2014. Os dados principais do cálculo desta viga estão apresentados mostrados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Cálculo da resistência à flexão da viga de referência de acordo com as prescrições da ABNT NBR 6118 (2014)

Viga	x (mm)	x/d	M _{NBR} (kN.m)	F _{u,NBR} (kN)
VR1	36,1	0,07	90,4	120,6

3.2.3.2. Vigas reforçadas com PRFC

As quatro vigas reforçadas com PRFC foram dimensionadas 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: Cálculo da resistência à flexão das vigas reforçadas com PRFC de acordo com as prescrições do ACI 440.2R (2017)

Viga	x (mm)	DEFORMAÇÕES				M _{ACI} (kN.m)	F _{u,ACI} (kN)	Modo de Ruptura
		ϵ_{fe}	ϵ_c	ϵ_s	ϵ'_s			
VC2	55,3	0,0119	0,0014	0,0111	0,0003	113,4	151,3	RF
VC3	58,2	0,0119	0,0014	0,0111	0,0004	125,2	167,0	
VC4	61,0	0,0119	0,0015	0,0110	0,0005	137,0	182,7	
VC5	63,7	0,0119	0,0016	0,0110	0,0005	148,7	198,3	
Obs: RF - ruptura da fibra								

Tabela 3.4: Cálculo da resistência à flexão das vigas reforçadas com PRFC de acordo com as prescrições do *fib* Bulletin 90 (2019)

Viga	x (mm)	DEFORMAÇÕES				M _{fib} (kN.m)	F _{u,fib} (kN)	Modo de Ruptura
		ϵ_{fe}	ϵ_c	ϵ_s	ϵ'_s			
VC2	62,7	0,0136	0,0018	0,0126	0,0006	116,0	154,7	RF
VC3	66,3	0,0136	0,0019	0,0126	0,0007	129,3	172,4	RF
VC4	69,8	0,0136	0,0020	0,0126	0,0008	142,6	190,1	RF
VC5	73,2	0,0136	0,0021	0,0126	0,0009	155,8	207,7	RF
Obs: RF- ruptura da fibra								

3.2.3.3. Vigas reforçadas com barra de aço

Como deseja-se comparar a eficiência entre os tipos reforço utilizados, as vigas reforçadas com barras de aço devem apresentar um momento último equivalente ao das vigas reforçadas com PRFC. Dessa maneira, foram calculadas as áreas de aço correspondentes às áreas de reforço de carbono, a fim de obter a mesma resistência final para estes elementos.

Assim sendo, as quatro vigas reforçadas com barra de aço foram dimensionadas seguindo as recomendações do ACI 440.2R (2017) e do *fib* Bulletin 90 (2019, fazendo algumas modificações para o reforço com barra de aço. Os dados principais do cálculo destas vigas são mostrados na Tabela 3.5 e na Tabela 3.6, de acordo com cada norma.

Tabela 3.5: Cálculo da resistência à flexão das vigas reforçadas com aço de acordo com as prescrições do ACI 440.2R (2017)

Viga	x (mm)	DEFORMAÇÕES				M _{ACI} (kN.m)	F _{u,ACI} (kN)	Modo de Ruptura
		ε _R	ε _c	ε _s	ε' _s			
VA2	59,8	0,0100	0,0012	0,0093	0,0004	115,5	154,0	EA
VA3	63,1	0,0100	0,0013	0,0093	0,0004	128,4	171,3	
VA4	66,3	0,0100	0,0014	0,0093	0,0005	141,3	188,4	
VA5	68,4	0,0100	0,0015	0,0093	0,0006	150,1	200,2	
Obs: EA - escoamento do aço do reforço								

Tabela 3.6: Cálculo da resistência à flexão das vigas reforçadas com aço de acordo com as prescrições do *fib* Bulletin 90 (2019)

Viga	x (mm)	DEFORMAÇÕES				M _{fib} (kN.m)	F _{u,fib} (kN)	Modo de Ruptura
		ε _R	ε _c	ε _s	ε' _s			
VA2	70,5	0,0100	0,0015	0,0093	0,0006	114,5	152,6	EA
VA3	74,3	0,0100	0,0016	0,0093	0,0007	127,2	169,6	
VA4	78,0	0,0100	0,0017	0,0093	0,0008	139,9	186,6	
VA5	80,5	0,0100	0,0018	0,0093	0,0008	148,6	198,2	
Obs: EA - escoamento do aço do reforço								

3.2.4. Resistência ao cisalhamento das vigas

As vigas do programa experimental foram dimensionadas para que não houvesse ruptura por cisalhamento após o reforço, buscando uma capacidade resistente ao cisalhamento superior à capacidade resistente à flexão calculada. Como foi utilizada a mesma armadura de cisalhamento para todas as vigas, adotou-se para a verificação o maior valor de resistência à flexão referente a viga VC5.

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

Os valores foram calculados de acordo com as prescrições da ABNT NBR 6118:2014, adotando-se estribos verticais de 8 mm espaçados a cada 20 cm. Na Tabela 3.7 são apresentados os valores encontrados na verificação da resistência ao cisalhamento.

Tabela 3.7: Cálculo da resistência ao cisalhamento

V _c (kN)	V _{sw} (kN)	V _u (kN)	P _{u,cisalhamento} (kN)	P _{u,flex,ACI} (kN)	P _{u,flex,fib} (kN)	Verificação
109,9	99,3	209,2	418,4	200,2	198,2	OK

Observa-se que a carga última estimada para uma ruptura por cisalhamento é maior que a carga última teórica à flexão das vigas reforçadas.

3.3. PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

3.3.1. Formas

Para a fabricação das formas dos espécimes optou-se por aproveitar formas metálicas que havia no Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília, fazendo-se as devidas modificações para as dimensões desejadas. Foram utilizadas chapas metálicas com espessura de 3mm para as chapas laterais e um perfil “U” com 5 mm de espessura para a base da forma. Depois de finalizada a fabricação das formas, estas foram pintadas para evitar a corrosão das peças e assim garantir a durabilidade destas.

No dia anterior ao da concretagem aplicou-se uma demão de DESMOL CD da marca VEDACIT em toda a parte interna da forma para impedir a aderência entre a forma e o concreto e facilitar o processo de desforma. Feito isso, as armaduras das vigas foram posicionadas para a concretagem. A Figura 3.9 apresenta o aspecto final das formas utilizadas já com as armações das vigas posicionadas.



(a)



(b)

Figura 3.9: Formas utilizadas para a concretagem dos espécimes.

(a) Vista Lateral (b) Vista Frontal

3.3.2. Ancoragem mecânica das barras de flexão

Para a ancoragem mecânica das barras foi adotado um sistema utilizando chapas de aço de dimensões 250 mm x 200 mm com espessura de 9 mm e furos de 14 mm. Na Figura 3.10 verifica-se o processo de soldagem da chapa para ancoragem mecânica na armadura antes da concretagem da peça.



(a) (b)
Figura 3.10: Soldagem da chapa de ancoragem mecânica.

(a) Soldagem (b) Aspecto final.

3.3.3. Concreto

3.3.3.1. Características do concreto e do processo de cura

No processo de fabricação de todos os espécimes foi empregado concreto usinado bombeado doado pela empresa Ciplan Cimento Planalto SA. Para o concreto em questão o agregado utilizado foi brita 1 calcária e o cimento utilizado foi CII plus. Além disso, a resistência característica à compressão (f_{ck}) desejada foi de 30 MPa.

Para o recebimento do concreto foi realizado o ensaio de determinação da consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone seguindo os procedimentos na norma ABNT NBR 16889:2020. Uma vez que o abatimento de tronco de cone desejado era igual a 10 +/- 2 cm e o resultado obtido no ensaio foi de 10 cm, o concreto foi aceito e deu-se prosseguimento à concretagem. A Figura 3.11 mostra o resultado do ensaio.



Figura 3.11: Resultado do ensaio de determinação da consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone.

A cura do concreto foi realizada com a utilização de tecidos de algodão e poliéster umedecidos sobre a superfície do concreto exposta, onde estes foram irrigados 3 vezes ao dia durante o período de 7 dias. A fim de reduzir a perda de água por evaporação e aumentar a eficiência do processo de cura também foram utilizadas lonas plásticas para cobrir os espécimes. A Figura 3.12 mostra a cura das vigas do programa experimental.



Figura 3.12: Cura das vigas do programa experimental.

3.3.3.2. Propriedades mecânicas do concreto

Para a caracterização das propriedades mecânicas do concreto foram moldados cinquenta e quatro corpos de provas cilíndricos de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura simultaneamente à concretagem dos espécimes, divididos em seis grupos com nove CPs cada. Os três primeiros grupos foram tomados após a concretagem de duas vigas e os últimos três grupos foram tomados ao final da concretagem de cada viga.

Os corpos de prova moldados foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão uniaxial e tração por compressão diametral conforme especificações das normas ABNT NBR 7222 (2011) e ABNT NBR 5739 (2007), respectivamente. Os ensaios foram realizados no Instituto Federal de Brasília (IFB) no Campus de Samambaia através de uma prensa EMIC modelo DL 30000 com capacidade para 2000 kN. A Figura 3.13 mostra o sistema de ensaio utilizado.

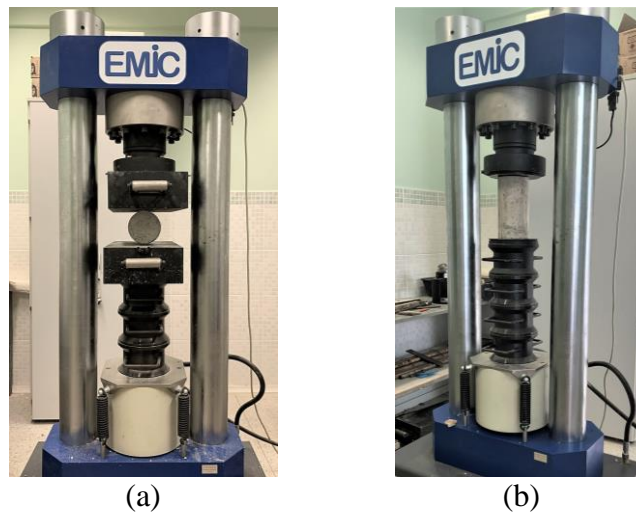


Figura 3.13: Ensaio de caracterização do concreto.
(a) Resistência à tração (b) Resistência à compressão

Além destes, foi realizado um ensaio para determinação do módulo de elasticidade, seguindo as recomendações da norma ABNT NBR 8522 (2008). Para tal, o corpo de prova foi conectado a um extensômetro duplo do mesmo fabricante da prensa, cuja função consistia em mensurar as deformações axiais. A Figura 3.14 mostra o sistema de ensaio utilizado.



Figura 3.14: Ensaio de determinação do módulo de elasticidade do concreto.

3.3.4. Aço

3.3.4.1. Especificações do aço

Para a confecção das vigas foram utilizadas barras de aço CA50 com superfície nervurada e bitolas de 12,5mm, 10 mm e 8 mm fabricadas pela empresa Arcelor Mittal. De acordo com as especificações do fabricante, este insumo segue as prescrições normativas da ABNT NBR 7480, apresenta uma resistência característica ao escoamento (f_{yk}) igual a 500 MPa e resistência última à tração igual a 540 MPa.

3.3.4.2. Ensaio do aço à tração

As propriedades mecânicas das barras de aço utilizadas na confecção da armadura de flexão, porta-estribo e estribos, foram investigadas por meio da execução de ensaios de tração à temperatura ambiente prescritos na norma ABNT NBR 6892 (2013).

Foram caracterizadas 3 amostras para cada tipo de barras de aço (diâmetro de 8 mm, 10mm e 12,5 mm), totalizando em um total de 9 corpos de prova com comprimento total igual a 600 mm e comprimento livre igual a 500 mm. Estes ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório de Materiais do campus de Tucuruí da Universidade Federal do Pará (UFPA) com auxílio de uma prensa EMIC modelo DL 30000 com capacidade para 300 kN, conectada a um extensômetro eletrônico EMIC modelo EE09.

3.3.5. Polímero reforçado com fibra de carbono (PFRC)

O laminado de fibra de carbono utilizado para o reforço das vigas trata-se de um compósito de matriz em resina epóxi, reforçados com fibra de carbono unidirecional por pultrusão. Comercialmente é vendida pela empresa MC Bauchemie com o nome de MC CarbonFiber Lamella.

De acordo com as especificações do fabricante, 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. Argamassa de reparo estrutural

3.3.6.1. Especificações do Fabricante

A argamassa de reparo estrutural utilizada no reforço das vigas com barra de aço trata-se de uma argamassa polimérica cimentícia com agente adesivo integrado e inibidor de corrosão e apresenta consistência tixotrópica. Comercialmente é vendida pela empresa MC Bauchemie com o nome de Nafufill CR.

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

3.3.6.2. Propriedades mecânicas da argamassa de reparo estrutural

Para a caracterização das propriedades mecânicas da argamassa estrutural foram moldados nove corpos de provas cilíndricos de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura simultaneamente à execução do reforço das vigas.

Os corpos de prova moldados foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão uniaxial e tração por compressão diametral conforme especificações das normas ABNT NBR 7222 (2011) e ABNT NBR 5739 (2007), respectivamente. Os ensaios foram realizados no Instituto Federal de Brasília (IFB) no Campus de Samambaia através de uma prensa EMIC modelo DL 30000 com capacidade para 2000 kN.

Além destes, foi realizado um ensaio para determinação do módulo de elasticidade, seguindo as recomendações da norma ABNT NBR 8522 (2008). Para tal, o corpo de prova foi conectado a um extensômetro duplo do mesmo fabricante da prensa, cuja função consistia em mensurar as deformações axiais.

3.3.7. Resina

O adesivo de colagem utilizado no reforço das vigas com PRFC trata-se de um adesivo estrutural de pega normal, bicomponente, a base de epóxi de consistência pastosa. Essa resina é vendida pela empresa MC Bauchemie pelo nome comercial de MC-Carbosolid 1300 TX. O

fabricante especifica que sua resistência à compressão é superior a 60 MPa aos 7 dias e sua aderência é de 2 MPa.

3.4. INSTRUMENTAÇÃO

3.4.1. Deslocamentos verticais

O acompanhamento dos deslocamentos verticais foi feito em seis pontos de medição como esquematizado na Figura 3.15, através de deflectômetros do tipo LVDT fabricados pela HBM com capacidade de até 50 mm e precisão de 0,01 mm. A Figura 3.15 ilustra os posicionamentos dos LVDTs adotados.

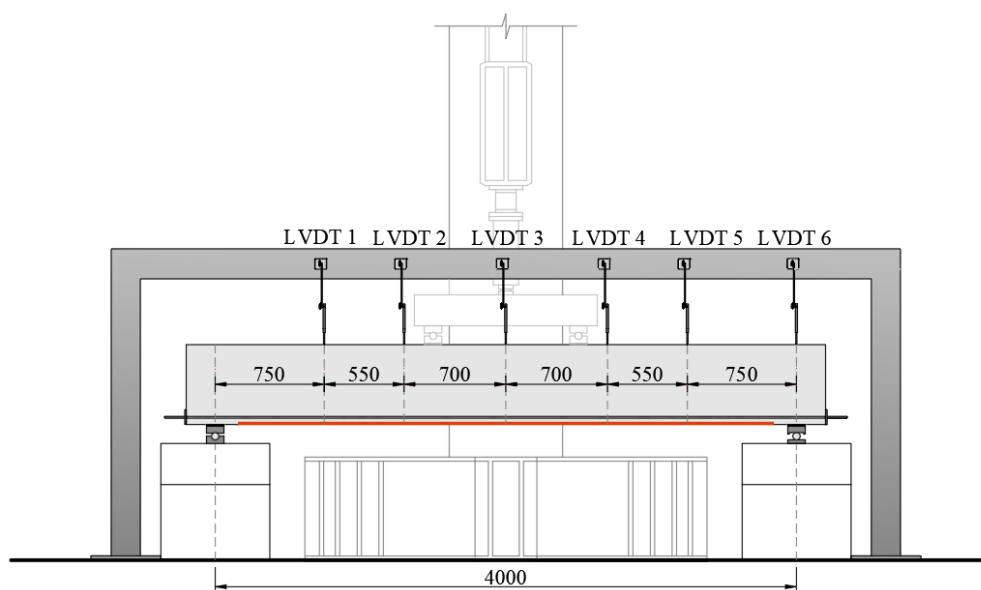


Figura 3.15: Posicionamento dos LVDTs.

O LVDT 6 foi posicionado sobre o apoio para verificar se durante os ensaios havia deslocamentos significativos nesses pontos. Os LVDTs 1 e 5 foram posicionados a 750 mm do apoio de forma a medir os deslocamentos no meio do trecho com cisalhamento da viga e por fim, os LVDTs 2, 3 e 4 foram posicionados no trecho de flexão pura.

3.4.2. Deformações nas armaduras de flexão e de cisalhamento

3.4.2.1. Disposição dos extensômetros das armaduras de flexão e 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 Figura 3.16 ilustra o posicionamento dos extensômetros.

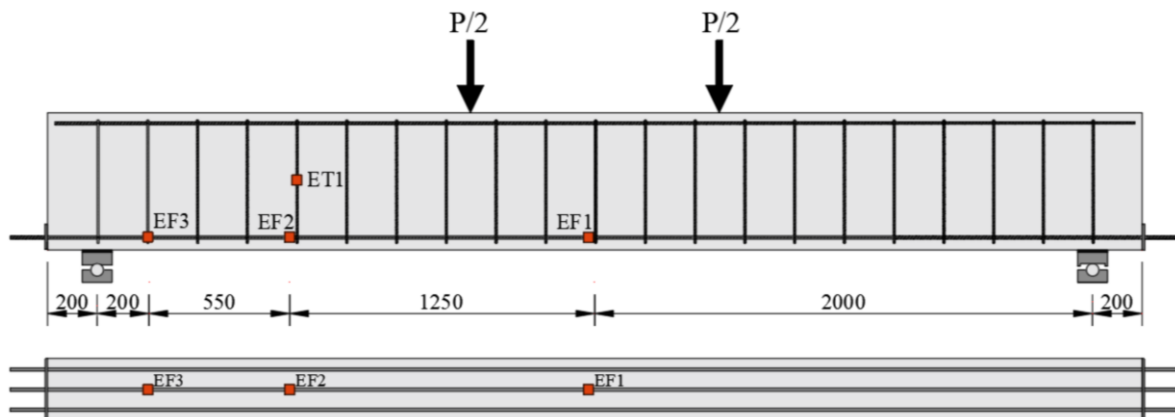


Figura 3.16: Posicionamento dos extensômetros nas armaduras de flexão e de cisalhamento.

Os extensômetros EF2, EF3 e ET1 foram posicionados numa região que foi nomeada de vão de cisalhamento e se localiza entre o ponto de aplicação de carga e o eixo do apoio.

Ressalta-se que cada ponto de medição apresenta dois extensômetros e, assim, o resultado da medição é obtido através da média das leituras dos dois extensômetros, conforme ilustra a Figura 3.17.

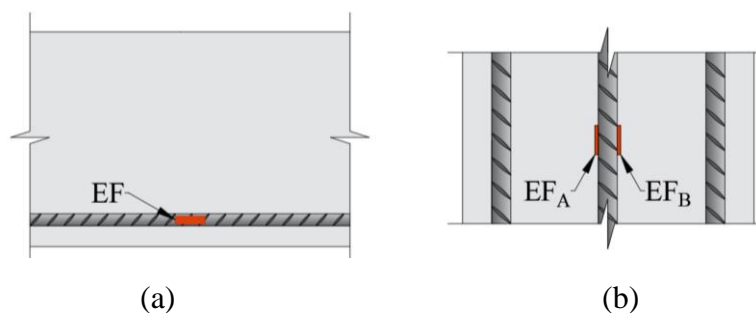


Figura 3.17: Posicionamento dos extensômetros na barra de flexão

(a) Vista lateral (b) Vista superior.

3.4.2.2. Processo de colagem dos extensômetros nas armaduras de flexão e cisalhamento

Visando proporcionar uma melhor fixação dos extensômetros, as barras de aço foram limadas e lixadas para remoção das nervuras e imperfeições na região, de forma a se obter uma superfície lisa, mas sem a redução da seção transversal da barra. Feito isso, a superfície preparada foi limpa com auxílio de algodões e álcool isopropílico.

Com a superfície limpa, os extensômetros foram colados na barra com um adesivo cianoacrilático (*Super Bonder*) e, posteriormente, cada um de seus terminais foram soldados a ponta de um cabo flexível paralelo com diâmetro de 1,5 mm que estava preso à barra por meio de abraçadeiras plásticas.

Para garantir o funcionamento dos dispositivos elétricos após a concretagem, o conjunto foi revestido por uma camada de resina epóxi, seguida de uma camada de silicone e, por fim, uma camada de fita isolante de auto fusão. A Figura 3.18 mostra todas as etapas desse processo de colagem dos extensômetros.

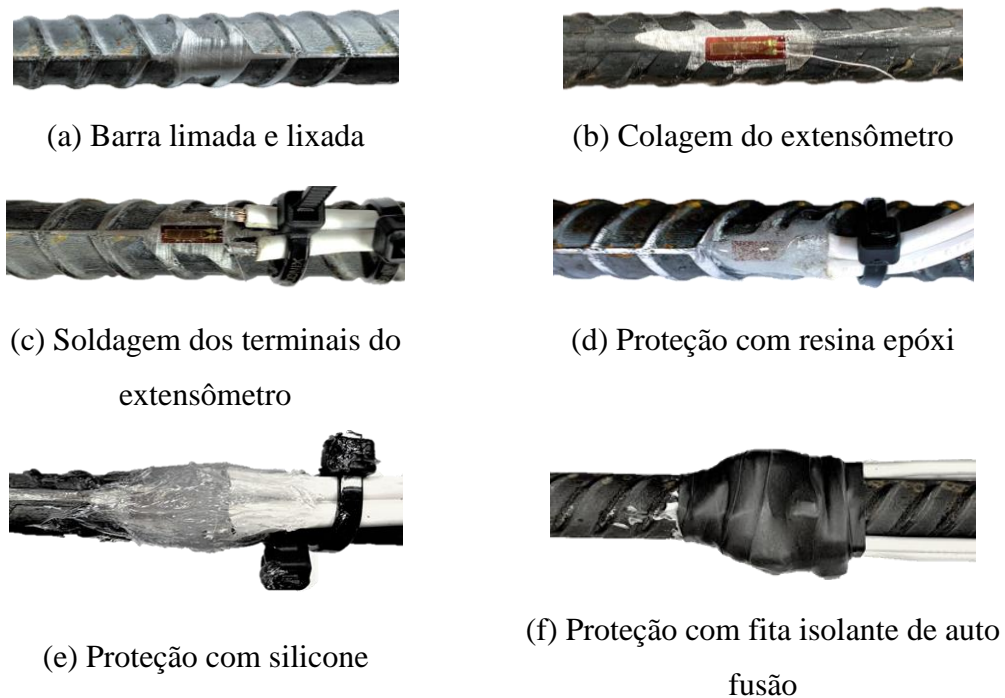


Figura 3.18: Etapas do processo de colagem dos extensômetros.

3.4.3. Deformações no reforço

3.4.3.1. Disposição dos extensômetros 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 $120 \pm 0,2 \Omega$. A Figura 3.19 ilustra o posicionamento desses extensômetros.

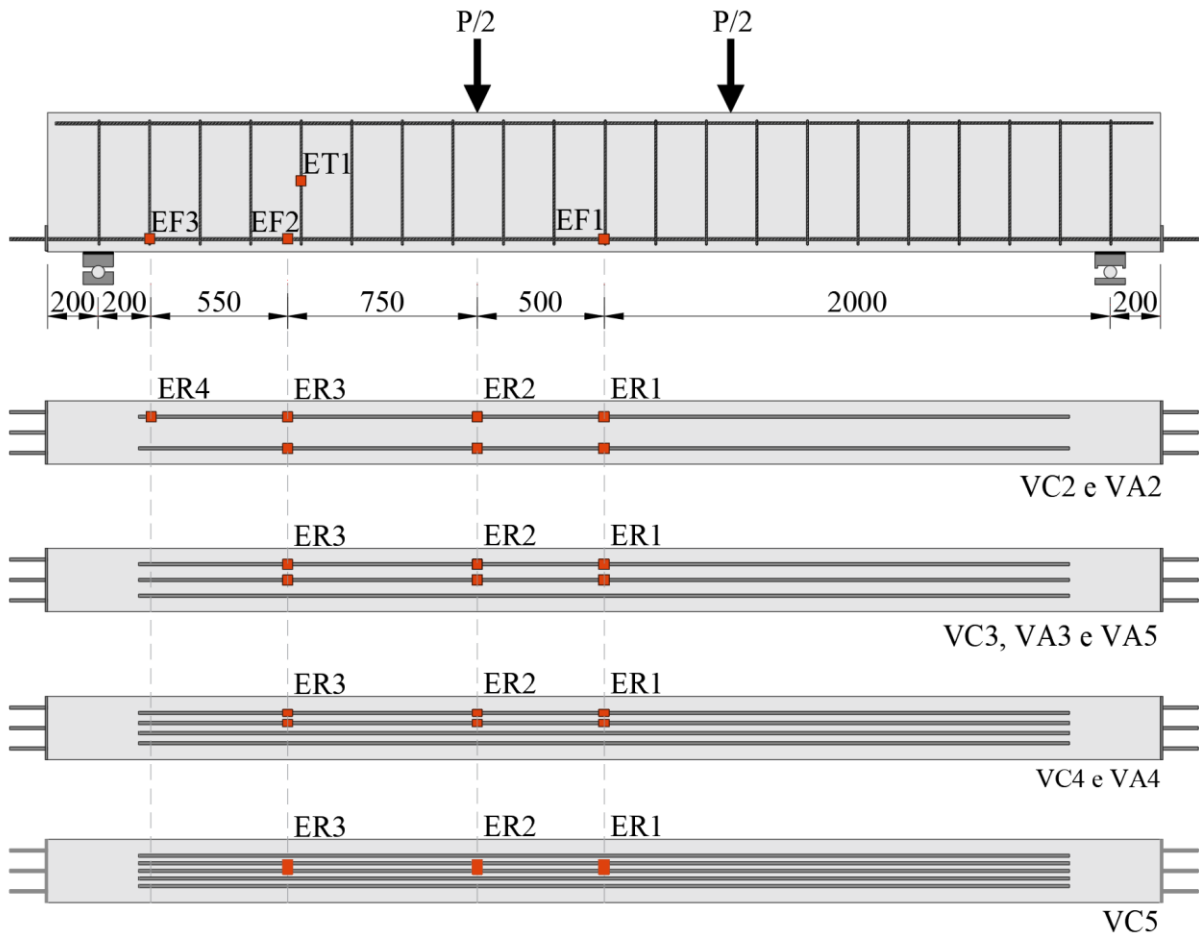


Figura 3.19: Posicionamento dos extensômetros no reforço.

No reforço optou-se por instrumentar mais de um elemento de reforço, pois o tamanho da ranhura impossibilita a colagem de dois extensômetros por ponto de medição, igual feito nos pontos de medição de deformação das armaduras de cisalhamento e flexão.

3.4.3.2. Processo de colagem dos extensômetros no reforço

Para a colagem dos extensômetros no reforço das vigas com barra de aço, o procedimento é o mesmo do citado anteriormente. Portanto, neste item será apenas descrito o processo de colagem dos extensômetros no laminado de PRFC.

Como o laminado de PRFC já é liso, não se fez necessária nenhuma preparação prévia da superfície a não ser a remoção de sujeiras com auxílio de algodões e álcool isopropílico. Dessa forma, os extensômetros foram colados diretamente sobre a superfície do laminado com um adesivo cianoacrilático (*Super Bonder*) e, posteriormente, cada um de seus terminais foram

soldados a ponta de um cabo flexível paralelo com diâmetro de 1,5 mm que estava 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 3.18 mostra todas as etapas desse processo de colagem dos extensômetros.



Figura 3.20: Posicionamento dos extensômetros no laminado de PRFC.

3.4.4. Deformações no concreto

3.4.4.1. Disposição dos extensômetros 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 120Ω modelo KC-70-120-A1-11, com o objetivo de medir as deformações do concreto durante o ensaio. A Figura 3.21 apresenta os pontos de medição do concreto.

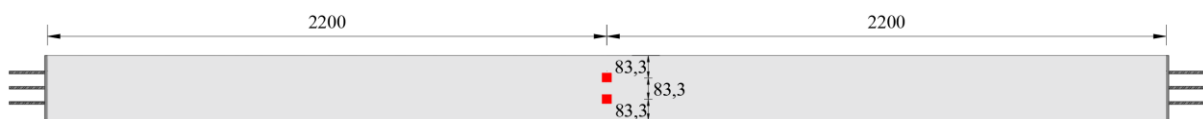


Figura 3.21: Posicionamento dos extensômetros no concreto.

3.5. PROCESSO EXECUTIVO DO REFORÇO DAS VIGAS

3.5.1. Abertura das ranhuras das vigas

Para a abertura das ranhuras das vigas reforçadas, estas foram posicionadas de cabeça pra baixo sobre caibros de madeira. Feito isso, com as marcações dos trechos que deveriam ser cortados

feitas, prosseguiu-se para a abertura das ranhuras com o auxílio de uma serra mármore da marca Makita, como pode ser observado na Figura 3.22.



Figura 3.22: Abertura das ranhuras nas vigas.

Para a ranhura das vigas reforçadas com PFRC a espessura da lâmina da serra mármore era suficiente para abrir a ranhura na largura correta, porém nas regiões onde ficariam os extensômetros no laminado era necessário fazer uma abertura maior, conforme mostra a Figura 3.23.



Figura 3.23: Abertura da ranhura para o posicionamento do extensômetro do laminado de PRFC.

Já para as ranhuras das vigas reforçadas com barra de aço, era necessário fazer dois cortes com a serra e com o auxílio de uma marreta e talhadeira remover a parte interna entre os dois cortes. Feito isso, para chegar na profundidade desejada, foi utilizado um marteleto com uma broca de 8mm. A Figura 3.24 mostra esse procedimento.



(a)



(b)

Figura 3.24: Abertura das ranhuras das vigas reforçadas com barra de aço.

A argamassa de reparo estrutural durante a execução do reforço não tem resistência suficiente para fixar a barra de aço e, por esse motivo, são necessários alguns ganchos. Dessa maneira, em cada viga foram demarcadas as posições onde iriam ser colocados os ganchos para fixar a barra durante a execução do reforço. A disposição dos ganchos nas ranhuras está ilustrada na Figura 3.25.

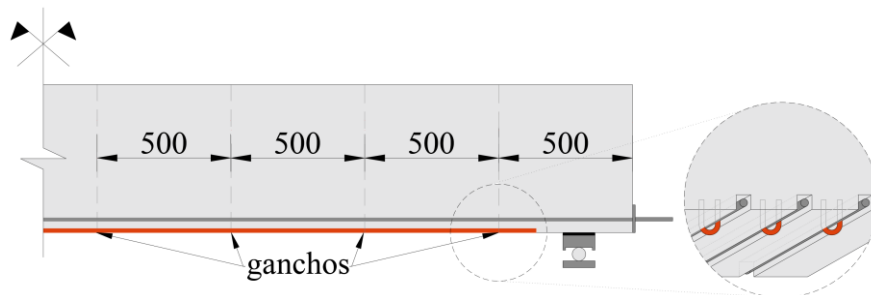


Figura 3.25: Disposições dos ganchos para a fixação das barras do reforço.

Dessa forma, nessas posições eram feitos dois furos com o auxílio de uma furadeira com broca de 6mm, uma vez que os ganchos foram executados com barra de 5 mm. A Figura 3.26 mostra a execução desses furos e o gancho.



(a) Execução dos furos



(b) Aspecto final do gancho

Figura 3.26: Execução dos furos para posicionamento dos ganchos para fixação da barra durante o reforço.

Terminado esses procedimentos, as vigas eram giradas novamente e posicionadas sobre blocos de concreto, para permitir que o reforço fosse feito contra a gravidade, a fim de garantir uma execução e condições mais próximas da realidade. A Figura 3.27 mostra o aspecto final das ranhuras e a Figura 3.28 mostra as vigas prontas para a execução do reforço.



(a)



(b)

Figura 3.27: Aspecto final das ranhuras para a execução do reforço.

(a) Vigas reforçadas com barras de aço (b) Vigas reforçadas com laminado de PRFC.



Figura 3.28: Vigas posicionadas para a execução do reforço.

3.5.2. Corte do laminado de PRFC

Como o laminado é comercialmente encontrado nas larguras padrão de 50 mm e 100 mm, é necessário o corte desse laminado, uma vez que a largura desejada é de 10 mm. Para o reforço em questão, foi adquirido o laminado de 50mm com espessura de 1,2 mm, no qual foram cortados 5 tiras de 10 mm.

Para o corte, o laminado foi cortado primeiramente no comprimento desejado (368 cm) e depois posicionado sobre a bancada. Feito isso, foram demarcadas as linhas dos cortes com um auxílio de um gabarito e régua e, assim, com auxílio de um estilete foram cortadas as tiras de 10 mm do laminado. A Figura 3.29 mostra o corte das tiras do laminado.



Figura 3.29: Corte do laminado para obtenção de tiras de 10 mm de largura.

3.5.3. Execução do reforço das vigas com PRFC

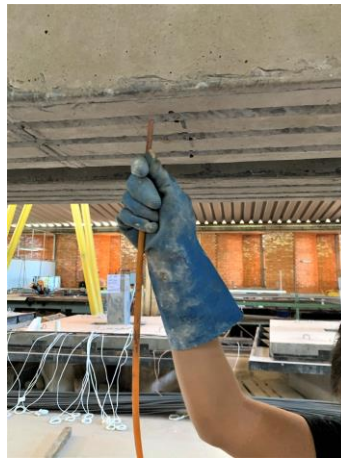
Para a execução do reforço das vigas com PRFC é necessário que o substrato esteja limpo, seco e livre de quaisquer partículas soltas, poeira, óleos, nata de cimento e outros contaminantes. Dessa maneira, todas as ranhuras foram limpas com o auxílio de compressor de ar. Os laminados de PRFC também foram limpos, a fim de eliminar qualquer resíduo que tivesse sobre sua superfície.

Feito isso, prosseguiu-se para a preparação da mistura da resina. Esta é fornecida pelo fabricante em embalagens pré-dosadas, compostas de uma base e um endurecedor. Cada um desses componentes foi homogeneizado separadamente com auxílio de uma espátula e, depois, foram misturados juntos com o auxílio de um misturador mecânico de baixa rotação até obter uma pasta homogênea.

Com a mistura pronta, preencheu a ranhura por completo com a resina e, depois, foi inserido o laminado. A resina que foi expulsa da ranhura foi retirada e foi feito o acabamento, de modo que o laminado ficasse totalmente dentro da ranhura e a ranhura totalmente preenchida pela resina. A Figura 3.30 mostra o procedimento completo da execução do reforço das vigas com PRFC.



(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 3.30: Procedimento da execução do reforço das vigas com PRFC.

3.5.4. Execução do reforço das vigas com barra de aço

Para a execução do reforço das vigas com barra de aço é necessário que o substrato esteja limpo e livre de quaisquer partículas soltas, poeira, óleos, nata de cimento e outros agentes contaminantes. Dessa maneira, assim como no reforço das vigas com PRFC, todas as ranhuras foram limpas com o auxílio de compressor de ar.

Como o fabricante recomenda que o substrato esteja umedecido até estar na condição de saturado-seco, todas as ranhuras foram molhadas com o auxílio de uma mangueira até estarem nessa condição. Feito isso, prosseguiu-se para o preparo da mistura da argamassa polimérica

(Nafuffil CR). Como ela é monocomponente, só é necessário adicionar água e misturar com auxílio de um misturador mecânico de baixa rotação. Como a pega da argamassa polimérica é relativamente rápida, optou-se por preparar a mistura para cada duas ranhuras.

Dessa forma, era pesado em uma balança 8 kg do monocomponente da argamassa polimérica. A essa quantidade eram adicionados 1,1 litros de água e, assim, eram misturados com o auxílio de um misturador mecânico por 3 a 5 minutos até atingir uma consistência homogênea.

Feito isso, dava-se início a execução do reforço da viga. Primeiro, a ranhura era preenchida até a metade com a argamassa com o auxílio de uma espátula. Depois, a barra de aço era posicionada nessa ranhura por 3 pessoas, que a ficavam segurando, enquanto uma pessoa, com auxílio de uma marreta, vinha inserindo os ganchos nos furos feitos previamente. Por fim, a ranhura era preenchida por completo e era feito o acabamento.

A Figura 3.31 mostra o procedimento completo da execução do reforço das vigas com barra de aço.



(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 3.31: Procedimento da execução do reforço das vigas com barra de aço.

Ressalta-se que foi realizada uma cura úmida da argamassa polimérica, onde as ranhuras foram irrigadas 3 vezes ao dia durante o período de 7 dias.

3.6. SISTEMA DE ENSAIO

Como descrito anteriormente, todas as vigas propostas possuem seção transversal retangular, tendo largura de 250 mm, altura total de 550 mm, comprimento total de 4400 mm e vão livre de 4000 mm.

Para dimensionar estas vigas, foi necessário, além de definir a sua geometria, definir o método de ensaio destes elementos. Desta forma, todas as vigas deverão ser ensaiadas com duas cargas concentradas simétricas, aplicadas a 1500 mm dos apoios, com auxílio de uma viga metálica de distribuição. A Figura 3.32 apresenta o esquema estático de carregamento dos ensaios propostos.

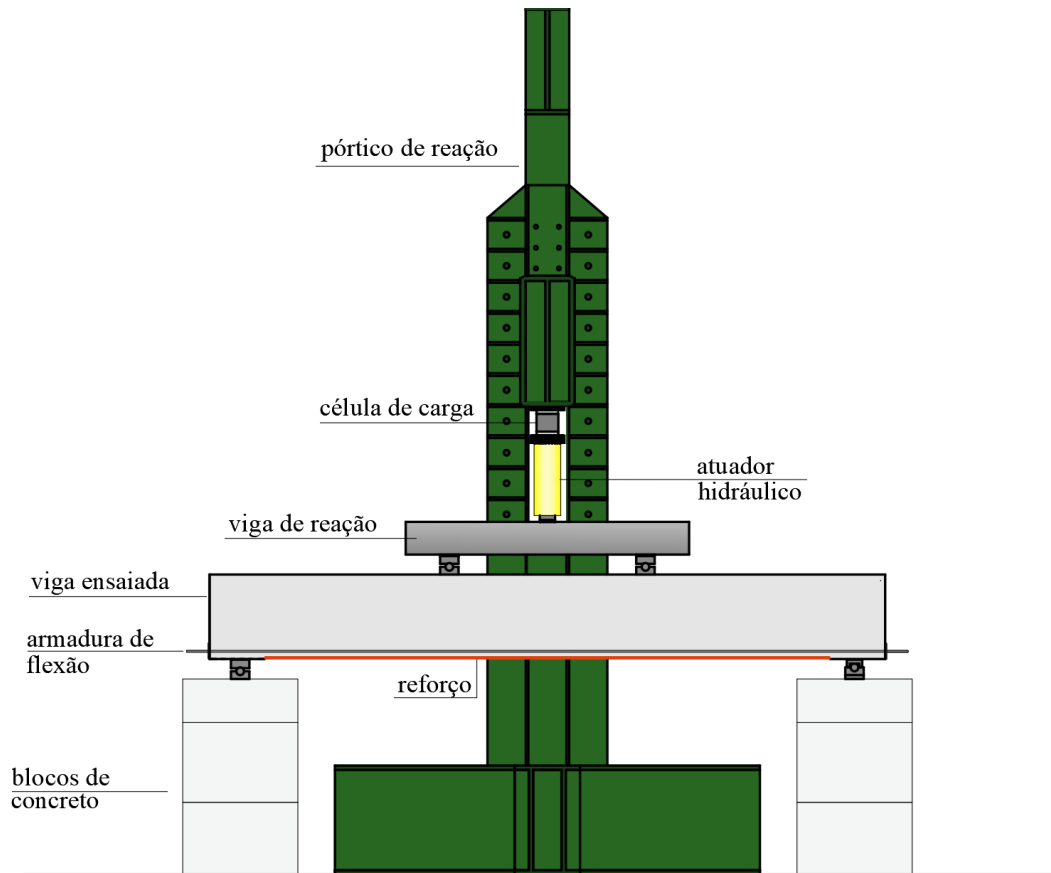


Figura 3.32: Representação do esquema estático de carregamento das vigas

A Figura 3.33 apresenta os diagramas de momento fletor e de esforço cortante, utilizados no dimensionamento das vigas.

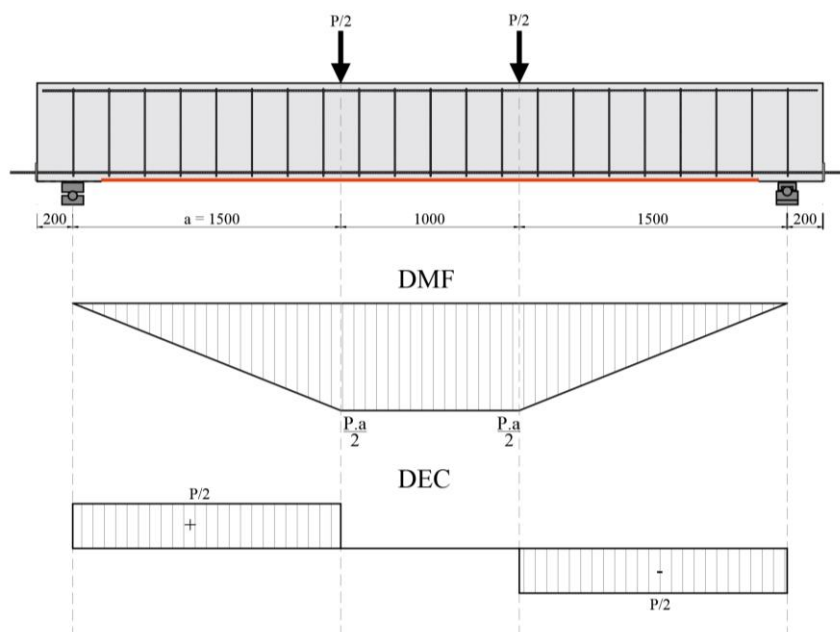


Figura 3.33: Representação dos diagramas de momento fletor e esforço cortante das vigas.

A carga era aplicada durante o ensaio por um cilindro hidráulico da marca *Enerpac* com capacidade de 500 kN e por meio de uma viga metálica de distribuição, essa carga era aplicada em dois pontos na viga. Para o monitoramento da carga aplicada durante o ensaio, foi utilizada uma célula de carga da marca HBM com capacidade de 500 kN.

As leituras de todos extensômetros, LVDTs e da célula de carga foram feitos por meio de um sistema de aquisição de dados *Spider 8* da marca HBM. O processamento e armazenamento dos dados foram feitos de forma automática, numa frequência de uma leitura por segundo, pelo programa *Catman*, o qual converteu 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

Foram preparados três corpos de prova de cada diâmetro para o ensaio de tração uniaxial, porém por um problema constatado depois no extensômetro utilizado para a leitura das deformações,

só foi possível obter um resultado para cada diâmetro. A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração do aço.

Tabela 4.1: Propriedades mecânicas do aço utilizado nas vigas.

ϕ (mm)	f_{ys} (MPa)	f_u (MPa)	E_s (GPa)	ϵ_s (%)
8	684,4	540,4	185,1	2,9
10	643,9	789,3	230,0	2,8
12,5	548,2	687,3	195,79	2,8
Obs: f_{ys} – Tensão de escoamento f_u – Tensão máxima E_s – Módulo de elasticidade longitudinal do aço ϵ_s – Deformação de escoamento				

4.1.2. Concreto

Para a caracterização do concreto, foram realizados ensaios de resistência à compressão, resistência à tração e ensaio de módulo de elasticidade. Dos nove corpos de prova de cada grupo (seis grupos ao todo), três CPs foram ensaiados à compressão, três CPs foram ensaiados à tração e três foram ensaios para obtenção do módulo de elasticidade. Como o ensaio de módulo não leva os CPs até a ruptura, esses depois foram ensaiados à compressão também. As médias dos resultados estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Propriedades mecânicas do concreto utilizado nas vigas.

Grupo	$E_{c,med}$ (GPa)	f_c (MPa)	f_{ct} (MPa)
1	36,69	49,94	4,79
2	33,63	43,22	4,66
3	38,33	43,71	4,15
4	32,90	42,01	3,84
5	32,15	42,69	3,54
6	27,99	44,03	3,65
MÉDIA	33,62	44,27	4,11
$E_{c,med}$ – Módulo de elasticidade médio f_{ctm} – Resistência à tração média f_{cm} – Resistência à compressão média			

4.1.3. Argamassa

Para a caracterização da argamassa polimérica, foram realizados ensaios de resistência à compressão, resistência à tração e ensaio de módulo de elasticidade. Dos nove corpos de prova moldados, três CPs foram ensaiados à compressão, três CPs foram ensaiados à tração e três foram ensaios para obtenção do módulo de elasticidade. Como o ensaio de módulo não leva os

CPs até a ruptura, esses depois foram ensaiados à compressão também. As médias dos resultados estão apresentados na Tabela 4.3

Tabela 4.3: Propriedades mecânicas da argamassa polimérica utilizada nas vigas.

$E_{c,med}$ (GPa)	f_c (MPa)	f_{ct} (MPa)
54,8	52,97	3,42
$E_{c,med}$ – Módulo de elasticidade médio f_{ctm} – Resistência à tração média f_{cm} – Resistência à compressão média		

4.2. CARGAS ÚLTIMAS E MODO DE RUPTURA DAS VIGAS

Na

Tabela 4.5 estão apresentadas as capacidades de carga e o modo de ruptura dos modelos ensaiados e as Figuras de 4.1 a 4.9 mostram uma visão geral das vigas após os ensaios.

Tabela 4.4: Resultados experimentais das vigas ensaiadas.

Viga	Reforço	ρ_r (%)	P_u (kN)	P_u/P_{ref}	Modo de Ruptura
VR1	-	-	153	-	Flexão – deformação excessiva do aço e esmagamento do concreto
VC2	2 lâminas PRFC	0,02	188	1,23	Flexão – deformação excessiva do aço e da fibra e esmagamento do concreto
VC3	3 lâminas PRFC	0,03	205	1,34	
VC4	4 lâminas PRFC	0,04	223	1,46	Flexão – deformação excessiva do aço e da fibra
VC5	5 lâminas PRFC	0,05	248	1,62	Flexão – deformação excessiva do aço e da fibra e esmagamento do concreto
VA2	2 barras ϕ 8	0,08	188	1,23	Flexão – deformação excessiva do aço e esmagamento do concreto
VA3	3 barras ϕ 8	0,12	209	1,36	
VA4	4 barras ϕ 8	0,16	231	1,51	
VA5	3 barras ϕ 10	0,19	224	1,46	Flexão – deformação excessiva do aço e deslocamento da argamassa
Obs: - Todas as armaduras de flexão das vigas eram compostas por três barras de ϕ 12,5mm ($\rho_f = 0,29$ %) - 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					



Figura 4.1: Vista frontal do trecho central da viga VR1 após o ensaio.



Figura 4.2: Vista frontal do trecho central da viga VC2 após o ensaio.



Figura 4.3: Vista frontal do trecho central da viga VC3 após o ensaio.



Figura 4.4: Vista frontal do trecho central da viga VC4 após o ensaio.



Figura 4.5: Vista frontal do trecho central da viga VC5 após o ensaio.



Figura 4.6: Vista frontal do trecho central da viga VA2 após o ensaio.



Figura 4.7: Vista frontal do trecho central da viga VA3 após o ensaio.



Figura 4.8: Vista frontal do trecho central da viga VA4 após o ensaio.

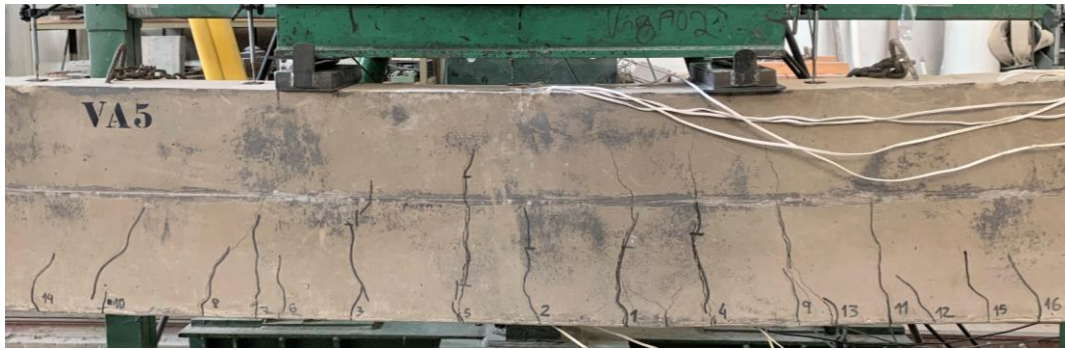


Figura 4.9: Vista frontal do trecho central da viga VA5 após o ensaio.

Conforme pode ser observado, todas as vigas apresentaram padrão de fissuração semelhante. Durante o ensaio, as primeiras fissuras originadas eram verticais entre os pontos de aplicação de carga. Com o aumento da carga aplicada, essas fissuras aumentavam o seu comprimento e abertura e outras fissuras inclinadas no vão de cisalhamento eram originadas, porém ainda distantes dos apoios das vigas. Ao final do ensaio, foi observado que as maiores aberturas de fissuras eram localizadas próximas aos pontos de aplicação de carga.

Comparando-se as cargas últimas, observa-se que todas as vigas reforçadas tiveram um acréscimo de carga significativo com relação à viga de referência (da ordem de 20% a 60%, variando de acordo com o aumento da taxa de reforço) e dentro do que havia sido dimensionado.

Além disso, pode-se observar também que as vigas VA2, VA3 e VA4 tiveram valores de carga última próximos a carga da viga equivalente reforçada com PRFC ($VC2 = 188$ kN, $VC3 = 205$ kN, $VC4 = 223$ kN, respectivamente) e, além disso, apresentaram o mesmo modo de ruptura (Flexão - deformação plástica excessiva e esmagamento do concreto).

A única viga com capacidade resistente aquém do esperado foi a viga VA5 (cerca de 92% da carga estimada). Essa também foi a única viga que apresentou um modo de ruptura diferente das demais (Flexão – deformação excessiva do aço e deslocamento da argamassa). Isso pode ser explicado por uma possível falha de execução do reforço, uma vez que durante a execução foi constatada uma dificuldade no preenchimento da ranhura com a argamassa devido às barras do reforço dessa viga serem de maior diâmetro que as demais. Ressalta-se que todas as ranhuras das vigas ensaiadas tinham a mesma largura e essa era a única viga cujas barras usadas no reforço tinham 10 mm de diâmetro e essa diferença da seção da barra dificultou até no posicionamento dos ganchos. Outros indícios de que esse deslocamento se deu por alguma falha de execução do reforço, foi porque além de ter ocorrido somente em uma ranhura, ele não

ocorreu de forma simétrica e estava localizado em regiões onde não havia fissuras. As Figuras 4.10 a 4.12 mostram os locais onde ocorreram esse deslocamento da argamassa.



Figura 4.10: Ranhuras da viga VA5 após o ensaio.



Figura 4.11: Deslocamento da argamassa em regiões sem fissuras.



Figura 4.12: Deslocamento da argamassa próximo ao apoio da viga.

A Figura 4.13 mostra o acréscimo da capacidade resistente em função do aumento da taxa de reforço. Nota-se que o acréscimo de carga é diretamente proporcional ao acréscimo da taxa de reforço. Esse padrão só não foi observado na viga VA5, devido a viga ter apresentado um outro modo de ruptura.

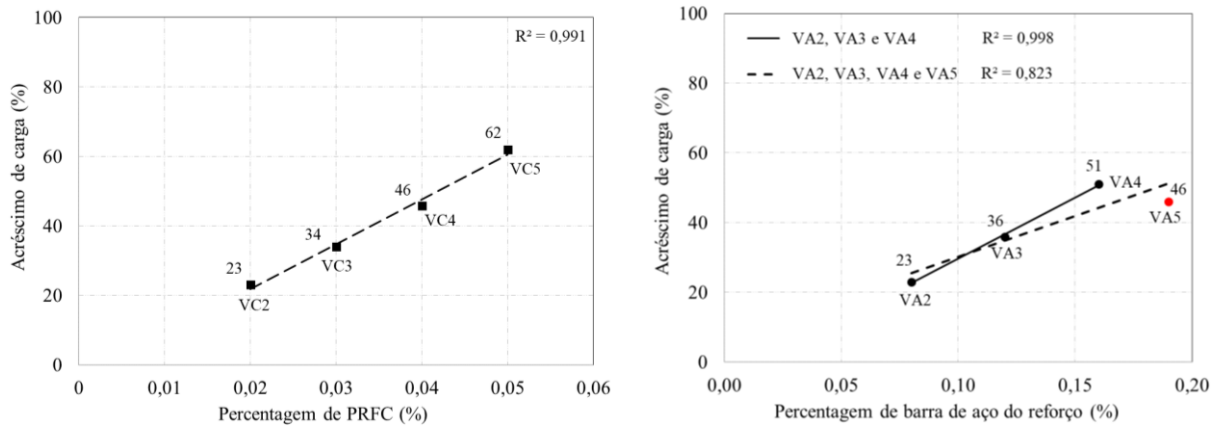


Figura 4.13 – Efeito da taxa de reforço no aumento da capacidade resistente

(a) vigas reforçadas com PRFC (b) vigas reforçadas com barras de aço

4.3. DEFORMAÇÕES NAS ARMADURAS DE FLEXÃO

Em todas as vigas que compõem o programa experimental a barra de flexão central foi instrumentada em três pontos (meio do vão da viga, meio do vão de cisalhamento e próximo ao apoio), sendo cada ponto composto por dois extensômetros posicionados diametralmente opostos.

Dessa forma, as Figuras 4.14 a 4.22 mostram a média das leituras medidas pelos dois extensômetros em cada um dos pontos, ou, em casos onde as leituras diferiam mais de 20%, era tomado apenas o maior valor.

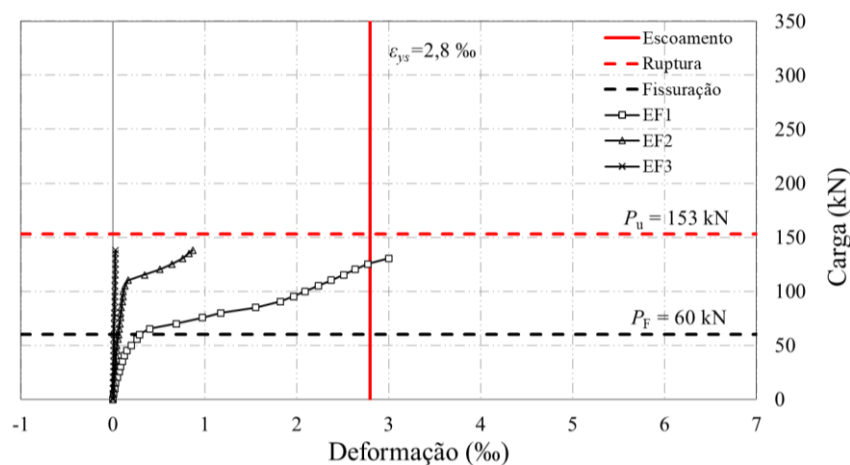


Figura 4.14: Deformações na armadura de flexão da viga VR1.

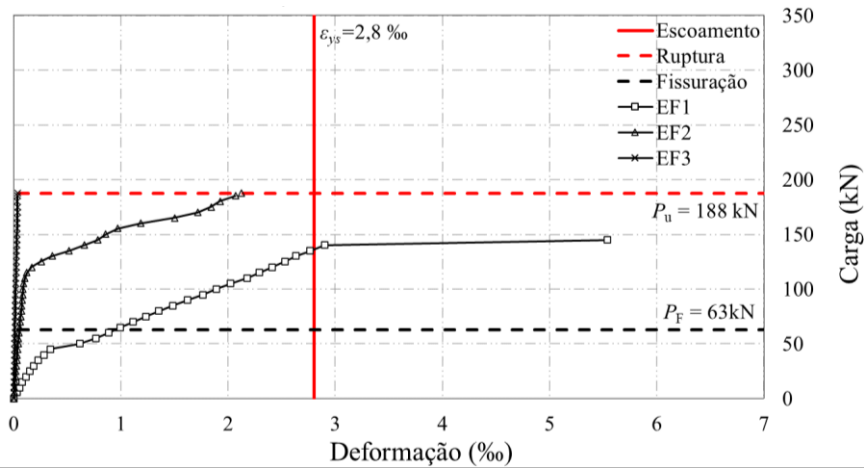


Figura 4.15: Deformações na armadura de flexão da viga VC2.

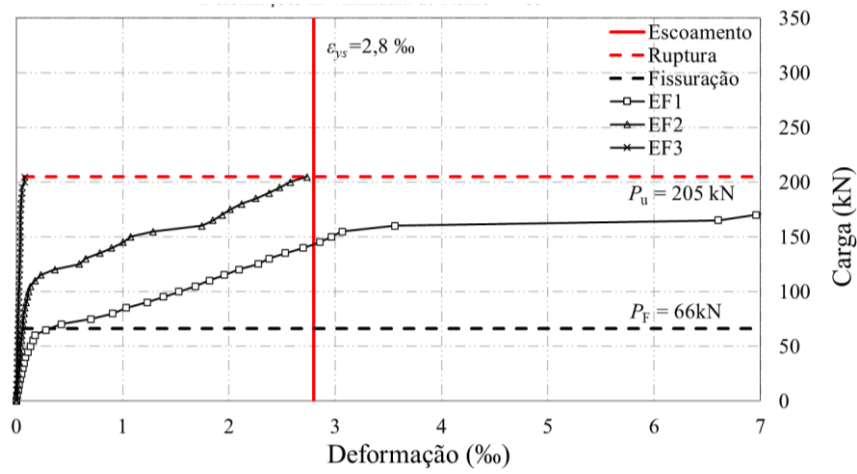


Figura 4.16: Deformações na armadura de flexão da viga VC3.

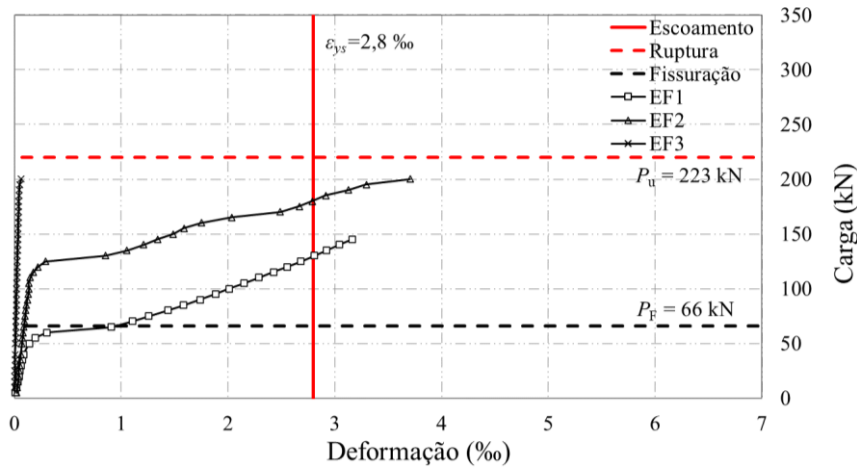


Figura 4.17: Deformações na armadura de flexão da viga VC4.

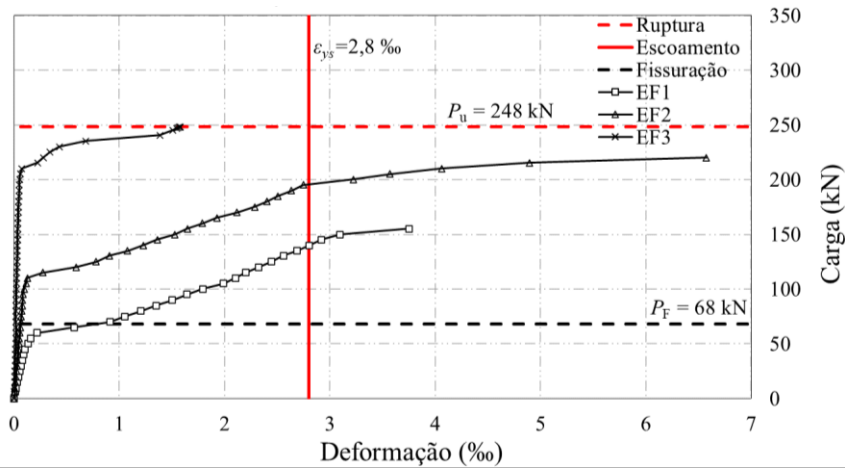


Figura 4.18: Deformações na armadura de flexão da viga VC5.

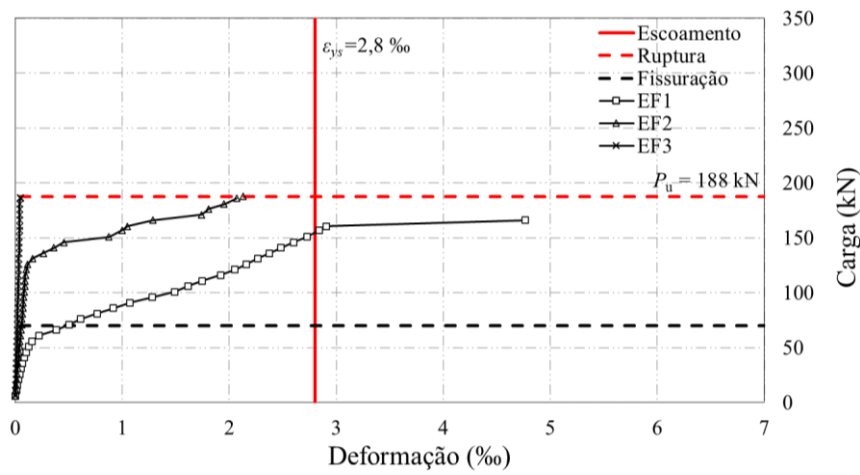


Figura 4.19: Deformações na armadura de flexão da viga VA2.

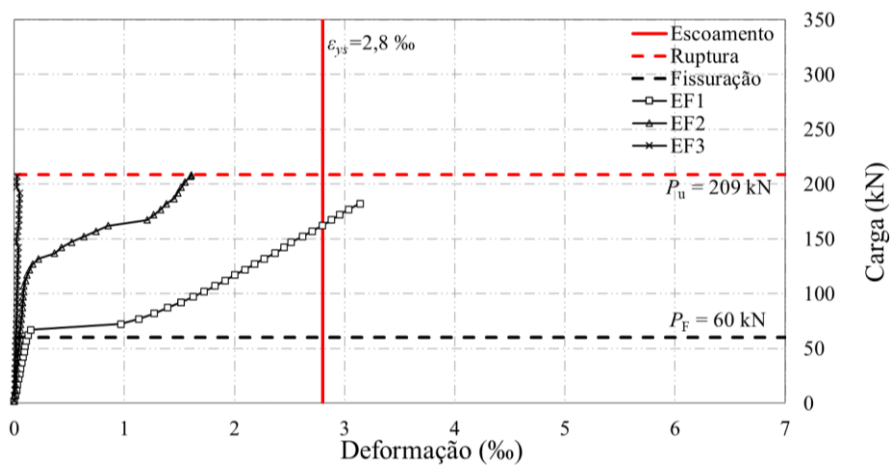


Figura 4.20: Deformações na armadura de flexão da viga VA3.

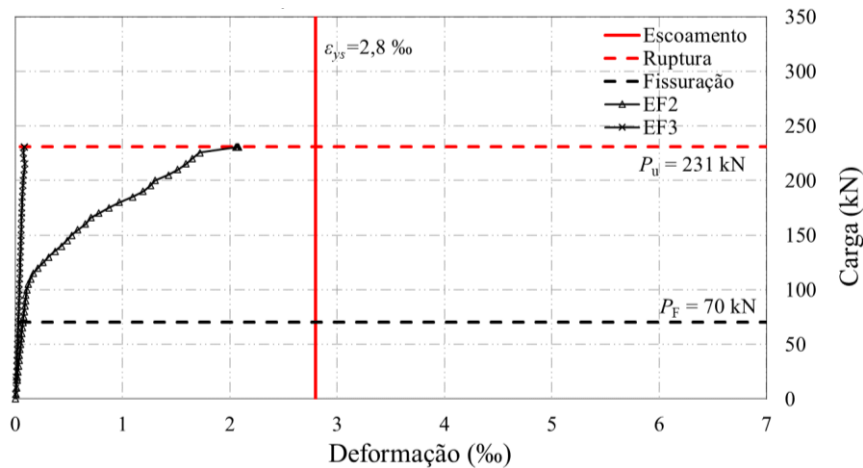


Figura 4.21: Deformações na armadura de flexão da viga VA4.

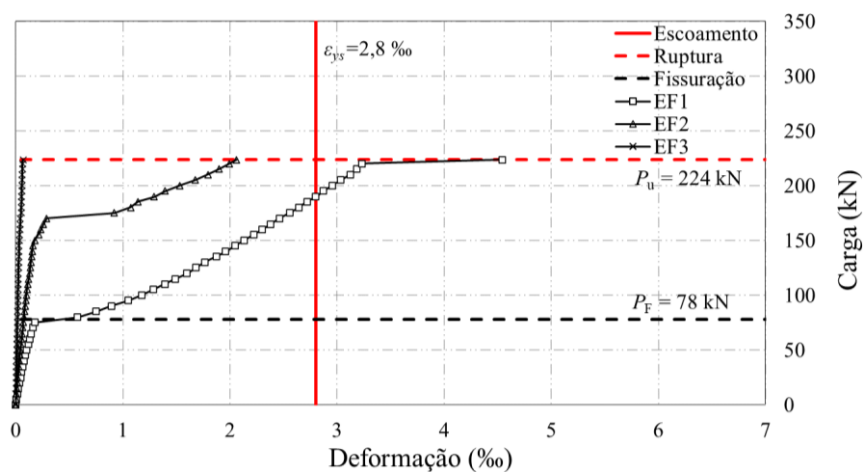


Figura 4.22: Deformações na armadura de flexão da viga VA5.

Com relação à aquisição dos dados da viga VR1, por falhas no sistema de aplicação de carga, o ensaio teve que ser interrompido em 138 kN e, depois disso foi retomado, porém, o único dado que foi medido após isso foi o da célula de carga. Por esse motivo, as leituras dos extensômetros apresentadas na Figura 4.14 só foram medidas até valor de carga. Já na viga VA4, os dois extensômetros da posição EF1 foram perdidos antes do início do ensaio e, por isso, esses valores não estão apresentados no gráfico.

Analisando o comportamento de todas as vigas, pode-se observar que todas as vigas tiveram suas armaduras de flexão escoando. Isso explica o modo de ruptura acompanhado de deslocamentos maiores que 50 mm e aberturas de fissuras maiores que 5 mm, que todas as vigas apresentaram. Além disso, o aumento da taxa de reforço não foi suficiente para aumentar a rigidez de tal forma que impedisse o escoamento das armaduras de flexão, o que está de acordo com o comportamento desejado no dimensionamento dessas vigas.

Nas Figuras 4.23 e 4.24 estão apresentados os resultados das deformações para o extensômetro EF1 das vigas com relação ao tipo de reforço executado, notando-se um comportamento bem similar até os últimos níveis de carga.

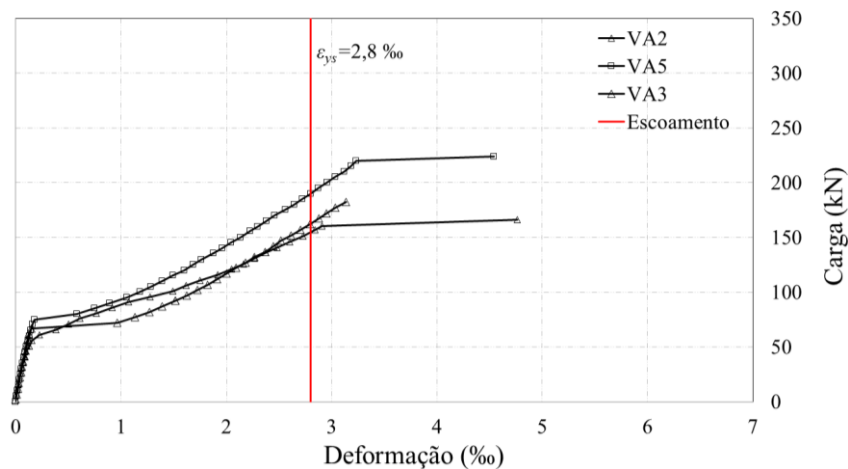


Figura 4.23: Deformações do extensômetro EF1 das vigas reforçadas com barras de aço.

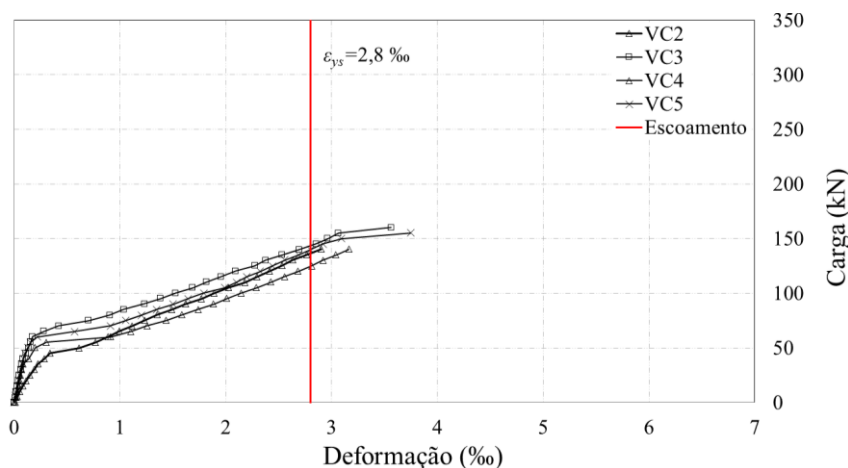


Figura 4.24: Deformações do extensômetro EF1 das vigas reforçadas com PRFC.

Ressalta-se que os valores da viga VA4 não estão apresentados na Figura 4.23, pois o extensômetro EF1 não estava funcionando antes do início do ensaio.

Pode-se observar que o aumento da taxa de reforço proporcionou um aumento da carga de escoamento das vigas. Para as vigas reforçadas com PRFC esse valor variou de 8% a 11% e para as vigas reforçadas com barras de aço esse valor foi de 23% a 51%.

Nas Figuras 4.25, 4.26 e 4.28 estão apresentados os resultados das deformações para o extensômetro EF1 das vigas com relação à taxa de reforço e, assim, é possível comparar os tipos de reforço para cada taxa de reforço. Já a Figura 4.27 apresenta os valores obtidos pelo

extensômetro EF2, para que pudesse ser feita a comparação entre a VA4 e a VC4, uma vez que a viga VA4 não tem dados para o extensômetro EF1.

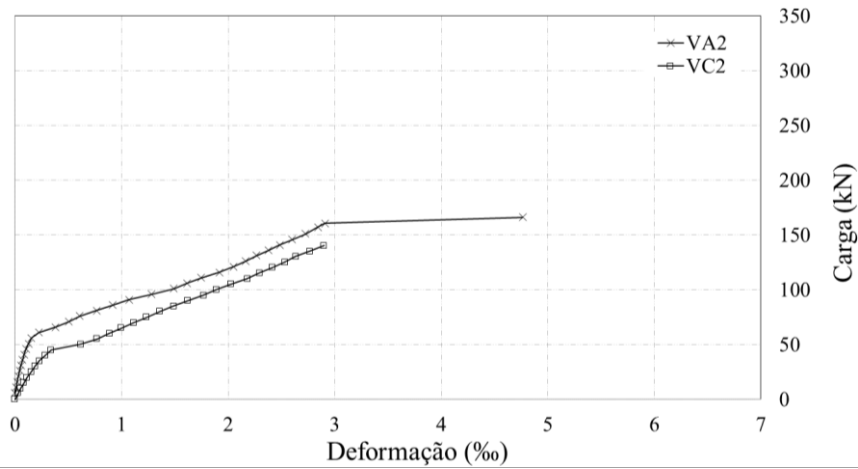


Figura 4.25: Deformações do extensômetro EF1 das vigas VA2 e VC2.

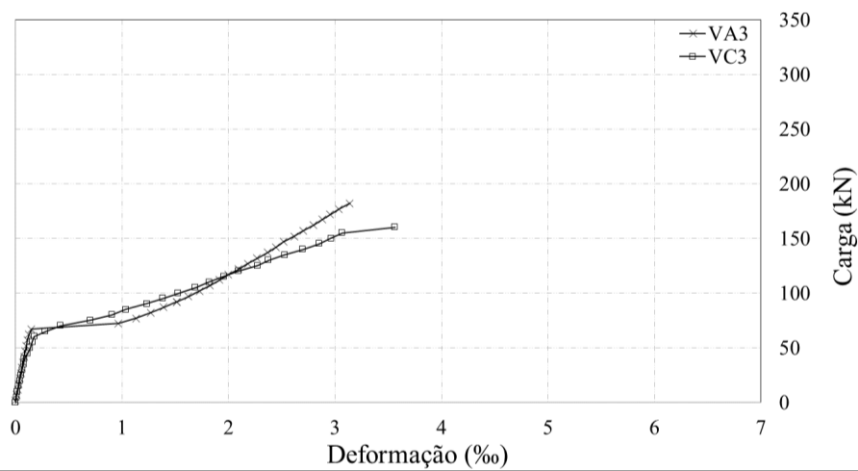


Figura 4.26: Deformações do extensômetro EF1 das vigas VA3 e VC3.

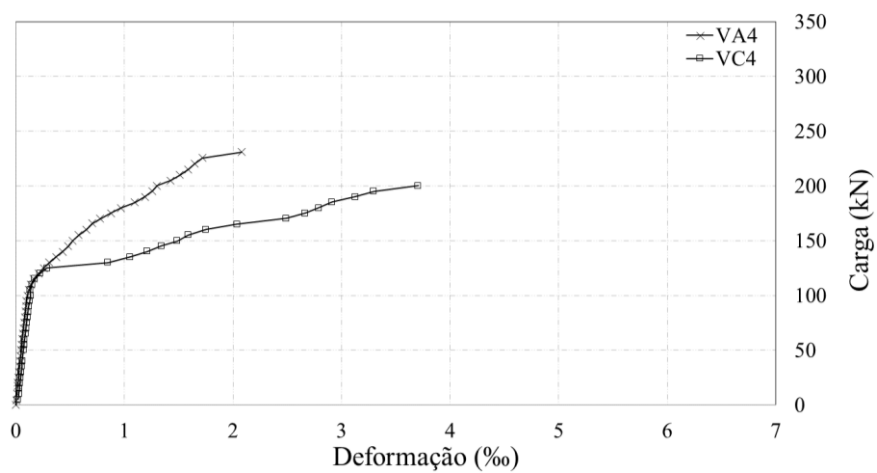


Figura 4.27: Deformações do extensômetro EF2 das vigas VA4 e VC4.

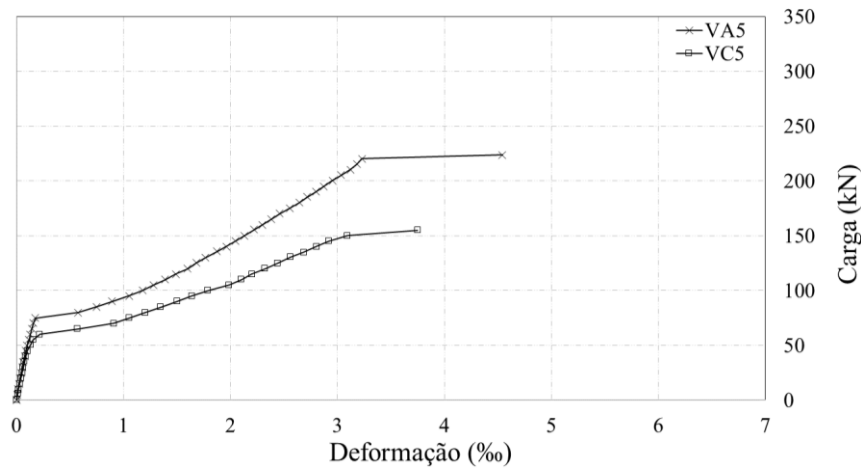


Figura 4.28: Deformações do extensômetro EF1 das vigas VA5 e VC5.

Comparando as deformações medidas das vigas reforçadas com barras de aço e PRFC, pode-se verificar que as vigas reforçadas com aço apresentaram um comportamento mais rígido, sendo essa diferença mais perceptível com o aumento da taxa de reforço. Comportamento semelhante ao observado por Almusallam *et al.* (2013). Esse aumento da rigidez também foi observado no aumento da carga de escoamento, apresentando uma diferença entre 15% e 35% maior do que a carga de escoamento das vigas reforçadas com PRFC.

Como para as vigas VA2 e VA3 as armaduras de flexão chegaram a níveis de deformação muito próximos das vigas VC2 e VC3, respectivamente, pode-se considerar que para essas taxas de reforço (0,08% e 0,12%) o tipo de reforço não afetou o comportamento das deformações das armaduras de flexão e suas cargas últimas (não diferem mais do que 2%).

4.4. DEFORMAÇÕES NAS ARMADURAS DE CISALHAMENTO

Em todas as vigas do programa experimental o estribo do meio do vão de cisalhamento foi instrumentado em um ponto médio da altura da perna do estribo com dois extensômetros diametralmente opostos. Dessa forma, as Figuras 4.29 a 4.37 mostram a média das leituras medidas pelos dois extensômetros nesse ponto em cada viga, ou, em casos onde as leituras diferiam mais de 20%, era tomado apenas o maior valor.

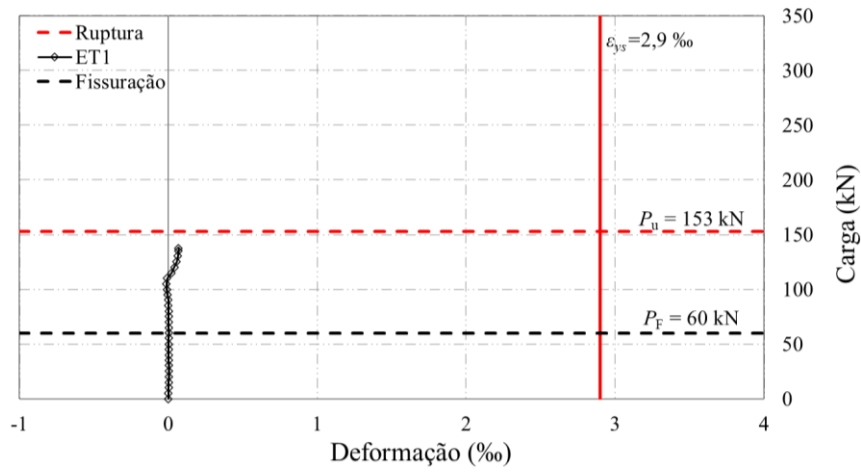


Figura 4.29: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VR1.

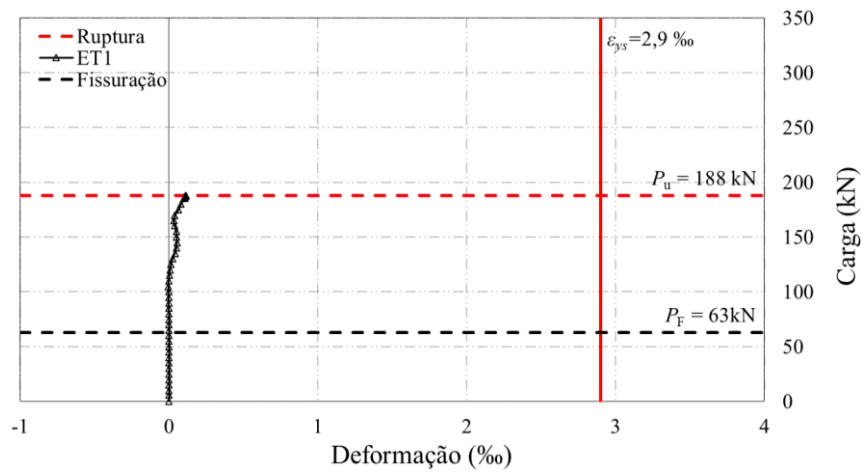


Figura 4.30: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VC2.

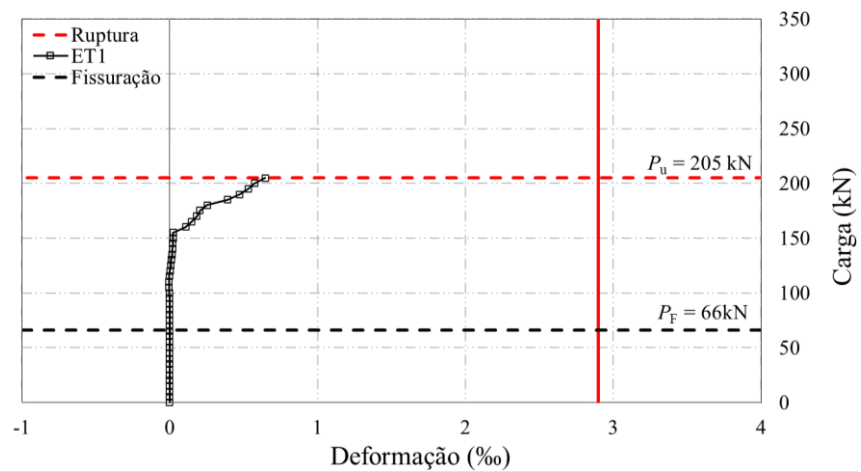


Figura 4.31: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VC3.

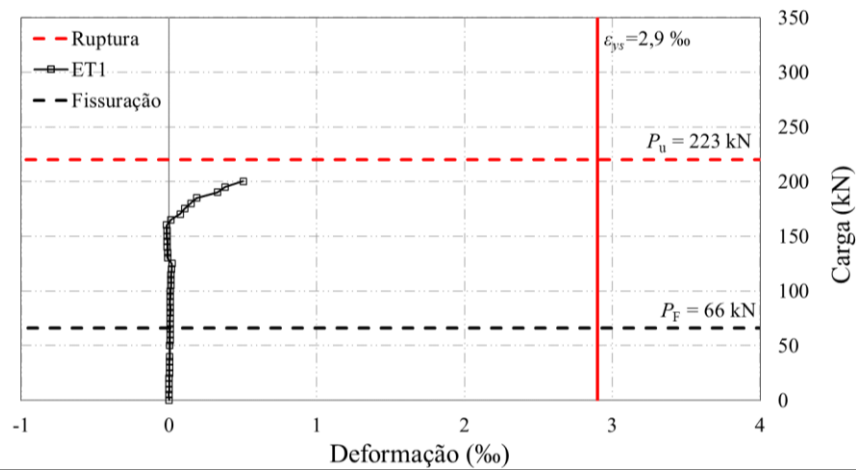


Figura 4.32: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VC4.

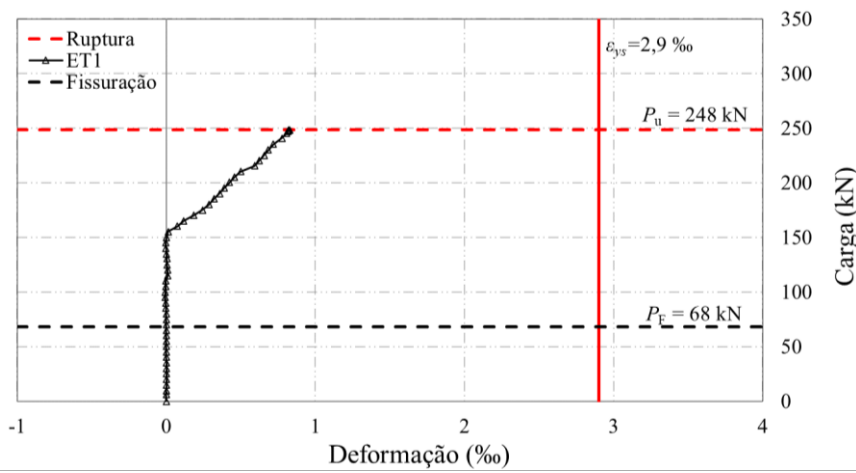


Figura 4.33: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VC5.

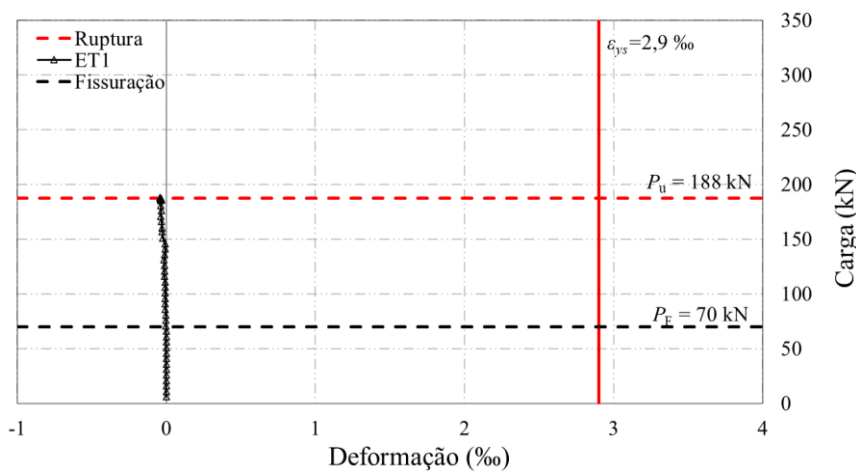


Figura 4.34: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VA2.

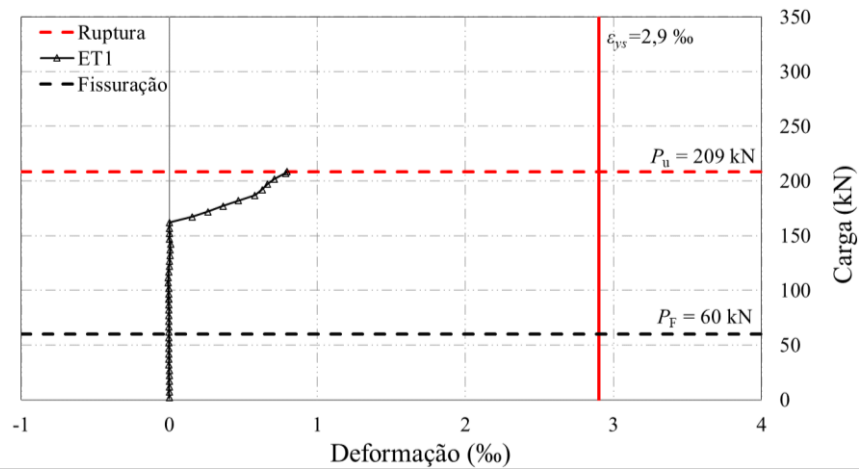


Figura 4.35: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VA3.

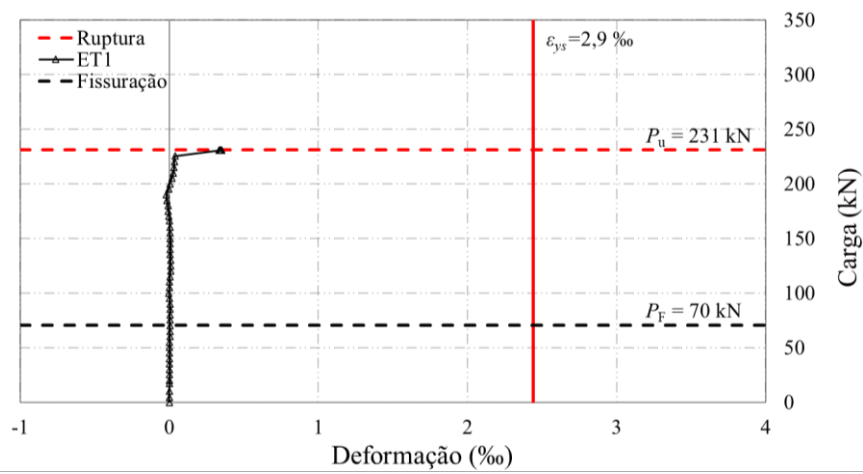


Figura 4.36: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VA4.

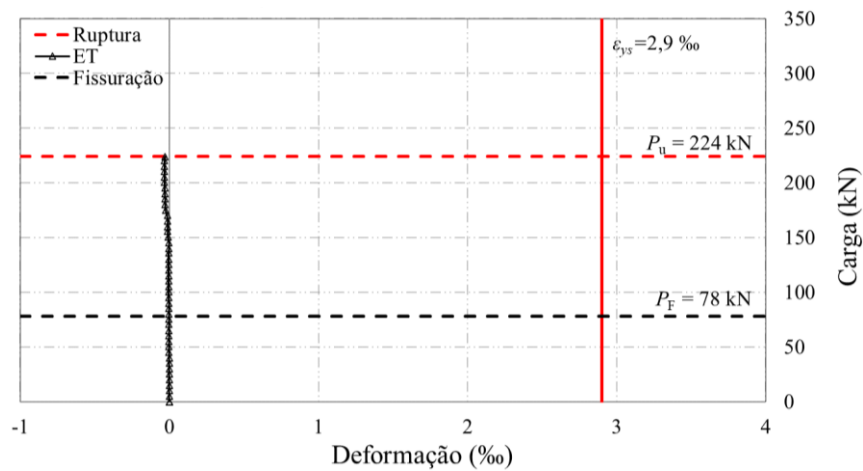


Figura 4.37: Deformações na armadura de cisalhamento da viga VA5.

Da mesma maneira que ocorreu nas leituras das armaduras de flexão da VR1, as leituras dos extensômetros do estribo da VR1 também foram interrompidas em 138 kN. Dessa forma, na Figura 4.29, as leituras só foram obtidas até esse valor de carga.

Comparando todas as vigas, pode-se observar que as armaduras de cisalhamento não alcançaram a tensão de escoamento, mostrando que a relação a/d considerada foi suficiente para garantir a ruptura por flexão.

4.5. DEFORMAÇÕES NO REFORÇO

Nas vigas reforçadas que compõem o programa experimental, o reforço (laminado de PRFC ou barra de aço) foi instrumentado em três pontos (meio do vão da viga, abaixo do ponto de aplicação de carga e meio do vão de cisalhamento). Por uma limitação do tamanho das ranhuras, foram instrumentadas duas barras de aço/dois laminados de PRFC, uma vez que não caberia dois extensômetros no mesmo ponto. Dessa forma, as Figuras 4.38 a 4.45 mostram a média das leituras medidas pelos dois extensômetros referentes ao mesmo ponto de leitura, porém de laminados/barras de aço diferentes.

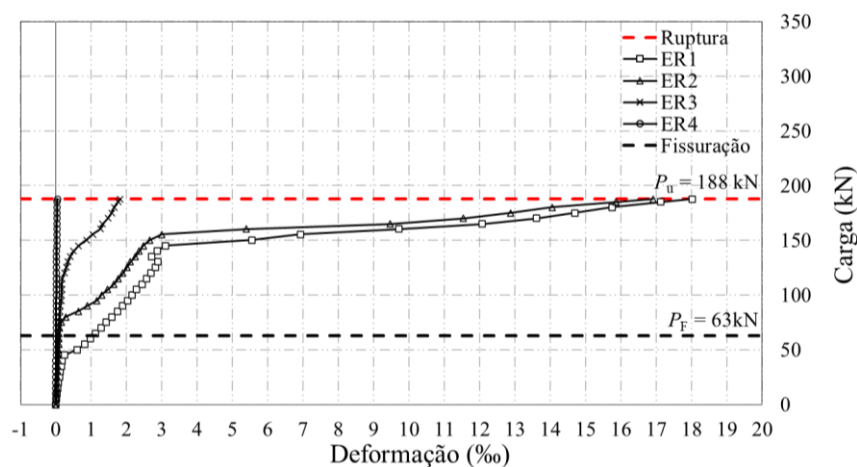


Figura 4.38: Deformações no reforço da viga VC2.

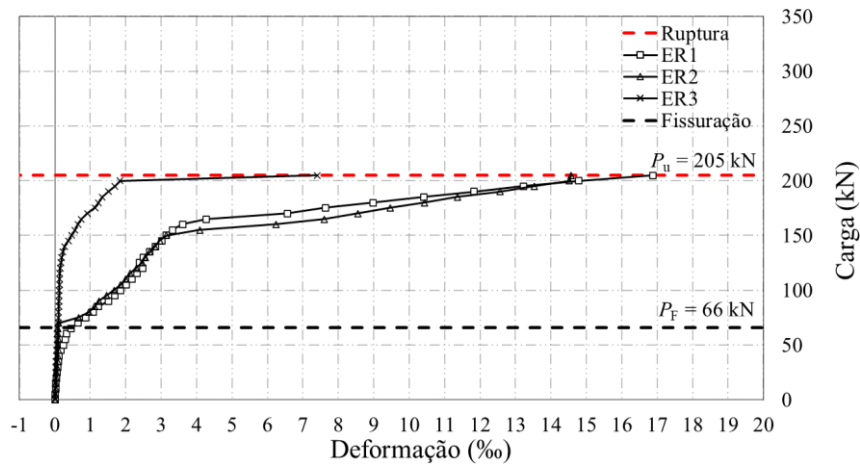


Figura 4.39: Deformações no reforço da viga VC3.

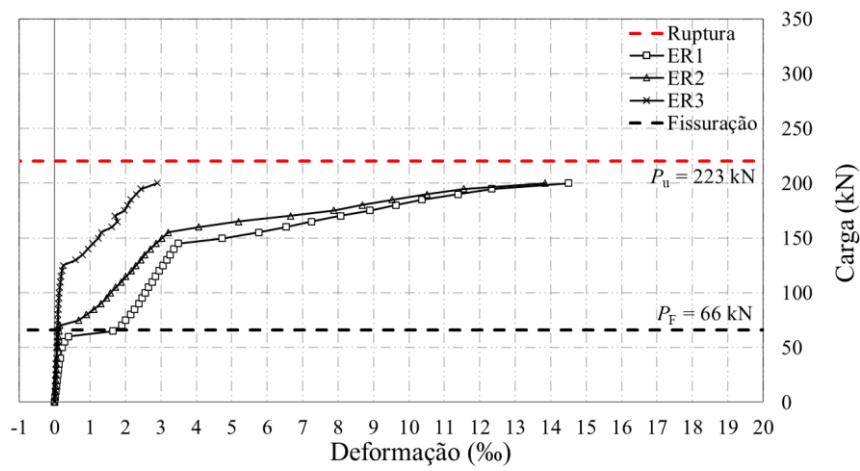


Figura 4.40: Deformações no reforço da viga VC4.

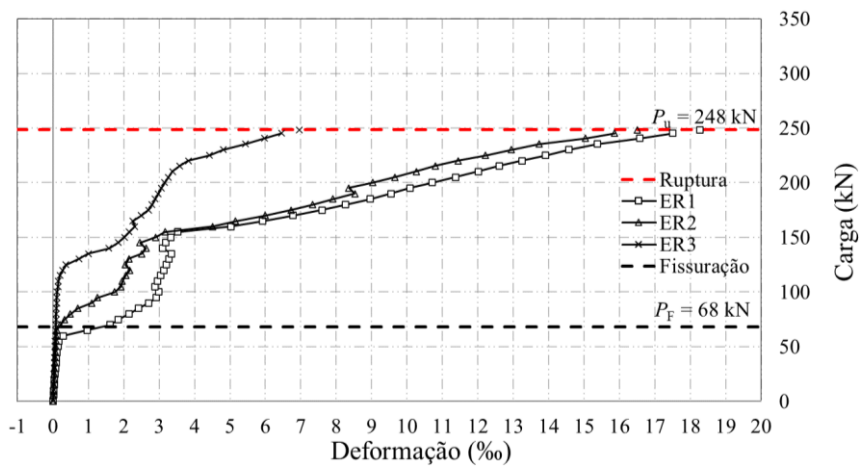


Figura 4.41: Deformações no reforço da viga VC5.

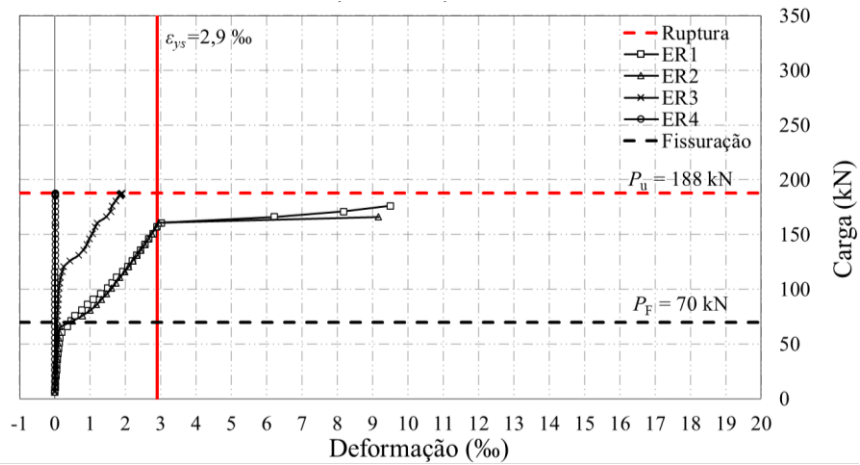


Figura 4.42: Deformações no reforço da viga VA2.

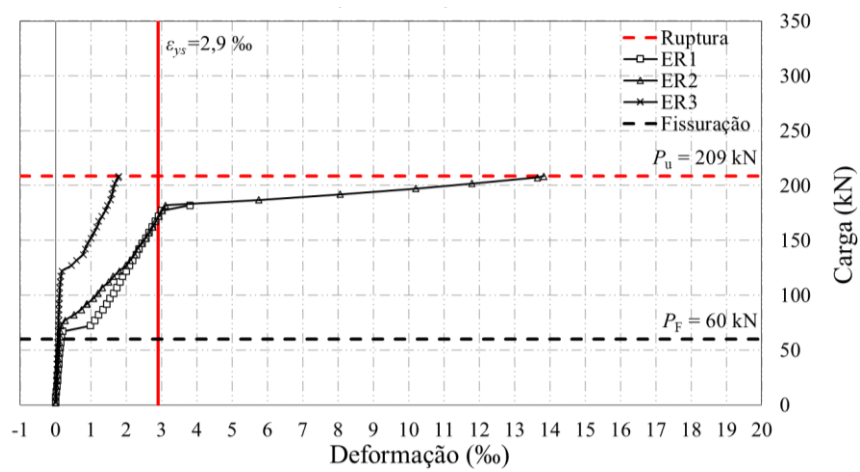


Figura 4.43: Deformações no reforço da viga VA3.

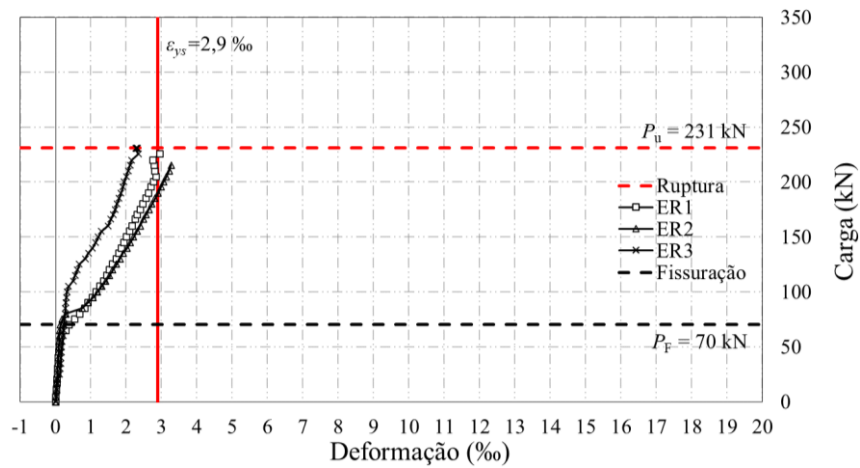


Figura 4.44: Deformações no reforço da viga VA4.

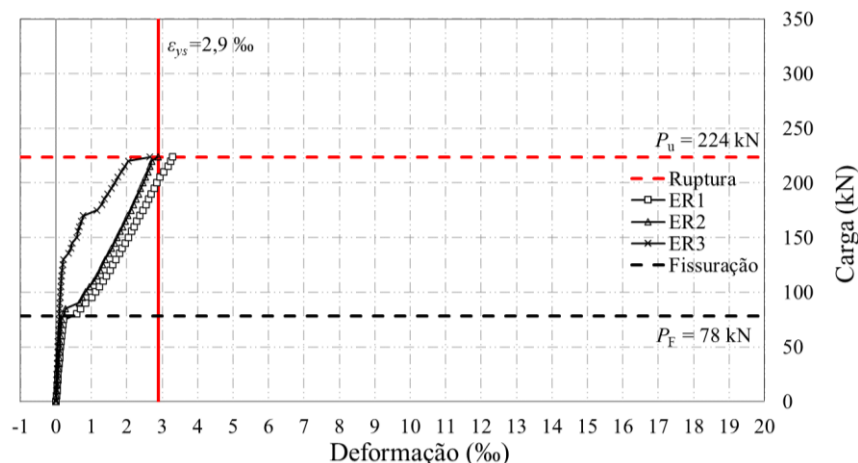


Figura 4.45: Deformações no reforço da viga VA5.

Pode-se observar que todas as vigas reforçadas com barra de aço e a argamassa de reparo estrutural atingiram o escoamento, o que levou às vigas a terem um modo de ruptura dúctil.

Com relação às deformações do reforço da viga VA5, pode-se observar que suas leituras não apresentaram um padrão diferente das demais vigas, mesmo tendo um modo de ruptura diferente das demais vigas. Como a barra de aço da ranhura que teve a argamassa deslocada estava instrumentada, seus valores de deformação lidos durante o ensaio foram comparados aos valores da outra ranhura e não foram observadas diferenças significativas. Isso indica que mesmo com a possível falha de execução do reforço, a tensão de aderência desenvolvida entre a barra de aço e a argamassa foi suficiente para levar a barra ao escoamento e quando esse valor ultrapassou a tensão resistente da argamassa, essa deslocou e a viga não conseguiu atingir uma carga última maior.

Nas Figuras 4.46 e 4.47 estão apresentados os resultados das deformações para o extensômetro ER1 das vigas com relação ao tipo de reforço executado.

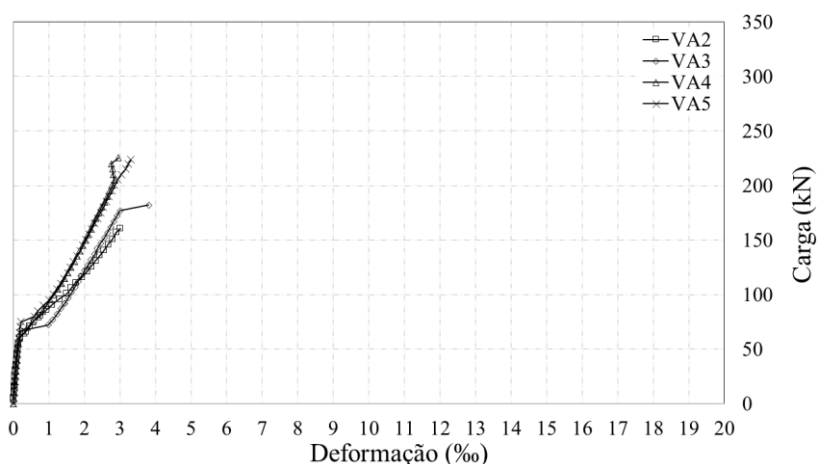


Figura 4.46: Deformações no reforço das vigas reforçadas com barra de aço.

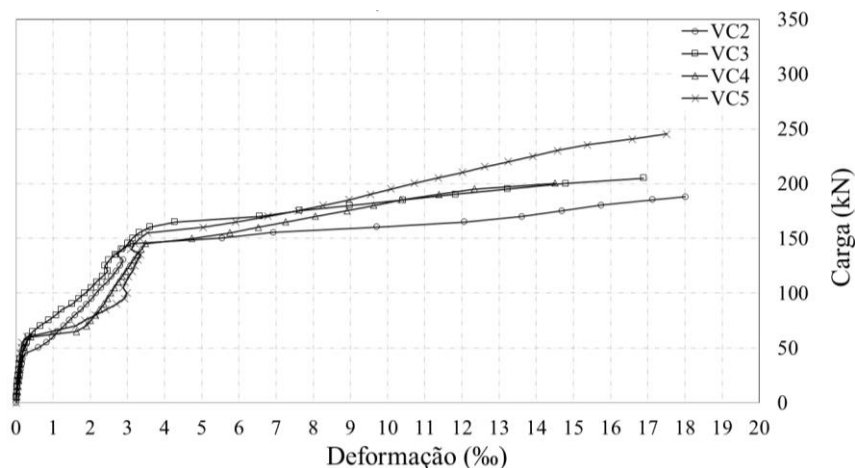


Figura 4.47: Deformações no reforço das vigas reforçadas com laminado de PRFC.

Ao aumentar a taxa de reforço, houve o acréscimo da rigidez da viga, independentemente do tipo de reforço executado, porém essa diferença na rigidez só é observada após a fissuração, ou seja, a primeira fase para todas as vigas é bastante similar. Agora, ao comparar os resultados em relação ao tipo de reforço, nota-se que a partir da segunda fase as vigas reforçadas com PRFC atingiram níveis de deformações maiores que as vigas reforçadas com aço, apresentando um comportamento relativamente mais dúctil. Na terceira fase, as vigas reforçadas de aço apresentam um comportamento praticamente todo plástico, enquanto o reforço de PRFC ainda foi capaz de mobilizar resistência crescente.

Com relação às vigas reforçadas com PRFC pode-se observar que, no momento da fissuração do concreto, as vigas VC4 e VC5 tiveram maiores acréscimos nos valores de deformação do que as vigas VC2 e VC3, porém, depois passaram a ter um comportamento mais rígido que as demais vigas (curva com uma inclinação maior), conforme esperado devido a maior taxa de reforço. Isso pode ter ocorrido por uma abertura fissura justamente onde o extensômetro estava posicionado. Ressalta-se que para as vigas reforçadas com PRFC cerca de 80% da deformação total ocorreu após o escoamento das armaduras de flexão.

Com relação às vigas reforçadas com barra de aço, nota-se que a principal diferença no comportamento das vigas com relação à taxa de reforço, se deu na segunda e terceira fases, ou seja, após a fissuração e antes do escoamento das barras.

Com relação à viga VA5, pode-se observar que suas leituras não apresentaram um padrão diferente das demais vigas, mesmo tendo um modo de ruptura diferente. Como a barra de aço da ranhura que teve a argamassa deslocada estava instrumentada, seus valores de deformação

lidos durante o ensaio foram comparados aos valores da outra ranhura e não foram observadas diferenças significativas. Isso indica que, mesmo com a possível falha de execução do reforço, a tensão de aderência desenvolvida entre a barra de aço e a argamassa foi suficiente para levar a barra ao escoamento.

Na Tabela 4.5 são apresentadas as deformações medidas nos extensômetros nos laminados de fibra de carbono no momento da ruptura.

Tabela 4.5: Resultados experimentais das vigas ensaiadas.

Viga	Deformação do PRFC (‰)		
	ER1	ER2	ER3
VC2	18,01	16,91	1,82
VC3	16,89	14,56	7,41
VC4	14,51	13,85	2,89
VC5	17,51	15,87	6,45

Com base nesses valores apresentados, pode-se observar que as deformações no PRFC foram maiores que o valor da deformação limite estabelecida pelo ACI 440.2R (2017) e pelo *fib* Bulletin 90 (2019) utilizando o método do NSM, para que não haja ruptura por descolamento da fibra ou delaminação do cobrimento do concreto (11,9‰ e 13,6‰, respectivamente). Isso indica que mesmo com a deformação maior da fibra, as estimativas normativas, aparentemente, apresentam-se a favor da segurança.

4.6. DEFORMAÇÕES NO CONCRETO

Em todas as vigas do programa experimental a superfície do concreto foi instrumentada em dois pontos no meio do vão. Dessa forma, as Figuras 4.48 a 4.56 mostram os valores das leituras medidas pelos dois extensômetros nesses pontos em cada viga.

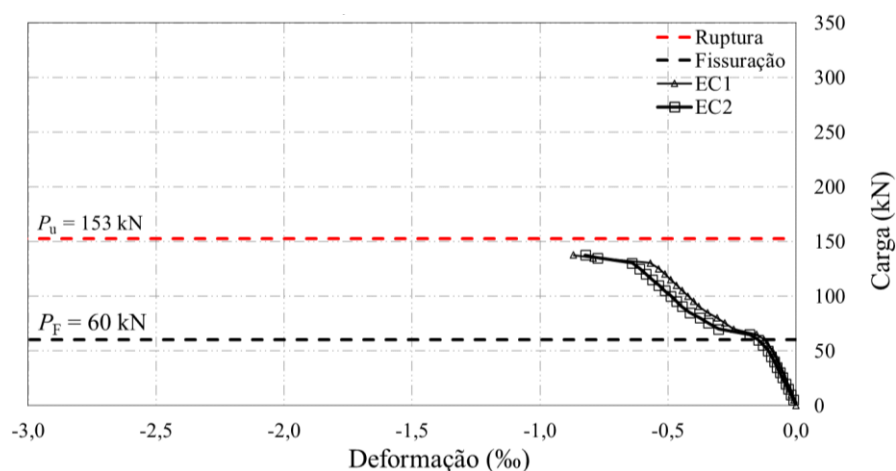


Figura 4.48: Deformações na superfície do concreto da viga VR1.

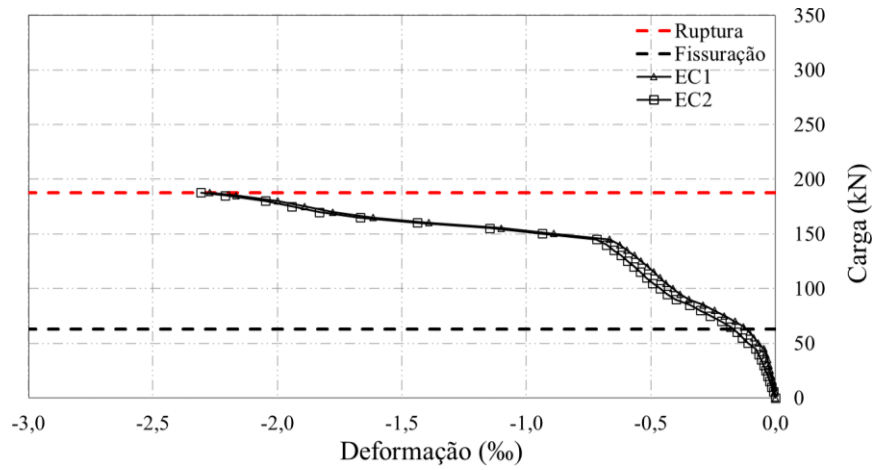


Figura 4.49: Deformações na superfície do concreto da viga VC2.

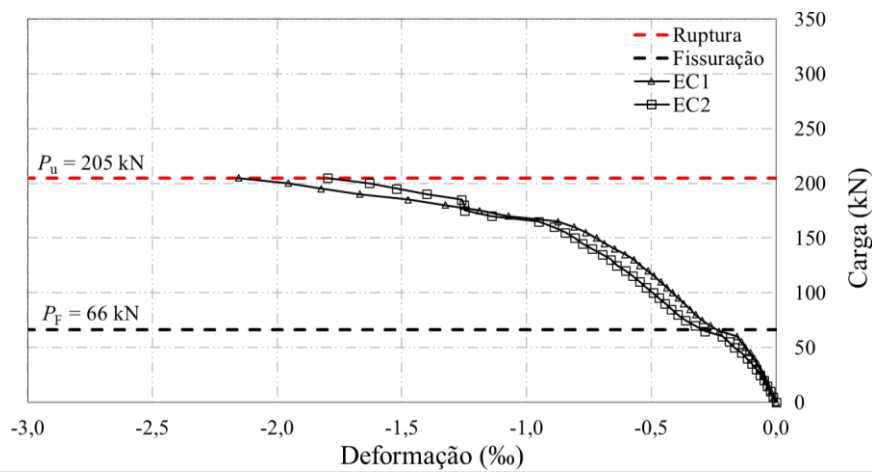


Figura 4.50: Deformações na superfície do concreto da viga VC3.

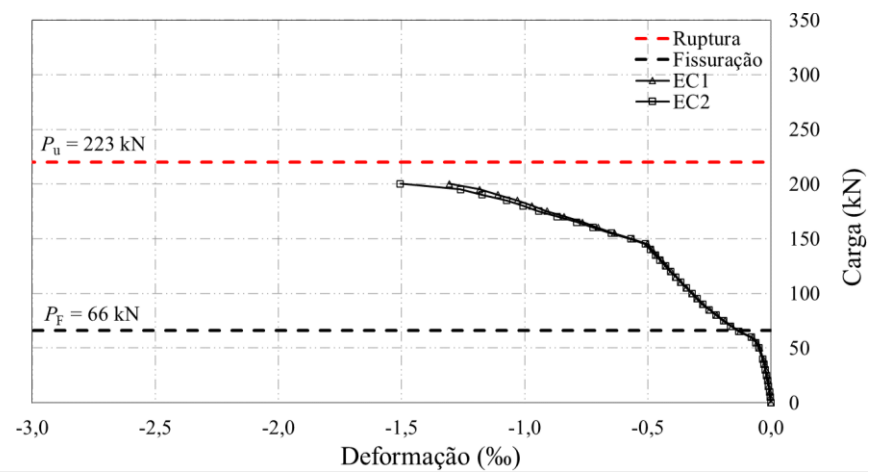


Figura 4.51: Deformações na superfície do concreto da viga VC4.

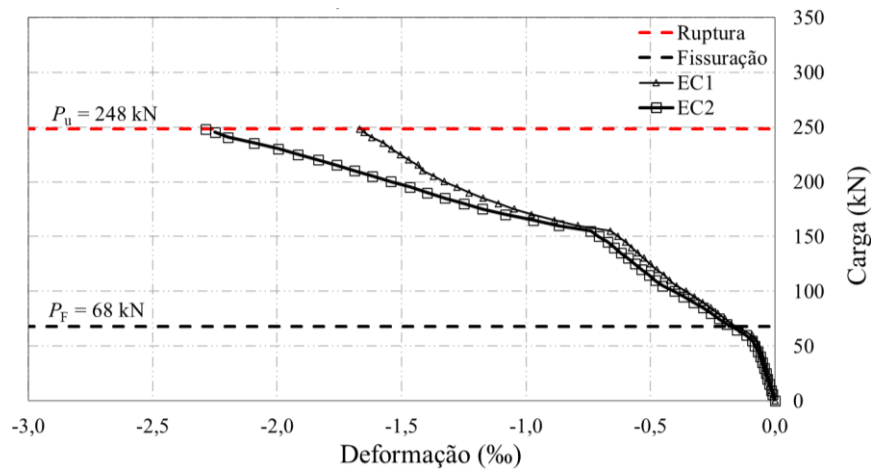


Figura 4.52: Deformações na superfície do concreto da viga VC5.

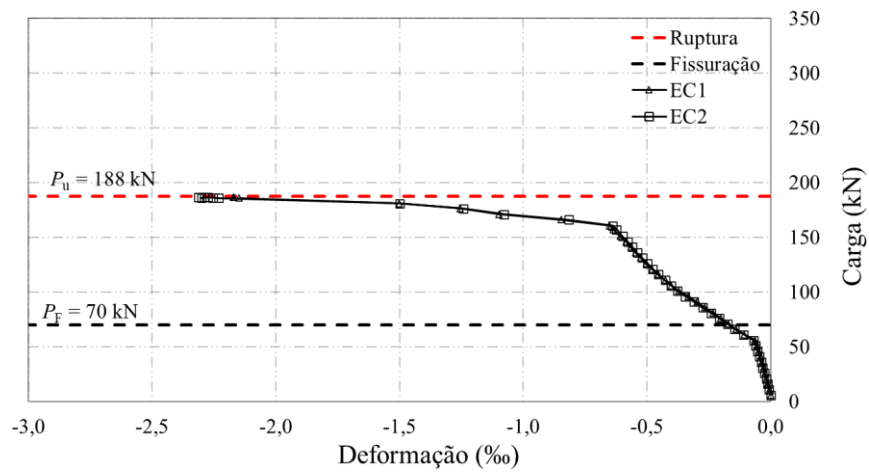


Figura 4.53: Deformações na superfície do concreto da viga VA2.

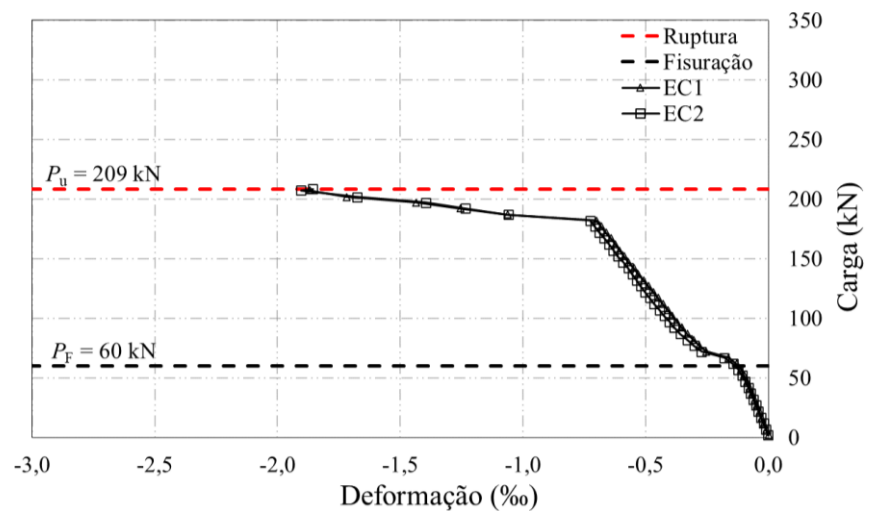


Figura 4.54: Deformações na superfície do concreto da viga VA3.

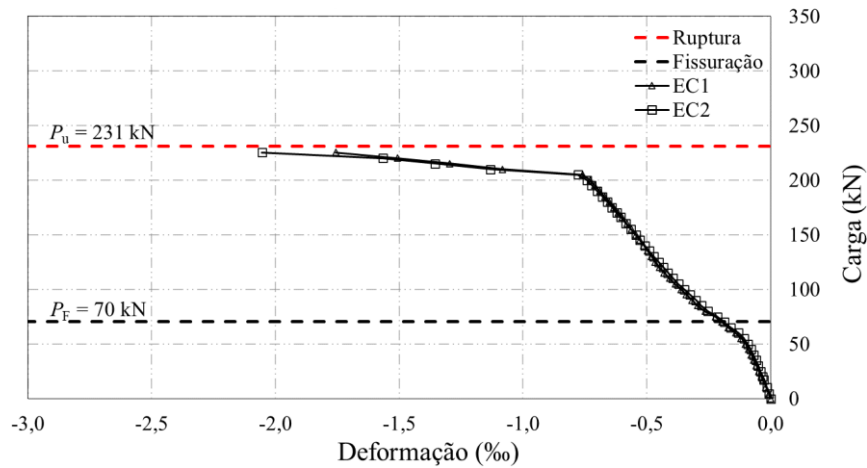


Figura 4.55: Deformações na superfície do concreto da viga VA4.

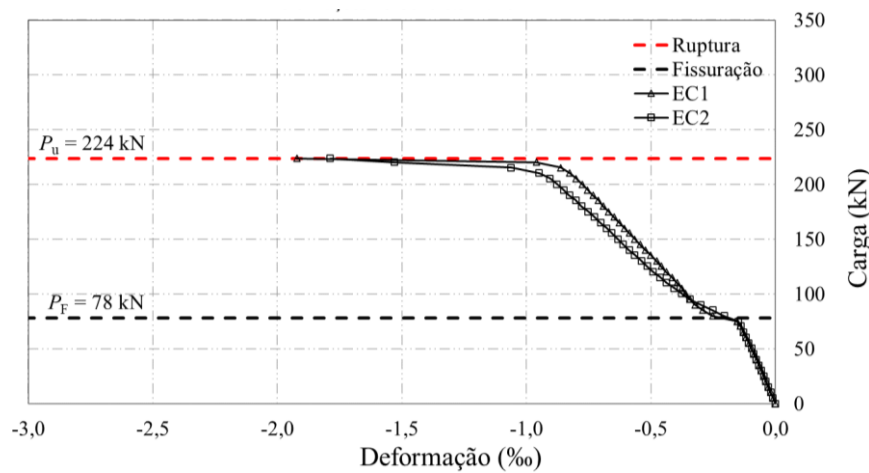


Figura 4.56: Deformações na superfície do concreto da viga VA5.

Como em algumas vigas o esmagamento do concreto ocorreu pôde ser observado mais próximo de um dos pontos de aplicação de carga, os valores lidos durante o ensaio podem não ser os valores máximos.

Com relação a viga VA5, pode-se notar que as deformações na superfície do concreto estavam abaixo das deformações obtidas nas demais vigas, o que fortalece a hipótese de que a ruptura da viga pode ter ocorrido pela falha de execução do reforço e provavelmente alcançaria a carga estimada.

4.7. DESLOCAMENTOS VERTICAIS DAS VIGAS

O acompanhamento dos deslocamentos verticais foi feito em seis pontos de medição, conforme a disposição apresentada no Capítulo 3. Dessa forma, as Figuras 4.57 a 4.65 mostram os valores das leituras medidas nesses pontos em cada viga.

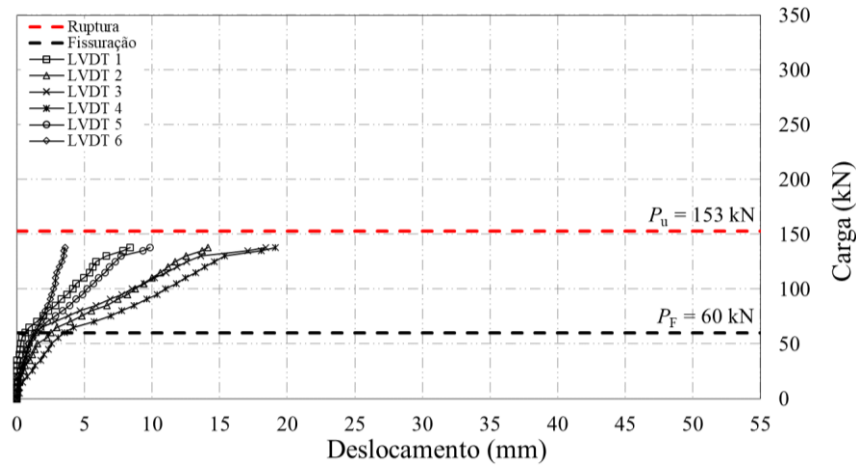


Figura 4.57: Deslocamentos verticais da viga VR1.

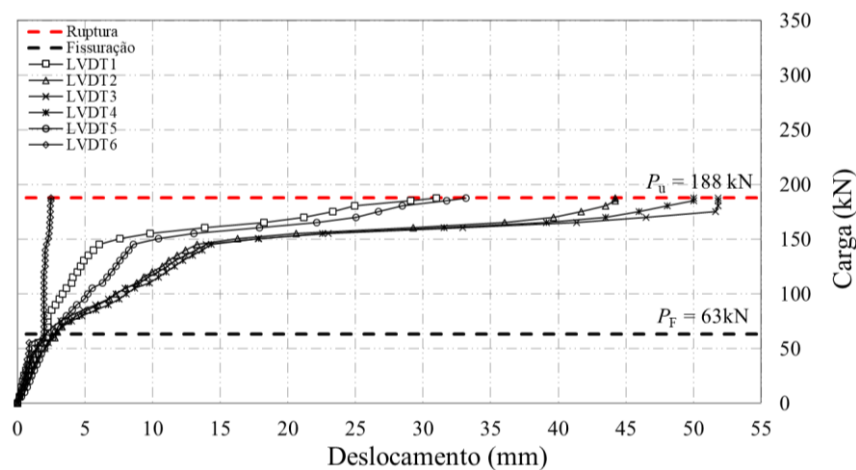


Figura 4.58: Deslocamentos verticais da viga VC2.

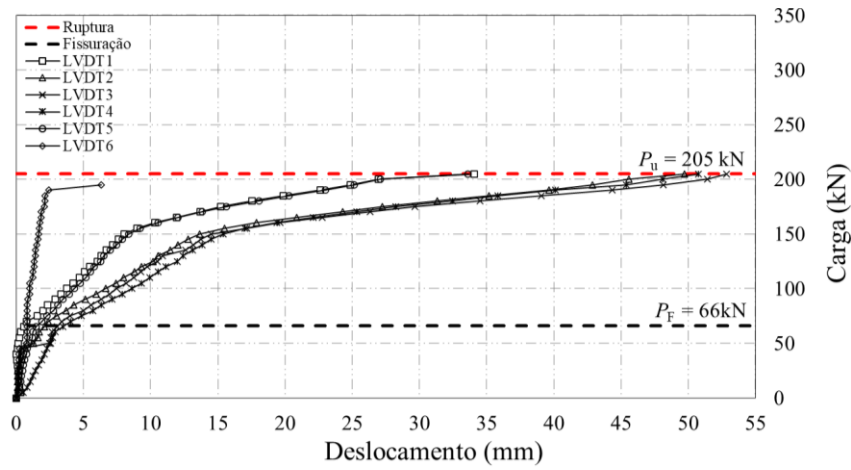


Figura 4.59: Deslocamentos verticais da viga VC3.

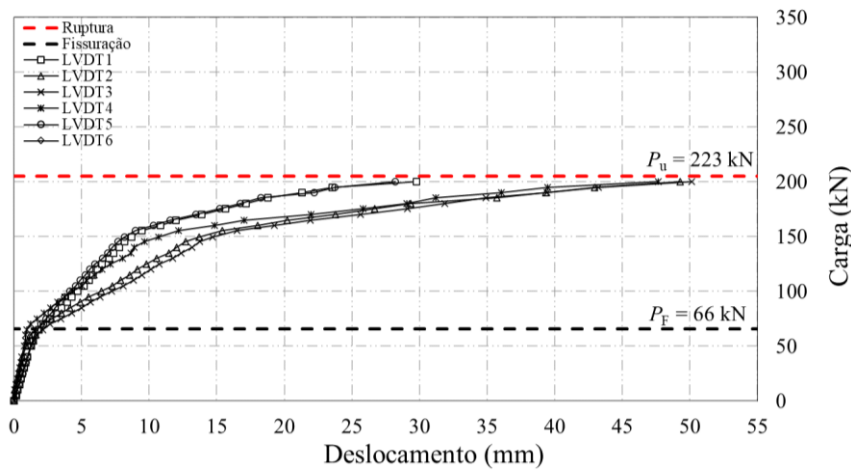


Figura 4.60: Deslocamentos verticais da viga VC4.

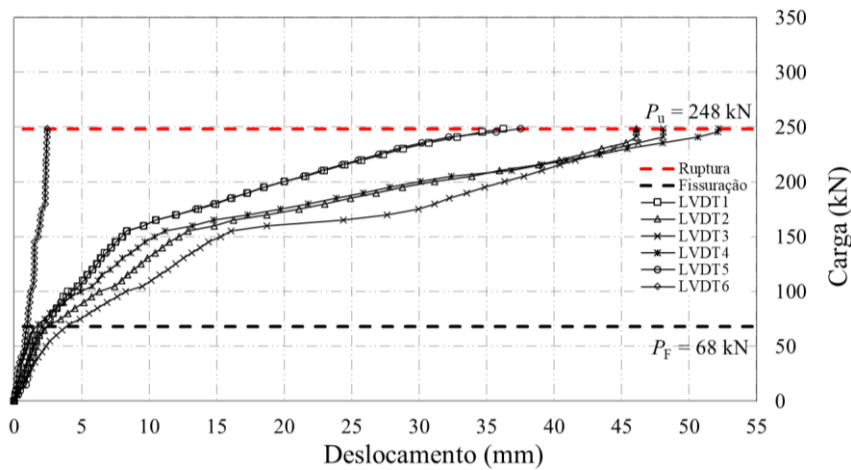


Figura 4.61: Deslocamentos verticais da viga VC5.

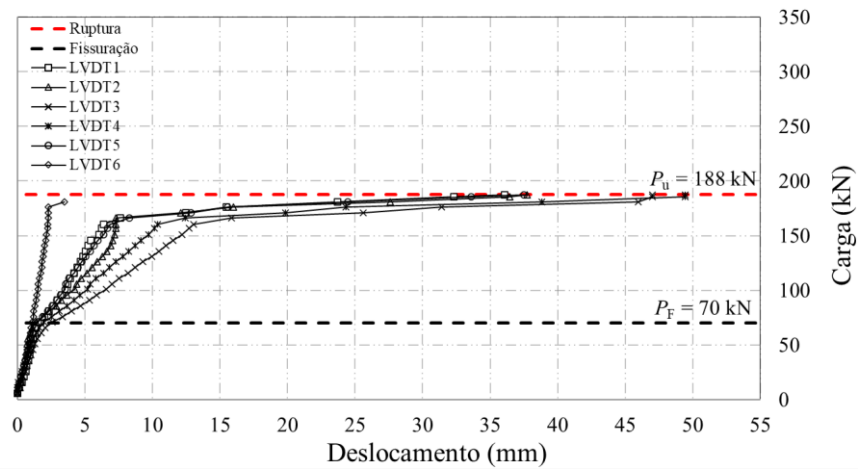


Figura 4.62: Deslocamentos verticais da viga VA2.

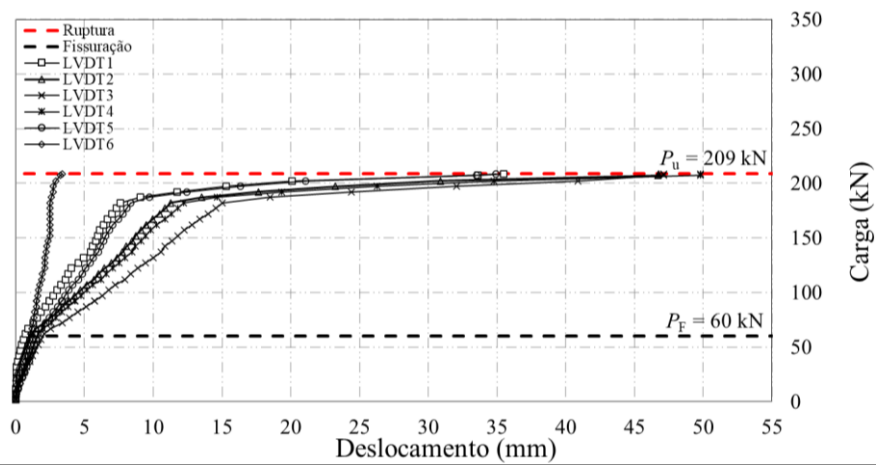


Figura 4.63: Deslocamentos verticais da viga VA3.

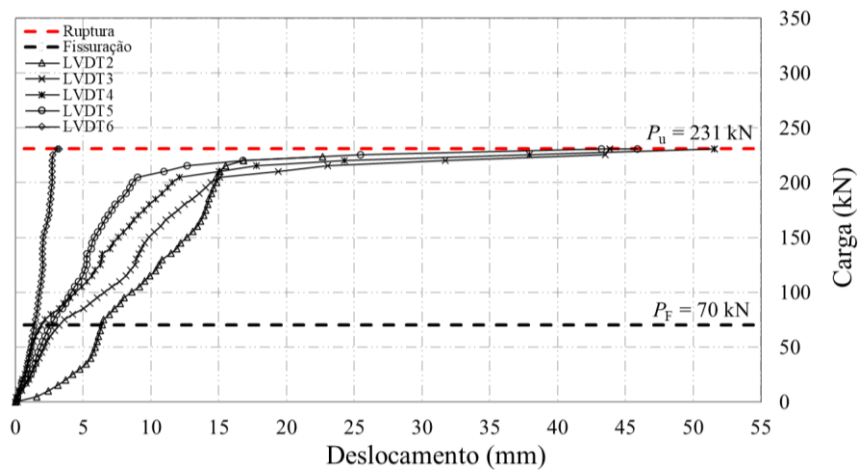


Figura 4.64: Deslocamentos verticais da viga VA4.

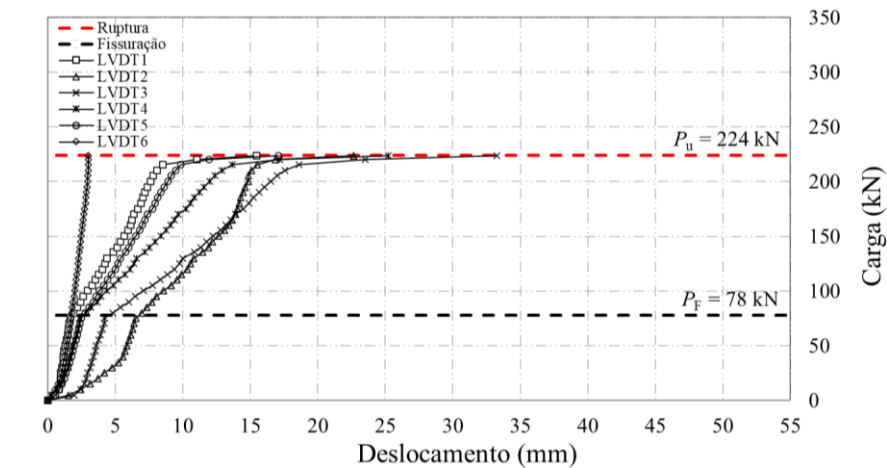


Figura 4.65: Deslocamentos verticais da viga VA5.

Ao analisar os gráficos, percebe-se na carga que foi observada a primeira fissura durante o ensaio há uma mudança na inclinação da curva carga-deslocamento, permanecendo quase uma reta até uma próxima mudança na inclinação. Essa mudança ocorreu nas vigas de PRFC (VC2 a VC5) por volta de 150 kN, para as vigas VA2 e VA3 em torno de 180 kN e para as vigas VA4 e VA5 por volta de 210 kN, onde o deslocamento do meio do vão era de aproximadamente 12,5 mm em todas as vigas.

De forma a analisar os deslocamentos verticais com relação ao tipo de reforço utilizado e a taxa de reforço, foram plotados os resultados do LVDT 3 (meio do vão) das vigas reforçadas com PRFC na Figura 4.66 e das vigas reforçadas com aço na Figura 4.67.

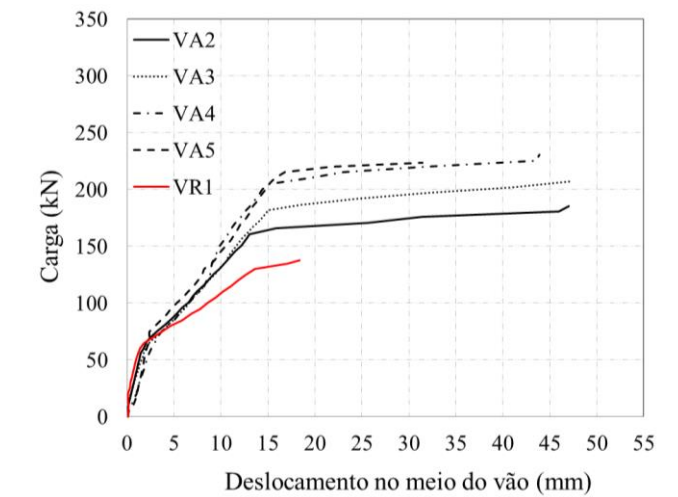


Figura 4.66: Deslocamentos verticais das vigas reforçadas com barra de aço.

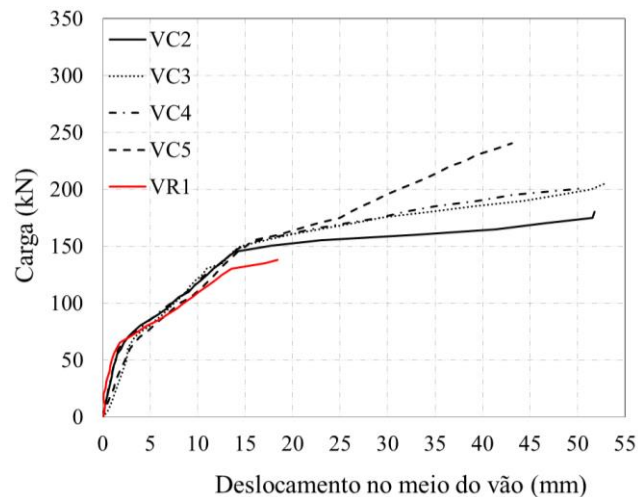


Figura 4.67: Deslocamentos verticais das vigas reforçadas com PRFC.

Com relação ao aumento da taxa de reforço, pode-se observar que este proporcionou um aumento da rigidez, conforme era esperado. Porém, para as vigas reforçadas com barra de aço, a diferença de rigidez entre estas, admitida aqui como sendo pequena, começa a ser notada a partir de aproximadamente 150 kN.

Pode-se observar três fases, sendo a fase 1 antes da fissuração do concreto (até, aproximadamente, 60 kN), a fase 2 com concreto fissurado na região de flexão pura e antes do escoamento da armadura de flexão e a fase 3, na qual ocorre o escoamento da armadura de flexão até a ruptura da viga.

Nas vigas reforçadas com PRFC percebe-se que a taxa de PRFC não interfere significativamente no comportamento das vigas nas fases 1 e 2 (situação de serviço), inclusive quando comparadas com a viga de referência. Dessa forma, a contribuição do reforço para a capacidade resistente da viga apenas torna-se notável a partir do escoamento das armaduras de flexão, e nota-se um comportamento de acréscimo de capacidade resistente diferente em relação à taxa de PRFC, uma vez que a parcela de resistência mobilizada pelo reforço será maior com o aumento da taxa. Esse mesmo padrão de comportamento foi observado por Dias *et al.* (2018).

O comportamento das vigas reforçadas com barras de aço, quando comparado ao da viga de referência, diferencia-se a partir da fase 2, tornando-se mais rígido com o aumento da taxa de reforço. Assim, verifica-se que a parcela resistente do reforço é mobilizada juntamente com a armadura de flexão a partir da fase 2 e escoam juntas a partir da fase 3.

Comparando os dois tipos de reforço, observa-se que o desempenho em serviço das vigas reforçadas com barras de aço é melhor que o da viga reforçada com PRFC, dada a diferença de rigidez e mobilização de resistência do reforço. No entanto, as capacidades últimas resistentes das vigas em ambos os métodos foram próximas. Isso proporcionou 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. Isso também foi observado nos experimentos de Almusallam *et al.* (2013), porém os autores utilizaram resina epóxi como adesivo.

5. AVALIAÇÃO DAS RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS

Neste capítulo é apresentada uma comparação dos resultados experimentais e os resultados teóricos calculados de acordo com o ACI 440.2R (2017) e *fib* Bulletin 90 (2019). O cálculo das vigas reforçadas foi realizado considerando que o reforço foi aplicado com as vigas descarregadas. Além disso, os fatores de segurança das formulações foram considerados iguais a 1.

Foram utilizadas no cálculo das vigas reforçadas as propriedades do aço, do concreto e do reforço de PRF determinados experimentalmente. Com esses dados a carga última foi calculada a partir da determinação do valor do momento fletor resistente para a seção do meio do vão da viga.

Ressalta-se que ambas as recomendações normativas não preveem o reforço por NSM usando barras de aço, sendo somente englobado o reforço usando PRF. Dessa forma, para a determinação da capacidade resistente teórica das vigas reforçadas com barra de aço foram necessárias algumas adaptações da formulação de cálculo. A primeira delas foi considerar que a deformação limite do aço do reforço é de 10‰ para ambas as recomendações normativas e que a tensão máxima desenvolvida no reforço era a tensão de escoamento do aço.

Os valores encontrados nos cálculos estão apresentados nas Tabela 5.1 e 5.2.

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)	CONCRETO		FORÇAS				M _{ACI} (kN)	Modo de Ruptura	M _{exp} /M _{ACI}
		α_1	β_1	F _f	F _s	F _c	F' _s			
VA2	53,7	0,59	0,70	55111	201823	-248532	-8402	127,4	RF	1,11
VA3	56,5	0,62	0,70	82667	201823	-274030	-10460	141,6	RF	1,11
VA4	59,2	0,64	0,70	110222	201823	-299577	-12468	155,9	RF	1,11
VA5	61,0	0,66	0,71	129167	201823	-317165	-13824	165,6	RF	1,01
VC2	49,2	0,62	0,70	45696	201823	-238686	-8833	122,7	RF	1,15
VC3	51,4	0,65	0,70	68544	201823	-258797	-11570	134,6	RF	1,14
VC4	53,5	0,67	0,71	91392	201823	-278959	-14256	146,5	RF	1,14
VC5	55,6	0,69	0,71	114240	201823	-299165	-16898	158,3	RF	1,18
Média = 1,12 CoV. = 0,04										
<p>Obs:</p> <p>x – profundidade da linha neutra; α_1 and β_1 - fatores do bloco de compressão do concreto; F_f - força no reforço F_s - força na armadura de flexão F_c - força resultante no bloco de compressão de concreto F'_s - força na armadura de compressão M_{exp}- momento último experimental M_{ACI} – momento último teórico estimado pelas formulações do ACI RF – Ruptura da fibra/deformação excessiva do aço do reforço</p>										

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

Viga	x (mm)	CONCRETO		FORÇAS				M _{fib} (kN)	Modo de Ruptura	F _{exp} /F _{fib}
		k ₁	k ₂	F _f (N)	F _s (N)	F _c (N)	F' _s (N)			
VA2	60,5	0,50	0,36	55111	201823	-243349	-13585	126,5	RF	1,12
VA3	63,6	0,53	0,36	82667	201823	-268512	-15977	140,7	RF	1,11
VA4	66,7	0,55	0,36	110222	201823	-293733	-18312	154,8	RF	1,12
VA5	68,7	0,56	0,36	129167	201823	-311099	-19890	164,5	RF	1,02
VC2	53,3	0,56	0,36	52224	201823	-238143	-15903	125,6	RF	1,12
VC3	55,9	0,58	0,36	78336	201823	-260421	-19738	139,1	RF	1,11
VC4	58,5	0,60	0,36	104448	201823	-282769	-23502	152,5	RF	1,10
VC5	61,0	0,62	0,37	130560	201823	-305174	-27209	165,9	RF	1,12
Média = 1,10 CoV. = 0,03										
<p>Obs:</p> <p>x – profundidade da linha neutra; k₁ and k₂ - fatores do bloco de compressão do concreto; F_f - força no reforço F_s - força na armadura de flexão F_c - força resultante no bloco de compressão de concreto F'_s - força na armadura de compressão F_{exp}- carga última experimental F_{fib} – carga última teórica estimada pelas formulações do fib RF – Ruptura da fibra/deformação excessiva do aço do reforço</p>										

A Figura 5.1 apresenta a relação entre os valores obtidos através das estimativas das prescrições normativas e os resultados experimentais.

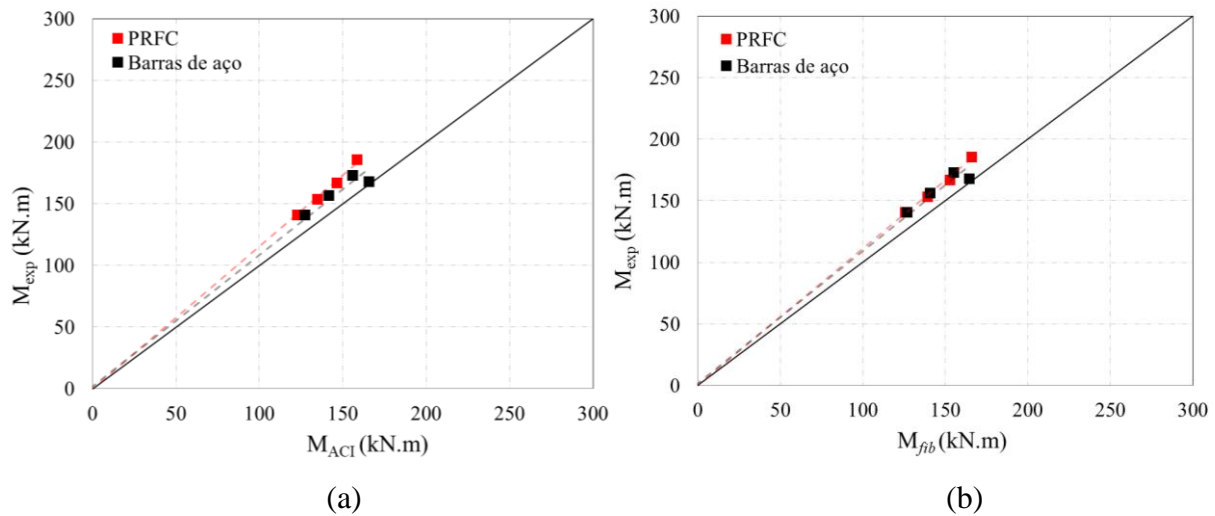


Figura 5.1: Comparação entre os valores experimentais e teóricos das vigas ensaiadas
(a) ACI (b) *fib* Bulletin

As estimativas de capacidade resistente à flexão das vigas reforçadas não diferiram muito entre o ACI e o *fib*, o primeiro apresenta resultados um pouco maiores na relação $M_{exp}/M_{teórico}$ para as vigas reforçadas com PRFC, uma vez que admite uma deformação limite menor para o laminado de PRFC. Todos os resultados encontrados foram considerados a favor da segurança.

Com relação às vigas reforçadas com barra de aço, pode-se observar que os valores entre a estimativa de cálculo e os valores experimentais não diferem mais do que 12%. Ressalta-se também que todas as vigas reforçadas com barra aço, com a exceção da VA5, apresentaram o mesmo modo de ruptura teórico e experimental. Dessa forma, pode-se concluir que para as taxas de reforço utilizadas, as adaptações de cálculo feitas em ambas as prescrições normativas foram suficientes para obter estimativas seguras. Entretanto, ressalta-se a necessidade da investigação para esse tipo de reforço com taxas de reforço maiores, uma vez que o modo de ruptura pode não ser o mesmo do que os observados neste programa experimental.

6. CONCLUSÕES

Nesta pesquisa avaliou-se o comportamento à flexão de vigas de concreto armado reforçadas pelo método NSM utilizando PRFC e barras de aço. O estudo experimental envolveu 9 ensaios em escala reais de vigas avaliando-se além do tipo de reforço, a influência da taxa de reforço. Dessa forma, as conclusões são apresentadas em relação a: influência do tipo de reforço, influência da taxa de reforço e comparação entre as estimativas teóricas e os resultados experimentais.

6.1. INFLUÊNCIA DO TIPO DE REFORÇO

Os dois tipos de reforços utilizados pela técnica do NSM foram eficazes para o reforço à flexão das vigas, atingindo acréscimos de carga de 23% a 62%.

Pode-se concluir que para as taxas de reforço adotadas no programa experimental o tipo de reforço utilizado não alterou o padrão de fissuração, carga última e modo de ruptura, com exceção VA5 ($\rho = 0,19\%$), que apresentou um modo de ruptura distinto da VC5 ($\rho = 0,05\%$).

As vigas reforçadas com adesivo de base cimentícia e barras de aço apresentaram um comportamento mais rígido do que as vigas reforçadas com PRFC, inclusive com cargas de 15% a 35% maiores para o escoamento, porém sem diferença significativa na capacidade resistente da viga. Esse resultado confirma os resultados esperados, mostrando que os resultados foram bem executados, uma vez que o aço tem um módulo de elasticidade um pouco maior do que o do PRFC e assim, o momento de inércia da seção homogeneizada da viga reforçada com aço é maior que o da viga reforçada com PRFC.

Esse aumento da rigidez e conseqüente aumento da carga de escoamento das vigas reforçadas com barra de aço e adesivo de base cimentícia, permite o aumento da carga de serviço. Dessa forma, pode-se concluir que o reforço à flexão com barras de aço e argamassa cimentícia pelo método NSM é uma solução adequada para não só restaurar como aumentar a capacidade resistente de vigas de concreto armada estabelecida em projeto.

Além disso, o reforço com adesivo de base cimentícia e barras de aço demonstrou uma aderência forte o suficiente para fazer com que a viga reforçada com barra de aço tivesse o comportamento similar ao de uma viga com armadura simples adicionada às barras do reforço,

uma vez que reforço escoo junto com a armadura de flexão. Por outro lado, nas vigas reforçadas com PRFC a carga de escoamento é praticamente a mesma da viga de referência, e, assim, o aumento da capacidade resistente fica sobre a responsabilidade do laminado.

6.2. INFLUÊNCIA DA TAXA DE REFORÇO

Conforme esperado, o aumento da taxa proporcionou um aumento da carga última (23% a 62%) e da carga de escoamento (8% a 11% para as vigas reforçadas com PRFC e 23% a 51% para as vigas reforçadas com barra de aço). Além disso, o aumento da taxa de reforço nas vigas reforçadas com PRFC não alterou o modo de ruptura, onde todas romperam por deformação excessiva do reforço seguida do esmagamento do concreto.

Para as taxas de reforço de 0,02% a 0,05% para o PRFC e de 0,08 a 0,16% para o aço observou-se um acréscimo de carga proporcional ao aumento da taxa de reforço. A única viga na qual isso não foi observado foi a viga VA5 ($\rho = 0,19\%$), que também foi a única viga que teve um modo de ruptura diferente das demais. Porém, esta alteração no modo de ruptura e carga última esperados muito provavelmente se deram devido a uma falha de execução e não pela taxa de reforço.

Por fim conclui-se que as taxas de reforço utilizadas não foram altas o suficiente para que fossem observadas cargas de fissuração com diferenças significativas. Dessa forma, todas as vigas tiveram comportamentos similares até a fissuração do concreto.

6.3. COMPARAÇÃO ENTRE AS ESTIMATIVAS TEÓRICAS E OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As estimativas teóricas do *fib* e ACI foram seguras e eficientes para estimar a carga de ruptura das vigas e o modo de ruptura das vigas reforçadas com CRFP. Além disso, as adaptações nas formulações teóricas de ambas as prescrições normativas para as vigas reforçadas com aço limitando a deformação do aço foram suficientes para uma boa estimativa da capacidade resistente e modo de ruptura para as taxas de reforço utilizadas.

6.4. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

São apresentadas a seguir algumas sugestões para trabalhos futuros.

- 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;
- Avaliação experimental de vigas de concreto armado reforçadas à flexão pelo método do NSM com taxas de reforço maiores, a fim de investigar se o modo de ruptura permanecerá o mesmo;
- Avaliação experimental de vigas de concreto armado reforçadas à flexão pelo método do NSM com PRFC utilizando a argamassa de reparo estrutural como adesivo;
- Avaliação experimental de vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento utilizando barras de aço e argamassa de reparo estrutural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-BAYATI, G., AL-MAHAIDI, R., & KALFAT, R. *Torsional strengthening of reinforced concrete beams using different configurations of NSM FRP with epoxy resins and cement-based adhesives*. *Composite Structures*, 168, 569–581, 2017.

AL-ABDWAIS, A. H., & AL-MAHAIDI, R. S. *Performance of reinforced concrete beams strengthened with NSM PRFC composites for flexure using cement-based adhesives*. *Structures*, 1446–1457, 2020.

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, 2015.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7480: *Aço destinado às armaduras para estruturas de concreto armado - Requisitos*. Rio de Janeiro, 2022.

[23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: *Cimento Portland - Requisitos*. Rio de Janeiro, 2018.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: *Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova*

cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522-1: *Concreto e endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação Parte 1: Módulos estáticos à compressão*. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ISO NBR 6892: *Materiais metálicos – ensaio à tração*. Rio de Janeiro, 2013.

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 PRFC- 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 ^[L]_[SEP]Engenharia. ^[L]_[SEP]CPGEC/UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 1999. 108 p.

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

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

BLASCHKO M. Bond behaviour of PRFC strips glued into slits. In: Proceedings FRPRCS-6. Singapore: World Scientific; 2003. p.205–14

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.

CASTANHEIRA, A. P. A.-F. *Estudo de um sistema de reparo mais eficaz para uma estrutura de concreto armado contaminada por cloretos*. Dissertação de Mestrado, Publicação E.DM 007^a/97, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 146p, 1997.

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 PRFC’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.

CRUZ, J. M. S., & BARROS, J. a O. *Bond Behavior of Carbon Laminate Strips Into Concrete By Pullout-Bending Tests*. School of Engineering, University of Minho, November, 8, 2002.

DE LORENZIS, L., & NANNI, A. *Bond between near-surface mounted fiber-reinforced polymer rods and concrete in structural strengthening*. ACI Structural Journal, 99(2), 123–132, 2002

DE LORENZIS, L., RIZZO, A., & LA TEGOLA, A. *A modified pull-out test for bond of near-surface mounted FRP rods in concrete*. Composites Part B: Engineering, 33(8), 589–603, 2002

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 PRFC inseridos*. Encontro Nacional Betão Estrutural 2012, Lisboa, Portugal, 2012.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. fib Bulletin 14. *Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures*. Lausanne, Suíça, 2001.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON fib Bulletin 90, *Externally bonded FRP reinforcement for concrete structures*, Technical report by Commission 5 Reinforcements and Task Group 5.1 "Reinforcement for concrete structures", Fédération Internationale du Béton, 2019.

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 PRFC*. 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 PRFC 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 PRFC 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 PRFC 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 PRFC 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 PRFC-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 PRFC 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) PRFC 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.

PINTO, L.G. *Análise da Resistência de Vigas de Concreto Armado Reforçadas à Flexão com Fibra de Carbono pelo Método Near Surface Mounted.* Monografia de Projeto Final em

Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 137p, 2018.

RAHAL, K. N., & RUMAIH, H. A. *Tests on reinforced concrete beams strengthened in shear using near surface mounted PRFC and steel bars*. *Engineering Structures*, 33(1), 53–62, 2011

ROSTASY, F. S. *Bonding of Steel and GFRP Plates in the Area of Coupling Joints*. *Talbrucke 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 AND, E.; TRIANTAFILLOU, T. *Design Procedures for the Use of Composites in Strengthening of Reinforced Concrete Structures*, 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.

TRIANAFILLOU, 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 PRFC Strips*. ACI Structural Journal, Vol. 104, No. 4, 2007.