

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE MÉTODOS DE  
ANCORAGEM DE POLÍMEROS REFORÇADOS COM  
FIBRAS DE CARBONO (PRFC) EM VIGAS DE CONCRETO  
ARMADO SUBMETIDAS À FLEXÃO**

**Luiz Henrique Barboza Tirado**

Porto Alegre - RS

2022

LUIZ HENRIQUE BARBOZA TIRADO

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE MÉTODOS DE  
ANCORAGEM DE POLÍMEROS REFORÇADOS COM  
FIBRAS DE CARBONO (PRFC) EM VIGAS DE CONCRETO  
ARMADO SUBMETIDAS À FLEXÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Porto Alegre - RS

2022

## CIP - Catalogação na Publicação

Tirado, Luiz Henrique Barboza  
Análise Experimental de Métodos de Ancoragem de  
Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono (PRFC) em  
Vigas de Concreto Armado Submetidas à Flexão / Luiz  
Henrique Barboza Tirado. -- 2022.  
185 f.  
Orientador: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre,  
BR-RS, 2022.

1. Ancoragem do reforço estrutural. 2. Reforço  
estrutural com PRFC. 3. Laço em U. 4. Parafuso spike.  
5. Ranhuras: EBRIG e EBROG. I. Silva Filho, Luiz  
Carlos Pinto da, orient. II. Título.

**LUIZ HENRIQUE BARBOZA TIRADO**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE MÉTODOS DE  
ANCORAGEM DE POLÍMEROS REFORÇADOS COM  
FIBRAS DE CARBONO (PRFC) EM VIGAS DE CONCRETO  
ARMADO SUBMETIDAS À FLEXÃO**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção de título de MESTRE EM ENGENHARIA, Área de Concentração de Estruturas, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 01 de dezembro de 2022

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho  
Ph.D. pela University of Leeds, Inglaterra  
Orientador

Prof. Lucas Festugato  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Mauro de Vasconcellos Real (UFRGS)**  
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof<sup>ª</sup>. Paula Manica Lazzari (UFRGS)**  
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof<sup>ª</sup>. Mônica Regina Garcez (UFRGS)**  
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. Lucas Alexandre Reginato (UFRGS)**  
PhD. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho ao meu pai, minha  
mãe e ao meu irmão, pelo constante  
incentivo, compreensão e parceria na vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha família por sempre, mesmo de longe, estarem presentes comigo nessa jornada de estudos, de desafios e de conquistas. Obrigado por não deixarem que faltasse nada em minha vida, seja amor, ensinamentos, dedicação, incentivo e apoio.

Agradeço ao professor Luiz Carlos Pinto da Silva Filho por toda confiança, orientação e contribuição oferecidos ao longo do desenvolvimento deste trabalho e da minha vivência dentro do Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME UFRGS).

Agradeço professores(as) Mauro de Vasconcellos, Paula Manica Lazzari, Mônica Regina Garcez e Lucas Reginato, pela disposição em participar da minha banca de mestrado e poderem contribuir com minha pesquisa.

Agradeço aos professores Ângela Gaio Graeff, Paula Manica Lazzari, Alexandre Lorenzi, Luciani Lorenzi e João Luiz Campagnolo por toda disposição, ensinamentos e colaboração com meu aprendizado profissional, pessoal e pelo auxílio no desenvolvimento da minha pesquisa. Agradeço aos professores e pesquisadores, Morgane Bigolin, por toda paciência e auxílio nos processos internos de aquisição dos materiais e ao Lucas Reginato, por todo suporte técnico na pesquisa e pelas constantes oportunidades de capacitação profissional.

Agradeço a todos os professores do Programa de Pós - Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPGEC UFRGS) pelos ensinamentos entregues durante as aulas. Agradeço a todos os pesquisadores, colegas e funcionários do laboratório LEME UFRGS e em especial e ao Sr. Edegar Lucas, técnico do laboratório e ao Sr. José Orvandi, por todo auxílio, contribuição à pesquisa e parceria durante os últimos meses.

Agradeço aos amigos, Adriano, Daniel, Felipe, Isadora, Tobias, Leonardo, Paola, Debora, Lucas, Daniele, Luciene, Joice, Julia, Sarah, Cleiton e muitos outros que contribuíram voluntaria ou involuntariamente para o andamento da minha pesquisa, seja com uma sugestão, apoio, motivação ou descontração ao longo de todo o programa de mestrado.

Agradeço a empresa ArcelorMittal (Porto Alegre), onde por intermédio de Margarete recebi a doação de materiais para realização da pesquisa.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos de mestrado acadêmico que garantiu a tranquilidade necessária para desenvolver minha pesquisa. Agradeço à Fundação Empresa Escola de Engenharia da UFRGS (FEENG) pelo suporte financeiro na aquisição de materiais para desenvolvimento da pesquisa.

A mente que se abre a uma nova ideia  
jamais voltará ao seu tamanho original.

*Albert Einstein*

## RESUMO

TIRADO, L. H. B. **Análise Experimental de Métodos de Ancoragem de Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono (PRFC) em Vigas de Concreto Armado Submetidas à Flexão.** 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Estrutural) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre.

O reforço estrutural com elementos de reforço externo na face tracionada de estruturas é um dos tipos de intervenção praticados a muitas décadas, com metodologias consolidadas e outras em constante investigações, como ocorrem com o reforço do tipo Polímero Reforçado com Fibras (PRF). Este material é um compósito formado pela união de uma matriz (resina epóxi), com um elemento de reforço (fibras de carbono, vidro ou aramida), apresentando elevado potencial, principalmente pela facilidade de aplicação, baixo peso específico, não corrosivo e com boas características físico-mecânicas. Entretanto, por ser uma prática recente, com apenas algumas décadas, ainda necessita de investigações e aperfeiçoamentos, devido aos modos de ruptura prematuros dos elementos reforçados com PRF, justificados pelo comportamento frágil que este material de reforço proporciona à estrutura de concreto reforçado, indicando baixa eficiência na aderência e ancoragem da ligação do compósito com o substrato à medida que são atingidos elevados níveis de carregamento. Essa situação exige subdimensionamentos do material de reforço nas normas internacionais existentes, porém, com indícios ao uso de mecanismos de incremento de ancoragem nos elementos reforçados, para aumentar a eficiência do uso do PRF (ductilidade, modos de ruptura e carga última). Nesse sentido esse trabalho teve como objetivo a avaliação experimental do comportamento e desempenho de diferentes metodologias de incremento de ancoragem de mantas de PRFC em vigas de concreto armado reforçadas à flexão, utilizando a técnica de reforço “*Externally Bonded Reinforcement*” (EBR). Para isso, foram produzidas 16 vigas de seção 12 cm x 20 cm e comprimento de 150 cm, divididas em 8 variáveis distintas. As variáveis referem-se as vigas: testemunho; referência (apenas com reforço à flexão); incrementos de ancoragem do tipo Laço em U; Parafuso spike; EBROG (*on grooves*) e EBRIG (*in grooves*), que compõem a Etapa I; além de incrementos de ancoragem que unem metodologias investigadas: EBRIG com laço em U e EBRIG com parafuso spike, compondo a Etapa II. Os resultados indicam eficiência do reforço para carga de ruptura e ganhos de ductilidade nos elementos com incrementos de ancoragem.

**Palavras-chave:** reforço estrutural; reforço de vigas de concreto; EBR; ancoragem dos Polímeros Reforçados com Fibras (PRF); Laço em U; spike; EBRIG; EBROG

## ABSTRACT

TIRADO, L. H. B. **Experimental Analysis of Anchoring Methods of Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP) in Reinforced Concrete Beams Submitted to Bending.** 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Estrutural) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre.

Structural reinforcement with external reinforcement elements on the tensile face of structures is one of the types of intervention practiced for many decades, with consolidated methodologies and others in constant investigation, as occurs with the reinforcement of the Fiber Reinforced Polymer (FRP) type. This material is a composite formed by the union of a matrix (epoxy resin) with a reinforcing element (carbon, glass or aramid fibers), presenting high potential, mainly due to the ease of application, low specific weight, non-corrosive and with good physical-mechanical characteristics. However, as it is a recent practice, with only a few decades, it still needs investigations and improvements, due to the premature failure modes of the elements reinforced with FRP, justified by the fragile behavior that this reinforcement material provides to the reinforced concrete structure, indicating low efficiency in the adhesion and anchoring of the composite bond to the substrate as high loading levels are reached. This situation requires undersizing of the reinforcement material in the existing international standards, however, with indications of the use of mechanisms to increase anchoring in the reinforced elements, to increase the efficiency of the use of FRP (ductility, failure modes and ultimate load). In this sense, this work aimed to experimentally evaluate the behavior and performance of different methodologies for increasing the anchoring of CFRP blankets in flexurally reinforced concrete beams, using the “Externally Bonded Reinforcement” (EBR) reinforcement technique. For this, 16 beams of section 12 cm x 20 cm and length of 150 cm were produced, divided into 8 different variables. The variables refer to the beams: core; reference (only with flexural reinforcement); U-Loop anchor increments; spike screw; EBROG (on grooves) and EBRIG (in grooves), which make up Stage I; in addition to anchoring increments that combine investigated methodologies: EBRIG with U-loop and EBRIG with spike screw, composing Stage II. The results indicate efficiency of the failure load and gains in ductility to the elements with anchoring increments.

**Keywords:** structural reinforcement; concrete beam reinforcement; EBR; anchoring of Fiber Reinforced Polymers (FRP); U wrapping anchor; spike anchor; groove EBRIG; groove EBROG

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma das etapas de pesquisa .....	23
Figura 2 – Representação gráfica: (a) Lei de Sitter e (b) Evolução do desempenho estrutural em função das manutenções ao longo do tempo.....	27
Figura 3 – Aplicação de métodos de reforço estrutural: (a) perfis metálicos; (b) protensão externa; (c) adição de armaduras; (d) polímeros reforçados com fibras (PRF).....	30
Figura 4 – Formação do Material Compósito .....	34
Figura 5 – Classificação geral dos materiais compósitos.....	35
Figura 6 – Diagrama tensão x deformação para matrizes poliméricas.....	39
Figura 7 – Representação dos tipos de fibra existentes no mercado e estudados: a) manta fibra de carbono; (b) barra de fibra de vidro; (c) manta de fibra de aramida .....	41
Figura 8 – Comparação dos valores de Módulo de Elasticidade de diferentes materiais .....	44
Figura 9 – Relação tensão x deformação típica para aço e fibras .....	45
Figura 10 – Representação das influências que afetam as propriedades dos materiais compósitos .....	48
Figura 11 – Esquemática das técnicas de reforço do tipo: (a) EBR e (b) NSM.....	53
Figura 12 – Representação dos modos de ruptura prematuros em vigas reforçadas com PRF.....	62
Figura 13 – Modos de ruptura de vigas de concreto armado reforçadas com PRF.....	63
Figura 14 – Ilustração das distribuições de deformação e tensão na seção de concreto .....	70
Figura 15 – Fluxograma do processo de dimensionamento do reforço de PRF.....	73
Figura 16 – Regiões de comprimento de ancoragem reto .....	74
Figura 17 – Representação do diagrama de momento fletor para as zonas de ancoragem .....	76
Figura 18 – Mecanismo de transferência de esforços entre concreto e reforço .....	78
Figura 19 – Distribuição de tensões normais e cisalhantes em vigas reforçadas com PRF .....	78
Figura 20 – Solicitações atuantes no reforço do PRF colados ao substrato de concreto.....	80
Figura 21 – Representações dos propósitos de ancoragem do tipo: (a) I; (b) II e (c) III.....	82
Figura 22 – Representação do mecanismo de ancoragem por “Laços em U”: (a) esquema gráfico; (b) aplicação experimental.....	83
Figura 23 - Representação do mecanismo de ancoragem por “Chapas de metal parafusadas” .....	84
Figura 24 - Representação do mecanismo de ancoragem por “Colagem de manta de fibra” .....	85
Figura 25 – Representação da metodologia: (a) regiões do parafuso; (b) aplicação em viga.....	86
Figura 26 - Representação do mecanismo de ancoragem por “Parafuso sobre o reforço”: (a) posicionamento do sistema de furação e (b) visão geral do método.....	87
Figura 27 - Representação do mecanismo de ancoragem do tipo EBROG.....	88
Figura 28 – Representação do mecanismo de ancoragem do tipo EBRIG.....	89
Figura 29 – metodologia de incremento de ancoragem por “pinças” metálicas .....	91
Figura 30 – Incremento de ancoragem do tipo $\pi$ .....	91
Figura 31 – Ensaio (a) representação esquemática e (b) aplicação de incremento de ancoragem .....	92
Figura 32 – Representação da metodologia (a) corte esquemático e (b) detalhe construtivo .....	92
Figura 33 – Metodologia de incremento de ancoragem por intertravamento epóxi.....	93
Figura 34 – Energia de ductilidade de vigas reforçadas e não reforçadas.....	96
Figura 35 – Visão geral da proposta experimental sobre ancoragem dos PRFC .....	98
Figura 36 – Detalhamento das vigas de concreto armado utilizadas no programa experimental .....	101
Figura 37 – Processo de confecção das armaduras das vigas: (a) entrega dos materiais de doação; (b) amarração dos estribos às armaduras longitudinais com arame recozido; (c) visão geral das ferragens armadas .....	102
Figura 38 – Ensaio de tração de armadura de aço: (a) preparação do ensaio; (b) sistema de fixação da instrumentação do LVDT; (c) resultado do ensaio de tração na prensa; (d) comparativos entre as barras ensaiadas .....	104
Figura 39 – Exemplificação do resultado do ensaio de tração do aço.....	105

Figura 40 – Etapas do processo de concretagem: a) posicionamento das ferragens armadas nas fôrmas; (b) detalhe construtivo dos espaçadores; (c) moldagem e vibração do concreto com mangote vibrador de imersão; (d) moldagem dos CP's de amostra .....	107
Figura 41 – Ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico por leitura direta: (a) representação da propagação do pulso ultrassônico; (b) realização do ensaio nos CP's deste programa experimental. ....	108
Figura 42 – Ensaio de Módulo de Elasticidade: (a) visão geral do ensaio; (b) detalhe do posicionamento da instrumentação nos corpos de prova.....	111
Figura 43 – Preparação do substrato da viga em posição invertida: (a) viga íntegra; (b) lixamento mecânico com disco de desbaste; (c) remoção de partículas com ar comprimido .....	116
Figura 44 – Preparação da manta de fibra de carbono: (a) base da viga com 1 chanfro; (b) base da viga com 2 chanfros; (c) marcação e corte da manta de fibra de carbono para reforço à flexão .....	117
Figura 45 – Preparação da resina epóxi de aplicação em manta de fibra de carbono: (a) pesagens dos componentes A e B fracionados; (b) homogeneização manual dos componentes .....	118
Figura 46 – Aplicação do sistema de reforço à flexão com manta de fibra de carbono: (a) resina no substrato de concreto; (b) posicionamento da manta de reforço e aplicação de resina saturante; (c) passagem do rolo quebra bolha .....	119
Figura 47 – Preparação da superfície lateral do elemento que recebe o laço em U: (a) marcação da posição do incremento de ancoragem; (b) lixamento do laço em U com disco de desbaste; (c) arredondamento da aresta da base .....	120
Figura 48 – Metodologia laço em U: (a) reforço à flexão; (b) incremento de ancoragem do tipo laço em U; (c) fixação do incremento de ancoragem .....	121
Figura 49 – Etapas de confecção do parafuso spike: (a) e (b) retirada dos fios de amarração da região livre; (c) enrolamento das fibras, formando um cilindro; (d) visualização do parafuso finalizado.....	122
Figura 50 – Preparação do substrato de concreto para ancoragem do tipo parafuso spike: (a) e (b) posicionamento e execução dos furos nas dimensões determinadas; (c) remoção das arestas do furo	123
Figura 51 – Posicionamento e preparação da manta de carbono para ancoragem do tipo parafuso spike: (a) corte na manta para introdução do parafuso; (b) reforço à flexão; (c) preenchimento prévio do furo com resina epoxídica de impregnação .....	123
Figura 52 – Aplicação da metodologia de incremento de ancoragem do tipo parafuso spike: (a) introdução completa do parafuso; (b) posicionamento da parte solta; (c) laminação da parte solta do parafuso .....	124
Figura 53 - Detalhes construtivos do método de incremento de ancoragem EBROG: (a) marcação das ranhuras; (b) execução das ranhuras com disco de corte; (c) remoção do concreto interno das ranhuras .....	125
Figura 54 - Dimensões do método de incremento de ancoragem EBROG: (a) remoção de arestas internas da ranhura; (b) e (c) dimensão da largura e profundidade da ranhura, respectivamente.....	125
Figura 55 - Aplicação do método de incremento de ancoragem EBROG: (a) e (b) aplicação da resina epoxídica de impregnação; (c) aplicação do reforço à flexão .....	125
Figura 56 - Detalhes construtivos do método de incremento de ancoragem EBRIG: (a) e (b) remoção e arredondamento das arestas externas da ranhura; (c) posicionamento do reforço à flexão; (d) e (e) dispositivo de aplicação do reforço contornando a seção transversal da ranhura; (e) laminação e finalização do processo de reforço com aplicação de incremento de ancoragem EBRIG .....	127
Figura 57 - Detalhes construtivos do método de incremento de ancoragem EBRIG com Laço em U: (a) substrato de concreto preparado; (b) aplicação do reforço à flexão; (c) aplicação do incremento de ancoragem .....	128
Figura 58 - Detalhes construtivos do método de incremento de ancoragem EBRIG com parafuso spike: (a) e (b) confecção dos furos; (c) preenchimento do furo com resina epoxídica; (d) posicionamento do reforço à flexão utilizando incremento de ancoragem EBRIG; (e) corte da manta para introdução dos parafusos; (f) posicionamento dos parafusos e laminação da parte solta no substrato de concreto ....	129
Figura 59 – Posicionamento dos medidores de deslocamento LVDT's no centro da viga .....	130

Figura 60 – Procedimento para instalação de <i>strain gauge</i> nas armaduras longitudinais: (a) lixamento na posição de instrumentação definida; (b) colagem do <i>strain gauge</i> ; (c) vedação e fixação da instrumentação .....	131
Figura 61 – Procedimento para instalação de <i>strain gauge</i> no substrato de concreto: (a) lixamento mecânico da superfície; (b) aplicação de cola plástica, lixamento e colagem do <i>strain gauge</i> ; (c) vedação do dispositivo .....	132
Figura 62 - Procedimento para instalação de <i>strain gauge</i> no substrato do material de reforço: (a) lixamento manual e superficial da camada de resina; (b) posicionamento e colagem do extensômetro; (c) vedação do dispositivo.....	133
Figura 63 – Posicionamento dos <i>Strin Gauges</i> nas vigas do programa experimental: (a) VT; (b) VR e VA; (c) VB; (d) VC, VD, VDA e VDB .....	134
Figura 64 – Configuração do ensaio de flexão à quatro pontos: (a) posicionamento de apoios e aplicação de cargas; (b) visão geral do ensaio .....	136
Figura 65 – Comportamento das vigas testemunho no ensaio de flexão .....	146
Figura 66 - Comportamento das vigas referência no ensaio de flexão.....	147
Figura 67 - Comportamento das vigas com ancoragem em Laço em U no ensaio de flexão.....	148
Figura 68 - Comportamento das vigas com ancoragem parafuso spike no ensaio de flexão .....	149
Figura 69 - Comportamento das vigas com ancoragem EBROG no ensaio de flexão.....	150
Figura 70 - Comportamento das vigas com ancoragem EBRIG no ensaio de flexão .....	151
Figura 71 - Comportamento das vigas com ancoragem EBRIG com laço em U no ensaio de flexão	152
Figura 72 - Comportamento das vigas com ancoragem EBRIG com parafuso spike no ensaio de flexão .....	153
Figura 73 – Comparativo de comportamentos das metodologias da Etapa I: (a) laço em U; (b); parafuso spike; (c) EBROG e (d) EBRIG .....	154
Figura 74 - Comparativo de comportamentos das metodologias da Etapa II: (a) EBRIG com laço em U e (b) EBRIG com parafuso spike .....	156
Figura 75 - Comparativo de comportamentos das metodologias das Etapa I e II .....	157
Figura 76 – Valores máximos de deformação específica no centro do vão das vigas .....	158
Figura 77 – Valores máximos de deformação específica do reforço de PRFC na viga .....	159
Figura 78 – Modos de ruptura das vigas ensaiadas à flexão .....	161
Figura 79 – Representação da determinação da ductilidade energética de vigas: (a) viga testemunho; (b) viga da metodologia EBRIG .....	165
Figura 80 – Gráfico comparativo das energias de ductilidade .....	167
Figura 81 – Representação do ensaio à flexão: (a) prensa universal localizada no LEME UFRGS e (b) diagrama de momento fletor e esforço cortante do modelo de viga ensaiada.....	181
Figura 82 – Diagrama tensão e deformação da seção de concreto com armadura de tração .....	182
Figura 83 - Diagrama tensão e deformação da seção de concreto com armadura de tração e compressão .....	183

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades das fibras de Carbono, Vidro e Aramida .....	43
Tabela 2 – Exemplo numérico das propriedades do compósito pela variável “volume das fibras” .....	47
Tabela 3 - Composição do traço de concreto .....	106
Tabela 4 – Critério de avaliação do concreto com base na velocidade de onda ultrassônica proposta pela norma BS EN 12504-4 .....	109
Tabela 5 – Resultados de ensaios de Velocidade de Pulso Ultrassônico em CP’s de concreto .....	110
Tabela 6 - Resultados do ensaio de Módulo de Elasticidade do concreto moldado das vigas .....	111
Tabela 7 – Resultados de ensaio de compressão em CP’s cilíndricos .....	112

Tabela 8 – Resultados analíticos x experimentais.....	139
Tabela 9 – Resultados dos ensaios de flexão das vigas e análise estatística .....	141
Tabela 10 – Comparação das metodologias com viga testemunho e referência .....	143
Tabela 11 – Fator de ductilidade das vigas do programa experimental .....	166
Tabela 12 – Resumo dos valores analíticos resistentes na viga de concreto.....	185

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Vantagens e desvantagens para cada um dos reforços estruturais analisados .....	32
Quadro 2 – Resultados de estudos de incremento de ancoragem de PRF.....	93
Quadro 3 - Nomenclatura dos grupos de vigas a serem estudadas.....	99
Quadro 4 – Resultados ensaio de tração de barra de aço .....	105
Quadro 5 – Características da manta de fibra de carbono e resina epóxi.....	114

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SIMBOLOS

### SIGLAS

UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
LEME	Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
EBR	<i>Externally Bonded Reinforcement</i>
EBRIG	<i>Externally Bonded Reinforcement in Grooves</i>
EBROG	<i>Externally Bonded Reinforcement on Grooves</i>
ELU	Estado Limite Último
ELS	Estado Limite de Serviço
FIB	<i>Fédération Internationale du Béton</i>
NSM	<i>Near Surface Mounted</i>
PRF	Polímero Reforçado com fibras
PRFC	Polímero Reforçado com fibras de carbono
PRFV	Polímero Reforçado com fibras de vidro
PRFA	Polímero Reforçado com fibras de aramida

### LETRAS MINÚSCULAS

<i>b</i>	Largura da seção transversal do elemento de concreto
<i>c</i>	Altura da linha neutra da seção de concreto
<i>d</i>	Altura útil da seção de concreto

$d'$	Distância bordo superior até o C.G. da armadura de compressão da seção
$d_f$	Altura útil do sistema de reforço
$h$	Altura da seção de concreto
$n$	Coefficiente de homogeneização de módulo de elasticidade
$f'_c$	Resistência característica de compressão do concreto
$f_{fe}$	Tensão de tração atuante no material de reforço PRF
$f_s$	Tensão de tração no aço
$f_{fu}$	Resistência à tração última da fibra (de cálculo)
$f_{fu}^*$	Resistência à tração última da fibra (fabricante)
$t_f$	Espessura do material de reforço PRF

### LETRAS MAIÚSCULAS

$A_f$	Área total do material de reforço
$A'_s$	Área da armadura de compressão da seção
$A_s$	Área da armadura tracionada
$C_E$	Coefficiente ambiental
$E_c$	Módulo de elasticidade do concreto
$E_s$	Módulo de elasticidade do aço
$E_f$	Módulo de elasticidade do material de reforço (PRF)
$E_f$	Módulo de elasticidade da fibra
$I_{cr}$	Momento de inércia da seção homogeneizada
$I_g$	Momento de inércia de seção retangular
$M_n$	Momento fletor de cálculo da seção de concreto reforçada
$M_u$	Momento fletor último da seção de concreto reforçada
$M_{DL}$	Momento fletor devido as cargas permanentes (peso próprio)
$R_{cc}$	Resulta de força do concreto comprimido
$R_f$	Resulta de força do material de reforço
$R_n$	Carga resistente antes de ser reforçada
$R'_{st}$	Resulta de força da armadura de compressão
$R_{st}$	Resulta de força da armadura de tração
$S_{DL}$	Ações permanentes
$S_{LL}$	Ações de sobrecarga

## LETRAS GREGAS

$\phi$	Parâmetro relacionado à ductilidade do elemento estrutural
$\psi_f$	Coefficiente de minoração da resistência do PRF
$\beta_1$	Fator de transformação do diagrama de tensões
$\alpha_1$	Coefficiente de redução da resistência do concreto (cargas de longa duração)
$\varepsilon_{bi}$	Deformação inicial da seção devido as cargas instaladas no ato do reforço
$\varepsilon_b$	Deformação específica da seção
$\varepsilon_c$	Deformação efetiva no concreto
$\varepsilon'_c$	Máxima deformação do concreto não confinado
$\varepsilon_{cu}$	Deformação axial última do concreto
$\varepsilon_{fc}$	Deformação específica da fibra do reforço à tração (de cálculo)
$\varepsilon_{fd}$	Deformação limite máxima (ruptura) da fibra do reforço
$\varepsilon_{fu}$	Deformação última da fibra do reforço (de cálculo)
$\varepsilon_{fu}^*$	Deformação última da fibra do reforço (fabricante)
$\varepsilon_{fe}$	Deformação efetiva no reforço de PRF
$\varepsilon_s$	Deformação efetiva no aço
$\varepsilon_{sy}$	Deformação de tração no aço, na situação extrema de tração
$\varepsilon_t$	Deformação de escoamento da armadura
$\mu_f$	Fator de ductilidade de flecha
$\mu_E$	Energia de ductilidade

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	19
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DO TEMA DE PESQUISA	20
1.2	OBJETIVOS	21
1.2.1	Objetivo principal	21
1.2.2	Objetivos específicos	21
1.3	LIMITAÇÕES	22
1.4	ESTRATÉGIA DE PESQUISA (DELINEAMENTO)	23
<b>2</b>	<b>REFORÇO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO</b>	<b>24</b>
2.1	PATOLOGIA DAS ESTRUTURAS EM ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO	24
2.1.1	Ciclo de vida e manutenções em estruturas	24
2.1.2	Sintomatologia, diagnóstico, prognóstico e terapia	27
2.2	TIPOS DE REFOÇO ESTRUTURAL	29
2.2.1	Metodologias de reforço estrutural	29
2.2.2	Comparação entre os tipos de reforço estrutural	32
2.3	MATERIAIS COMPÓSITOS	33
2.3.1	Definição	34
2.3.2	Classificação	35
2.3.3	Materiais compósitos do Tipo Polímeros Reforçados com Fibras	36
2.3.3.1	Matriz do tipo Polimérica	38
2.3.3.2	Elemento reforço do tipo Fibras	39
2.4	PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS DO TIPO PRF	46
2.4.1	Regra da Mistura	46
2.4.2	Parâmetros de influência nas propriedades do Polímeros Reforçados com Fibras (PRF)	48
2.4.3	Propriedades dos Polímeros Reforçados com Fibras (PRF)	49
2.4.3.1	Resistência à Tração	49
2.4.3.2	Resistência à Compressão	50
2.4.3.3	Módulo de Elasticidade	50
2.4.3.4	Ductilidade	50
2.4.3.5	Outras propriedades	51
2.5	TÉCNICAS DE REFORÇO COM PRF	53
2.5.1	Técnica EBR	53
2.5.2	Técnica NSM	54
2.6	APLICAÇÃO DO SISTEMA PRF COMO REFORÇO ESTRUTURAL	55
2.6.1	Etapa de dimensionamento do reforço por PRF	55
2.6.2	Etapa construtiva do reforço por PRF	55
2.6.2.1	Preparação do substrato	55

2.6.2.2	Preparação das resinas.....	57
2.6.2.3	Aplicação do sistema de Polímero Reforçado com Fibras (PRF) .....	57
2.6.3	Manutenção e acompanhamento da estrutura reforçada com PRF.....	58
<b>3</b>	<b>COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DO REFORÇO COM PRF .....</b>	<b>60</b>
3.1	MODOS DE RUPTURA DO POLÍMERO REFORÇADO POR FIBRAS .....	60
3.2	METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO DO REFOÇO DO TIPO PRF .....	65
3.2.1	Limite de Resistência .....	65
3.2.2	Dimensionamento à flexão.....	66
3.3	ANCORAGEM DOS POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS - PRF.....	75
3.3.1	Aderência e ancoragem dos Polímeros Reforçados com Fibras .....	75
3.3.1.1	Estudo da ancoragem do PRF .....	75
3.3.1.2	Estudo da determinação do comprimento de ancoragem.....	76
3.3.1.3	Estudo do modo de ruptura .....	77
3.3.1.4	Estudo da interação concreto/adesivo/fibra: aderência .....	79
3.3.2	Tipos de ancoragem dos Polímeros Reforçados com Fibras.....	81
3.3.3	Análise eficiência dos métodos de incremento de ancoragem .....	93
3.4	ANÁLISE DE DUCTILIDADE EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO.....	94
<b>4</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>98</b>
4.1	ESTRATÉGIA EXPERIMENTAL.....	98
4.2	METODOLOGIA DE INCREMENTO DE ANCORAGEM.....	99
4.3	MODELO EXPERIMENTAL – VIGAS EM CONCRETO ARMADO.....	100
4.3.1	Projeto das vigas de concreto armado .....	100
4.3.2	Procedimento de confecção das vigas de concreto armado.....	101
4.3.2.1	Armaduras das vigas .....	102
4.3.2.2	Ensaio de caracterização das armaduras .....	102
4.3.2.3	Confecção do Concreto .....	106
4.3.2.4	Ensaio de controle tecnológico dos corpos de prova de concreto .....	107
4.3.3	Material de reforço do tipo Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (PRFC) .....	113
4.4	APLICAÇÃO DA MANTA DE FIBRA DE CARBONO.....	114
4.4.1	Referência .....	120
4.4.2	Laço em U.....	120
4.4.3	Parafuso spike .....	121
4.4.4	EBROG .....	124
4.4.5	EBRIG.....	126
4.4.6	EBRIG com laço em U.....	127
4.4.7	EBRIG com parafuso spike.....	128
4.5	INSTRUMENTAÇÃO DOS ENSAIOS DE FLEXÃO .....	129

4.5.1	<i>Linear Variation Displacement Transducer (LVDT)</i> .....	130
4.5.2	<i>Strain Gauge</i> .....	130
4.6	PROCEDIMENTO DE ENSAIO À FLEXÃO DAS VIGAS .....	135
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>137</b>
5.1	CONSIDERAÇÕES DOS RESULTADOS .....	137
5.2	RESULTADOS ANALÍTICOS .....	138
5.3	RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS VIGAS .....	140
5.4	COMPORTAMENTO DOS ELEMENTOS NO ENSAIO À FLEXÃO .....	145
5.4.1	Comparação entre comportamentos das vigas da Etapa I .....	154
5.4.2	Comparação entre comportamentos das vigas da Etapa II .....	155
5.4.3	Comparação entre comportamentos das vigas das Etapa I x Etapa II .....	156
5.5	ABERTURA DE FISSURAS E MODOS DE FALHA .....	158
5.6	AVALIAÇÃO DA DUCTILIDADE .....	165
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>168</b>
6.1	CONCLUSÕES .....	168
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	169
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>171</b>
	<b>Apêndice A – Dimensionamento de reforço estrutural de vigas com PRF</b> .....	<b>176</b>
	<b>Apêndice B – Verificação de cálculo da viga de concreto armado</b> .....	<b>181</b>
	<b>B1 – Desconsiderando a contribuição da armadura de compressão</b> .....	<b>182</b>
	<b>B2 – Considerando a contribuição da armadura de compressão</b> .....	<b>183</b>
	<b>B3 – Esforço cortante resistente</b> .....	<b>185</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O crescimento da área de Patologia das Estruturas pode ser considerado como um reflexo da necessidade da sociedade, que de forma geral, anseia por cuidados e soluções de problemas desenvolvidos nos mais diversos tipos estruturais. Tal situação ocorre principalmente em grandes centros urbanos, caracterizados por alta concentração de construções, ou nas obras públicas de forma geral, que movimentam elevados volumes financeiros para reconstrução de estruturas, muitas vezes de liberação orçamentária burocrática.

Os problemas, denominados na Engenharia Civil como “manifestações patológicas”, são resultados das mais diferentes origens: deficiência de projeto e construção, falta de manutenção recorrentes, acidentes, ações imprevistas, ambientes agressivos, degradações naturais dos materiais que compõem a estrutura e outros. Em todas essas situações é fundamental o acompanhamento e análise detalhados para avaliar a necessidade de intervenção e o seu tipo mais correto, com o objetivo de garantir a vida útil, estabilidade (segurança aos usuários) e durabilidade da estrutura.

Diversas técnicas de reforço estrutural foram desenvolvidas e aperfeiçoadas à medida que as necessidades foram surgindo ao longo das últimas décadas. Tem como similaridade a adição de elementos de reforço externo na face tracionada dos elementos estruturais com o objetivo de melhorar (*retrofit*) ou restaurar (reabilitação) a resistência à flexão, ao corte, à compressão/tração e ductilidade.

As técnicas existentes atualmente referem-se ao uso de cabos de aço protendido; colagem por meio de pastas adesivas (ou aparafusamento) de elementos metálicos nas regiões da estrutura a ser reforçada; substituição completa dos elementos danificados por perfis metálicos ou em concreto armado; aumento de seção transversal através de concreto armado ou concretos e argamassas especiais; uso de Polímeros Reforçados com Fibras (PRF) e outras. Cada uma dessas técnicas apresentam vantagens e desvantagens, necessitando de uma análise cuidadosa e minuciosa afim de se adotar a metodologia que mais se adequa as variabilidades de objetivo do reforço, magnitude e tipos de cargas atuantes na estrutura, acréscimo de cargas (peso próprio) decorrente do tipo de reforço, implicação em outras manifestações patológicas, interferências arquitetônicas ou de materiais, possibilidades de corrosões, viabilidade financeira e outros aspectos que indiquem uma melhor solução em detrimento de outras.

As investigações do uso do PRF na Engenharia Civil começaram no EMPA (*Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research*), laboratório de pesquisa suíço e se espalharam rapidamente para diversos outros países da Europa, além do Japão, Estados Unidos

e Canadá. Atualmente, os estudos e as aplicações dessa técnica podem ser considerados em escala global, principalmente após os trabalhos de pesquisa, investigações técnicas e discussões terem sido compilados e organizados, formando diversas normas, recomendações práticas, construtivas e de dimensionamento numérico, como por exemplo através das organizações *American Concrete Institute (ACI)*; *International Federation for Structural Concrete (FIB)*; *Japan Society of Civil Engineers (JSCE)*; *Japan Concrete Institute (JCI)*; *Canadian Standards Association (CSA)* e outros.

O uso do PRF apresenta elevado potencial de aplicação, principalmente pelas suas características não corrosivas, baixo peso, elevado módulo de elasticidade, elevada resistência à tração e rapidez na aplicação, Machado (2010). Apesar dos benefícios tecnológicos dessa metodologia, os custos para aplicação que a técnica de PRF demanda, materiais e mão de obra, ainda são consideráveis, fazendo com que a naturalmente a técnica seja um impedimento de escolha. Apesar disso, reforça-se o fato de que a comparação de custos entre as técnicas de reforço não pode ser o foco principal na tomada de decisão de escolha do tipo de reforço, mas um dos parâmetros a serem considerados.

Essa metodologia de reforço apresenta comportamento não dúctil na ruptura, ou seja, não é característico de ter um patamar de escoamento suficiente que garantam significativas deformações ao compósito antes que haja sua efetiva ruptura. Assim, quando os elementos de concreto armado são reforçados, como por exemplo em vigas, à medida que a carga cresce e o surgimento das fissuras se propaga no concreto, ocorre um comportamento comum de ruptura prematura, seja através do descolamento do material de reforço ou por ruptura do concreto de cobertura, entretanto sem alcançar a capacidade máxima do reforço.

Dessa forma, o estudo do reforço estrutural do tipo PRF, busca colaborar para a disseminação em nível nacional desta técnica em elementos de concreto armado e avançar na busca de metodologias de incremento de ancoragem que indiquem maior eficiência e segurança estrutural no uso desse tipo de reforço, aumentando a capacidade resistente e, portanto, a eficiência dessa metodologia.

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DO TEMA DE PESQUISA

O estudo dos Polímeros Reforçados com Fibras (PRF) aplicados como reforço ou *retrofit* em estruturas de concreto armado tem aumentado consideravelmente ao longo dos últimos anos, juntamente com a aplicação dessa técnica em estruturas físicas reais, justificadas pela fácil implementação da metodologia e pelas características positivas, relacionadas às

propriedades mecânicas do material e baixa interferência arquitetônica nos elementos que exigem algum tipo de intervenção.

Entretanto, diversos grupos de pesquisa, nacionais e internacionais, convergem suas análises investigativas sobre o comportamento do material isolado e associado aos elementos reforçados, caracterizando-o como de comportamento frágil ou de ruptura prematura, portanto, um obstáculo ao uso integral da capacidade das fibras até o seu limite. Assim, as normas e manuais introduziram mecanismos que evitam que a estrutura reforçada atinja limites de carregamento próximos aos limites do comportamento frágil ou de ruptura prematura do sistema de reforço com PRF, através da redução da capacidade resistente nos dimensionamentos numéricos e introduzindo mecanismos de ancoragem, afim de controlar eventuais comportamento indesejados.

Diversas pesquisas indicam que a adoção de mecanismos de incrementos de ancoragem no sistema de PRF garante uma alteração benéfica na forma de ruptura do elemento reforçado, (torna-o mais dúctil), além de proporcionar acréscimo de carga, comparados aos elementos sem reforço ou reforçado, mas sem incrementos de ancoragem. Nesse contexto, a continuidade da investigação das metodologias de ancoragem se faz necessária para permitir o aumento da eficiência do material, sem atingir os limites de ruptura frágil ou prematuro, característico desse tipo de reforço.

## 1.2 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são divididos entre objetivo principal e objetivos específicos, atribuindo ao primeiro caráter geral e ao segundo aprofundamento necessário para o cumprimento da finalidade da pesquisa, como pode ser observar nos itens a seguir.

### 1.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho consiste na análise experimental do comportamento e desempenho de diferentes metodologias de incremento de ancoragem de mantas de fibra de carbono, aplicados em elementos de concreto armado reforçados à flexão, utilizando a técnica de reforço “*Externally Bonded Reinforcement*” (EBR).

### 1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são listados a seguir:

- a) Avaliar as metodologias de incremento de ancoragem, comparativamente aos elementos sem reforço e aos elementos apenas reforçados à flexão, no que diz respeito ao acréscimo de carga e a deformação do elemento;
- b) Avaliar o comportamento da ductilidade de todos os elementos do programa experimental nos ensaios de flexão a quatro pontos, através dos fatores numéricos adimensionais de ductilidade, comparando-os;
- c) Avaliar a eficiência das metodologias de incremento de ancoragem no que diz respeito aos modos de ruptura dos elementos ensaiados, comparando com as vigas sem reforço e as reforçadas à flexão sem incrementos de ancoragem;
- d) Comparar as cargas máximas obtidas nos resultados analíticos e experimentais de todas as vigas do programa experimental;
- e) Propor duas alterações nas metodologias de incremento de ancoragem da etapa I do programa experimental, a fim de formar a etapa II, realizando as mesmas análises e comparações descritas nos itens (a) a (e), indicadas acima.

### 1.3 LIMITAÇÕES

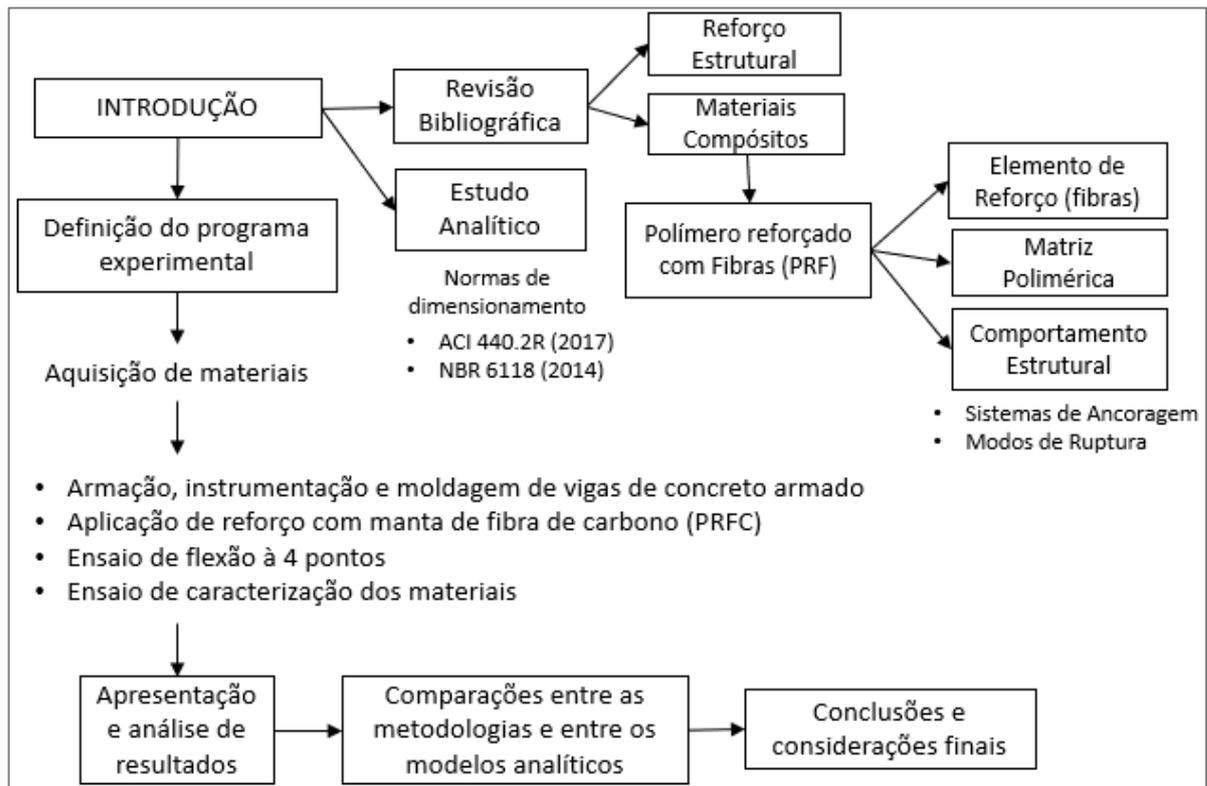
As limitações da pesquisa estão relacionadas aos fatores listados a seguir:

- a) Definição das dimensões das vigas de concreto armado (comprimento máximo de 150 cm x 12 cm de largura), compatibilizado com as dimensões de uso e operação da prensa de ensaios do LEME UFRGS, além de garantir manuseio logístico e seguro das peças dentro do laboratório;
- b) Alta diversidade de estudos e metodologias propostas na literatura para a execução das ancoragens do reforço de Polímeros Reforçados por Fibras (PRF), limitando a pesquisa a um grupo específico de proposta encontrada na literatura;
- c) As quantidades de repetição de amostras para a mesma variável são reduzidas ao número limite de duas, por restrição de tempo para análise e conclusão do programa e de recursos financeiros;
- d) Devido a quantidade total de vigas de concreto armado propostas no programa experimental, o processo de concretagem não foi realizado dentro de ambiente controlado do LEME UFRGS, sendo realizado por empresa externa de pré-fabricados.

## 1.4 ESTRATÉGIA DE PESQUISA (DELINEAMENTO)

A fim de alcançar os objetivos propostos neste trabalho, com as devidas contextualizações das limitações que influenciam na pesquisa, determinou-se uma estratégia experimental para o desenvolvimento desta dissertação. A Figura 1 propõe as etapas necessárias para a realização do trabalho.

Figura 1 – Fluxograma das etapas de pesquisa



Fonte: elaborada pelo autor

## 2 REFORÇO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

Nesse capítulo serão abordados alguns conceitos importantes a respeito das “Patologias das Estruturas” e sobre reforço de elementos de concreto armado, indicando as principais metodologias existentes e características básicas. Por fim, são abordadas as definições, conceitos e características intrínsecas aos materiais do tipo Polímeros Reforçados com Fibras, no que se refere ao reforço de estruturas de concreto armado.

### 2.1 PATOLOGIA DAS ESTRUTURAS EM ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO

A “Patologia das Estruturas” é o campo da Engenharia das Construções que se propõem a estudar as causas e os mecanismos de anomalias (problemas ou defeitos) existentes em uma estrutura, sejam eles em um elemento estrutural ou não estrutural, isolado ou em conjunto com mais componentes. Uma construção que apresenta uma manifestação patológica – define-se como a expressão dos problemas encontrados nas estruturas – não atende adequadamente a uma ou mais funções para as quais o elemento estrutural foi construído.

Com isso, o campo de estudos se dedica ao entendimento das origens; formas de desenvolvimento do dano; consequências para a construção; avaliação das necessidades de intervenção; metodologia de intervenção (demolição, reforço e outras), além dos mecanismos que evitam o surgimento de novas anomalias ou agravamento das existentes, como por exemplo, através do acompanhamento periódico por meio de inspeções e manutenções.

O conhecimento e domínio dos tópicos apresentados permite um melhor entendimento da estrutura em estudo e a tomada de decisão mais precisa da solução, evitando riscos aos usuários das edificações e a sua própria conservação, englobando assim todo o conhecimento da disciplina de “Patologia das Estruturas”.

#### 2.1.1 Ciclo de vida e manutenções em estruturas

Toda e qualquer estrutura é caracterizada por um ciclo de vida e pode ser definida como o tempo compreendido entre as fases de planejamento do projeto até as fases de uso e manutenção da edificação, sendo o período considerado para que ela possa cumprir sua função projetada com desempenho<sup>1</sup> satisfatório e sem grandes custos de manutenção. Além disso,

---

<sup>1</sup> **Desempenho:** relacionado ao uso de um sistema ou processo construtivo com a finalidade de exercer a sua função, seja qual for a solução técnica adotada, no tempo estipulado em relação ao uso da estrutura. Desempenho insatisfatório não significa a condenação da estrutura, devendo ser investigado os motivos desse fato, e prever terapias (exemplo, reforço estrutural ou manutenção) para retorno do limite mínimo de desempenho.

estruturas de maior importância econômico-social são caracterizadas por receberem medidas ao longo das diversas fases da vida útil para garantir estabilidade, segurança e desempenho satisfatórios aos usuários. Nesse contexto, entende-se que a vida útil é influenciada pela relação entre usuário e estrutura em qualquer etapa do seu ciclo de vida.

Para uma estrutura atingir a sua vida útil projetada é essencial que manutenções ocorram regularmente para retomada do desempenho satisfatório, pois os materiais que constituem a estrutura perdem a eficiência progressivamente ao longo dos anos por diversos motivos: qualidade do material, desgastes naturais, ações de agentes agressivos ambientais<sup>2</sup>, ações atuantes previstas e eventualmente imprevisas em projeto, erros de execução ou outras situações que acometem a estrutura. Entende-se por “manutenção”, o ato de manter, consertar ou conservar qualquer elemento estrutural, a fim de retomar as condições satisfatórias de desempenho, garantir a durabilidade<sup>3</sup> estrutural e promover a continuação da vida útil estipulada na fase de projeto.

O acompanhamento da evolução estrutural durante o uso, através dos anos e conseqüentemente das deteriorações estruturais, são importantes por permitirem avaliar a necessidade de intervenções na estrutura, visando a durabilidade e desempenho adequados à da construção ao longo de sua vida útil. Para isso, as inspeções (cadastrais, rotineiras, especiais ou de outros tipos) previamente planejadas e documentadas permitem realizar tal acompanhamento ao longo do tempo, intervindo, através das manutenções, sempre que necessário.

Durante uma inspeção, ao se observar a necessidade de manutenções, conhecidas como medidas de profilaxia<sup>4</sup>, avalia-se a natureza. Essas podem ser do tipo preventiva, preditiva, detectiva ou corretiva. Os três primeiros tipos de manutenção ocorrem de forma rotineira, quando a estrutura não indica nenhum problema grave ou preocupante, porém necessária para que determinada situação esteja sob controle e não evolua para um problema mais crítico. A manutenção corretiva é exigida em situações que a estrutura evidencia algum problema mais grave, necessitando de atenção, análise e possivelmente intervenção o mais rápido possível.

---

<sup>2</sup> **Agressividade ambiental:** são as ações físicas e químicas que agem nas estruturas, independentemente dos efeitos mecânicos, variações volumétricas e outras ações determinadas em projeto, levando em consideração a exposição que a estrutura sofrerá no ambiente, o período de vida útil e a durabilidade exigida.

<sup>3</sup> **Durabilidade:** capacidade da estrutura resistir às ações externas, satisfazendo pré-requisitos de desempenho ao longo do tempo.

<sup>4</sup> **Profilaxia:** termo utilizado na Patologia das Construções com o objetivo de indicar a aplicação de medidas de prevenção para evitar o surgimento ou agravamento de determinada situação maléfica/negativa.

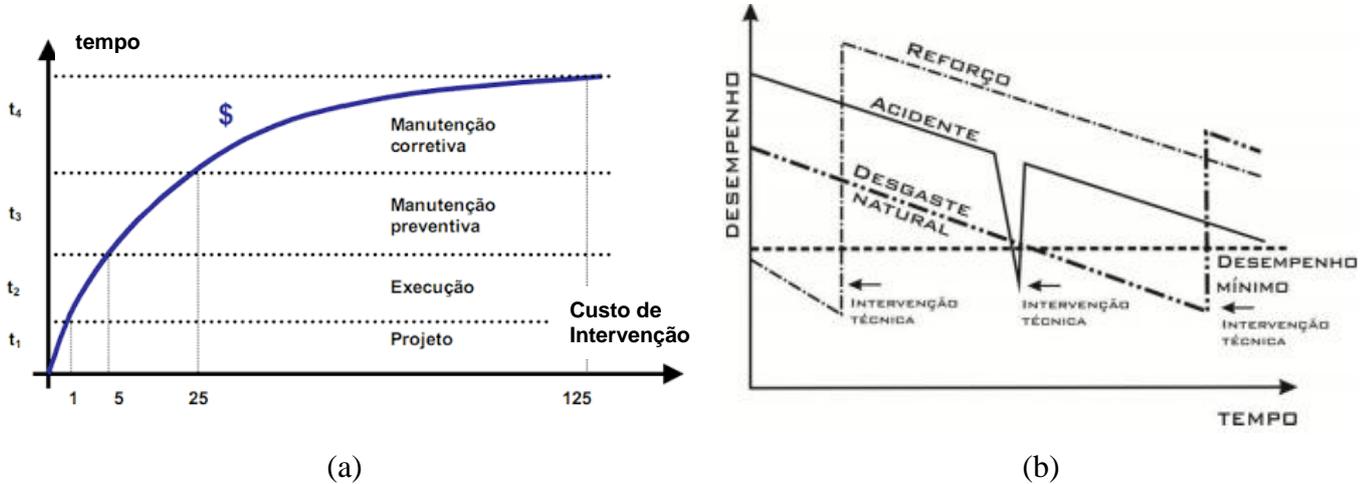
Entretanto, as manutenções não podem originar-se apenas pelo uso ou deterioração natural do elemento estrutural, pois são observadas práticas (ou decisões) existentes em cada uma das fases do ciclo de vida da estrutura que influenciam na maneira como a durabilidade e deterioração do elemento de concreto armado evoluem. Diversos estudos indicam que o maior volume de práticas construtivas, influentes na durabilidade estrutural, se referem as escolhas, ou negligências, na fase de projeto, Souza e Ripper (1998).

Sitter (1984) propôs, sob uma ótica financeira, a execução de manutenções em uma estrutura ao longo de diferentes fases de projeto, a fim de assegurar a durabilidade estrutural, indicando a maneira como os custos gerados por tais intervenções evoluem. Esse estudo foi extremamente aceito pela comunidade técnico-científica e mundialmente conhecido por “Lei dos Cinco” ou “Lei de Siter”, sofrendo diversas aplicações e desdobramentos.

De acordo com essa Lei, os custos de intervenção para solucionar um determinado problema na edificação e retornar a estrutura aos níveis de durabilidade mínimos crescem de acordo com uma progressão geométrica de razão cinco ao longo do tempo, implicando no agravamento do nível de problematização e conseqüentemente da manifestação patológica, caso as decisões sejam postergadas (efeito em cascata). Ou seja, intervenções, correções ou decisões são mais eficientes, simples e baratas, quanto mais cedo forem previstas, identificadas e solucionadas.

Através da Figura 2a, observam-se as importâncias financeiras das intervenções ou decisões atribuídas ou negligenciadas, em cada uma das fases de uma edificação ao longo do tempo, dividindo-as em fases de projeto, execução, manutenção preventiva e manutenção corretiva (relacionadas ao uso). Assim, evidencia-se a importância das inspeções e manutenções estruturais. Para a Figura 2b, indica-se graficamente a eficiência e simplicidade das manutenções ao longo do tempo de vida útil de uma estrutura com o objetivo de recompor o desempenho estrutural, reduzido por diversos motivos (desgastes naturais, acidentes e outros), através das intervenções.

Figura 2 – Representação gráfica: (a) Lei de Sitter e (b) Evolução do desempenho estrutural em função das manutenções ao longo do tempo



Fonte: (a) adaptado de Sitter (1984); (b) Souza e Ripper (1998)

Portanto, o conjunto de imagens evidencia um hábito recorrente e antieconômico no setor de Engenharia das Construções: negligenciar inspeções rotineiras promovem problemas em cascata a uma estrutura, pois não são observados os problemas iniciais e que estão em constante evolução ao longo do tempo, surgindo novos, ou agravando-os e comprometendo mais rapidamente a estrutura. Conseqüentemente, ocorre o aumento dos custos para a correção desses problemas, em uma progressão geométrica de razão cinco, como prevê a Lei de Sitter. Logo, projetar, construir, inspecionar e manter uma estrutura de forma correta é a melhor política para a alta durabilidade.

### 2.1.2 Sintomatologia, diagnóstico, prognóstico e terapia

O surgimento de problemas em uma edificação, seja na integridade ou em elementos complementares, pode ocasionar sinais externos, denominados sintomas (ou manifestações) de que algum problema (patologia) está ocorrendo na estrutura. A sintomatologia pode ser definida como o estudo dos sinais que as estruturas externam ao longo do tempo, indicando que algum eventual problema ocorre na estrutura, sendo um estudo relevante, por ser o primeiro passo para o entendimento das “Patologias das Estruturas” e necessário para que seja possível diagnosticar e tratar o problema (BOLINA; HELENE; TUTIKIAN, 2019).

Assim, o estudo se inicia pela “Inspeção Visual” da estrutura, com o objetivo de obter uma coleta geral dos dados, indicando, através de relatórios técnicos, os sinais observados, a localização e intensidade. A análise do projeto e a adoção de ensaios específicos podem auxiliar nessa etapa inicial para promover um estudo mais claro e um diagnóstico mais condizente.

No “Diagnóstico” acontece a identificação do problema incidente pela análise de todos os dados coletados na “Inspeção Visual”. Assim, nessa fase verifica-se a influência de cada informação (sintomas) no comportamento global da construção, ou seja, as consequências dos sintomas na estrutura, além das possíveis origens, chegando à compreensão global do problema. Logo, para essa fase é imprescindível ter conhecimento teórico sobre o desempenho da estrutura e dos materiais utilizados em relação aos agentes agressivos; investigar sobre intervenções já realizadas na estrutura; analisar projetos e outros mecanismos que permitam diagnosticar mais precisamente o problema existente na estrutura.

O conjunto de ações investigativas são conhecidas como “Anamnese” e fazem parte do procedimento de “Diagnóstico”. Apesar de se chegar a uma conclusão (diagnóstico) que justifique os sintomas (sinais) existentes na estrutura, não se pode afirmar com plena convicção sobre a sua exatidão ou solução, pois apenas será confirmada com a resposta da estrutura ao tratamento indicado e aplicado.

Concomitantemente, o estudo passa pela fase de “Prognóstico”, que corresponde à explicação das consequências que irão ocorrer à estrutura ao longo do tempo caso não sejam efetuadas as medidas corretivas necessárias para a extinção do problema. Dependendo da situação, é na fase do prognóstico em que se percebe que mesmo que ocorra uma intervenção, essa não será satisfatória ou apresentará um custo-benefício elevado pela inevitabilidade de evolução desfavorável do caso (BOLINA; HELENE; TUTIKIAN, 2019).

Ao final, é estabelecida a tomada de decisão, indicando as intervenções, conhecidas como terapias, necessárias pra solucionar o problema patológico estudado, corrigindo a estrutura e reestabelecendo os critérios mínimos de desempenho. Nesse contexto, um dos grupos de terapias que podem ser adotadas, refere-se ao “Reforço Estrutural”, onde as intervenções podem ser de diferentes tipos e intensidades, dependendo principalmente do tipo de estrutura e da manifestação patológica identificada, diagnosticada e prognosticada.

Dessa forma, observa-se que os tópicos discutidos acima se relacionam para compor todo o entendimento de uma estrutura, se atentando aos aspectos da estabilidade estrutural até a relação que o usuário terá com a estrutura ao longo dos anos. A interdisciplinaridade com as áreas de concepção estrutural, projetos estruturais/complementares e execução se fazem necessários ao entendimento da ocorrência das manifestações patológicas existentes, pois impactam diretamente em suas ocorrências e correções. Assim, os conceitos apresentados estão diretamente inter-relacionados e pertencem ao contexto do estudo de “Reforço Estrutural”.

## 2.2 TIPOS DE REFOÇO ESTRUTURAL

O reforço estrutural pode ser utilizado em elementos que perderam sua capacidade resistente ao longo dos anos, devido a inúmeros fatores que podem acontecer a uma estrutura. Permitem um reestabelecimento da capacidade de carga inicialmente projetada ou então, em situações de adequação de uso, no qual o objetivo é permitir que o elemento possa suportar maiores carregamentos em comparação ao definido na fase de concepção de projeto. Ao primeiro atribui-se o termo “reabilitação<sup>5</sup>” e ao segundo, “*retrofit*<sup>6</sup>”.

O “Estado-Limite” é o termo designado a Engenharia Estrutural que indica o estado na qual a estrutura, ou um determinado elemento construtivo, deixa de atender requisitos pré-estabelecidos. A norma NBR 6118 (ABNT, 2014) indica a existência de diversos tipos de Estados-Limites, em que para cada um deles certas condições limites são impostas e devem ser seguidas. A fim de classificá-los, observam-se dois grandes grupos: Estado Limite Último (ELU) e Estado Limite de Serviço (ELS).

Através das normas regulamentadoras é possível elaborar projetos com o objetivo de atingir as características mínimas recomendadas. Caso a estrutura não atenda qualquer um dos parâmetros estabelecidos pelas normas, em qualquer fase de sua utilização ou vida útil, é necessária alguma metodologia de reforço estrutural.

Dos dois grupos descritos, entende-se o ELS como aquele relacionado ao conforto no uso, durabilidade, aparência e boa utilização das estruturas, dos usuários e das funcionalidades dos equipamentos, como por exemplo, com a limitação de deslocamentos verticais dos elementos estruturais; formações de fissuras e outros. No ELU, relaciona-se o estado no qual a estrutura já não pode ser utilizada por razão de esgotamento da capacidade resistente, logo colocando em risco à segurança. Para os dois Estados Limites, caso não haja o atendimento das especificações mínimas normativas, há a necessidade de intervenção nas estruturas, com ressalva ao não atendimento do ELU, onde a intervenção deve ser imediata pelo potencial risco de ruína.

### 2.2.1 Metodologias de reforço estrutural

Cada situação de reforço exige uma análise específica sendo a melhor escolha condicionada aos tipos de ações atuantes e sua magnitude em cada componente, o objetivo

---

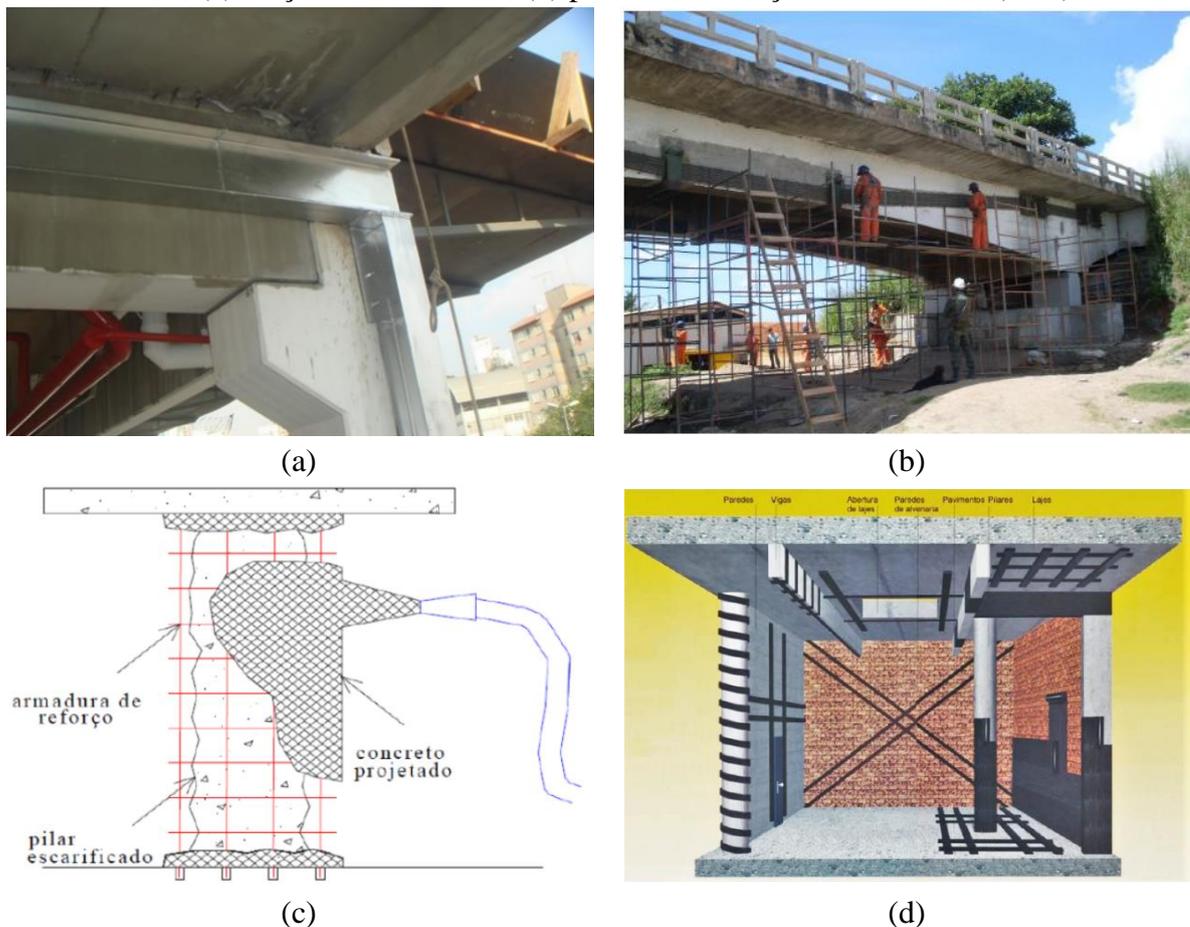
<sup>5</sup> **Reabilitação:** situação de reforço estrutural para recuperação da resistência inicial do elemento estrutural, danificado por diferentes fatores.

<sup>6</sup> **Retrofit:** situação de reforço estrutural de elementos para correção de anomalias devido deficiências de projeto ou de construção, além de situações de resistência a cargas adicionais justificadas por uma nova utilização.

estrutural (reabilitação ou *retrofit*), os materiais envolvidos, (garantia de uma melhor aderência entre substrato e reforço), valores monetários, tempo dispendido para execução dos reforços, mão de obra qualificada disponível e facilidade ou proximidade de obtenção das matérias primas. Deve ser levado em consideração a adoção das boas práticas de execução de cada um dos tipos de reforço, seguindo as recomendações do fabricante, estudos técnico-científicos ou normas técnicas vigentes.

O objetivo do reforço em estruturas de concreto armado é garantir determinadas condições de suportar o carregamento solicitado, ou seja, proporcionar capacidade resistente. Existem diversas metodologias, ou técnicas, que promovem o reforço da estrutura, entre elas: aplicação de chapas e perfis metálicos; protensão externa; aumento de seção com uso de concreto e armadura de aço e aplicação de materiais compósitos: Polímero Reforçado com Fibra (PRF). A Figura 3 ilustra o uso das metodologias citadas.

Figura 3 – Aplicação de métodos de reforço estrutural: (a) perfis metálicos; (b) protensão externa; (c) adição de armaduras; (d) polímeros reforçados com fibras (PRF)



Fonte: (a) Techniques (2021); (b) Vitório e De Barros (2011); (c) Helene (1992); Juvandes (2002)

a) Reforço por aplicação de chapas e perfis metálicos

Os reforços por chapas e perfis metálicos utilizam elementos metálicos fixados nos substratos de concreto por colagem (uso de adesivo epóxi e/ou massas específicas) ou fixação através de parafusos (uso de chumbadores e/ou parabolt), que permitem a união do elemento de aço adicionado ao concreto da estrutura original, com objetivo da ação solidária entre os materiais e a transmissão correta de esforços, garantindo ganhos de resistências.

b) Reforço por protensão externa

O concreto protendido é um tipo construtivo bastante utilizado em estruturas ou elementos que apresentam elevadas cargas atuantes, exigindo grandes dimensões caso não fosse utilizado o sistema de protensão. Possui como objetivo melhorar uma das características negativas do concreto: a baixa resistência à tração. Através da introdução da cordoalha (ou barras de aço), a estrutura irá receber esforços internos normais, comprimindo o concreto e tracionando a armadura de protensão, permitindo a diminuição das deformações das peças, reduzindo o aparecimento de fissuras e aumentando as características de tração, compressão e de momento fletor resistente.

Devido ao fato da protensão externa ser utilizada como um mecanismo de reparo estrutural, ou seja, a estrutura sofre interferência após algum período de sua vida útil, é fundamental atentar-se às especificações de materiais utilizados no período de execução da construção ou investigar as condições atuais dos materiais, com o objetivo de verificar se o concreto existente suporta os esforços normais de compressão que serão inseridos no elemento a fim de reestabelecer ou aumentar a capacidade de carga.

c) Reforço por aumento de seção com uso de concreto e armadura de aço

O processo é bastante adotado para a correção de manifestações patológicas em elementos que compõem a estabilidade da estrutura, principalmente em vigas e pilares. Conhecido também como “encamisamento da estrutura original”, essa metodologia implica na adição de armaduras na seção do elemento estrutural e a posterior concretagem com o intuito de aumentar ou retornar os níveis de resistência da peça original.

Nesse tipo de metodologia, é fundamental: garantir a união correta entre elementos de idades diferentes; realizar o escoramento adequado do elemento ou dos pontos da estrutura que podem sofrer redistribuição de esforços, para que a escarnificação do elemento ocorra de forma segura, aliviando eventuais tensões da armadura que podem estar pré-tensionadas e por fim, a verificação das armaduras corroídas do elemento.

Os concretos de alto desempenho, que atingem resistência à compressão superiores a 50 MPa, ou de ultra-alto desempenho, no qual atingem resistência à compressão superiores a 100 MPa, podem ser uma alternativa ao uso do concreto convencional aplicado a essa metodologia, pelo alcance de altas resistências, característica desse material, o que pode permitir redução da seção de reforço ou até dispensa do uso das armaduras. Entretanto, apresenta características técnicas de preparo, manuseio e aplicação específicas, exigindo precauções para a sua utilização.

d) Reforço por aplicação de materiais compósitos do tipo polímero reforçado com fibra

Os materiais compósitos são uma mistura de materiais, produzindo um novo produto, com características superiores aos objetos inicialmente misturados, caso estes fossem analisados separadamente. O grupo de materiais compósitos mais utilizados na aplicação de reforço estrutural é o Polímero Reforçado com Fibras (PRF), sendo elas de carbono, vidro ou aramida, aplicados comumente com resina epoxídica.

Tal tipo de reforço ganha relevância no meio técnico-científico nas últimas décadas, decorrente das suas características de versatilidade e manuseio, assumindo formas complexas; rapidez de aplicação; elevada resistência, comparada ao peso próprio; durabilidade; manutenção das dimensões originais do elemento estrutural reforçado; fácil obtenção e fabricação das matérias primas, além de outros fatores que permitem um resultado final de extremo interesse nos métodos de reforço estrutural.

## 2.2.2 Comparação entre os tipos de reforço estrutural

Através do Quadro 1, analisam-se as principais vantagens e desvantagens na escolha de cada uma das metodologias, atrelado as suas características intrínsecas.

Quadro 1 – Vantagens e desvantagens para cada um dos reforços estruturais analisados

TIPO	VANTAGENS	DESVANTAGENS (Continua)
Chapas e perfis metálicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Execução rápida e simples, ideal para situações emergenciais e imediatas de estabilidade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Visibilidade do elemento danificado pode ficar prejudicada após execução do reforço, exigindo inspeção e manutenção periódicas.</li> </ul>
Protensão externa	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inspeção do reforço (cabos e elemento de concreto) ao longo da vida útil;</li> <li>• Redução do uso de concreto pela não necessidade de aumento exagerado da seção;</li> <li>• Permite resolver problemas de vários tipos de esforços solicitantes (momento fletor positivo e</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de equipamentos especializados (máquina de protensão) e controle dos valores de protensão;</li> <li>• Mão de obra especializada;</li> <li>• Vulnerabilidade à ação do fogo, da corrosão eletroquímica, colisões/choques e atos de vandalismo;</li> </ul>

(Conclusão)

TIPO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
	negativo, além de esforço cortante, pela inclinação dos cabos); <ul style="list-style-type: none"> <li>Baixo acréscimo de peso à estrutura.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Problemas para o uso em estruturas com baixa resistência à compressão, devido à introdução de força normal pela protensão.</li> </ul>
Aumento de seção com concreto e armadura de aço	<ul style="list-style-type: none"> <li>Materiais de uso comum e fácil acesso;</li> <li>Técnica comum em canteiro de obra e com tecnologia dominada pelo mercado de trabalho;</li> <li>Apesar do aumento da seção, existe possibilidade, através do uso de concreto de alto desempenho, de reduzir esse aumento, permitindo redução da área de armaduras ou eventualmente a sua dispensa;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Interferência arquitetônica devido aumento da seção;</li> <li>Necessário cuidado com a aderência entre camadas;</li> <li>Interrupção parcial ou total do uso da estrutura para a execução do reforço e ganho de resistência.</li> </ul>
Materiais compósitos (PRF)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Baixo peso específico;</li> <li>Versátil: cada tipo de fibra pode ser aplicado a um tipo de estrutura ou situação de carregamento;</li> <li>Apresenta produtos em vários formatos;</li> <li>Boas características de resistência à tração, módulo de elasticidade, impacto e resistente a ação dos agentes ambientais agressivos;</li> <li>Facilidade e rapidez de execução;</li> <li>Manutenção das dimensões originais do elemento estrutural.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dependendo da fibra usada, pode ter custo elevado;</li> <li>Perda de resistência na presença de água;</li> <li>Necessário ancoragem suficiente;</li> <li>Perde de desempenho significativo em altas temperaturas.</li> </ul>

Fonte: elaborado pelo autor

Vale ressaltar que todos os métodos apresentam características comuns e essenciais para o sucesso da aplicação do reforço, seja na escolha da metodologia, elaboração do projeto ou aplicação da técnica, a citar: a sinalização do local e das suas adjacências; plano de escoramento condizente com as cargas atuantes e considerando uma eventual redistribuição de esforços; limpeza da superfície degradada; análise do concreto e armaduras da região danificada; aplicação coerente do material de reforço, priorizando a aderência entre o material de reforço e o substrato da superfície degradada, através da correta preparação da superfície; realização de monitoramento do sistema escolhido e definição dos períodos de manutenção necessários.

### 2.3 MATERIAIS COMPÓSITOS

Após indicar as questões iniciais acerca das Patologias das Estruturas e entender de forma simplificada quais são as análises e processos de uma estrutura em estudo, compreende-se qual deve ser o caminho percorrido até chegar à conclusão da necessidade de reforço estrutural. Assim, o desenvolvimento da pesquisa segue com o objetivo estudar o comportamento do reforço do tipo Polímeros Reforçados por Fibras (PRF) em vigas de concreto

armado submetidas a esforços de flexão. Os tópicos a seguir tem a função de apresentar definições, classificações e características intrínsecas a essa metodologia de reforço.

### 2.3.1 Definição

O termo “material compósito” ou simplesmente “compósito” é amplamente utilizado em diversas áreas do conhecimento. Por não ser uma terminologia exclusiva da Engenharia Civil pode ter seu sentido genérico definido como um material composto por duas ou mais fases, sendo de diferentes propriedades químicas e físicas.

Especificamente para a área da Engenharia, a terminologia pode ser entendida como um material constituído de duas fases combinadas (multifásicos), artificialmente construídas em uma escala macroscópica (matriz, fibra, partículas e outros), cujas propriedades dependem do tipo, quantidade e arranjo dos materiais que o compõem e que tem seu desempenho final superior, ou diferente, do apresentado pelos materiais que fazem parte da sua composição, quando analisados individualmente antes da mistura, Callister (2007).

Dessa forma, os compósitos nada mais são do que o produto da mistura de dois grupos de materiais, chamados “Matriz” e “Elemento de Reforço”, cada um com suas funções específicas e que juntos constituem o produto final, denominado “Compósito”, observado na Figura 4, em que são atribuídas funções e características de cada parte do compósito.

Figura 4 – Formação do Material Compósito

MATRIZ	+	ELEMENTO DE REFORÇO	=	MATERIAL COMPÓSITO
> Responsável pela união entre as fibras que formam o compósito e pela transferência de esforços		>> Responsável pelas propriedades mecânicas do compósito (elevada resistência e módulo de elasticidade)		>>> Atuação conjunta
> Garante proteção contra ataque de agentes agressivos do meio ambiente e de danos causados pelo uso		>> Realça algumas propriedades desejadas		>>> Resultado da mistura dos dois grupos
> Confere a estrutura do compósito e mantém as fibras posicionadas corretamente		>> Garante as propriedades químicas e físicas do compósito		>>> Não há dissolução dos materiais componentes da mistura
> Preenche os espaços vazios que se estabelecem entre os materiais de reforço				

Fonte: elaborada pelo autor

Variações do tipo de matriz e do tipo, forma, direção e concentração de elemento de reforço, podem proporcionar materiais compósitos diferentes, tornando-os mais ou menos recomendados a determinados tipos de uso. Porém, em todos os casos de materiais compósitos, a formação é a mesma e a funcionalidade se conserva: a “Matriz” sempre terá a função de

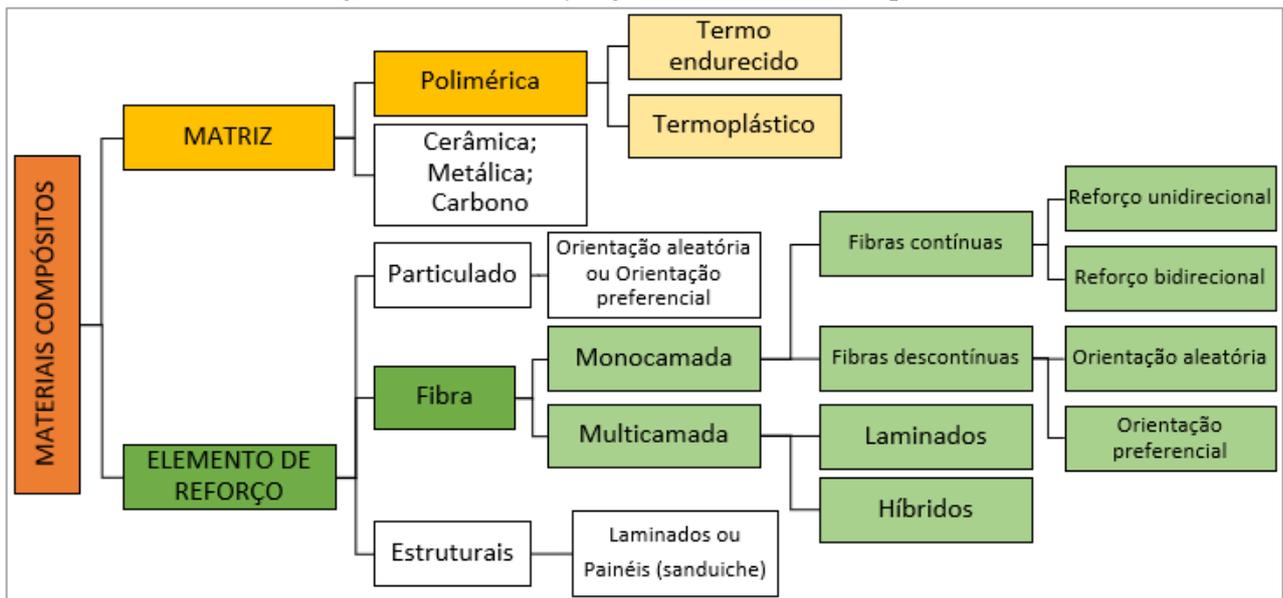
manter o elemento de reforço que a compõem coeso, propiciando a transferência das tensões de cisalhamento entre os dois grupos, enquanto que o “Elemento Estrutural” permanece dentro da matriz absorvendo as tensões de tração decorrentes dos esforços solicitantes atuantes, logo responsável pela resistência mecânica do sistema.

O compósito, apesar de ser formado pela mistura de diferentes materiais que atuam de forma conjunta, mantém suas identidades individuais, ou seja, não se dissolvem ou se transformam completamente em outros materiais e, portanto, podem ser facilmente identificados. O concreto é um dos compósitos mais conhecidos na Engenharia Civil e retratam o fato abordado: é constituído de duas fases distintas, o agregado (miúdo e graúdo) e a pasta de cimento, representando o elemento de reforço e a matriz, respectivamente.

### 2.3.2 Classificação

A matriz e o elemento de reforço, que compõem o material compósito, possuem subdivisões e classificações específicas, como pode ser observado na Figura 5. Para o primeiro grupo, a divisão refere-se aos diferentes tipos de matriz, já no segundo grupo, a divisão refere-se ao arranjo geométrico e geometria dos tipos de elementos de reforço.

Figura 5 – Classificação geral dos materiais compósitos



Fonte: elaborada pelo autor

No grupo dos Elementos de Reforço, os “compósitos particulados” são caracterizados por serem partículas com diversos formatos e tamanhos, não fibrosos, granulares e dispersos aleatoriamente na matriz. Podem ser considerados “quase homogêneos” em relação a uma escala maior do que o tamanho médio das partículas e devido à aleatoriedade da distribuição

das partículas, esse grupo de compósitos pode ser considerado “quase isotrópico”, como por exemplo, o concreto. Segundo Meneghetti (2007), a incorporação do reforço particulado na matriz causa modificações variadas nas propriedades do material resultando em termos de condutividade térmica e elétrica, melhora do desempenho em elevadas temperaturas, redução do atrito, aumento da resistência à abrasão, melhora da trabalhabilidade, aumento da dureza superficial e redução da retração.

Nos Elementos de Reforço constituídos por fibras, o objetivo da atuação do elemento como reforço é a tração. Inúmeras fibras são usadas para formar os compósitos empregados na Engenharia Civil, dividindo-as em quatro grupos: fibras naturais (de origem mineral, vegetal ou animal), fibras cerâmicas, metálicas e fibras sintéticas (como por exemplo, de carbono, vidro e aramida). As fibras podem ter sua classificação dividida entre contínuas e descontínuas:

- a) Fibra descontínua: são compostas por fibras curtas como reforço. Entende-se como fibras curtas aquelas de comprimento menor, comparado a dimensão do seu diâmetro. A orientação das fibras pode ser aleatória ou unidirecional e geralmente são utilizadas em aplicações de baixas solicitações mecânicas. Devido à aleatoriedade da distribuição das fibras, os compósitos com fibras descontínuas com orientação aleatória podem ser considerados “quase isotrópicos”.
- b) Fibras contínuas: são compostas por fibras longas. Entende-se como fibras longas aquelas de comprimento maior, comparado a dimensão do seu diâmetro. A orientação das fibras pode ser unidirecional, bidirecional ou multidirecional. A utilização ocorre em lugares onde se requer alta rigidez e resistência.

No grupo da Matriz, existem diferentes tipos desse material, como polimérica, cerâmica, metálica e carbono, sendo que este trabalho irá se concentrar aos estudos das matrizes poliméricas, uma vez que as outras possuem aplicações restritas na Engenharia Civil.

A matriz polimérica subdivide-se em “termo-endurecido” (ou termorrígido) e “termoplástico”, diferenciando-se devido seu comportamento à altas temperaturas. Além disso, a região da interface entre os dois grupos - Matriz e Elemento de Reforço - é um importante objeto de pesquisas, pois tal região interfere nas propriedades mecânicas do compósito. A boa interface, dado pelo resultado da compatibilidade química entre as fases, é essencial para as características finais do compósito, como a resistência e rigidez.

### 2.3.3 Materiais compósitos do Tipo Polímeros Reforçados com Fibras

Os Polímeros Reforçados com Fibras (PRF) ou “*Fiber Reinforced Polymer*” (FRP), são utilizados há várias décadas, porém em indústrias diferentes da construção civil, como a

aeroespacial, automotiva, naval e de armamentos, que aplicam tais materiais com desempenho e características diferentes as necessárias para a Engenharia Civil. De acordo com Meneghetti (2007), as primeiras aplicações deste material na área da Engenharia Civil ocorreram apenas em 1984, no EMPA, Laboratório Federal Suíço de Pesquisas e Testes de Materiais, através de ensaios de vigas de concreto armado reforçadas com PRF à base de fibra de carbono, com o intuito de comparar a metodologia de reforço de chapas metálicas coladas.

Nesse contexto, muitos estudos foram desenvolvidos nas últimas décadas, buscando entender o comportamento dos materiais compósitos e mais especificamente dos PRF, a fim de aprofundar as suas características, vantagens, aplicabilidades, limitações e pontos negativos ou melhorados. Tais estudos permitiram a elaboração de diversas publicações na literatura, além da elaboração de normas técnicas, como as relacionadas ao grupo de pesquisa da *American Concrete Institute* (ACI) 440, que tem a ACI 440.2R – *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures* (2017); a *Federation Internationale du Béton* FIB - Bulletin n°14 (2001) e as recentes Normas Brasileiras. Estas começam a surgir no cenário nacional com os primeiros documentos e recomendações sobre o uso de fibras na construção, mas sem documentos regulamentando o reforço estrutural com PRF, como se observa, até a conclusão deste trabalho, na NBR 16935 (ABNT, 2021); NBR 16938 (ABNT, 2021); NBR 16939 (ABNT, 2021); NBR 16940 (ABNT, 2021); NBR 16941 (ABNT, 2021); NBR 16942 (ABNT, 2021).

Embora seja crescente a necessidade de reforçar as estruturas em âmbito nacional, pode-se dizer que no Brasil os reforços do tipo PRF são, atualmente, executados com base em estudos experimentais, recomendações e especificações do fabricante, em relatórios de obras já executadas e nas normas estrangeiras. Esta última é avaliada com cuidado, pois as condições em tais normas revelam as características existentes do país de origem, no que diz respeito a produtos, ambientes, fabricantes, matéria prima e outros fatores, o que causa adaptações de critérios para atender as condições regionais e realizar o dimensionamento, execução e acompanhamento do sistema de reforço com PRF de forma eficiente.

Os materiais compósitos do tipo PRF podem ser do tipo “fios”; “mantas”; “tecidos” ou “laminados” e são descritos a seguir, de acordo com Beber (2003):

- a) Fios: indicam o sistema simples de feixes de fibra, dispostas paralelamente, sendo unidirecionais;
- b) Mantas: são flexíveis ou pré-impregnadas. São entendidas como um sistema de agrupamento de fibras, que ocorre através do posicionamento de feixes contínuos e

paralelos (unidirecionais) sobre uma rede simples de proteção e/ou com espelhamento de uma resina de pré-impregnação;

- c) Tecidos: representam a forma geral dos sistemas de agrupamento de fibras em um reforço, através do posicionamento em forma de fios contínuos tecidos por processo têxtil convencional (uni, bi ou multidirecional), de *woven roving* (bidirecional) ou de *mat* (multidirecional). Pode apresentar-se seco ou pré-impregnado, no estado final;
- d) Laminados: material pré-fabricado, através da impregnação de um conjunto de feixes ou camadas contínuas de fibras (sistema unidirecional) por uma resina termorrígida, consolidado por um processo de pultrusão e com controle de forma do compósito através da espessura e largura.

#### 2.3.3.1 Matriz do tipo Polimérica

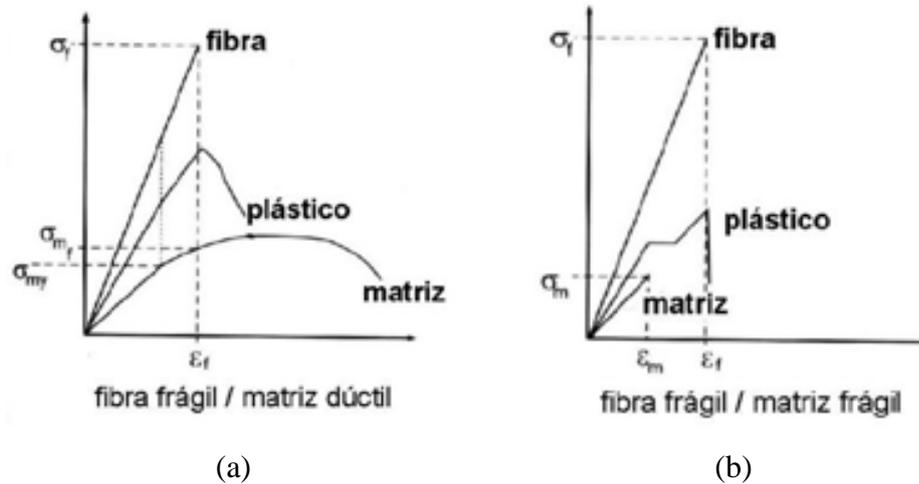
A nível molecular, a matriz do tipo polimérica pode ser entendida como sendo macromoléculas constituídas por unidades menores, denominadas de monômeros. Portanto, as moléculas dos polímeros se originam através da ligação de várias unidades de moléculas pequenas (no caso os monômeros) e que se repetem, formando a macromolécula. De acordo com Callister (2007), a matriz que envolve as fibras de um compósito pode ser chamada de resina impregnante ou, simplesmente, resina.

Em um sistema de reforço do tipo PRF, o compósito recebe os esforços solicitantes da estrutura, porém apenas uma pequena parcela dos esforços que são destinados ao reforço, é suportada pela matriz polimérica, já que esta função é de responsabilidade das fibras, dentro do contexto de "material compósito". Segundo Beber (2003), isso é garantido pelas características da fibra e da matriz, pois quando uma carga incide em um compósito constituído por uma **matriz** de baixo módulo de elasticidade e baixa resistência à tração, reforçada com **fibras** de alta resistência à tração e alto módulo de elasticidade, a matriz polimérica, sob tensão, transfere a carga para as fibras. Tais particularidades resultam em um material de alta resistência e alto módulo, o que determina a rigidez e a resistência do compósito. A matriz polimérica do tipo resina epoxídica é a mais utilizada e encontrada nas pesquisas acadêmicas devido as suas características ideais, de módulo de elasticidade (2,5 a 4,1 GPa) e resistência à tração (55 a 130 MPa), Beber (2003).

Quando o compósito está instalado sob as cargas solicitantes da estrutura, a matriz polimérica tem que ter, necessariamente, um alongamento de ruptura muito maior do que o alongamento que ocorre na fibra (elemento estrutural), afim de permitir que a matriz continue a possuir capacidade de carga mesmo após a tensão na fibra ter atingido a sua tensão de ruptura,

ou seja o limite de resistência, Machado (2010). Ainda, segundo o autor, os sistemas compósitos com fibras devem trabalhar segundo critério “fibra com ruptura frágil” e matriz polimérica com “ruptura dúctil”, conforme indicado na Figura 6a, representado pelo gráfico tensão x deformação dos elementos. Dessa maneira, fica descartada a possibilidade de que o compósito entre em colapso pela ruptura frágil da matriz, como indicado na Figura 6b.

Figura 6 – Diagrama tensão x deformação para matrizes poliméricas



Fonte: Machado (2010)

No contexto dos reforços estruturais utilizando PRF, de acordo com Beber (2003), pode-se dizer que os polímeros termorrígidos (resinas termorrígidas) são ideais, em relação as resinas termoplásticas, para a confecção dos compósitos PRF devido a boa estabilidade térmica e dimensional; boa resistência química; baixa fluência (baixa viscosidade), sendo um excelente aspecto para orientação de fibras; material de fácil manuseio e processabilidade.

As resinas epoxídicas (ou epóxi) são as mais utilizadas em reforço e recuperação de estruturas de concreto, pois apresentam excelentes propriedades de aderência a diversos tipos de fibras e substratos, são resistentes a ações químicas, tem elevada durabilidade, baixa retração durante a cura, alta resistência à tração e resistência a grandes variações de temperatura (-40°C à +50°C).

### 2.3.3.2 Elemento reforço do tipo Fibras

As fibras são um dos principais materiais utilizados como “Elemento de Reforço” aplicados a estruturas de concreto armado dentro do contexto dos Materiais Compósitos, por apresentarem características mecânicas que favorecem a sua utilização, além de questões como boa trabalhabilidade, manuseio e produção das fibras. Segundo Beber (2003), entende-se fibra como um material filamentar, cuja razão entre o comprimento e diâmetro do material seja na

ordem de, no mínimo, 100 vezes. Embora não haja restrições quanto a um valor para o diâmetro mínimo, recomenda-se que o máximo diâmetro não seja superior a 0,25 milímetros.

Como descrito anteriormente, as fibras são as responsáveis por garantirem o acréscimo de resistência ao elemento estrutural. Assim, a partir da combinação de um material fibroso de alta resistência à tração e alto módulo de elasticidade, com um material (matriz) de baixo módulo de elasticidade e baixa resistência, como descrito por Beber (2003), forma-se um compósito que consegue transmitir os esforços solicitantes às fibras, garantindo acréscimo de esforços resistentes para a estrutura, cumprindo o objetivo do reforço.

Existem diversos tipos de fibras que podem ser utilizados como Elemento de Reforço nos materiais compósitos. Cada uma delas tem características e aplicações mais (ou menos) recomendadas para os tipos de manifestação patológica ou o contexto estrutural existente (sistema construtivo, cargas atuantes e outros fatores). Ainda podem ser oferecidos pelos fabricantes através de diversos formatos, como por exemplo, em laminados, barras, mantas pré-impregnadas, tecidos e outros, que podem influenciar na aplicação no substrato danificado.

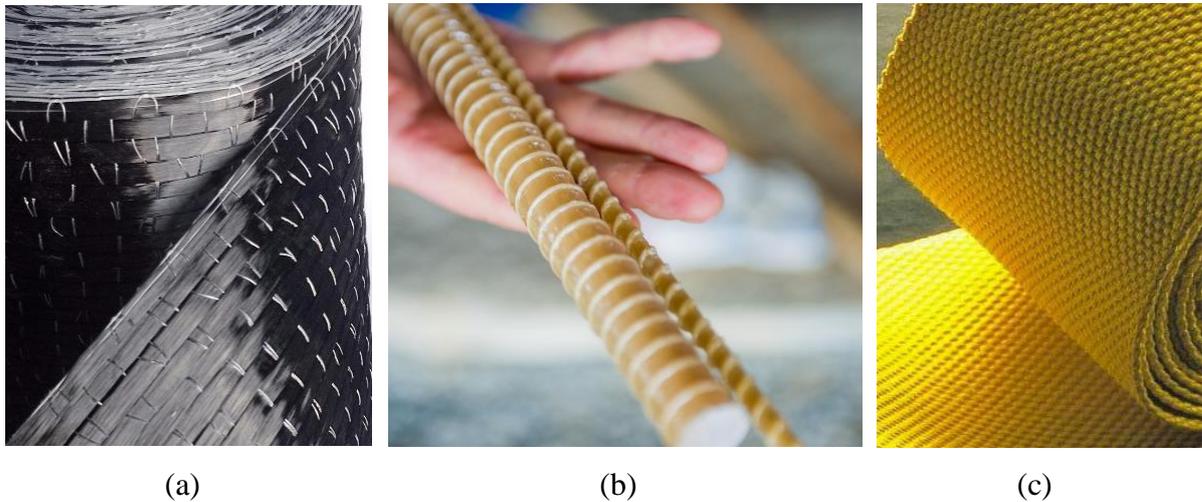
A construção das fibras representa o alinhamento das moléculas do material, pois quanto melhor a atração intermolecular, fruto de um alto grau de alinhamento, maior será o alcance de altas resistências à tração do material. Assim, o módulo de elasticidade é um parâmetro fundamental para medir a característica das fibras, Beber (2003).

Hollaway (1993), indica as principais características das fibras, de forma genérica, utilizadas na fabricação dos compósitos são:

- a) Elevada resistência e módulo de elasticidade;
- b) Pequena variação de resistência entre fibras individuais;
- c) Estabilidade e capacidade de manter suas propriedades ao longo do processo de fabricação e manuseio;
- d) Uniformidade de seus diâmetros e superfícies.

Os principais tipos de fibra encontrados, atualmente, no mercado e objeto das pesquisas tecno-científicas na comunidade acadêmica são as fibras de vidro (GFRP – *Glass Fiber Reinforced Polymer*), carbono (CFRP – *Carbon Fiber Reinforced Polymer*) e aramida (AFRP – *Aramid Fiber Reinforced Polymer*). Na Figura 7 observa-se a representação dos tipos de fibra que terão suas características e particularidades discutidos ao longo do trabalho.

Figura 7 – Representação dos tipos de fibra existentes no mercado e estudados: a) manta fibra de carbono; (b) barra de fibra de vidro; (c) manta de fibra de aramida



Fonte: (a) Archiproducts (2022); (b) Composite Group (2022); (c) Dynatch (2022)

#### a) Fibras de Vidro

São obtidas a partir da fundição de minerais moídos, como areia, caulim, calcita, colemanita e outros, formando diversos tipos de fibras de vidro, possuindo a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) como componente primário em comum.

Dentre as principais características gerais, pode-se destacar: excelentes propriedades mecânicas de flexibilidade, maleabilidade, resistência ao impacto, resistência à tração; não enferrujamento ou oxidação; baixa densidade (material leve); baixo coeficiente de dilatação térmica; facilidade de processamento; baixo custo, quando comparada às outras fibras de reforço de alto desempenho; baixa condutividade elétrica, térmica, resistente ao fogo e aos agentes químicos; material versátil devido à grande facilidade de aquisição e manuseio e excelente relação custo/benefício, permite a construção de peças de forma rápida e eficiente. Entretanto é caracterizado por ter baixo módulo de elasticidade, baixa resistência à abrasão e de difícil adesão à matriz polimérica quando está na presença de umidade.

#### b) Fibras de Carbono

A composição da fibra de carbono é dada por uma mistura de carbono nas formas amorfa e cristalina, tornando-se um material característico pela força das ligações carbono-carbono e pela leveza do átomo de carbono, Garcez (2007).

Os polímeros reforçados que utilizam fibras de carbono como elemento de reforço apresentam as seguintes características, segundo Machado (2010): bom comportamento à

fadiga e a atuação de cargas cíclicas; elevada resistência a ataques químicos; não sofre corrosão por ser um material inerte; possui leveza devido ao seu baixo peso específico (cerca de cinco vezes menor do que o do aço estrutural); antimagnetismo, possibilitando atuar em locais específicos; estabilidade reológica (relacionado a elasticidade, viscosidade e plasticidade); elevada resistência mecânica e rigidez.

Machado (2010) indica como limitações ao uso do PRF de fibra de carbono a baixa resistência ao fogo, comportamento linear-elástico até a ruptura e alto custo comparado às demais técnicas de reforço. Beber (2003), afirma que o alto módulo de elasticidade e a alta resistência, dependem do grau de orientação das fibras, ou seja, do paralelismo entre os eixos das fibras, decorrente de aplicações específicas dos métodos de fabricação.

#### c) Fibras de Aramida

A fibra de aramida é a denominação genérica para as “Poliamidas Aromáticas”, sendo uma fibra sintética, logo não biodegradável, obtida a partir de nylons aromáticos, com as moléculas formando cadeias longas e altamente orientadas ao longo do eixo. Ressalta-se que esse tipo de fibra é fabricado a partir de processos e recursos não renováveis.

Algumas características que tornam o material atrativo são descritas a seguir, de acordo com Beber (2003): baixa densidade devido as altas propriedades específicas; resistência ao impacto; alta resistência à tração; módulo de elasticidade, variando entre 60 GPa a 120 GPa, porém com comportamento de ruptura dúctil, em lugar da ruptura frágil característico das fibras de carbono; boas características à abrasão e a corrosão; boas características térmicas, sendo mais resistentes ao fogo do que as fibras de carbono e vidro, com decomposição em temperaturas na ordem de 427°C a 482°C; elevada tenacidade, o que contribui para o seu excelente desempenho em situações de impacto de veículos e cargas.

#### d) Reforço Híbrido

O Reforço Híbrido tem como objetivo combinar propriedades das fibras tornando o reforço polimérico mais eficientes para determinados tipos específicos de uso. Tal necessidade decorre de desvantagens específicas no uso como o reforço dos PRF comuns (vidro, carbono e aramida) para combater os esforços de flexão e cisalhamento.

De acordo com Meneghetti (2007), uma das principais desvantagens do uso de PRF e que estimula a adoção de reforço híbridos, está relacionado ao comportamento frágil na ruptura dos sistemas compósitos, não indicando nenhum patamar de escoamento ou outro sinal de falha

iminente. Tal comportamento pode ser modificado com a adoção de tecidos ou mantas híbridas, formados por diferentes tipos de fibras.

Nos itens apresentados anteriormente, observam-se as características e propriedades gerais das fibras de vidro, carbono e aramida. A utilização de uma fibra em detrimento da outra deve ser analisada pelos critérios de custo de produção e benefícios estruturais (as características físico-mecânicas devem ser favoráveis ao tipo de uso considerado), propiciando definir qual fibra é mais adequada ao tipo de finalidade desejada.

A Tabela 1 a seguir indica um resumo dos valores característicos das fibras estudadas neste trabalho e que formam os materiais compósitos do tipo PRF, aplicados como reforço em elementos de concreto armado.

Tabela 1 – Propriedades das fibras de Carbono, Vidro e Aramida

Fibra	Característica	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistencia à Tração (GPa)	Deformação Última (%)
Carbono	Uso Geral	220 – 240	2,05 – 3,79	1,2
	Resistência Elevada	220 – 240	3,79 – 4,82	1,4
	Resistência Ultra-Elevada	220 – 240	4,82 – 6,20	1,5
	Módulo Elevado	340 – 520	1,72 – 3,10	0,5
	Módulo Ultra-Elevado	520 – 690	1,38 – 2,40	0,2
Aramida	Uso Geral	69 – 83	3,44 – 4,14	2,5
	Elevada Performance	110 – 124	3,44 – 4,14	1,6
Vidro	Vidro – E	69 – 72	1,86 – 2,68	4,5
	Vidro – S	86 – 90	3,44 – 4,14	5,4

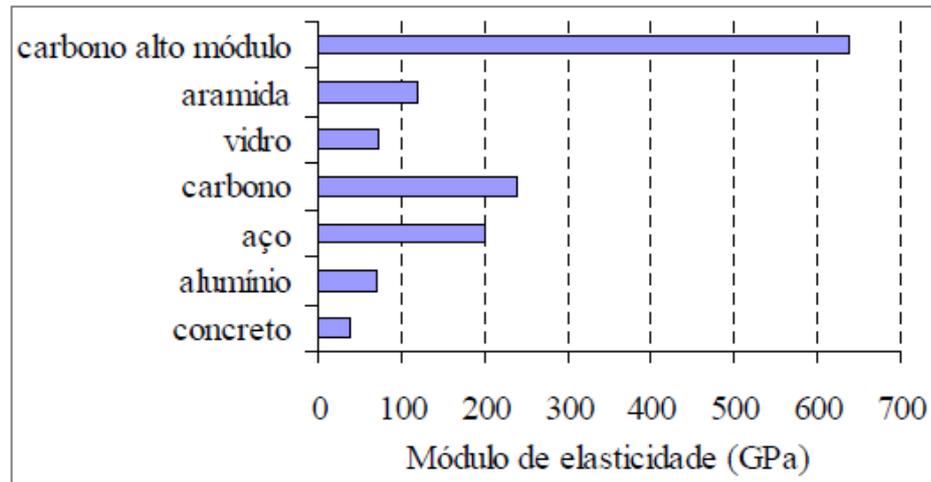
Fonte: ACI 440.2R (2017)

Da Tabela 1 acima são extraídas informações importantes, tais como: as fibras de **carbono** apresentam módulo de elasticidade mais elevados; enquanto que as fibras de **aramida** intermediário em relação ao fibras de vidro e carbono. Logo as fibras de **vidro** são as mais inferiores, além de terem tendência a serem mais deformáveis que as fibras de carbono e aramida, restringindo sua utilização em certas aplicações.

O módulo de elasticidade do compósito não depende apenas das características da fibra, pois é o resultado da soma dos módulos de elasticidade da matriz e da fibra, relacionados pelos respectivos volumes de cada material e, portanto, varia em função dos elementos utilizados para compor o compósito. Na Figura 8, Meneghetti (2007) compara os módulos de elasticidade do concreto, alumínio e aço com as fibras de carbono, vidro e aramida, permitindo entender o

comportamento dessas fibras aos materiais usualmente conhecidos e largamente utilizados na construção civil.

Figura 8 – Comparação dos valores de Módulo de Elasticidade de diferentes materiais

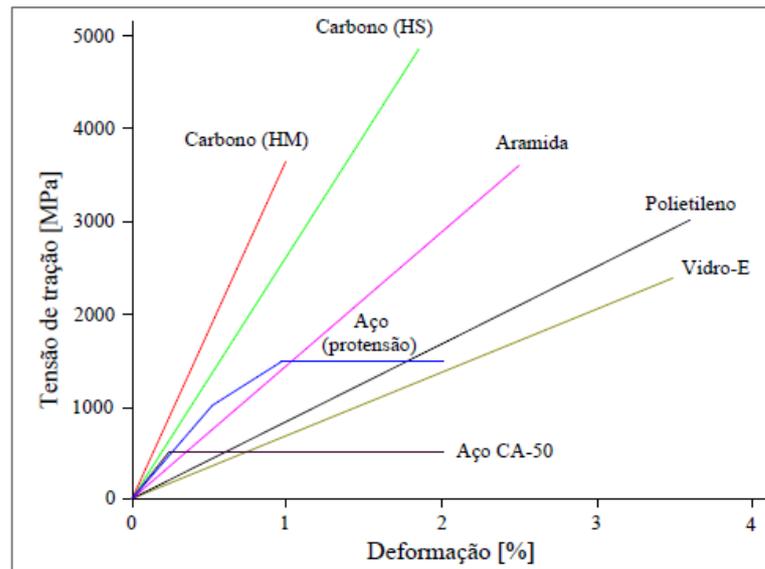


Fonte: Meneghetti (2007)

Da figura acima, observa-se que todos os tipos de compósitos formados com fibras apresentam módulo de elasticidade maior do que o do concreto e alumínio. Além disso, fica visualmente fácil de perceber que o módulo de elasticidade da fibra de carbono é o único que supera o do aço, que em geral tem valor de 210 GPa. Assim, é possível concluir que a aplicação de reforços usando a metodologia de materiais compósitos em estruturas de aço, a princípio é menos vantajosa, eficiente e economicamente viável, comparativamente a elementos estruturais do tipo concreto e alumínio.

A Figura 9 indica outro importante comportamento para critérios estruturais, a relação Tensão x Deformação dos materiais. Observa-se o comportamento das fibras de vidro, carbono e aramida em relação a outros materiais, como aço e polietileno.

Figura 9 – Relação tensão x deformação típica para aço e fibras



Fonte: Meneghetti (2007)

Da figura acima observa-se que todos os tipos de fibras apresentam o mesmo comportamento linear-elástico de Tensão x Deformação até a ruptura, o que não é ideal, principalmente no que diz respeito à segurança estrutural e dos usuários. Ainda é possível observar o contraste do comportamento frágil dos PRF e dúctil do aço, o que leva a dois pontos de importância discussão, Teng et al. (2002):

- a) Como as fibras não possuem a ductilidade do aço, a sua “fragilidade” pode influenciar e limitar o comportamento dúctil dos elementos de concreto reforçados com PRF. Porém, tais fibras podem aumentar consideravelmente a resistência e a ductilidade, por exemplo, quando usados confinados em pilares;
- b) Suas características indicam que a capacidade de redistribuição de tensões é restrita, decorrência da falta de ductilidade. A consequência desse fato, se traduz no dimensionamento de estruturas reforçadas com PRF colados externamente, pois estes não poderão seguir os parâmetros tradicionais de cálculo de estruturas de concreto armado: a contribuição do compósito é tratada de forma equivalente à do aço, ajustando-se para as diferenças de módulo de elasticidade, seção transversal e deformações.

A escolha do melhor tipo de fibra a ser utilizada em reforços de estruturas de concreto armado agrega inúmeras variáveis e cabíveis de contextos e discussões. Garcez (2007), apresenta uma avaliação comparativa e qualitativa das fibras em estudo, para aplicações em reforço estrutural de concreto armado, com o intuito de classificá-las de forma geral a partir de suas propriedades, utilizando critérios mecânicos, físicos e de durabilidade, atribuindo níveis de significância para cada um deles. Apesar de ser uma avaliação qualitativa e subjetiva, as

comparações apresentadas indicam que as fibras de vidro, carbono e aramida possuem características necessárias para reforços em estruturas de concreto armado, como por exemplo na recuperação de vigas subarmadas ou corroídas. Também indicam maior relevância para as fibras de carbono em comparação com as de vidro e aramida, devido as suas propriedades. Entretanto, a escolha da fibra deve levar também em consideração o ambiente em que o reforço será exposto, as características e magnitudes das cargas atuantes na estrutura e custos totais de cada sistema, a fim de escolher o material mais eficiente ao contexto.

## 2.4 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS DO TIPO PRF

Os materiais compósitos são definidos como a junção de dois ou mais materiais, formando um novo produto com características distintas, como discutido anteriormente. Cada um dos materiais (matriz e elemento de reforço) a serem usados na mistura apresentam suas propriedades e característica específicas, sendo importante entender quais serão as características dos produtos finais da mistura, ou seja, dos compósitos propriamente dito, além de entender como e quanto de cada tipo de material contribui para as propriedades finais do compósito. A seguir estudam-se as propriedades físicas e mecânicas dos materiais PRF.

### 2.4.1 Regra da Mistura

As propriedades mecânicas básicas dos compósitos reforçados com fibras podem ser estimadas numericamente através da “Regra da Mistura” em que cada fase do compósito contribui para as suas propriedades efetivas, sendo que essa contribuição dependente apenas da fração volumétrica dos constituintes. Tal regra é sugerida pela FIB (2001) e permite auxiliar na visualização de possíveis resultados numéricos das propriedades dos compósitos, porém devendo sempre ser comprovada experimentalmente, através de ensaios técnicos especificados em normas vigentes.

Os modelos de Voight e de Reuss, são os dois modelos mais conhecidos e que partem de premissas diferentes para as suas formulações. Os dois modelos relacionam o módulo de elasticidade do compósito com as propriedades físicas dos elementos individuais através de equações que objetivam uma aproximação do comportamento dos compósitos reforçados por fibras, partindo de premissas pré-estabelecidas.

Medeiros et al. (2014) discutem acerca da regra da mistura, indicando matematicamente o comportamento gráfico do Módulo efetivo x Fração volumétrica da inclusão (fibra) para os

modelos de Voigt e Reuss concluindo que o modelo de Voigt é o limite superior e o modelo de Reuss o limite inferior das propriedades determinadas numericamente, entretanto não garante com eficácia o resultado real da análise, o que converge ao apresentado por Meneghetti (2007) e recomendado pela FIB (2001). Além disso, segundo os autores, a regra da mistura se torna representativa das propriedades dos compósitos, quando o módulo de elasticidade da inclusão é poucas vezes maior que o módulo de elasticidade da matriz, o que vai de encontro com a definição de compósito. A Tabela 2, retirado de Meneghetti (2007), indica comparações das propriedades dos compósitos formados por fibras, utilizando as equações numéricas do Modelo de Voigt.

Tabela 2 – Exemplo numérico das propriedades do compósito pela variável “volume das fibras”

Área da Seção Transversal			Propriedades Estimadas do Compósito				Carga Estimada de Ruptura	
$A_{fib}$ (mm <sup>2</sup> )	$A_m$ (mm <sup>2</sup> )	$A_{tot}$ (mm <sup>2</sup> )	$V_{fib}$ (%)	$E_{fib}$ (MPa)	$\sigma_{fib}$ (MPa)	Deformação máxima (%)	(kN)	(%)
70	0	70	100	220.000	4.000	1,818	280,0	100,0
70	30	100	70	154.900	2.824	1,823	282,4	100,9
70	70	140	50	111.500	2.040	1,830	285,6	102,0

Onde:  $E_{fib} = 220\text{GPa}$ ;  $E_m = 3\text{MPa}$ ;  $\sigma_{fib} = 4.000\text{MPa}$  e  $\sigma_{mat} = 80\text{MPa}$

Fonte: adaptado de Meneghetti (2007)

Da tabela acima, observa-se que as propriedades de rigidez e resistência dos compósitos, determinadas através do modelo numérico de Voigt para diferentes configurações de frações volumétricas de fibras, derivam das propriedades e da área da seção transversal das fibras, ou seja, do “elemento de reforço”. Isso pode ser justificado pelo fato de que a rigidez e resistência das fibras serem muito maiores do que de tais parâmetros na matriz.

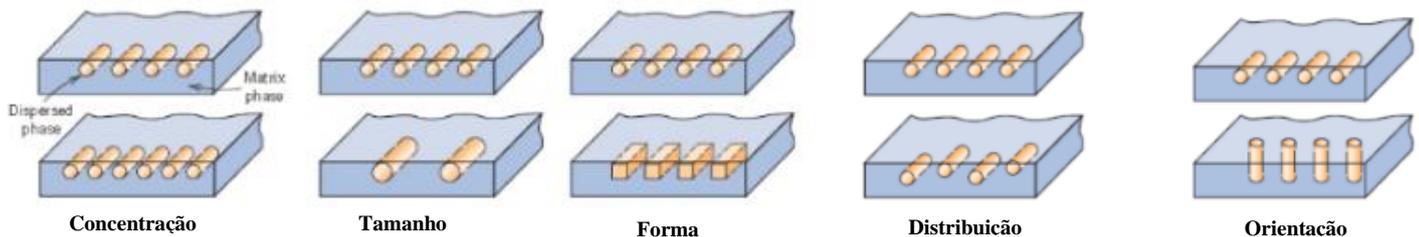
Os compósitos de tipo PRF podem ser fabricados de diversos formatos, assim, como as propriedades são definidas pela área da seção transversal, no caso dos laminados pré-fabricados, esses dados são normalmente fornecidos pelos fabricantes, o que não ocorre em sistemas curados *in situ*, em que a espessura final do compósito e a fração volumétrica das fibras são difíceis de serem determinadas devido sua possibilidade de variação ao longo da sua aplicação, dificultando o uso de equações numéricas para o cálculo das propriedades do compósito. Dessa forma, os valores das propriedades dos compósitos só serão confiáveis, principalmente em sistemas curados *in situ*, através de ensaios específicos, ou seja, o comportamento real da interação fibra-matriz deve ser efetivado através de ensaios de tração com o intuito de considerar importantes efeitos reais e específicos do conjunto.

#### 2.4.2 Parâmetros de influência nas propriedades do Polímeros Reforçados com Fibras (PRF)

A utilização dos Polímeros Reforçados por Fibras (PRF) com finalidade de reforço estrutural é benéfica em diversos aspectos. É fundamental a importância do reconhecimento das características, particularidades e propriedades físicas e mecânicas dos materiais PRF para que a utilização desse tipo de compósito seja a mais precisa ao problema ou situação proposta.

As propriedades físicas e mecânicas dos PRF tem influência no comportamento final e são dependentes dos materiais que o compõem e de suas interações ou ligações. Logo, dependem de parâmetros envolvendo as fibras e a matriz, permitindo a formação de materiais compósitos com características variadas, Callister (2007). Ainda, segundo o autor, alguns desses parâmetros são: tipos de fibra, tipo de matriz; concentração (proporção entre fases); tamanho (comprimento) da fibra; formato das fibras; distribuição das fibras; orientação das fibras na matriz (uni, bi, tridimensional ou aleatória); técnicas de produção e controle de qualidade, adotadas durante o processo de manufatura. A Figura 10 indica a representação gráfica de alguns desses parâmetros.

Figura 10 – Representação das influências que afetam as propriedades dos materiais compósitos



Fonte: adaptado de Callister (2007)

Os materiais compósitos não são homogêneos, portanto, as propriedades apresentadas são fatores que podem modificar a característica final do compósito, permitindo melhores ou piores propriedades a situação que se deseja utilizar. No apêndice do ACI 440.2R (2017), por exemplo, é observada a descrição de algumas propriedades das fibras utilizadas para formar os materiais compósitos, sendo influenciadas pela orientação.

Callister (2007) discute sobre os aspectos de influência da fibra e da matriz na formação dos compósitos. Entre elas, indica que o comprimento da fibra está ligado ao grau de transferência de carga da matriz para as fibras, principalmente em sua extremidade, uma vez que existe um comprimento crítico das fibras para que haja o fortalecimento e enrijecimento efetivo do material compósito. Segundo o autor, tal comprimento é função do diâmetro da fibra, da sua resistência à tração e da resistência de ligação fibra-matriz, logo, à medida que o

comprimento da fibra aumenta, o reforço torna-se mais eficaz. O autor ainda afirma que fibras com comprimento 15 vezes maior do que o comprimento crítico são denominadas como “fibras contínuas”, sendo as “fibras descontínuas” ou “curtas” as que não obedecem a essa relação. Portanto, para concretizar uma significativa resistência no compósito, as fibras devem ser contínuas.

Callister (2007) faz afirmações sobre a orientação das fibras, com dois extremos possíveis: alinhamento paralelo ao eixo longitudinal das fibras em uma única direção; e alinhamento aleatório. As fibras contínuas são normalmente alinhadas, enquanto que as fibras descontínuas podem ser alinhadas, parcialmente orientadas ou de orientação aleatória. Outra influência discutida pelo autor refere-se à distribuição das fibras, afirmando que as melhores propriedades gerais dos materiais compósitos são obtidas quando a distribuição da fibra ocorre de maneira uniforme. Outras discussões e características sobre os parâmetros de influência das propriedades dos materiais compósitos são observadas em Callister (2007).

#### 2.4.3 Propriedades dos Polímeros Reforçados com Fibras (PRF)

Os Polímeros Reforçados com Fibras (PRF), no contexto do uso em reforço de estruturas de concreto armado, têm as suas propriedades físicas e mecânicas estudadas, com o objetivo de entender como o PRF pode se comportar na estrutura e sob determinadas influências. Observa-se na literatura diversas pesquisas sobre as propriedades dos PRF ao longo das últimas décadas. Dessa forma, nos itens a seguir serão apresentados, simplificadamente, as principais propriedades dos materiais de reforço do tipo PRF, devendo ser consultada a literatura específica de tais temas, quando necessário.

##### 2.4.3.1 Resistência à Tração

Os Polímeros Reforçados com Fibras (PRF), empregados como reforço estrutural, são utilizados para resistirem aos esforços de tração atuantes no elemento. De acordo com Garcez (2007), o comportamento de um PRF, sujeito aos esforços de tração, depende das deformações últimas da fibra e da matriz, que são diferentes entre si, além do percentual de volume de fibras existentes no compósito, sendo esses dois fatores influentes no modo de ruptura do PRF. Segundo a autora, na Engenharia Civil é comum utilizar PRF com porcentagem em volume de fibra elevados, na ordem de 60 a 70%, combinada com matrizes que possuem deformações últimas menores que a das fibras, como no caso das resinas epóxi, produzindo falha não crítica na matriz.

A resistência à tração na direção das fibras (longitudinal) é maior do que na direção perpendicular, influenciando no comportamento resistente do PRF. E ainda, quando submetidos à tração, os PRF não apresentam escoamento antes da ruptura, caracterizando um comportamento elástico-linear, até a ruptura, que ocorre de forma brusca e sem aviso prévio, logo uma ruptura frágil, podendo ser catastrófica.

#### 2.4.3.2 Resistência à Compressão

Como descrito no item anterior, os PRF são normalmente usados para resistirem às solicitações de tração existentes na estrutura a ser reforçada, porém podem ser solicitados à esforços de compressão em situações de redistribuição de cargas que eventualmente ocorrem nas estruturas, por diversos motivos, como por intervenções externas, cargas cíclicas e outros. Garcez (2007) afirma que as fibras com boa resistência à compressão permitem produzir materiais compósitos do tipo PRF também com boa resistência à compressão, e ainda, indica que as resistências à compressão axial dos PRF compostos por fibras de carbono, vidro e aramida possuem resistência à compressão de 78%, 55% e 20% da resistência à tração desses materiais compósitos, respectivamente.

#### 2.4.3.3 Módulo de Elasticidade

A escolha do material compósito leva como um dos parâmetros de escolha, o Módulo de Elasticidade do PRF. Garcez (2007) indica que o PRF com elevado módulo de elasticidade, confere aumento de rigidez, como ocorre com o PRF de fibras de carbono, sendo essencial para reforçar estruturas com grandes incrementos de cargas e restrição de deformação ou ainda quando necessário a substituição de armaduras internas, danificadas, por exemplo, por fadiga, corrosão ou outros processos. Ainda, segundo a autora, estruturas que exigem reforço com baixos módulos de elasticidade são aquelas que necessitam de grande deformabilidade (por exemplo, em situações de cargas sísmicas), proporcionando melhora na distribuição de fissuras na superfície do elemento, aumentando a ductilidade da estrutura, porém, sem aumentar a capacidade de carga.

#### 2.4.3.4 Ductilidade

A ductilidade pode ser entendida como a capacidade de um material sofrer deformação plástica, ou seja, de maneira permanente, antes de atingir o ponto de ruptura e sem perda excessiva de resistência. Garcez (2007) recorda que no dimensionamento de elementos de concreto armado à flexão, há o pressuposto de que o aço da armadura longitudinal tracionada

deve escoar antes de que a ruptura do elemento seja atingida, para permitir grandes deformações da estrutura antes do efetivo colapso, resultando em um comportamento dúctil e benéfico a segurança. Porém, o comportamento de um Polímero Reforçado com Fibra (PRF), quanto à ductilidade é diferente do caracterizado pelo aço, logo essa propriedade deve ser revista nas estruturas de concreto armado reforçadas por PRF.

Assim, enquanto o aço atinge o escoamento quando submetido a tensões de tração que causam deformações superiores a 2%, os PRF quando submetidos a esses mesmos tipos de esforços apresentam um comportamento elástico-linear até próximo da tensão última do compósito, causando ruptura brusca, sem patamar de escoamento. Portanto, a diferença de comportamento para essa propriedade no aço e no PRF impede a extensão do conceito tradicional de ductilidade às estruturas de concreto armado reforçadas com PRF.

Garcez (2007) indica estudos com reforços híbridos (PRFH) que objetivam melhorar as características de ductilidade do material compósito, através da combinação e manipulação das direções das fibras. Algumas investigações apontam que PRF produzidos pela combinação de fibras de carbono (elevado módulo de elasticidade) e vidro (baixo módulo de elasticidade) geram materiais com comportamento similar ao do aço, quando submetidos à esforços de tração (gráfico Tensão x Deformação elástico-linear, seguido de patamar de escoamento), ou seja, boas características de ductilidade e aumento na capacidade de carga dos elementos reforçados.

A propriedade da ductilidade das estruturas reforçadas com PRF é um fator de relevância ao objetivo da pesquisa, que busca aumentar o comportamento dúctil desse tipo de reforço com a utilização de mecanismo de incremento de ancoragem. Assim, essa propriedade será discutida com mais detalhes ao longo do trabalho.

#### 2.4.3.5 Outras propriedades

Existem ainda uma série de propriedades que caracterizam os Polímeros Reforçados com Fibras (PRF), entre elas: rigidez, fadiga, fluência, durabilidade (relacionados a radiação ultravioleta; resistência à umidade; elevadas temperaturas; corrosão; resistência a álcalis e ciclos gelo-degelo), resistência ao impacto, propriedades elétricas e a expansão térmica. Algumas dessas propriedades são indicadas a seguir.

A **rigidez**, capacidade de um elemento estrutural resistir a uma deformação originada por uma carga aplicada, é uma característica que geralmente deve ser melhorada nas estruturas que necessitam de algum tipo de reforço. Como a rigidez é função do módulo de elasticidade, os elementos a serem reforçados necessitam de materiais que apresentam características de elevado módulo de elasticidade, como ocorrem com os PRF de fibra de carbono.

A **fadiga** pode ser entendida como um processo que ocorre em estruturas que recebem ciclos de carga e descarga, repetidamente causando o acúmulo progressivo de danos, iniciado pela formação de pequenas fissuras em pontos de altas concentração de tensões, aumentando progressivamente em cada ciclo de carregamento. O reforço através dos PRF promove o aumento da resistência à fadiga dos elementos estruturais reforçados, pois auxilia no controle e redução da fissuração, além de melhorar a distribuição das fissuras ao longo do elemento.

A **fluência** ou deformação lenta é considerada uma deformação permanente e irreversível que surge progressivamente ao longo do tempo, sob efeito de carregamento constante no elemento estrutural. Como os PRF são materiais viscoelásticos e apresentam deformação contínua sob tensão, é fundamental analisar a fluência em elementos estruturais reforçados com o PRF, principalmente em contextos de altas temperaturas, presença de umidade e elevados níveis de tensão aplicada, podendo influenciar o comportamento do PRF quanto à fluência e levar a ruptura.

A **durabilidade** pode ser entendida como a capacidade de uma estrutura resistir às ações externas, satisfazendo pré-requisitos de desempenho ao longo do tempo. A exposição de estruturas reforçadas com PRF a certas condições ambientais pode afetar a sua durabilidade ao degradarem as fibras, matriz polimérica e interface fibra-matriz do compósito. Garcez (2007) afirma que, pelo fato de as fibras governarem a maioria das propriedades mecânicas do PRF, os compósitos podem ainda resistir a algumas solicitações por um determinado período de tempo, caso a degradação atinja apenas a matriz. Assim, as normas internacionais adotam fatores de redução afim de diminuir as tensões de tração devido as ações ambientais, de certa forma conservadores, pois há uma série de incertezas envolvidas. As ações ambientais agressivas, ao conseguirem atingir o material polimérico, alteram suas propriedades mecânicas, reduzindo o seu desempenho. Tais ações podem ser de diversos tipos, como radiação ultravioleta; resistência à umidade; elevadas temperaturas; corrosão; resistência a álcalis e ciclos gelo-degelo.

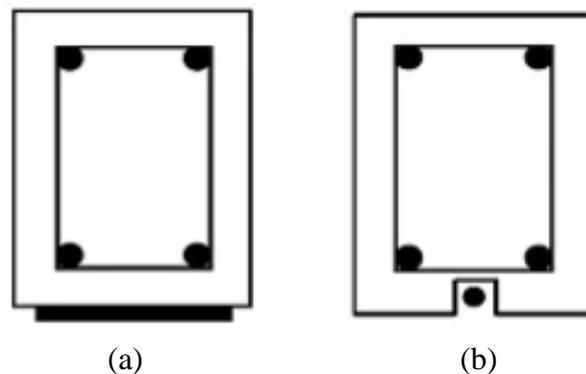
As **temperaturas elevadas**, em geral, remetem-se a situações de incêndios que podem ocorrer em estruturas reforçadas com PRF. O comportamento do reforço é desvantajoso para essa situação, normalmente degradando-o. Garcez (2007) afirma que as fibras de vidro, aramida e carbono podem resistir a temperaturas de aproximadamente 1000°C, 175°C e 275°C, respectivamente. Logo, pelo fato de as fibras possuírem melhores propriedades térmicas que as matrizes (resina), que são os formadores do compósito, o reforço de PRF pode continuar a suportar cargas na direção longitudinal até sua temperatura limite de deterioração da resina e quando isso ocorre, há o comprometimento da transferência de carga da resina para a fibra,

reduzindo as propriedades à tração do compósito. Segundo a autora, os materiais compósitos, em geral, estão vinculados a uma temperatura de serviço de até 80°C, justificado pela perda de qualquer função aderente da resina acima dessa temperatura, sendo, portanto, o fator preponderante do comportamento do sistema de reforço.

## 2.5 TÉCNICAS DE REFORÇO COM PRF

Atualmente, observam-se na literatura duas técnicas de aplicação do reforço do tipo PRF em elementos estruturais. A mais utilizada e antiga, denomina-se “*Externally Bonded Reinforcement*” (EBR), traduzida livremente como “reforço ligado externamente” e a mais recente, mas mesmo assim amplamente estudada na comunidade internacional, é nomeada como “*Near Surface Mounted*” (NSM), traduzida livremente como “montado próximo da superfície”. A Figura 11 ilustra a representação esquemática da seção transversal das duas técnicas de reforço com PRF aplicado em uma viga hipotética de concreto armado.

Figura 11 – Esquemática das técnicas de reforço do tipo: (a) EBR e (b) NSM



Fonte: (MDPI, 2016)

O desenvolvimento deste trabalho, relacionado a metodologias de incremento de ancoragem, está atrelado às técnicas de reforço do tipo EBR, porém, é importante conceituar as duas técnicas de reforço com PRF a fim de contextualizar a pesquisa, caracterizando-as a seguir.

### 2.5.1 Técnica EBR

A técnica de reforço estrutural por colagem externa do Polímero Reforçado com Fibras (PRF) tem rápida execução e facilidade de aplicação, com tratamento do substrato e aplicação do material de reforço, sendo as duas únicas etapas gerais da técnica. O restabelecimento do desempenho ou necessidade de aumento de carga em um elemento estrutural ocorre pela colagem do material, a fim de combater os esforços incidentes, sejam eles de flexão, aplicando

o reforço ao longo de todo comprimento longitudinal da face inferior do elemento ou da região que sofre tais esforços; ou ainda nas faces laterais das vigas, com as fibras de PRF transversalmente ao eixo da peça ou perpendicularmente as possíveis fissuras de corte, com o objetivo de combater esforços cisalhantes.

A metodologia EBR permitiu ao longo dos anos diversos estudos com o objetivo de aperfeiçoamento da técnica e conseqüente aumento da eficiência do PRF. Assim, melhora aspectos como a capacidade de carga e das questões de ductilidade ou de alteração dos modos de ruptura prematura (detalhados ao longo do trabalho), através das aplicações de mecanismos de protensão no material de reforço ou de incrementos de ancoragem no reforço.

### 2.5.2 Técnica NSM

A técnica de reforço estrutural por posicionamento do elemento compósito próximo à superfície, ocorre através da inserção de laminados de Polímero Reforçado com Fibra (PRF) em entalhes executados no cobrimento dos elementos de concreto armado. Tais entalhes e posicionamentos são feitos nas regiões em que se deseja combater os esforços solicitante, seja ao longo de todo comprimento longitudinal da face inferior do elemento, para os casos de flexão; ou ainda nas faces laterais da viga, com entalhe transversalmente ao eixo da peça ou perpendicularmente as possíveis fissuras de corte, com o objetivo de combater esforços cisalhantes. Os entalhes, após limpos, são preenchidos primeiramente com material adesivo e em seguida posicionado o PRF, através de faixas (formato de tiras retangulares), ou haste (formato cilíndrico), complementando o sistema de reforço. A dupla área de aderência dessa técnica supera em muitos casos a deficiência do descolamento prematuro, que normalmente ocorre na técnica EBR.

Os estudos observados na literatura indicam que a metodologia NSM permite incrementos na capacidade de carga e aumento da ductilidade, quando comparada com as vigas de controle, além de proteção contra vandalismo, fogo e ação dos raios ultravioleta. Porém a utilização dessa técnica apresenta algumas desvantagens, como aumento da complexidade de preparação da superfície, comparada a técnica EBR, visto que necessita de equipamentos de corte de concreto; o elemento a ser reforçado pode não ter cobrimento de concreto suficiente na região de realização dos entalhe, devido técnicas construtivas antigas ou erros de projeto/execução; o concreto pode não possuir qualidade suficiente por alto grau de deslocamento ou porosidade devido sua elevada idade ou ainda não atendimento às normas construtivas, sendo todas essas situações fatores que dificultam a aplicação dessa técnica.

## 2.6 APLICAÇÃO DO SISTEMA PRF COMO REFORÇO ESTRUTURAL

Este tópico está destinado a discutir os procedimentos e metodologias necessárias à aplicação de reforço estrutural através da metodologia de Polímeros Reforçados por Fibras. Pressupõe-se que a escolha desse tipo de reforço está atrelada a uma análise estrutural prévia e detalhada, entendendo o comportamento da edificação, os mecanismos que originaram o problema observado e suas influências diretas e indiretas na estrutura, além das consequências decorrentes das diversas alternativas que podem ser consideradas para a solução do problema estrutural em questão, sendo tais premissas discutidas anteriormente.

### 2.6.1 Etapa de dimensionamento do reforço por PRF

O dimensionamento do reforço do tipo PRF é atualmente indicado através de normas técnicas com metodologias de cálculo e recomendações construtivas, como observado na norma ACI 440.2R (2017). Para a fase de dimensionamento do reforço, é fundamental a definição do objetivo, reabilitação ou *retrofit*; do conhecimento das características das cargas atuantes no elemento antes e após sua aplicação, magnitude e tipo (estática ou dinâmica); características do elemento a ser reforçado, como dimensões, áreas totais de armaduras e classe de concreto. Após o cálculo do dimensionamento exigido pela estrutura para o reforço estrutural, segue-se para a parte construtiva do reforço.

### 2.6.2 Etapa construtiva do reforço por PRF

Os procedimentos e recomendações construtivas para a execução do reforço são similares entre os fabricantes e com uma série de recomendações convergindo com outros tipos de metodologias de reforço. A etapa construtiva passa pelas fases de preparação do substrato; preparação das resinas e aplicação do sistema PRF, ressaltando que o desempenho esperado do reforço do tipo PRF depende da qualidade da equipe que executa os serviços, dos materiais utilizados e do correto prosseguimento da sequência executiva, uma vez que se observa na literatura que diversos autores indicam correlação significativa entre o preparo do substrato e o funcionamento e eficácia do reforço, exigindo atenção especial nessa fase.

#### 2.6.2.1 Preparação do substrato

Durante essa fase, o substrato deve passar pelos processos de limpeza, reparação, recuperação, regularização e imprimação, sendo todas elas justificadas pela garantia da aderência entre reforço e superfície, detalhadas a seguir:

- a.) Limpeza: remoção de materiais superficiais, como poeira, substâncias oleosas e graxas. Eventuais desgastes da superfície podem ser exigidos para remover o cimento superficial em excesso ou em processo de degradação;
- b.) Reparação/recuperação: análise da qualidade do concreto, imperfeições superficiais graves e eventuais corrosões das armaduras, com objetivo de eliminar, através de processos de recuperação específicos, as manifestações patológicas que acometem esses materiais;
- c.) Regularização: correção das imperfeições superficiais do substrato de concreto com o objetivo de proporcionar uma superfície adequada e nivelada do substrato para a aplicação do reforço, evitando que uma possível concentração de tensões prejudique a ação do compósito e, eventualmente, promova o arrancamento precoce do reforço a partir destes pontos. Machado (2010) indica a utilização de uma pasta epoxídica com a presença de elevado teor de sólidos para cobrir eventuais imperfeições superficiais e criar um plano liso e nivelado para a execução do reforço, também denominadas como *putty*;
- d.) Imprimação: deve ser analisada a necessidade da utilização dessa camada no substrato, ao avaliar a qualidade do substrato após a passagem pelos processos (a) à (c), citados acima, e a solução técnica dos produtos fornecidos pelo fabricante. Tem como objetivo consolidar o substrato, criando uma ponte de aderência entre o concreto e o sistema compósito. Machado (2010) indica que essa camada, denominada *primer*, ao penetrar nos poros do concreto, estabelece uma película sobre a superfície, criando-se assim uma interface mais eficiente para a transmissão de esforços entre o compósito e a peça de concreto, de modo a melhorar a propriedade adesiva da superfície para a recepção da resina de saturação ou do adesivo.

Os processos apresentados acima devem ser verificados e executados conforme a necessidade e sempre com elevado rigor, pois substratos mal preparados podem impedir a efetiva transferência dos esforços para o PRF, resultando em eventuais falhas precoces por descolamentos da interface concreto-compósito. O ACI 440.2R (2017) faz recomendações importantes acerca do substrato, indicando que problemas relacionados à condição do concreto e com potencial comprometimento à integridade do sistema PRF, devem ser tratados durante a preparação do substrato, logo antes da aplicação do reforço. O sistema de reforço não pode ser aplicado em superfícies que apresentem suspeita ou confirmação de corrosão das armaduras, para que não haja impacto na integridade do reforço, tratando-as antes da aplicação do compósito de PRF. As fissuras não devem ser ativas e além disso, as que apresentam abertura superior a 0,3 mm devem receber injeções de resina epoxídica, com o objetivo de evitar a redução de desempenho do sistema de reforço, pois tais fissuras expostas em determinados

ambientes, principalmente os agressivos, são acessos à agentes de degradação, impactando na eficiência do sistema de reforço.

Outro ponto importante de estudo é a resistência necessária do substrato de concreto que recebe as transferências dos esforços solicitantes do sistema PRF. Machado (2010) indica que os PRF aderidos externamente devem ser aplicados em substratos com tensão de tração mínima de 1,4 MPa e a resistência à compressão mínima de 14 MPa. Já o ACI 440.2R (2017) indica que os sistemas compósitos não sejam aplicados em substratos que apresentem resistência à tração menor do que 1,4 MPa e resistência à compressão menor do que 17 MPa.

#### 2.6.2.2 Preparação das resinas

Após a preparação do substrato, a fase construtiva segue para a preparação e aplicação das resinas, seguindo as recomendações do fabricante. Os componentes que formam a resina (resina, componente “A” e catalisar, componente “B”) devem ser homogeneamente misturados em temperatura apropriada e com as proporções adequadas, medidas em balança; verificar o tempo de utilização da mistura homogeneizada, seguindo fielmente o recomendado pelo fabricante, pois o uso após este tempo reduz a penetração da resina na superfície do substrato e/ou prejudica a saturação das fibras do material de reforço.

A resina é, portanto, o responsável pela colagem, fixação e aderência do material de reforço ao elemento de concreto, logo recomendado possuir baixa viscosidade afim de facilitar a aplicação e percolação pelas fibras, porém com alta tixotropia, com o objetivo de reduzir escorrimientos, importante no caso de reforços em vigas, em que o sistema é aplicado na face inferior do elemento, Garcez (2007).

#### 2.6.2.3 Aplicação do sistema de Polímero Reforçado com Fibras (PRF)

Após o preparo adequado do substrato e das resinas, como descrito nos itens anteriores, o sistema de reforço estrutural das mantas, tecidos ou laminados pode ser aplicado. Os sistemas “curado *in situ*” e “pré-fabricado” apresentam semelhanças e diferenças nos procedimentos de aplicação:

- a) Nos dois sistemas a aplicação ocorre de forma manual pelo uso de manta, tecido ou laminado e resina de imprimação;
- b) Nos sistemas “pré-fabricados” a resina tem apenas o objetivo de fazer a ligação entre o compósito e o substrato de concreto. Já para os sistemas “curados *in situ*”, a resina tem função de forma a matriz e ser adesivo.

Na prática, o processo construtivo dessa fase se inicia pela aplicação da resina saturante, de forma uniforme e em todo o substrato previamente tratado, regularizado e limpo, sendo que a resina também pode ser aplicada separadamente sobre as fibras. A manta, tecido ou laminado é posicionado no elemento a ser reforçado e levemente pressionada sobre a resina fresca, sendo que tal pressão deve ocorrer objetivando a retirada de bolhas de ar presentes entre as camadas de resina e compósito, expulsando-as completamente antes da saturação da resina e evitando a criação de “vazios”, o que reduziria a eficiência na transmissão das cargas solicitantes.

Machado (2010) indica a aplicação opcional de uma película de acabamento com elevado teor de sólidos, alto brilho e resistente à corrosão, afim de garantir proteção e acabamento estético para o sistema. Caso o dimensionamento do reforço exija o uso de mais de uma camada da fibra, deve-se repetir em cada nova camada, uma nova porção de resina saturante antes da aplicação da camada seguinte de reforço, adotando para cada uma os mesmos cuidados citados acima, referentes a formação indesejada de bolhas.

Para os dois sistemas citados, o ACI 440.2R (2017) indica que a temperatura, a umidade relativa do ar e a umidade superficial no momento da aplicação do reforço, são fatores que podem afetar o desempenho do material, devendo tais condições serem monitoradas antes e durante a aplicação do material compósito escolhido. Nesse contexto, Meneghetti (2007) afirma que, em geral, os adesivos devem ser aplicados nas seguintes condições de superfície:

- a) Temperaturas superficiais do concreto abaixo do nível especificado pelo fabricante do compósito podem provocar a saturação imprópria das fibras e cura inadequada do sistema;
- b) A temperatura do ambiente e da superfície de concreto que será reforçada deve ser maior do que 20°C, geralmente;
- c) As superfícies úmidas/molhadas prejudicam a ligação entre o compósito PRF e o substrato, com exceção das resinas que são formuladas e recomendadas para esse tipo específico de situação e superfície.

### 2.6.3 Manutenção e acompanhamento da estrutura reforçada com PRF

O sistema de reforço do tipo PRF aplicado em elementos de concreto armado são um importante mecanismo de reabilitação estrutural, porém, a solução não se encerra no momento de conclusão da aplicação do compósito, já que inspeções e manutenção periódicas ainda são fundamentais para permitir a continuidade do sucesso da solução adotada ao longo do tempo.

Durante a elaboração do projeto de reforço do elemento estrutural, devem ser descritos detalhadamente a previsão das avaliações e monitoramentos adicionais a serem executados no elemento, com o objetivo de atender os requisitos mínimos de durabilidade e qualidade,

reunindo parâmetros fundamentais para novas análises da estrutura. A elaboração de um cronograma periódico de inspeções e manutenções no elemento reforçado permite realimentar informações sobre o comportamento da estrutura e do reforço aplicado, avaliando o sucesso do reforço e suas eventuais deteriorações, julgando a necessidade de novas intervenções. O ACI 440.2R (2017) destina um capítulo de sua norma para discutir as inspeções, manutenções e reparos em elementos de reforço do tipo PRF.

### 3 COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DO REFORÇO COM PRF

Ao longo deste capítulo serão discutidas e estudadas as implicações causadas pelo reforço estrutural dos Polímeros Reforçados com Fibras (PRF) quando aplicados em elementos estruturais de concreto armado. Afim de entender o comportamento estrutural entre os materiais, serão abordados tópicos relacionados aos modos de ruptura do PRF e a metodologia de dimensionamento da ACI 440.2R (2017), fornecendo as ferramentas necessárias para o estudo dos mecanismos e metodologias de ancoragem existentes para o PRF, objetivo principal deste trabalho.

#### 3.1 MODOS DE RUPTURA DO POLÍMERO REFORÇADO POR FIBRAS

O estudo dos modos de ruptura dos elementos estruturais reforçados com Polímeros Reforçados com Fibras (PRF) se justifica pelo fato de que ao se entender o comportamento de atuação desses tipos de compósitos na sua fase crítica, ou seja na ruptura, permite-se interpretar os parâmetros e variáveis que atuam no sistema de reforço. A compreensão de condições de geometria, carregamento, configuração do reforço, ancoragem e outros, permite adotar procedimentos de dimensionamento mais confiáveis aos incrementos de carga exigidos (reabilitação ou *retrofit*), além de justificativas mais assertivas e coerentes nas decisões de projeto.

Hollaway (1993) indica que a anisotropia<sup>7</sup>, característica dos materiais compósitos, gera um complicado mecanismo de ruptura nos reforços, causando danos significativos devido aos carregamentos estáticos suportados pelo PRF, em que as propriedades dos materiais formadores, o tipo e magnitude do esforço aplicado indicam os níveis de danos causados.

O objetivo do reforço com PRF é permitir que as cargas atuantes no elemento de concreto armado, possam agir com segurança, solucionando as manifestações patológicas existentes. A expectativa é de que o reforço promova aumentos significativos na resistência à flexão dos elementos de concreto armado, tornando-se uma metodologia de reforço eficiente.

Porém, observa-se na literatura diversos estudos, como em Beber (2003), que descreve o mecanismo de ruptura principal ocorrendo para cargas significativamente menores do que o potencial máximo previsto, obtido através dos modelos teóricos tradicionais de solicitação do reforço, devido falha estrutural prematura e frágil. Como as características das fibras já apontavam para esse tipo de comportamento do material compósito, devido ao desempenho

---

<sup>7</sup> **Anisotropia:** característica dada a um material que tem o comportamento de suas propriedades físicas variando conforme as diferentes direções.

frágil da fibra, como discutido nos capítulos anteriores deste trabalho, algumas considerações nas normas técnicas são adotadas com o objetivo de reduzir as deformações que causavam modos de ruptura prematura e frágil, ao custo de subdimensionar o material de reforço, porém trazendo mais segurança. Entretanto, investigações sobre os modos de ruptura permitem entender o comportamento dos elementos de reforço de forma geral, como em casos de adoção de mecanismo de incremento de ancoragem, avaliando sua eficiência.

O ACI 440.2R (2017) indica que solicitadas à flexão, as vigas de concreto armado reforçadas com os materiais de PRF podem apresentar modos de ruptura variados. A norma agrupa diversos estudos investigativos, estabelecendo cinco modos típicos de ruptura à flexão, com o objetivo de serem parâmetros de controle para o dimensionamento das estruturas reforçadas com os compósitos de PRF, sendo os seguintes:

- a. Ruptura (ou esmagamento) na zona comprimida do concreto antes do escoamento do aço;
- b. Escoamento do aço, seguido pela ruptura do reforço polimérico (PRF);
- c. Escoamento do aço, seguido pela fissuração (ou esmagamento) do concreto na zona comprimida;
- d. Ruptura na camada de cobrimento de concreto, gerada por tensão de cisalhamento e tração;
- e. Ruptura (ou descolamento) do sistema de reforço na interface concreto-PRF.

Os modos de ruptura (a), (b) e (c) apresentados nos itens acima são comuns a qualquer elemento de concreto armado sob esforços de flexão, logo chamados de “ruína clássica”. Meneghetti (2007) afirma que para esses três tipos, o mecanismo de ruptura ocorre quando os elementos de concreto reforçados agem de forma conjunta com o reforço de PRF até o momento da falha. Já o segundo grupo, (d) e (e) referem-se a “ruína prematura”. Discute-se, a seguir, sobre os modos de ruína apresentados acima:

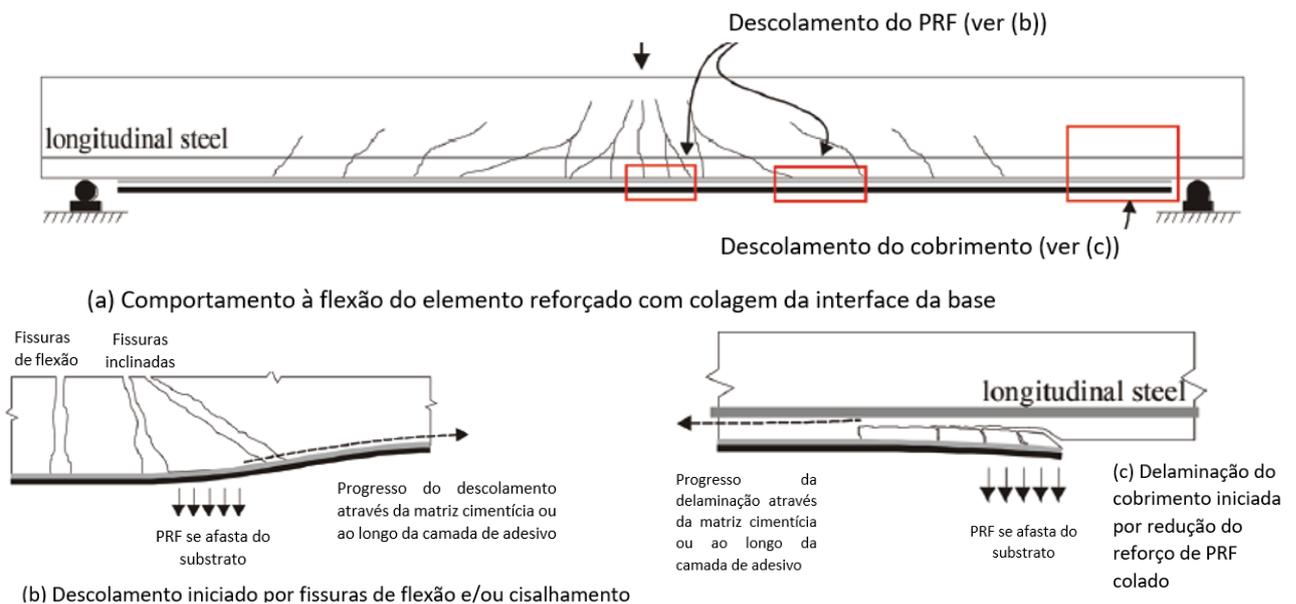
- Modo de ruptura (a): ocorre em elementos com altas taxas de armadura ou em vigas subarmadas com alta taxa de reforço, proporcionando a garantia da capacidade resistente necessária à viga reforçada, gerando uma ruptura frágil e sem aviso prévio, Meneghetti (2007). Tal tipo de ruptura não é desejada, sendo considerada uma solução não viável para o reforço;
- Modo de ruptura (b): ocorre em elementos caracterizados por baixas taxa de armadura e reforço. Para que esse tipo de ruptura ocorra, é fundamental que o reforço do tipo PRF esteja adequadamente ancorado, Meneghetti (2007);
- Modo de ruptura (c): de acordo com Orlando (2019) é o modo de ruptura mais desejável e que vai ao encontro dos princípios da segurança estrutural: a viga atinge seu nível máximo

de resistência à flexão à medida que ocorre o escoamento do aço na região tracionada seguido do esmagamento do concreto na zona comprimida, permitindo assim que o reforço permaneça íntegro. Esse modo de ruptura ocorre quando a viga a ser reforçada (original) e após a aplicação do reforço estão subdimensionadas, Meneghetti (2007);

- Modo de ruptura (d): Nesse tipo de ruptura ocorre a perda da camada de cobrimento do concreto, causada pela ação de tensões de cisalhamento e de tração, além da ruptura na interface concreto-reforço, sendo justificadas pela perda da efetividade do compósito, no momento da falha, Thomsen et al. (2004);
- Modo de ruptura (e): Diversos fatores podem justificar o modo de ruptura por descolamento do reforço na interface concreto-PRF, porém, o desempenho satisfatório do método passa pelos mecanismos de ancoragem adotados para os compósitos do tipo PRF e pelo entendimento do mecanismo de transferência de tensões na interface.

A Figura 12 ilustra alguns modos de ruptura apresentados.

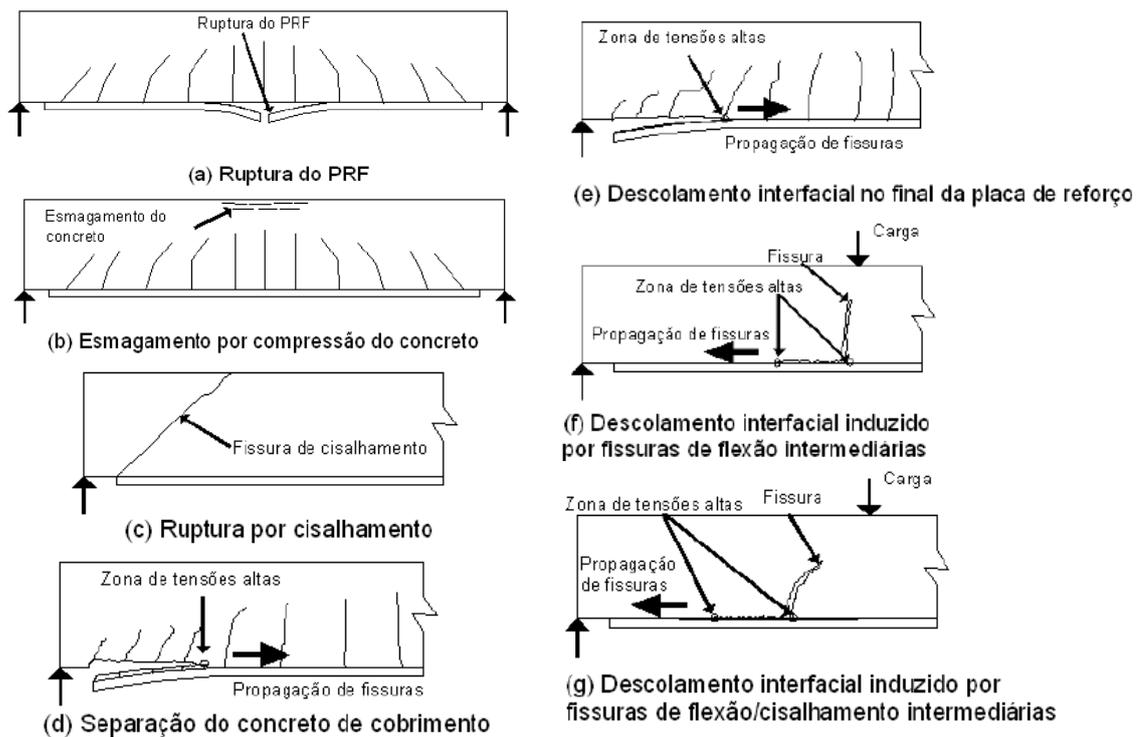
Figura 12 – Representação dos modos de ruptura prematuros em vigas reforçadas com PRF



Fonte: adaptado da ACI 440. 2R (2017)

No trabalho de Teng et al. (2002), ocorre a discussão sobre os modos de ruptura, divididos de maneira mais detalhada da apresentada pela norma ACI 440.2R (2017). A Figura 13 indica a apresentação dos modos de ruptura.

Figura 13 – Modos de ruptura de vigas de concreto armado reforçadas com PRF



Fonte: Teng et al. (2002)

A respeito dos sete modos de ruptura propostos pelo autor, conforme indicados na figura acima, discute-se:

- **Modo (a) - Ruptura do PRF:** representa o esgotamento da resistência à tração do reforço e, portanto, considerado como o modo clássico de ruptura, tornando-se referência para o dimensionamento;
- **Modo (b) - Esmagamento por compressão do concreto:** é considerado o modo de ruptura mais desejável, pois o rompimento ocorre de maneira dúctil e com aviso prévio, promovendo maior segurança aos usuários. Nesse modo de ruptura observa-se o esmagamento do concreto por compressão de duas maneiras: antes do escoamento da armadura ou então após escoamento da armadura;
- **Modo (c) - Ruptura por cisalhamento:** a ruptura ocorre quando a viga atinge a capacidade limite de resistência ao cisalhamento antes que os níveis de resistência máxima à flexão sejam alcançados, portanto, causando a ruptura por cisalhamento. É justificada pelo aumento significativo no momento fletor resistente da viga, devido o reforço de PRF, Meneghetti (2007);
- **Modo (d) - Separação do concreto de cobertura:**

- Modo (e) - Descolamento interfacial no final da placa de reforço: esse tipo de ruptura pode ocorrer devido à deficiência no controle de qualidade dos materiais/execução; falhas de ancoragem do PRF ou outros motivos. Atribui-se também a esse modo de ruptura as altas tensões interfaciais que surgem nas zonas próximas à extremidade do reforço, amplamente denominado na literatura como *peeling-off*<sup>8</sup>, Meneghetti (2007);
- Modo (f) - Descolamento interfacial induzido por fissuras de flexão intermediárias: esse tipo de ruptura pode ocorrer devido as fissuras de flexão geradas pelas altas tensões no PRF podendo serem controladas limitando a deformação do PRF em 8‰ aproximadamente Orlando (2019). Além disso, essa ruptura pode ser induzida por fissuras de flexão ou flexão-cisalhamento fora da extremidade do reforço, Meneghetti (2007);
- Modo (g) - Descolamento interfacial induzido por fissuras de flexão-cisalhamento intermediárias: induzidas por fissuras de flexão ou flexão-cisalhamento fora da extremidade do reforço, segundo Meneghetti (2007), devido fissuras de cisalhamento inclinadas no concreto.

Ainda, os modos de ruptura apresentados acima podem ser divididos em dois grupos, com características semelhantes: modos (b) a (d), associados a deficiências de resistência da estrutura original, compondo o grupo dos modos de ruptura onde a seção possui perfeita ligação entre o compósito-concreto até o instante do momento da ruína, sendo denominado de “ruína clássica”; e os modos (e) a (g), associados as falhas do sistema de reforço, sendo que normalmente as rupturas prematuras, geralmente por descolamento, estão associadas a esses modos de ruína, Meneghetti (2007).

Beber (2003) sintetiza os modos de ruptura discutidos acima, ao afirmar que para taxas de armadura e quantidade de reforço reduzidas, pode ocorrer o escoamento da armadura seguido da ruptura do reforço à tração. Caso estes valores sejam elevados, a ruptura ocorre por esmagamento do concreto, com o aço podendo ou não ter atingido o escoamento (dependem de sua taxa de armadura). Por fim, a ligação entre o PRF e o substrato de concreto pode falhar, promovendo descolamento em função da propagação rápida de fissuras no adesivo (a maioria das resinas tem comportamento frágil); *peeling off* do compósito por causa de fissuras de flexão/cisalhamento no concreto; além do arrancamento da camada de concreto entre o compósito e a armadura longitudinal.

---

<sup>8</sup> **Peeling-off**: é o nome dado a um modo de ruptura por descolamento interfacial do PRF iniciado nas extremidades do material de reforço, se propagando para as regiões centrais da estrutura.

### 3.2 METODOLOGIA DE DIMENSIONAMENTO DO REFOÇO DO TIPO PRF

Até a data da elaboração deste trabalho, não foi encontrada em vigor nenhuma norma brasileira de dimensionamento do reforço estrutural utilizando os Polímeros Reforçados com Fibras (PRF). Assim, o longo deste item, serão apresentadas e discutidas as metodologias de dimensionamento que fazem a previsão teórica da capacidade resistente à flexão de vigas reforçadas com PRF a partir da norma internacional *American Concrete Institute - ACI 440.2R* (2017), denominada “*Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*”.

#### 3.2.1 Limite de Resistência

Determinação dos limites de resistência relacionados à alguma falha no sistema de reforço devido a danos, vandalismo e outras causas, permitindo que o elemento reforçado mantenha capacidade estrutural suficiente até que o material seja reparado.

- a) Limite geral de resistência: indica que a resistência existente na estrutura deve ser suficiente para resistir a um nível de cargas, descrito na Equação (1) . Logo, o reforço dimensionado deve ser suficiente para suportar as ações incidentes com os seus respectivos coeficientes, apresentando, portanto, uma reserva de resistência, para permitir que o material de reforço mantenha capacidade estrutural suficiente até que o FRP danificado seja reparado.

$$(\phi R_n)_{existente} \geq (1,1 S_{DL} + 0,75 S_{LL})_{novo} \quad (1)$$

Sendo,

$\phi$  – Parâmetro relacionado à ductilidade do elemento estrutural a ser reforçado;

$R_n$  – Carga resistente da estrutura antes de ser reforçada (resistência existente);

$S_{DL}$  – Cargas devido ao peso próprio (cargas mortas);

$S_{LL}$  – Cargas vivas (sobrecarga), com seu fator podendo ser aumentado analisando as características da estrutura.

- b) Limite de resistência ao fogo: os sistemas de PRF perdem a sua capacidade de reforço após curtos períodos de tempo de exposição à ação do fogo, mesmo que se utilizem sistemas de proteção específicos. Não há recomendação para considerar o efeito do reforço destes sistemas quando expostos a esse tipo de ação. Dessa forma, essa estrutura, antes de ser reforçada, deve ter capacidade resistente suficiente para suportar, em segurança, as ações permanentes ( $S_{DL}$ ) e as ações de sobrecarga ( $S_{LL}$ ), conforme indicado na Equação (2).

$$(R_{n\theta})_{existente} \geq 1,0 S_{DL} + 1,0 S_{LL} \quad (2)$$

### 3.2.2 Dimensionamento à flexão

Para o dimensionamento à flexão do reforço, são descritas pelo ACI 440.2R (2017) as seguintes hipóteses de cálculo:

- i) O dimensionamento é baseado nas atuais dimensões, disposições das armaduras e propriedades dos materiais do elemento estrutural a ser reforçado;
- ii) Até a ruptura, as seções transversais permanecem planas (hipótese de Bernoulli);
- iii) O encurtamento (deformação de compressão) máximo no concreto é de 3,0‰. Para a NBR 6118 (ABNT, 2014), o valor máximo é de 3,5‰;
- iv) A resistência à tração do concreto é desprezada;
- v) Assume-se que o diagrama Tensão x Deformação do aço é elástico-linear até o seu escoamento, seguido de comportamento perfeitamente plástico;
- vi) O PRF é caracterizado por uma lei linear e elástica tensão-deformação até à ruptura;
- vii) A deformação de corte na camada do adesivo é desprezada, visto que esta camada é muito fina com reduzidas variações na sua espessura.

Após a consideração das hipóteses de cálculo, o procedimento de dimensionamento do reforço com PRF segue para as etapas a seguir:

#### a) Propriedades dos materiais (considerações ambientais)

O ACI 440.2R (2017) indica que comumente os valores de resistência à tração última ( $f_{fu}^*$ ) e deformação última ( $\varepsilon_{fu}^*$ ) dos PRF, apresentados pelos fabricantes, não consideram as influências provocados pela exposição do material de reforço aos agentes agressivos ambientais que ocorrem ao longo do tempo de vida do material. Dessa forma, tais valores fornecidos devem ser interpretados como “iniciais”, devendo ser corrigidos por um fator relacionado ao ambiente de exposição do reforço, denominado de Coeficiente Ambiental ( $C_E$ ).

A norma indica os valores de cálculo da tração última ( $f_{fu}$ ), deformação última ( $\varepsilon_{fu}$ ) e módulo de elasticidade ( $E_f$ ), conforme indicado nas Equações (3), (4) e (5).

$$f_{fu} = C_E \cdot f_{fu}^* \quad (3)$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \cdot \varepsilon_{fu}^* \quad (4)$$

$$E_f = \frac{f_{fu}}{\varepsilon_{fu}} \quad (5)$$

b) Deformações iniciais no concreto

Antes da aplicação do sistema de reforço no elemento de concreto armado, é usual existir certo nível de deformação inicial na estrutura devido a eventuais cargas atuantes, sendo minimamente o peso próprio. Assim, a deformação da seção no instante da aplicação do reforço é considerada como ( $\varepsilon_b = \varepsilon_{fc} + \varepsilon_{bi}$ ). Logo, no dimensionamento do PRF deve ser considerado o nível de deformação inicial, assumindo comportamento linear-elástico e considerando todo carregamento existente no momento da aplicação do reforço (no mínimo o peso próprio), como indicado na Equação (6):

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL}(d_f - kd)}{I_{cr}E_c} \quad (6)$$

Sendo,

$\varepsilon_b$  – Deformação específica na seção;

$\varepsilon_{fc}$  – Deformação específica da fibra à tração (de cálculo);

$\varepsilon_{bi}$  – Deformação específica pré-existente na seção quando ocorre aplicação do reforço;

$M_{DL}$  – Momento fletor devido as cargas permanentes (peso próprio) no instante do reforço;

$d_f$  – Altura útil do sistema de reforço (geralmente  $d_f \approx h$ );

$I_{cr}$  – Momento de inércia da seção homogeneizada;

$E_c$  – Módulo de elasticidade do concreto.

c) Homogeneização da seção transversal

Como a estrutura tem materiais de comportamentos diferentes, deve ser realizada a uniformização dos materiais da seção, a fim de determinar o momento de inércia crítico da seção reforçada. Sabendo que:  $n = \frac{E_s}{E_c}$ ;  $B = \frac{b}{n.A_s}$ ;  $I_g = \frac{bh^3}{12}$ ;  $r = \frac{(n-1).A'_s}{n.A_s}$ , pode-se aplicar as equações abaixo, afim de determinar a seção homogeneizada. Apesar da norma indicar que podem ser desprezadas do cálculo as armaduras de compressão ou porta estribo da seção, as Equações (7) e (8) indicam os parâmetros de cálculo considerando-as.

$$k.d = \frac{\sqrt{2dB \left(1 + \frac{rd'}{r}\right) + (1+r)^2} - (1+r)}{B} \quad (7)$$

$$I_{cr} = \frac{bk^3d^3}{3} + n.A_s(d - kd)^2 + (n - 1).A'_s(kd - d')^2 \quad (8)$$

Sendo,

$n$  – Coeficiente de homogeneização;

$E_s$  – Módulo de elasticidade do aço;

$b$  – Largura da seção transversal do elemento de concreto;

$A_s$  – Área da armadura tracionada existente;

$I_g$  – Momento de inércia de seção retangular;

$h$  – Altura da seção de concreto;

$d$  – Altura útil da seção de concreto.

#### d) Determinação da linha neutra

Como o aço é um material que apresta comportamento de escoamento e o material de reforço é caracterizado por ser elástico-linear até a ruptura, a única maneira de calcular a profundidade da linha neutra é arbitrando um valor inicial, verificando-se em seguida o equilíbrio de forças existentes na seção produzido por esse valor de linha neutra, comparando-os e formado um processo iterativo. O ACI 440.2R (2017) recomenda a altura da linha neutra da seção de concreto ( $c$ ) como sendo 20% da altura útil da seção, logo  $c = 0,2 \cdot d$ .

#### e) Discussão dos modos de ruptura

A indicação dos modos de ruptura é indicada no ACI 440.2R (2017) e discutido no item 3.1 deste trabalho. Assim, ao adotar um dos modos de ruína descritos na norma, a partir da limitação da deformação no material, é possível determinar por equações de equilíbrio, a posição da linha neutra e comparar com o valor arbitrado na iteração inicial, além das deformações e tensões da armadura interna e do PRF. Porém, para isso, adota-se no cálculo a hipótese de ocorrência de ruínas prematuras que são características em estruturas reforçadas à flexão pela técnica de colagem externa (EBR) e, como são complexas de detectar, ocorre a redução dos valores críticos de segurança.

O esmagamento do concreto ocorre quando a deformação na fibra mais comprimida atinge o valor de 3,0%, de acordo com o ACI 440.2R (2017) ou 3,5% pela NBR 6118 (ABNT, 2014). A ruptura do reforço ocorre quando a deformação do PRF atinge a deformação de ruptura de cálculo ( $\varepsilon_f = \varepsilon_{fu}$ ) e antes que o concreto alcance sua deformação máxima admitida.

f) Deformação máxima permitida no PRF<sup>9</sup>

O ACI 440.2R (2017) indica que a ruptura controlada pelo descolamento do compósito deve ser o estado governante na viga reforçada. A deformação máxima, recomendada pela norma para ocorrer no PRF afim de impedir a ruptura por descolamento devido à fissuração, deve ser o menor dos valores indicada na Equação (9). Além disso, tal equação é válida apenas para a técnica EBR, sendo a NSM apresentando outra relação numérica.

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{f'_c}{nE_f t_f}} \leq 0,9\varepsilon_{fu} \quad (9)$$

Sendo,

$\varepsilon_{fd}$  – Deformação limite máxima da fibra (de dimensionamento);

$f'_c$  – Resistência à compressão do concreto;

$t_f$  – Espessura do material de reforço PRF;

$n$  – Número de camadas do reforço PRF;

$E_f$  – Módulo de elasticidade do PRF.

g) Deformação efetiva no PRF

O compósito de PRF apresenta comportamento linear-elástico até a ruptura, logo o nível de deformação atuante no PRF será o limitante para o dimensionamento do PRF. A deformação efetiva do material ocorrerá para as situações de ruptura do concreto; ruptura do sistema PRF e descolamento do sistema PRF do substrato de concreto. Assim, a deformação ( $\varepsilon_{fe}$ ) que ocorre no reforço é a menor entre os valores indicados na Equação (10).

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left( \frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad (10)$$

Sendo:

$\varepsilon_{fe}$  – Deformação efetiva que acontece no reforço de PRF;

$\varepsilon_{cu}$  – Deformação axial última do concreto.

<sup>9</sup> A **Deformação máxima permitida no PRF** substitui o coeficiente (km), existente na versão do ACI 440.2R (2002). Segundo Orlando (2019), o coeficiente km limitava a máxima deformação no reforço, mas foi retirado da atualização da norma americana, realizada em 2017, para melhorar a segurança e manter a precisão do dimensionamento, visto que a deformação do PRF tem papel importante no cálculo do reforço.

$$Se \begin{cases} \varepsilon_{cu} \left( \frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \rightarrow \text{ocorrerá o caso A no comportamento do dimensionamento} \\ \varepsilon_{cu} \left( \frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} > \varepsilon_{fd} \rightarrow \text{ocorrerá o caso B no comportamento do dimensionamento} \end{cases}$$

- Caso A: o limitante do dimensionamento é o esmagamento do concreto;
- Caso B: o limitante do dimensionamento é a deformação do material de reforço PRF, para evitar o descolamento do material.

#### h) Tensão atuante no PRF

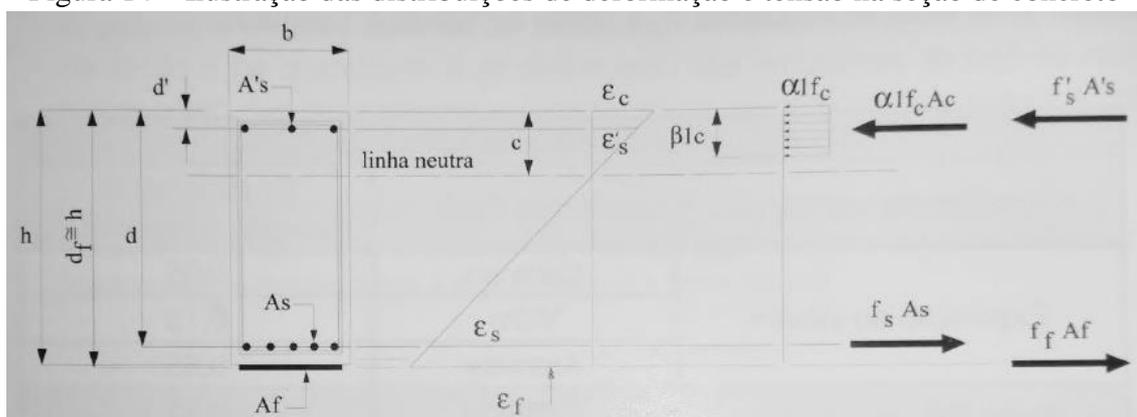
A máxima tensão de tração atuante, ou tensão efetiva, ( $f_{fe}$ ) que o material de reforço pode suportar antes que ocorra a ruptura por flexão, segundo a ACI 440.2R (2017), é determinada a partir da deformação efetiva ( $\varepsilon_{fe}$ ) do compósito, admitindo comportamento elástico-linear para o reforço, como pode ser observado na Equação (11).

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad (11)$$

#### i) Estado Limite Último (ELU)

Um elemento de concreto armado reforçado PRF tem a resistência à flexão de sua seção determinada pela compatibilidade de deformações e equilíbrio das forças internas, controlando-se o modo de ruptura. O cálculo do momento resistente, determinado para o Estado Limite Último (ELU), indicado pela ACI 440.2R (2017), pode ser representado pela Figura 14.

Figura 14 – Ilustração das distribuições de deformação e tensão na seção de concreto



Fonte: adaptado do ACI 440.2R (2017)

Assim, para o valor da linha neutra e deformações determinadas nos itens anteriores, a deformação do aço ( $\varepsilon_s$ ) e do concreto ( $\varepsilon_c$ ) são definidas por semelhança de triângulo, orientada pela Figura 14 acima. Logo, observa-se as Equações (12) e (13).

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left( \frac{d - c}{d_f - c} \right) \quad (12)$$

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left( \frac{c}{d_f - c} \right) \quad (13)$$

Simultaneamente, com a determinação das forças resultantes do concreto comprimido ( $R_{cc}$ ), armadura longitudinal superior ( $R'_{st}$ ), armadura longitudinal inferior ( $R_{st}$ ) e no reforço de PRF ( $R_f$ ), calcula-se o momento resistente na seção, através das Equações (14) e (15).

$$R_{cc} + R'_{st} = R_{st} + R_f \quad (14)$$

$$c = \frac{f_s A_s + f_f A_f - f'_s A'_s}{\alpha_1 f_c \beta_1 b} \quad (15)$$

Com a determinação do valor da linha neutra ( $c$ ), através da equação acima, o processo de iteração pode ser comparado com o valor da linha neutra arbitrado inicialmente. Se os dois valores forem iguais, indica que o equilíbrio de esforços foi alcançado, prosseguindo com o cálculo. Caso contrário, deve-se arbitrar outro valor da linha neutra e repetir os processos de cálculo descritos acima. Com o equilíbrio da seção, determina-se o momento fletor de cálculo, conforme descrito na Equação (16).

$$M_n = f_s A_s \left( d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f f_{fe} A_f \left( h - \frac{\beta_1 c}{2} \right) - f'_s A'_s \left( \frac{\beta_1 c}{2} - d' \right) \quad (16)$$

Sendo,

$M_n$  – Momento fletor de cálculo (nominal) da seção;

$A_s$  – Área da armadura de tração da seção;

$A'_s$  – Área da armadura de compressão da seção;

$f_s$  – Tensão de tração no aço;

$h$  – Altura total da seção;

$d$  – Altura útil: distância do bordo superior até o centro de gravidade da armadura de tração (inferior) da seção;

$d'$  – Distância do bordo superior até o centro de gravidade da armadura de compressão (superior) da seção;

$\beta_1$  – Fator de transformação do diagrama de tensões;

$\alpha_1$  – Coeficiente de redução da resistência do concreto devido às cargas de longa duração;

$c$  – Posição da Linha Neutra;

$\psi_f$  – Coeficiente de minoração da resistência do PRF (na flexão = 0,85);

$f_{fe}$  – Tensão de tração efetiva no reforço de PRF;

$A_f$  – Área total do material de reforço.

O coeficiente ( $\psi_f$ ) é adotado para minoração da resistência do PRF, definido pelo ACI 440.2R (2017), devido questões de confiabilidade das propriedades determinadas para o material compósito. O termo ( $\alpha_1$ ) observado na Figura 14, refere-se a resistência do concreto devido às cargas de longa duração e o termo ( $\beta_1$ ) é função da transformação do diagrama de tensões, como informados no ACI 318 e indicado nas Equações (17), (18) e (19).

$$\beta_1 = \frac{4\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6\varepsilon'_c - 2\varepsilon_c} \quad (17)$$

$$\alpha_1 = \frac{3\varepsilon'_c \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1 \varepsilon_c'^2} \quad (18)$$

$$\varepsilon'_c = \frac{1,71 \cdot f'_c}{E_c} \quad (19)$$

Sendo,

$\varepsilon'_c$  - Máxima deformação do concreto não confinado;

$f'_c$  - Resistência característica do concreto à compressão.

#### j) Verificação da ductilidade

O uso da metodologia de reforço por PRF em estruturas de concreto armado causa uma redução na ductilidade do elemento estrutural, o que pode provocar rupturas prematuras, como discutido anteriormente. A ductilidade adequada para os elementos de concreto armado é atingida se a deformação no aço, no instante do rompimento do concreto, seja descolamento ou delaminação do sistema de reforço, atingir pelo menos 0,005. Portanto, a deformação deve permanecer acima desse valor para se evitar a ruptura frágil e, para isso, o dimensionamento do PRF indica um fator de minoração da resistência ( $\phi$ ), como observa-se na Equação (20).

$$\phi = \begin{cases} 0,90; \text{ para } \varepsilon_t \geq 0,005 \\ 0,65 + 0,25 \frac{(\varepsilon_t - \varepsilon_{sy})}{0,005 - \varepsilon_{sy}}; \text{ para } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_t < 0,005 \\ 0,65; \text{ para } \varepsilon_t \leq \varepsilon_{sy} \end{cases} \quad (20)$$

Sendo,

$\phi$  – Fator de minoração de resistência, relacionado com a ductilidade da seção;

$\varepsilon_t$  – Deformação de tração no aço, na situação extrema de tração;

$\varepsilon_{sy}$  – Deformação de escoamento da armadura.

#### k) Resistência à Flexão

O dimensionamento do reforço estrutural deve exceder os esforços minorados pelo fator ( $\phi$ ), relacionado a ductilidade, como apresentada através da equação (21).

$$\phi M_n \geq M_u \quad (21)$$

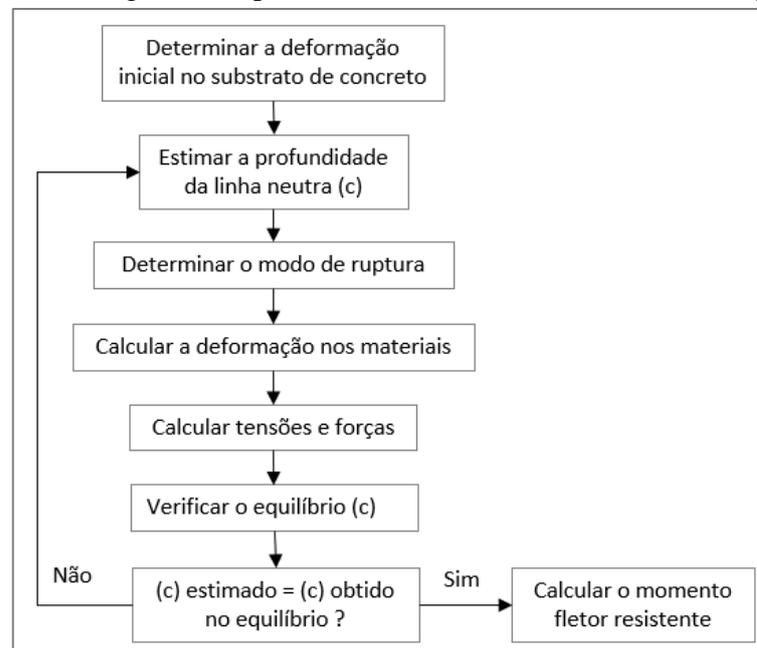
Sendo,

$M_n$  – Momento fletor resistente de cálculo;

$M_u$  – Momento fletor de cálculo atuante na seção.

A Figura 15 indica o processo de cálculo iterativo de dimensionamento do reforço de elementos de concreto armado com Polímero Reforçado com Fibras (PRF) pela técnica EBR.

Figura 15 – Fluxograma do processo de dimensionamento do reforço de PRF



Fonte: elaborada pelo autor

#### l) Comprimento de ancoragem do PRF

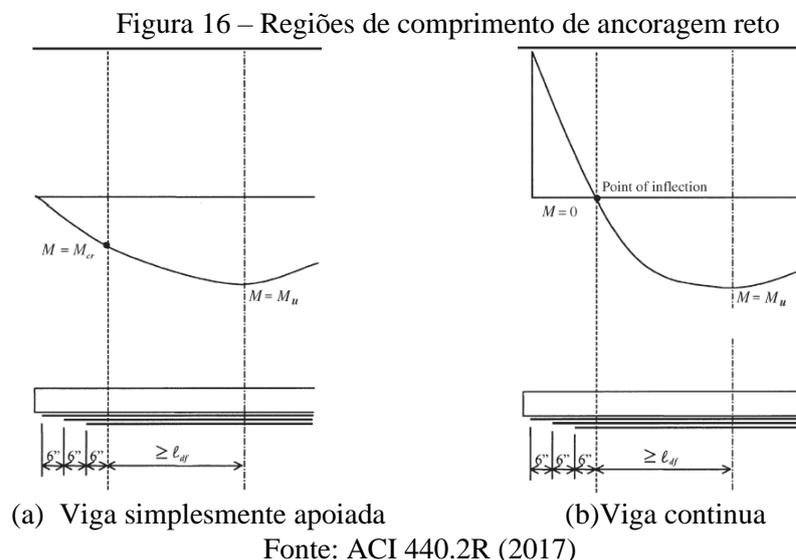
O ACI 440.2R (2017) indica que o comprimento de ancoragem, denominado como “Comprimento de Desenvolvimento” refere-se a um comprimento crítico ( $l_{df}$ ), sendo o valor

mínimo para desenvolvimento da capacidade de ligação do PRF. Assim, a tensão do PRF é efetiva ao longo da seção se o comprimento de ancoragem disponível no PRF exceder o valor crítico, como indicado na Equação (22). Esta ancoragem é entendida como “ancoragem reta”.

$$l_{df} = \sqrt{\frac{nE_f t_f}{\sqrt{f'_c}}} \quad (22)$$

De acordo com a norma, para os casos de vigas simplesmente apoiadas com uma única camada de sistema de reforço, o comprimento de ancoragem reta se inicia, na região onde o momento resistido pela viga se torna igual ao momento de fissuração (momento crítico  $M_{cr}$ ), atuando o acréscimo do comprimento reto ( $l_{df}$ ) além dessa região. Ainda, para vigas simplesmente apoiadas, porém com múltiplas camadas de reforço, a norma permite uma redução do comprimento das camadas adicionais, desde que cada camada sucessiva termine a uma distância de no máximo 150 mm em relação a camada anterior, sendo que para todas, o comprimento ( $l_{df}$ ) deve ser respeitado a partir da região onde se inicia o momento crítico. A Figura 16a ilustra tais regiões.

Em vigas contínuas com uma única camada de reforço, o ACI 440.2R (2017) indica que o comprimento de ancoragem reto deve iniciar na região de inflexão (momento fletor nulo) do elemento, recebendo acréscimo de comprimento de no mínimo  $d/2$  ou 150 mm além dessa região. Em situações de vigas contínuas com múltiplas camadas de reforço, a norma prevê uma redução das camadas adicionais, desde que cada camada sucessiva termine a uma distância de no máximo 150 mm em relação a camada anterior. A Figura 16b ilustra tais regiões.



Após a descrição da metodologia de dimensionamento do reforço por PRF em estruturas de concreto armado, nota-se a importância de demonstrar a metodologia aplicada em um exemplo numérico completo, com finalidade de ilustração. No **Apêndice A**, deste trabalho, é apresentado o memorial de cálculo determinado para o reforço de PRF em viga de concreto armado que será utilizado nos ensaios experimentais deste trabalho.

### 3.3 ANCORAGEM DOS POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS - PRF

A ancoragem do PRF é indicada como uma característica importante dentro do contexto do sistema de reforço nas vigas de concreto armado com resultados convergentes ao aumento de eficiência do compósito, por permitirem maiores resistências ao elemento estrutural, alteração do modo de ruptura e/ou aumento da ductilidade. O desempenho do compósito do tipo PRF usado como mecanismo de reforço é fortemente atrelado as ligações entre o concreto e o sistema de reforço propriamente dito. A transferência das tensões na interface, a seleção do tipo de adesivo e do sistema de reforço adequado, e a caracterização dos modos de ruptura são fundamentais para o entendimento do comportamento estrutural.

#### 3.3.1 Aderência e ancoragem dos Polímeros Reforçados com Fibras

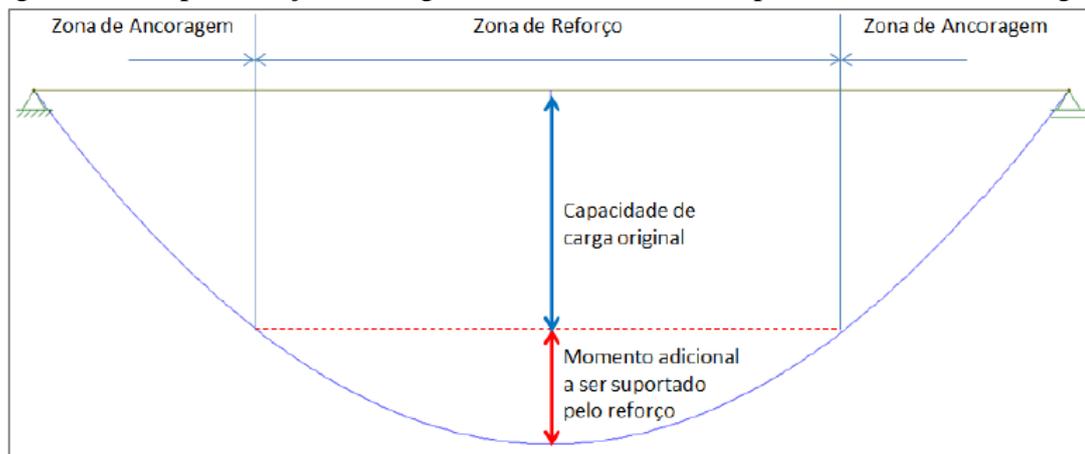
Os estudos serão divididos nos seguintes tópicos: ancoragem, determinação do comprimento de ancoragem, modos ruptura e interação substrato com adesivo/fibra (aderência).

##### 3.3.1.1 Estudo da ancoragem do PRF

A ancoragem do PRF pode ser dividida em dois grupos: ancoragem reta e ancoragem por mecanismo adicionais, denominados de incremento de ancoragem, sendo diferenciadas ao longo do trabalho, quando necessário, ou denominada genericamente por “ancoragem”, caso se refira aos dois grupos.

A ancoragem reta ocorre através de um prolongamento do elemento compósito, ultrapassando a zona de reforço. Tal comprimento reto é necessário para ancorar e resistir a força limite que ocorre na interface e que tem a tendência de arrancar o reforço do substrato de concreto, permitindo que os esforços sejam transmitidos integralmente para a viga. A Figura 17 indica o comportamento gráfico do reforço e da ancoragem reta, através do diagrama de momentos fletores de uma viga fictícia submetida à esforços de flexão.

Figura 17 – Representação do diagrama de momento fletor para as zonas de ancoragem



Fonte: Oliveira (2018)

A ancoragem do PRF pode atuar também com o objetivo de promover uma ruptura mais dúctil do elemento estrutural, segundo observado em diversos estudos na literatura. Em muitos casos, a ancoragem torna-se um fator crítico do dimensionamento do PRF, sendo a situação solucionada no dimensionamento através do uso de deformações abaixo da deformação de ruptura do compósito, reduzindo a eficiência do compósito. Portanto, os incrementos de ancoragem objetivam melhorar as possibilidades de ancoragem do sistema de reforço, permitindo sistemas mais eficientes.

### 3.3.1.2 Estudo da determinação do comprimento de ancoragem

Existem na literatura algumas propostas de metodologias de cálculo do comprimento de ancoragem reto do PRF. Tais valores tem como objetivo vencer as elevadas tensões na interface concreto-compósito para que não haja falhas nas ancoragens e não ocorram descolamentos do PRF ou separação da camada de cobrimento do concreto. Porém, a ancoragem reta tem um valor máximo de comprimento, no qual não há influência na transferência de carga do compósito para a viga caso seja ultrapassado. Tal valor é relacionado ao módulo de elasticidade da fibra, espessura do reforço e resistência do concreto, como pode ser observado na Equação (22), indicada pelo ACI 440.2R (2017) e apresentada no item 3.2 deste trabalho.

Ibell e Darby (2014 apud OLIVEIRA, 2018) propõem um procedimento de cálculo do comprimento de ancoragem relativamente diferente ao apresentado pelo ACI 440.2R (2017). Porém, indicam uma relação matemática interessante: a força máxima de ancoragem, que permite calcular a resistência máxima do reforço antes da falha na ancoragem e com isso aprimorar as técnicas de ancoragem reta ou por incrementos. Os processos de cálculo elaborados pelos autores são indicados nas Equações (23), (24) e (25).

$$l_{t,max} = 0,7 \sqrt{\frac{E_{fd} \cdot t_f}{f_{ck}}} \quad (23)$$

$$k_b = 1,06 \sqrt{\frac{2 - (b_f/b)}{1 + (b_f/400)}} \geq 1 \quad (24)$$

$$T_{k,max} = 0,5 \cdot k_b \cdot b_f \sqrt{\frac{E_{fd} \cdot t_f}{f_{ck}}} \quad (25)$$

Sendo,

$l_{t,max}$  – Comprimento efetivo de ancoragem;

$E_{fd}$  – Módulo de elasticidade da fibra;

$t_f$  – Espessura do reforço;

$f_{ck}$  – Resistência característica de tração do concreto;

$T_{k,max}$  – Força máxima de ancoragem;

$k_b$  – Fator de forma;

$b_f$  – Largura do reforço;

$b$  – Largura da viga reforçada.

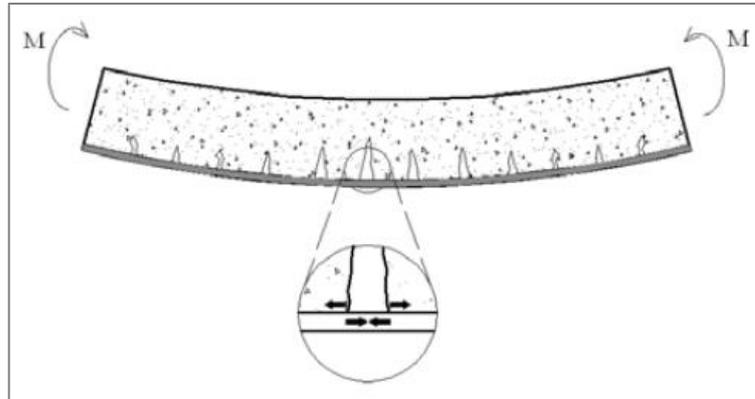
### 3.3.1.3 Estudo do modo de ruptura

Os mecanismos de aderência e ancoragem dos PRF estão fortemente associados aos modos de ruptura, discutidos no início deste capítulo, pois ao analisá-los e identificá-los, obtém-se indícios que expliquem a falha, agindo no sentido de encontrar maneiras de serem evitadas ou retardadas. As rupturas prematuras, estão geralmente relacionadas com as falhas nos mecanismos de aderência e/ou mecanismo de ancoragens do PRF. Quando a força resistente na interface reforço-estrutura é superada pela força atuante na estrutura, observa-se a perda de aderência do sistema, desenvolvendo um processo de falha.

Teng et al. (2002) explicam a sequência desse processo: uma estrutura reforçada com PRF quando submetida à esforços de flexão, permitem o surgimento de fissuras na região tracionada do elemento de concreto. Em tais pontos fissurados, o PRF fica altamente tensionado, transferindo essas tensões para as bordas das fissuras do elemento de concreto. A magnitude dessas tensões na interface, que tem característica cisalhante, são um dos fatores determinantes ao comportamento da ruptura em tal situação. As falhas desse tipo ocorrem normalmente pela propagação das fissuras no concreto de forma paralela ao tecido de PRF e adjacentes à interface concreto-reforço, iniciando no ponto de tensão mais alto e se

desenvolvem até o ponto final do elemento de reforço. Tal situação ocorre quando a resistência à tração é superada antes de se esgotar a capacidade de resistência do adesivo. A Figura 18, esquematiza esse processo.

Figura 18 – Mecanismo de transferência de esforços entre concreto e reforço

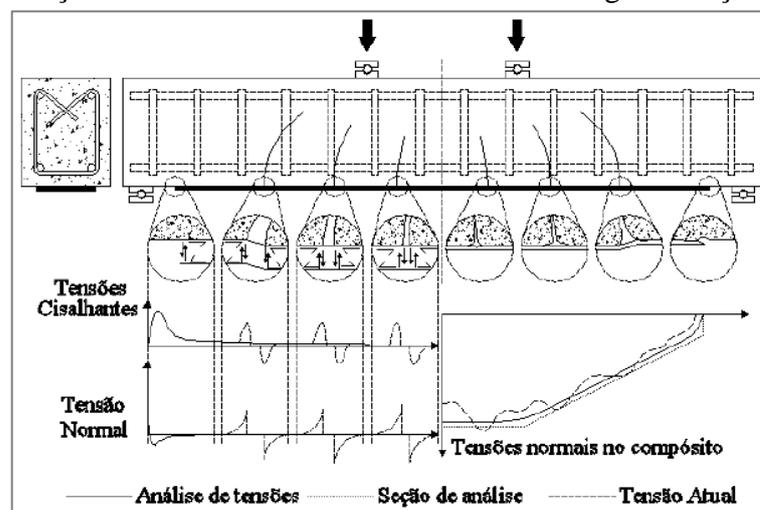


Fonte: Teng et al. (2002)

Meneghetti (2007) complementa ainda sobre a formação das fissuras: indica que há o surgimento de outras fissuras na região do entorno da fissura principal, ao mesmo tempo que altas tensões normais, localizadas nas regiões da extremidade do material de reforço se formam na interface, causando o descolamento do compósito e originando o mecanismo chamado de *peeling-off*. Estas altas tensões de interface, que são de características normais ou cisalhantes e representadas na

Figura 19, são conhecidas por produzirem falhas prematuras no elemento reforçado, quando este não é satisfatoriamente ancorado, influenciando no desempenho do reforço do tipo PRF.

Figura 19 – Distribuição de tensões normais e cisalhantes em vigas reforçadas com PRF



Fonte: adaptado de Buyukozturk et al. (2004)

Ainda com relação aos descolamentos, a autora indica que em teoria, nos elementos reforçados com PRF, o descolamento pode ter origem dentro ou na interface dos materiais que formam o sistema de reforço, com a propagação prevalecendo no caminho que exigir a menor quantidade de energia. Vários fatores podem contribuir para uma ruptura na interface concreto-reforço, sendo que Xiao et al. (2004) indicam algumas delas:

- a) Má distribuição ou a falta de agente ligante (representado pela formulação adesiva, sendo na maioria dos casos uma resina de origem epoxídica com endurecedor adequado);
- b) Existência de fissuras de flexão ou de cisalhamento no concreto;
- c) Presença de agregado graúdo na superfície;
- d) Existência de cargas cíclicas capazes de provocar fadiga.

Outro conjunto interessante de fatores de influência estão relacionados a durabilidade dos materiais envolvidos no sistema compósito do tipo PRF, principalmente no que diz respeito ao adesivo. Fatores como exposição à umidade, a altas temperaturas e a raios ultravioletas podem provocar a degradação da formulação do adesivo, o que se torna pertinente pelo fato do adesivo ser relevante para a criação de uma estrutura reforçada monolítica. O modo de ruptura prematuro por descolamento do compósito (*peeling-off*) teve seu comportamento eficientemente controlado com a adoção de sistemas de ancoragens, como descrito por diversos trabalhos experimentais, Meneghetti (2007).

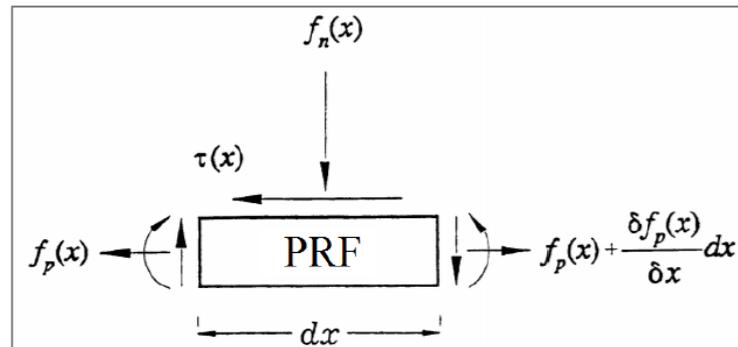
#### 3.3.1.4 Estudo da interação concreto/adesivo/fibra: aderência

A compreensão da interação entre o substrato de concreto e o sistema de reforço com PRF são importantes para o conhecimento do funcionamento das ancoragens das estruturas reforçadas. Ao aplicar o reforço com PRF em um elemento de concreto armado, o comportamento esperado é uma interação mútua entre os elementos da interface, permitindo uma eficiente transferência de esforços do material de reforço para o substrato de concreto e possibilitando o acréscimo de resistência estrutural.

Os estudos observados na literatura para determinações numéricas das tensões interfaciais nos elementos reforçados, adota a consideração de que o material de reforço está sujeito a esforços normais (tração) e cisalhantes, sendo constantes ao longo da espessura da camada de reforço. Essa interação de cargas, tração e cisalhamento, que surgem quando o elemento é solicitado, muitas vezes são insuficientes para a resistência de aderência do material de reforço, permitindo o descolamento prematuro do compósito colado ao substrato, e em muitos casos o fator limitante do dimensionamento do reforço.

Tal descolamento prematuro, promovido pelas elevadas tensões normais (tração) e cisalhantes que ocorrem na interface do concreto e compósito são observados na Figura 20, sendo  $\tau(x)$  referente ao cisalhamento e  $f_p(x)$  ao normal (tração).

Figura 20 – Solicitações atuantes no reforço do PRF colados ao substrato de concreto



Fonte: Malek et al. (1998)

A origem dos descolamentos prematuros gerado pelas altas tensões normais (tração) e cisalhantes que atuam na camada adesiva (região interfacial), podem ser justificadas por:

- Solicitação cisalhante: atuam pela diferença de deslocamento longitudinal entre o topo e a base do adesivo. Ao entrarem em carga, esses esforços cisalhantes são gerados pelas deformações axiais, por flexão e cisalhamento;
- Solicitação normal (tração): atuam pela compatibilidade de deformações entre o substrato de concreto e o material de reforço. Ao entrarem em carga esses esforços normais são gerados pelas deformações de cisalhamento e flexão.

Nos estudos experimentais e teóricos de Chen e Teng (2001) e Yuan et al. (2004), há sugestões dos parâmetros que interferem no comportamento da resistência de aderência, sendo eles: comprimento de ancoragem; resistência do concreto; rigidez axial do compósito; relação entre largura do PRF e do concreto; rigidez e resistência do adesivo.

Teng et al. (2002) afirmam que o comprimento de ancoragem é um dos fatores mais importantes na caracterização da resistência da aderência e conseqüentemente no comportamento da ligação. Outro fator importante refere-se à resistência do substrato de concreto e do adesivo: em resistência à compressão do concreto de aproximadamente 25 MPa, a ruptura ocorre em uma fina camada do material, adjacente ao compósito; em adesivos de baixa resistência ou substratos caracterizados com resistência à compressão superior a 50 MPa, permite uma ruptura entre a interface concreto-reforço.

A ocorrência efetiva da transferência dos esforços entre o material de reforço e o concreto é fundamental para que o PRF permita aumentar, de forma significativa e eficaz, a

capacidade de carga de um elemento estrutural reforçado, logo, a aderência (resistência de ligação) deve ser elevada e/ou suficiente para que tal transferência possa ocorrer satisfatoriamente. Porém, de acordo com Ye (2001) uma ligação do tipo rígida na interface geralmente induz a uma falha repentina e precoce, limitando a capacidade de absorção de energia; entretanto, caso a ligação seja fraca, permite um mecanismo de endurecimento com ruptura longitudinal na camada de adesivo. Para ambos os tipos de ligação, entende-se que estas são necessárias para a transferência de tensões.

A finalidade é encontrar mecanismos que garantam que o conjunto concreto-reforço trabalhe como uma estrutura consolidada – monolítica, única – logo o uso de uma formulação adesiva que garanta a transmissão eficiente das tensões entre os componentes é essencial. Intuitivamente, pressupõem que quanto maior a espessura do adesivo, melhor a eficiência de transmissão do sistema, porém, devido a propriedade do módulo de elasticidade do adesivo ser menor do que a do elemento de reforço do compósito (fibra) e do concreto, de acordo com Meneghetti (2007), deve-se minimizar a espessura do adesivo.

Outra análise intuitiva que frequentemente ocorre é em relação ao aumento do comprimento de ancoragem com o objetivo de aumento de resistência de aderência até que seja esgotada a capacidade resistente do compósito. Teng et al. (2002) elucidam que a resistência de aderência não aumenta, necessariamente, com o aumento do comprimento de ancoragem, pois ao se iniciar o processo de descolamento do reforço, ocorre a continuação deste processo ao longo de todo comprimento, podendo fazer o compósito não alcançar a máxima tensão de tração, independentemente do comprimento de ancoragem.

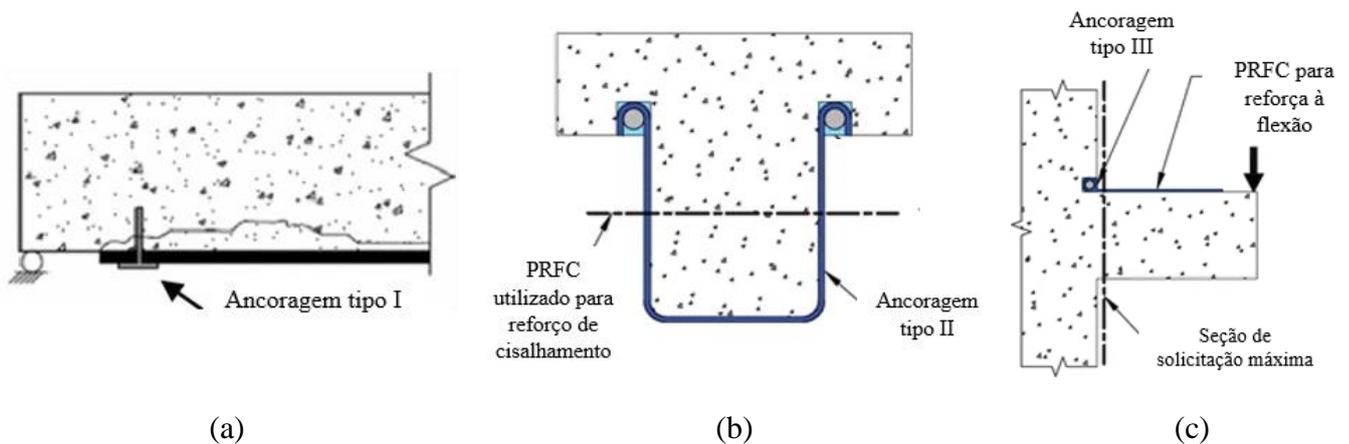
A ancoragem reta é descrita por diversos autores como fundamental para o resultado do reforço estrutural e a aplicação em todas as estruturas é praticamente um consenso entre os pesquisadores. Além disso, o estudo de Meneghetti (2007) converge para o mesmo raciocínio: o uso de ancoragem adicional no final do material do sistema de reforço com PRF atrasa ou previne as rupturas prematuras. Em ambos os casos permitem como resultado a integralidade do elemento, permitindo respostas eficazes as cargas que atuam na estrutura.

### 3.3.2 Tipos de ancoragem dos Polímeros Reforçados com Fibras

Ao longo das últimas décadas, diversos estudos propuseram-se a elaborar metodologias de incremento de ancoragem e investigar a sua eficiência. Mesmo dentro de um tipo de metodologia, encontra-se na literatura variações da aplicação original, influenciadas pelos esforços estruturais existentes e pela disposição do elemento a ser reforçado (restrições geométricas, limitações de instalação e características de transferência de tensões).

Para Grelle e Sneed (2013), a ancoragem, de forma geral, serve para alguns propósitos: (I) prevenir ou retardar a abertura de fissuras interfaciais, comum nas extremidades da estrutura; (II) aumentar a transferência de esforço cortante interfacial através do aumento da área pela qual o esforço é transferido e (III) fornecer um mecanismo de transferência de cargas em casos nos quais não há comprimento de ancoragem disponível além da seção mais solicitada. A Figura 21 ilustra possíveis tipos de ancoragens para as três possibilidades citadas acima.

Figura 21 – Representações dos propósitos de ancoragem do tipo: (a) I; (b) II e (c) III



Fonte: adaptado de Grelle e Sneed (2013)

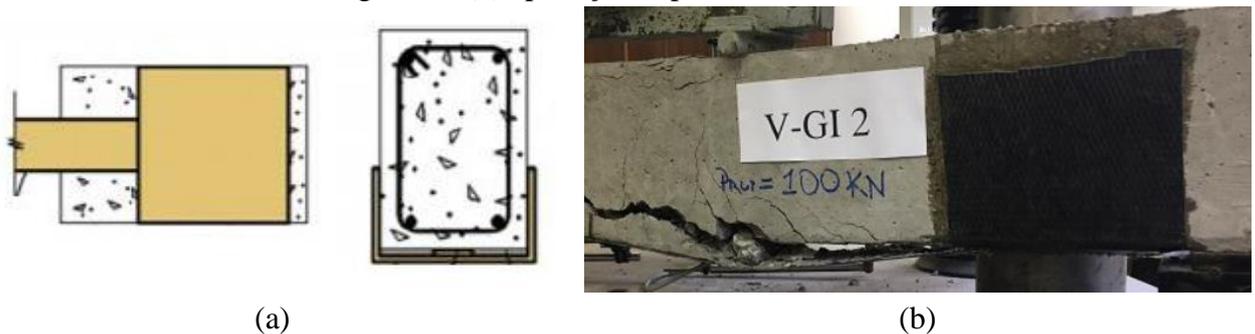
A ancoragem pode ser observada através de duas maneiras: **ancoragem reta** e por **mecanismo adicionais**. A primeira ocorre pela extensão do comprimento do sistema de reforço, como foi apresentada e discutida no item de dimensionamento do PRF deste trabalho, porém em determinados casos, entendido como insuficientes para o controle de rupturas prematuras de estruturas reforçadas. Já a segunda se propõe solucionar tal insuficiência, permitindo uma melhora no desempenho da ancoragem e consequentemente do sistema de reforço como um todo, através da inserção de componentes ou criação de mecanismos na viga a ser reforçada. A seguir, serão indicadas e discutidas as principais características de metodologias de incremento de ancoragem encontradas na literatura.

#### a) Laços em “U”

A metodologia, também conhecida como “*U wrapping*” é composta pela aplicação de mantas de PRF coladas transversalmente ao reforço, nas duas extremidades da viga, de forma a criar um mecanismo de envolvimento das faces laterais e face inferior do elemento, ficando em formato de “U”. Grelle e Sneed (2013) afirmam que essa espécie de semiconfinamento ou aperto, é conhecido como “*clamping*” e confere a capacidade de ancoragem ao sistema.

Entre as vantagens atribuídas a essa metodologia, indica-se a compatibilidade entre os materiais do reforço e da ancoragem adicional, ambos de PRF, evitando potenciais corrosões. Entretanto, o processo de instalação no elemento a ser reforçado quando ele é de geometria irregular, de difícil acesso as faces laterais ou ao elemento como um todo, é tratada como uma desvantagem. A Figura 22 ilustra o mecanismo.

Figura 22 – Representação do mecanismo de ancoragem por “Laços em U”: (a) esquema gráfico; (b) aplicação experimental



Fonte: (a) adaptado de Biscaia et al. (2014); (b) Oliveira (2018)

Estudos de Ferrari et al. (2002) indicam que essa metodologia é eficiente para evitar descolamento prematuro do reforço em manta de PRF, atingido a capacidade máxima do reforço. Nos trabalhos de Smit e Teng (2003 apud Kalfat et al., 2013) foi observado mudanças no modo de ruptura devido à fissuração intermediária em vigas de concreto armado e não ocorrência de descolamento no final do reforço.

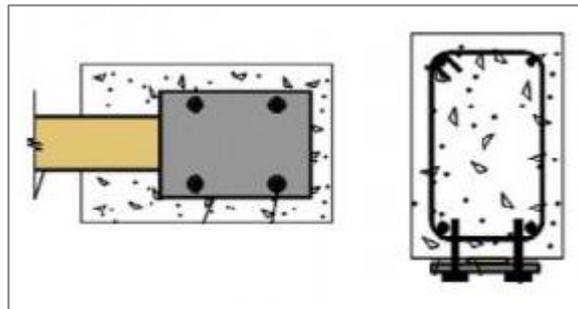
Ferreira et al. (2018) indicam que maiores comprimentos da largura do Laço em U favorecem melhores resultados de ancoragem, com maior resistência à flexão de vigas. Com relação ao posicionamento do incremento, este deve ocorrer nas extremidades do reforço, por permitir que o mecanismo de ancoragem possa ser mais efetivo, com maiores deformações, e exercendo influência na mudança do comportamento prematuro da falha. Entretanto, para os pesquisadores, o modo de ruptura para esse tipo de metodologia ainda pode ser considerado frágil, independentemente das dimensões e posicionamentos do laço em U.

Mostofinejad et al. (2019) pesquisaram o uso desta metodologia buscando melhorar o comportamento da técnica através da adoção de laço em U, porém com tramas bidirecionais tecidas manualmente, denominado “*warp and woof strap*” (WWS), permitindo aumento da capacidade em 32% e da ductilidade em 80%, comparado as vigas com laço em U tradicionais.

### b) Chapas de metal parafusadas

A metodologia de incremento de ancoragem é uma das primeiras a serem estudadas, segundo Kalfat et al. (2013 apud OLIVEIRA, 2018), apresentando diversas propostas de variações e investigações da influência da geometria, posição e quantidade de parafusos aplicados no material de PRF. Consiste na colagem de chapas metálicas no reforço de PRF e parafusadas ao substrato de concreto, com objetivo de o esforço ser transmitido do reforço à chapa metálica, através da interface de contato entre os dois tipos de material, e por fim serem transmitidos ao elemento de concreto armado por meio da ligação dos parafusos. A Figura 23 ilustra o mecanismo descrito.

Figura 23 - Representação do mecanismo de ancoragem por “Chapas de metal parafusadas”



Fonte: Biscaia et al. (2014)

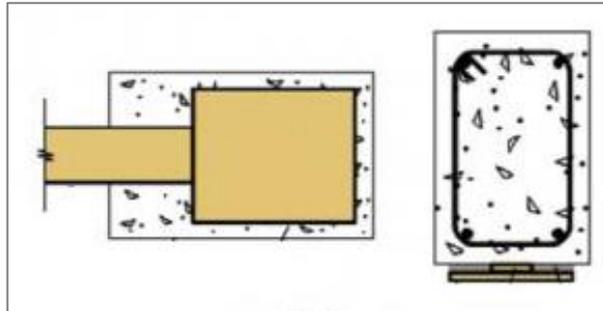
Observa-se nessa metodologia uma preocupação importante com relação a corrosão eletrolítica na ancoragem devido ao uso de materiais metálicos (chapas e parafusos) e ainda mais importante se a chapa e os parafusos forem de metais diferentes. Logo, há necessidade de analisar o ambiente no qual a estrutura a ser reforçada está inserida ou exposta, devendo tomar as precauções necessárias para mitigar os efeitos da corrosão.

Oliveira (2018) indica que a metodologia de ancoragem por chapas metálicas coladas e parafusadas permitiram aumento de ductilidade ao elemento reforçado, sendo essa uma característica importante ao comportamento do sistema, devido à natureza intrínseca de ruptura frágil do compósito de PRF, conforme discutido o longo do trabalho. Nesse estudo, o autor indica que os elementos ancorados através da técnica de chapas metálicas coladas e parafusadas apresentaram perda de ductilidade entre 40% a 75% enquanto que os elementos reforçados sem mecanismos de ancoragem adicional sofreram perda de ductilidade entre 70% a 80%. Tal comportamento foi atribuído ao sistema de ancoragem adicional de chapas metálicas coladas e parafusadas por proporcionar um descolamento gradual do reforço ao longo do tempo.

c) Colagem de mais de uma camada de PRF sobre o reforço

A metodologia consiste na colagem de uma nova camada de material compósito, através da sobreposição deste material adicional ao reforço previamente instalado. As fibras dessa camada adicional devem estar orientadas perpendicularmente à direção da força no material de reforço, de acordo com Oliveira (2018) e de mesmo material utilizado no reforço, logo evitando processos corrosivos indesejados. A Figura 24 ilustra o mecanismo descrito.

Figura 24 - Representação do mecanismo de ancoragem por “Colagem de manta de fibra”



Fonte Biscaia et al. (2014)

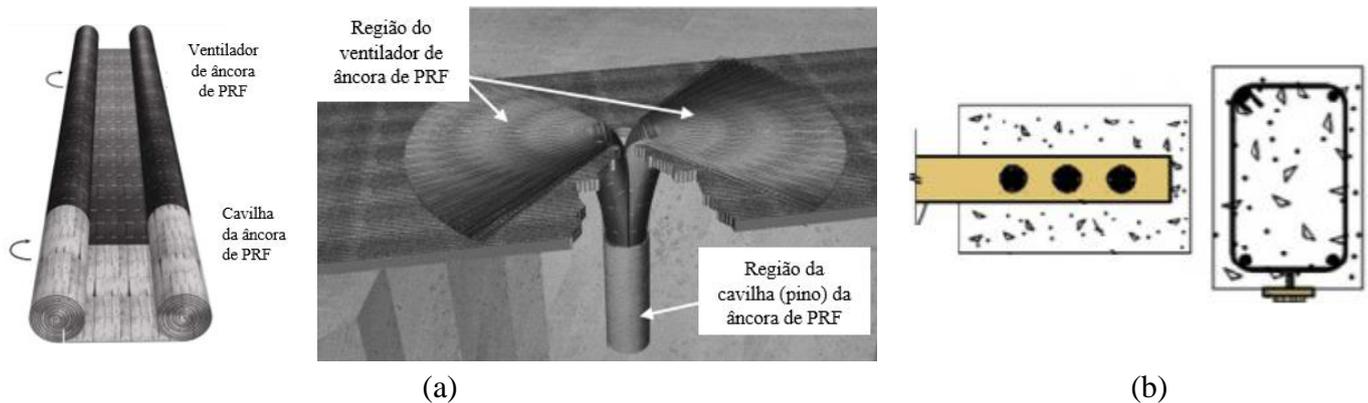
Apesar de ser considerado como uma das metodologias de ancoragem adicional mais simples e fáceis de aplicação, observa-se na literatura que essa técnica é a menos eficiente e sem resultados consistentes quanto ao uso, podendo ser justificado por não proporcionar um efetivo confinamento (ou aperto), seja total ou parcial para o reforço de PRF.

d) Ancoragem de PRF (parafuso spikes)

A metodologia consiste em enrolar (previamente) pedaços de mantas de PRF de maneira a formar pequenos cilindros, em formato de parafuso para que parte seja introduzida no interior do concreto, através de furos previamente posicionados, e o restante ao atravessar o material de reforço a flexão é aderido ao substrato reforçado.

O parafuso *spike*, nome encontrado na literatura, é formado por um cilindro de PRF, sendo que a região inserida recebe o nome de “*anchor dowell*” (cavilha da âncora, em uma tradução livre) e a região que permanece fora do furo recebe o nome de “*anchor fan*” (leque de âncora, em tradução livre), recebendo uma camada de resina epóxi para ser ligada ao reforço de PRF e concluir a ancoragem. A Figura 25 ilustra o mecanismo descrito.

Figura 25 – Representação da metodologia: (a) regiões do parafuso; (b) aplicação em viga



Fonte: (a) Smith et al. (2011); (b) Biscaia et al. (2014)

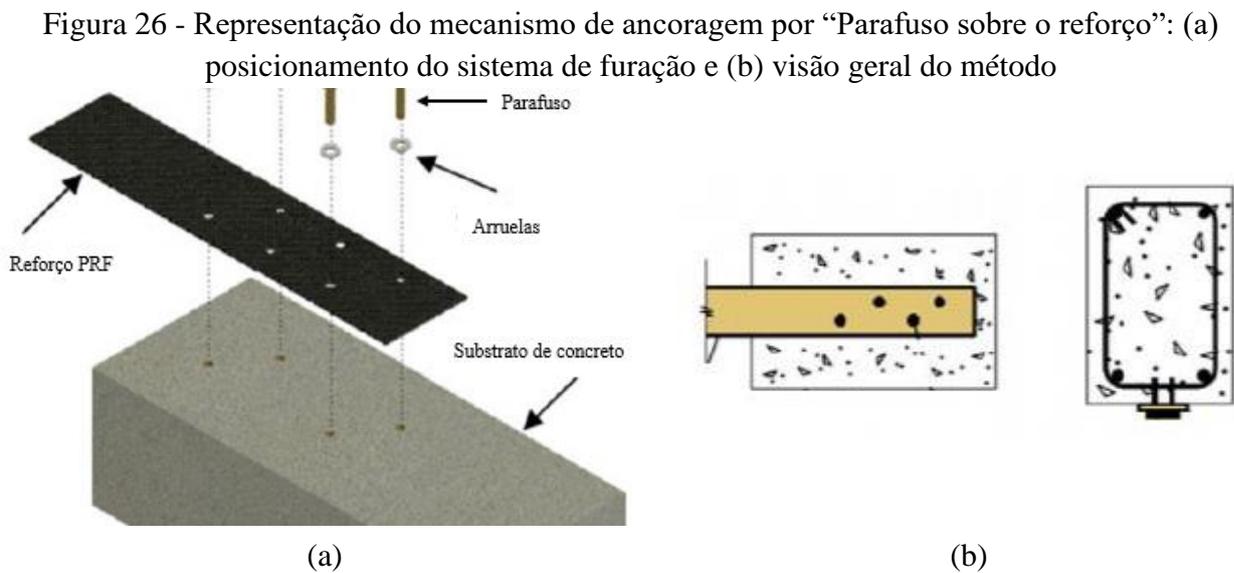
Essa técnica de incremento de ancoragem é vantajosa, pois podem ser utilizados como incrementos de ancoragem em diversos elementos estruturais que serão reforçados, como em vigas, pilares e lajes. Além disso, por serem do mesmo material que o reforço, evitam problemas relacionados à corrosão e de simples produção.

Smith et al. (2011) identificou que apenas na região de cisalhamento, onde o momento fletor é variável no ensaio de flexão a quatro pontos, há influência dos parafusos *spike* para o comportamento do reforço. Os pesquisadores identificaram que parafusos mais espaçados reduziram a taxa de propagação de trincas de descolamento e permitiram deflexões mais altas, apesar de limitaram os acréscimos de carga. Além disso, determinaram que a configuração dos parafusos com leque de âncora com maior teor de fibra e posicionadas mais perto da região do pico de momento de flexão, somados a parafusos com leque de âncora de menor teor de fibra e posicionados nas extremidades do PRF, produziram o maior aumento na resistência com capacidade de deflexão significativa.

Zaki et al. (2020) realizaram o estudo de incremento de ancoragem com parafusos *spike* em cinco vigas do tipo “T” de concreto armado, utilizando como variáveis as quantidades de parafusos, diâmetro e espaçamento entre os elementos. Todas os parafusos foram aplicados em região de momento fletor variável, para o ensaio de flexão a quatro pontos. Como resultado, os autores obtiveram a eficiência do método de ancoragem para todas as configurações, indicando que apenas 1 parafuso em cada extremidade tem comportamento pouco significativo no reforço; que o espaçamento ente os elementos são essenciais, mas que não podem ser de grandes dimensões, pois perdem eficiência e que o uso de 4 parafusos *spike* atingiu comportamentos semelhantes a metodologia de laço em U.

e) Parafusos diretamente sobre o reforço

A metodologia é similar a duas outras técnicas citadas acima (“Chapa de metal parafusada” e “Ancoragem de PRF – *spikes*”) porém não utiliza chapas metálicas e os parafusos não são compostos por mantas poliméricas. Logo, a técnica consiste em utilizar apenas parafusos metálicos aplicados diretamente sobre o reforço de PRF, perfurando o reforço e o substrato de concreto. Existem na literatura estudos propondo algumas aplicações diferentes com a presença ou ausência de arruelas e variações de espaçamento/quantidade de parafusos. A Figura 26 ilustra o mecanismo descrito.



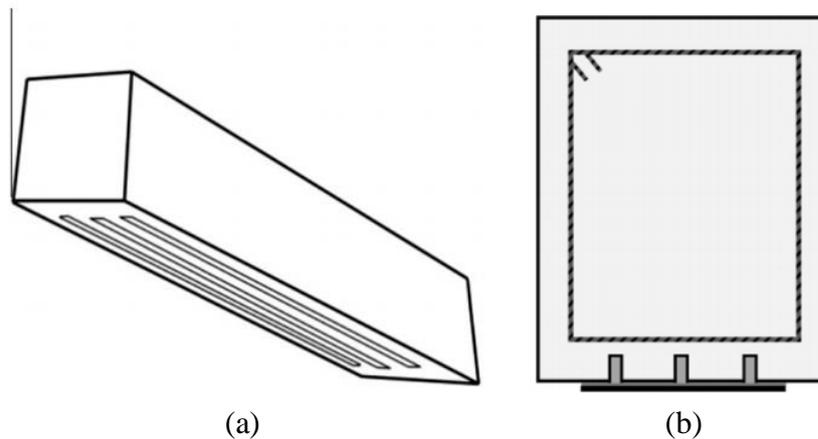
Fonte: (a) adaptado de Oliveira (2018) e (b) Biscaia et al. (2014)

#### f) Método EBROG - *Externally Bonded Reinforcement on Grooves*

A metodologia de incremento de ancoragem utilizando ranhuras, conhecido como EBROG, é relativamente recente na literatura internacional. É uma técnica de reforço do tipo EBR, mas se apropria dos benefícios que a técnica NSM apresenta para incrementar a ancoragem do sistema de colagem externa do material de PRF, pelo aumento da área de aderência.

A proposta desse tipo de metodologia é realizar ranhuras longitudinais na face inferior da viga de concreto armado a ser reforçada, para serem preenchidas com resina epóxi e em seguida, receber o sistema de reforço de PRF, cobrindo tais ranhuras. A Figura 27 ilustra o mecanismo descrito.

Figura 27 - Representação do mecanismo de ancoragem do tipo EBROG



Fonte: Mostofinejad e Shameli (2012)

Em seu trabalho Mostofinejad e Shameli (2011) avaliaram o comportamento de vigas de concreto armado de 120 x 140 x 1000 mm (largura, altura e comprimento), reforçadas à flexão e com incremento de ancoragem com três ranhuras de dimensões 8 x 10 x 850 mm (largura, profundidade e comprimento). Para o estudo, obteve-se crescimento de cargas de até 188% em comparação a vigas não reforçadas e de 107% em comparação a vigas reforçadas sem incremento de ancoragem. A pesquisa seguiu investigando o comportamento do método com duas e três camadas de reforço com PRF, permitido maior eficiência do método.

Hosseini e Mostofinejad (2013) avaliaram o método EBROG através de ensaios de arrancamento em corpos de prova de concreto reforçados com PRF, indicando que o método pode eliminar o descolamento prematuro, alterar os modos de falha e permitir aumento de até 55,5% da capacidade em relação a elementos reforçados sem incremento de ancoragem. O trabalho indicou ainda que a realização de duas ranhuras com 5 mm de largura e 10 mm de profundidade aumenta em até em até 62,7% a capacidade resistente do elemento.

Tajmir-Riahi et al. (2019) avaliaram o método EBROG com uma única ranhura de 5 mm de largura e 10 mm de profundidade, através de ensaios de arrancamento em corpos de prova de concreto reforçados com PRF, indicando aumento de até 67,5 % em comparação a elementos reforçados sem incremento de ancoragem. Investigando a dimensão da ranhura de 10 x 10 mm, obteve-se aumento de 61% e em corpos de prova com ranhura de 5 x 5 mm, obteve-se aumento de apenas 42,2%, sendo a pior configuração do estudo dos autores.

Sanginabadi et al. (2022a) observaram todos os estudos encontrados na literatura, relacionados ao método EBROG e elaborados até o presente momento, confirmando a eficácia desse tipo de incremento de ancoragem. Além disso, indicam que para o método EBROG, a

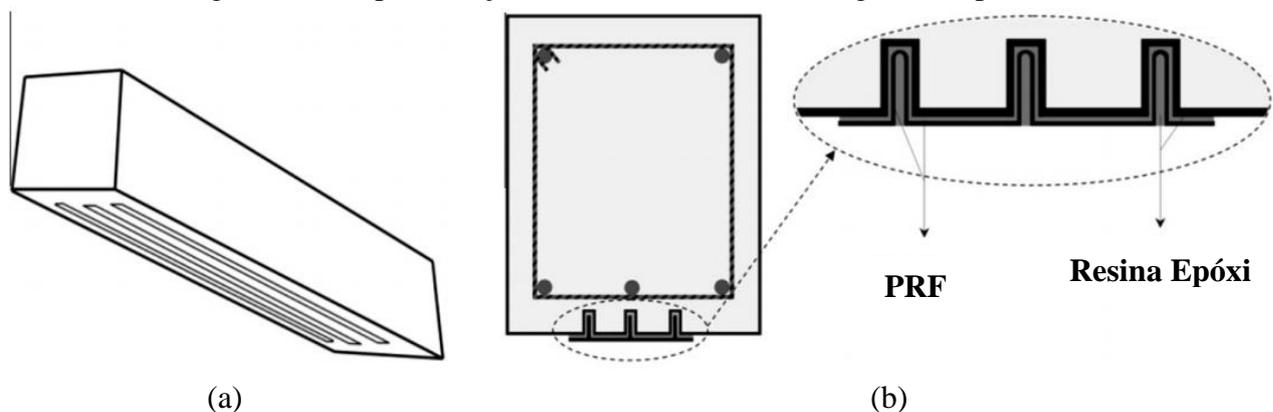
configuração ideal para ranhura é aquela que consiste em dimensões de  $5 \times 5$  mm, largura e profundidade, espaçadas por 15 mm nas situações com mais de uma ranhura.

g) Método EBRIG - Externally Bonded Reinforcement in Grooves

A metodologia de incremento de ancoragem utilizando ranhuras, conhecido como EBRIG, é relativamente recente na literatura internacional. A técnica mescla a metodologia EBROG e NSM, uma vez que utiliza ranhuras longitudinais na superfície reforçada, aplicando o PRF em contato direto com o perímetro interno destas ranhuras. Após realizar as ranhuras longitudinais no substrato de concreto reforçado, é aplicada uma pequena quantidade de resina epóxi, seguida do reforço de PRF de forma a contornar a totalidade do perímetro das ranhuras, finalizando a impregnação da manta com uma nova camada de resina, removendo o excesso.

Mostofinejad e Shameli (2013) afirmam que uma vez que a metodologia EBRIG garante aumento da área de contato entre o FRP e a superfície de concreto, comparativamente ao método EBROG, a técnica resulta significativo desempenho estrutural, modificando a iniciação e propagação de trincas, além do aumento dos limites de carregamento último. A Figura 28 ilustra o mecanismo descrito.

Figura 28 – Representação do mecanismo de ancoragem do tipo EBRIG



Fonte: Mostofinejad e Shameli (2012)

Mostofinejad e Shameli (2013) realizaram em seus estudos, ranhuras de dimensões  $850 \times 7 \times 10$  (medidas em milímetros), respectivamente de comprimento, largura e profundidade em vigas de concreto armado de comprimento total de 1000 mm, indicando incremento de carga de 198% comparado a vigas sem reforço e de 120% em relação a vigas com o mesmo tipo de reforço, porém sem incremento de ancoragem. A pesquisa seguiu investigando o comportamento do método com duas e três camadas de reforço com PRF, permitindo maior eficiência do método.

Sanginabadi et al. (2022b) observaram todos os estudos encontrados na literatura, relacionados ao método EBRIG e elaborados até o presente momento, confirmando a eficácia desse tipo de incremento de ancoragem ao permitirem aumento de carga última e deslocamento, alteração do modo de ruptura prematuro e ductilidade, comparados as vigas não reforçadas e as que possuem reforço, porém sem incrementos de ancoragem.

Observa-se que as metodologias de incremento de ancoragem EBROG e EBRIG tem seus resultados descritos na literatura como eficientes para alterarem o modo de ruptura da estrutura, permitido acréscimo de cargas ao elemento e proporcionando maior eficiência do reforço. Entretanto, devido a metodologia construtiva descrita para os dois processos serem baseadas em ranhuras na região de cobrimento do concreto, deve ser observada a existência suficiente do cobrimento de armadura na estrutura, para que as ranhuras longitudinais sejam realizadas sem interferência nas armaduras de flexão.

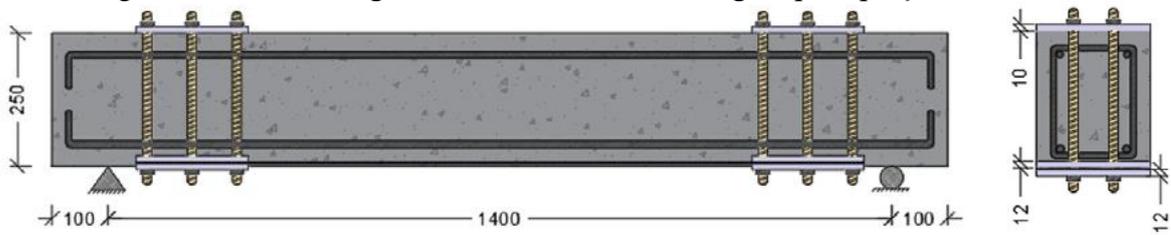
#### h) Outras técnicas de incremento de ancoragem observadas

Ao analisar os trabalhos encontrados na literatura, observa-se outras propostas de metodologias de incremento de ancoragem, obtidas a partir de variações de alguma metodologia apresentada ou são recentes e inovadoras, precisam de mais reprodução em outros centros acadêmico para validação ou são de execução complexa e restrita a determinadas configurações estruturais. Dessa forma algumas dessas propostas serão apresentadas a seguir.

#### I) Pinças metálicas (ou gravatas metálicas)

A metodologia de incremento de ancoragem conhecida como “pinças” metálicas (ou *mechanical clamps*) é bastante usada para a técnica de reforço NSM, mas sem impeditivos de ser utilizada também na técnica EBR. Consiste em aplicar placas metálicas nas faces superior e inferior do elemento a ser reforçado, unindo tais elementos por barras laterais, através da extremidade da estrutura ou por dentro da seção do concreto, permitindo o incremento de ancoragem do reforço de PRF. Tal metodologia pode ser complexa de execução em estruturas cotidianas devidos interferências arquitetônicas/estruturais (principalmente com lajes) para instalação desse sistema. A Figura 29 ilustra a metodologia descrita.

Figura 29 – metodologia de incremento de ancoragem por “pinças” metálicas

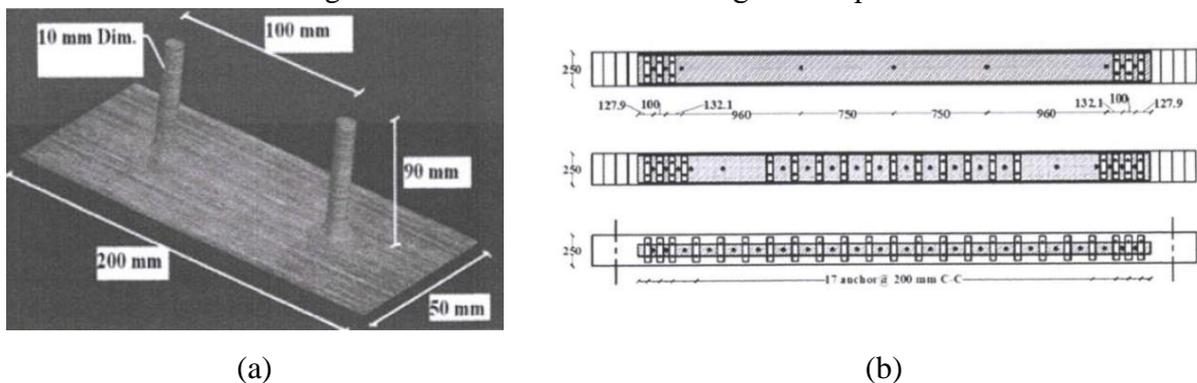


Fonte: Obaidat, Barham e Aljarah (2020)

## II) Ancoragem em formato $\pi$

A ancoragem do tipo “ $\pi$ ” pode ser entendida como uma variação do incremento de ancoragem por chapa de metálica parafusada. Consiste em um mecanismo formado por uma placa ligada a dois pinos paralelos, sendo o sistema fabricado inteiramente de PRF. Pode ser inserido sobrepondo a camada de reforço de PRF, em diversas regiões da estrutura reforçada, através de dois furos no substrato de concreto, para encaixe dos pinos. Essa técnica de incremento de ancoragem é representada na Figura 30.

Figura 30 – Incremento de ancoragem do tipo  $\pi$



(a)

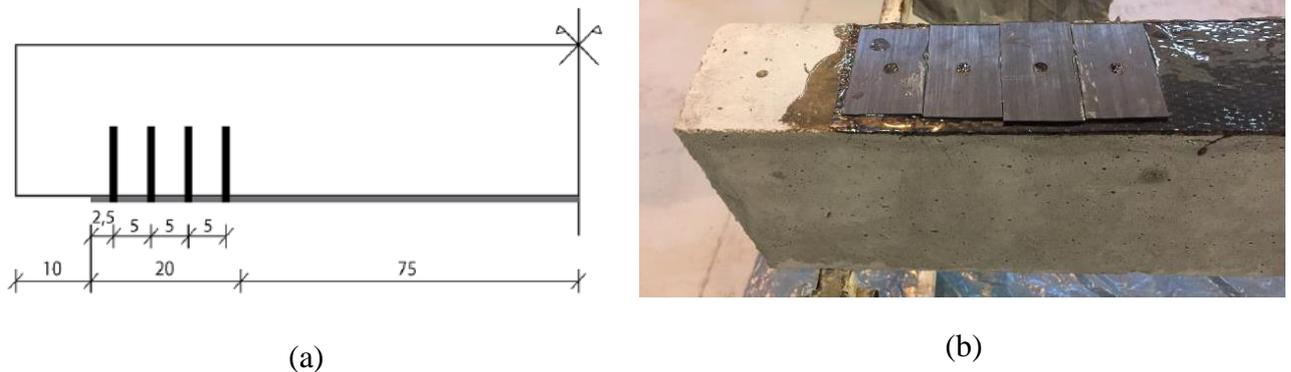
(b)

Fonte: Mostafa e Razaqpur (2013)

## III) Chapas de laminado e parabolt

A proposta de metodologia realizada por Oliveira (2018) foi a de realizar o incremento de ancoragem através de laminados de PRFC fixados com parafusos metálicos do tipo parabolt, que segundo o autor, trata-se de uma proposta ainda não verificada na literatura. Porém, os resultados obtidos indicaram modo de ruptura prematura devido escorregamento do reforço, além de baixo acréscimo de carga de ruptura devido ao incremento de ancoragem, comparativamente a técnica de laço em U, desenvolvida no trabalho do autor. A Figura 31 ilustra a metodologia descrita.

Figura 31 – Ensaio (a) representação esquemática e (b) aplicação de incremento de ancoragem

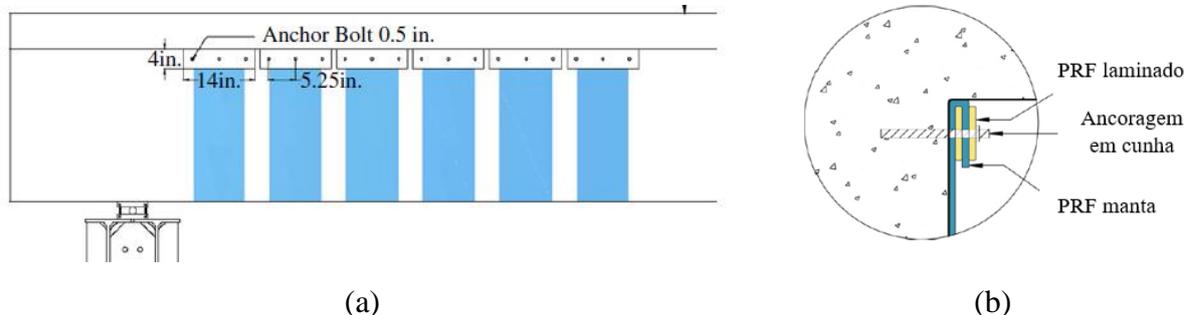


Fonte: Oliveira (2018)

#### IV) Combinação de técnicas: laço em U e chapas metálicas parafusadas

Observa-se na literatura o uso combinado das técnicas Laço em U e chapas PRF aparafusadas, como pode ser observado na Figura 32. Tal proposta de incremento de ancoragem é citado na literatura para situações de reforço em vigas que necessitam de contribuição aos esforços de cisalhamento, usando PRF.

Figura 32 – Representação da metodologia (a) corte esquemático e (b) detalhe construtivo

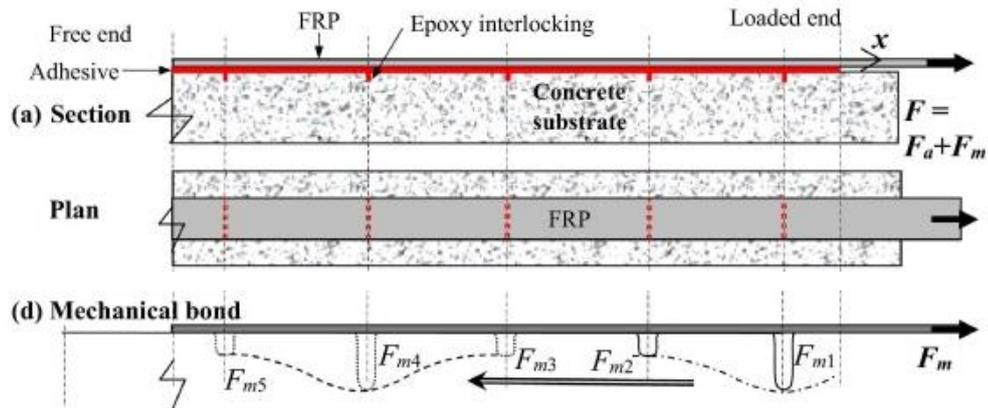


Fonte: Belarbi, Bae e Brancaccio (2011)

#### V) Nervuras do tipo intertravamento epóxi

Jiang et al. (2018) introduziram um novo método chamado intertravamento epóxi, baseado em métodos de ranhura para melhorar o desempenho da ligação. Semelhante ao método EBROG, este método indica a presença de ranhuras ou pinos produzidas em seções transversais da superfície que recebe o reforço de PRF. Segundo os autores, os resultados analíticos indicam que o aumento da profundidade do sulco aumentou a contribuição das superfícies de concreto responsáveis pela resistência dos sulcos preenchidos e, conseqüentemente, o comportamento de carga-deslizamento foi melhorado. A Figura 33 indica uma representação da metodologia.

Figura 33 – Metodologia de incremento de ancoragem por intertravamento epóxi



Fonte: Jieng et al. (2018)

### 3.3.3 Análise eficiência dos métodos de incremento de ancoragem

Das principais metodologias descritas acima, busca-se na literatura, trabalhos de diferentes autores a fim de indicar similaridades de resultados, investigando para os métodos de incrementos de ancoragem estudados, aqueles com melhores ou piores comportamentos para o reforço de PRF. Buscam-se ensaios semelhantes: vigas de concreto armado, bi apoiadas, submetidas à esforços de flexão, com aplica o de uma camada de reforço, pela técnica EBR. Porém, como se tem conhecimento que existem diferenças, principalmente quanto   dimensão da viga e fabricantes dos materiais os resultados serão padronizados, permitindo compara es através das porcentagens de incremento de carga obtida através da viga referência dos respectivos estudos. Apresentam-se, portanto, os resultados da carga de ruptura pela média das: vigas testemunho e vigas com incremento de ancoragem, nomeadas arbitrariamente para compor o Quadro 2, como VT e VA, respectivamente.

Quadro 2 – Resultados de estudos de incremento de ancoragem de PRF

Metodologia de Incremento de Ancoragem	Autor (ano)	Qnt. de Vigas	Média dos resultados (Continua)			
			Carga ruptura (kN)	Incremento de Carga (Ruptura)	Modo de Ruptura	Avalia�o Incremento de Ancoragem (b)
Laços em U	Oliveira (2018)	VT = 2 VA = 2	VT = 75,7 VA = 95,5	26,2%	Separa�o camada de concreto	Parcialmente eficiente
	Ferrari, Padaratz e Loriggio (2002)	VT = 2 VA = 2	VT = 38 VA = 75	97,4 %	Ruptura do PRF	Eficiente
Chapa metálica parafusada	Ferrari, Padaratz e Loriggio (2002)	VT = 2 VA = 2	VT = 38 VA = 63	65,7%	Ruptura do PRF	Eficiente

Metodologia de Incremento de Ancoragem	Autor (ano)	Qnt. de Vigas	Média dos resultados			
			Carga ruptura (kN)	Incremento de Carga (Ruptura)	Modo de Ruptura	Avaliação Incremento de Ancoragem (b)
Parafuso spike	Zhang e Smith (2016)	VT = 1 VA = 1	VT = 15,8 VA = 36,1	128%	Descolamento PRF	Parcialmente eficiente
Parafuso metálico	Yazdani, Aljaafreh e Beneberu (2019)	VT = 1 VA = 1	VT = 28,7 VA = 32,3	12,5%	Descolamento PRF	Parcialmente eficiente
EBROG (a)	Mostofinejad e Shameli (2011)	VT = 2 VA = 2	VT = 9,3 VA = 19,3	107%	Ruptura do PRF	Eficiente
	Mostofinejad e Shameli (2012)	VT = 2 VA = 2	VT = 8,4 VA = 20,0	139%	Ruptura do PRF	Eficiente
EBRIG (a)	Mostofinejad e Shameli (2012)	VT = 2 VA = 2	VT = 8,4 VA = 20,3	142%	Ruptura do PRF	Eficiente

(a) análise para vigas com 1 ranhura longitudinal

(b) avaliação do aumento de carga com incremento de ancoragem e controle do modo de falha

Fonte: elaborado pelo autor

Algumas observações sobre o Quadro 2 acima são indicadas a seguir:

- Zhang e Smith (2016) realizam várias configurações e posicionamentos do parafuso spike em seus ensaios. Os resultados da tabela acima referem-se à configuração que garantiu maior incremento de carga apresentadas em seu artigo;
- Mostofinejad e Shameli (2011) apresentam em seu artigo, o estudo da quantidade de ranhuras (1, 2 ou 3) para o método EBROG, indicando aumento da carga de ruptura e deslocamento, com o aumento do número de ranhuras;
- Mostofinejad e Shameli (2012) apresentam em seu artigo, o estudo da quantidade de ranhuras (1, 2 ou 3) para o método EBRIG, indicando aumento da carga de ruptura e deslocamento, com o aumento do número de ranhuras. Realizam comparações com o método EBR, NSM e EBROG, indicando melhores resultados de carga última e deslocamento para o método EBRIG, independentemente e todos os casos de quantidades de ranhuras.

### 3.4 ANÁLISE DE DUCTILIDADE EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO

A ductilidade é um fator de considerável importância dentro das questões de segurança estrutural, uma vez que permite a estrutura atingir níveis críticos de estabilidade sem que haja colapso abrupto, retardando falhas. Permite inicialmente evacuações, intervenções ou outras

medidas de curto prazo para a segurança dos usuários e das adjacências, dentro do contexto da edificação e em um segundo momento, ações que interrompam o processo de colapso ou que, sendo este inevitável, possa ser controlado.

Naaman e Jeong (1995) definem essa característica como a capacidade do elemento estrutural permitir deformações inelásticas sem a perda de sua capacidade resistente, atingido a ruptura após um considerável acúmulo de energia inelástica de deformação. Logo, pode ser quantificada e avaliada por meio de índices adimensionais que mensuram esse comportamento.

Nos elementos de concreto armado, o concreto tem elevada resistência à compressão apesar de ser um material frágil, ou seja, que não permite atingir elevada deformação, quando submetido aos carregamentos. Assim, a ductilidade desses elementos é garantida pelas deformações inelásticas da armadura longitudinal, fazendo com que o sistema, ao trabalhar em conjunto, tenha elevadas resistência e deformação.

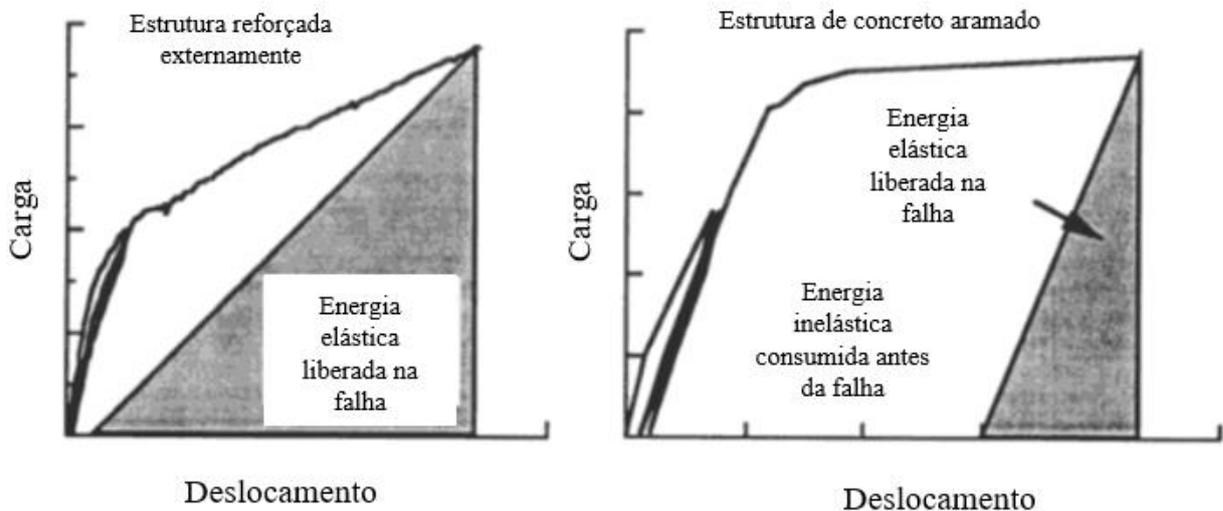
Entretanto, conforme discutido dentro deste capítulo, quando um elemento de concreto armado é reforçado externamente com PRF, há alterações significativas do comportamento estrutural (item 3.1), sendo necessários fatores de minoração no dimensionamento (item 3.2) ou construtivos (item 3.3.2) a fim de garantir segurança, decorrentes do comportamento não dúctil de ruptura do PRF que não atinge os níveis de energia inelástica satisfatórios.

Oudah e Hacha (2012) discutem a respeito da distinção entre ductilidade e deformabilidade, atribuindo à primeira a quantidade de trabalho plástico que uma estrutura pode apresentar antes da ruptura sem perda significativa de resistência, logo a energia que a estrutura pode absorver antes do colapso. A segunda refere-se à quantidade de deformação que uma estrutura sofre, sem ocorrer a falha e sem envolvimento do trabalho plástico. Assim, em uma estrutura reforçada com PRF, a ruptura pode acontecer no compósito ou decorrentes de grandes deslocamentos, porém sem atingir a deformação inelástica necessária, não representando uma ductilidade aceitável.

Machado (2004) discute que ao reforçar externamente uma estrutura com PRF, estas passam a absorver uma maior quantidade de carga, mas a capacidade de deformação, comparado a estruturas não reforçadas, será alterada, com a tendência de romper a estrutura antes de atingir níveis de deformação suficientes. Tais deformações podem ser da mesma ordem de grandeza entre uma estrutura reforçada e sem reforço, uma vez que a energia elástica liberada pelo reforço de PRF pode ser absorvida pelo concreto, acarretando formação de fissuras e deformações. Porém, as estruturas reforçadas possuirão uma energia elástica acumulada maior e uma energia inelástica acumulada inferior, comparadas as estruturas sem reforço. Portanto, a ductilidade em estruturas reforçadas será, em geral, menor do que em estruturas convencionais.

Naaman e Jeong (2001) indicam graficamente o comportamento energético de elementos reforçados externamente e de elementos de concreto armado usuais, através da Figura 34.

Figura 34 – Energia de ductilidade de vigas reforçadas e não reforçadas



Fonte: adaptado de Naaman e Jeong (2001)

Como não é apenas a deformação que garante a ductilidade, mas a energia absorvida durante a deformação elástica e inelástica dos elementos estruturais, para a quantificação eficiente de uma ductilidade é interessante relacionar uma contínua interação entre a ação aplicada e a deformação correspondente, de forma a se obter o comportamento real da estrutura até a ruptura, permitindo avaliar as parcelas de energia de deformação armazenadas (Machado, 2004).

Os procedimentos convencionais para a determinação da ductilidade em elementos estruturais são, geralmente, expressos por meio de uma relação chamada fator de ductilidade de flecha. Mas como são consideradas pouco apropriadas para determinar a ductilidade de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos, avalia-se o comportamento pela energia de ductilidade, que se relaciona às considerações da energia elástica e da energia inelástica. As equações (26) e (27), indicam, respectivamente, as relações descritas.

$$\mu_{\delta} = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (26)$$

Sendo,

$\mu_{\delta}$  – Fator de ductilidade de flecha;

$\delta_u$  – Flecha na carga de ruptura;

$\delta_y$  – Flecha quando ocorre a tensão de escoamento do aço da armadura longitudinal

$$\mu = \frac{E_{tot}}{E_{el}} \quad (27)$$

Sendo,

$\mu$  – Energia de ductilidade;

$E_{tot}$  – Energia total, calculada pelo diagrama carga x flecha

$E_{el}$  – Energia elástica, calculada pelo diagrama carga x flecha

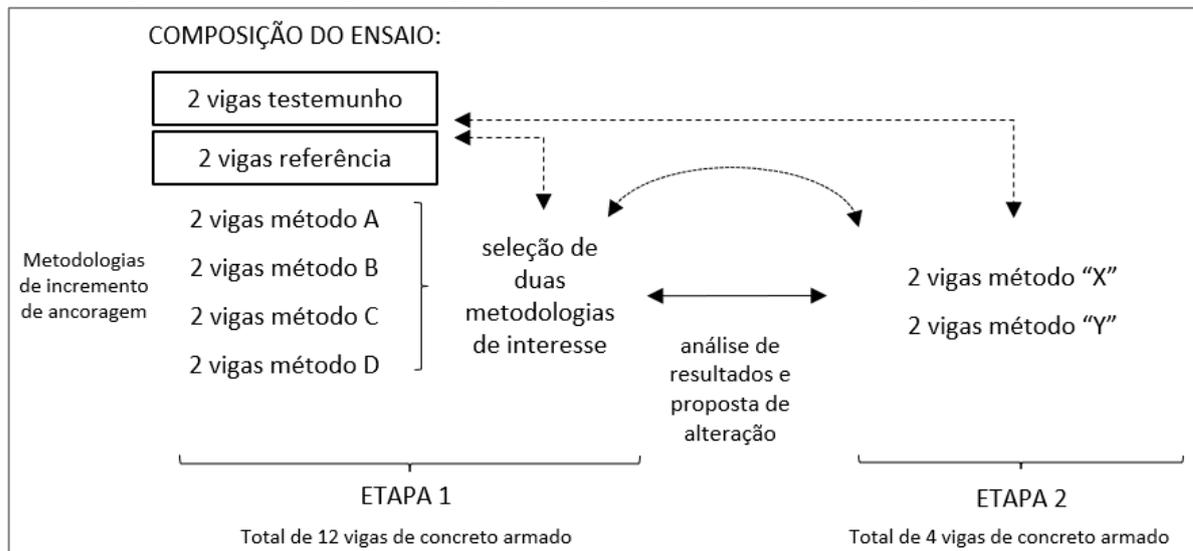
## 4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão apresentadas a construção do programa experimental e as atividades que foram desenvolvidas, a fim de alcançar os objetivos propostos para este trabalho. Assim, será indicado e justificado a composição do programa experimental, as características e parâmetros das vigas de concreto armado e dos materiais de reforço de PRFC, os ensaios de caracterização de corpos de prova do aço e do concreto, além das metodologias de instrumentação e da descrição dos ensaios de flexão à quatro pontos nas vigas.

### 4.1 ESTRATÉGIA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi dividido em duas etapas, totalizando 16 vigas de concreto armado, conforme apresentado na Figura 35. A composição e divisão do programa permitiu estudar o comportamento da ancoragem do reforço à flexão dos PRFC, proporcionando comparações com o comportamento de elementos de concreto; com uma metodologia já consolidada no meio técnico-científico; com metodologias observadas em pesquisas internacionais e, por fim, com propostas de novas metodologias, para investigar avanços a respeito do tema.

Figura 35 – Visão geral da proposta experimental sobre ancoragem dos PRFC



Fonte: elaborada pelo autor

Na **ETAPA 1**, foram realizados 12 ensaios em vigas de concreto armado, utilizando 4 metodologias de incremento de ancoragem distintas, realizando assim 2 repetições de vigas para cada uma das variáveis metodológicas. Foram realizados também, o ensaio em 2 vigas “testemunho” e 2 vigas “referência” com função de controle e comparação dos resultados

experimentais. O enfoque nessa primeira etapa é reproduzir as metodologias de incremento de ancoragem de PRF em vigas de concreto armado observadas na literatura.

Na **ETAPA 2** foram realizados 4 ensaios a partir da avaliação dos resultados da primeira etapa do programa, selecionando duas metodologias de interesse da Etapa I para propor alterações das variáveis com o intuito de investigar possibilidades de melhoria de desempenho. Para isso, foram utilizadas 2 repetições de vigas para cada uma das metodologias modificadas e em seguida comparando-as com os resultados obtidas na Etapa 1, com a viga “testemunho” e a viga “referência”, a fim de avaliar alguma alteração no comportamento produzidas pelas propostas de modificações. Logo, o enfoque na etapa 2 é avançar as pesquisas de metodologias de incremento de ancoragem em compósitos do tipo PRF.

Nas duas etapas do programa experimental, alguns parâmetros e processos, como nas etapas de fabricação, reforço, instrumentação e ensaio, foram realizados da mesma maneira ou da forma mais aproximada possível para todas as vigas, a fim reduzir variáveis não controladas dentro do programa experimental. Tais parâmetros aproximadamente constantes são descritos ao longo do trabalho.

## 4.2 METODOLOGIA DE INCREMENTO DE ANCORAGEM

Após a apresentação do item 3.3.2 deste trabalho, com discussões das metodologias e resultados numéricos obtidos por alguns autores sobre incremento de ancoragem, observa-se algumas metodologias com resultados mais satisfatórios, sendo adotadas para compor o programa experimental. Dessa forma, o Quadro 3 indica a metodologia de incremento de ancoragem que foi investigada, além da nomenclatura adotada para sua respectiva identificação.

Quadro 3 - Nomenclatura dos grupos de vigas a serem estudadas (Continua)

Etapa	Grupo de viga	Identificação	Mecanismo de incremento de ancoragem	Tipo de material utilizado de PRFC	
				Ancoragem reta	Incremento de ancoragem
1	Testemunho	VT1; VT2	-	-	-
	Referência	VR1; VR2	(apenas ancoragem reta)	Manta	-
	Metodologia A	VA1; VA2	Laço em U	Manta	Manta
	Metodologia B	VB1; VB2	Parafuso spike	Manta	Manta
	Metodologia C	VC1; VC2	EBROG	Manta	Manta
	Metodologia D	VD1; VD2	EBRIG	Manta	Manta

(Conclusão)

Etapa	Grupo de viga	Identificação	Mecanismo de incremento de ancoragem	Tipo de material utilizado de PRFC	
				Ancoragem reta	Incremento de ancoragem
2	Metodologia X	VX1; VX2	proposta de alteração (a)	(definido após ensaios e análises de resultados da etapa I)	
	Metodologia Y	VY1; VY2	proposta de alteração (a)		

(a) proposta de alteração: modificação da metodologia de incremento de ancoragem (proposta de melhoramento) a partir dos resultados da Etapa 1

Fonte: elaborado pelo autor

A escolha da metodologia de ensaio “Laço em U” ocorre pelo fato de ser uma técnica bastante conhecida e adotada dentro do meio técnico-científico, permitido comparar os resultados com as novas metodologias propostas. A metodologia “Parafusos Spike” é atualmente bastante investigada, indicando resultados em potencial. As metodologias “EBRIG” e “EBROG” são recentes e com poucos trabalhos de investigação acadêmicas acerca da técnica, seja em nível nacional e internacional, apresentando vantagens para o incremento de ancoragem.

### 4.3 MODELO EXPERIMENTAL – VIGAS EM CONCRETO ARMADO

Ao longo desse item, serão apresentados as definições e características dos materiais utilizados no desenvolvimento da pesquisa experimental.

#### 4.3.1 Projeto das vigas de concreto armado

As vigas de concreto armado foram definidas de forma a reproduzir uma situação usual de edificação observadas em obras urbanas, logo adota-se como parâmetro de projeto, a resistência característica à compressão ( $f_{ck}$ ) de 25 MPa aos 28 dias, NBR 6118 (ABNT, 2014).

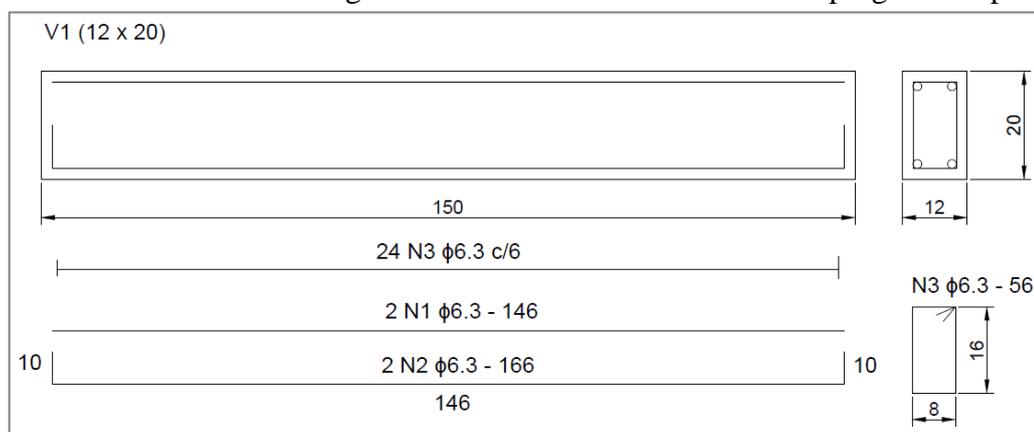
As dimensões adotadas para a viga estão relacionadas as limitações do laboratório LEME UFRGS no que dizem respeito a logística de uso do laboratório e prensa universal de ensaios e, portanto, foram definidas como 1,50 x 0,12 x 0,20 (medidas em metros) de comprimento, base e altura, respectivamente. Todas as vigas utilizadas no estudo foram moldadas através de uma empresa de pré-fabricado, permitindo menor variabilidade dos elementos estruturais.

Como o objetivo do estudo está atrelado ao reforço estrutural, o dimensionamento da viga de concreto armado foi definido de forma a reduzir a armadura longitudinal, obtendo assim um subdimensionamento da armadura de flexão, o que justifica a necessidade de reforço por PRF, e superdimensionar os estribos, para evitar ruptura do elemento por esforço cortante,

avaliando com mais clareza o comportamento da ancoragem do sistema de PRF. Portanto, após alguns estudos e análises de configurações de área de aço, adotou-se para a estrutura o detalhamento indicado por Giese (2019), indicado na Figura 36. Observa-se que todas as armaduras utilizadas (longitudinal e estribo) foram de 6.3 mm de diâmetro, resultando em relação a armadura: taxa  $\rho = 0,26\%$ , distribuição dos estribos a cada 60 mm e dimensionamento no domínio 2 de deformação.

No **Apêndice B** observa-se com mais detalhes a verificação de cálculo para a estrutura da viga descrita acima, indicando a metodologia de cálculo, os domínios de deformação e os resultados analíticos para viga de concreto armado.

Figura 36 – Detalhamento das vigas de concreto armado utilizadas no programa experimental



Fonte: elaborada pelo autor

#### 4.3.2 Procedimento de confecção das vigas de concreto armado

A concretagem das vigas foi realizada por fábrica especializada, na região de Porto Alegre - RS, caracterizando-se como um elemento pré-fabricado. Essa tomada de decisão ocorreu a fim de garantir maior uniformidade entre todos os elementos estruturais utilizados no programa experimental, uma vez que as 16 peças de concreto armado foram moldadas no mesmo dia, com a mesma dosagem de material, formando um único lote, evitando assim variabilidades não controladas desse processo produtivo.

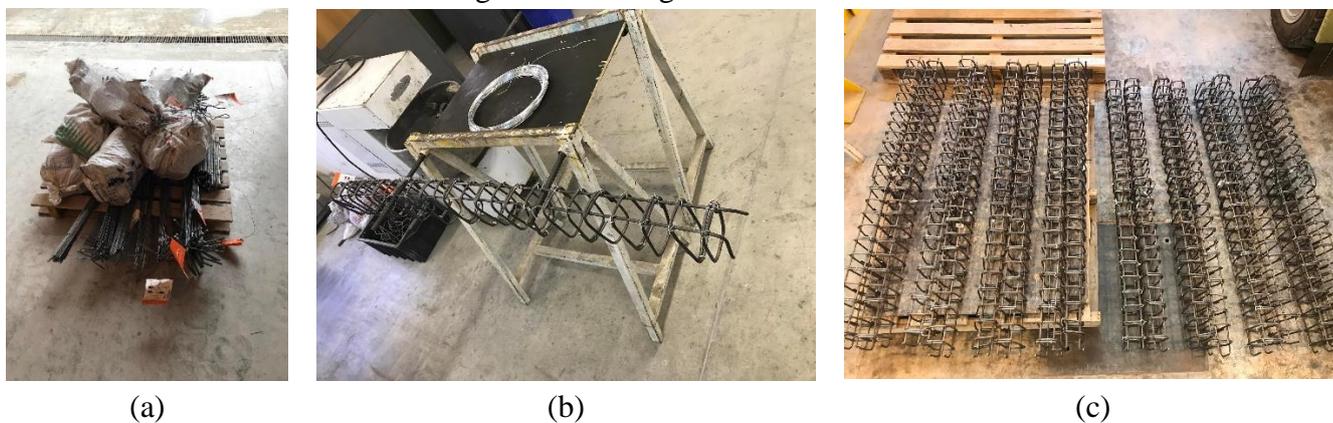
Assim, a empresa recebeu em sua sede as ferragens com sua armação devidamente amarradas e instrumentadas, processo que seguiu as especificações do projeto indicadas na Figura 36 e realizadas no próprio laboratório LEME UFRGS. Além disso, durante o processo de concretagem, foram produzidos 10 exemplares corpos de prova cilíndricos (10 x 20 cm, respectivamente diâmetro e altura), a partir de amostra do material fresco de moldagem, representando o concreto utilizado na produção desses elementos, com o objetivo de comporem

o controle tecnológico do material, afim de verificar a qualidade da concretagem e das características mecânicas. Dessa forma, a empresa contratada foi responsável única e exclusivamente pelo processo de concretagem das vigas, utilizando os próprios equipamentos, materiais e mão de obra necessário para a produção das peças e, por fim, do transporte e entrega dos elementos devidamente curados ao LEME UFRGS.

#### 4.3.2.1 Armaduras das vigas

As ferragens foram doadas pela empresa AcelorMittal e entregues ao laboratório LEME UFRGS previamente cortadas e dobradas, seguindo as especificações de projeto. Na sequência, realizou-se o processo de amarração das armaduras através de arame recozido, seguido do processo de instrumentação da armadura longitudinal de flexão, com as especificações e detalhes apresentados na sequência deste trabalho. A Figura 37 ilustra algumas das etapas do processo.

Figura 37 – Processo de confecção das armaduras das vigas: (a) entrega dos materiais de doação; (b) amarração dos estribos às armaduras longitudinais com arame recozido; (c) visão geral das ferragens armadas



Fonte: elaborada pelo autor

Finalizado os processos de amarração das ferragens e instrumentação das armaduras longitudinais, os elementos seguiram para processo de concretagem em empresa de pré-fabricado especializada. Tal etapa será apresentada na sequência deste trabalho.

#### 4.3.2.2 Ensaio de caracterização das armaduras

Com o objetivo de avaliar as características das armaduras utilizadas no processo de produção das vigas, foi realizado o ensaio de tração das armaduras longitudinais a partir de amostras, seguindo as normas NBR ISO 6892 (ABNT, 2018), obtendo os parâmetros de tensão

e deformação ao longo de todo o ensaio. Seguindo as recomendações das normas citadas, foram preparadas três amostras das armaduras, objeto de estudo: aço CA-50, de diâmetro nominal ( $\phi$ ) de 6.3 mm, comprimento unitário de 70 cm, dispostas 20 cm em cada extremidade dos pontos de fixação (dentro das agarras da prensa), restando um comprimento livre entre apoios de 30 cm, na qual ocorreu a deformação até o rompimento das amostras de aço.

A preparação do ensaio continuou com a marcação da região de comprimento inicial  $L_0$  igual a 10 vezes o diâmetro nominal da barra ensaiada, marcada dentro da região livre do elemento e disposto aproximadamente em seu centro para posterior fixação da instrumentação. Após, seguiu pelo posicionamento de uma unidade de *Linear Variation Displacement Transducer* (LVDT) para aferição dos valores de deslocamento durante o ensaio, com curso de +/- 10,00 mm e precisão de 0,0001 mm da marca HBM. A aquisição de dados da prensa e da instrumentação para esse ensaio foi realizada através do programa *Catman Easy*, utilizando o equipamento QuantumX MX840B, da marca HBM.

Após a preparação de todo o aparato de ensaio, realizou-se a aferição da distância entre os suportes de fixação do LVDT que são solidarizados a barra, utilizando um paquímetro, a fim de determinar com maior precisão o comprimento inicial  $L_0$  da barra para o ensaio. A medida é de aproximadamente 10 vezes o diâmetro da barra ensaiada, e essa aferição ocorre para medição precisa dessa distância), determinando a deformação específica do material, a partir da Equação (28).

$$\varepsilon (\%) = \frac{\Delta L}{L_0} * 1000 \quad (28)$$

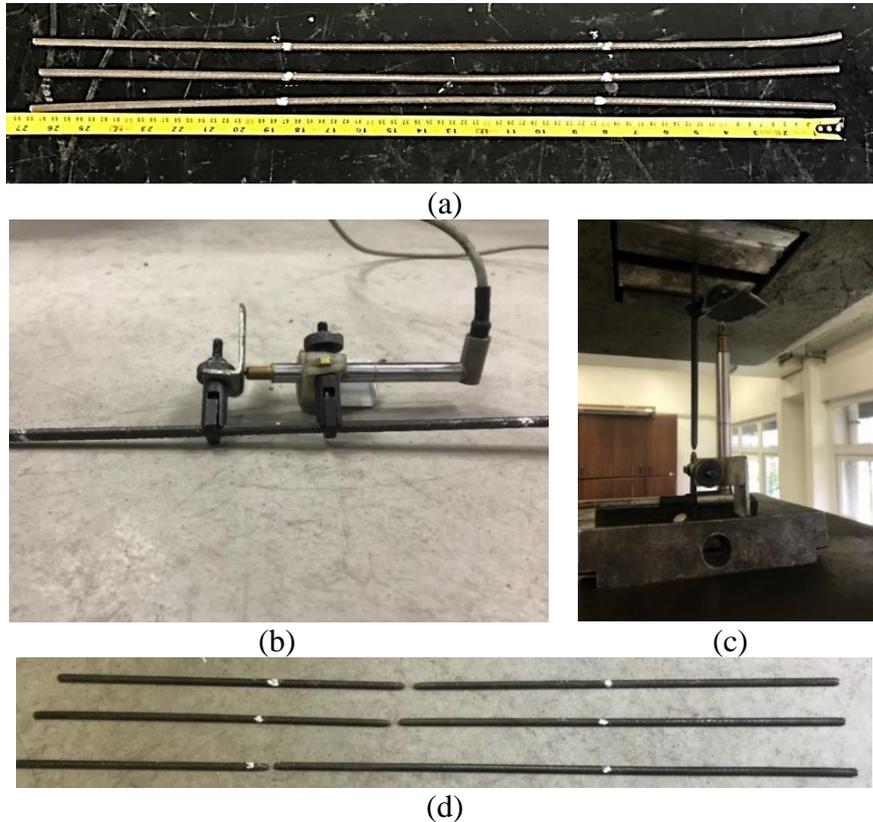
Sendo,

$\Delta L$  – Variação do comprimento da barra durante ensaio, aferido pelo LVDT;

$L_0$  – Comprimento entre marcações do comprimento de medida no corpo de prova, determinados antes do ensaio, à temperatura ambiente.

Para as três amostras ensaiadas foi utilizado uma velocidade de carregamento de 10MPa/s. A Figura 38 ilustra as etapas desenvolvidas para realização do ensaio.

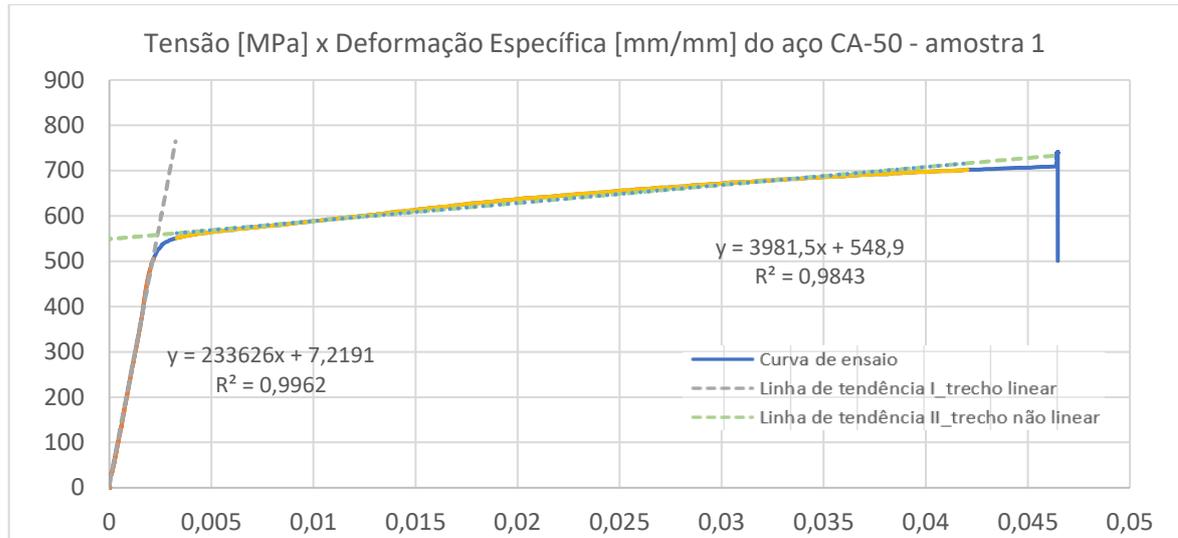
Figura 38 – Ensaio de tração de armadura de aço: (a) preparação do ensaio; (b) sistema de fixação da instrumentação do LVDT; (c) resultado do ensaio de tração na prensa; (d) comparativos entre as barras ensaiadas



Fonte: elaborada pelo autor

A determinação da tensão e deformação específica na região do escoamento do elemento, foi determinada a partir do gráfico Tensão x Deformação Específica, pela construção de equações de linhas de tendência com fator de correlação  $R^2$  de aproximadamente igual a 1,0, nas regiões de comportamento elástico e plástico do aço. A Figura 39 exemplifica o resultado do ensaio de tração do aço para a amostra 1, sendo que para as amostras 2 e 3 foram obtidos resultados gráficos similares. A formação das linhas de tendência e a geração das equações de reta correspondentes, permitiram determinar a tensão e deformação no limite de escoamento do aço. O Quadro 4 apresenta os resultados desse tipo de ensaio para cada uma das amostras.

Figura 39 – Exemplificação do resultado do ensaio de tração do aço



Fonte: elaborada pelo autor

Quadro 4 – Resultados ensaio de tração de barra de aço

Aço CA-50   Diâmetro nominal ( $\phi$ ) de 6.3 mm   Área nominal de 31,172 mm <sup>2</sup>						
Amostra	Escoamento			Máximo (último)		
	Força [kN]	Tensão [MPa]	Deformação esp. [%]	Força [kN]	Tensão [MPa]	Deformação esp. [%]
1	17,40	558,29	2,36	23,11	741,23	46,47
2	18,19	583,65	3,51	23,84	764,88	89,36
3	20,79	666,98	1,67	25,34	812,96	94,24
Média	18,80	602,97	2,51	24,10	773,02	76,69

Fonte: elaborado pelo autor

Ao caracterizar o comportamento das armaduras longitudinais na transição do patamar elástico para o plástico e os valores de tensão e deformação no escoamento, é possível utilizar tais parâmetros para determinar com mais exatidão a ductilidade das vigas de concreto armado ensaiadas à flexão a quatro pontos.

Ao observar os resultados aprestados no Quadro 4 acima, há uma diferença para os valores característicos normativos da NBR 6118 (ABNT, 2014), que indica a tensão de escoamento para o aço CA-50 de 500 MPa e deformação específica é de 2,07 %, considerando módulo de elasticidade de 210 GPa e coeficiente de minoração do aço ( $\gamma_s$ ) de 1,15. Assim conclui-se que para esse lote amostral os valores médios de tensão no escoamento são de 602,97 MPa; a média da tensão última de 773,02 MPa; a média da deformação específica no escoamento de 2,51 % e a média da deformação específica última de 76,69 %. No escoamento, o ensaio de tração do aço indicou aumento das propriedades em 21,6% para a tensão e 21,4%

para a deformação específica, em comparação aos valores característicos de dimensionamento indicados na norma.

Além disso, a partir da região de comportamento elástico do aço, pode ser obtido o módulo de elasticidade médio, a partir das médias dos resultados das amostras, através de relação inversamente proporcional entre tensão e deformação. Logo o módulo de elasticidade ( $E$ ) é dado pela Equação (29).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{602,97 \text{ MPa}}{0,00251} \approx 240 \text{ GPa} \quad (29)$$

#### 4.3.2.3 Confeção do Concreto

Conforme explicitado, a concretagem dos elementos foi realizada dentro de central de concretagem através de empresa de pré-fabricado especializada, com o objetivo de alcançar a resistência à compressão mínima de 25 MPa. A produção ocorreu no dia 17/01/2022 e a Tabela 3 apresenta os dados da composição do traço de concreto utilizados, com as quantidades em relação a 1 m<sup>3</sup> de concreto. O cimento utilizado foi o CP V ARI-RS e o aditivo foi o Advacast 518, informações fornecidas pela empresa responsável.

Tabela 3 - Composição do traço de concreto

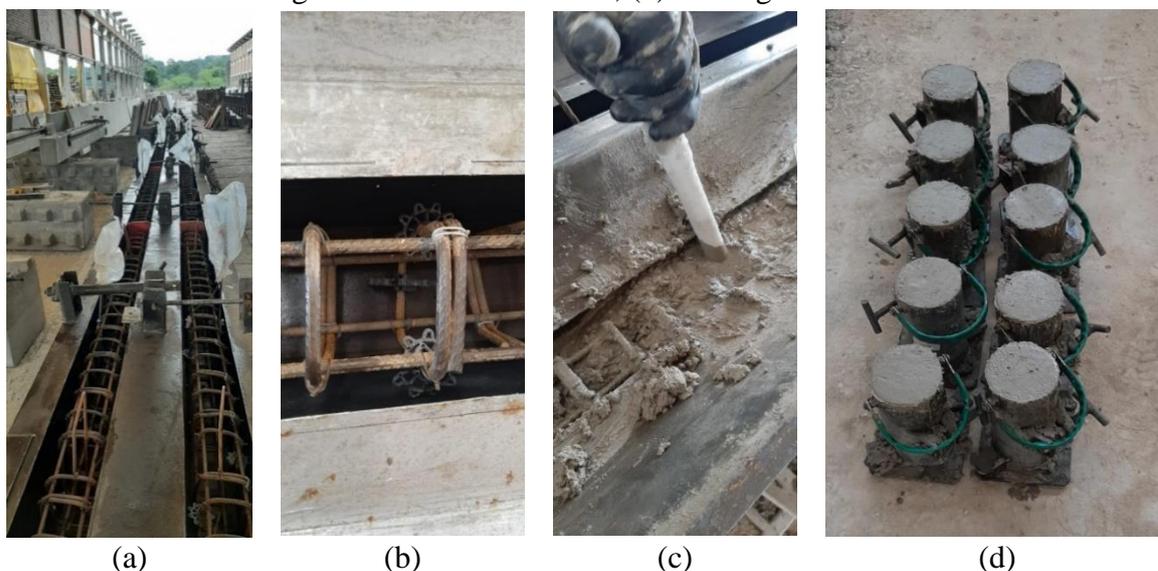
Traço	Material	Uni.	Quantidade
1 : 0,92 : 3,41 : 2,88	Cimento	[kg]	270
	Areia Fina	[kg]	250
	Areia Média	[kg]	922
	Brita 0	[kg]	778
	Água	[L]	178
	Aditivo	[L]	0,5
	Relação a/c	-	0,66
	Slump test	[mm]	160

Fonte: elaborada pelo autor

As ferragens armadas no LEME UFRGS e transportadas até a empresa de pré-fabricados receberam a adição de espaçadores plásticos, garantindo o cobrimento especificado em projeto. Em seguida foram posicionadas em fôrmas metálicas, respeitando as dimensões geométricas finais dos elementos. Todas as 16 vigas do programa experimental foram concretadas em lote único, através de linha de produção, em central de concreto automatizada, que realizou a pesagem dos materiais indicados no traço e em seguida produziu a mistura.

A trabalhabilidade do concreto foi avaliada conforme a norma NBR 16889 (ABNT, 2020), através do abatimento de tronco de cone. Para a mistura do traço caracterizado, obteve-se *slump* de 160 mm. Após, o processo produtivo seguiu para a moldagem dos elementos das vigas e dos corpos de prova, onde ocorreu o adensamento do concreto com uso de vibrador de imersão. A Figura 40 indica a sequência do processo de moldagem dos elementos.

Figura 40 – Etapas do processo de concretagem: a) posicionamento das ferragens armadas nas fôrmas; (b) detalhe construtivo dos espaçadores; (c) moldagem e vibração do concreto com mangote vibrador de imersão; (d) moldagem dos CP's de amostra



Fonte: elaborada pelo autor

O processo de cura das vigas e dos CP's de concreto foram realizados em temperatura e umidade ambientes, sendo protegidos das intempéries em local com cobertura e transportados após 28 dias da data da concretagem, garantindo resistências suficientes ao material, evitando esforços não previstos ao elemento e danos ou fissurações prematuras. Ao serem entregues no LEME UFRGS, os elementos ficaram em condições ambientais até o dia dos seus respectivos ensaios, protegidos das intempéries em ambiente coberto.

#### 4.3.2.4 Ensaios de controle tecnológico dos corpos de prova de concreto

Com o objetivo de avaliar a qualidade da concretagem, dos materiais empregados e das características mecânicas do concreto, foram realizados nos corpos de prova cilíndricos, Ensaios Não Destrutivos (END), do tipo Velocidade de Pulso Ultrassônico (VUP) e módulo de elasticidade, e em seguida Ensaios Destrutivos, do tipo compressão axial simples.

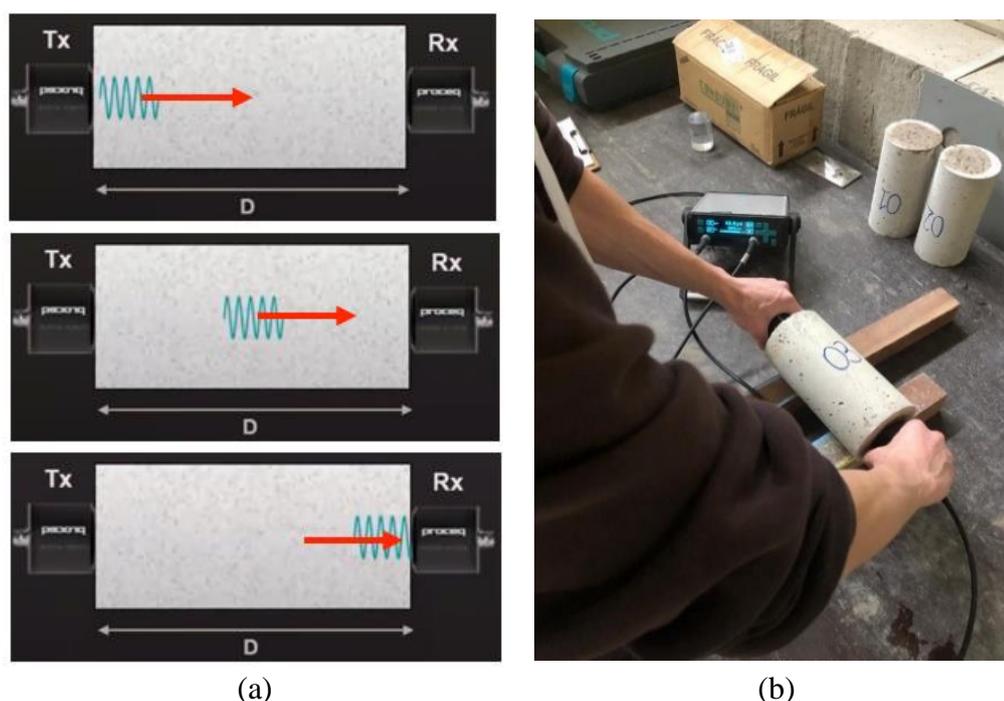
Os corpos de prova, após desinformados passaram por processo de retificação, com o intuito de corrigir as eventuais irregularidades existentes na base e/ou topo do CP, a fim de torná-los lisos, com as faces de base e topo paralelas e planas para a realização dos ensaios de caracterização descritos a seguir.

a. Ensaio de velocidade de pulso ultrassônico (VPU)

A NBR 8802 (ABNT, 2019) indica que a determinação da velocidade de propagação de ondas longitudinais obtidas por pulsos ultrassônicos (VPU) em um elemento de concreto permite avaliar a homogeneidade do material; detectar eventuais falhas internas de concretagem, profundidades de fissuras e outras imperfeições, além de monitorar a variações no concreto ao longo do tempo, decorrente de agressividade do meio (ataque químico).

O ensaio é realizado a partir do posicionamento de um transdutor transmissor (T), que emite pulsos ultrassônicos que se propagam pelo meio material em estudo através de ondas, que são recebidas por um transdutor receptor (R). Assim, nos corpos de prova cilíndricos obtidos do processo de moldagem das vigas, esse tipo de END foi realizado de forma “direta”, onde os transdutores são posicionados nas faces planas e paralelas dos CP’s de concreto em análise. A Figura 41 ilustra o ensaio descrito.

Figura 41 – Ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico por leitura direta: (a) representação da propagação do pulso ultrassônico; (b) realização do ensaio nos CP’s deste programa experimental



Fonte: (a) adaptado de BSI (1986); (b) elaborado pelo autor

Conhecendo-se o comprimento geométrico do elemento inspecionado na qual a onda irá percorrer, dado pela distância de separação entre os dois transdutores, o ensaio mede o tempo em que o transdutor-transmissor (T) emite o pulso até o momento em que o transdutor-receptor (R) detecta a onda, fazendo com que seja possível determinar a velocidade de propagação da onda no meio através da Equação (30).

$$V = D/t \quad (30)$$

Sendo,

V - Velocidade da onda ultrassônica no elemento inspecionado (m/s);

D - Distância percorrida pela onda entre os transdutores (m);

t - Tempo entre a emissão e recepção da onda ultrassônica pelos transdutores (s).

Teodoro, Oswaldo, Carasek (2018) afirmam que há um consenso de que o ensaio permite avaliar a uniformidade do concreto (compacidade, fissuras e falhas), uma vez que a onda ultrassônica se propaga mais rapidamente em meios mais densos do que no ar. Segundo esses os autores, concretos com maiores velocidades determinadas nesse ensaio apresentam maior compacidade, sendo um indício de que apresentam menos vazios e em tese, uma maior qualidade de forma geral. A norma britânica BS EN 12504-4 – *Testing concrete. Determination of ultrasonic pulse velocity*, apresenta uma correlação entre a qualidade do concreto e as velocidades de pulso ultrassônico, conforme indica a Tabela 4, na qual é utilizada para avaliar a qualidade dos corpos de prova deste programa experimental.

Tabela 4 – Critério de avaliação do concreto com base na velocidade de onda ultrassônica proposta pela norma BS EN 12504-4

Velocidade [m/s]	> 4500	3500 - 4500	3000 - 3500	2000 - 3000	< 2000
Qualidade	Excelente	Bom	Regular	Ruim	Péssimo

Fonte: BS EN 12504-4 (2021)

A presença de vazios causa um retardo das ondas, em função da baixa velocidade do som no ar, devido ao fato do tempo de propagação dos pulsos ultrassônicos serem correlacionados com a densidade do material, Adamatti (2017). Ou seja, caso existam problemas no interior do elemento inspecionado, como nichos de concretagem ou fissuras, a onda irá percorrer a distância estabelecida entre os transdutores em um tempo maior (velocidade da onda mais lenta), devido a inconsistência do meio em que se propaga e aos problemas que

encontra, resultando em velocidades finais menores do que as esperadas para um concreto com maior qualidade.

Para os CP's obtidos a partir da concretagem das vigas, realizou-se o ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico (VUP), obtendo a média de três leituras do tempo de propagação do pulso, realizadas em sequência. Assim, ao medir o comprimento dos CP's com o uso de paquímetro, foi determinado para cada um deles a velocidade de propagação do pulso, a partir da Equação (30), e a sua respectiva qualidade a partir do critério de avaliação apresentada na Tabela 4. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados de ensaios de Velocidade de Pulso Ultrassônico em CP's de concreto

CP	Comprimento [mm]	Tempo [ $\mu$ s]				Velocidade média [m/s]	Qualidade
		1	2	3	Média		
01	194,63	48,1	47,8	47,8	47,90	4063	Bom
02	195,20	48,0	48,5	48,3	48,27	4044	Bom
03	197,57	48,8	48,3	48,3	48,47	4077	Bom
04	196,23	49,3	49,3	48,8	49,13	3993	Bom
05	197,23	48,8	48,7	48,8	48,77	4054	Bom
06	196,53	48,4	48,4	48,0	48,27	4071	Bom
07	195,53	48,8	48,7	48,8	48,77	4009	Bom
08	195,47	48,4	48,6	48,3	48,43	4037	Bom
09	196,53	49,3	49,3	49,3	49,30	3986	Bom
10	196,13	48,8	49,0	49,3	49,03	3999	Bom

Fonte: elaborada pelo autor

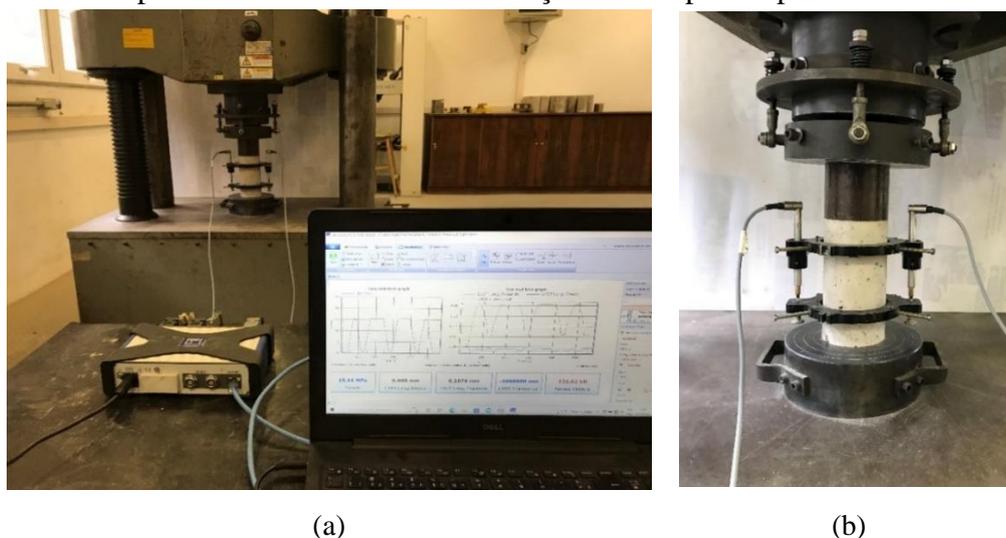
Dessa forma observa-se que para todos os CP's a velocidade de propagação do pulso ultrassônico indica uma qualidade “Boa” para o concreto, ou seja, há indícios de que é um material suficientemente homogêneo e não possui imperfeições ou falhas significativas. Portanto, o resultado do ensaio de VUP oferece indícios de que as vigas de concreto armado apresentam comportamento semelhante aos CP's, no que diz respeito a qualidade dos materiais e processo de moldagem.

#### b. Ensaio de módulo de elasticidade tangente inicial (Eci)

O ensaio de módulo de elasticidade seguiu as instruções da NBR 8522 (ABNT, 2017) na qual estipula ciclos de carregamento e descarregamento, atingindo valor máximo de 30% da tensão de ruptura à compressão ( $f_c$ ) e mínimo de 0,5 MPa, para o lote analisado. Durante o ensaio foi feita a aferição dos valores de deslocamento com o uso de dois *Linear Variation*

*Displacement Transducer* (LVDT), com curso de +/- 1,00 mm e precisão de 0,0001 mm da marca HBM. A Figura 42 ilustra a realização do ensaio. A aquisição de dados da prensa e da instrumentação para o ensaio foi realizada através do programa Catman Easy, utilizando o equipamento QuantumX MX840B, da marca HBM. Nesses ensaios, utilizou-se a taxa de aplicação de carga da prensa de 0,45 MPa/s.

Figura 42 – Ensaio de Módulo de Elasticidade: (a) visão geral do ensaio; (b) detalhe do posicionamento da instrumentação nos corpos de prova



Fonte: elaborada pelo autor

Para o conjunto de 10 CP's existentes no lote de 16 vigas de concreto, dividiu-se dois grupos aleatórios de 5 CP's cada, a fim de realizar os ensaios de módulo de elasticidade espaçados dentro do intervalo de tempo em que ocorreram os ensaios de flexão das vigas, a fim de indicar maior representatividade de resultados entre o controle tecnológico do concreto e as vigas ensaiadas. Dessa forma, para os ensaios nas duas datas, obtém-se os resultados da média e desvio padrão do módulo de elasticidade, indicados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados do ensaio de Módulo de Elasticidade do concreto moldado das vigas

Data do ensaio	CP's	Módulo de elasticidade [GPa]	Desvio padrão
09/09/2022	01 a 05	25,27	0,33
04/10/2022	06 a 10	24,67	0,03
Média geral		24,97	0,38

Fonte: elaborada pelo autor

Observa-se que os valores do módulo de elasticidade para as duas datas de ensaios diferem-se em apenas 0,60 GPa entre si, correspondendo a 2,38% de discrepância, logo sendo

considerado pouco significativa. Adota-se, portanto, o valor da média para as duas idades, ou seja, 24,97 GPa como o módulo de elasticidade tangente inicial do concreto.

c. Ensaio de compressão axial simples

A determinação da resistência à compressão seguiu as recomendações da NBR 5739 (ABNT, 1994) através dos CP's cilíndricos obtidos no dia da concretagem das vigas de concreto armado. Foi avaliada a resistência à compressão axial em três CP's para as idades de 235 e 260 dias após a moldagem dos elementos, a fim de realizar esse controle próximo das datas dos ensaios de flexão das vigas, indicando maior representatividade de resultados entre o concreto dos CP's e as vigas ensaiadas. Nesses ensaios, utilizou-se a taxa de aplicação de carga da prensa de 0,45 MPa/s. O diâmetro de cada elemento foi obtido através da média de três leituras consecutivas com uso de paquímetro. A Tabela 7 apresenta o resultado do ensaio.

Tabela 7 – Resultados de ensaio de compressão em CP's cilíndricos

Data ensaio	CP	Diâmetro [cm]				Área [cm <sup>2</sup> ]	Força [kN]	Resistência [MPa]		Desvio padrão
		1	2	3	Média	Média		unit.	Média	
09/09/2022	01	9,70	10,20	10,15	10,13	80,59	199,49	24,75	25,14	0,7
	02	10,10	10,40	10,10	10,20	81,71	213,50	26,13		
	03	9,90	10,50	10,50	10,30	83,32	204,50	24,54		
04/10/2022	04	10,50	10,60	10,10	10,40	84,95	238,00	28,02	26,88	1,49
	05	10,30	10,00	10,10	10,13	80,59	224,50	27,86		
	06	9,90	10,10	10,30	10,10	80,12	198,50	24,78		
Média geral								26,01	1,46	

Fonte: elaborada pelo autor

Observa-se que à resistência a compressão do ensaio para os dois conjuntos de datas divergiu apenas 1,74 MPa, correspondendo a 6,7% de diferença, podendo ser considerado uma variação pouco significativa. Portanto, adota-se o valor da média para as duas idades, ou seja, 26,01 MPa (desvio padrão de 1,46 entre todas as seis amostras em estudo), como sendo a média da resistência à compressão do concreto ( $f_{cm}$ ).

A variação de resultados obtidos para as duas idades (235 e 260 dias após a moldagem do concreto) nos ensaios de módulo de elasticidade e resistência à compressão axial podem ser consideradas pouco significativas, uma vez que o concreto não está mais em idades recentes da

concretagem, indicando uma fase de maior estabilidade de suas características mecânicas. Portanto, apesar da realização desses ensaios de controle tecnológico ocorrerem em duas idades distintas, tais datas estão suficientemente afastadas das fases onde o concreto apresenta variações significativas de suas propriedades, podendo ser consideradas variações em um intervalo aceitável, conforme indicam Araújo (2001) e Reginato (2020). Apesar disso, esperava-se que nas idades ensaiadas a resistência à compressão média obtida para os CP's ( $f_{cm}$ ) fosse consideravelmente maior, uma vez que tais idades são consideravelmente elevadas, o que permitiria mais tempo para que os processos de reação entre os materiais ocorressem nesse período, até que fossem atingidas as fases mais estáveis.

O valor do ( $f_{ck}$ ) adotado em projeto, refere-se ao valor da resistência à compressão que deve ocorrer nas amostras em até 28 dias, considerando o tratamento estatístico de distribuição normal, conforme indica a NBR (ABNT 12655, 2015). A Equação (31), obtida dessa norma, determina a resistência a compressão do concreto ( $f_{ckj}$ ), com j entre 235 e 260 dias, de 23,60 MPa, logo inferior ao estipulado em projeto. Dessa forma, há indícios de que a resistência média ( $f_{cm}$ ) dos CP's não atingiria o valor de projeto de 25 MPa, caso esses fossem ensaiados aos 28 dias, evidenciando alguma inconsistência no processo de especificação do traço, pesagem dos materiais ou moldagem, fornecidos pela empresa de pré-fabricados.

$$f_{ckj} = f_{cmj} - 1,65 * S_n \quad (31)$$

Sendo,

$f_{ckj}$  – Resistência característica do concreto à compressão, aos j dias, em MPa;

$f_{cmj}$  – Resistência média do concreto à compressão obtida em ensaio, aos j dias, em MPa;

1,65 – Valor estatístico com 95% de certeza das amostras;

$S_n$  – Desvio padrão das amostras, em MPa.

#### 4.3.3 Material de reforço do tipo Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (PRFC)

A aquisição da manta de fibra de carbono e da resina polimérica ocorreu através da mesma empresa/fabricante, com o intuito de compatibilizar a solução técnica entre os materiais que compõem o sistema de reforço, evitando novas variáveis não controláveis para o programa experimental. Assim, foram adquiridos os materiais de fabricante especializado e que atende à critérios mínimos de qualidade. São apresentadas no Quadro 5 as características dos materiais, dados fornecidos pelo fabricante.

Quadro 5 – Características da manta de fibra de carbono e resina epóxi

Manta de fibra de carbono	Resina epóxi (componente A + B)
- Nome comercial: C-Sheet 240	- Nome comercial: 55 RS
- Manta unidirecional de fibra de carbono	- Composição básica:
- Densidade 1,78 g/cm <sup>3</sup>	- (componente A): bisfenol A; Epicloridina e Sílica
- Gramatura 300 g/m <sup>2</sup>	- (componente B): Poliamino-amida
- Espessura: 0,168 mm	- Tempo de trabalho (25°C): 30min
- Resistência à tração: $\geq 430$ kN/cm <sup>2</sup>	- Cura inicial: 2h
- Módulo de elasticidade: $\geq 24000$ kN/cm <sup>2</sup>	- Cura final: 7 dias
- Deformação de ruptura: 1,8%	- Resistência a tração na flexão (25°C): 40 MPa após 7 dias
	- Resistência a compressão (25°C): 65 MPa após 7 dias
	- Aderência à tração no concreto: 4,5 MPa após 7 dias

Fonte: elaborado pelo autor

A grande parte dos trabalhos acadêmicos e produtos comerciais de variados fabricantes utilizam dois tipos de resina para aplicação do reforço, sendo o *primer*, com função criar uma ponte de aderência eficiente para transmissão de esforços; e outra de impregnação, para formar o material compósito com a fibra. Porém, o produto utilizando nesta pesquisa tem solução técnica que dispensa o uso da resina *primer*, conforme especificado pelo fabricante, sendo, portanto, utilizando apenas um único tipo de resina com as duas funções.

Observou-se que a manta de fibra de carbono do fabricante é suficiente maleável, facilitando o uso dentro no programa experimental, por permitir aderir a superfícies de difícil acesso, como ocorreu com as metodologias de ranhura EBRIG e EBROG e laço em U.

#### 4.4 APLICAÇÃO DA MANTA DE FIBRA DE CARBONO

Uma vez que o objetivo do estudo é avaliar o comportamento dos elementos reforçados devido aos diferentes métodos de incremento de ancoragem, a aplicação do reforço seguiu alguns parâmetros análogos ou efetivamente iguais entre todos os elementos estruturais reforçados, a fim de reduzir variáveis indesejadas. Assim, os parâmetros invariáveis para as metodologias são:

- a. Preparação da superfície, aplicação do reforço estrutural e das respectivas técnicas de incremento de ancoragem com a viga em posição invertida (não natural);
- b. Aplicação do mesmo tipo de solução de manta (carbono) e de resina (epóxi) para todos os elementos reforçados;

- c. Manta de fibra de carbono e resina epóxi do mesmo tipo, lote e fabricante;
- d. Área de manta de fibra de carbono iguais para todos os elementos reforçados à flexão;
- e. Centralização da manta de fibra de carbono de reforço à flexão com a posição central da largura da viga de concreto reforçada;
- f. Aplicação de apenas 1 camada de manta de fibra de carbono como reforço da viga à flexão;
- g. Quantidades de resinas aproximadamente iguais entre as metodologias de incremento de ancoragem;
- h. Aplicação das metodologias de reforço em ambiente controlado e constantes de temperatura e umidade;
- i. Aplicação das metodologias de reforço realizadas pelo mesmo aplicador;
- j. Tempo para aplicação de carga (realização de ensaio) de no mínimo 7 dias;
- k. Tempo de armazenamento do elemento estrutural em ambiente controlado de temperatura e umidade de no mínimo 7 dias, sendo em todo período a viga permanecendo na posição invertida.

Dessa forma, serão descritos e ilustrados a seguir os procedimentos básicos que foram realizadas e que se repetiram à todas as vigas de concreto armado a serem reforçadas.

i. Preparação do substrato de concreto da superfície

Lixamento mecânico com disco de desbaste com o objetivo de remover a nata superficial do cimento proveniente do processo de cura do material, permitido uma abertura de poros, benéfica para a aderência entre material compósito e concreto. A Figura 43 ilustra o processo descrito.

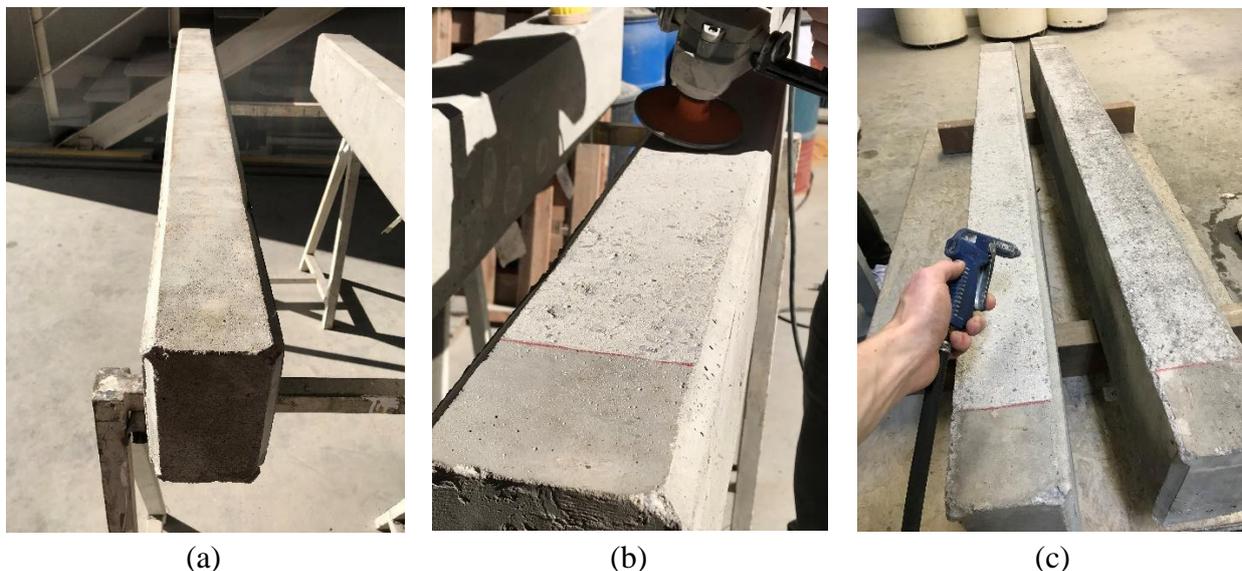
ii. Preparação do substrato do mecanismo de ancoragem específico

Preparação da superfície para receber o respectivo método de incremento de ancoragem, utilizando discos de desbaste, marreta, talhadeira e furadeira. Cada uma das metodologias de incremento de ancoragem tem seu processo de aplicação detalhada ao longo do trabalho.

iii. Limpeza do substrato de concreto

Com o objetivo de remover impurezas e partículas soltas provenientes da preparação da superfície de concreto, principalmente nos poros do substrato, foi utilizado ar comprimido em toda região de aplicação do reforço previamente preparado na etapa anterior. A Figura 43 ilustra o processo descrito.

Figura 43 – Preparação do substrato da viga em posição invertida: (a) viga íntegra; (b) lixamento mecânico com disco de desbaste; (c) remoção de partículas com ar comprimido



(a)

(b)

(c)

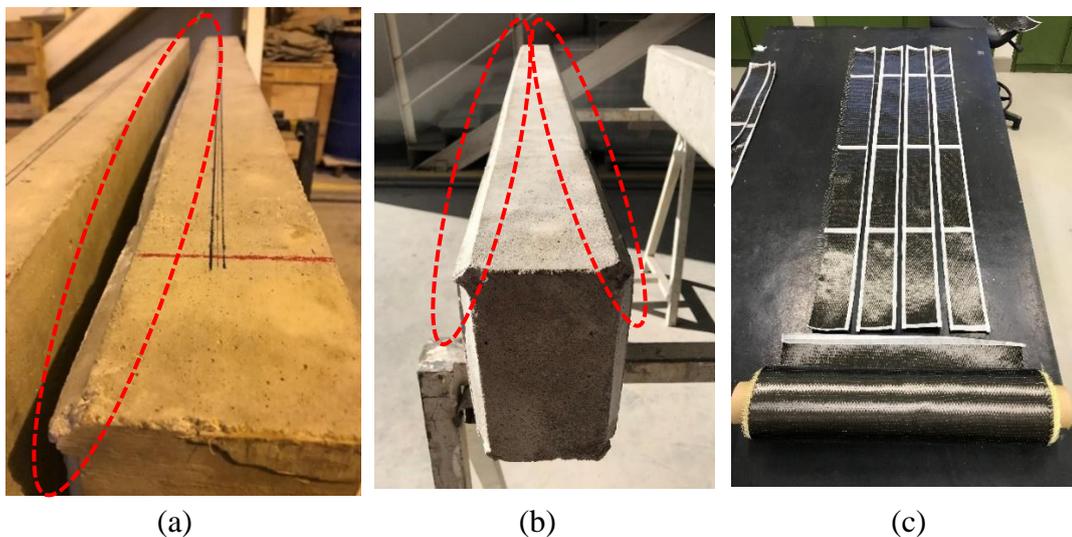
Fonte: elaborada pelo autor

#### iv. Corte e preparação da manta de fibra de carbono

Em projeto, as vigas de concreto armado têm largura de 12 cm, entretanto, durante o processo construtivo realizado por empresa de pré-moldados especializada, a fôrma metálica utilizada possuía 1 e/ou 2 chanfros ao longo de todo comprimento lateral (aresta) da base do elemento, restando uma região plana de aproximadamente 9 cm de largura na seção transversal. A Figura 44a e Figura 44b ilustram a situação descrita dos chanfros

Como não se concluiu com precisão qual seria o comportamento que uma colagem de manta em um elemento assimétrico, com chanfro, poderia causar ao comportamento do elemento (resistência, deformação e modo de ruptura); e que as áreas totais da manta poderiam ser diferentes para vigas com 1 ou 2 chanfros, optou-se por uniformizar em todos os elementos reforçados, utilizando dimensões de manta de 9 cm de largura e 130 cm de comprimento, correspondendo a região livre e plana existentes entre apoios. A Figura 44c ilustra o corte da manta de carbono usado para reforço à flexão.

Figura 44 – Preparação da manta de fibra de carbono: (a) base da viga com 1 chanfro; (b) base da viga com 2 chanfros; (c) marcação e corte da manta de fibra de carbono para reforço à flexão



Fonte: elaborada pelo autor

v. Pesagem e mistura das resinas

A resina epóxi foi fornecida pelo fabricante em embalagens de 1,1 kg do componente (A) e 0,9 kg do componente (B), totalizando 2 kg. O reforço foi realizado em uma viga de cada vez, sendo assim, a mistura dos componentes A e B foram feitos em quantidades suficientes para reforçar uma viga por vez, garantindo uma homogeneização mais eficiente no processo de mistura e do tempo de endurecimento na aplicação, cerca de 30 minutos a temperatura de 25°C, segundo o fabricante.

Ainda segundo o fabricante, o fracionamento da resina ocorre em proporção 1:1 em volume ou então 55% do componente (A) e 45% do componente (B), ambos em peso. Todos os processos de pesagem dos componentes foram realizados em balança de precisão e tiveram sua mistura executada manualmente durante 5 minutos, cronometrados no instante de mistura dos componentes A e B em recipiente a parte, afim de obter uma mistura homogênea e que não ocorresse concentração dos componentes nas bordas ou no fundo. A Figura 45 indica o processo descrito.

Figura 45 – Preparação da resina epóxi de aplicação em manta de fibra de carbono: (a) pesagens dos componentes A e B fracionados; (b) homogeneização manual dos componentes



(a)

(b)

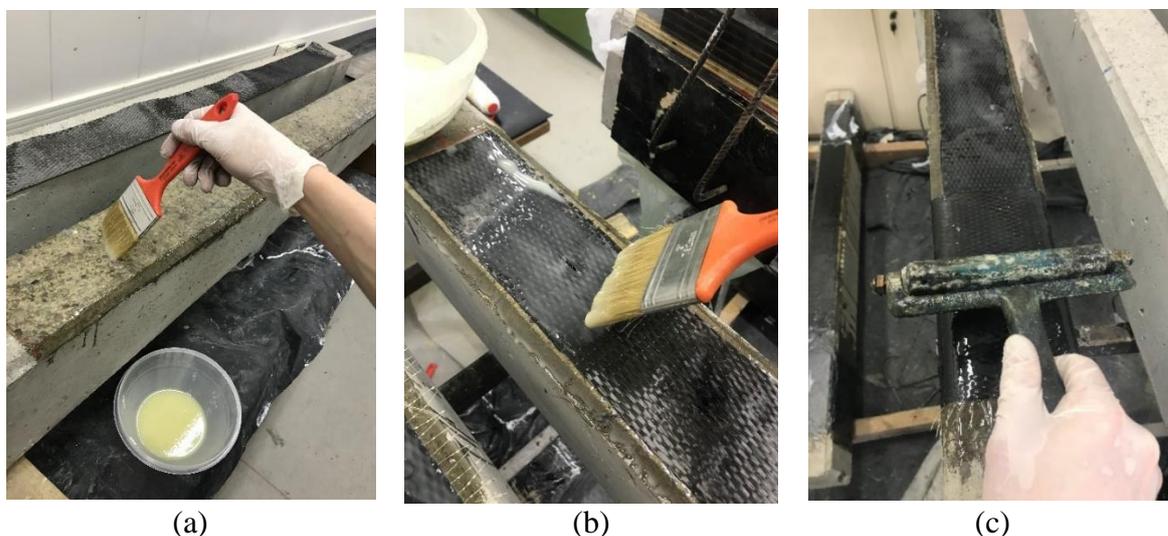
Fonte: elaborada pelo autor

vi. Aplicação do reforço

A aplicação do reforço para todas as vigas foi realizada pelo mesmo aplicador, utilizando as mesmas técnicas de aplicação e na posição invertida da viga (não natural), devido à alta complexidade de algumas metodologias de incremento de ancoragem, somado ao pouco domínio prático em realizar a aplicação desse sistema de reforço pelo aplicador (no caso, o autor deste trabalho).

O processo de reforço ocorreu usando pincel e se iniciou pela aplicação manual de uma camada de resina no substrato de concreto, afim de criar uma ponte de aderência eficiente para transmissão de esforços ao elemento estrutural. Em seguida, ocorreu o posicionamento centralizado da manta, a partir do centro da seção transversal de largura 12 cm e ao longo de todo comprimento livre; foi aplicada a resina para impregnação da manta, formando o material compósito; seguido da aplicação do incremento de ancoragem específico de cada metodologia e pôr fim a passagem de um “rolo quebra bolha”, com o objetivo de remover qualquer quantidade de ar aprisionado nas camadas ou então expulsar o excesso de resina, garantindo uma fixação eficiente do material compósito na base da estrutura. A Figura 46 exemplifica o processo descrito.

Figura 46 – Aplicação do sistema de reforço à flexão com manta de fibra de carbono: (a) resina no substrato de concreto; (b) posicionamento da manta de reforço e aplicação de resina saturante; (c) passagem do rolo quebra bolha



Fonte: elaborada pelo autor

#### vii. Procedimento de cura controlada

A aplicação de todos os sistemas de reforço ocorreu em ambientes controlados e constantes de temperatura de 25°C e umidade de 55%, a fim de uniformizar o processo, remover uma possível variável das análises e permitir a comparação dos resultados apenas pelas metodologias de incremento de ancoragem. Adotou-se essas características de temperatura e umidade, uma vez que está dentro da faixa de tolerância de aplicação indicada pelo fabricante e ser condições plausíveis de acontecerem em uma situação cotidiana de reforço de estruturas.

Ainda, as vigas reforçadas permaneceram nesse mesmo ambiente de temperatura e umidade controlados por pelo menos 7 dias, prazo mínimo que o fabricante recomenda para aplicação de cargas na estrutura.

#### viii. Instrumentação e ensaio

Após todo processo, foi realizada a instrumentação da manta com *Strain Gauges*, afim de medir as deformações específicas da manta de fibra de carbono durante a aplicação de cargas, seguido do ensaio de flexão a quatro pontos, sendo ambos detalhados ao longo deste capítulo do trabalho.

Em seguida, serão indicados os procedimentos específicos para a construção de cada uma das metodologias de incremento de ancoragem. As vigas, “referência”; “laço em U”; “parafuso spike”; EBROG” e “EBRIG” referem-se à primeira etapa do programa experimental. A partir do resultado obtido para esses elementos, se propôs alterações nas metodologias,

realizando mais dois tipos de incrementos de ancoragem, “EBRIG com Laço em U” e “EBRIG com parafuso spike”

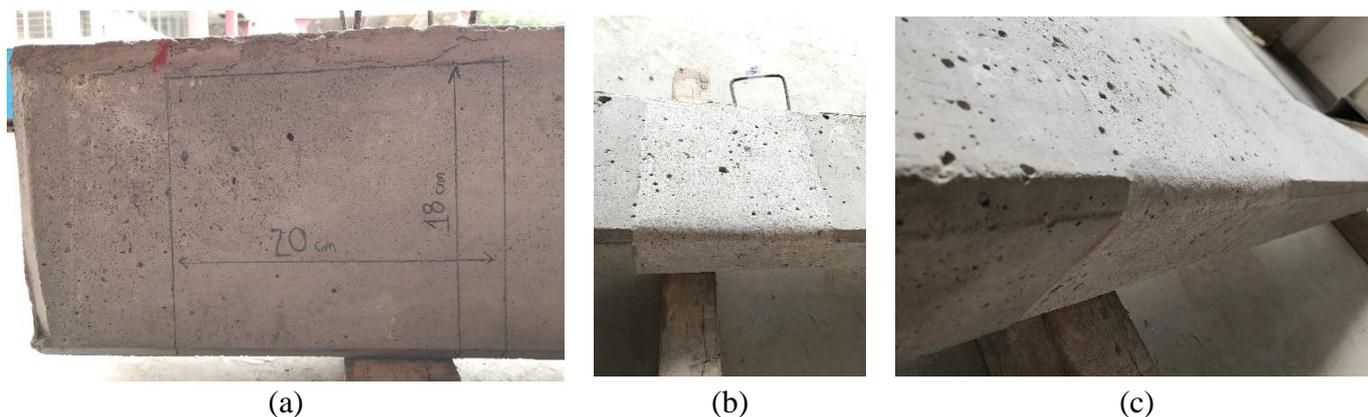
#### 4.4.1 Referência

A viga referência, denominadas VR1 e VR2, não receberam nenhuma metodologia de incremento de ancoragem. Logo, o seu processo de aplicação do reforço seguiu apenas as etapas básicas (i) a (viii) do item 4.4, descritas anteriormente.

#### 4.4.2 Laço em U

O incremento de ancoragem do tipo “laço em U”, denominados de VA1 e VA2, ocorrem nas extremidades das vigas. Para isso, é necessário realizar o lixamento mecânico com disco de desbaste na região da face lateral dos elementos, na posição onde o reforço será aplicado, afim de remover a nata superficial de concreto. Além disso, é fundamental realizar o arredondamento das arestas na posição onde a manta transpassa da base para a face lateral do elemento, com a função de evitar a concentração de tensões indesejadas (cisalhantes) e eventualmente rupturas prematuras. A Figura 47 indica o processo descrito.

Figura 47 – Preparação da superfície lateral do elemento que recebe o laço em U: (a) marcação da posição do incremento de ancoragem; (b) lixamento do laço em U com disco de desbaste; (c) arredondamento da aresta da base



Fonte: elaborada pelo autor

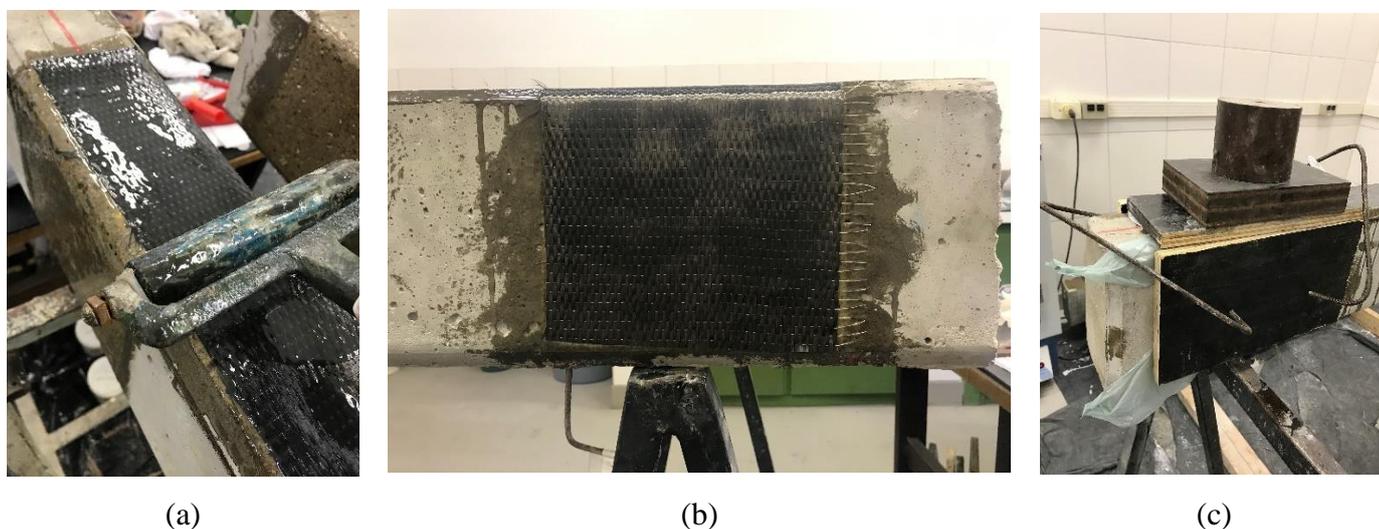
Nessa metodologia, a manta tem dimensões de 20 cm de largura e 46 cm de comprimento, para que atinjam 18 cm de altura na face lateral da viga, formando uma espécie de confinamento. Tais dimensões foram adotadas ao observar Ferreira et al. (2018) e os resultados obtidos pelo grupo de pesquisa LEME UFRGS, com melhores respostas para maiores larguras de laço, posicionadas nos extremos do elemento de reforço e com alturas

significativas, de 80% a 90% da altura total do elemento. É observado na prática que o incremento de ancoragem do tipo laço em U ocorre ao longo de toda altura livre do elemento, uma vez que é comum encontrar as vigas suportando lajes, além de facilitar a aplicação do sistema. Para essa metodologia, a direção dos fios da manta está disposta perpendicularmente em relação ao comprimento longitudinal da viga e ao reforço à flexão.

A aplicação da manta de fibra de carbono ocorre primeiramente para o reforço à flexão, sendo tal etapa considerada finalizada com a passagem do rolo quebra bolhas. Em seguida, foi executada a aplicação da manta do laço em U nas extremidades do elemento, de forma a sobrepor a camada da manta reforçada à flexão, com intuito de promover o incremento de ancoragem deste reforço.

Após a aplicação do reforço, foi realizado o posicionamento de fôrmas de madeira, grampos metálicos e pesos nas regiões do laço em U com o objetivo de auxiliar na fixação do reforço e evitar descolamento ou fixações incorretas nas faces laterais. A Figura 48 indica as etapas principais da metodologia descrita.

Figura 48 – Metodologia laço em U: (a) reforço à flexão; (b) incremento de ancoragem do tipo laço em U; (c) fixação do incremento de ancoragem



Fonte: elaborada pelo autor

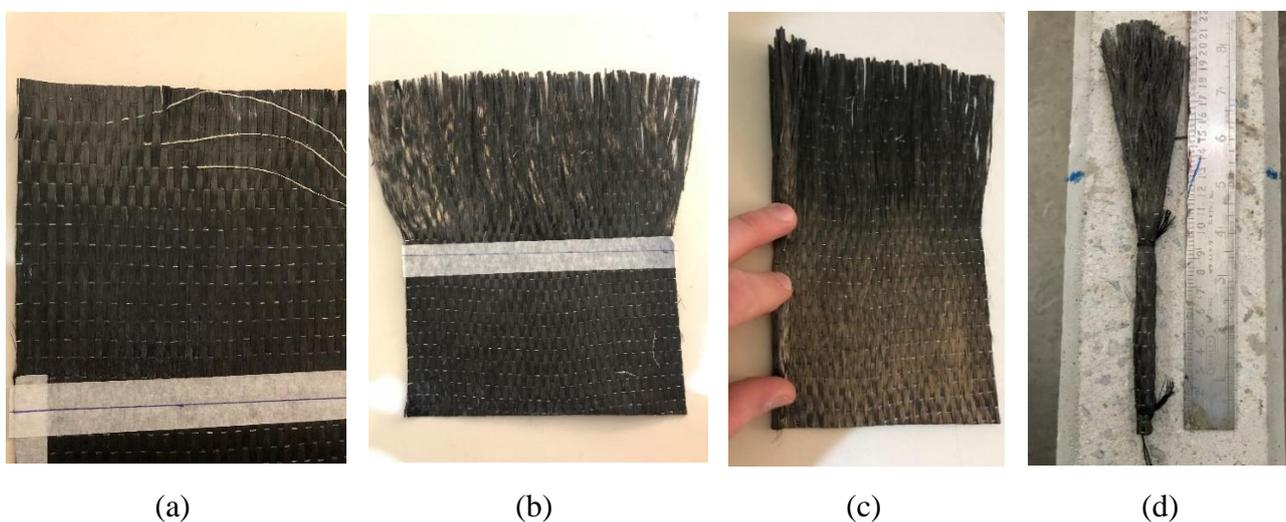
#### 4.4.3 Parafuso spike

O incremento de ancoragem do tipo “parafuso spike”, denominados de VB1 e VB2, ocorrem nas extremidades das vigas, na posição onde o momento fletor da viga é crescente (região do apoio até o comprimento de 1/3 do vão livre da viga), uma vez que a influência do método ocorre apenas nessa região, segundo Zaki et al. (2020) e Smith (2011).

Os parafusos de manta de fibra de carbono foram previamente preparados, utilizando o mesmo tipo e fabricante da manta. As dimensões dos parafusos foram de 1 cm de diâmetro (valor adotado) e 20 cm de comprimento, sendo que 9 cm introduzidos no interior do concreto, restando 11 cm para serem aderidos ao substrato da base, uma vez que Zaki et al. (2020) recomendam no mínimo o embutimento da região do cobrimento.

Afim de fazer parafusos nessas especificações, foi necessário cortar a manta de fibra de carbono nas dimensões 20 cm de comprimento x 15cm da largura; retirar os cordões que auxiliam na amarração e alinhamento das fibras até resultar em 11 cm de manta livre e enrolar, formando cilindros de diâmetro de 1 cm e amarrar com os próprios fios da manta, afim de garantir a forma do parafuso até o momento da aplicação do dispositivo. Ao todo foram confeccionadas para cada viga 6 unidades de parafusos para serem aplicados 3 em cada extremidade do elemento. Este valor foi adotado para permitir uma quantidade significativa de parafusos no vão de cisalhamento, mas que não fossem em excesso, garantindo espaço para posicionamento e aderência da região dos espigões na base, conforme discutido por Zaki et al. (2020). A Figura 49 indica as etapas do processo de confecção dos dispositivos.

Figura 49 – Etapas de confecção do parafuso spike: (a) e (b) retirada dos fios de amarração da região livre; (c) enrolamento das fibras, formando um cilindro; (d) visualização do parafuso finalizado

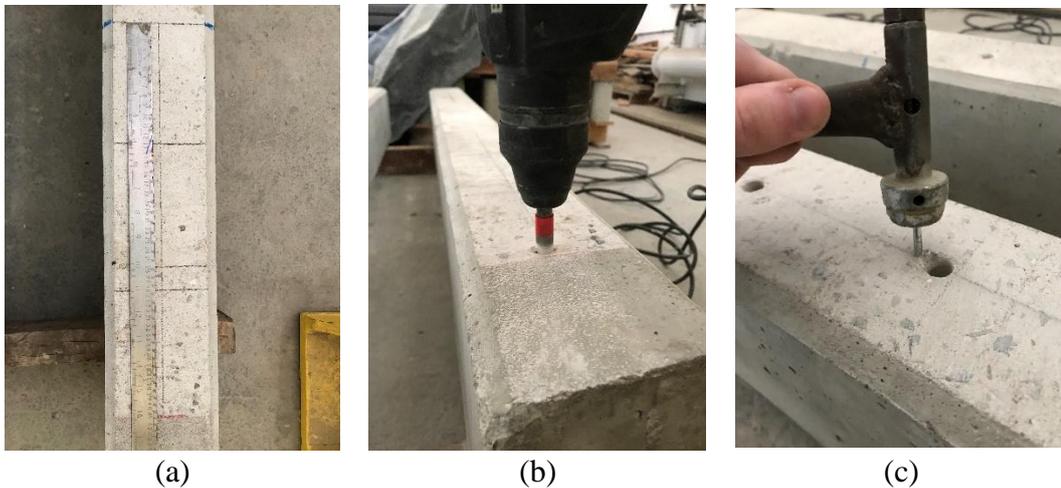


Fonte: elaborada pelo autor

Após o lixamento mecânico do substrato, realizou a marcação do posicionamento dos parafusos, seguido da furação com martetele elétrico até a profundidade mínima de 9 cm. O processo seguiu para o apicoamento superficial da região do furo na qual ocorre a transição de direções do parafuso, retirando arestas que possam introduzir tensões cisalhantes desnecessárias. No processo de limpeza do substrato com ar comprimido, retirou-se toda

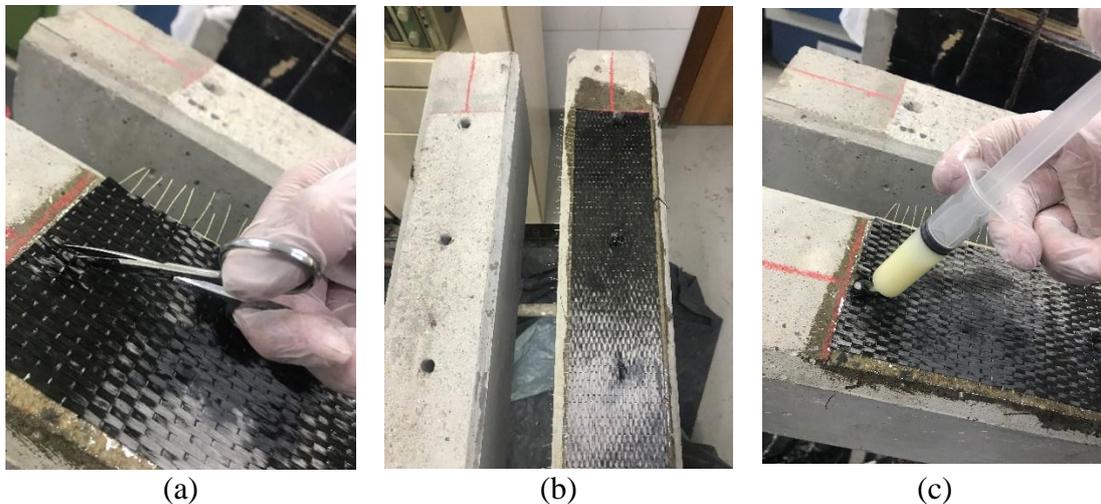
partícula solta dentro do furo. Após a aplicação da manta de reforço à flexão, realizou pequenos cortes na direção longitudinal da manta, onde os parafusos serão introduzidos nas vigas, porém danificando minimamente a manta. Em seguida, com o auxílio de uma seringa, preencheu o orifício com cerca de 2/3 da profundidade com resina e se fez a instalação do parafuso até a atingir os 9 cm. Por fim, realizou a dobra dos fios de comprimento livre de 11 cm para aderirem ao substrato da viga, realizando a impregnação com resina de forma gradual nos fios livres dos parafusos. A Figura 50, Figura 51 e Figura 52 indicam as etapas do processo de aplicação descrito.

Figura 50 – Preparação do substrato de concreto para ancoragem do tipo parafuso spike: (a) e (b) posicionamento e execução dos furos nas dimensões determinadas; (c) remoção das arestas do furo



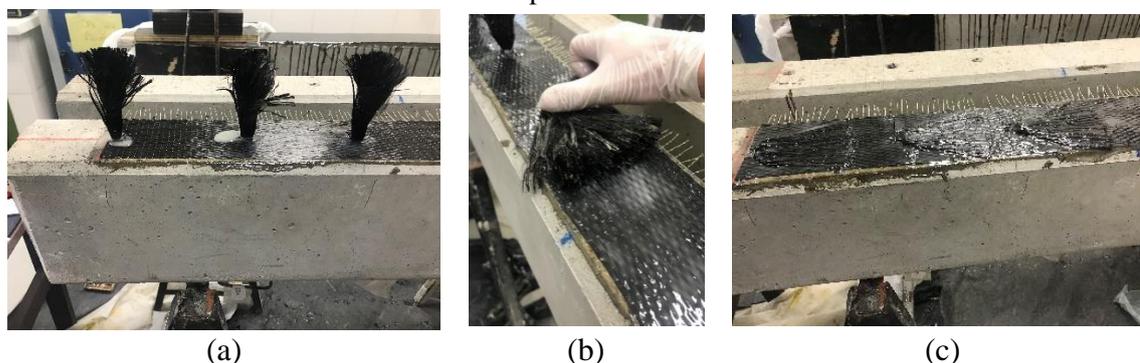
Fonte: elaborada pelo autor

Figura 51 – Posicionamento e preparação da manta de carbono para ancoragem do tipo parafuso spike: (a) corte na manta para introdução do parafuso; (b) reforço à flexão; (c) preenchimento prévio do furo com resina epoxídica de impregnação



Fonte: elaborada pelo autor

Figura 52 – Aplicação da metodologia de incremento de ancoragem do tipo parafuso spike: (a) introdução completa do parafuso; (b) posicionamento da parte solta; (c) laminação da parte solta do parafuso



Fonte: elaborada pelo autor

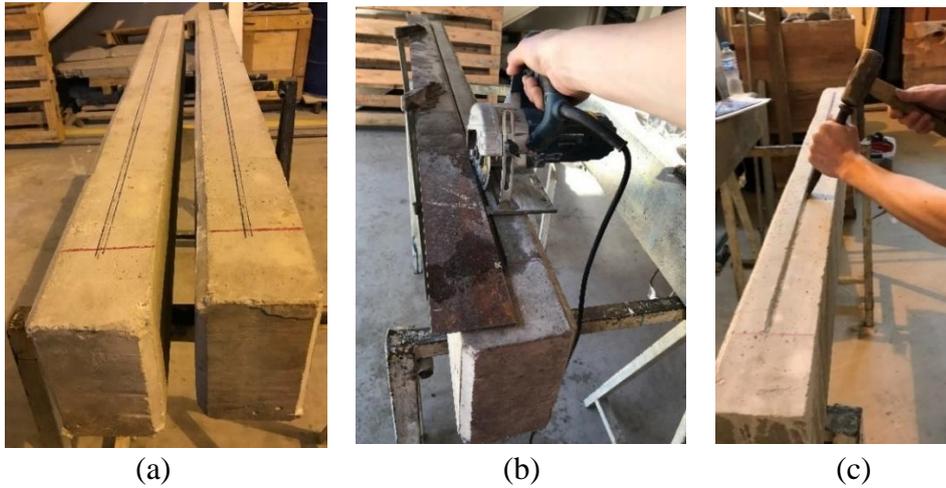
#### 4.4.4 EBROG

O incremento de ancoragem do tipo “EBROG”, denominados de VC1 e VC2, ocorre a partir de uma abertura de rasgo na metade da seção transversal da base da viga, ao longo do comprimento livre do elemento, ou seja, de 130 cm. A abertura do rasgo foi pré-definida com dimensões de 10 x 10 mm (largura e profundidade), indicando uma razão unitária entre a dimensão da largura e profundidade e sendo possível de executar, uma vez que o cobrimento da viga é de 2 cm, definida em projeto. Essa dimensão da ranhura foi adotada uma vez que, após ensaios preliminares, foi observada a dificuldade em alcançar a dimensão considerada ideal por Sanginabadi et al. (2022a), de 5 x 5 mm de largura e profundidade para a metodologia. Além disso, os estudos de Tajmir-Riahi et al. (2019) e Mostofinejad e Shameli (2011) adotaram dimensões da ranhura de 10 x 10 mm, 5 x 5 mm e 5 x 10 mm, para os primeiros e de 8 x 10 mm, para os segundos, sendo largura x profundidade, obtendo sucesso nas análises.

Para a preparação e execução da ranhura, foi utilizado disco de corte mecânico, talhadeira e martelo, afim de remover o concreto da região do rasgo e de regularizar o fundo da ranhura. Não necessariamente todas as vigas ficaram com as dimensões de largura e profundidade desejada, uma vez que dependem do domínio e habilidade do profissional que utiliza o disco de corte mecânico, porém atingiram dimensões finais minimamente próximas às pré-definidas.

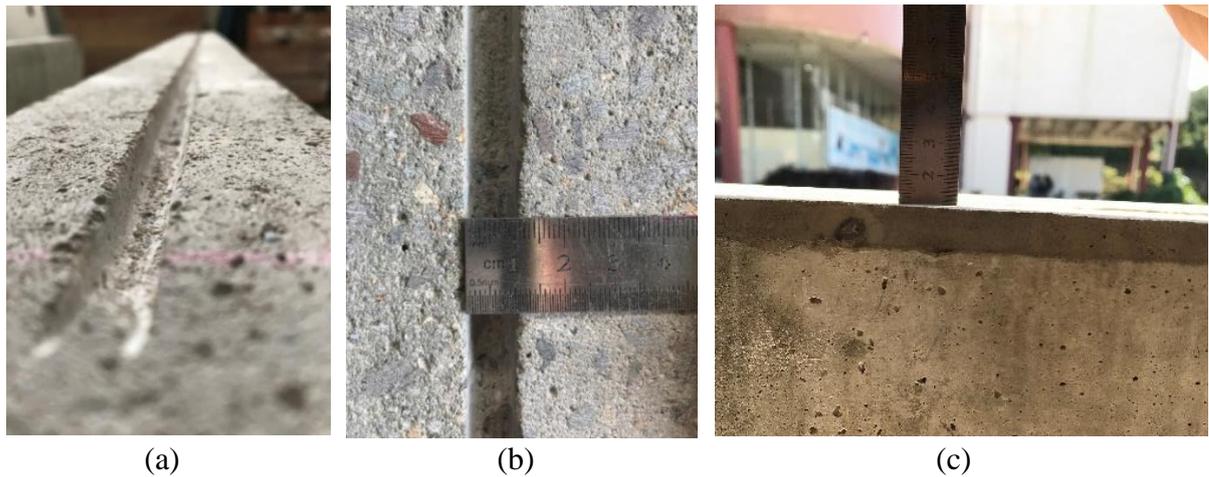
A aplicação do reforço para essa metodologia consiste em preencher a totalidade da ranhura com resina e em seguida realizar os procedimentos básicos para aplicação do reforço à flexão do elemento. A Figura 53, Figura 54 e Figura 55 indicam as etapas do processo de aplicação do incremento de ancoragem descrito.

Figura 53 - Detalhes construtivos do método de incremento de ancoragem EBROG: (a) marcação das ranhuras; (b) execução das ranhuras com disco de corte; (c) remoção do concreto interno das ranhuras



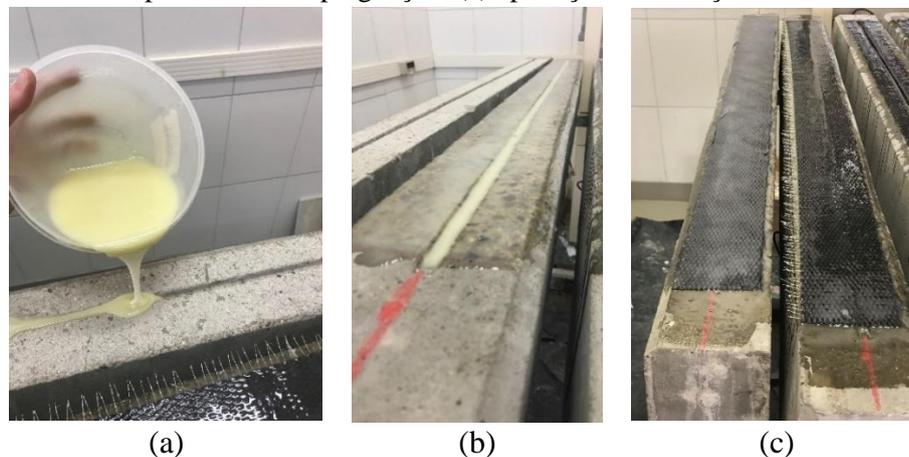
Fonte: elaborada pelo autor

Figura 54 - Dimensões do método de incremento de ancoragem EBROG: (a) remoção de arestas internas da ranhura; (b) e (c) dimensão da largura e profundidade da ranhura, respectivamente



Fonte: elaborada pelo autor

Figura 55 - Aplicação do método de incremento de ancoragem EBROG: (a) e (b) aplicação da resina epoxídica de impregnação; (c) aplicação do reforço à flexão



Fonte: elaborada pelo autor

#### 4.4.5 EBRIG

O incremento de ancoragem do tipo “EBRIG”, denominados de VD1 e VD2, é um método de abertura de rasgo na base da viga, similar a metodologia EBROG, assim o preparo seguiu alguns procedimentos semelhantes ao descritos no tópico 4.4.4 deste trabalho.

Realizou a abertura de rasgo na metade da seção transversal da base da viga, ao longo do comprimento livre do elemento, ou seja, de 130 cm, com dimensões pré-definidas de 10 x 10 mm (largura e profundidade), a fim da dimensão da ranhura ser a mesma variável da metodologia EBROG, permitindo comparação das eficiências entre as técnicas. A abertura foi realizada com disco de corte mecânico, utilizando talhadeira e martetele para remoção do concreto da região do rasgo e regularização do fundo da ranhura. Como a aplicação da manta contorna a região do rasgo, foi necessário remover as arestas interna da ranhura, arredondando-as com disco de desbaste ao longo de todo comprimento da abertura, para que não haja concentrações de tensões cisalhantes que pudessem promover a ruptura prematura do material. Não necessariamente todas as vigas ficaram com as dimensões de largura e profundidade desejada, uma vez que dependem do domínio e habilidade do profissional que utiliza o disco de corte mecânico, porém atingiram dimensões finais minimamente próximas as pré-definidas.

A dimensão da largura da manta de fibra de carbono seguiu as mesmas características adotadas para as outras metodologias, ou seja, de 9 cm. Apesar da existência da ranhura introduzir a possibilidade de uma área maior ao reforço à flexão, optou-se por continuar a uniformização de áreas de reforço para todas as metodologias, a fim que seja possível fazer comparações mais precisas do comportamento dos diferentes tipos de incrementos de ancoragem.

Na aplicação do reforço, após o posicionamento da manta na viga, ocorreu a introdução da manta dentro da ranhura em todo comprimento livre da viga, através de dispositivo de rolo com disco de madeira de largura menor do que 10 mm e altura maior do que 10 mm, afim de que a manta seja aderida na ranhura de forma eficiente (fundo e paredes laterais), além de atuar como um rolo quebra bolha para a região interna do rasgo, garantido a colagem do reforço. A Figura 56 indica as etapas do processo de aplicação do incremento de ancoragem descrito.

Figura 56 - Detalhes construtivos do método de incremento de ancoragem EBRIG: (a) e (b) remoção e arredondamento das arestas externas da ranhura; (c) posicionamento do reforço à flexão; (d) e (e) dispositivo de aplicação do reforço contornando a seção transversal da ranhura; (e) laminação e finalização do processo de reforço com aplicação de incremento de ancoragem EBRIG



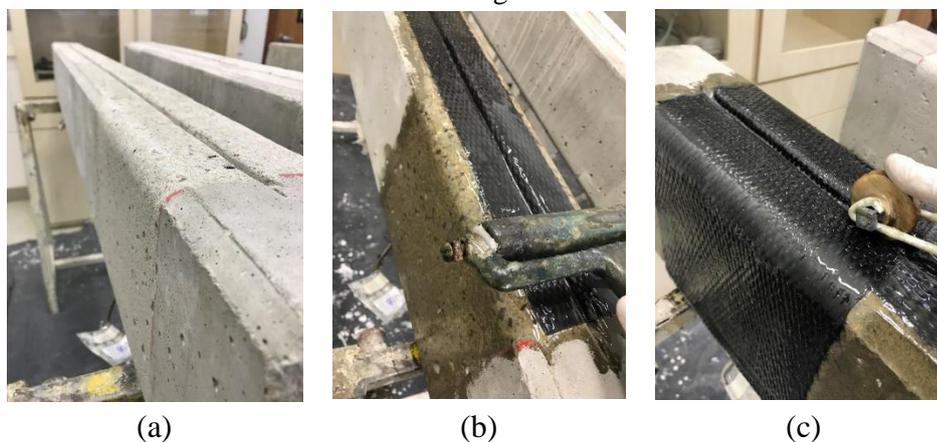
Fonte: elaborada pelo autor

#### 4.4.6 EBRIG com laço em U

O incremento de ancoragem do tipo “EBRIG com laço em U”, denominados de VDA1 e VDA2, referem-se à segunda parte do programa experimental, em que se propõem alteração nas metodologias de incremento de ancoragem da Etapa 1. Nesse caso, realizou a união da metodologia de ranhuras EBRIG com a aplicação do laço em U, seguindo os procedimentos descritos em 4.4.2 e 4.4.5 deste trabalho, utilizando as mesmas dimensões de ranhura para o EBRIG e de manta de fibra de carbono para o laço em U, afim de compatibilizar essa variável entre as outras metodologias, avaliando de maneira efetiva a eficiência das técnicas.

Nessa aplicação, primeiramente foi executada a metodologia EBRIG e em seguida a aplicação do laço em U nas extremidades, garantindo que na região de aplicação do laço ocorra o contorno da manta dentro da ranhura e a aderência completa do reforço na região do fundo e paredes da ranhura, com o uso do rolo com disco de madeira. A Figura 57 indica as etapas do processo de aplicação do incremento de ancoragem descrito.

Figura 57 - Detalhes construtivos do método de incremento de ancoragem EBRIG com Laço em U: (a) substrato de concreto preparado; (b) aplicação do reforço à flexão; (c) aplicação do incremento de ancoragem



Fonte: elaborada pelo autor

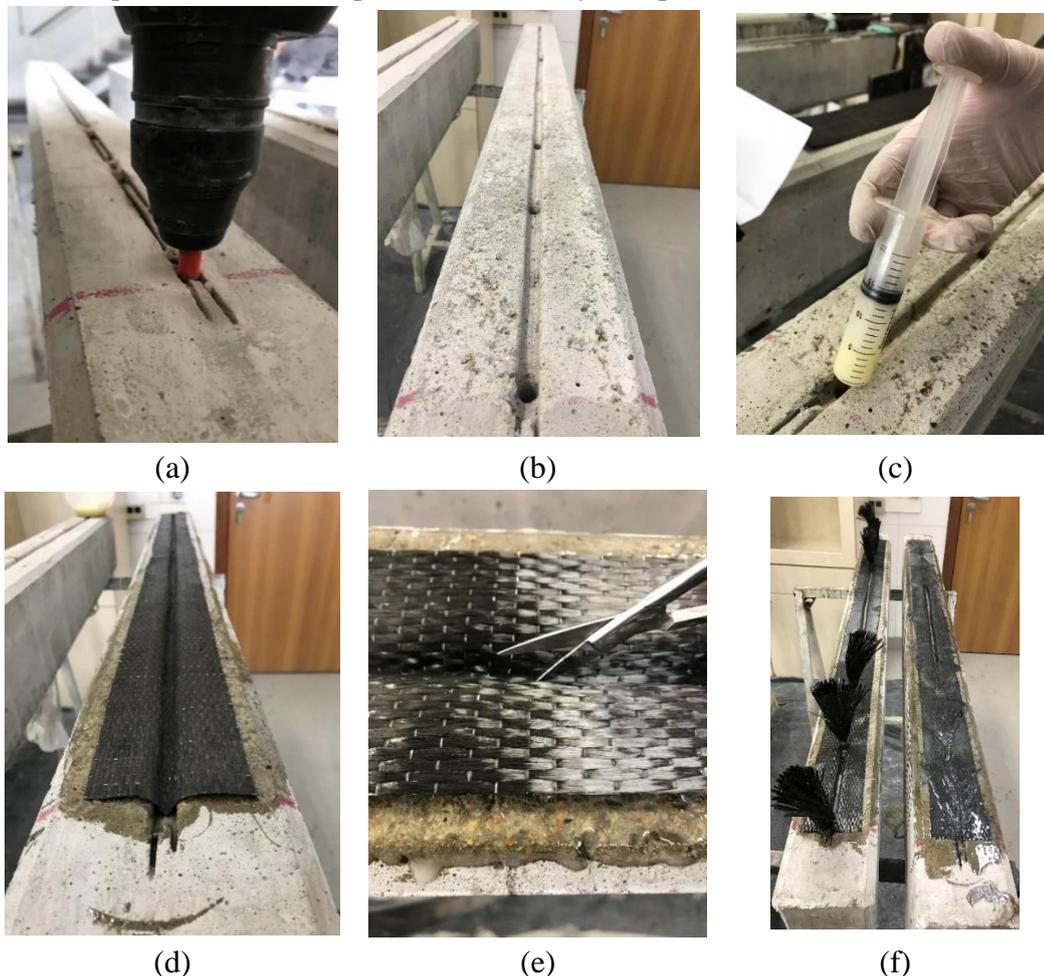
#### 4.4.7 EBRIG com parafuso spike

O incremento de ancoragem do tipo “EBRIG com parafuso spike”, denominados de VDB1 e VDB2, referem-se à segunda parte do programa experimental, em que se propõem alteração nas metodologias de incremento de ancoragem da Etapa 1. Nesse caso, realizou a união da metodologia de ranhuras EBRIG com a aplicação do parafuso spike, seguindo os procedimentos descritos em 4.4.3 e 4.4.5 deste trabalho, utilizando as mesmas dimensões de ranhura para o EBRIG e configurações do parafuso spike, afim de compatibilizar essa variável entre as outras metodologias, avaliando a eficiência das técnicas.

Na aplicação, como o diâmetro do parafuso e a largura da ranhura tem 10 mm, a introdução do parafuso ficou inteiramente dentro da largura da ranhura. Como a profundidade da ranhura é de 10 mm, as furações dos buracos para a inserção dos parafusos ficaram com 9 cm em relação ao fundo da ranhura, logo a 10 cm em relação a base da viga, compatibilizando com a metodologia descrita em 4.4.3 deste trabalho.

Primeiramente, foi executada a metodologia EBRIG e em seguida a aplicação dos parafusos spike. Ao dobrar a parte solta do parafuso na base da viga, garantiu-se que as fibras aderidas ficassem dispostas em toda base do elemento estrutural, sendo que na região da ranhura, aderissem ao fundo e paredes laterais, com o uso do rolo com disco de madeira. A Figura 58 indica as etapas do processo de aplicação do incremento de ancoragem descrito.

Figura 58 - Detalhes construtivos do método de incremento de ancoragem EBRIG com parafuso spike: (a) e (b) confecção dos furos; (c) preenchimento do furo com resina epoxídica; (d) posicionamento do reforço à flexão utilizando incremento de ancoragem EBRIG; (e) corte da manta para introdução dos parafusos; (f) posicionamento dos parafusos e laminação da parte solta no substrato de concreto



Fonte: elaborada pelo autor

#### 4.5 INSTRUMENTAÇÃO DOS ENSAIOS DE FLEXÃO

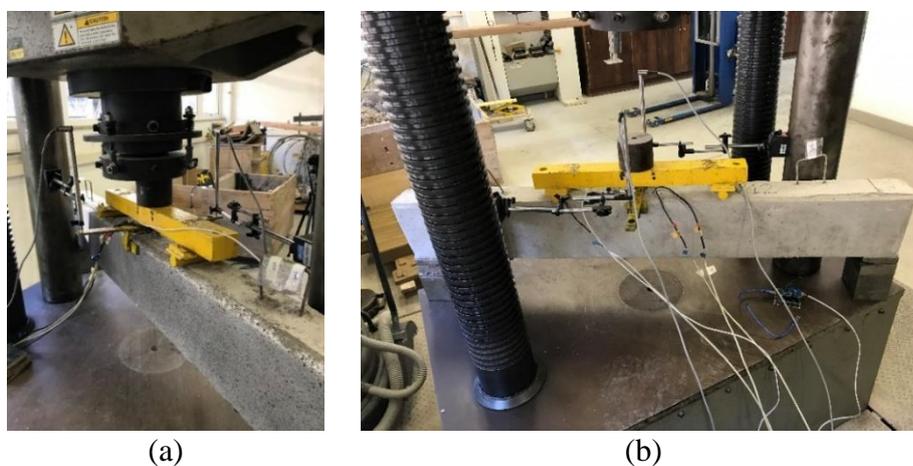
Todas as vigas ensaiadas receberam instrumentação do tipo LVDT (*Linear Variation Displacement Transducer*) para monitoramento do deslocamento vertical da estrutura durante o ensaio de flexão.

Com o objetivo de avaliar as deformações específicas dos materiais, todas as vigas receberam extensômetros do tipo *Strain Gauge* na armadura longitudinal, no substrato de concreto e na manta de fibra de carbono. Tais dispositivos foram posicionados conforme interesse de avaliação do comportamento da deformação específica durante o ensaio e permitem comparações quantitativas do comportamento dos materiais nos diferentes métodos de ancoragem propostos no programa experimental.

#### 4.5.1 *Linear Variation Displacement Transducer (LVDT)*

A medição do deslocamento da estrutura de concreto armado ocorreu com o uso de LVDT da marca HBM, com curso  $\pm 25,00$  mm e precisão de 0,01 mm. Para isso, foram dispostos dois LVDT's em cada ensaio, sendo cada um dos equipamentos posicionados em cada face lateral do elemento, com ambos localizados na região da seção transversal central da viga. Dessa forma, a média dos resultados obtidos por cada equipamento permite definir o deslocamento vertical da seção longitudinal central das vigas. A Figura 59 indica o posicionamento descrito nos elementos.

Figura 59 – Posicionamento dos medidores de deslocamento LVDT's no centro da viga



Fonte: elaborada pelo autor

#### 4.5.2 *Strain Gauge*

A instalação dos dispositivos de leitura de deformação específica, seguiram os procedimentos realizados e consolidados dentro do grupo de pesquisa LEME UFRGS. Algumas etapas do procedimento de instalação do *strain gauge* nos materiais aço, concreto e reforço de manta se repetem, portanto, são apresentadas a seguir de forma geral:

- a) Marcação do posicionamento para instalação do dispositivo: buscou-se adotar a mesma posição para o mesmo material instrumentado, a fim de permitir comparações das deformações específicas nas diferentes metodologias para a região em estudo;
- b) Regularização da superfície, realizada através de lixamento manual ou mecânico do material. Eventualmente, foi feita a aplicação de material que auxilie na planicidade do elemento a ser instrumentado.
- c) Limpeza da superfície a fim de remover partículas soltas com o uso de álcool isopropílico;
- d) Colagem do dispositivo *Strain Gauge* na superfície, permitindo a deformação solidarizada com o material em análise, através do uso de cola adesiva instantânea Loctite 496;

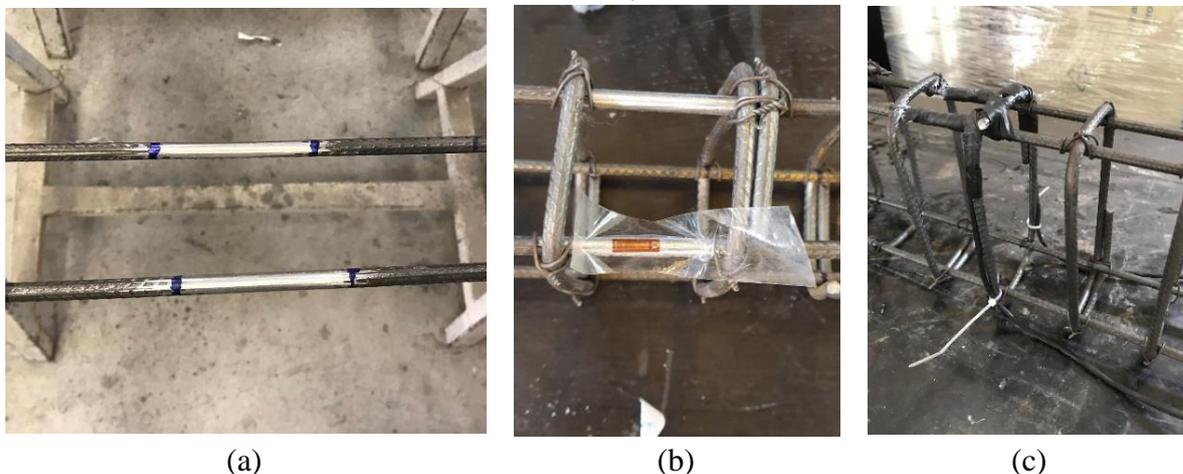
- e) Soldagem com estanho das antenas do *Strain Gauge* com o cabo de aquisição de dados
- f) Proteção mecânica e elétrica do dispositivo, com uso de fita isolante;
- g) Fixação do cabo de aquisição de dados em superfície rígida com aplicação de cola plástica, a fim de evitar arrancamento mecânico do cabo durante manuseio do elemento ou prematuramente durante o ensaio.

Sendo assim, nos itens a seguir, serão apresentados os aspectos particulares de cada um dos materiais instrumentados dentro deste programa experimental.

#### i. Armaduras de flexão

Foi realizada a fixação de extensômetros em cada uma das armaduras longitudinais (positivas) da viga, sendo posicionadas no centro das barras, ou seja, a 0,75 m da extremidade da viga. O procedimento de instrumentação correu após a etapa de amarração das ferragens e antes da etapa de concretagem dos elementos, sendo efetuadas dentro do LEME UFRGS. O lixamento das barras das ferragens ocorreu com uso de lima até que fosse perceptível aspecto liso, eliminando as nervuras do elemento na região instrumentada. Após os procedimentos básicos concluídos, foi realizado a vedação com fita de alta fusão e silicone, protegendo para o processo de moldagem. O cabo de aquisição de dados foi fixado nos estribos com abraçadeira plástica, a fim de dar sustentação até que fossem alcançados a região de fora das fôrmas de concretagem. Algumas etapas do processo descrito são indicadas na Figura 60. O *Strain Gauge* utilizado foi KFG-10-120-C1-11, de 10 mm de comprimento, da marca Kyowa e *gauge factor* de  $2,11 \pm 1,0\%$ .

Figura 60 – Procedimento para instalação de *strain gauge* nas armaduras longitudinais: (a) lixamento na posição de instrumentação definida; (b) colagem do *strain gauge*; (c) vedação e fixação da instrumentação



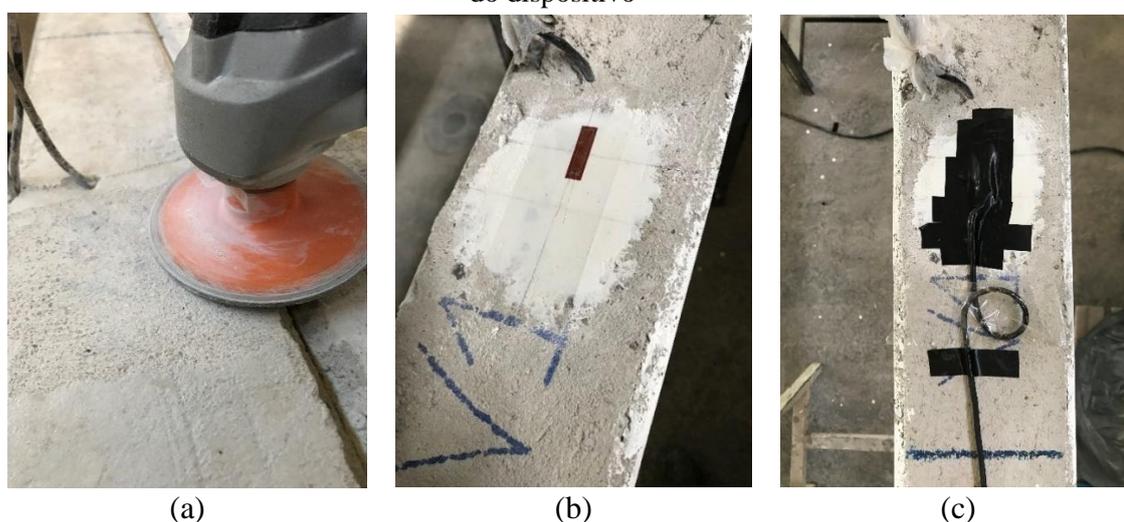
Fonte: elaborada pelo autor

### ii. Substrato de concreto

Foi realizada a fixação de extensômetros no substrato de concreto da viga que recebe os esforços de compressão no ensaio de flexão à quatro pontos (na parte superior do elemento). Os extensômetros foram posicionados a 20 cm do ponto de aplicação do apoio da carga, uma vez que na maioria das vigas não foi possível aplicar o *strain gauge* no centro do vão, devido aos cabos da instrumentação do aço estarem posicionados nessa região. Logo, tal posição foi adotada para permitir a instrumentação na mesma posição em todas as vigas, compatibilizando resultados. Entende-se que as deformações nessa posição serão aproximadamente iguais as ocorridas exatamente no centro do vão, uma vez que estão distantes apenas 3,5 cm do centro geométrico da viga.

A regularização da superfície ocorreu por lixamento mecânico com disco de desbaste, seguido de aplicação de uma fina camada de cola plástica com características mecânicas (resistência e deformação) similares ao do concreto e posterior lixamento manual com folha de lixa, com a função de finalizar a regularização e planificar a superfície. Algumas etapas do processo descrito são indicadas na Figura 61. O *Strain Gauge* utilizado foi KFG-20-120-C1-11, de 20 mm de comprimento, da marca Kyowa e *gauge factor* de  $2,09 \pm 1,0\%$ .

Figura 61 – Procedimento para instalação de *strain gauge* no substrato de concreto: (a) lixamento mecânico da superfície; (b) aplicação de cola plástica, lixamento e colagem do *strain gauge*; (c) vedação do dispositivo



Fonte: elaborada pelo autor

### iii. Manta de fibra de carbono

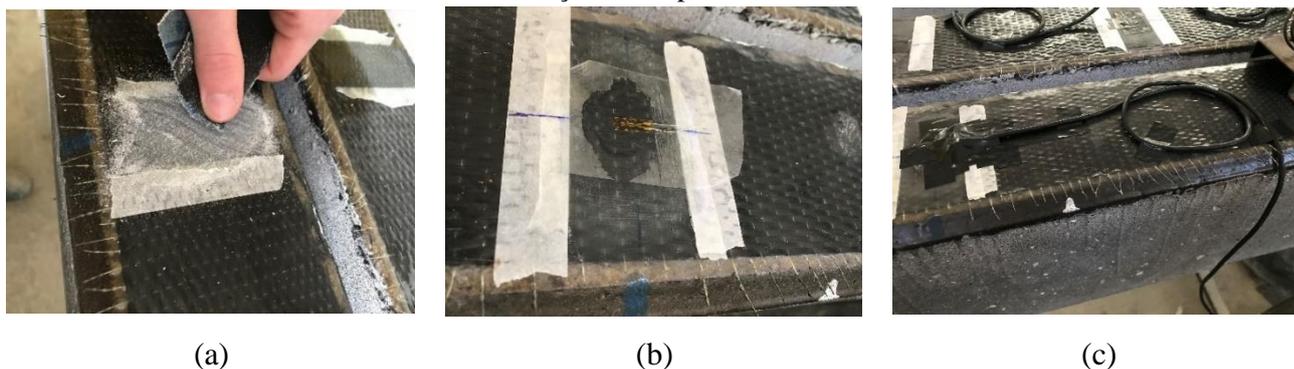
Foi realizada a fixação de extensômetros no material de reforço, posicionado em regiões de interesse de avaliação do comportamento do material. De forma geral, em todas metodologias foi realizada a instrumentação da manta de fibra de carbono na posição central da

viga (0,75 m da extremidade da viga) e na extremidade (0,30 m da extremidade da viga, uma vez que o Laço em U ocupa o espaço até essa cota geométrica e assim, avaliando o comportamento da manta do reforço à flexão ao invés do mecanismo de incremento de ancoragem), compatibilizando todas as vigas.

Nas metodologias de ranhura EBROG também foram posicionados extensômetros nas ranhuras, correspondentes às regiões do fundo e parede lateral do centro do vão (0,75m da extremidade da viga), a fim de avaliar o comportamento do reforço nessas regiões durante o ensaio. Nas metodologias que possuíam o parafuso spike, além dos extensômetros mínimos (centro e extremidade), também foram posicionados extensômetros na região do substrato da base entre os parafusos, afim de avaliar a funcionamento do dispositivo para o reforço e ancoragem.

A instrumentação da manta ocorreu após alguns dias da aplicação do reforço da viga, para garantir uma cura inicial e não comprometer o sistema PRFC. O processo de regularização da superfície da manta ocorreu através de lixamento manual e superficial da resina para não danificar os fios da fibra. Algumas etapas do processo descrito são indicadas na Figura 62. O *Strain Gauge* de KFRP-5-120-C1-3, de 5 mm de comprimento, da marca Kyowa e *gauge factor* de  $1,96 \pm 1,0\%$ .

Figura 62 - Procedimento para instalação de *strain gauge* no substrato do material de reforço: (a) lixamento manual e superficial da camada de resina; (b) posicionamento e colagem do extensômetro; (c) vedação do dispositivo

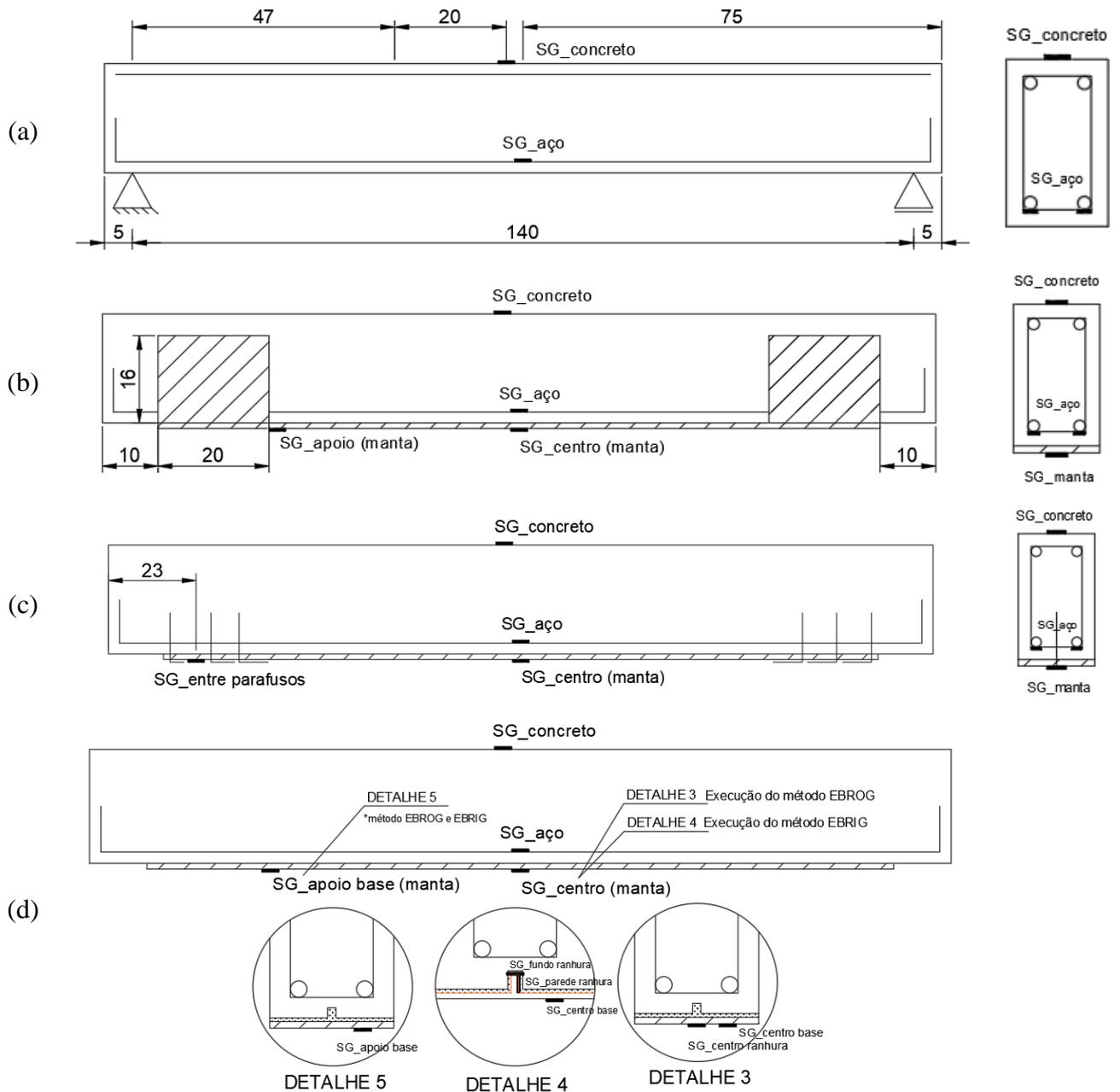


Fonte: elaborada pelo autor

Assim, para a instrumentação do tipo de *Strain Gauge* buscou-se o posicionamento na mesma cota geométrica para todas as vigas, permitindo comparações de comportamento dos mesmos materiais entre todos os métodos. Dessa forma, na Figura 63 é indicada uma representação gráfica do esquema geral da posição dos *Strain Gauges* em todas as vigas do programa experimental. Para os extensômetros das mantas de fibra de carbono, nomeiam-se:

- No centro do vão: “SG\_centro”;
- Mais próximo dos apoios da extremidade: “SG\_apoio” e “SG\_apoio base”;
- Para o método dos parafusos spike (VB e VDB): “SG\_entre parafusos”;
- Para o método EBROG (VC) no centro da viga: “SG\_base” e “SG\_centro ranhura”;
- Para o método EBRIG (VD e VDA), posicionado internamente na ranhura e no centro da viga: “SG\_parede ranhura”, “SG\_fundo ranhura” e SG\_base.

Figura 63 – Posicionamento dos *Strin Gauges* nas vigas do programa experimental: (a) VT; (b) VR e VA; (c) VB; (d) VC, VD, VDA e VDB



Fonte: elaborada pelo autor

#### 4.6 PROCEDIMENTO DE ENSAIO À FLEXÃO DAS VIGAS

A realização de todos os ensaios mecânicos ocorreu nas dependências do Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturas (LEME), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, através da prensa da marca Shimadzu, de capacidade de 2000 kN. No ensaio de flexão à quatro pontos das vigas de concreto armado, utilizou-se a taxa de aplicação de carga da prensa de 1,0 mm/min, conforme utilizado dentro do grupo de pesquisas LEME UFRGS.

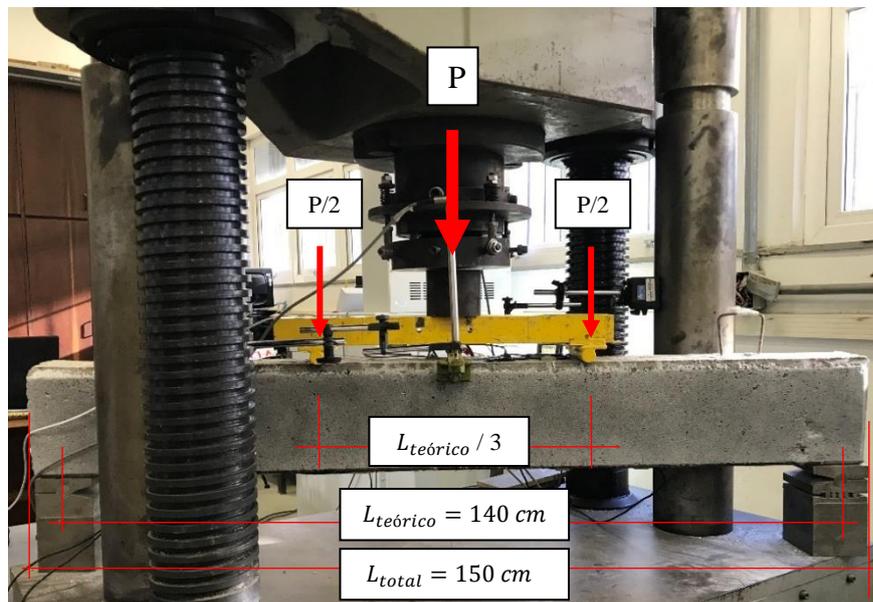
A aquisição de dados da prensa e da instrumentação para os ensaios mecânicos foi realizada através do programa Catman Easy, utilizando o equipamento QuantumX MX840B, da marca HBM, com oito canais de leitura sendo o primeiro destinado à entrada de dados da prensa e o segundo e terceiro canais a aquisição de dados dos LVDT's. Para os ensaios flexão à quatro pontos, foi necessária a utilização de um segundo equipamento QuantumX MX840B, de forma sincronizada, com o objetivo de utilizar as entradas restantes (4 a 8) do primeiro equipamento e as entradas seguintes do segundo, a fim de adquirir os dados dos *strain gauges* estrategicamente posicionados na viga. Em todos os ensaios mecânicos utilizou-se uma frequência de 5 Hz de leitura.

Durante o ensaio de flexão à quatro pontos, a viga de concreto foi apoiada em bases rígidas de 10 cm de comprimento e 12 cm de largura, sendo uma extremidade do tipo apoio simples (ou de primeiro gênero), que permite a rotação e o deslocamento horizontal e impede o deslocamento vertical; e a outra extremidade do tipo apoio duplo (ou de segundo gênero), que permite a rotação, impedindo o deslocamento vertical e horizontal. Dessa forma, o vão livre real entre os apoios da base é de 130 cm, porém para efeitos de cálculo os apoios são do tipo concentrados na metade do comprimento dessas bases rígidas, resultando em um vão livre teórico de 140 cm.

O ensaio de flexão à quatro pontos das vigas de concreto ocorreram pela aplicação da carga da prensa, considerada pontual, em uma barra metálica rígida, apoiada em dois cilindros transversais a esta e também metálicos, que cobrem a seção transversal do elemento e que estão distantes entre si de uma distância  $L/3$ . O valor  $L$  refere-se ao comprimento do vão livre teórico do elemento, posicionando o conjunto em sua face superior.

Os ensaios das vigas foram realizados entre os dias 24/08/2022 e 05/10/2022 e para cada elemento, foi realizado o rompimento total da estrutura, esgotando a capacidade máxima, de forma contínua e sem interrupções. A Figura 64 indica a configuração descrita para o ensaio.

Figura 64 – Configuração do ensaio de flexão à quatro pontos: (a) posicionamento de apoios e aplicação de cargas; (b) visão geral do ensaio



(a)



(b)

Fonte: elaborada pelo autor

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao longo deste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos nos ensaios de flexão à quatro pontos nas vigas de concreto armado. Os resultados serão apresentados, a fim de comparar o comportamento das diferentes metodologias de ancoragem do sistema de reforço com o comportamento da viga testemunho (sem reforço) e viga referência (apenas ancoragem reta, sem nenhuma metodologia de incremento), no que dizem respeito as cargas máximas, deslocamentos no centro do vão, deformações dos materiais, análise da ductilidade e modos de ruptura ou falha.

### 5.1 CONSIDERAÇÕES DOS RESULTADOS

As vigas de concreto foram ensaiadas com idades diferentes, uma vez que o processo de concretagem ocorreu em um único lote e logisticamente foi inviável realizar os ensaios de flexão em um único dia. O primeiro elemento foi rompido após 219 dias da data da concretagem e o último elemento foi rompido após 261 dias desta mesma data, indicando 42 dias de diferença.

Araújo (2001) e Reginato (2020) discutem os processos de envelhecimento do concreto e indicam a evolução das características mecânicas, convergindo seus resultados e análises para a validação do fato de que as diferenças entre as datas dos ensaios deste programa experimental podem ser consideradas como pouco significativas no comportamento final dos elementos, uma vez que o concreto não está mais em idades recentes da concretagem, caracterizado por maior estabilidade de suas reações químicas de hidratação do cimento e conseqüentemente das características mecânicas. Portanto, apesar da realização dos ensaios de flexão ocorrerem em datas distintas, estas estão suficientemente afastadas das fases onde o concreto apresenta variações significativas de suas propriedades, podendo ser consideradas variações em um intervalo aceitável e pouco relevante.

As vigas reforçadas foram ensaiadas com idades aproximadamente iguais após aplicação da resina de impregnação. O elemento reforçado que teve menor tempo entre a etapa de aplicação do reforço e a efetiva ruptura em ensaio correspondeu as vigas VDA1, VDA2, VDB1, VDB2, com 9 dias e o maior tempo correu nas vigas VD1 e VD2, com 14 dias, indicando 5 dias de diferença. Assim todas as vigas reforçadas respeitaram o tempo mínimo de 7 dias para aplicação de carga, conforme recomendação do fabricante, portanto não se pode afirmar que seja um fator de alteração de resistência ou comportamento dos elementos reforçados.

Uma vez que o programa experimental foi elaborado para acontecer com apenas duas repetições por variável proposta, as comparações entre as metodologias dos comportamentos dos elementos ao longo do ensaio de flexão serão realizadas para todos os elementos, ou seja, sem utilizar a média das repetições, uma vez que tal tratamento estatístico pode indicar análises imprecisas no comportamento das metodologias. Análises das médias acontecem apenas quando for pertinente para o estudo, sendo justificadas.

A Etapa II do programa experimental, correspondentes as vigas VDA1, VDA2, VDB1, VDB2, foi elaborada a partir dos resultados obtidos das vigas da etapa I do trabalho, propondo alterações, a fim de melhorar o comportamento dos elementos reforçados. Foram observados resultados satisfatórios para as vigas das metodologias laço em U, parafuso spike e EBRIG, sendo proposto a aplicação em conjunto dessas metodologias para a execução da Etapa II.

## 5.2 RESULTADOS ANALÍTICOS

A previsão dos resultados experimentais ocorre através do estudo dos resultados analíticos, permitindo comparação para os valores máximos de momento fletor em sistemas de flexão a quatro pontos. O estudo analítico levou em consideração as características dos materiais aço e concreto, considerando seus valores médios obtidos através dos ensaios de controle tecnológico, discutido e apresentado no item 4.3.2.4 deste trabalho e nos dados do fabricante das mantas de fibra de carbono e resina epóxi, discutido e apresentado no item 4.3.3 deste trabalho, a fim de comparações coerentes.

Para a determinação dos momentos fletores máximos da análise analítica, utilizou a norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014) no que diz respeito à viga testemunho de concreto armado e a norma ACI 440.2R (2017) no que diz respeito à viga reforçada com manta de fibra de carbono (viga referência), obtendo os respectivos valores normativos. Afim de permitir comparações mais coerentes entre valor analítico e experimental, os cálculos e considerações, observados nos Apêndices A e B deste trabalho, consideram a armadura de compressão do aço contribuindo para a seção resistente de concreto. Para a determinação analítica, foram levantados das respectivas normas os seguintes fatores e coeficientes de cálculo:

- a) Os efeitos deletérios das cargas de longa duração, efeito Rüsçh, e os coeficientes de minoração do aço ( $\gamma_s = 1,15$ ) e do concreto  $\gamma_c = 1,4$ ;
- b) Coeficiente ambiental (CE); coeficiente de minoração para deformação máxima de projeto do compósito de PRF ( $\epsilon_{fd}$ ), associada a determinação do valor de cálculo ( $\epsilon_{fd}$ ); fator  $\alpha_1$  de

minoração do concreto pelo efeito Rüschi; minoração da resistência na flexão do PRFC ( $\psi_f$ ); coeficiente de ductilidade ( $\phi$ ).

A Tabela 8 indica os resultados analíticos e experimentais obtidos para a viga de concreto sem nenhum tipo de reforço (viga testemunho – VT) e para a viga que não recebeu incrementos de ancoragem, apenas reforço à flexão (viga referência – VR). Os resultados experimentais referem-se ao maior valor obtido dentro da mesma variável (testemunho e referencia). Nos resultados analíticos da viga testemunho, desconsidera-se todos os coeficientes descritos no item (a) acima. Para o resultado analítico das vigas referência, se faz o estudo dos elementos em 3 situações distintas, referentes aos coeficientes da norma, descritos no item (a) e (b) acima: “VR\_i”, considerando todos os coeficientes da norma; “VR\_ii”, desconsiderando os coeficientes, exceto o de ductilidade ( $\phi$ ) e “VR\_iii” sem a aplicação de nenhum coeficiente.

Tabela 8 – Resultados analíticos x experimentais

VIGA	ANALÍTICO		EXPERIMENTAL		COMPARAÇÃO
	$M$ [kNm]	$F$ [kN]	$M_{exp}$ [kNm]	$F_{exp}$ [kN]	$\frac{M_{exp}}{M}$
VT	6,48	27,59	7,73	32,89	1,19
VR_i	11,08	47,15	11,00	46,82	0,99
VR_ii	12,25	52,14			0,89
VR_iii	13,61	57,93			0,81

$M$  ;  $F$ : momento fletor máximo e força máxima analíticos, de acordo com as respectivas normas vigentes

$M_{exp}$  ;  $F_{exp}$ : momento fletor máximo e força máxima experimentais, obtidas nos ensaios

Fonte: elaborada pelo autor

As comparações entre os resultados analíticos e experimentais indicam que a norma 6118 (ABNT, 2014) subdimensiona a viga de concreto armado testemunho do estudo (VT) em aproximadamente 19%, resultado esperado por ser normativo.

Para o resultado analítico “VR\_i”, observa-se que a norma consegue prever de forma significativa o comportamento do elemento experimental (reforçado e sem incremento de ancoragem), devido a diferença de carga de aproximadamente 1%. Ao desconsiderar os coeficientes de minoração, porém ainda considerando o comportamento dúctil, “VR\_ii”, o valor analítico superdimensiona as expectativas de carga máxima dos elementos experimentais em 11%; e ao também desconsiderar o coeficiente de ductilidade, “VR\_iii”, o valor analítico superdimensiona mais ainda o experimental, agora em 19%.

A previsão analítica da metodologia “VR\_iii”, é o que aconteceria com um elemento real, caso não existissem os comportamentos de ruptura frágil, característicos das vigas reforçadas com PRF. Ao observar os resultados experimentais das metodologias de incremento de ancoragem, a carga analítica “VR\_iii” se aproxima da experimental em no mínimo 90%, como ocorre com as vigas VA1, VA2, VB1, VB2, VC2, VD1 (inclusive para esta, supera em 3,8% o valor analítico), VD2, VDA1 e VDA2.

No **Apêndice B**, é indicado o valor analítico para o esforço cortante resistente a partir da metodologia na NBR 6118 (ABNT, 2014), com objetivo de verificar a seção de concreto armado proposta. Obteve-se o valor de  $V_k = 123,28 \text{ kN}$ , desconsiderando os coeficientes de minoração normativos do aço e concreto. Experimentalmente, a viga testemunho de concreto atingiu momento fletor máximo de 7,73 kNm, o que indica esforço cortante de 15,59 kN, representando 12,6% do esforço cortante máximo analítico. Experimentalmente, a viga referência, reforçada e sem incremento de ancoragem, atingiu momento fletor máximo de 11,00 kNm, o que indica esforço cortante de 23,40 kN, representando 18,9% do esforço cortante máximo analítico. Com relação às outras metodologias de incremento de ancoragem, o maior momento fletor ocorreu para a viga VD1, com momento fletor máximo de 14,14 kNm, o que indica esforço cortante de 30,08 kN, representando 24,4% do esforço cortante máximo analítico. Logo, as configurações da armadura transversal garantiram o superdimensionamento do elemento ao esforço cortante e evitaram a ruptura por esse tipo de esforço.

### 5.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS VIGAS

Para os resultados dos ensaios, foram identificados os pontos que correspondem aos valores máximos e médios entre as repetições que ocorreram durante o ensaio, sendo eles a carga aplicada pela prensa ( $P_{m\acute{a}x}$ ); o seu respectivo momento fletor ( $M_{m\acute{a}x}$ ) e a flecha atuante no centro do elemento ( $f_{m\acute{a}x}$ ). Além disso, determina-se um tratamento estatístico populacional par esses resultados, através do cálculo da diferença numérica, percentual e coeficiente de variação dos elementos de mesma variável, a fim de comparar o comportamento das repetições dentro das mesmas espécies.

Sabendo que as vigas VT; VR; VA; VB; VC e VD correspondem a primeira parte do programa experimental e as vigas VDA e VDB correspondem a segunda parte, é apresentado na Tabela 9 os resultados.

Tabela 9 – Resultados dos ensaios de flexão das vigas e análise estatística

Id.	VALOR MÁXIMO			VALOR MÉDIO			ESTATÍSTICA (POPULACIONAL)					
	$P_{máx}$	$M_{máx}$	$f_{máx}$	$P_{máx}$	$M_{máx}$	$f_{máx}$	$\Delta P_{máx}$	$\Delta M_{máx}$	$\Delta f_{máx}$	Desvio Padrão (Coeficiente de Variação)		
	kN	kNm	mm	kN	kNm	mm	kN (%)	kNm (%)	mm (%)	P.	M.	F.
VT 1	32,89	7,73	35,32	31,16	7,33	33,06	3,46	0,81	4,53	1,73	0,41	2,27
VT 2	29,43	6,92	30,79				(10,52%)	(10,48%)	(12,83%)	(5,55%)	(5,55%)	(6,85%)
VR 1	46,82	11,00	11,17	46,42	10,91	11,18	0,80	0,19	0,01	0,40	0,09	0,00
VR 2	46,02	10,81	11,18				(1,71%)	(1,73%)	(0,09%)	(0,86%)	(0,86%)	(0,04%)
VA 1	55,86	13,13	17,42	56,33	13,24	18,70	0,93	0,22	2,56	0,47	0,11	1,28
VA 2	56,79	13,35	19,98				(1,64%)	(1,65%)	(12,81%)	(0,83%)	(0,83%)	(6,84%)
VB 1	53,00	12,46	22,49	55,03	12,94	20,02	4,05	0,95	4,59	2,03	0,48	2,47
VB 2	57,05	13,41	17,54				(7,10%)	(7,08%)	(22,01%)	(3,68%)	(3,68%)	(12,36%)
VC 1	43,34	10,18	9,85	49,21	11,56	12,96	11,73	2,76	6,21	5,87	1,38	3,11
VC 2	55,07	12,94	16,06				(21,30%)	(21,33%)	(38,67%)	(11,92%)	(11,92%)	(23,96%)
VD 1	60,16	14,14	19,82	58,08	13,65	17,98	4,17	0,98	3,69	2,09	0,49	1,84
VD 2	55,99	13,16	16,13				(6,93%)	(6,93%)	(18,62%)	(3,59%)	(3,59%)	(10,26%)
VDA 1	54,77	12,87	21,41	53,57	12,59	21,09	2,40	0,56	0,6	1,20	0,28	0,32
VDA 2	52,37	12,31	20,76				(4,38%)	(4,35%)	(3,04%)	(2,24%)	(2,24%)	(1,54%)
VDB 1	47,97	11,27	19,29	44,65	10,49	16,77	6,64	1,56	5,05	3,32	0,78	2,52
VDB 2	41,33	9,71	14,24				(13,84%)	(13,84%)	(26,18%)	(7,44%)	(7,44%)	(15,06%)

Fonte: elaborada pelo autor

A partir dos resultados da Tabela 9, pode-se fazer as seguintes afirmações sobre os valores máximos de cargas (i) a (iii) e de flechas (iv) a (vi):

- i. A **maior carga de ruptura** ocorre para a viga VD1 e a **menor carga de ruptura** para as vigas testemunho (VT). Considerando apenas os elementos reforçados, a **menor carga de ruptura** ocorre para a viga VDB2;
- ii. A **maior variação de cargas** máximas que ocorrem dentro das mesmas variáveis, é a da metodologia VC (incremento de ancoragem EBROG), com 21,30% de diferença; a metodologia VDB (incremento de ancoragem EBRIG com parafuso spike) também indicou significativa variação, com 13,84% de diferença. Dessa forma, os maiores **coeficientes de variação** de carregamento acontecem para as metodologias VC e VDB;

- iii. A **menor variação de cargas** máximas que ocorrem dentro das mesmas variáveis, é a da metodologia VA (incremento com laço em U), com 1,64% de diferença; a metodologia VR (referência) também indicou pouca variação, com 1,71% de diferença. Dessa forma, os menores **coeficientes de variação** de carregamentos acontecem para as metodologias das vigas VA e VR;
- iv. A **maior flecha** máxima ocorre para as vigas testemunho (VT); considerando apenas as vigas reforçadas, a **maior flecha** máxima ocorre para a viga VB1 e **menor flecha** máxima ocorre para a viga VC1, sendo as flechas máximas computadas no instante de ruptura do elemento;
- v. A **maior variação das flechas** máximas que ocorrem dentro das mesmas variáveis, é a da metodologia VC (incremento de ancoragem EBROG), com 38,67% de diferença; a metodologia VDB (incremento de ancoragem EBRIG com parafuso spike) também indicou significativa variação, com 26,18% de diferença. Dessa forma, os maiores **coeficientes de variação** de flecha acontecem para as metodologias das vigas VC e VDB;
- vi. A **menor variação das flechas** máxima que ocorrem dentro das mesmas variáveis, é a da metodologia VR (viga referência), com 0,09% de diferença; a metodologia VDA (incremento de ancoragem EBRIG com laço em U) também indicou pouca variação, com 3,04% de diferença. Dessa forma, os menores **coeficientes de variação** de flecha acontecem para as metodologias das vigas VR e VDA.

Ao analisar os resultados da Tabela 9, observa-se que as espécies apresentam diferenças de resultados para carga e flecha entre as suas repetições, sendo mais significativas para algumas metodologias, como a VC, e menos significativas, como a VR, o que era de se esperar, uma vez que se lida com muitas variáveis não controladas dentro de um programa experimental. Apesar disso, se entende que os resultados são satisfatórios e permitem chegar aos objetivos propostos.

Como os resultados obtidos para os exemplares das vigas testemunho e das vigas referência foram consistentes entre suas repetições, é apresentada na Tabela 10 a comparação de cada uma das metodologias de incremento de ancoragem em relação aos valores médios das vigas testemunho e referência.

Tabela 10 – Comparação das metodologias com viga testemunho e referência

Id.	Variação em relação à média da viga TESTEMUNHO						Variação em relação à média da viga REFERÊNCIA					
	$\Delta P_{m\acute{a}x}$		$\Delta M_{m\acute{a}x}$		$\Delta f_{m\acute{a}x}$		$\Delta P_{m\acute{a}x}$		$\Delta M_{m\acute{a}x}$		$\Delta f_{m\acute{a}x}$	
	kN	%	kNm	%	mm	%	kN	%	kNm	%	mm	%
VR 1	15,66	50,26	3,67	50,07	-21,89	-66,21	-	-	-	-	-	-
VR 2	14,86	47,69	3,48	47,48	-21,88	-66,18	-	-	-	-	-	-
VA 1	24,70	79,27	5,80	79,13	-15,64	-47,31	9,44	20,34	2,22	20,35	6,24	13,44
VA 2	25,63	82,25	6,02	82,13	-13,08	-39,56	10,37	22,34	2,44	22,36	8,80	18,96
VB 1	21,84	70,09	5,13	69,99	-10,57	-31,97	6,58	14,17	1,55	14,21	11,31	24,36
VB 2	25,89	83,09	6,08	82,95	-15,52	-46,94	10,63	22,90	2,50	22,91	6,36	13,70
VC 1	12,18	39,09	2,85	38,88	-23,21	-70,21	-3,08	-6,64	-0,73	-6,69	-1,33	-2,87
VC 2	23,91	76,73	5,61	76,53	-17,00	-51,42	8,65	18,63	2,03	18,61	4,88	10,51
VD 1	29,00	93,07	6,81	92,91	-13,24	-40,05	13,74	29,60	3,23	29,61	8,64	18,61
VD 2	24,83	79,69	5,83	79,54	-16,93	-51,21	9,57	20,62	2,25	20,62	4,95	10,66
VDA 1	23,61	75,77	5,54	75,58	-11,65	-35,24	8,35	17,99	1,96	17,97	10,23	22,04
VDA 2	21,21	68,07	4,98	67,94	-12,30	-37,21	5,95	12,82	1,4	12,83	9,58	20,64
VDB 1	16,81	53,95	3,94	53,75	-13,77	-41,65	1,55	3,34	0,36	3,30	8,11	17,47
VDB 2	10,17	32,64	2,38	32,47	-18,82	-56,93	-5,09	-10,97	-1,20	-11,00	3,06	6,59

Fonte: elaborada pelo autor

Os valores negativos da Tabela 10 indicam que o elemento em análise gerou um resultado comparativo menor do que a média da viga testemunho e/ou referência. Logo valores positivos indicam que o elemento em análise gerou um resultado comparativo maior do que a média da viga testemunho e/ou referência. Ainda, pode ser afirmado que todas as vigas do programa experimental apresentaram acréscimo de cargas em relação à média das vigas testemunho, evidenciando o sucesso do reforço à flexão com manta de fibra de carbono em qualquer metodologia.

Em relação à carga média das vigas testemunho, a viga que não possui incremento de ancoragem (VR) proporcionou um aumento máximo de 50,26% (adição de 15,66 kN). Ao analisar todas as vigas do programa, a metodologia D (EBRIG) permitiu os maiores aumentos de carga em relação à média das vigas testemunho, com aumento máximo de 93,07% (adição de 29,00 kN).

As vigas VC1 e a VDB2 não conseguiram atingir cargas máximas maiores do que a média da viga referência. Observa-se que para a repetição da primeira metodologia (VC2), o acréscimo de carga para a média da viga referência foi considerável, de 18,63% (adição de 8,65 kN), sendo um indício de que a metodologia C (EBROG) sofreu alguma variável não controlada durante o processo produtivo. Para a metodologia EBRIG com parafuso spike (VDB1), houve acréscimo de carga em relação à média da referência, porém pouco significativa, de apenas 3,34% (adição de 1,55 kN), sendo um indício de pouca eficiência da metodologia DB de incremento de ancoragem.

As vigas das metodologias A (laço em U) e D (EBRIG) permitiram os maiores aumentos de carga em relação à média das vigas referência, com aumentos máximos de 22,37% (adição de 10,37 kN) e 29,60% (adição de 13,74 kN), respectivamente, indicando eficiência nos incrementos de ancoragem.

A viga que não apresenta incremento de ancoragem (VR) teve o comportamento esperado quanto ao deslocamento no centro do vão, indicando deslocamentos consideravelmente menores, aproximadamente 66% a menos do que a média das que atuaram nas vigas testemunho. Em todo o programa experimental, nenhuma viga apresentou flechas maiores do que as que atuaram na média das vigas testemunho. Entretanto as vigas das metodologias VB (parafuso spike) e VDA (EBRIG com laço em U) indicaram numericamente valores expressivos de deslocamento, com ao menos uma de suas repetições atingindo no mínimo 20 mm de flechas, o que é interessante se tratando do comportamento de ruptura frágil do reforço externo de PRF sem incremento de ancoragem.

Observa-se que todos os incrementos de ancoragem possuíram flechas maiores do que a média das que atuam nas vigas referência, indicando sucesso dos incrementos de ancoragens, com exceção da viga VC1 (apesar de sua repetição, a VC2, indicar aumento considerável de 4,88 mm de deslocamento no centro do vão em relação a referência). A viga VB1 apresentou o maior acréscimo de flecha no centro do vão, comparativamente a média da viga referência, de 24,36% (adição de 11,31 mm), porém todas as metodologias se comportam satisfatoriamente quanto a esse parâmetro, com pelo menos uma de suas repetições com acréscimo de no mínimo 10% das flechas, comparado a média das vigas referência.

Ao comparar os resultados obtidos entre as Etapas I e II, pode-se afirmar que as cargas e flechas máximas de toda as vigas da Etapa II foram menores do que as que ocorrem nas metodologias envolvidas da Etapa I (VA, VB e VD), sendo um indício da não ocorrência de “superposição de efeitos”. Porém, para a metodologia VDA, observa-se uma aproximação considerável das cargas e flechas máximas em relação as metodologias VA e VD. Assim, as

propostas de metodologias da Etapa II não apresentaram resultados que melhorassem o comportamento das vigas da Etapa I em relação a esses parâmetros.

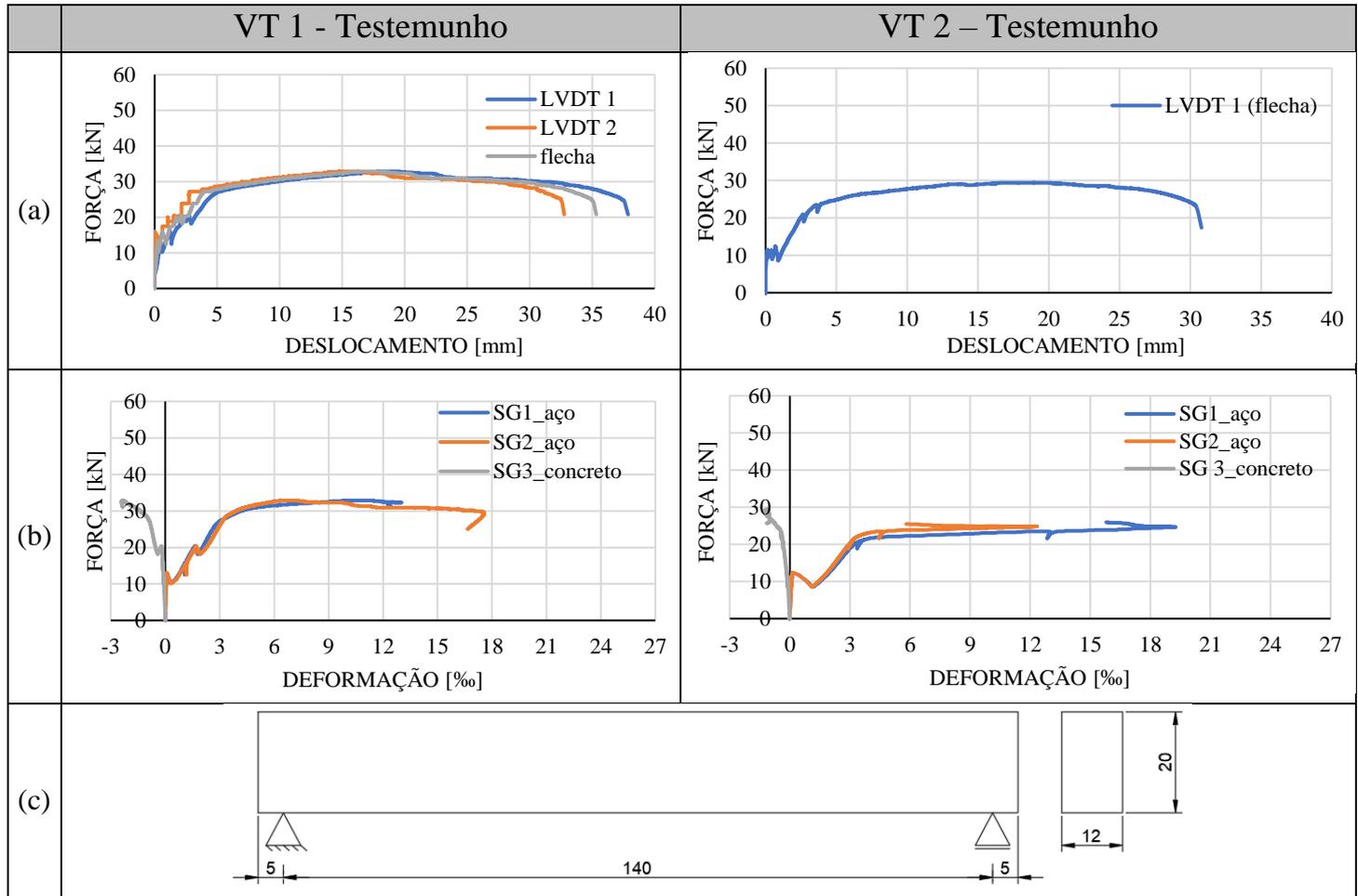
#### 5.4 COMPORTAMENTO DOS ELEMENTOS NO ENSAIO À FLEXÃO

A partir dos resultados de flexão a quatro pontos das vigas, são analisados os comportamentos dos elementos ao longo dos ensaios. Para isso, são construídos os gráficos Carga x Deslocamento; Carga x Deformação Específica do concreto e do aço e Carga x Deformação Específica da manta de PRFC.

A seguir, são apresentadas as Figura 65 à Figura 72 que indicam o comportamento dos elementos em estudo. Os tópicos (a) referem-se aos gráficos “Carga x Deslocamento”; os tópicos (b) referem-se aos gráficos “Carga x Deformação Específica da armadura longitudinal”; os tópicos (c) referem-se aos gráficos “Carga x Deformação Específica da manta de PRFC” e os tópicos (d) referem-se a uma representação esquemática da metodologia analisada.

Os dados referentes às “Cargas” são os obtidos a partir da prensa, em [kN], os “Deslocamentos” referentes aos LVDT’s, em [mm] e as “Deformações Específicas” referentes aos *strain gauges*, em [%]. Caso não seja representado um determinado dado (LVDT ou *strain gauge*), indica que a leitura do dispositivo não ocorreu de forma efetiva durante o ensaio e seus dados não foram considerados por não representar o comportamento elemento.

Figura 65 – Comportamento das vigas testemunho no ensaio de flexão

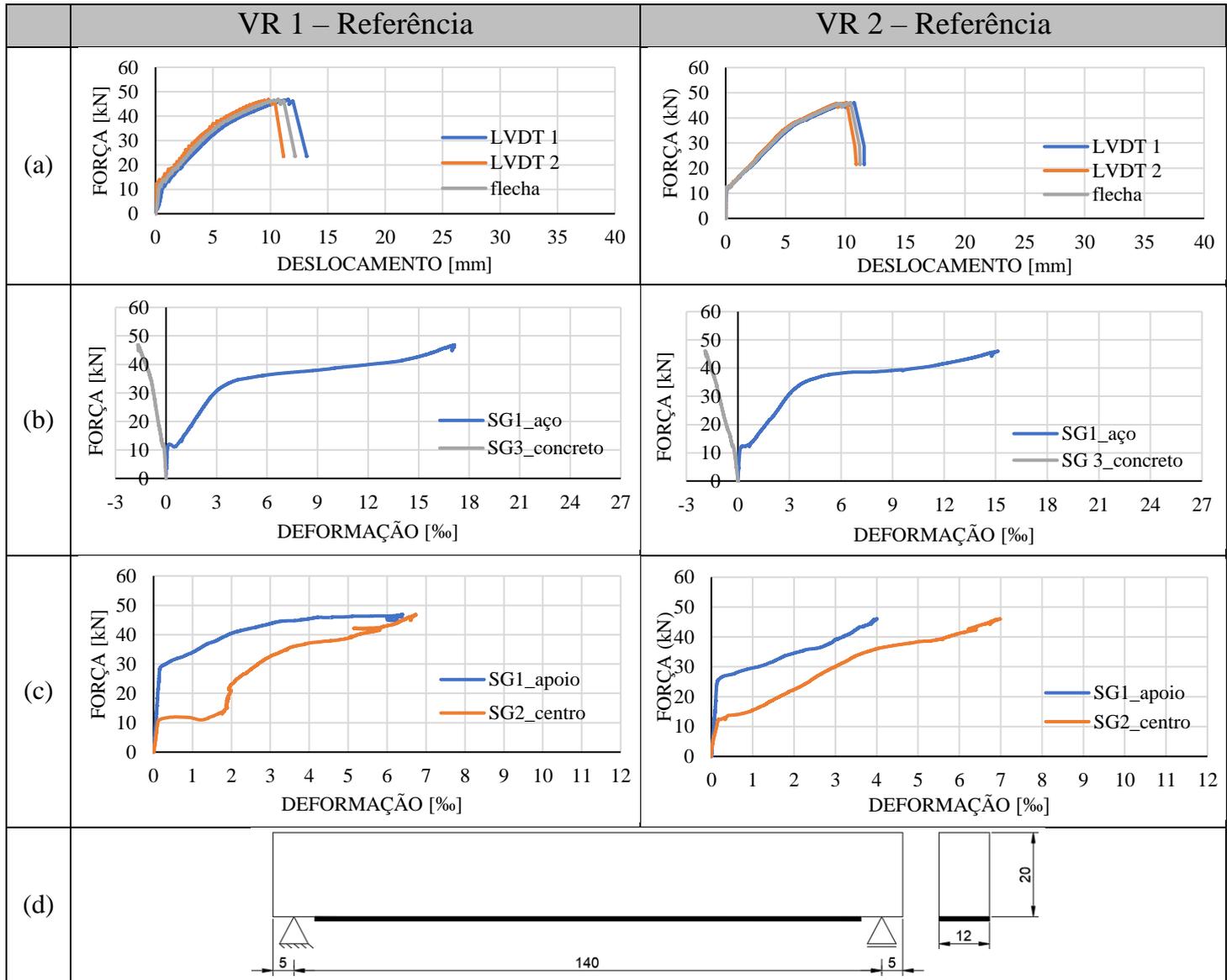


Fonte: elaborada pelo autor

As vigas (VT) referem-se aos elementos sem nenhum tipo de reforço. Ao observar os conjuntos de gráficos (a) e (b) apresentados acima, os dois elementos da série apresentaram comportamentos significativamente semelhantes e dentro do previsto para esse tipo de elemento, com considerável escoamento da armadura de flexão, garantido deformação e ductilidade.

As deformações específicas do aço e do concreto se comportaram da forma esperada para os dois exemplares. Não foi atingido a deformação de compressão máxima do concreto (3,5‰), mas atingindo valores maiores do que os máximos normativos (10‰) de deformação do aço, logo indicando ruptura dentro do domínio 2.

Figura 66 - Comportamento das vigas referência no ensaio de flexão

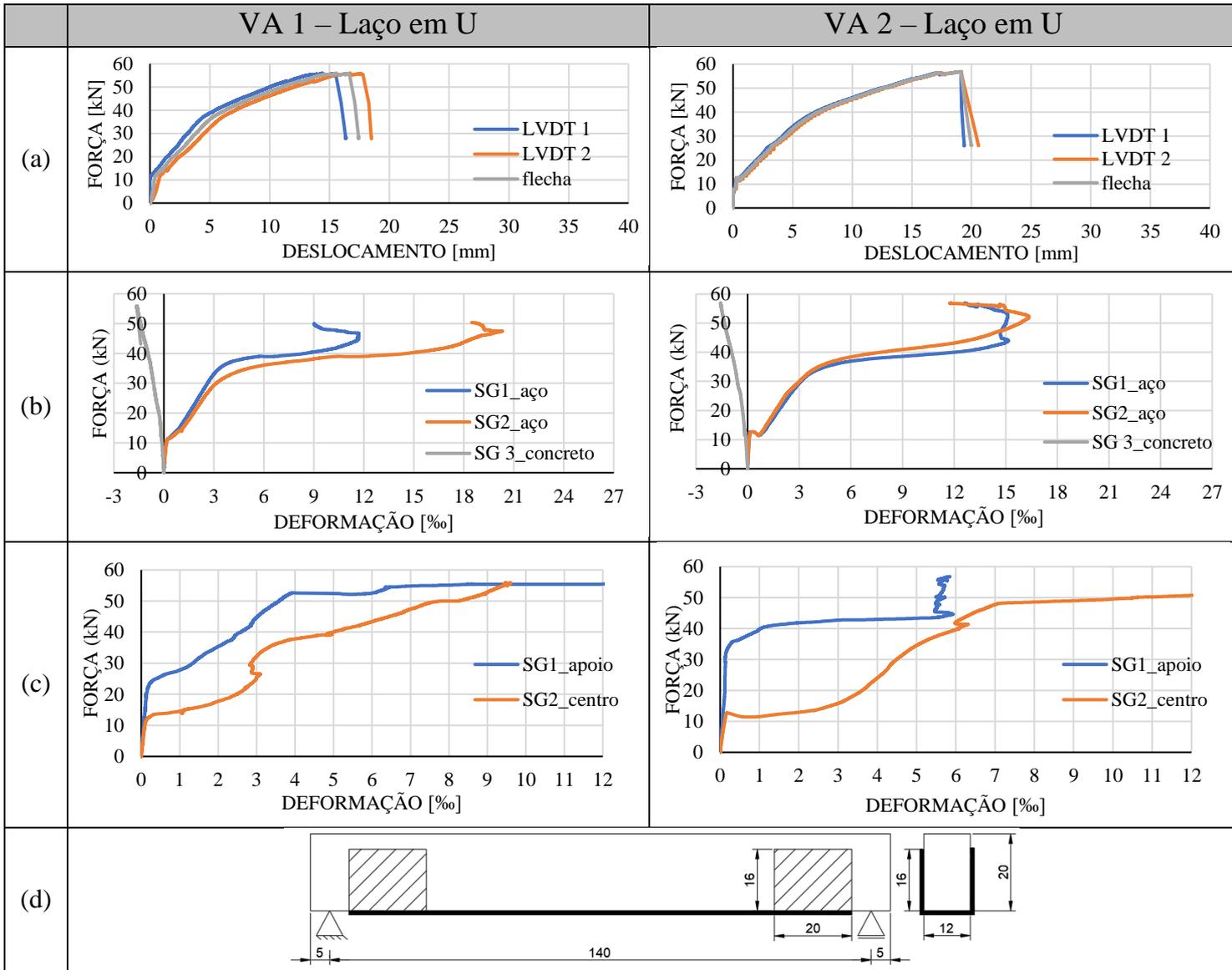


Fonte: elaborada pelo autor

Ao observar os conjuntos de gráficos (a) e (b) apresentados acima, os dois elementos da série apresentaram comportamentos significativamente semelhantes, com ruptura prematura do reforço, sem propagação de grandes fissuras e sem característica dúctil de ruptura.

As deformações específicas do aço, concreto e manta se comportaram da forma esperada para os dois exemplares. Não foi atingida a deformação de compressão máxima do concreto (3,5‰), mas atingindo valores maiores do que os máximos normativos (10‰) de deformação do aço, logo indicando ruptura dentro do domínio 2. A manta apresentou maiores deformações no centro do vão, como esperado, comparado as extremidades, indicando o descolamento prematuro.

Figura 67 - Comportamento das vigas com ancoragem em Laço em U no ensaio de flexão

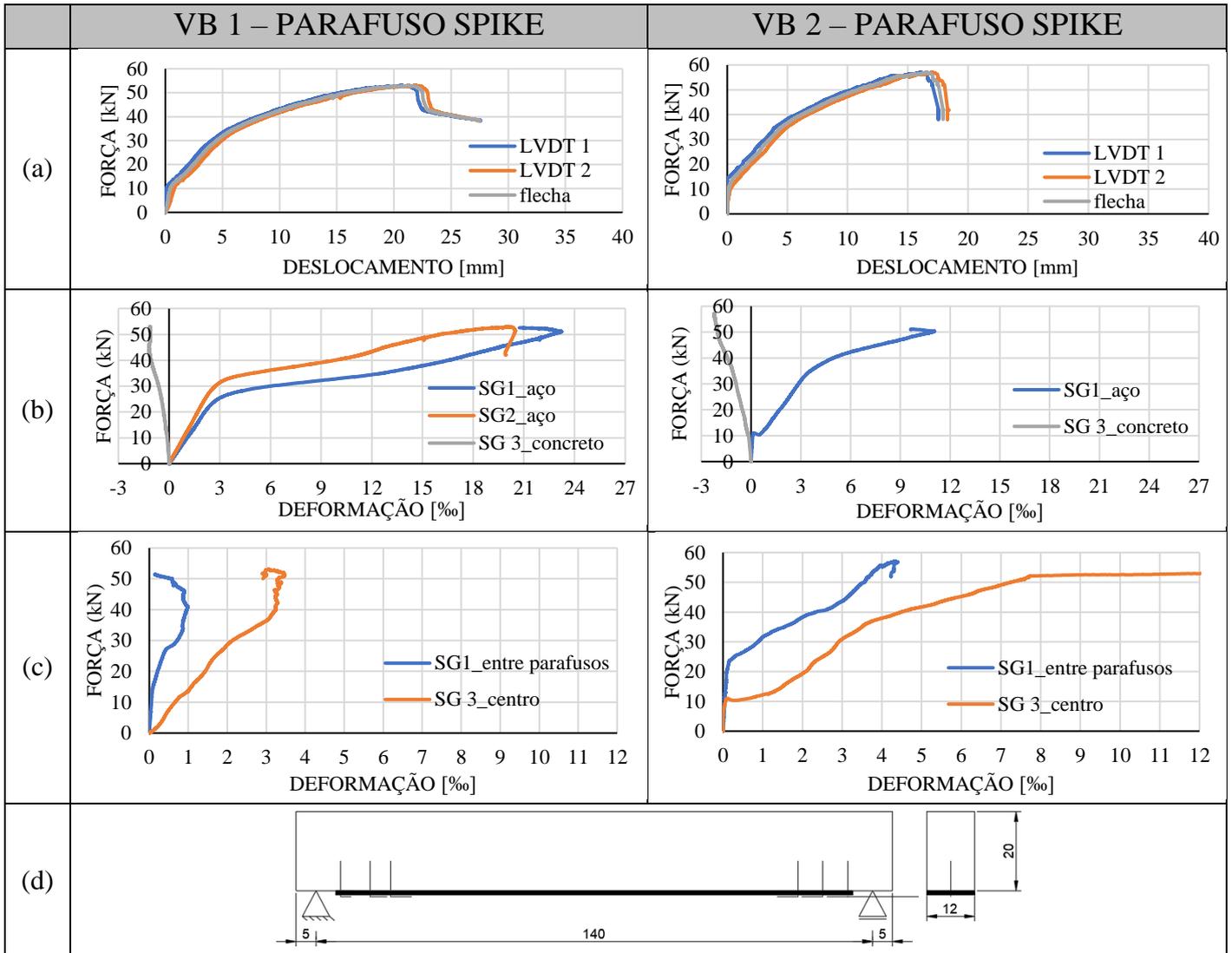


Fonte: elaborada pelo autor

Ao observar os conjuntos de gráficos (a), (b) e (c) apresentados acima, os dois elementos da série apresentaram comportamentos significativamente semelhantes, com ruptura prematura do reforço, sem propagação de grandes fissuras e sem característica dúctil de ruptura.

As deformações específicas do aço, concreto e manta se comportaram da forma esperada para os dois exemplares. Não foi atingida a deformação de compressão máxima do concreto (3,5%), mas atingindo valores maiores do que os máximos normativos (10%) de deformação do aço, logo indicando ruptura dentro do domínio 2. A manta apresentou maiores deformações no centro do vão para VA2 (supõem-se que por arrancamento prematuro do cabo do leitor) e maiores na extremidade para a VA1, sendo este o comportamento esperando para essa metodologia de incremento de ancoragem.

Figura 68 - Comportamento das vigas com ancoragem parafuso spike no ensaio de flexão

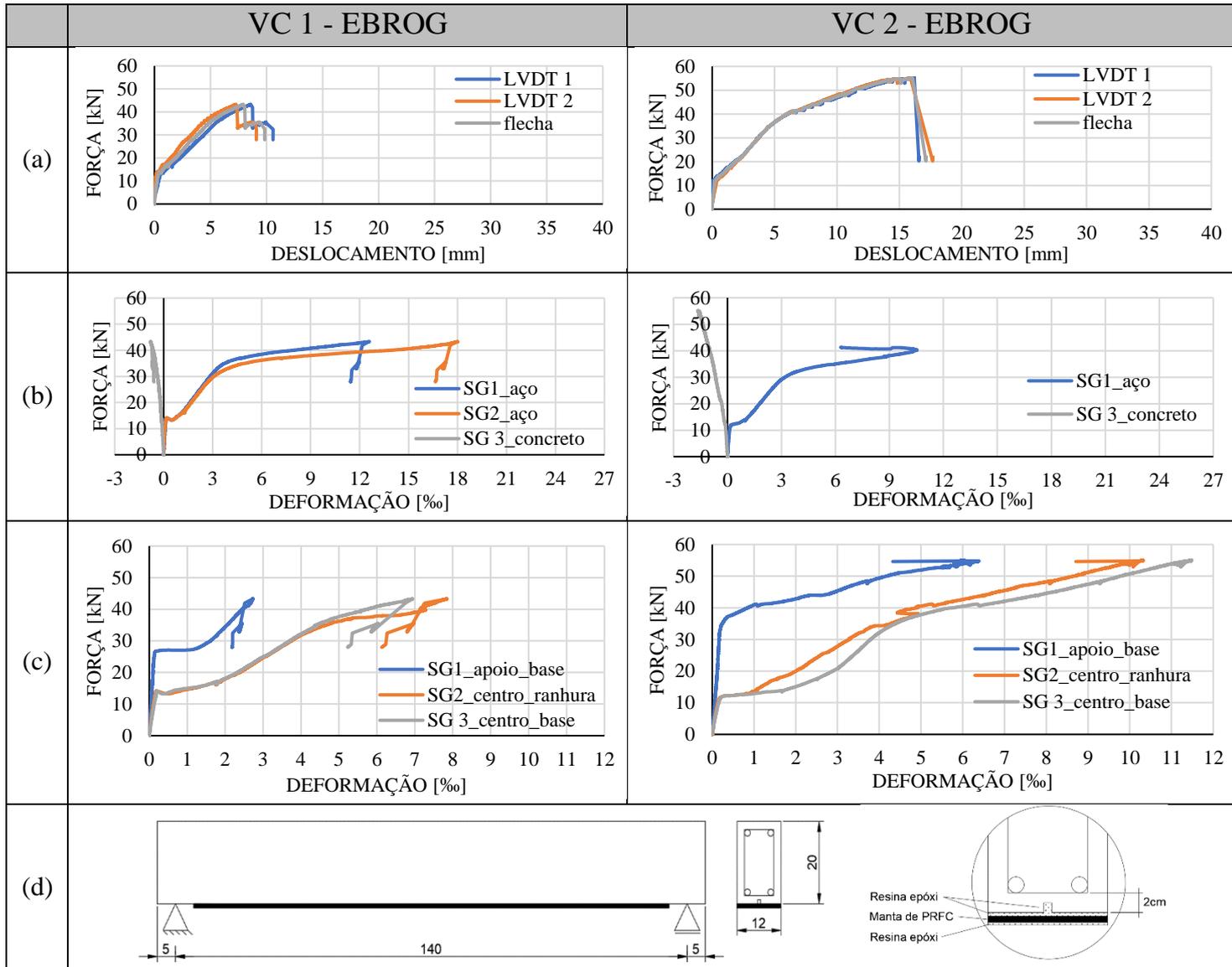


Fonte: elaborada pelo autor

Ao observar os conjuntos de gráficos (a), (b) e (c) apresentados acima, os dois elementos da série apresentaram comportamentos ligeiramente diferentes, uma vez que na VB1 não houve falha prematura do material do reforço, indicando uma ruptura menos abrupta, diferente do que ocorre para a VB2, como se observa nos gráficos acima de Carga x Deslocamento.

Para os dois elementos, não foi atingida a deformação específica de compressão máxima do concreto (3,5‰), mas atingindo valores maiores do que os máximos normativos (10‰) para a deformação do aço, logo indicando ruptura dentro do domínio 2. Para as deformações da manta (VB1), se observa que apesar da viga atingir maior deslocamento no centro do vão, os *strain gauges*, a princípio perderam leitura precocemente por possível processo de instrumentação incorreto. A manta atingiu maiores deformações no centro do vão para os dois elementos, comparado a região da manta entre os parafusos da extremidade.

Figura 69 - Comportamento das vigas com ancoragem EBROG no ensaio de flexão

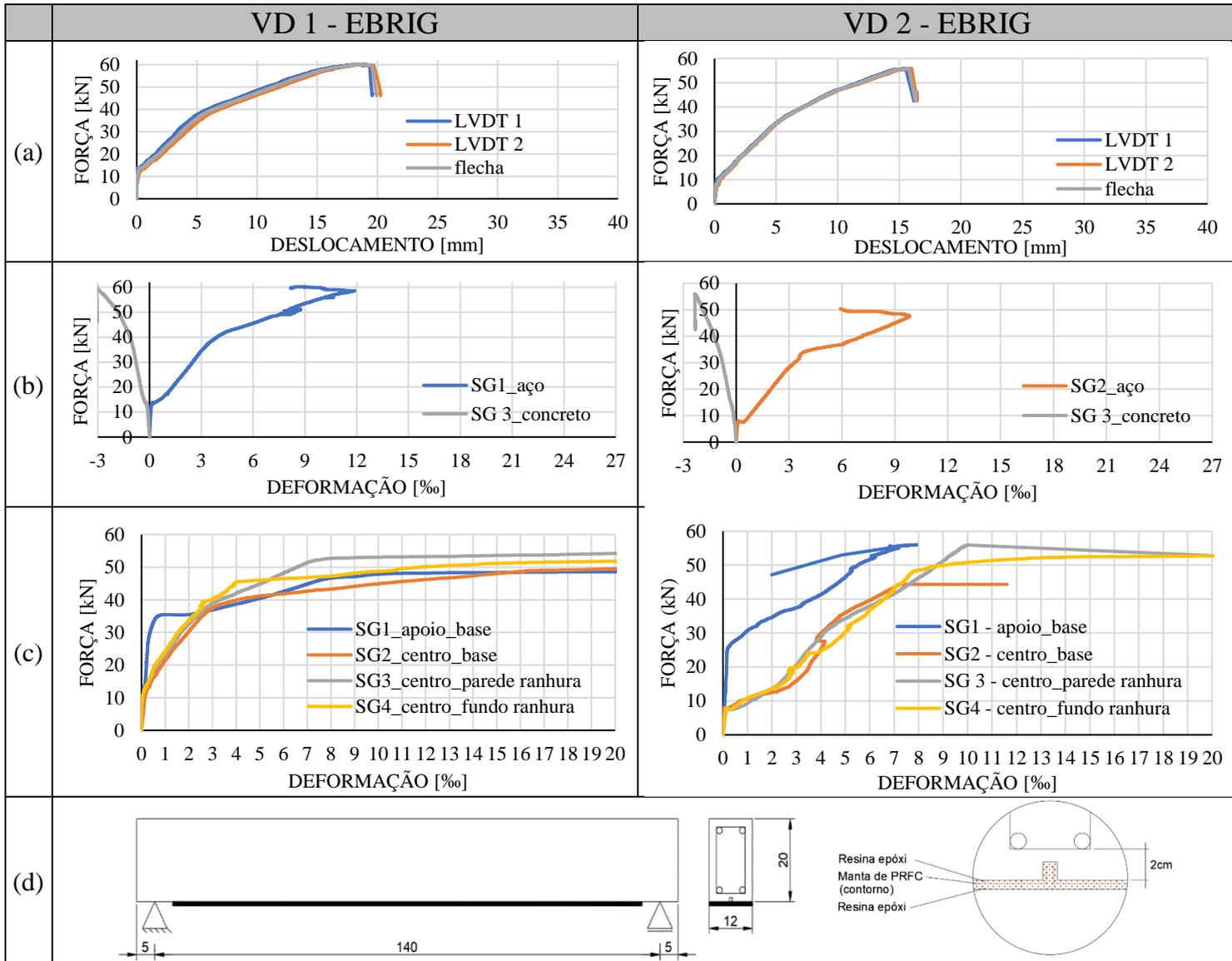


Fonte: elaborada pelo autor

Ao observar os conjuntos de gráficos (a), (b) e (c) apresentados acima, os dois elementos da série apresentaram comportamentos semelhantes, com ruptura prematura do reforço, sem propagação de grandes fissuras e sem característica dúctil de ruptura, apesar dos deslocamentos máximos ocorrerem com maior intensidade na VC1 do que na VC2.

As deformações específicas do aço, concreto e manta se comportaram da forma esperada para os dois exemplares. Não foi atingido a deformação de compressão máxima do concreto (3,5‰), mas foi atingindo valores maiores do que os máximos normativos (10‰) de deformação do aço, logo indicando ruptura dentro do domínio 2. As deformações da manta no “centro da base” e no “centro da ranhura” foram semelhantes, indicando igualdade de comportamento, sendo que no geral, as deformações da manta foram menores na extremidade.

Figura 70 - Comportamento das vigas com ancoragem EBRIG no ensaio de flexão

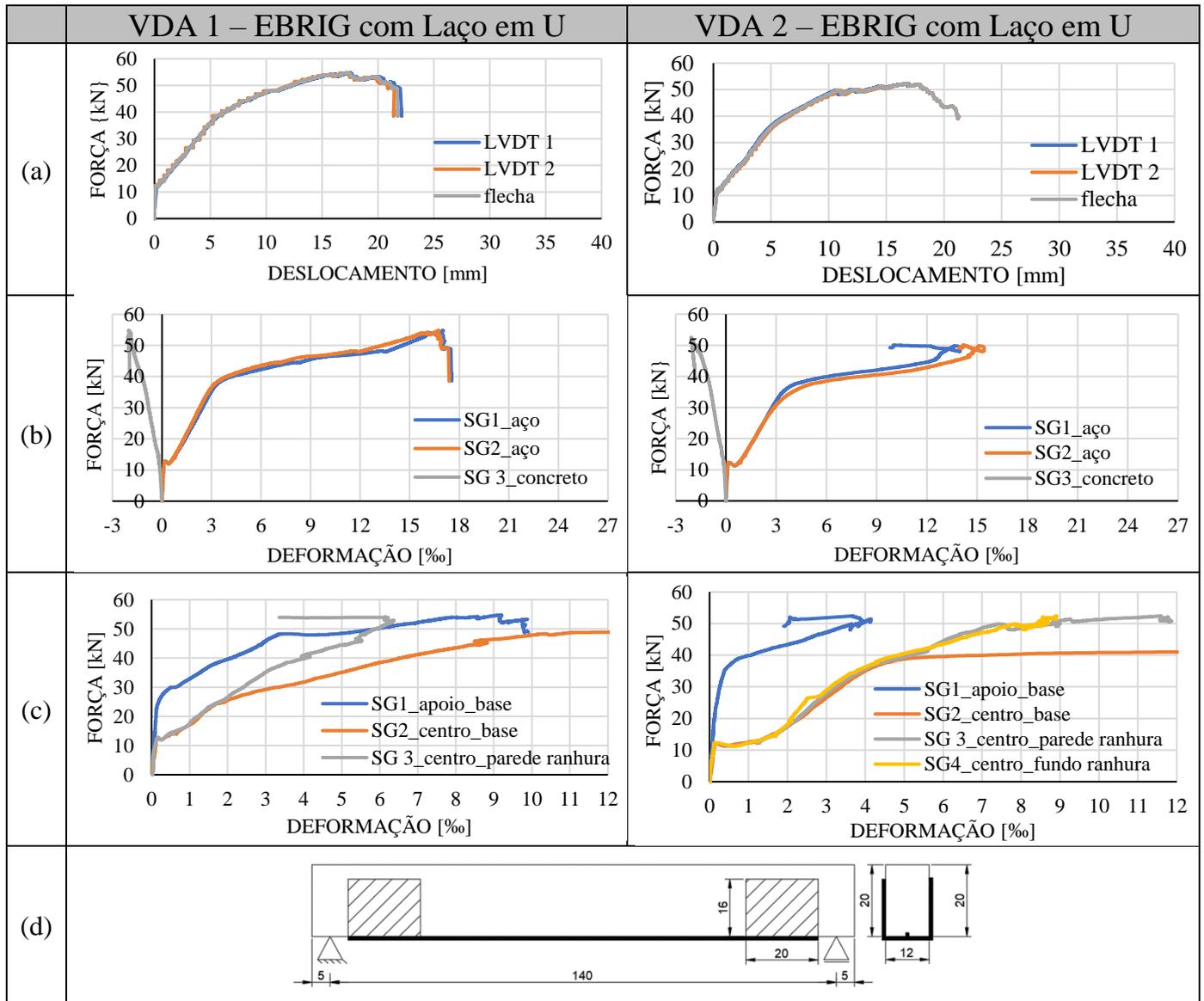


Fonte: elaborada pelo autor

Ao observar os conjuntos de gráficos (a), (b) e (c) apresentados acima, os dois elementos da série apresentaram comportamentos semelhantes, com deformações significativas e certo grau de ductilidade, escoando devido o comportamento do incremento de ancoragem.

A deformação específica do concreto atingiu valor próximo ao da compressão máxima do concreto (3,5%) e a do aço alcançou valores maiores do que os máximos normativos (10%), indicando ruptura dentro do domínio 2, porém próximo ao domínio 3. A deformação da manta apresentou comportamentos diferentes entre os exemplares, a princípio pela qualidade da instrumentação, sendo a VD1 o comportamento esperado ao método. De forma geral todas as regiões internas da ranhura com manta deformam significativamente, contribuindo para o incremento de ancoragem.

Figura 71 - Comportamento das vigas com ancoragem EBRIG com laço em U no ensaio de flexão

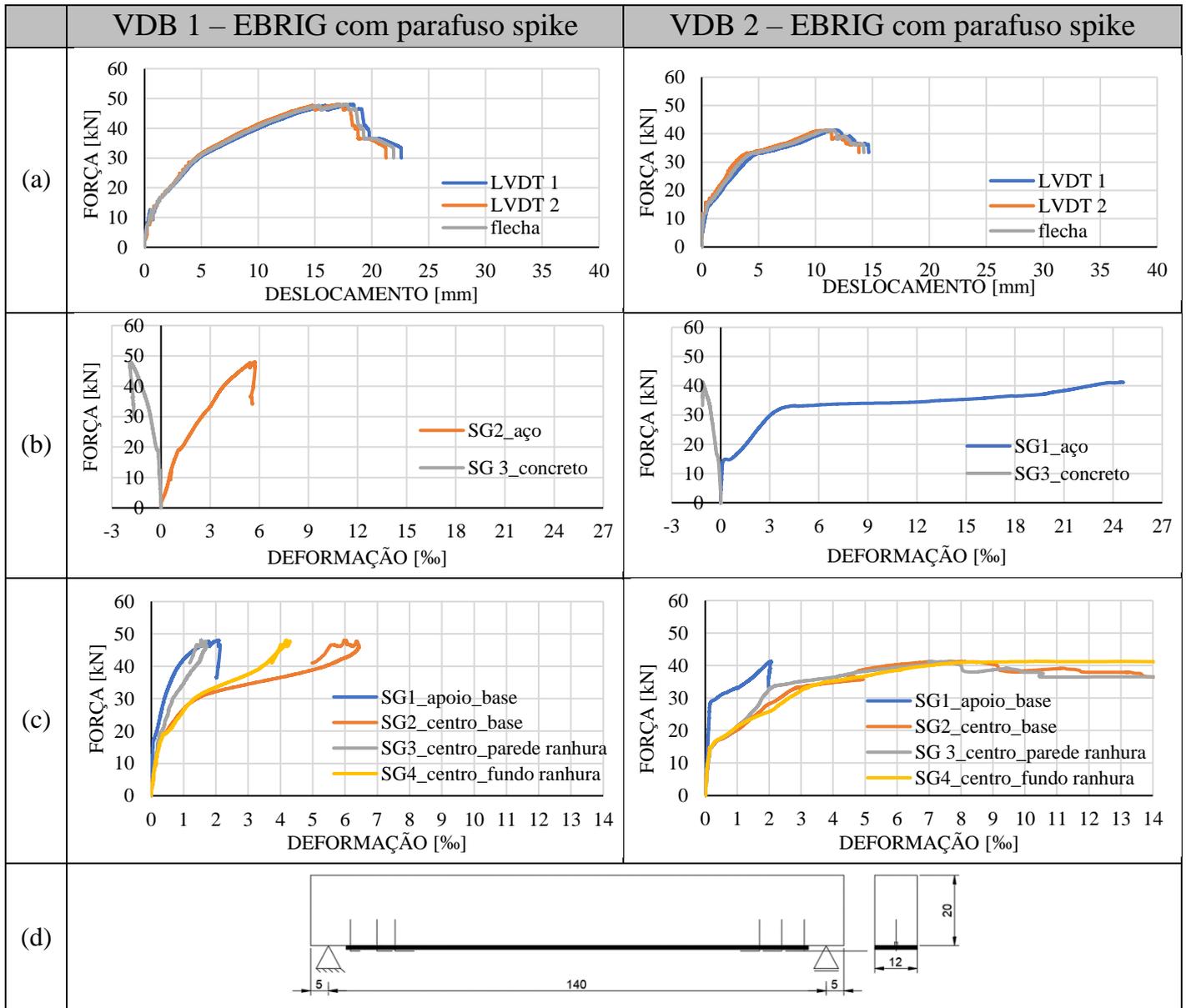


Fonte: elaborada pelo autor

Ao observar os conjuntos de gráficos (a), (b) e (c) apresentados acima, os dois elementos da série apresentaram comportamentos semelhantes, com deformações significativas e certo grau de ductilidade, escoando devido o comportamento do incremento de ancoragem.

A deformação específica do concreto atingiu valor próximo ao da compressão máxima do concreto (3,5‰) e a do aço alcançou valores maiores do que os máximos normativos (10‰), indicando ruptura dentro do domínio 2. A deformação da manta apresentou comportamentos semelhantes entre os exemplares (o extensômetro do “centro fundo ranhura” da VDA1 não apresentou leituras devido instrumentação incorreta). De forma geral todas as regiões internas da ranhura e do laço em U deformam significativamente, contribuindo para o incremento de ancoragem.

Figura 72 - Comportamento das vigas com ancoragem EBRIG com parafuso spike no ensaio de flexão



Fonte: elaborada pelo autor

Ao observar os conjuntos de gráficos (a), (b) e (c) apresentados acima, os dois elementos da série apresentaram comportamentos semelhantes, com deformações significativas e certo grau de ductilidade, escoando devido o comportamento do incremento de ancoragem.

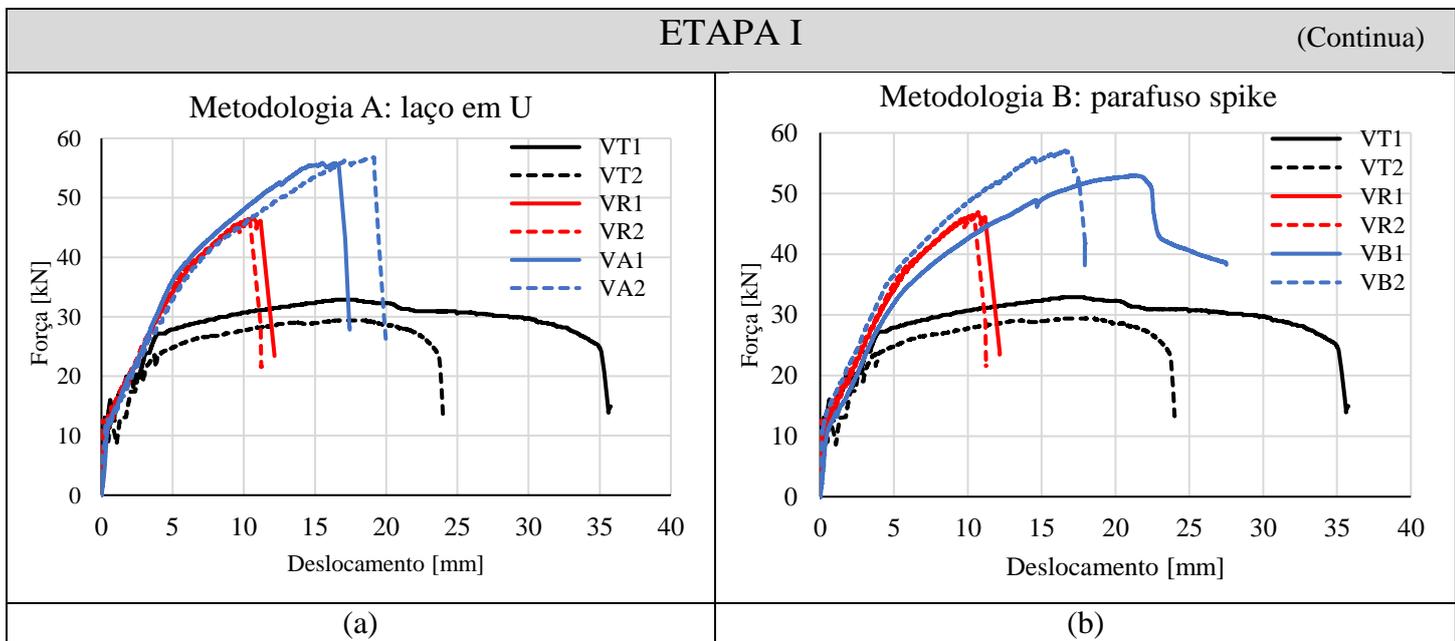
A deformação específica do concreto atingiu valor abaixo da compressão máxima do concreto (3,5%) e a do aço alcançou valores maiores do que os máximos normativos (10%), indicando ruptura dentro do domínio 2. A deformação da manta apresentou comportamentos semelhantes entre os exemplares e de forma geral todas as regiões internas da ranhura e dos parafusos spike deformam significativamente, contribuindo para o incremento de ancoragem.

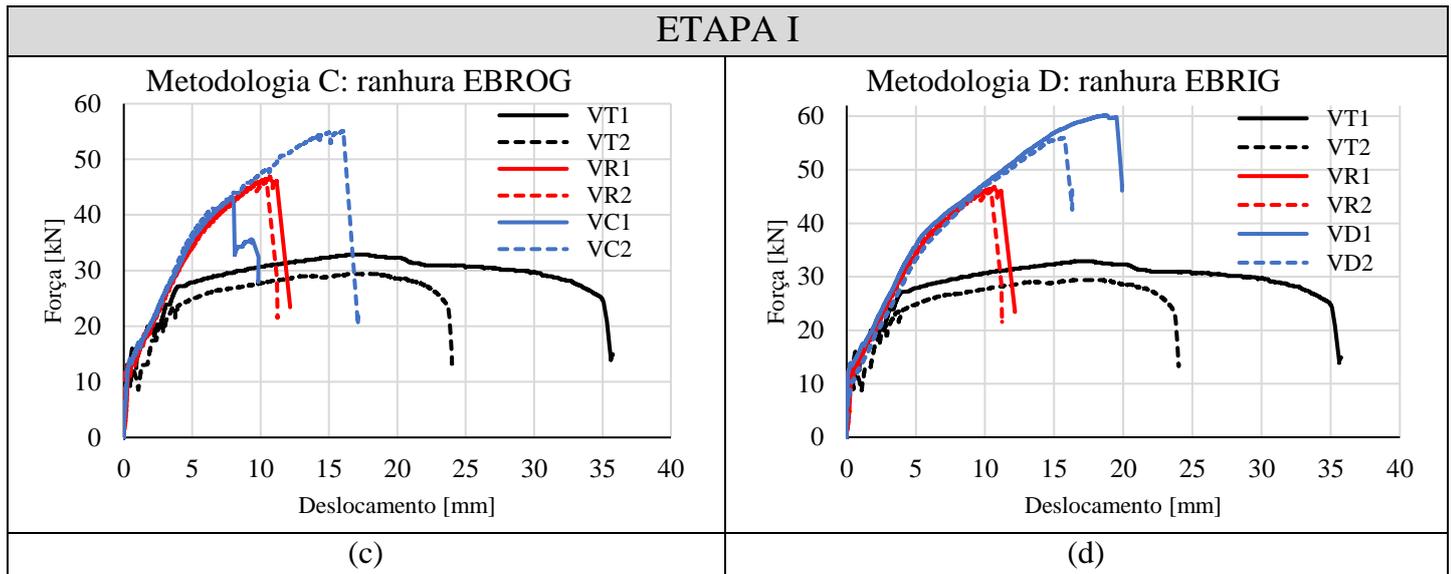
De forma geral, se observa que as metodologias que possuem a técnica EBRIG em sua variável, apresentam dados significativos de deformação do material de reforço nas regiões da “parede” e do “fundo” da ranhura da seção transversal central da viga, indicando que tais regiões ao longo do comprimento da ranhura desempenham função de aumento significativo da ancoragem do reforço e contribuem para melhorar o desempenho do PRFC. Além disso, observa-se que a dificuldade de execução de alguns mecanismos de incremento da ancoragem, como nos métodos de ranhura e parafuso spike, se justifica pelo aprimoramento de determinados comportamentos dos elementos reforçados, comparados a viga testemunho e referência.

#### 5.4.1 Comparação entre comportamentos das vigas da Etapa I

A partir dos dados obtidos nos ensaios, pode-se construir comparativos dos comportamentos dos elementos de cada uma das metodologias de incremento de ancoragem da Etapa I com as vigas testemunho (VT) e referência (VR), através do diagrama Carga x Deslocamento. A Figura 73 indicam os comparativos.

Figura 73 – Comparativo de comportamentos das metodologias da Etapa I: (a) laço em U; (b); parafuso spike; (c) EBROG e (d) EBRIG





Fonte: elaborada pelo autor

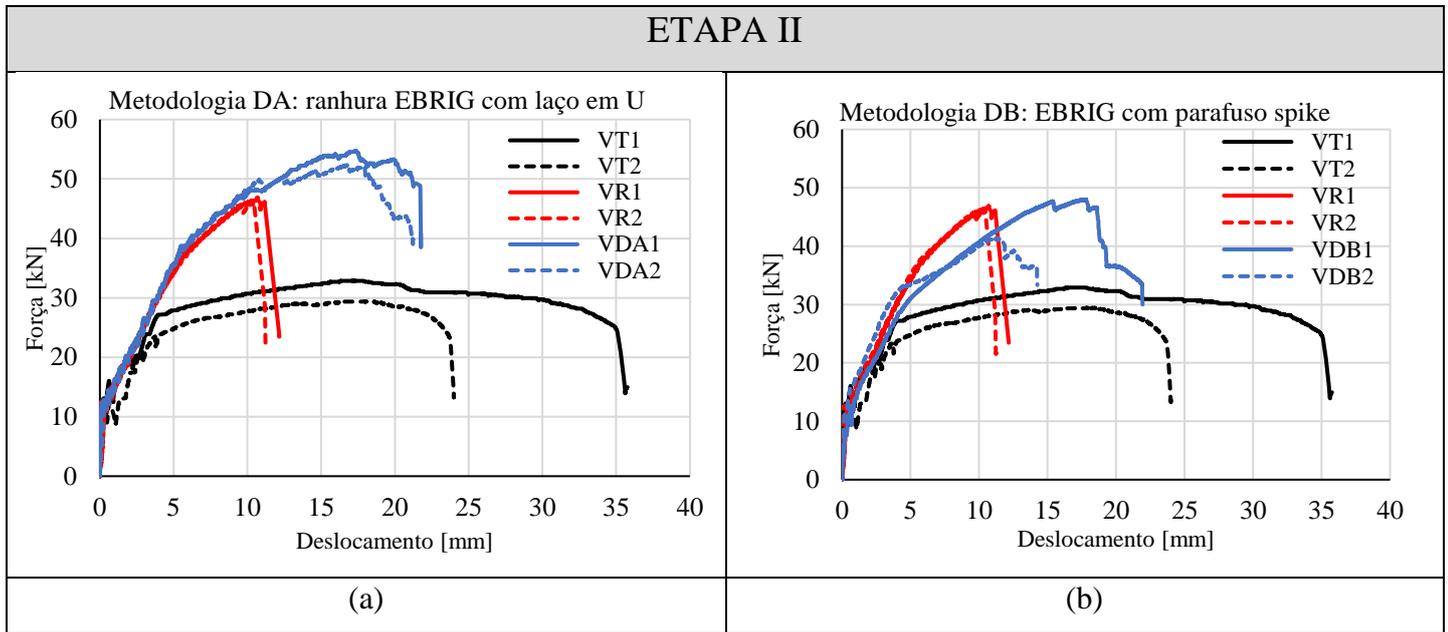
Analisando a Figura 73, observa-se que o comportamento Carga x Deslocamento de todas as metodologias de incremento de ancoragem da Etapa I superaram as da viga referência, porém foram inferiores as da viga testemunho. Observa-se ainda que a metodologia B e D garantiram uma maior proximidade em relação ao comportamento de ductilidade das vigas testemunho.

Fica claro que em nenhuma metodologia de incremento de ancoragem da Etapa I houve um grande nível deslocamento vertical da estrutura com carga aproximadamente constante e sem que houvesse falha do elemento, indicando que pode ser elevado o nível de ductilidade de um elemento reforçado utilizando técnicas de incremento de ancoragem, comparado a estruturas apenas reforçadas (VR), porém de forma limitada.

#### 5.4.2 Comparação entre comportamentos das vigas da Etapa II

A partir dos dados obtidos nos ensaios, pode-se construir comparativos dos comportamentos dos elementos de cada uma das metodologias de incremento de ancoragem da Etapa II com as vigas testemunho (VT) e referência (VR), através do diagrama Carga x Deslocamento. A Figura 74 indica os comparativos.

Figura 74 - Comparativo de comportamentos das metodologias da Etapa II: (a) EBRIG com laço em U e (b) EBRIG com parafuso spike



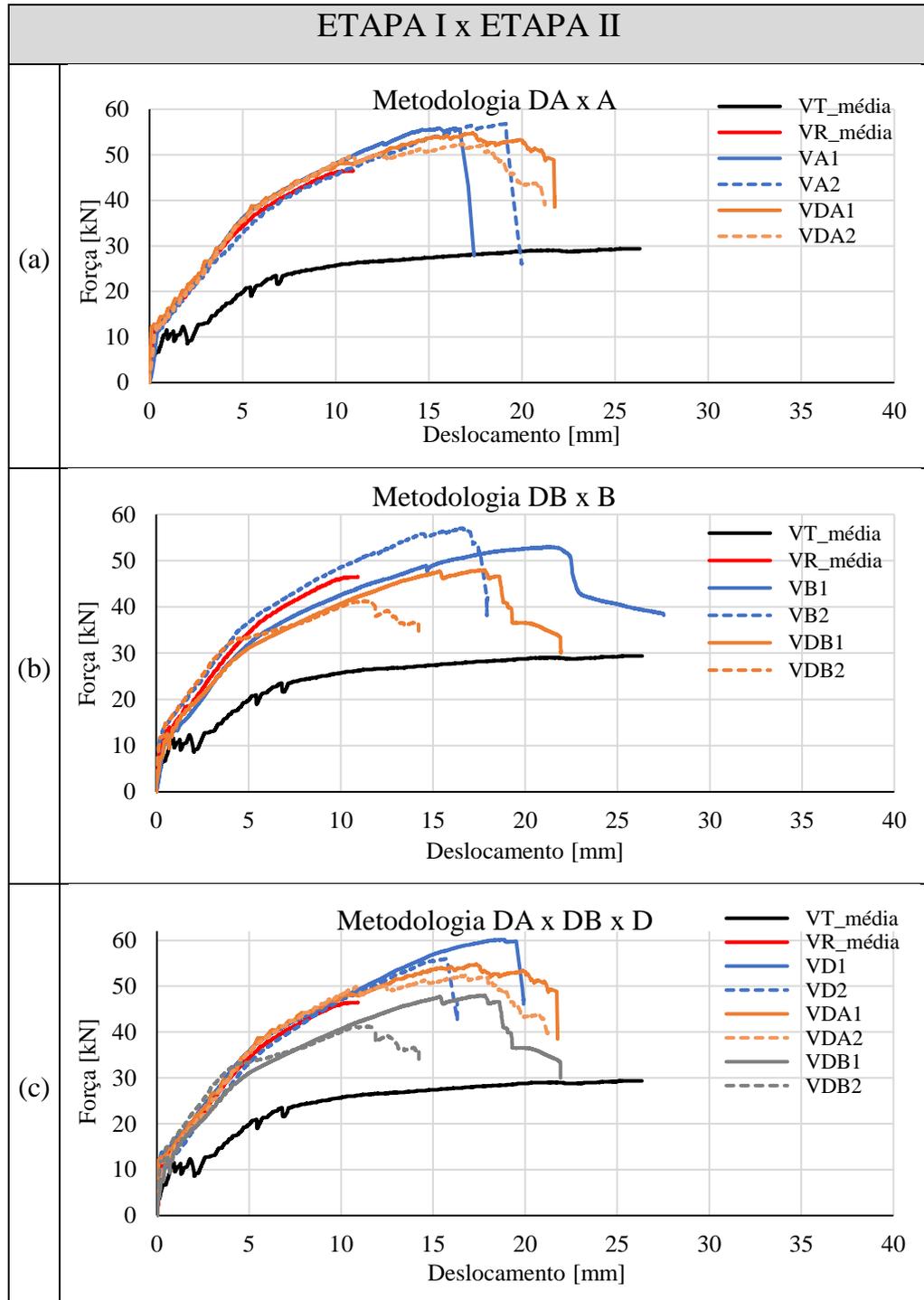
Fonte: elaborada pelo autor

Analisando a Figura 74, observa-se que o comportamento Carga x Deslocamento de todas as metodologias de incremento de ancoragem da Etapa II superaram as da viga referência e sendo inferiores as da viga testemunho, assim como ocorreu com os elementos da Etapa I. Entretanto, houve uma alteração do comportamento das vigas da Etapa I para as da Etapa II, como será melhor observado no item a seguir.

#### 5.4.3 Comparação entre comportamentos das vigas das Etapa I x Etapa II

A partir dos dados obtidos nos ensaios, pode-se construir comparativos dos comportamentos dos elementos de cada uma das metodologias de incremento de ancoragem da Etapa II com os elementos de interesse da Etapa I, através do diagrama Carga x Deslocamento. Afim de se ter um parâmetro de contextualização, são apresentadas também as médias dos resultados das vigas testemunho e referência, uma vez que as duas espécies têm comportamento aproximadamente igual entre suas variáveis. A Figura 75 indica os comparativos.

Figura 75 - Comparativo de comportamentos das metodologias das Etapa I e II



Ao propor as metodologias DA e DB, esperava-se que as cargas e deslocamentos totais nos elementos fossem superiores aos que ocorrem individualmente nas metodologias A, B e D, com no mínimo uma taxa de superposição de efeitos. Entretanto, ao analisar a Figura 75, observa-se que os elementos não tiveram seus resultados individuais superpostos, pois a

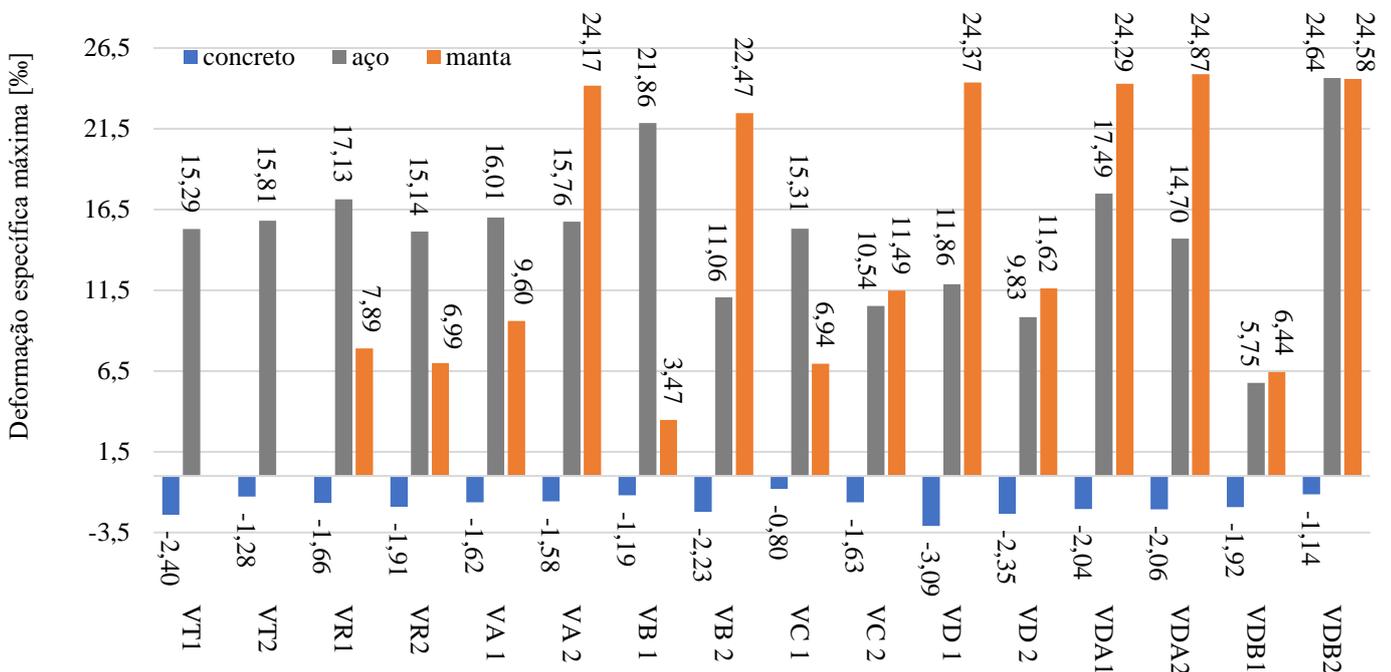
metodologia DA e DB não conseguiram alcançar os valores atingidos pelas cargas suportadas pelas metodologias A e D; B e D, respectivamente.

Porém, apesar das metodologias da Etapa II não promoverem acréscimo de cargas, é possível observar que para essas propostas o comportamento de ruptura observado no gráfico carga x deslocamento indicou um avanço mínimo, comparadas as vigas testemunho e as metodologias propostas na Etapa I, garantindo pequeno aumento dos níveis de ductilidade.

## 5.5 ABERTURA DE FISSURAS E MODOS DE FALHA

O estudo do comportamento das ancoragens das mantas dos PRFC segue para a análise das formas de ruptura que aconteceram nos elementos. Na Figura 76, é feita a análise dos valores de deformação específica máxima a partir dos *strain gauges* para os materiais aço, concreto e manta, instrumentados nas posições centrais do elemento, onde atuam os momentos fletores máximos.

Figura 76 – Valores máximos de deformação específica no centro do vão das vigas



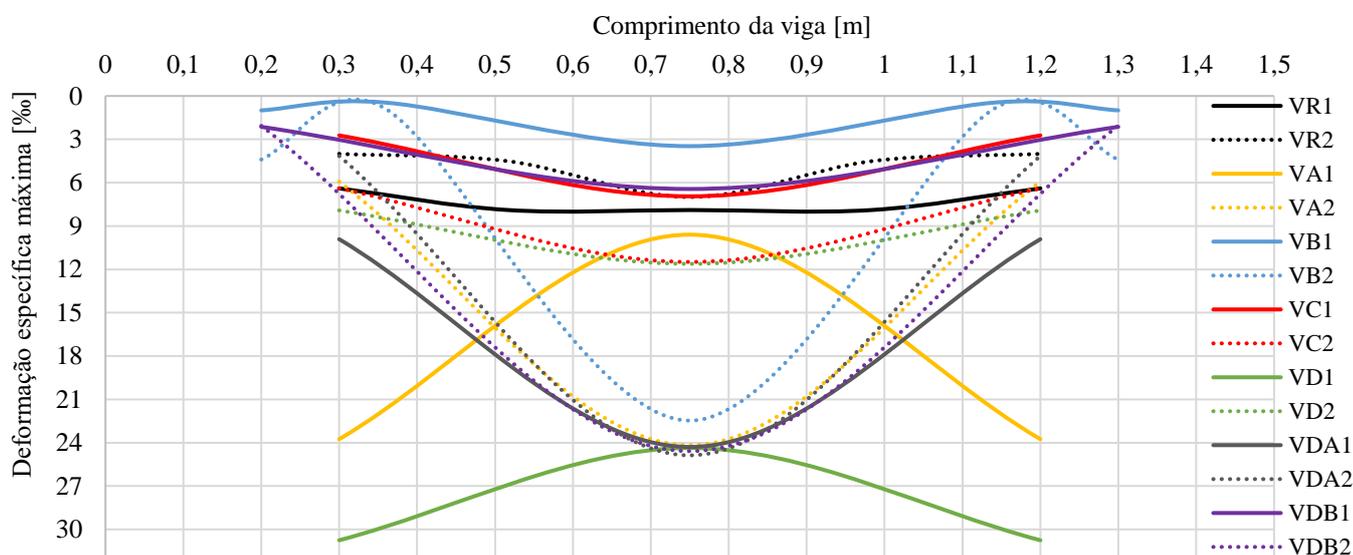
Fonte: elaborada pelo autor

Os limites recomendados pela NBR 6118 (ABNT, 2014) indicam que a deformação máxima do concreto deve atingir valor de -3,5‰ e para o aço de 10‰. Assim, observa-se que para o concreto, nenhuma viga atingiu a deformação específica limite estabelecida pela norma, diferentemente do que ocorre para o aço, em que diversos elementos ultrapassaram o limite

normativo. O fabricante indica deformação de ruptura de 18% para o material de reforço, logo ao observar os resultados de alguns elementos, tal nível foi ultrapassado, porém sem que ocorra a ruptura do material de reforço, como por exemplo com o elemento VA2. Tal situação pode ser justificada pelo fato da deformação de ruptura informada pelo fabricante ser determinada através de ensaio de tração direta do material, logo, de forma isolada e sem considerar a interação com outros materiais, como ocorre para os elementos compósitos associados às vigas de concreto armado. Além disso, entende-se que o fabricante subdimensiona as propriedades mecânicas do material, uma vez que existem diversas variáveis no processo de aplicação das fibras em um elemento, como por exemplo, ser um processo de aplicação não mecanizado.

A Figura 77 indica visualmente o comportamento da deformação específica do material de reforço em cada viga reforçada, através do posicionamento dos *strain gauges* ao longo da viga, a partir da hipótese de que os valores obtidos nas posições instrumentadas são simétricos em relação a seção central da viga e que o comportamento segue uma relação diretamente proporcional à distância entre os pontos de leitura de deformação.

Figura 77 – Valores máximos de deformação específica do reforço de PRFC na viga



Fonte: elaborada pelo autor

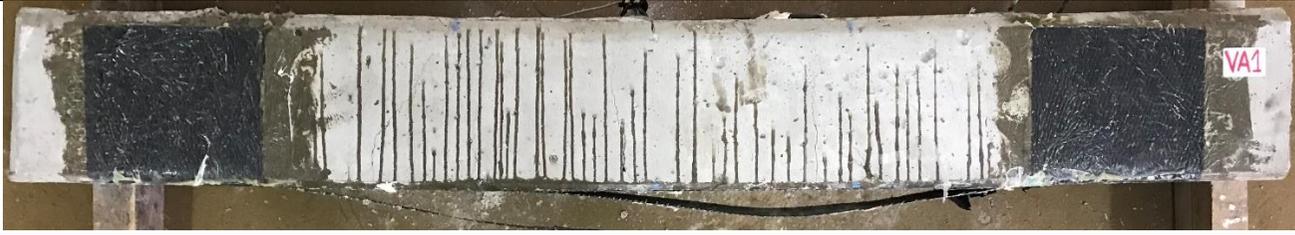
Pode ser observado que vigas VA, VD, VB, VDB apresentaram diferenças significativas dos valores máximos no centro do vão em relação a suas respectivas repetições. As metodologias R e C apresentaram comportamento e valores máximos de deformação do material ao longo da viga semelhantes entre essas duas metodologias, porém com deformações maiores para a metodologia C. As deformações máximas no centro do vão para as vigas VDA1,

VDA2, VDB2, VD1, VB2 e VA2 atingiram valores semelhantes. As vigas VR1, VR2, VB1, VDB1, VC1, VC2 e VD1 apresentaram deformações máximas similares ao longo de toda viga, indicando uma distribuição das tensões. É interessante observar os exemplares VD1 e VA1, que indicaram deformações maiores nas extremidades do que no centro do vão, indicando que a região de incremento de ancoragem, cumpriu sua função.

Ao ter conhecimento da deformação máxima dos materiais e investigando os elementos após os ensaios de flexão, pode ser apresentado a Figura 78, com os modos de ruptura dos elementos e as medições das aberturas máximas (trincas, fissuras, rachadura) que ocorrem em cada uma das vigas, medidas a partir de fissurômetro e sem a aplicação de carga. De maneira geral, é possível observar um aumento da intensidade e quantidade de fissuras nos elementos com mecanismos de incremento e ancoragem., comparadas as vigas referência.

Figura 78 – Modos de ruptura das vigas ensaiadas à flexão

Id.	Abertura de fissura e tipo de ruptura	Imagem
VT1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abertura máxima: &gt; 10,00 mm</li> <li>• Modo de ruptura: ruína por flexão; escoamento da armadura longitudinal</li> </ul>	
VT2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abertura máxima: &gt; 10,00 mm</li> <li>• Modo de ruptura: ruína por flexão; escoamento da armadura longitudinal</li> </ul>	
VR1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abertura máxima: 0,9 mm</li> <li>• Modo de ruptura: descolamento prematuro do reforço na interface concreto-PFRC na extremidade da viga reforçada (ruptura frágil)</li> </ul>	
VR2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abertura máxima: 0,4 mm</li> <li>• Modo de ruptura: descolamento prematuro do reforço na interface concreto-PFRC na extremidade da viga reforçada (ruptura frágil)</li> </ul>	

VA1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abertura máxima: 0,4 mm</li> <li>• Modo de ruptura: descolamento do reforço na interface concreto-PFRC na região central do vão</li> </ul>	
VA2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abertura máxima: 0,9 mm</li> <li>• Modo de ruptura: descolamento do reforço na interface concreto-PFRC na região central do vão</li> </ul>	
VB1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abertura máxima: 3,0 mm</li> <li>• Modo de ruptura: descolamento discreto do reforço na interface concreto-PFRC nas extremidades laterais da dos parafusos da viga; início de esmagamento do concreto comprimido</li> </ul>	
VB2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abertura máxima: 0,7 mm</li> <li>• Modo de ruptura: descolamento do reforço na interface concreto-PFRC iniciado na extremidade (laterais dos parafusos) e avançando pelo comprimento da viga;</li> </ul>	

VC1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abertura máxima: 2,5 mm</li> <li>• Modo de ruptura: descolamento do reforço na interface concreto-PFRC na extremidade da viga reforçada</li> </ul>	
VC2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abertura máxima: 0,5 mm</li> <li>• Modo de ruptura: descolamento do reforço na interface concreto-PFRC, com deslocamento parcial do concreto de comprimento na extremidade da viga reforçada</li> </ul>	
VD1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abertura máxima: 0,5 mm</li> <li>• Modo de ruptura: descolamento do reforço na interface concreto-PFRC na extremidade da viga reforçada</li> </ul>	
VD2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abertura máxima: 0,4 mm</li> <li>• Modo de ruptura: descolamento do reforço na interface concreto-PFRC na extremidade da viga reforçada</li> </ul>	

VDA1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abertura máxima: 1,3 mm</li> <li>• Modo de ruptura: descolamento do reforço na interface concreto-PFRC no vão central da viga reforçada</li> </ul>	
VDA2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abertura máxima: 2,6 mm</li> <li>• Modo de ruptura: descolamento do reforço na interface concreto-PFRC no vão central da viga reforçada</li> </ul>	
VDB1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abertura máxima: 1,8 mm</li> <li>• Modo de ruptura: descolamento discreto do reforço na interface concreto-PFRC entre os parafusos de apenas uma das extremidades da viga</li> </ul>	
VDB2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abertura máxima: 1,9 mm</li> <li>• Modo de ruptura: descolamento discreto do reforço na interface concreto-PFRC no centro do vão da viga</li> </ul>	

Fonte: elaborada pelo autor

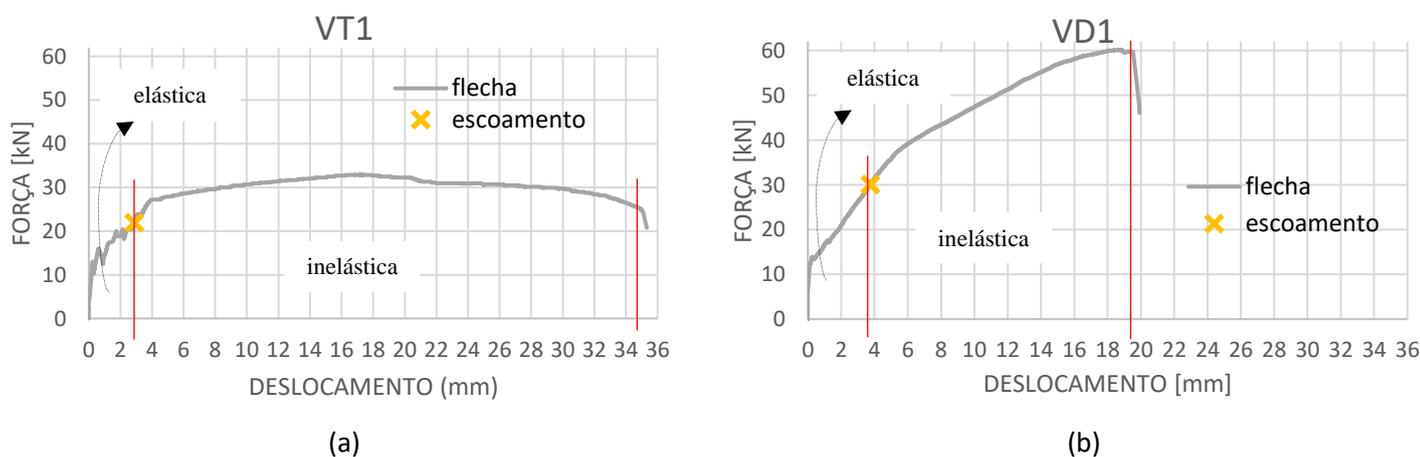
## 5.6 AVALIAÇÃO DA DUCTILIDADE

Ao serem propostos as metodologias de incremento de ancoragem dos reforços à flexão de PRFC em vigas de concreto armado e após apresentação dos resultados individuais dos elementos ensaiados, se propõem avaliar o comportamento das estruturas e respectivas metodologias a partir da quantificação da ductilidade, característica essencial à segurança dos usuários e entendida como uma propriedade pouco eficiente no reforço com PRFC sem incremento de ancoragem. A partir das discussões no item 3.4 deste trabalho, serão feitas a quantificação da ductilidade a partir de dois métodos distintos, comparando-os.

O Fator de Ductilidade de Flecha ( $\mu_f$ ) é determinado a partir do diagrama Carga x Deslocamento, através da flecha obtida no centro do vão para relacionar o valor obtido na carga de ruptura com o valor no instante em que ocorre a tensão de escoamento do aço longitudinal. O início do escoamento da viga de concreto é atribuído ao instante que a primeira barra da armadura de flexão de aço, instrumentadas com *strain gauges*, atinge o valor de deformação específica ( $\epsilon_s$ ) de 2,51%, conforme especificado no item 4.3.2.2 deste trabalho.

A Energia de Ductilidade ( $\mu_E$ ) é determinada a partir do diagrama Carga x Deslocamento, através das áreas abaixo da curva de ensaio, para relacionar a energia total do elemento, (do início até a carga última do ensaio), com a energia elástica (do início até o ponto em que se inicia o escoamento estrutural, dado pelo instante de escoamento do aço longitudinal). As áreas foram obtidas a partir do programa AutoCad e a Figura 79 exemplifica as regiões elásticas e inelásticas das vigas VT1 e VD1 deste programa experimental. A Tabela 11 indica os resultados obtidos.

Figura 79 – Representação da determinação da ductilidade energética de vigas: (a) viga testemunho; (b) viga da metodologia EBRIG



Fonte: elaborada pelo autor

Tabela 11 – Fator de ductilidade das vigas do programa experimental

Viga	Flecha [mm]		$\mu_f$	Diferença com		Energia [kNmm]		$\mu_E$	Diferença com		$\mu_f \times \mu_E$
	Escoam.	Carga Última		$VT_{média}$	$VR_{média}$	Elástica	Inelástica		$VT_{média}$	$VR_{média}$	
VT 1	2,87	35,32	12,31	-	-	367,00	7495,44	21,42	-	-	43%
VT 2	1,85	30,79	16,65	-	-	185,66	6816,37	37,71	-	-	98%
VR 1	3,40	11,17	3,29	-77%	-	509,99	2596,02	6,09	-79%	-	13%
VR 2	3,23	11,18	3,46	-76%	-	532,61	2477,98	5,65	-81%	-	10%
VA 1	3,13	17,42	5,57	-62%	65%	466,29	5501,00	12,80	-57%	118%	34%
VA 2	3,27	19,98	6,12	-58%	81%	477,04	6232,84	14,07	-52%	140%	37%
VB 1	3,01	22,49	7,48	-48%	122%	416,19	7990,35	20,20	-32%	244%	59%
VB 2	2,91	17,54	6,03	-58%	79%	486,18	5998,01	13,34	-55%	127%	34%
VC 1	3,07	9,85	3,20	-78%	-5%	516,28	1710,65	4,31	-85%	-27%	5%
VC 2	3,00	16,06	5,35	-63%	59%	471,85	5168,74	11,95	-60%	104%	31%
VD 1	3,74	19,82	5,29	-63%	57%	656,72	6682,47	11,18	-62%	90%	27%
VD 2	3,21	16,13	5,02	-65%	49%	455,10	4839,26	11,63	-61%	98%	31%
VDA 1	4,02	21,41	5,33	-63%	58%	775,90	7920,40	11,21	-62%	91%	27%
VDA 2	3,50	20,76	5,93	-59%	76%	550,39	7037,07	13,79	-53%	135%	37%
VDB 1	4,70	19,29	4,10	-72%	21%	797,78	5237,92	7,57	-74%	29%	16%
VDB 2	2,72	14,24	5,25	-64%	56%	439,98	3629,64	9,25	-69%	58%	19%

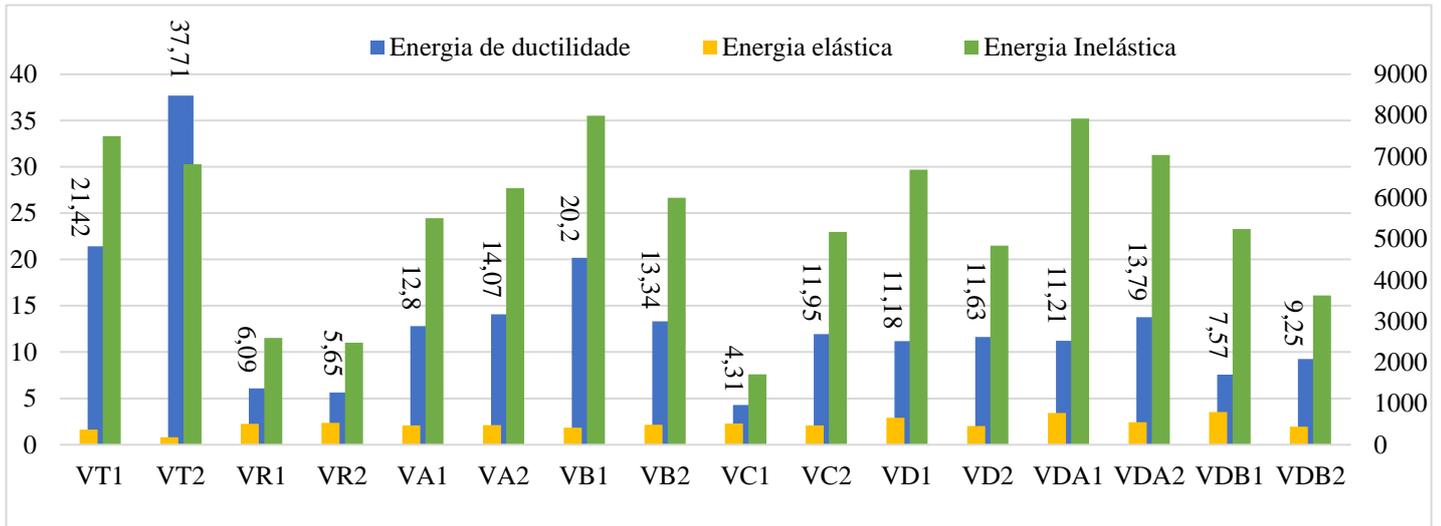
Fonte: elaborada pelo autor

No instante do início do escoamento dos elementos, observa-se que as flechas na seção central do vão são relativamente menores para a viga testemunho do que para as vigas reforçadas, com e sem incremento de ancoragem. Tal situação também é observada para a energia elástica dos elementos reforçados, com resultados consideravelmente maiores em relação as vigas testemunho.

O Fator de Ductilidade de Flecha das vigas reforçadas (com e sem incremento de ancoragem) foi 48% a 78% menor do que a da média das vigas testemunho. Porém, comparando apenas as vigas reforçadas com incremento de ancoragem, o Fator de Ductilidade de Flecha foi 21% (VDB1) a 122% (VB1) maior do que a média dos resultados obtidos nas vigas referência, indicando a importância dos mecanismos de incremento de ancoragem para reforço com PRF ao serem analisadas por esse critério.

A Energia de Ductilidade das vigas reforçadas (com e sem incremento de ancoragem) em comparação a das vigas testemunho; e entre as vigas apenas reforçadas com incremento de ancoragem em comparação a das vigas referência, observa-se o mesmo comportamento indicado para o Fator de Ductilidade de Flecha. Porém, como a relação de energias permite analisar o comportamento ao longo de todo o ensaio, é possível observar que mesmo que tal relação numérica tenha indicado perda de ductilidade nos elementos reforçados em comparação as vigas testemunho, é possível observar que o comportamento inelástico de algumas metodologias, como a VB1, VD1, VDA1 e VDA2 atingiram intensidades próximas as vigas testemunho. A Figura 80 indica graficamente as comparações de Energia de Ductilidade, Energia Elástica e Inelástica entre os elementos estruturais ensaiados.

Figura 80 – Gráfico comparativo das energias de ductilidade



Fonte: elaborada pelo autor

Apesar da comparação entre o Fator de Ductilidade de Flecha ( $\mu_f$ ) e a Energia de Ductilidade ( $\mu_E$ ) mostrarem resultados numéricos diferentes, uma vez que são conceitualmente distintos, é possível afirmar que os resultados obtidos para os dois métodos de determinação indicam que as vigas com incremento de ancoragem resultam em aumento de ductilidade, quando esse critério é comparado aos elementos apenas reforçados, evidenciando a importância dos incrementos de ancoragem em estruturas reforçadas com PRF.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo deste capítulo, serão apresentadas as conclusões do desempenho das metodologias de incremento de ancoragem dos reforços à flexão com manta de fibra de carbono aplicadas em vigas de concreto armado submetidos à esforços de flexão à quatro pontos, conforme estabelecido como objetivo principal deste trabalho.

### 6.1 CONCLUSÕES

Ao observar os objetivos específicos para este trabalho de dissertação, pode-se apresentar as principais conclusões dos resultados coletados dentro dos itens a seguir:

- a) O reforço à flexão é eficiente para aumentar a capacidade de carga de vigas de concreto armado, independentemente da existência de incremento de ancoragem, porém não permite atingir flechas maiores do que as vigas sem reforço, comportamento esperado devido as características de ruptura frágil do PRF, com reduções de 30% a 70% desse parâmetro;
- b) Todas as metodologias de incremento de ancoragem apresentadas neste trabalho aumentaram a capacidade de carga das vigas de concreto em até 29% e flecha em até 24%, em comparação aos elementos com o mesmo tipo de reforço, porém sem a presença desses incrementos de ancoragem, evidenciando sua importância, mesmo com níveis de dificuldade em execução para alguns mecanismos, como nos métodos parafuso spike e ranhura;
- c) Comparados à viga testemunho e referência, no que diz respeito ao acréscimo de carga, a metodologia EBRIG (VD1) foi a mais eficiente. Quanto aos parâmetros de flecha e ductilidade, a metodologia parafuso spike (VB1) foi a mais eficiente para esses dois critérios em estudo, comparados à viga testemunho e referência;
- d) Ter reforço à flexão com PRFC sem incremento de ancoragem não garante comportamento dúctil ao elemento de concreto armado, porém é possível observar que esses incrementos indicam alterações da ductilidade aos elementos, devido aumento da energia elástica e inelástica, conferindo modos de rupturas menos frágeis ou que atinjam maiores utilizações dos materiais.
- e) Para o reforço com PRFC, a carga analítica, que desconsidera todos os coeficientes de minoração, foi significativamente maior do que a carga experimental da viga referência, cerca de 19%, indicando o comportamento frágil do reforço à ruptura prematura. Quando o valor analítico leva em consideração todos os parâmetros normativos de minoração, o resultado de carga máxima converge (1% de diferença), logo, previsões coerentes segundo

a norma. Ao observar os resultados experimentais das vigas com incremento de ancoragem e os resultados analíticos sem nenhum coeficiente normativo de minoração, há convergência de até 90% dos resultados para carga máxima, indicando eficiência do comportamento do material;

- f) A metodologia EBROG, apesar de permitir acréscimo de carga ao elemento, em comparação à viga referência, não garantiu aumentos expressivos, no máximo 8%, com índices de ductilidade energética semelhantes à referência, evidenciando necessidade de novas investigações para se obter um mecanismo mais eficiente de incremento de ancoragem;
- g) Ao aplicarem as metodologias laço em U, parafuso spike e EBRIG na Etapa II, houve pequena alteração do comportamento dos elementos de reforço, aumentando a rigidez do elemento, da energia inelástica e conseqüentemente da ductilidade. A proposta EBRIG com laço em U foi mais eficiente do que a EBRIG com parafuso spike, entretanto nas duas metodologias, não houve superposição dos resultados individuais.

Por fim, conclui-se que os incrementos de ancoragem de reforço à flexão em vigas de concreto armado são importantes para a segurança estrutural dos elementos, sejam por metodologias mais habituais, como as de Laço em U ou por metodologias mais recentes, como em mecanismos de ranhura, permitindo aumento da eficiência dos materiais de reforço e garantia de maior segurança a uma eventual ruptura do elemento reforçado.

## 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em consideração aos resultados obtidos e as conclusões alcançadas por este programa experimental, a seguir são indicadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- a) Avaliação do comportamento do laço em U com várias camadas sobrepostas como incremento de ancoragem;
- b) Estudo do aumento da quantidade de parafusos spike dentro da região de momento fletor variável em uma viga de concreto armado em ensaio de flexão à quatro pontos;
- c) Estudo da variação do tamanho das fibras livre dos parafusos spike que ficam aderidas na base de concreto e do tamanho do parafuso inserido dentro do substrato de concreto;
- d) Estudo da concentração de fibras dispostas para o parafuso spike;
- e) Avaliar a influência da profundidade, largura, quantidade e proximidade das ranhuras no substrato de uma viga de concreto armado para os métodos EBRIG e EBROG;

- f) Aplicar a metodologia de incremento de ancoragem EBROG em conjunto com a metodologia laço em U e parafuso spike;
- g) Aplicar as mesmas metodologias descritas no programa experimental para mais de uma camada de reforço à flexão e para uso em conjunto com laminados e mantas;
- h) Avaliar por modelos numéricos/computacionais as metodologias de incremento de ancoragem propostas neste programa experimental;
- i) Propor equações numéricas que permitam a previsão de cargas e deformações das vigas reforçadas a flexão com incremento de ancoragem do tipo Laço em U, parafuso spike, EBRIG e EBROG;
- j) Avaliar a construção de uma rotina de programação para formação de gráfico momento x curvatura de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com mantas de fibra de carbono, considerando o valor do momento fletor (carga) como dado de entrada.

## REFERÊNCIAS

- ADAMATTI, D. S. et al. **Análise de estruturas de concreto armado através da velocidade de propagação do pulso ultrassônico: estudo de parâmetros tecnológicos intervenientes**. Revista Ibracon. [S.l.]. 2017.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures**, ACI 440.2R, p. 117, 2017.
- ARAÚJO, J. M. **Estruturas de Concreto: Módulo de deformação longitudinal de concreto - Notas de Aula**. Rio Grande – RS, p. ISSN 1519-4086. 2001.
- ARCHIPRODUCTS. **Archiproducts**. Disponível em: <[https://www.archiproducts.com/pt/produtos/kimia/polimero-reforcado-com-fibras-em-fibra-de-carbono-kimitech-cba\\_317249](https://www.archiproducts.com/pt/produtos/kimia/polimero-reforcado-com-fibras-em-fibra-de-carbono-kimitech-cba_317249)>. Acesso em: 05 set. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **Concreto de Cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação: NBR 12655**, Rio de Janeiro - 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **Concreto-Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos: NBR 5739**, Rio de Janeiro - 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **Materiais metálicos - Ensaio de Tração Parte 1 - Método de ensaio à temperatura ambiente: NBR ISSO 6892**, Rio de Janeiro – 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica: NBR 8802**, Rio de Janeiro – 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone: NBR 16889**, Rio de Janeiro – 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 1 - Módulos estáticos à compressão: NBR 8522**, Rio de Janeiro – 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **Manutenção de edificações — Requisitos para o sistema de gestão de manutenção: NBR 5674**, Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **Desempenho de Edificações Habitacionais: NBR 15575**, Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **Projeto de estruturas de Concreto - Procedimento: NBR 6118**, Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **Diretrizes para elaboração de manuais de uso, operação e manutenção das edificações — Requisitos para elaboração e apresentação dos conteúdos: NBR 14037**, Rio de Janeiro, 2014.
- BARROS, J. D. **Dimensionamento de reforço à flexão e ao corte com FRP segundo as recomendações do ACI 440**. Universidade do Minho. Braga (Portugal), p. 35. 2004.
- BEBER, A. J. **Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono**. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 317. 2003.
- BELARBI, A.; BAE, S.-W.; BRANCACCIO, A. Behavior of full-scale RC T-beams strengthened in shear with externally bonded FRP sheets. **Construction and Building Materials**, p. 20, 2011.

BOLINA, F.; HELENE, P.; TUTIKIAN, B. **Patologia de Estruturas**. 1<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: Oficina de Textos, 2019.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BSI. - **Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulse in concrete - Part 203**: BSI 1881, London, UK - 1986.

BUYUKOZTURK, O.; GUNES, O.; KARACA, E. **Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites**. Construction and Building Materials. [S.l.], p. 9 - 19. 2004.

CALLISTER JR., W. D. **Material Science and Engineering - An Introduction**. 7<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.

CHEN, J. F.; TENG, J. G. **Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete**. Journal of Structural Engineering. [S.l.], p. 784-791. 2001.

COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BETON - fib. **Bulletin 14**: Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures, Technical Report, p. 138. 2001.

COMPOSITEGROUP. **CompositeGroup**. Disponível em: <<https://compositegroup.com.br/blog/gfrp-o-que-e-como-e-produzido/>>. Acesso em: 05 set. 2022.

DOCPLAYER. **DocPlayer**. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/84780881-Reforco-com-concreto-e-adicao-de-armaduras.html>>. Acesso em: 21 jun. 2021.

DOMICIANO, A. K. B.; PENA, E. A.; MACHADO, E. R. Análise crítica do reforço estrutural com pómero reforçado com fibra de carbono em pilares de concreto armado submetidos à compressão: estudo de caso. **Revista Petra**, p. 15, 2016.

DYNATECH. **Dynatech**. Disponível em: <<https://www.dynatech.ind.br/fibra-aramida-preco>>. Acesso em: 05 set. 2022.

FERRARI, V. J. **Reforço à Flexão de Vigas de Concreto Armado com Manta de Polímero Reforçado com Fibras de Carbono (PRFC) Aderido a Substrato de Transição Constituído por Compósito Cimentício de Alto Desempenho**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 328. 2007.

FERRARI, V. J.; PADARATZ, I. J.; LORIGGIO, D. D. **Reforço à flexão em vigas de concreto armado com manta de fibra de carbono: mecanismos de incremento de ancoragem**. Universidade Federal de Santa Catarina. Maringá, p. 9. 2002.

FERREIRA, M. P. et al. **Influência da ancoragem na resistência à flexão de vigas reforçadas com mantas de PRFC**. Revista ALCONPAT. [S.l.]. 2018.

GARCEZ, M. R. **Alternativas para Melhoria no Desempenho de Estruturas de Concreto Armado Reforçadas pela Colagem de Polímeros Reforçados com Fibras**. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 267. 2007.

GIESE, A. C. H. **Utilização de argamassa reforçada com têxtil de fibra de vidro álcali resistente para reforço à flexão de vigas de concreto armado**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 190. 2019.

GRELLE, S. V.; SNEED, H. Review of Anchorage Systems for Externally Bonded FRP Laminates. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, p. 33, mar. 2013.

- HELENE, P. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. São Paulo: PINI, 1992.
- HOLLAWAY, L. **Polymer Composites for Civil and Structural Engineering**. 1ª. ed. [S.l.]: Springer, 1993.
- HOSSEINI, A.; MOSTOFINEJAD, D. **Experimental investigation into bond behavior of CFRP sheets attached to concrete using EBR and EBROG techniques**. *Composites Part B: Engineering*. [S.l.], p. 130-139. 2013.
- JIANGA, C. et al. **Epoxy interlocking: A novel approach to enhance FRP-to-concrete bond behavior**. *Construction and Building Materials*. [S.l.], p. 643-653. 2018.
- JUVANDES, L. F. P. **Reforço e Reabilitação de Estruturas de Betão Usando Materiais Compósitos de "CFRP"**. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, p. 396. 1999.
- JUVANDES, L. F. P. **Reforço e Reabilitação de Estruturas**. Relatório Técnico. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, p. 93. 2002.
- JUVANDES, L. F. P.; MARQUES, A. T.; FIGUEIRAS, J. A. **Materiais Compósitos no Reforço de Estruturas de Betão**. Relatório Técnico. Faculdade De Engenharia da Universidade do Porto. Porto, p. 118. 1996.
- KALFAT, R. et al. An efficiency framework for anchorage devices used to enhance the performance of FRP strengthened RC members. **Construction and Building Materials**, p. 22, 2018.
- MACHADO, A. D. P. **Manual de reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono**. São Paulo: Better, 2010. 120 p.
- MACHADO, M. G. **Estudo experimental da ductilidade de vigas em concreto armado reforçadas à flexão utilizando compósitos com tecidos de fibras de carbono**. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro. [S.l.]. 2004.
- MALEK, A. M.; SAADATMANESH, H.; EHSANI, M. R. **Prediction of failure load of R/C beams strengthened with FRP plate due to stress concentration at the plate end**. *ACI Structural Journal*. [S.l.]. 1998.
- MDPI. **MDPI**, 2016. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4360/8/7/261>>. Acesso em: 26 ago. 2021.
- MEDEIROS, D. O. et al. **Introdução aos estudos dos materiais compósitos analisando o modelo da regra das misturas**. Instituto Federal de Alagoas. Alagoas. 2014.
- MENEGHETTI, L. C. **Análise do comportamento à fadiga de vigas de concreto armado reforçado com PRF de vidro, carbono e aramida**. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 277. 2007.
- MOSTAFA, A.; RAZAQPUR, A. G. **CFRP anchor for preventing premature debonding of externally bonded FRP laminates from concrete**. *Journal of Composites for Construction*. [S.l.], p. 641-650. 2013.
- MOSTOFINEJAD, D. et al. **Innovative warp and woof strap (WWS) method to anchor the FRP sheets in strengthened concrete beams**. *Construction and Building Materials*. [S.l.], p. 351-364. 2019.

- MOSTOFINEJAD, D.; SHAMELI, S. M. **Performance of EBROG Method under Multilayer FRP Sheets for Flexural Strengthening of Concrete Beams**. Construction and Building Materials. [S.l.], p. 7. 2011.
- MOSTOFINEJAD, D.; SHAMELI, S. M. **Externally bonded reinforcement in grooves (EBRIG) technique to postpone debonding of FRP sheets in strengthened concrete beams**. Construction and Building Materials. [S.l.], p. 8. 2012.
- NAAMAN, A. E.; JEONG, S. M. **Structural Ductility of Concrete Beams Prestressed with FRP Tendons**. E & FN Spon, Great Britan. Proceedings of the Second International RILEM Symposium FRPRCS – 2. [S.l.], p. 379-386. 1995.
- NOGUEIRA, C. G.; RODRIGUES, I. D. Novo modelo de dimensionamento de vigas em concreto armado à flexão simples considerando o fator de ductilidade. **IBRACON**, p. 11, fev. 2020.
- OBAIDAT, Y. T.; BARHAM, W. S.; ALJARAH, A. H. New anchorage technique for NSM-CFRP flexural strengthened RC beam using steel clamped end plate. **Construction and Building Materials**, p. 11, 2020.
- OLIVEIRA, A. F. D. **Análise Experimental de Ancoragens de Polímeros Reforçados com Fibras em Elementos de Concreto Armado Submetidos à Flexão**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 190. 2018.
- ORLANDO, I. D. G. **Projeto de Estruturas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos FRP: Dimensionamento à Flexão e à Força Cortante**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 196. 2019.
- OUDAH, F.; EL-HACHA, R. **A new ductility model of reinforced concrete beams strengthened using Fiber Reinforced Polymer reinforcement**. Composites Part B: Engineering. [S.l.], p. 3338-3347. 2012.
- PINHEIRO, L. H. B. **Reforço de Pontes em Concreto Armado por Protensão Externa**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas, p. 186. 2018.
- REGINATO, L. A. **Avaliação Experimental dos Efeitos da Corrosão em Concreto Armado: Diagnóstico e Reabilitação com UHPFRC e Concreto Têxtil**. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 191. 2020.
- SANGINABADI, K. et al. **Bond behavior of FRP composites attached to concrete using EBROG method: A state-of-the-art review**. Composite Structures. [S.l.]. 2022a.
- SANGINABADI, K. et al. **RC members externally strengthened with FRP composites by grooving methods including EBROG and EBRIG: A state-of-the-art review**. Construction and Building Materials. [S.l.]. 2022b.
- SITTER, W. R. **Costs for service life optimization. The law of fives**, International CEBRILEM. Workshop on durability of concrete structures. Proceedings. Copenhagen, 1984. 18 - 20.
- SMITH, S. T. et al. **FRP-strengthened RC slabs anchored with FRP anchors**. Engineering Structures. [S.l.], p. 1075-1087. 2011.
- SOUZA, V. C. M. D.; RIPPER, T. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. São Paulo: PINI, 1998. 262 p.

TAJMIR-RIAHIA, A.; MOSHIRIAB, N.; MOSTOFINEJAD, D. **Bond mechanism of EBROG method using a single groove to attach CFRP sheets on concrete.** Construction and Building Materials. [S.l.], p. 693-704. 2019.

TECHNIQUES Solução em Engenharia. **Reforço Estrutural com Perfis e Chapas de Aço**, 2021. Disponível em: <<http://www.fixhouse.com.br/recuperacoes-estruturais/>>. Acesso em: 20 jun. 2021.

TENG, J. G. et al. **FRP Strengthened RD structures.** West Sussex, England: John e Wiley & Sons. [S.l.], p. 245. 2002.

TEODORO, R.; CASCUDO, O.; CARASEK, H. **Uso de Pulso Ultrassônico para Avaliação de Concretos Contendo Diferentes Tipos de Metacaulim de Alta Reatividade.** ConaEnd&Lev. [S.l.]. 2018.

THOMSEN, H. et al. **Failure mode analyses of reinforced concrete beams strengthened in flexure with externally bonded fiber-reinforced polymers.** Journal of Composites for Construction ASCE. [S.l.], p. pp. 123-131. 2004.

VITÓRIO, J. A. P.; DE BARROS, R. C. Reforço e Alargamento de Pontes Rodoviárias com a Utilização de Protensão Externa. **Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas**, Fortaleza, p. 14, 2011.

XIAO, J.; LI, J.; ZHA, Q. **Experimental study on bond behavior between FRP and concrete.** Construction and Building Materials. [S.l.], p. 745 - 752. 2004.

YAZDANI, N.; ALJAAFREH, T.; BENEBERU, E. Concrete beam flexural strengthening with anchored pre-saturated CFRP laminates. **Construction and Building Materials**, p. 7, 2019.

YE, J. Q. **Interfacial shear transfer of RC beams strengthened by bonded composites plates.** Cement & Concrete Composites. [S.l.], p. 411 - 417. 2001.

YUAN, H. et al. **Full-range behavior of FRP to concrete bonded joints.** Engineering and Structures. [S.l.], p. 553-564. 2004.

ZAKI, M. A. et al. **Performance of reinforced concrete T beams strengthened with flexural CFRP sheets and secured using slay anchors.** Engineering Structures. [S.l.]. 2020.

ZHANG, H.; SMITH, S. T. Influence of plate length and anchor position on FRP-to-concrete joints. **Composite Structures**, p. 10, 2016.

## Apêndice A – Dimensionamento de reforço estrutural de vigas com PRF

A seguir, será descrito o procedimento de cálculo do dimensionamento do reforço estrutural de vigas de concreto armado com Polímeros Reforçados com Fibras (PRF), como descrito no Capítulo 3 deste trabalho, portanto, seguindo as recomendações do ACI 440.2R (2017). Tal dimensionamento é realizado para as vigas de concreto caracterizadas e utilizadas no programa experimental deste trabalho. Serão considerados os esforços resistentes pela armadura de compressão. Com relação aos coeficientes de minoração normativos, serão apresentados os cálculos através de dois casos: considerando-os e desconsiderando-os.

### Etapa inicial: Dados necessários para o dimensionamento

Características da viga a ser reforçada	Características do material de reforço
$h = 20 \text{ cm}$ $b_w = 12 \text{ cm}$ (base da viga de concreto) Largura do reforço de 9 cm Cobrimento = 2 cm $d = 20 - 2 - (0,63/2) = 17,685 \text{ cm}$ $d' = 2 + (0,63/2) = 2,315 \text{ cm}$ $L = 1,50 \text{ m}$ (comprimento total da viga)  $f_{cm} = 26,01 \text{ MPa}$   $E_{cm} = 24,97 \text{ GPa}$ Aço CA 50 $A_s = 2 \varnothing 6.3 \text{ mm} = 2 * 0,312 \text{ cm}^2 = 0,624 \text{ cm}^2$ $A'_s = 2 \varnothing 6.3 \text{ mm} = 2 * 0,312 \text{ cm}^2 = 0,624 \text{ cm}^2$ $f_{ym} = 602,97 \text{ MPa}$   $E_{sm} = 240 \text{ GPa}$	Modelo: C - Sheet 240 Tipo: Manta Fibra: Carbono $t_f = 0,168 \text{ mm}$ (espessura de 1 camada) $f_{fu}^* = 4300 \text{ MPa}$ (resistência última à tração) $\varepsilon_{fu}^* = 18 \text{ ‰}$ (deformação de ruptura) $E_f = 240 \text{ GPa}$ (módulo de elasticidade)  Obs: Como não foram realizados nessa pesquisa ensaios experimentais de caracterização do material de reforço, utilizam-se para o dimensionamento estes valores característicos, fornecidos pelo fabricante.

### Etapa 1: Cálculo do momento fletor devido as ações permanentes

- Densidade do concreto armado:  $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$

- Peso da viga de concreto armado:  $P = 2500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * (0,12\text{m} * 0,2\text{m}) = 60 \text{ kg/m} = 0,6 \text{ kN/m}$

- Momento fletor devido peso próprio:

$$M = \frac{qL^2}{8} = \frac{0,6 \text{ kN/m} * 1,50^2}{8} = 0,16875 \text{ kNm} = 168,75 \text{ kNm}$$

### Etapa 2: Nível de deformação inicial da seção (imediatamente antes do reforço)

- Módulo de elasticidade do concreto:  $E_{cm} = 24,97 \text{ GPa}$  (valor “médio” experimental)

- Módulo de elasticidade do aço:  $E_{sm} = 240 \text{ GPa}$  (valor “médio” experimental)

- Coeficiente:  $n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{240 \text{ GPa}}{24,97 \text{ GPa}} = 9,61$

- Coeficiente:  $B = \frac{b}{n.A_s} = \frac{120mm}{9,61*62,4 mm^2} = 0,2$

- Coeficiente:  $r = \frac{(n-1).A'_s}{n.A_s} = \frac{(0,2-1)*0,624}{0,2*0,624} = 0,8959$

$$kd = \frac{\sqrt{2dB\left(1+\frac{rd'}{r}\right)+(1+r)^2}-(1+r)}{B} = \frac{\sqrt{2*120*0,2*\left(1+\frac{0,8959*2,315}{0,8959}\right)+(1+0,8959)^2}-(1+0,8959)}{0,2} = 35,96 mm$$

$$k = \frac{kd}{d} = \frac{35,96 mm}{176,85mm} = 0,203$$

- Momento de inércia da seção homogeneizada (material de reforço, concreto e armaduras de tração e compressão)

$$I_{cr} = \frac{120*0,203^3*176,85^3}{3} + 9,61 * 62,4 * (176,85 - 35,96)^2 + (9,61 - 1) * 62,4 * (35,96 - 2,315)^2$$

$$I_{cr} = 1,39 * 10^7 mm^4$$

- Deformação devido inicial:  $\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL}(d_f - kd)}{I_{cr}E_c} = \frac{168,75kNmm * (200mm - 35,96mm)}{1,39*10^7 mm^4 * 24970 N/mm^2}$

$$\varepsilon_{bi} = 8,00 * 10^{-8} mm/mm = 8,00 * 10^{-5} \text{‰}$$

Entretanto, o reforço aplicando nas vigas deste programa experimental, foram realizadas na viga em posição invertida, sendo mantido dessa forma até a aplicação de carga de ruptura. Logo desconsidera-se a deformação inicial do reforço,  $\varepsilon_{bi} = 0,00$

### **Etapa 3:** Propriedades do reforço de PRF e coeficiente ambiental

- Área do material de reforço:  $A_f = 90 mm * 0,168 mm = 15,12 mm^2$

- Coeficiente ambiental (fibra de carbono exposta a ambiente interno):  $C_E = 0,95$

- Resistência última (valor característico) à tração de cálculo:  $f_{fu} = C_E \cdot f_{fu}^* = 0,95 * 4300MPa = 4085 MPa$

- Deformação de ruptura cálculo:  $\varepsilon_{fu} = C_E \cdot \varepsilon_{fu}^* = 0,95 * 18\text{‰} = 17,1 \text{‰}$

### **Etapa 4:** Deformação máxima permitida do material de reforço de PRF

- Sendo (n) o número de camadas do sistema de reforço e adotando inicialmente 1 camada, tem-se que a deformação limite (máxima) permitida para o sistema de reforço é dada por:

$$\varepsilon_{fd} \leq \begin{cases} 0,41 * \sqrt{\frac{f'_c}{n * E_f * t_f}} = 0,41 * \sqrt{\frac{26,01MPa}{1 * 240000 * 0,168}} = 0,01041 mm/mm = 10,41 \text{‰} \\ 0,9 * \varepsilon_{fu} = 0,9 * 17,1 \text{‰} = 15,39 \text{‰} \end{cases}$$

Logo,  $\varepsilon_{fd} = 15,39 \text{‰}$

### **Etapa 5:** Deformação efetiva do material de reforço de PRF para uma linha neutra (LN) adotada

- Linha Neutra: adota-se  $c = 0,2 * d = 0,2 * 17,685 cm = 3,537 cm$

- Deformação efetiva que irá ocorrer no sistema de reforço de PRF devido LN adotada:

$$\varepsilon_{fe} \leq \begin{cases} \varepsilon_{cu} * \left(\frac{d_f - c}{c}\right) - \varepsilon_{bi} = 3,5\text{‰} * \left(\frac{200\text{mm} - 35,73\text{mm}}{35,73\text{mm}}\right) - 0\text{‰} = 16,29\text{‰} \\ \varepsilon_{fd} = 10,41\text{‰} \end{cases}$$

Adota-se a deformação do concreto  $\varepsilon_{cu} = 3,5\text{‰}$ , de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), e a altura do reforço como sendo a mesma da seção da viga:  $d_f = h$ .

Logo,  $\varepsilon_{fe} = 10,41\text{‰}$ , indicando que o concreto é o limitante do dimensionamento. As próximas etapas estão diretas ou indiretamente relacionadas ao valor da LN adotada nessa etapa de cálculo.

#### **Etapa 6:** Tensão efetiva atingida pelo material de reforço de PRF

- Tensão atingida pelo material de reforço:  $f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} = 240\text{ GPa} * 10,41\text{‰} = 2499,22\text{MPa}$

#### **Etapa 7:** Determinação da deformação do aço e do concreto

- Deformação efetiva atingida pelo aço:

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{d - c}{d_f - c}\right) = (10,41\text{‰} + 0,00\text{‰}) \cdot \left(\frac{176,85\text{mm} - 35,37\text{mm}}{200\text{mm} - 35,37\text{mm}}\right) = 8,95\text{‰}$$

- Deformação efetiva atingida pelo concreto:

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{c}{d_f - c}\right) = (10,41\text{‰} + 0,00\text{‰}) \cdot \left(\frac{35,37\text{mm}}{200\text{mm} - 35,37\text{mm}}\right) = 2,24\text{‰}$$

Como no aço CA-50 o patamar de escoamento do aço se inicia em 2,51‰ valor obtido experimentalmente para este trabalho), concluímos que o aço está escoando. Além disso, a norma americana permite deformações no aço superiores à 10‰, o que é limitado por esse valor nas normas brasileiras.

#### **Etapa 8:** Verificação do valor da LN (conferência do processo iterativo)

- Máxima deformação no concreto não confinado:

$$\varepsilon'_c = \frac{1,71 * f'_c}{E_c} = \frac{1,71 * 26,01\text{MPa}}{24970\text{MPa}} = 0,00178\text{mm/mm} = 1,78\text{‰}$$

- Fator de transformação do diagrama de tensões:

$$\beta_1 = \frac{4\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6\varepsilon'_c - 2\varepsilon_c} = \frac{4 * 1,78\text{‰} - 2,24\text{‰}}{6 * 1,78\text{‰} - 2 * 2,24\text{‰}} = 0,7867$$

- Coeficiente de redução da resistência do concreto devido às cargas de longa duração:

$$\alpha_1 = \frac{3\varepsilon'_c \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1 \varepsilon_c^2} = \frac{3 * 1,78\text{‰} * 2,24\text{‰} - 2,24^2\text{‰}}{3 * 0,7867 * 1,78^2\text{‰}} = 0,9281$$

- Valor da Linha Neutra do equilíbrio (equilíbrio de forças resultados da seção):

$$c = \frac{f_s A_s - f'_s A'_s + f_f A_f}{\alpha_1 f_c \beta_1 b} = \frac{602,97 \text{ N/mm}^2 * 62,4 \text{ mm}^2 - 602,97 \text{ N/mm}^2 * 62,4 \text{ mm}^2 + 2499,22 \text{ MPa} * 15,12 \text{ mm}^2}{0,9281 * 26,01 \text{ MPa} * 0,7867 * 120 \text{ mm}} = 16,58 \text{ mm}$$

$$c_{\text{adotado}} = 3,573 \text{ cm}$$

$$c_{\text{calculado}} = 1,66 \text{ cm}$$

Como  $C_{\text{adotado}} \neq C_{\text{calculado}}$ , logo adotar novo valor da linha neutra (c) e re-calcular das etapas 5 a 8, até que se encontre a convergência e, portanto, o equilíbrio  $c_{\text{adotado}} = c_{\text{calculado}}$ . Utilizando programas de computador e realizando o processo iterativo, obtém-se que o equilíbrio será dado para  $c = 2,204046 \text{ cm}$ . Indica-se os valores calculados nas etapas 5 a 8 para o valor de linha neutra do equilíbrio:

$\varepsilon_{fe} = 28,25\% \leq 10,41\% = 10,41\%$	$\varepsilon'_c = 1,78\%$
$f_{fe} = 2499,22 \text{ MPa}$	$\beta_1 = 0,72$
$\varepsilon_s = 9,06\%$	$\alpha_1 = 0,76$
$\varepsilon_c = 1,29\%$	$c_{\text{calculado}} = 2,204 \text{ cm} \mid c_{\text{iteração}} = 2,204 \text{ cm}$ $\therefore$ equilíbrio da seção

**Etapa 9:** Determinação do momento nominal, coeficiente de ductilidade e momento último da seção em equilíbrio

- Momento nominal (de cálculo):

$$M_n = f_s A_s \left( d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f f_{fe} A_f \left( h - \frac{\beta_1 c}{2} \right) - f'_s A'_s \left( \frac{\beta_1 c}{2} - d' \right)$$

$$M_n = \frac{602,97 \text{ N}}{\text{mm}^2} * 62,4 \text{ mm}^2 * \left( 176,85 \text{ mm} - \frac{0,72 * 22,04 \text{ mm}}{2} \right) + 0,85 * \frac{2499,22 \text{ N}}{\text{mm}^2} * 15,12 \text{ mm}^2 * \left( 200 \text{ mm} - \frac{0,72 * 22,04 \text{ mm}}{2} \right) - \frac{602,97 \text{ N}}{\text{mm}^2} * 62,4 \text{ mm}^2 * \left( \frac{0,72 * 22,04 \text{ mm}}{2} - 23,15 \text{ mm} \right)$$

$$M_n = 1,23 * 10^7 \text{ Nmm} = 12,31 \text{ kNm}$$

- Coeficiente de ductilidade:

$$\phi = \begin{cases} 0,90; \text{ para } \varepsilon_t \geq 0,005 \\ 0,65 + 0,25 \frac{(\varepsilon_t - \varepsilon_{sy})}{0,005 - \varepsilon_{sy}} = 0,65 + 0,25 \frac{(9,058 - 2,51)}{0,005 - 2,51} = 0,97; \text{ para } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_t < 0,005 \\ 0,65; \text{ para } \varepsilon_t \leq \varepsilon_{sy} \end{cases}$$

Como a deformação atingida pelo aço na seção ( $\varepsilon_s$ ) é de 9,058 %, e a deformação de escoamento da armadura CA-50 ( $\varepsilon_t$ ) é de 2,51 %, valor obtido experimentalmente, obtém-se o coeficiente de ductilidade como sendo,  $\phi = 0,9$

- Momento último da seção reforçada:

$$\phi M_n \geq M_u \rightarrow M_u = 0,90 * 12,31 kNm = 11,08 kNm$$

No ensaio de flexão à quatro pontos:  $11,08 kNm \div 0,47m = 23,8 kN$  de carga pontual

2 cargas pontuais de  $23,8 kN \therefore$  carga teórica na prensa =  $47,16 kN$

**Caso se desconsidera os seguintes coeficientes de minoração:** deformação inicial devido ao peso próprio na aplicação do PRFC é nula; coeficiente ambiental (CE); coeficiente de minoração para deformação máxima de projeto do compósito de PRF ( $\varepsilon_{fd}$ ), associada a determinação do valor de cálculo ( $\varepsilon_{fd}$ ); fator  $\alpha_1$  de minoração do concreto pelo efeito Rüschi; minoração da resistência na flexão do PRFC ( $\psi_f$ ); coeficiente de ductilidade ( $\phi$ ). A norma ACI 440.2R (2017) não apresenta coeficientes de minoração do aço e do concreto, com o dimensionamento dos elementos de concreto da norma NBR 6118 (ABNT, 2014). Assim, através do processo iterativo desconsiderando tais parâmetros obtém-se o seguinte equilíbrio:

$\varepsilon_{fe} = 37,21\text{‰} \leq 10,41\text{‰} = 10,41 \text{‰}$	$\varepsilon'_c = 1,78\text{‰}$
$f_{fe} = 2499,22 \text{ MPa}$	$\beta_1 = 0,70$
$\varepsilon_s = 9,09 \text{‰}$	$\alpha_1 = 1,00$
$\varepsilon_c = 0,98 \text{‰}$	$c_{calculado} = 1,7196 \text{ cm} \mid c_{iteração} = 1,7196 \text{ cm}$ $\therefore$ equilíbrio da seção
$M_u = 13,61 kNm$ , para $\phi = 1,00$ (desconsiderando o coeficiente de ductilidade)	$M_u = 12,25 kNm$ para $\phi = 0,90$ (considerando o coeficiente de ductilidade)

**Etapa complementar:** determinação do comprimento de ancoragem reta do reforço (processo construtivo):

$$l_{df} = \sqrt{\frac{nE_f t_f}{\sqrt{f'_c}}} = \sqrt{\frac{1 * 240000 \text{ N/mm}^2 * 0,168 \text{ mm}}{\sqrt{26,01 \text{ N/mm}^2}}} = 88,9 \text{ mm} = 8,89 \text{ cm}$$

Como trata-se de viga de concreto armado simplesmente apoiada com a aplicação de uma única camada de reforço, tem-se que o comprimento de ancoragem se inicia na região onde o momento resistido pela viga se torna igual ao momento de fissuração (momento crítico  $M_{cr}$ ), como discutido no Capítulo 3. Porém, observa-se nas aplicações práticas do reforço em vigas de concreto armado com PRF o uso do material em toda região do substrato da viga, por facilitar a instalação, evitar erros e garantir a ancoragem reta. Por se tratar de um estudo experimental, adota-se, para o reforço dimensionado acima, a aplicação de PRF na totalidade do comprimento do elemento.

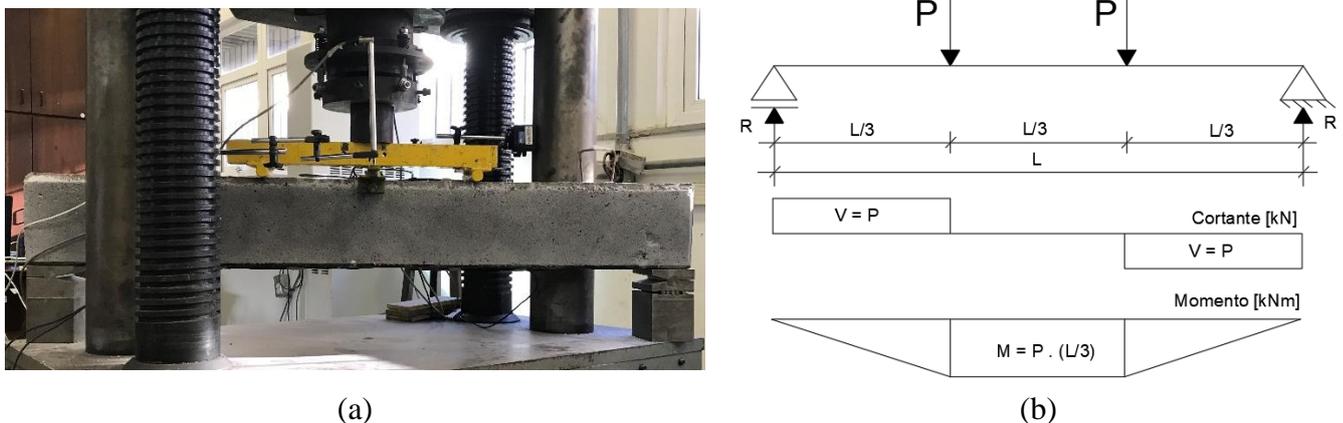
## Apêndice B – Verificação de cálculo da viga de concreto armado

A viga de concreto armado utilizada para os ensaios experimentais deste trabalho e apresentada no 4.3.1, será verificada para esforços de flexão simples, de duas formas: desconsiderando e considerando a armadura de compressão do elemento para contribuição da resistência da seção, apresentadas respectivamente no Apêndice B1 e Apêndice B2. Além disso se realiza a verificação para o esforço cortante resistente da seção, indicada no Apêndice B3. Todas as hipóteses de cálculo das metodologias são as indicadas pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

Ao longo desse Apêndice B, para cada um dos dois casos e/ou verificações, a determinação dos esforços resistentes ocorre desconsiderando o efeito Rüsich, associado à redução da resistência do concreto devido ao efeito deletério das cargas de longa duração, e dos coeficientes de minoração da resistência do aço e do concreto, uma vez que se pretende determinar os valores analíticos do elemento para a carga última máxima que pode ser atingida, conforme indica a NBR 6118 (ABNT, 2014). As propriedades dos materiais (aço e concreto), utilizados ao longo desse Apêndice B, serão dadas pelos valores médios, obtidos através dos ensaios experimentais descritos no Capítulo 4 deste trabalho.

Como o ensaio da viga é de flexão a quatro pontos e ao saber que as distâncias apoio-carga; carga-carga e carga-apoio são iguais e cada uma equivale a um terço do vão total da viga, é possível calcular a carga concentrada aplicada pela prensa. A Figura 81 indica o esquema do ensaio realizado e o diagrama de esforços.

Figura 81 – Representação do ensaio à flexão: (a) prensa universal localizada no LEME UFRGS e (b) diagrama de momento fletor e esforço cortante do modelo de viga ensaiada



Fonte: elaborada pelo autor

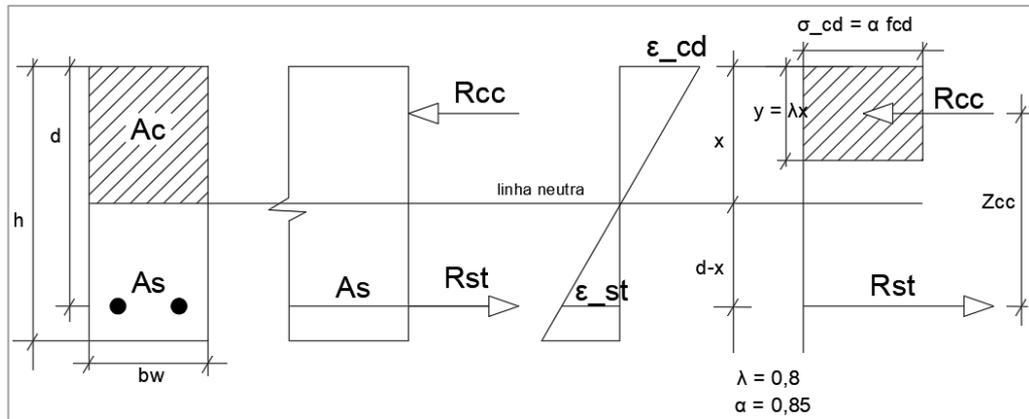
**Dados da viga:**  $f_{cm} = 26,01\text{MPa}$ ;  $E_c = 24,97\text{ GPa}$  (valor médio);  $2 \phi 6.3\text{mm}$  para armadura de tração;  $2 \phi 6.3\text{mm}$  para armadura de compressão;  $\phi 6.3\text{mm}$  a cada  $6\text{ cm}$  para armadura

transversal; aço CA 50;  $f_{ym} = 602,97 \text{ MPa}$ ;  $E_{aço} = 240 \text{ GPa}$  (valor médio);  $b_w = 12 \text{ cm}$ ;  $h = 20 \text{ cm}$ ;  $d = 17,685 \text{ cm}$ ;  $d' = 2,315 \text{ cm}$  (cobrimento de 2 cm).

### B1 – Desconsiderando a contribuição da armadura de compressão

Analisando o diagrama de tensões e deformação do concreto, apresentado na Figura 82 obtém-se as relações de equilíbrio de força do concreto e do aço tracionado. Desconsidera-se para o procedimento de cálculo o efeito Rüsçh e os coeficientes de minoração do aço ( $\gamma_s = 1,15$ ) e do concreto ( $\gamma_c = 1,4$ ).

Figura 82 – Diagrama tensão e deformação da seção de concreto com armadura de tração



Fonte: elaborada pelo autor

**Equilíbrio de forças resultante:**  $F_{concreto} = F_{aço}$ , considerado que  $\sigma = F/A$ , tem-se a equação do equilíbrio como:  $(\alpha_c * f_{cd})(\lambda * x * b_w) = A_s * f_{yd}$ , sendo:  $f_{yd} = f_{yk}/\gamma_s$ ;  $f_{cd} = f_{ck}/\gamma_c$ . Logo o valor da linha neutra ( $x$ ) do equilíbrio da seção, é dado por:

$$x_{calculado} = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{\alpha_c \cdot f_{cd} \cdot \lambda \cdot b_w} = \frac{(2 * 0,312 \text{ cm}^2) \frac{60,297}{1,0} \text{ kN/cm}^2}{1,00 \cdot \frac{26010}{1,0} \text{ kN/cm}^2 * 0,12 \text{ m} * 0,8} = 0,015068 \text{ m}$$

**Domínios de deformação do concreto armado:** sabendo que o aço utilizado é CA-50, tem-se as posições da linha neutra para os limites dos domínios:

Limite domínio 2/3	$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{cu} = 3,5\%$ $\varepsilon_{st} = \varepsilon_{su} = 10\%$	$x_{2/3} = 0,259 * d = 0,259 * 0,1768 \text{ m} = 0,0458 \text{ m}$
Limite domínio 3/4	$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{cu} = 3,5\%$ $\varepsilon_{st} = \frac{\sigma}{E} = \frac{602,97/1,00 \text{ MPa}}{240000 \text{ MPa}} = 2,51\%$	$x_{3/4} = 0,45 * d = 0,45 * 0,1768 \text{ m} = 0,0795 \text{ m}$

Comparando os valores limites da linha neutra calculado *versus* limites dos domínios, concluímos que a seção está no domínio 2.

**Determinação do momento fletor máximo resistente:**  $M = A_s \cdot f_{yd} \cdot \left( d - \frac{\lambda \cdot x}{2} \right)$

$$M = (2 * 0,312 \text{ cm}^2) * \frac{60,297}{1,00} \text{ kN/cm}^2 * \left( 17,685 \text{ cm} - \frac{0,8 * 1,51 \text{ cm}}{2} \right)$$

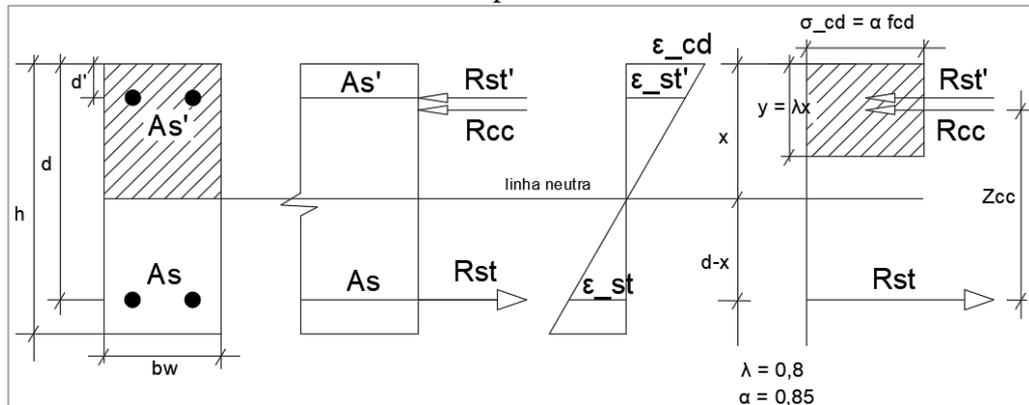
$$M = 642,73 \text{ kNcm}$$

Logo, ao desconsiderar o efeito Rüsç e os coeficientes de minoração do aço ( $\gamma_s = 1,15$ ) e do concreto ( $\gamma_c = 1,4$ ), obtém-se a posição da linha neutra  $x_{calculado} = 1,51 \text{ cm}$ , indicando um momento fletor resistente para o elemento de  $M = 642,73 \text{ kNcm}$ . Para o ensaio de flexão à quatro pontos isso indica duas cargas concentradas de 13,68 kN e carga da prensa de 27,36 kN.

## B2 – Considerando a contribuição da armadura de compressão

Analisando o diagrama de tensões e deformação do concreto, apresentado na Figura 83 obtém-se as relações de equilíbrio de força do concreto, do aço comprimido e do aço tracionado. Desconsidera-se para o procedimento de cálculo o efeito Rüsç e os coeficientes de minoração do aço ( $\gamma_s = 1,15$ ) e do concreto ( $\gamma_c = 1,4$ ).

Figura 83 - Diagrama tensão e deformação da seção de concreto com armadura de tração e compressão



Fonte: elaborada pelo autor

**Equilíbrio de forças resultante:**  $F_{concreto} + F'_{aço} = F_{aço}$ , considerado que  $F = \sigma * A$ , tem-se e equação do equilíbrio como:  $(\alpha_c * f_{cd})(\lambda * x * b_w) + A'_s * f'_{yd} = A_s * f_{yd}$ , sendo:

$f_{yd} = f_{yk}/\gamma_s$ ;  $f_{cd} = f_{ck}/\gamma_c$ . Logo o valor da linha neutra ( $x$ ) do equilíbrio da seção, é dado por:

$$x_n = \frac{A_s \cdot f_{yd} - A'_s \cdot f'_{yd}}{\alpha_c \cdot f_{cd} \cdot \lambda \cdot b_w}$$

$$x_n = \frac{(2 * 0,312 \text{ cm}^2) \frac{60,297}{1,00} \text{ kN/cm}^2 - (2 * 0,312 \text{ cm}^2) \frac{60,297}{1,00} \text{ kN/cm}^2}{1,00 \cdot \frac{26010}{1,00} \text{ kN/cm}^2 * 0,12\text{m} * 0,8} = 0,00\text{m}$$

Para o primeiro valor de linha neutra calculada a seção está no domínio 2 de deformação, com o aço atingido a deformação máxima de 10%. Assim, para este primeiro valor da linha neutra determina-se as deformações e as tensões nos materiais através de semelhanças de triângulos, para em seguida determinar a posição da linha neutra de equilíbrio para tais parâmetros, a fim de ser avaliando um novo equilíbrio.

**Deformação do aço tracionado:** como a seção está no domínio de deformação 2, obtém-se que a deformação do aço tracionado atinge valor de  $\varepsilon_s = 10\%$

$$\text{Deformação do aço comprimido: } \varepsilon'_{st} = \left(\frac{x-d'}{d-x}\right) \varepsilon_{st} = \left(\frac{0,00-2,315}{17,685-0,00}\right) * 0,01 = -1,31 * 10^{-3}$$

$$\text{Deformação do aço no escoamento: } \varepsilon_{yd} = \frac{\sigma_{aço}}{E_{aço}} = \frac{60,297/1,00}{240000} = 2,51 * 10^{-4}$$

$$\text{Deformação do concreto comprimido: } \varepsilon_{cc} = \left(\frac{x}{d-x}\right) \varepsilon_{st} = \left(\frac{0,00}{17,685-0,00}\right) * 0,01 = 0,00$$

**Tensão no aço tracionado:** como a seção está no domínio de deformação 2, obtém-se que a tensão do aço tracionado é de  $\frac{60,297 \text{ kN/cm}^2}{1,00} = 60,297 \text{ kN/cm}^2$

$$\text{Tensão no aço comprimido: } \sigma = \varepsilon'_{st} \cdot E = \left(\frac{x-d'}{d-x}\right) \varepsilon_{st} \cdot E = \left(\frac{0,00-2,315}{17,685-0,00}\right) * 0,01 * 24000 = -31,42$$

**Tensão no concreto comprimido:** como a seção está no domínio de deformação 2, obtém-se que a tensão do concreto comprimido é de  $\frac{2,601 \text{ kN/cm}^2}{1,00} = 2,601 \text{ kN/cm}^2$

$$\text{Momento fletor último: } M_u = A_s \cdot f_y \cdot d - 0,32 * \alpha_c * b_w * f_c * x^2 - A'_s * f'_y * d'$$

$$M_u = 0,624 * 60,297 * 17,685 - 0,32 * 1,00 * 12 * 2,601 * 0,0^2 - 0,624 * (-31,42) * 2,315$$

$$M_u = 710,79 \text{ kNcm}$$

**Nova posição da Linha Neutra:** a partir das tensões e deformações encontradas para o aço comprimido, aço tracionado e para concreto, determina-se a nova posição da Linha Neutra atante na seção

$$x_{n+1} = \frac{A_s \cdot f_y - A'_s \cdot f'_y}{\alpha_c \cdot f_c \cdot \lambda \cdot b_w} = \frac{0,624 * 60,297 - 0,624 * (-31,42)}{1,00 * 2,601 * 0,8 * 12}$$

$$x_n = 0,00 \text{ cm e } x_{n+1} = 2,29 \text{ cm}$$

Assim, como o equilíbrio não foi atingido ( $x_n \neq x_{n+1}$ ), se faz necessário realizar uma nova iteração do procedimento de cálculo descrito anteriormente, dada para uma posição de linha neutra de:

$$x_{n+2} = \frac{0,00 + 2,29}{2} = 1,15 \text{ cm}$$

O processo é repetido até que se encontre a posição do equilíbrio da linha neutra (processo iterativo de convergência) e para tal valor, determina-se o momento fletor último analítico resistente para a seção. Utilizando o programa Excel, a fim de otimizar os procedimentos repetitivos do cálculo das iterações, determina-se a posição do equilíbrio da linha neutra ( $x$ ) do processo iterativo igual a 1,73 cm, o que corresponde ao domínio 2 de deformações. Assim o momento fletor resistente é dado por:  $M = 648,36 \text{ kNcm}$ . A Tabela 12 indica o resumo dos resultados analíticos calculados.

Tabela 12 – Resumo dos valores analíticos resistentes na viga de concreto

Armadura Longitudinal Considerada no Cálculo Analítico	Momento Fletor [kNcm]	Carga na prensa [kN]
Tração	642,73	27,35
Tração e Compressão	648,36	27,59
Tração vs Tração e Compressão [%]	0,88%	

Fonte: elaborada pelo autor

### B3 – Esforço cortante resistente

Para a determinação do esforço cortante analítico obtido para a armadura transversal, realizam-se os procedimentos de cálculo descritos a seguir. Desconsidera-se os coeficientes de minoração do aço ( $\gamma_s = 1,15$ ) e do concreto ( $\gamma_c = 1,4$ ).

#### Área da armadura transversal ( $A_{sw}$ ):

$$A_{sw}/s \rightarrow 100 \text{ cm}$$

$$2 * 0,312 \text{ cm}^2 \rightarrow e = 6 \text{ cm}$$

$$A_{sw} = 10,4 \text{ cm}^2/\text{m}$$

#### Força cortante resistente pela armadura ( $V_{sw}$ ):

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{sw}}{0,9 * d * f_{ywd}} \rightarrow 10,4 \text{ cm}^2/\text{m} = \frac{V_{sw}}{0,9 * 0,17685 \text{ m} * \frac{60,297}{1,00} \text{ kN/cm}^2}$$

$$\therefore V_{sw} = 99,81 \text{ kN}$$

**Força cortante atuante de cálculo ( $V_k$ ):** sendo ( $V_c$ ) a força resistida pelo concreto

$$f_{ctm} = 0,3 * f_{ck}^{\frac{2}{3}} = 0,3 * (26,01 \text{ MPa})^{\frac{2}{3}} = 2,63 \text{ MPa}$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7 * f_{ctm} = 0,7 * 2,63 \text{ MPa} = 1,84 \text{ MPa}$$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c} = \frac{1,84MPa}{1,00} = 1,84 MPa$$

$$V_c = 0,6 * f_{ctd} * b_w * d = 0,6 * 184 N/cm^2 * 12cm * 17,685cm = 23,47kN$$

$$V_{sw} = \gamma_f * V_k - V_c \rightarrow 99,81 = (1,00 * V_k) - 23,47$$

$$\therefore V_k = 123,28 kN$$

Logo, desconsiderando os coeficientes de minoração do aço ( $\gamma_s = 1,15$ ) e do concreto ( $\gamma_c = 1,4$ ), obtém-se um esforço cortante resistente para o elemento de  $V = 123,28 kN$ .