

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

**ANÁLISE TEÓRICA-EXPERIMENTAL DE VIGAS DE CONCRETO
ARMADO REFORÇADAS COM LAMINADOS DE POLÍMEROS
REFORÇADOS COM FIBRAS DE CARBONO (PRFC) COM E SEM
PROTENSÃO**

Sarah Lodeti Pessi

PORTO ALEGRE

2022

SARAH LODETI PESSI

**ANÁLISE TEÓRICA-EXPERIMENTAL DE VIGAS DE
CONCRETO ARMADO REFORÇADAS COM LAMINADOS
DE POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS DE
CARBONO (PRFC) COM E SEM PROTENSÃO**

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
2022

CIP - Catalogação na Publicação

Pessi, Sarah Lodeti

ANÁLISE TEÓRICA-EXPERIMENTAL DE VIGAS DE CONCRETO
ARMADO REFORÇADAS COM LAMINADOS DE POLÍMEROS
REFORÇADOS COM FIBRAS DE CARBONO (PRFC) COM E SEM
PROTENSÃO / Sarah Lodeti Pessi. -- 2022.

151 f.

Orientador: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho.

Coorientadora: Paula Manica Lazzari.

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. Polímero Reforçado com Fibras (PRF). 2. Sistemas
de reforço. 3. Protensão de laminados. 4. Sistemas de
ancoragem. I. Silva Filho, Luiz Carlos Pinto da,
orient. II. Lazzari, Paula Manica, coorient. III.
Titulo.

SARAH LODETI PESSI

**ANÁLISE TEÓRICA-EXPERIMENTAL DE VIGAS DE
CONCRETO ARMADO REFORÇADAS COM LAMINADOS
DE POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS DE
CARBONO (PRFC) COM E SEM PROTENSÃO**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Área de Concentração 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, 29 de dezembro de 2022

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
PhD. pela University of Leeds, UK

Orientador

Prof^a. Paula Manica Lazzari
Dr^a. pela Universidade Federal do Rio Grande
do Sul
Coorientadora

Prof. Lucas Festugato
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Acir Mércio Loredo-Souza
PhD pela The University of Western Ontario, UWO, Canadá

Prof. Mônica Regina Garcez
Dr^a. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Vanessa Fátima Pasa Dutra
Dr^a. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

AGREDECIMENTOS

Agradeço minha família, em especial minha mãe, Adriana, que mesmo de longe esteve presente com todo o suporte necessário para o andamento da pesquisa, oferecendo amor, apoio e incentivo.

Agradeço ao professor Luiz Carlos Pinto da Silva Filho e a professora Paula Manica Lazzari, orientadores desse trabalho, por todos os ensinamentos obtidos durante a pesquisa, em especial na parte final da dissertação onde o tempo era limitado, obrigada por toda a confiança depositada.

Agradeço aos membros da banca, professores Acir Loredou-Souza, Mônica Garcez e Vanessa Dutra, pela disposição em participar da banca de defesa da dissertação de modo a contribuir com a pesquisa.

Agradeço aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) por todos os ensinamentos transmitidos durante as aulas das disciplinas, onde foi possível desenvolver as bases que proporcionaram maior entendimento no decorrer da pesquisa. À pesquisadora e professora, Morgane Bigolin, responsável pela tramitação dos orçamentos da pesquisa, auxiliando e contribuindo para aquisição dos materiais. Agradeço também ao pesquisador, Lucas Reginato, que além de todo o conhecimento repassado, auxiliou na realização dos ensaios.

Agradeço aos pesquisadores e membros do Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) em especial o Sr. Edegar Lucas, técnico de laboratório, que foi responsável por elaborar todos os mecanismos necessários para atingir o objetivo da pesquisa, e que mesmo com o tempo restrito se empenhou de modo a permitir o andamento dos ensaios e ao Sr. José Orvandi, que auxiliou na realização dos experimentos.

Agradeço aos amigos, Julia, Luiz, Cleiton, Joice e Isadora pelo apoio e incentivo para o andamento da dissertação, principalmente da fase experimental.

Agradeço a empresa ArcelorMittal de Porto Alegre, que através da Margarete, foi possível a doação de materiais para a etapa inicial da pesquisa.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de pesquisa que permitiu o total empenho durante todo o mestrado, e à Fundação Empresa

Escola de Engenharia da UFRGS (FEENG), pelo suporte financeiro na aquisição de materiais para a pesquisa.

RESUMO

PESSI, S. L. **Análise teórica-experimental de vigas de concreto armado reforçadas com laminados de polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC) com e sem protensão.** 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre.

A durabilidade de estruturas de concreto armado tem sido um tema recorrente no intuito de aumentar a vida útil das estruturas realizadas. Sabe-se que o concreto é considerado um material durável, porém, apresenta limites relativos às deteriorações ocasionadas por agentes agressivos. Nesse sentido, a recuperação de estruturas danificadas torna-se relevante e diversos sistemas foram propostos como método de reforço de construções, entre eles o Polímero Reforçado com Fibras (PRF). Os PRF são comumente empregados na face externa na viga através de aderência por meio de resina, configurando o reforço de aderência externo – EBR (*Externally Bonded Reinforcement*), entanto, a simples aderência limita a capacidade de utilização de grande parte da resistência à tração do compósito devido a falhas prematuras do sistema. Em vista disso, a protensão de Polímeros Reforçados com Fibras tem sido amplamente estudada como método de reforço de elementos de concreto armado por propiciar inúmeras vantagens, entre elas o aumento da carga última e redução da abertura de fissuras. O presente trabalho pretende analisar experimentalmente vigas de concreto armado reforçadas à flexão com laminados de PRFC protendidos e ancorados através de sistema não metálico. O estudo foi realizado com 8 vigas de concreto armado, que foram divididas em quatro grupos: vigas testemunho, simplesmente reforçadas com e sem ancoragem e por último as vigas reforçadas com laminado protendido com sistema não metálicos. As vigas foram submetidas ao ensaio de flexão estática a quatro pontos sendo avaliadas em termos de capacidade resistente, deformação, perdas de protensão e falha do sistema. Os resultados demonstraram aumento de 48,2% na carga última das vigas protendidas em relação às vigas testemunho, com aplicação de um nível de protensão de 4,10% da resistência a tração do compósito. As perdas de protensão imediatas observadas foram de 10,6% da carga média aplicada para protensão. Além disso, uma comparação analítica dos resultados experimentais foi desenvolvida, se mostrando eficiente conforme a relação de 1,03 entre os resultados teóricos e obtidos experimentalmente, indicando uma contribuição para o estabelecimento de critérios de projeto de estruturas reforçadas com laminados de PRF.

Palavras-chave: *polímero reforçado com fibras (PRF); sistemas de reforço; protensão de laminados; sistemas de ancoragem.*

ABSTRACT

PESSI, S. L. **Análise teórica-experimental de vigas de concreto armado reforçadas com laminados de polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC) com e sem protensão.** 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre.

The durability of reinforced concrete structures has been a recurring theme in order to increase the service life of the structures. It is known that concrete is considered a durable material, however, it presents limits concerning the deterioration caused by aggressive agents. In this sense, the recovery of damaged structures becomes relevant and several systems have been proposed as a method of construction reinforcement, among them the Fiber Reinforced Polymer (FRP). The FRP are commonly employed in the external face of the beam through adherence by means of resin, configuring the external bonded reinforcement - EBR (Externally Bonded Reinforcement), however, the simple adherence limits the ability to use much of the tensile strength of the composite due to premature failure of the system. In view of this, prestressing of Fiber Reinforced Polymers has been widely studied as a method of reinforcement of reinforced concrete elements for providing numerous advantages, including the increase of ultimate load and reduction of crack opening. The present work intends to experimentally analyze reinforced concrete beams flexurally strengthened with prestressed CFRP laminates anchored through a non-metallic system. The study was performed with 8 beams of reinforced concrete, which were divided into four groups: specimen beams, simply strengthened with and without anchorage and finally the beams strengthened with prestressed laminate with non-metallic system. The beams were subjected to a four-point static bending test and evaluated in terms of strength capacity, deformation, prestressing losses, and system failure. The results showed increases of 48.2% in the ultimate load of prestressed beams compared to the control beams, with the application of a prestressing level of 4.10% of the composite tensile strength. The observed prestressing losses were 10.6% of the average applied load for prestressing. Moreover, an analytical comparison of the experimental results was developed, proving to be efficient according to the ratio of 1.03 between theoretical and experimental results, indicating a contribution to the establishment of design criteria for structures strengthened with FRP laminates.

Palavras-chave: *Fiber Reinforced Polymer (FRP); reinforcement systems; laminate prestressing; anchoring systems.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Ilustração esquemática da pesquisa.....	25
Figura 2.1 – Laminados de PRFV da ponte Kattenbusch na Alemanha durante a aplicação ..	29
Figura 2.2 – Reforço com laminados de PRFC na ponte de Ibach na Suíça	29
Figura 2.3 – (a) Aplicação do PRFC em 1998 no Viaduto Santa Teresa; (b) Atual reforço no viaduto Santa Teresa em 2020.....	30
Figura 2.4 – Comparação tensão-deformação dos polímeros reforçados com fibras e o aço sob o ensaio uniaxial	32
Figura 2.5 – Relação tensão-deformação entre a fibra, matriz e compósito PRF	33
Figura 2.6 – Etapas para aplicação de sistemas com polímeros reforçados com fibras	36
Figura 2.7 – (a) Sistema NSM com barras; (b) Sistema NSM com lâminas; (c) Sistema EBROG.....	39
Figura 2.8 – Sistema EBRIG	39
Figura 2.9 – Fluxograma de cálculo para verificação do reforço segundo ACI 440.2R-17 (ACI, 2017).....	44
Figura 2.10 – Distribuição das tensões e deformações na seção de concreto reforçada com PRF	45
Figura 2.11 – Comparação momento x curvatura de vigas sem reforço, com reforço de PRF protendido e sem protensão	49
Figura 2.12 – Desprendimento da cobertura de concreto nas extremidades da viga após liberação do esforço.....	50
Figura 2.13 – Protensão de laminados de PRFC na ponte rio Pilsia localizada em Szczercowska Wieś (Polônia). (a) ancoragem gradiente; (b) equipamento de protensão	51
Figura 2.14 – Sistema de protensão com curvatura do elemento de reforço. (a) Elevação do centro da viga com macacos hidráulicos; (b) aplicação do laminado de PRF; (c) retirada dos macacos hidráulicos após a resina estar seca.....	52
Figura 2.15 – Sistema de curvatura da viga através de cabos de aço, chapas em L e macacos hidráulicos	54
Figura 2.16 – Representação de um reforço com sistema de protensão de laminados contra um suporte externo independente: (a) Fixação dos laminados de PRF em suportes de aço conectados a um dispositivo de protensão, com execução da tensão; (b) aplicação dos laminados protendidos na viga; (c) reforço finalizado	54

Figura 2.17 – Dispositivo de protensão dos laminados de PRF: (a) viga metálica de reação; (b) dispositivo de ancoragem da lâmina para ser protendida	55
Figura 2.18 – Sistemas de protensão de laminados de PRF: (a) com viga de aço; (b) com blocos de aço	56
Figura 2.19 – Sistema de protensão do laminado de PRF com viga de aço como suporte de reação.....	57
Figura 2.20 – Sistema de protensão e ancoragem de laminados com método EBROG.....	57
Figura 2.21 – Relação força x deslocamento para as lajes reforçadas e referência.....	58
Figura 2.22 – Sistema de protensão de laminados através da reação contra o próprio elemento a ser reforçado	58
Figura 2.23 – Sistema de protensão de laminados idealizado por Wight et al. (2001)	59
Figura 2.24 – Sistema de protensão realizado por Woo et al. (2008).....	60
Figura 2.25 – (a) Sistema de protensão A: extremidade fixa; (b) Sistema de protensão A: extremidade de tensionamento; (c) clipe de aço do sistema A; (d) clipe de aço do sistema B	61
Figura 2.26 – Sistema de protensão de laminados S&P Clever Reinforcement Company: (a) ancoragem fixa; (b) ancoragem que realiza protensão	62
Figura 2.27 – Sistemas de protensão de laminados Sika®: (a) Sika LEOBA CarboDur LCII; (b) Sika-StressHead	62
Figura 2.28 – Dispositivo de protensão idealizado por Meier, Stöcklin e Winistörfer	63
Figura 2.29 – Representação esquemática da protensão de laminados gradual	64
Figura 2.30 – Sistema de protensão de laminados de PRFC sem ancoragem mecânica.....	65
Figura 2.31 – Sistema de ancoragem de laminados protendidos: (a) ancoragem fixa; (b) ancoragem ativa; (c) ancoragem de transição.....	66
Figura 2.32 – Deslizamento do laminado do dispositivo de ancoragem durante o ensaio estático	66
Figura 2.33 – Sistema misto de ancoragem de laminados de PRFC protendidos	67
Figura 2.34 – Dispositivo de ancoragem em U de PRFC para laminados protendidos	68
Figura 2.35 – Sistema de ancoragem em U de PRFC: (a) âncora em U; (b) inserção do sistema de ancoragem.....	69
Figura 2.36 – Cordão de fibra de carbono aplicado como sistema de ancoragem	70
Figura 2.37 – Ancoragem dos cordões de PRFV nas lajes: (a) localização da ancoragem; (b) aplicação do sistema	71

Figura 2.38 – Sistema de aplicação do cordão de fibras de carbono em fendas: (a) abertura do orifício e das fendas; (b) inserção do cordão de fibra de carbono; (b) aplicação de resina nas fendas; (d) aplicação de resina para receber o tecido	71
Figura 3.1 – Seção transversal e detalhamento da armadura longitudinal e transversal das vigas estudadas	78
Figura 3.2 – Processo de concretagem na fábrica de pré-moldados: (a) formas de concretagem; (b) vibração; (c) cura das vigas	79
Figura 3.3 – Laminado de PRFC Sika® CarboDur® S 514	81
Figura 3.4 – Manta C-Sheet 240.....	82
Figura 3.5 – Vigas reforçadas com laminado simplesmente aderido	82
Figura 3.6 – Vigas simplesmente reforçadas com ancoragem de laços em U.....	83
Figura 3.7 – Gráfico da tensão cisalhante interfacial entre o concreto e o laminado.....	84
Figura 3.8 – Processo de desgaste das vigas reforçadas: (a) demarcação da área; (b) desgaste da superfície; (c) aplicação de ar pressurizado	84
Figura 3.9 – (a) aplicação da resina; (b) laminado fixado a viga após o uso do rolo para tiragem de bolhas de ar	85
Figura 3.10 – (a) arredondamento das bordas para execução da ancoragem com laço em U; (b) nivelamento da área de contato entre a manta e o laminado	86
Figura 3.11 – (a) saturação da superfície da viga para aplicação da manta; (b) sistema de ancoragem finalizado.....	86
Figura 3.12 – Vigas simplesmente reforçadas com ancoragem de laço em U em posição de cura, com a superfície inferior voltada para cima	87
Figura 3.13 – Viga com laminado protendido com ancoragem de laços em U de manta de fibra de carbono	87
Figura 3.14 – Suporte externo de reação independente para o sistema de protensão.....	88
Figura 3.15 – Sistema de protensão com as definições das ancoragens.....	88
Figura 3.16 – Ancoragem Passiva: (a) vista superior; (b) caixa de ancoragem com sistema de cunhas; (c) sistema de ancoragem	89
Figura 3.17 – Sistema de cunhas: (a) conjunto com partes fixas; (b) conjunto com partes fixas e móveis; (b) ranhuras nas faces das peças móveis	90
Figura 3.18 – Sistema de fixação da ancoragem ativa	90
Figura 3.19 – Sistema completo da ancoragem ativa da protensão.....	90
Figura 3.20 – Aplicação do laminado na viga anteriormente a protensão	91

Figura 3.21 – Aplicação da ancoragem de manta com laço em U: (a) resina de nivelamento na interface entre o laminado e a manta; (b) sistema pronto para protensão	91
Figura 3.22 – Aumento da aderência do laminado; (a) aplicação da resina; (b) adição de areia	92
Figura 3.23 – Sistema de protensão com suporte de reação externo	92
Figura 3.24 – (a) superfície lixada; (b) exposição dos fios; (c) isolamento do extensômetro ..	94
Figura 3.25 – (a) solda do fio de transmissão; (b) isolamento dos fios com cabo preto; (c) proteção com fita de autofusão; (d) aplicação da massa plástica	94
Figura 3.26 – Regularização da superfície de concreto: (a) desgaste da superfície de concreto; (b) desgaste da superfície da massa plástica	95
Figura 3.27 – Aplicação dos extensômetros no concreto: (a) posicionamento dos extensômetros; (b) isolamento do conjunto; (c) emprego da massa plástica para fixação	96
Figura 3.28 – Instrumentação dos extensômetros das vigas reforçadas com laminados protendidos	96
Figura 3.29 – Aplicação dos extensômetros no laminado: (a) lixamento da superfície; (b) posicionamento do extensômetro; (c) isolamento dos fios; (d) proteção do conjunto	97
Figura 3.30 – Apoios para ensaio de flexão estática a quatro pontos: (a) apoio de primeira ordem; (b) apoio de segunda ordem	98
Figura 3.31 – Representação ilustrativa do ensaio de flexão estática a quatro pontos	98
Figura 3.32 – Configuração do ensaio de flexão estática a quatro pontos	99
Figura 3.33 – Distribuição de tensão da seção transversal da viga com PRF protendido	101
Figura 3.34 – Fluxograma de cálculo do momento resistente da seção das vigas com PRF protendido	104
Figura 4.1 – Carga x deslocamento para o Grupo 1 (VT)	109
Figura 4.2 – Deformações no aço durante o ensaio de flexão estática a quatro pontos para as vigas do grupo I (VT)	110
Figura 4.3 – Fissuras localizadas no centro do vão durante a ruptura das vigas testemunho ..	111
Figura 4.4 – Esmagamento a compressão do concreto das vigas testemunho	111
Figura 4.5 – Carga x deslocamento para o grupo 2 (VS)	112
Figura 4.6 – Deformação do aço, concreto e laminado para as vigas do grupo 2 (VS)	113
Figura 4.7 – Modo de falha da viga VS-1: descolamento do reforço	114
Figura 4.8 – Destacamento da cobertura de concreto juntamente com o laminado: (a) fissura inicial; (b) modo de falha	114

Figura 4.9 – Curva carga x deslocamento para as vigas do grupo 3 (VSU).....	115
Figura 4.10 – Deformações no aço, concreto e laminado para as vigas do grupo 3 (VSU)...	116
Figura 4.11 – Ruptura por deslocamento da cobertura de concreto da viga VSU-1: (a) fissura a 45°; (b) descolamento do laço em U de manta de carbono.....	117
Figura 4.12 – Descolamento da ancoragem de laço em U na ruptura da viga VSU-2: (a) fissura a 45°; (b) descolamento do laço em U de manta de carbono; (c) amplificação da fissura a 45°	118
Figura 4.13 – Curva carga x deslocamento para o grupo 4 (VPU)	119
Figura 4.14 – Deformações no aço, concreto e laminado para as vigas do grupo 4 (VPU)...	119
Figura 4.15 – Fissura de 45° em direção ao terço médio da viga após o sistema de ancoragem	120
Figura 4.16 – Modo de ruptura da viga VPU-1: deslizamento do laminado com descolamento do substrato de concreto	121
Figura 4.17 – Direcionamento lateral das fibras da ancoragem de laço em U	121
Figura 4.18 – Ruptura da seção transversal da viga VPU-2.....	122
Figura 4.19 – Deslizamento do laminado do sistema de ancoragem da viga VPU-2.....	122
Figura 4.20 – Curva carga x deslocamento de todos os grupos	122
Figura 4.21 – Monitoramento da célula de carga da viga protendida 1 (VPU-1)	125
Figura 4.22 – Deformações no laminado durante a protensão da viga VPU-1	126
Figura 4.23 – Monitoramento da célula de carga da viga protendida 2 (VPU-2)	127
Figura 4.24 – Deformações no laminado durante a protensão da viga VPU-2	128
Figura A.1 – Modelagem computacional da viga testemunho	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Fator de redução ambiental das propriedades iniciais dos PRF	43
Tabela 3.1 – Nomenclatura e classificação das vigas	77
Tabela 3.2 – Traço teórico e executado na concretagem	79
Tabela 3.3 – Resistência média a compressão do concreto	80
Tabela 3.4 – Módulo de elasticidade do concreto	80
Tabela 3.5 – Propriedades mecânicas do laminado de PRFC	81
Tabela 3.6 – Características e propriedades da manta de fibra de carbono	81
Tabela 4.1 – Dados do dimensionamento para o reforço com PRFC simplesmente aderido	107
Tabela 4.2 – Momento último da seção de acordo com previsões analíticas	107
Tabela 4.3 – Momento e carga de fissuração de acordo com análise teórica	108
Tabela 4.4 – Carga e Momento de Fissuração	109
Tabela 4.5 – Carga e momento último dos grupos estudados	123
Tabela 4.6 – Análise estatística	124
Tabela 4.7 – Índice de ductilidade energética de flecha	125
Tabela 4.8 – Nível e perda de protensão associado ao sistema de protensão contra suporte externo	129
Tabela 4.9 – Comparação entre carga de fissuração teórica e experimental	129
Tabela 4.10 – Comparação entre carga e momento último teórico e experimental	130
Tabela A.1 – Dados para cálculo da verificação do laminado de CFRP	147
Tabela B.1 – Dados para cálculo da verificação do laminado protendido de CFRP	150

LISTA DE SIGLAS

ABNT/CEE - Associação Brasileira de Normas Técnicas/Comissão de Estudo Especial

ACI – *American Concrete Institute*

AFRP – *Aramid Fiber Reinforced Polymer*

CFRP – *Carbon Fiber Reinforced Polymer*

CNR – *National Research Council*

EBR – *Externally Bonded Reinforcement*

EBRIG – *Externally Bonded Reinforcement In Groves*

EBROG – *Externally Bonded Reinforcement On Groves*

EMPA – *Swiss Federal Materials Testing and Research Laboratories*

FIB – *Fédération Internationale du Béton*

FRP – *Fiber Reinforced Polymer*

GFRP – *Glass Fiber Reinforced Polymer*

LEME – Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais

LVDT – *Linear Variation Displacement Transducer*

NSM – *Near-Surface Mounted*

PRF – Polímero reforçado com fibras

PRFA – Polímeros Reforçados com Fibras de Aramida

PRFC – Polímero Reforçado com Fibras de Carbono

PRFV – Polímeros Reforçados com Fibras de Vidro

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

i. LETRAS MAIÚSCULAS DO ALFABETO ROMANO

A : área da seção transversal da viga

A_{ct} : Área transformada efetiva da seção transversal do concreto

A_f : Área do reforço de PRF

A_s : Área da armadura de tração

C_E : Fator de redução externo conforme ambiente de exposição do PRF

E_c : Módulo de elasticidade do concreto

E_f : Módulo de elasticidade do PRF

E_s : Módulo de elasticidade do aço

F_c : Resultante de forças à compressão do concreto

F_{fe} : Resultante de forças à tração do reforço

F_s : Resultante de forças à tração do aço

I_{cr} : Momento de inércia da seção fissurada

I_{eq} : Momento de inércia equivalente

I_{eqm} : Momento de inércia equivalente modificado

I_g : Momento de inércia que considera a seção não fissurada

L : Comprimento do laminado entre as fixações

L_v : Vão da viga

M_a : Momento referente a qualquer carga aplicada

M_{cr} : Momento de fissuração

M_n : Momento resistente da seção

M_o : Momento de descompressão

M_u : Momento resistente de cálculo da seção

P : Carga aplicada na viga em um dos pontos no ensaio de flexão estática

P_p : Força aplicada ao PRF após a introdução das perdas de pré-esforço

T_g : Temperatura de transição vítrea do PRF

ii. LETRAS MINÚSCULAS DO ALFABETO ROMANO

a : Vão até o carregamento

b : Largura da viga

c : Distância da face de compressão do concreto até a linha neutra

c_b : Distância da fibra comprimida de concreto até a linha neutra no modo de falha equilibrado

d : Distância da face comprimida do concreto até o centro da armadura de tração

d_f : Distância até o reforço tomando como referência a seção comprimida de concreto

d' : Distância da face comprimida do concreto até o centro da armadura de compressão

e_f : Distância do PRF ao eixo neutro da seção bruta

f_{fu}^* : Tensão de tração última do PRF fornecida pelo fabricante

f'_c : Resistência característica à compressão do concreto

f_A : Perda de tensão derivada dos dispositivos de ancoragem

f_R : Perda por relaxamento do PRFC

$f_{f,s}$: Tensão no reforço sob cargas de serviço

f_{fe} : Tensão efetiva no reforço

f_{fi} : Tensão inicial imposta ao laminado

f_{fu} : Tensão de tração última do PRF

f_{pi} : Tensão na fibra inferior devido à protensão

$f_{s,s}$: Tensão no aço sob cargas de serviço

f_s : Tensões no aço

f_{yd} : Tensão de escoamento do aço

h : Altura da viga

n : Número de camadas do reforço

n'_s : Relação entre os módulos de elasticidade do aço de compressão e o concreto

n_f : Relação entre o módulo de elasticidade do PRF e o concreto

n_s : Relação entre os módulos de elasticidade do aço de tração e o concreto

t_f : Espessura da camada de PRF

x_g : Distância da fibra superior até o eixo neutro após a introdução da força de pré-esforço

iii. LETRAS GREGAS MINÚSCULAS

ε_{fu}^* : Deformação última do PRF fornecida pelo fabricante

Δ_a : Deslizamento de ancoragem

ΔM_{cr} : Aumento do momento de fissuração

ΔM_u : Aumento do momento último

ΔM_y : Aumento do momento de escoamento

Ψ_f : Fator de redução de resistência

α_1 : Multiplicador para determinar a distribuição de tensão retangular equivalente

β_1 : Profundidade do bloco retangular de tensões

ε_{bi} : Deformação pré-existente no concreto antes da instalação do reforço devido as cargas atuantes

ε_c : Deformação no concreto

ε'_c : Deformação máxima no concreto

ε_{cu} : Deformação última do concreto

ε_{fc} : Deformação de descompressão

ε_{fd} : Deformação máxima permitida ao PRF para evitar o descolamento

ε_{fe} : Deformação efetiva no reforço

ε_{fp} : Deformação gerada ao PRF devido a protensão

ε_{ft} : Deformação total no laminado de PRF

ε_{fu} : Deformação última do PRF

ε_s : Deformação no aço,

ε_{sy} : Deformação correspondente à resistência ao escoamento do aço

ε_t : Deformação de tração líquida no aço

$\xi_{cf,b}$: Altura de compressão relativa no modo de ruptura balanceado

σ_{cg} : Tensão no concreto devido à carga permanente mobilizada pela protensão ou simultaneamente aplicada com a protensão

σ_{cp} : Tensão inicial no concreto no centro de gravidade da protensão devido a protensão de n laminados

ψ_{cr} : Fator de redução da tensão na fibra inferior devido à protensão

$\Delta\sigma_f$: Variação da perda de tensão

$\Delta\varepsilon_{fc}$: Incremento de deformação no PRF

ξ : Altura de compressão relativa para qualquer modo de falha

ϕ : Fator de redução do momento resistente

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	21
1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	23
1.2 LIMITAÇÕES.....	24
1.3 DELINEAMENTO DA PESQUISA.....	25
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	26
2 MATERIAL COMPÓSITO: POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS (PRF)..	28
2.1 HISTÓRICO DOS SISTEMAS DE RECUPERAÇÃO COM PRF.....	28
2.2 COMPONENTES DOS POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS.....	30
2.2.1 Matriz.....	31
2.2.2 Fibras.....	31
2.3 PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS.....	33
2.3.1 Propriedades mecânicas: módulo de elasticidade, resistência à tração e compressão.....	33
2.3.2 Propriedades físicas e térmicas: densidade, resistência ao calor e coeficiente de dilatação térmica.....	34
2.4 ELEMENTOS REFORÇADOS COM PRF.....	35
2.4.1 Reforço à flexão de vigas de concreto armado: EBR.....	35
2.4.2 Técnicas alternativas de aderência aumentada: NSM, EBRIG, EBROG.....	38
2.4.3 Dimensionamento à flexão de elementos reforçados com PRF segundo a ACI 440.2R-17.....	41
2.5 PROTENSÃO DOS LAMINADOS DE POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS.....	48
2.5.1 Técnicas de protensão de laminados de PRFC.....	51
2.5.1.1 Pré-esforço através de sistemas com vigas curvadas.....	52
2.5.1.2 Pré-esforço contra sistema externo independente (Sistemas pré-tensionados).....	54
2.5.1.3 Pré esforço contra o próprio elemento a ser reforçado (Sistema pós-tensionado).....	58

2.5.2	Sistemas de ancoragem.....	65
2.5.2.1	Ancoragens Metálicas.....	66
2.5.2.2	Ancoragens não metálicas	67
2.5.3	Nível de pré-esforço	72
2.5.4	Perdas de pré-esforço	73
3	METODOLOGIA DE PESQUISA	77
3.1	CARACTERÍSTICAS DA PESQUISA E MATERIAIS	77
3.1.1	Caracterização das vigas	77
3.1.2	Materiais.....	78
3.1.2.1	Concreto.....	78
3.1.2.2	Laminados de PRFC	80
3.1.2.3	Manta de fibra de carbono	81
3.2	SISTEMAS DE REFORÇO SIMPLESMETE ADERIDOS (EBR).....	82
3.3	SISTEMAS DE REFORÇO COM LAMINADOS DE PRFC PROTENDIDOS	87
3.3.1	Sistema de protensão	88
3.3.2	Aplicação da protensão em vigas de concreto armado.....	91
3.4	INSTRUMENTAÇÃO	93
3.4.1	Instrumentação no Aço	93
3.4.2	Instrumentação no concreto	95
3.4.3	Instrumentação dos laminados de PRFC	96
3.5	ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA A QUATRO PONTOS	97
3.6	ABORDAGEM ANALÍTICA DO MOMENTO DE FISSURAÇÃO E RESISTÊNCIA ÚLTIMA DAS VIGAS PROTENDIDAS.....	99
3.6.1.1	Momento de fissuração	100
3.6.1.2	Momento de resistência última	101
3.7	DUCTILIDADE.....	104
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	106
4.1	Análise teórica da capacidade resistente das seções.....	106

4.2 ANÁLISE EXPERIMENTAL	108
4.2.1 Carga e Momento de fissuração	108
4.2.2 Capacidade resistente das seções.....	109
4.2.3 Ductilidade.....	124
4.2.4 Sistema de protensão	125
4.3 ANÁLISE TEÓRICA-EXPERIMENTAL.....	129
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	131
5.1 CONCLUSÕES.....	131
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	133
REFERÊNCIAS	134
Apêndice A – Modelagem computacional das vigas testemunho	145
Apêndice B – Verificação do sistema de reforço de acordo com ACI 440-2R (ACI, 2017)	147
Apêndice C – Verificação do momento último das vigas protendidas de acordo com metodologia analítica expressa em 3.6.1.2.....	150

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de construções rápidas após a Segunda Guerra Mundial levou ao aprimoramento de técnicas e a composição de tecnologias envolvendo o concreto armado. Desde então, esse compósito, tem se tornado o principal material construtivo de edificações e obras de arte especiais, tornando a durabilidade dessas estruturas um assunto relevante, principalmente no que diz respeito a elaboração de normas e recomendações técnicas, com o intuito de aumentar a vida útil das estruturas realizadas com esse material. Segundo a NBR 15575 (ABNT, 2013), a durabilidade de estruturas de concreto armado corresponde à capacidade da mesma em desempenhar as funções as quais foram especificadas mediante seu uso ao longo tempo, com as manutenções e os procedimentos indicados para determinada finalidade.

As estruturas em concreto armado se caracterizam duráveis quando comparadas aos demais materiais utilizados para a mesma finalidade, sobretudo quando essa contém as manutenções necessárias para manter o seu desempenho. Porém, esse material possui limitações relativas às deteriorações ocasionadas por agentes agressivos, principalmente no que tange à exposição a intempéries. A NBR 6118 (ABNT, 2014) difere do conceito inicialmente mencionado por abordar que a durabilidade é a capacidade que a estrutura deve possuir de resistir aos efeitos ambientais previstos no projeto.

Mediante à exposição ao ambiente, ações decorrentes de processos químicos, físicos e biológicos, mudanças nas cargas estruturais de utilização, erros de execução e projeto e alterações normativas levam à necessidade de intervenções estruturais para recuperar, reparar ou reforçar os elementos prejudicados, onde podem ser empregadas diferentes técnicas. Os métodos mais empregados para recuperação estrutural são o encamisamento com graute e concreto, reforço com uso de perfis metálicos ou chapas de aço, protensão externa e os polímeros reforçados com fibras (PRF) ou em inglês *fyber reinforced polymer* (FRP) (SOUZA; RIPPER, 1998).

Esses materiais compósitos são constituídos por fibras envolvidas em uma matriz polimérica, cuja técnica mais utilizada para aplicação do reforço é a colagem externa de laminados ou mantas com adesivos/resina à estrutura após tratamento superficial, conhecida como sistema EBR (*Externally Bonded Reinforcement*) (SOARES, 2017). Apesar do aumento da resistência mecânica devido à utilização desse sistema, a falha encontra-se na fragilidade da ruptura do

material, devido ao fato de as fibras possuírem essa propriedade, além de ocorrer o descolamento prematuro antes de atingir a força ou a ductilidade esperada (LIU; OEHLERS; SERACINO, 2007; NGUYEN; CHAN; CHEONG, 2001).

De acordo com estudos realizados por Motavalli et al. (2011) as estruturas reforçadas com o compósito utilizam apenas 20 a 30% da capacidade de resistência do polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) quando ligados externamente, seja em flexão ou cisalhamento, indicando que a falha do sistema acontece prematuramente, seja ela por deslocamento, ou ruptura. Nessa perspectiva, tem-se desenvolvido a protensão desse compósito, para o melhor aproveitamento da eficácia à tração do polímero reforçado com fibras (PRF).

A protensão do PRFC alia a contribuição do reforço passivo do EBR, com as vantagens da aplicação de um sistema pré-esforçado às estruturas, aumentando a capacidade mecânica, retardando o aparecimento de fissuras, bem como a abertura dessas e reduzindo a deflexão em vigas (MICHELS et al., 2013). No entanto, a alta concentração de tensões e gradientes de corte nas extremidades de contato entre o laminado e o concreto ocasionam o descolamento prematuro do compósito, tendo como necessidade o uso de ancoragens para evitar essa falha, de modo a transferir as forças do sistema EBR para o concreto (SIWOWSKI et al., 2020; SENA-CRUZ et al., 2018).

Os sistemas de protensão com laminados de PRF estão sendo amplamente estudados desde o final da década de 80 e início da década de 90, e tem como preceito inicial o método de protensão. Vários sistemas foram propostos, podendo ser divididos em três categorias principais: sistemas de pré-esforço curvados, pré-esforço contra um suporte externo e pré-esforço contra o próprio elemento reforçado (CORREIA, 2018; RASHID et al., 2019; MOSHIRI et al., 2020). Ambos os sistemas levam em consideração o nível de pré-esforço e, segundo Rashid et al. (2019), estudos foram realizados com níveis de zero até 80% da resistência à tração do laminado. No entanto, de acordo com o normativo ACI 440.2R-17 (ACI, 2017) a limitação da resistência à tração do laminado de PRFC deve ser 55%, de modo a evitar rupturas devido à fluência.

No Brasil, os estudos envolvendo a protensão de laminados de PRF são limitados, mais ainda no que tange aos efeitos das ancoragens na resistência do sistema. Escobar (2003) estudou o desempenho a solicitações normais de vigas de concreto armado reforçadas com PRFC protendidos, comparando os resultados obtidos experimentalmente com os resultados obtidos através de um modelo analítico de cálculo. Mais tarde, em 2007, o estudo realizado por Garcez

(2007) na UFRGS, iniciou o conceito de empregar o PRFC protendido na universidade, analisando a eficiência da técnica de protensão com sistema de ancoragem gradual, através de ensaios estáticos e cíclicos. Recentemente, Silva (2018), elaborou a protensão em laminados inseridos em ranhuras longitudinais, com a técnica NSM (*Near-Surface Mounted*), em vigas de concreto armado, comparando a técnica EBR, NSM, e NSM protendido.

No país ainda não existem normas para dimensionamento e diretrizes de projeto de estruturas reforçadas externamente com Polímeros Reforçado com fibras, ou PRF protendido. No entanto, análises estão sendo realizadas pela Comissão de Estudo Especial de Materiais Não Convencionais para Reforço de Estruturas de Concreto - ABNT/CEE-193, tendo como objetivo obter terminologias, desempenhos, requisitos, procedimentos e métodos de ensaio que envolvam reforços externos ou internos com materiais não convencionais, manifestando a necessidade e importância de evolução dessa técnica de reforço que envolve o estudo de diversos parâmetros e variáveis significativas para o uso em estruturas.

Portanto, embora os resultados experimentais anteriores em vigas reforçadas com PRF protendidos sejam úteis para entender o desempenho mecânico estático e cíclico das vigas, é necessário um estudo mais aprofundado do comportamento de vigas de concreto armado reforçadas com essa técnica, principalmente com relação aos efeitos do sistema de ancoragem. Nesse sentido, o presente estudo busca desenvolver um sistema de protensão pré-esforçado contra suporte externo de modo a promover a compatibilização de tensões na interface de contato do laminado de Polímero Reforçado com Fibras de Carbono e o concreto através de um sistema de ancoragem não metálico, comparando os resultados em termos de resistência mecânica, modo de ruptura, carga de fissuração e deflexão, além da obtenção de aspectos sobre as perdas de protensão, capacidade dos sistemas envolvidos e suas respectivas falhas.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo principal dessa pesquisa é a análise teórico-experimental de vigas reforçadas com laminados de Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono (PRFC) sem e com protensão através de um sistema de pré-esforço contra suporte externo, utilizando um sistema de ancoragem não metálico, de modo a obter uma comparação entre as resistências mecânicas proporcionadas pela protensão.

Além disso, pretende-se dar continuidade aos estudos iniciados em 2007 na UFRGS, utilizando a protensão de laminados como método de reforço de estruturas convencionais, objetivando

uma melhoria e atualização no sistema de recuperação estrutural, de modo a contribuir com pesquisas nacionais, que são até então limitadas.

O trabalho também tem como objetivos secundários:

- a) avaliação do comportamento de desempenho mecânico das vigas de concreto armado por meio de ensaios estáticos, comparando os resultados com vigas testemunho sem nenhum reforço, com vigas simplesmente reforçadas e com vigas reforçadas com laminados de PRFC protendidos;
- b) comparação dos resultados experimentais obtidos com soluções analíticas, através de diretrizes normativas e a mecânica tradicional, em termos de carga última e carga de fissuração das vigas estudadas;
- c) análises das deformações durante o pré-esforço e ensaio estático de flexão das vigas protendidas através de extensômetros;
- d) avaliação da evolução de fissuras das vigas de concreto armado em todos os sistemas de reforço, objetivando a comparação da ductilidade;
- e) análise da resistência do sistema de reforço, bem como sua aderência na interface concreto e laminado e interferência no sistema de protensão, comparando as vantagens e desvantagens mediante esse item; e
- f) verificação das perdas de protensão ocasionadas devido ao corte do laminado no sistema de pré-esforço contra suporte externo.

1.2 LIMITAÇÕES

As limitações da pesquisa levam em consideração o ensaio experimental, bem como as orientações pertinentes ao estudo, tendo como base as recomendações dos instrumentos de laboratório, sendo elencados a seguir:

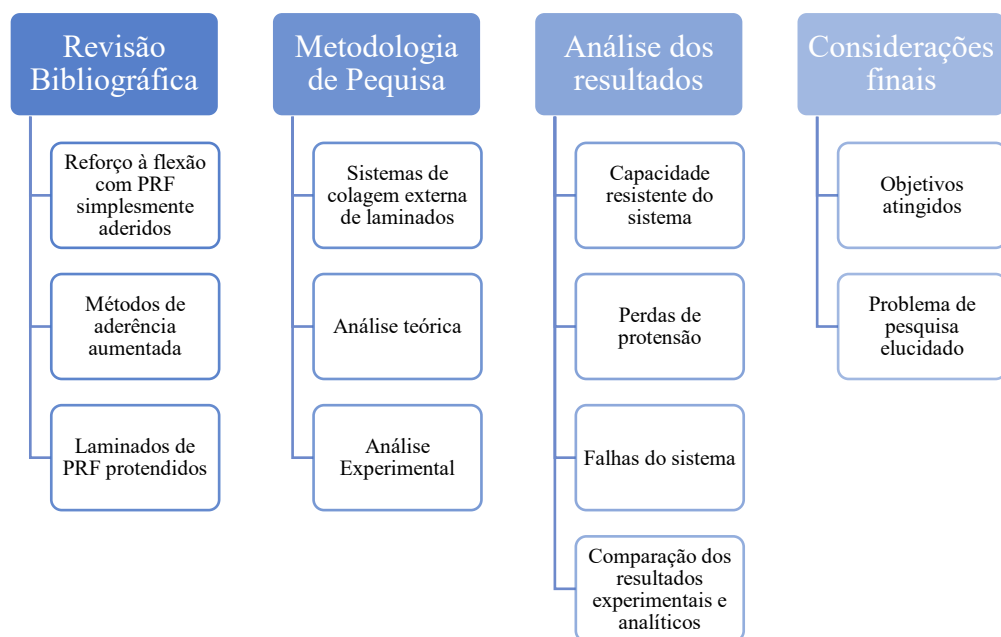
- a) a utilização de uma única resistência característica média a compressão do concreto, adotado em todas as vigas igual a 25 MPa;
- b) a definição de apenas uma seção transversal para todas as vigas estudadas de 12x20 cm com comprimento longitudinal de 150 cm;

- c) a armadura de aço se mantém constante em todas as espécies estudadas, sendo calculadas de acordo com o Domínio II de deformação imposto pela NBR 6118 (ABNT, 2014);
- d) a utilização de apenas um laminado em cada viga, com dimensões de 50 mm de largura, por 1,4 mm de espessura com comprimento de 130 cm;
- e) o estudo de apenas um sistema não metálico de ancoragem, formado de manta de fibra de carbono em formato de laço em U;
- f) a utilização de um único sistema de protensão contra suporte externo, empregando apenas um nível de pré-esforço, sendo esse de aproximadamente 4,10% da capacidade de resistência à tração do laminado de PRFC, sem considerar as perdas da protensão, conforme referenciado no item 2.5.2; e
- h) o desempenho mecânico foi medido levando em consideração apenas os resultados do ensaio de flexão estática a quatro pontos.

1.3 DELINEAMENTO DA PESQUISA

As etapas para elaboração e andamento da pesquisa, incluindo os aspectos pertinentes a cada item são representadas ilustrativamente na Figura 1.1.

Figura 1.1 – Ilustração esquemática da pesquisa



(fonte: elaborada pela autora)

A primeira etapa da pesquisa foi a revisão bibliográfica, incluindo aspectos sobre os possíveis sistemas de reforço estrutural com polímeros reforçados com fibras. Na sequência, as variáveis da pesquisa foram selecionadas e os grupos definidos na metodologia de pesquisa. Posteriormente à etapa experimental ser concluída, a análise dos resultados foi realizada em termos de capacidade resistente dos sistemas, perdas de protensão, deformações, modo de falha das seções e comparações entre os resultados obtidos experimentalmente e analiticamente. Por fim, as considerações finais foram desenvolvidas de modo a verificar os objetivos propostos e atingidos, e a resolução do problema de pesquisa.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A dissertação foi dividida inicialmente em 5 capítulos. No presente capítulo é apresentada uma introdução sobre a temática da pesquisa, bem como a problemática elucidada e os objetivos a serem atingidos. Além disso, também é exposto um breve resumo das etapas para o andamento da dissertação.

No segundo capítulo é abordada a revisão bibliográfica pertinente ao tema, contendo um breve histórico do reforço de PRF, a composição do conjunto, características físicas e mecânicas do compósito, abrangência do sistema de aderência externa e modo de aplicação. Além disso é discorrido sobre alguns métodos de reforço com PRF através de ranhuras na superfície, caracterizando uma aderência aumentada. Ainda, no capítulo 2, é apresentada a protensão de Polímeros Reforçados com Fibras, considerando o histórico de aplicação do sistema, métodos de protensão, seus níveis de pré-esforço comumente estudados, perdas de pré-esforço esperadas e sistemas de ancoragem. O procedimento de dimensionamento de reforço com PRF segundo a norma ACI 440.2R-17 (ACI, 2017) também é apresentado nesse capítulo.

A metodologia de pesquisa é abordada no capítulo 3, onde são apresentadas as dimensões geométricas da viga, dimensionamento da armadura de tração e do reforço e detalhamento dos quatro grupos a serem estudados, bem como os ensaios a serem realizados e a instrumentação das vigas. O método analítico de cálculo de momento último e carga de fissuração das vigas protendidas também são apresentados nesse capítulo.

O quarto capítulo compreende os resultados da pesquisa em termos de capacidade resistente das seções estudadas, estudo dos modos de ruptura, comparações entre modelos analíticos e experimentais e o comportamento do sistema de protensão, considerando a carga e as

deformações durante a aplicação da tensão, bem como as perdas de protensão associada ao sistema.

E por fim, o capítulo cinco apresenta as considerações finais sobre o trabalho com comparações com os objetivos abrangidos durante a presente dissertação, bem como sugestões para trabalhos futuros.

2 MATERIAL COMPÓSITO: POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS (PRF)

Nesse capítulo, será apresentado um breve histórico dos sistemas compósitos utilizando polímeros reforçados com fibras, juntamente com a descrição dos componentes empregados bem como suas propriedades físicas, mecânicas e químicas. Também será apontado o embasamento sobre as técnicas e métodos de aplicação do reforço, tal como suas principais diretrizes técnicas com base em recomendações normativas.

2.1 HISTÓRICO DOS SISTEMAS DE RECUPERAÇÃO COM PRF

As aplicações envolvendo os compósitos de polímeros reforçados com fibras se desenvolveram principalmente na década de 60 e 70, onde eram empregados sobretudo nas indústrias navais e automobilísticas, bem como em equipamentos esportivos e armamentos (BEBER, 2003; BAKIS et al., 2002). Na indústria da construção civil, os primeiros esforços para o uso desse compósito em elementos estruturais se sucederam da década de 80, na Suíça, mais precisamente pelos pesquisadores do laboratório EMPA (*Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research*), onde estudos foram realizados, buscando a substituição de chapas de aço como elemento de reforço pelo polímero reforçado com fibras (GARCEZ, 2007).

Meier (1987) estudou o PRF como elemento de reforço de vigas reforçadas com laminados, obtendo incrementos na capacidade de carga em torno de 30%. Em 1988, o mesmo autor publicou estudos comparando os custos de aplicação do compósito em relação à chapas de aço, resultando em economia relacionada ao uso de andaimes em recuperação de pontes.

Segundo Meier (1996) o primeiro reforço utilizando laminados de polímeros reforçados com fibras de vidro (PRFV) foi realizado na Alemanha em 1987, na ponte Kattenbusch. A ponte era formada de vigas caixão com comprimento total de 478 m, composta de nove vãos e dez juntas que apresentavam rachaduras devido aos aumentos das tensões de fadiga (CZADERSKI; MEIER, 2018). As juntas receberam o reforço de laminados de PRFC com 20 placas de 3200 mm de comprimento, 150 mm de largura e 30 mm de espessura, tendo sua eficácia comprovada, reduzindo a largura das fendas em 50% e diminuindo a amplitude de tensão devido à fadiga em 36% (MEIER, 1996). Detalhes sobre a aplicação dos laminados podem ser observados na Figura 2.1 a seguir.

Figura 2.1 – Laminados de PRFV da ponte Kattenbusch na Alemanha durante a aplicação



(fonte: CZADERSKI; MEIER, 2018)

A primeira construção a receber laminados de polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC) foi a ponte Ibach em Lucerna na Suíça, em 1991. Ela foi construída em 1969 e apresentou danos nos cabos de protensão externa após uma manutenção para instalação de novos sinais de tráfego, onde os cabos acabaram sendo danificados. O reforço foi realizado com três tiras de PRFC de 5 m de comprimento. O resultado do reforço foi satisfatório após um teste com veículo de carga, demonstrando a eficiência do sistema aplicado, que apesar do alto custo inicial ainda se mostrou aceitável principalmente quando comparado ao aço, onde seria necessário 175 kg para a reparação, enquanto foram utilizados 6,2 kg de PRFC (MEIER, 1995, 2000). A Figura 2.2 abaixo, apresenta a disposição dos laminados aplicados na ponte, onde dois desses foram pintados por razões estéticas. Em 2008, uma inspeção realizada constatou que os laminados se apresentavam em perfeitas condições (CZADERSKI; MEIER, 2018).

Figura 2.2 – Reforço com laminados de PRFC na ponte de Ibach na Suíça

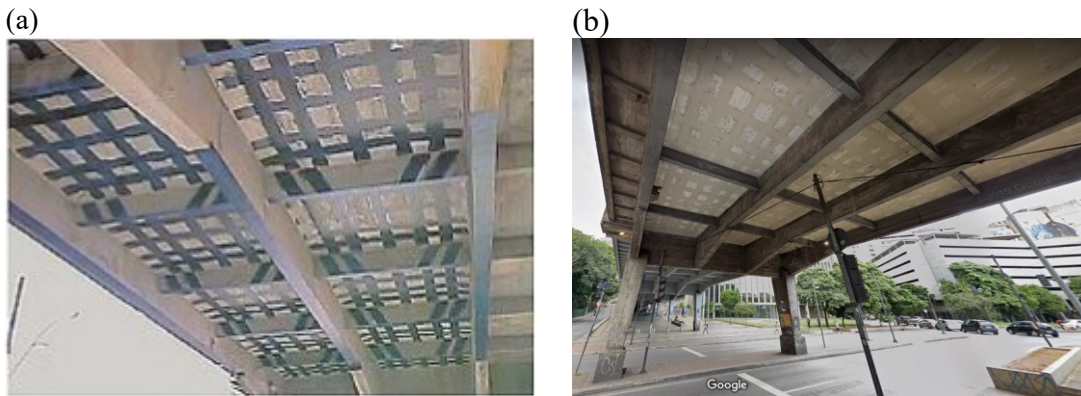


(fonte: CZADERSKI; MEIER, 2018)

No Brasil, a primeira obra reforçada com fibra de carbono foi o Viaduto Santa Teresa, em Belo Horizonte no ano de 1998, onde a carga máxima permitida na ponte havia sido sobrecarregada devido à nova classe rodoviária exigida, sendo necessárias aplicações do sistema de PRFC em todas as lajes e vigas principais (ARQUEZ, 2010), conforme pode ser observado na Figura 2.3

(a), que demonstra a recuperação em 1998, e a Figura 2.3 (b), que mostra a situação do reforço em 2019.

Figura 2.3 – (a) Aplicação do PRFC em 1998 no Viaduto Santa Teresa; (b) Atual reforço no viaduto Santa Teresa em 2020



(fonte: (a) ARQUEZ, 2010; (b) GOOGLE EARTH, 2019)

2.2 COMPONENTES DOS POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS

O sistema tem sido amplamente utilizado devido às suas vantagens, principalmente aliadas a facilidade de aplicação do reforço, a proteção à corrosão, simplicidade no manuseio sem aparelhos específicos, permitindo o aumento da resistência à flexão e a redução de deflexões e rachaduras (MEIER, 2000). Segundo Machado e Machado (2015), os sistemas de polímeros reforçados com fibras podem ser produzidos por até três sistemas diferentes: sistemas pré-curados, sistemas pré-impregnados e sistemas aplicados por via úmida. Os sistemas pré-curados são fabricados por pultrusão ou laminação, sendo diretamente aplicados no elemento a ser reforçado. Os sistemas pré-impregnados são compostos por fibra ou tecido pré-impregnado com resina polimérica e aderidos com posterior uso adicional de resina. O último processo compreende tecidos ou mantas impregnados com resina no local do reforço, antes e posteriormente à aplicação.

Atualmente, os polímeros reforçados com fibras podem ser encontrados no mercado mundial de distintas formas, como por exemplo barras pultrudadas, tecidos, laminados, mantas pré-impregnadas e cordões, compreendendo processos de produção anteriormente descritos.

As utilidades proporcionadas por esse compósito dependem de fatores correlacionados às interações entre os componentes, bem como concentrações, tamanhos, formas e direções dos materiais constituintes. A versatilidade desse elemento é promovida pelas inúmeras variáveis decorrentes do processo de composição. Cada material que constitui o compósito possui uma

propriedade específica que formam novas características quando atuando em conjunto. Nesse sentido, a resistência e a rigidez do polímero reforçado com fibras dependem do tipo de fibra utilizado, bem como sua matriz polimérica e a interação entre ambos os materiais (BEBER, 2003).

2.2.1 Matriz

As funções das matrizes são de proteger as fibras das ações de intempéries, bem como manter a homogeneidade do composto e permitir a transferência de tensões entre as fases. Segundo Amran et al. (2018), a escolha da matriz que irá compor o sistema se torna crucial, uma vez que essa interfere nas características mecânicas do compósito.

A resistência à tração específica e o módulo de elasticidade específico da matriz são importantes para determinar algumas características do compósito. O módulo de elasticidade do sistema pode ser obtido através da regra das misturas, determinado pela soma dos módulos de elasticidade da matriz e da fibra, multiplicado pelas suas respectivas porcentagens no sistema. Comumente, a porcentagem da matriz e das fibras são de 30% e 70%, respectivamente, e nesse caso o módulo de elasticidade da matriz não tem grande inferência nos resultados, já que os valores correspondentes à fibra são mais elevados (GARCEZ, 2007).

As resinas mais empregadas nos compósitos PRF são as termofixas epoxídicas, por apresentarem melhor propriedade mecânica e durabilidade, quando comparadas à poliéster por exemplo. Além disso, possuem alta adesividade e resistência, permitindo transmitir os esforços entre o sistema e o concreto de maneira eficaz (MENEGETTI, 2007).

2.2.2 Fibras

A principal função das fibras é transportar as cargas ao longo de seu comprimento, fornecendo força e rigidez ao sistema. Além disso, elas regem a capacidade do conjunto, dando ao compósito propriedade anisotrópica, baixo peso específico, amortecimento ao choque e isolamento eletromagnético, possuindo a vantagem de não apresentarem processos corrosivos, quando exposta a ambientes externos (JUVANDES, 1999).

As fibras podem ser dispostas em uma única direção (unidirecional, sendo transversalmente isotrópicas), duas direções (bidirecionais, tornando-se ortotrópicas) ou várias direções (tridimensionais ou aleatórias). Para reforços estruturais o mais comum é o uso de fibras

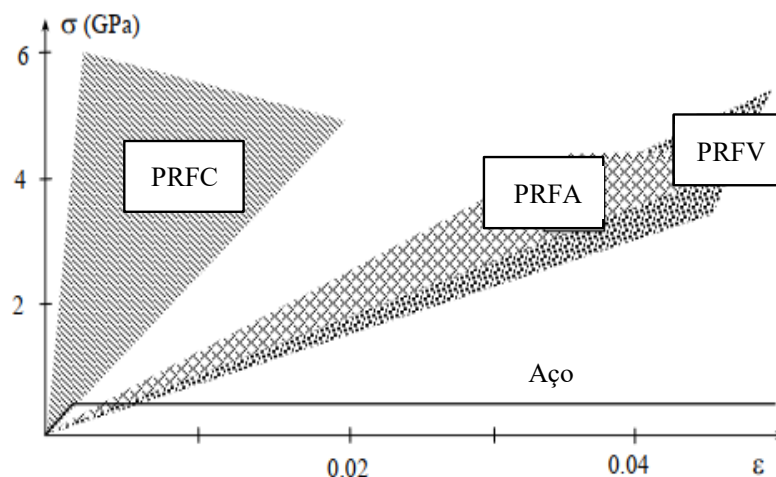
unidirecionais. As propriedades mecânicas em qualquer direção são proporcionais à quantidade de fibra por volume orientada respectivamente nessa direção (ACI, 2007).

As fibras sintéticas mais empregadas usualmente na engenharia civil são as fibras de carbono, vidro e aramida e denotam a nomenclatura frequente a seguir:

- a) polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC) em inglês, *carbon fiber reinforced Polymer (CFRP)*;
- b) polímeros reforçados com fibras de vidro (PRFV) em inglês, *glass fiber reinforced Polymer (GFRP)*; e
- c) polímeros reforçados com fibras de aramida (PRFA) em inglês, *aramid fiber reinforced Polymer (AFRP)*.

Na Figura 2.4, é ilustrado o comportamento tensão x deformação para todos os tipos de fibras nos compósitos de polímeros reforçados citados, juntamente com o aço, sob o carregamento monotônico de curto prazo, sendo importante mencionar que todas as fibras eram unidimensionais. É possível perceber o elevado módulo de elasticidade dos polímeros reforçados com fibras de carbono quando comparado aos demais, porém com baixa deformabilidade.

Figura 2.4 – Comparação tensão-deformação dos polímeros reforçados com fibras e o aço sob o ensaio uniaxial



(fonte: adaptada de FIB, 2001)

2.3 PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS

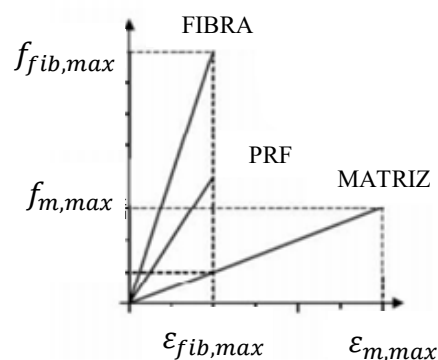
As propriedades dos polímeros reforçados com fibras são dependentes dos materiais que compõem esse sistema, as fibras e matrizes. Estas, são alteradas conforme quantidade percentual dos componentes, tipo e orientação da fibra, sua geometria e, também, com relação a composição da matriz (FIKRY et al., 2018).

Segundo Costa (2019), as propriedades mais importantes dos polímeros reforçados com fibras podem ser divididas em propriedades mecânicas (módulo de elasticidade e resistência à tração e compressão) e propriedades físicas e térmicas (densidade, resistência ao calor e coeficiente de dilatação térmica).

2.3.1 Propriedades mecânicas: módulo de elasticidade, resistência à tração e compressão

As fibras promovem alta rigidez ao sistema, enquanto a matriz realiza a compatibilidade de tensões entre as fases, nesse sentido a contribuição de cada uma das componentes em termos de carga x deflexão pode ser observada na Figura 2.5 abaixo. Como é possível perceber, a curva de PRF é linear e apresenta comportamento frágil, atingindo a ruptura na tensão máxima com baixa deformabilidade e com a mesma deformação das fibras. Além disso, o módulo de elasticidade do compósito é inferior ao observado para as fibras, visto que a matriz também está formando o sistema.

Figura 2.5 – Relação tensão-deformação entre a fibra, matriz e compósito PRF



(fonte: adaptada de SENA CRUZ et al., 2011)

Em aplicações estruturais de engenharia, as fibras devem ser dispostas unidirecionalmente ao longo de uma única direção, de modo que o material atinja os valores máximos de módulo de elasticidade e resistência (ACI, 2007; COSTA, 2019).

Segundo o ACI 440.2R-17 (ACI, 2017), a ligação de um sistema de PRF na face de tensão de um membro solicitado à flexão com fibras orientadas ao longo do comprimento irá proporcionar um aumento de resistência na flexão do elemento em virtude da capacidade de tração do compósito. Na falta da disposição de valores referentes aos módulos de elasticidade, resistência à tração e deformação última das fibras fornecidos pelos fabricantes de PRF podem ser utilizados os disponibilizados na Tabela 1 do Anexo A contido no ACI 440.2R-17 (ACI, 2017).

2.3.2 Propriedades físicas e térmicas: densidade, resistência ao calor e coeficiente de dilatação térmica

Segundo o ACI 440.2R-17 (ACI, 2017), a densidade dos polímeros reforçados com fibras pode variar entre 1,2 e 2,1 g/cm³, sendo o composto que contém fibras de vidro o que possui a maior densidade, e PRFC e PRFA com valores intermediários. Essa faixa de valores ainda se mantém 6 vezes menor que a densidade do aço, sendo considerada 7,9 g/cm³.

Os coeficientes de dilatação térmica dos PRF variam de acordo com o tipo de resina, de fibras, seu percentual e orientação dessas no compósito (CARNEIRO; TEIXEIRA, 2008). A Tabela 4.2.2 contida no ACI 440.2R-17 (ACI, 2017), demonstra os valores de coeficientes térmicos para as diferentes fibras presentes nos polímeros reforçados. No sentido paralelo às fibras os polímeros reforçados com aramida contraem com o aumento de temperatura, enquanto os compósitos de vidro dilatam, e os de carbono acabam tendo coeficiente quase nulo, ou negativo. No sentido transversal das fibras ambos os compósitos dilatam com o aumento da temperatura.

A resistência ao calor dos polímeros reforçados com fibras é governada pela temperatura de transição vítrea (T_g), cima desse T_g a estrutura molecular do compósito é alterada e o módulo de elasticidade é reduzido. Essa temperatura depende do tipo de resina utilizada, que geralmente se situa entre a faixa de 60 a 82°C (ACI, 2017). Nesse sentido, o uso de PRF em elementos estruturais se torna problemático, uma vez que a rigidez do compósito é alterada em temperaturas abaixo do que é esperado em um incêndio (CHOWDHURY et al., 2011) devido à mudança estrutural da resina que acaba deixando de ser dura e quebradiça para macia e plástica (CERNIAUSKAS et al., 2020; KODUR et al., 2007).

Segundo ACI 440.2R-17 (ACI, 2017), as fibras ainda podem suportar alguma capacidade de resistência na direção longitudinal mesmo após o T_g da resina ser atingido, isso porque as temperaturas suportadas pelas fibras são superiores, sendo 1000 °C para fibras de carbono, 275 °C para fibras de vidro e 175 °C para fibras de aramida.

2.4 ELEMENTOS REFORÇADOS COM PRF

Os polímeros reforçados com fibras são materiais versáteis e, devido às vantagens já citadas, podem ser aplicados em diferentes elementos estruturais, como reforço à flexão em vigas, lajes e paredes, reforço ao cisalhamento e confinamento de pilares e reservatórios.

Conforme citado no capítulo 1, a técnica mais aplicada atualmente com PRF para reforços à flexão é o sistema por colagem externa, conhecido internacionalmente como EBR (*Externally Bonded Reinforcement*), no qual diversos documentos técnicos e normativos foram desenvolvidos com o intuito de parametrizar procedimentos de dimensionamento e recomendações de projetos de estruturas com polímeros reforçados com fibras, alguns deles mais conhecidos são o ACI 440.2R-17 (ACI, 2017), FIB Bulletin 14 (FIB, 2001) e CNR - DT 200 R1 (CNR, 2013). Além desse método, outros sistemas que empregam entalhes longitudinais como método alternativo de aumento de aderência como NSM, EBRIG e EBROG têm sido estudados.

2.4.1 Reforço à flexão de vigas de concreto armado: EBR

Esse sistema de reforço envolve até duas técnicas de colagem, os sistemas úmidos ou curados *in loco*, e os sistemas pré-fabricados ou pré-curados (COSTA, 2019; KOTYNIA, 2019; SENA CRUZ et al., 2011). O primeiro refere-se à colagem de resina epóxi em mantas ou tecidos com cura no local do reforço, enquanto o segundo relaciona-se com laminados colados na superfície dos elementos a serem reforçados com adesivos de cura a frio (FIB, 2001; TENG et al., 2003).

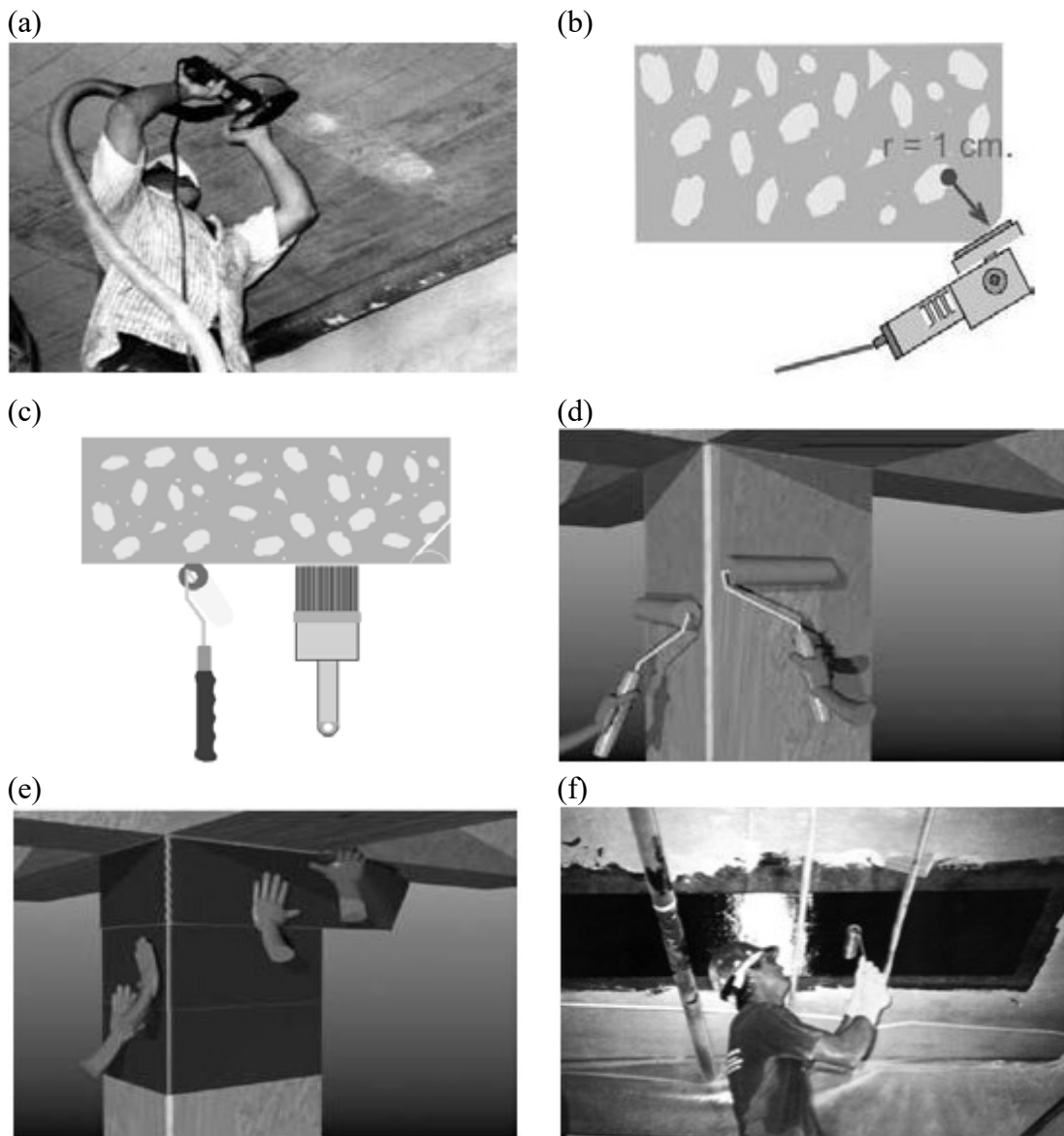
Segundo Mohammadi et al. (2015), os sistemas aplicados por via úmida são praticamente impossíveis de apresentar com exatidão o módulo de rigidez do compósito, devido à dificuldade de determinar com precisão o seu módulo de Young. Nestes casos, geralmente o fabricante fornece os valores por meio de testes laboratoriais, pois quando realizado o processo em campo, fatores como cura e defeitos provocados durante a aplicação do reforço podem influenciar significativamente nos resultados.

Para permitir aderência entre o substrato e lâmina ou manta de PRF, são necessários alguns procedimentos básicos. Inicialmente, deve ser efetuada a limpeza e preparação da superfície através de materiais abrasivos ou jato de areia (Figura 2.6 (a)), regularização dessa e dos cantos (Figura 2.6 (b)), permitindo maior aderência do sistema compósito ao concreto. Posteriormente, deve ser realizado o corte, limpeza e imprimação do PRF com sua respectiva aplicação (Figura 2.6 (d);(e);(f)). Ainda, dependendo da técnica utilizada, podem ser incluídas algumas etapas

(ORLANDO, 2019). Por fim, deve-se inspecionar o reforço visualmente ou por meio de ensaios não destrutivos, de modo a realizar controle de qualidade.

Segundo Cauich et al. (2019), o reforço deve ser aplicado no sentido longitudinal e paralelo às tensões de tração. Se as fibras forem necessariamente montadas na direção perpendicular das fissuras, o reforço tem um bom aproveitamento do aumento da rigidez e resistência proporcionada, diferentemente do que pode ser encontrado na disposição das fibras obliquamente às fissuras em um sistema de recuperação estrutural. Ainda, de acordo com os mesmos autores, um percentual de aumento de até 200% pode ser obtido na resistência mecânica de vigas de concreto armado reforçadas com PRFC.

Figura 2.6 – Etapas para aplicação de sistemas com polímeros reforçados com fibras



(fonte: MACHADO, 2006)

Outro cuidado importante durante a aplicação do reforço é com relação ao estado de conservação da superfície de concreto, que deve estar íntegra e sem corrosões aparentes na armadura. Caso necessário, reparos devem ser efetuados de modo a evitar o contato do PRF com o substrato danificado. Segundo o ACI 440.2R-17 (ACI, 2017), a superfície de aderência concreto/PRF deve possuir condições de resistência de tração e cisalhamento suficientes para transferência de tensões para o compósito. A resistência mínima indicada pela norma deve ser de 1,4 e 17 MPa de resistência à tração e compressão característica do concreto, respectivamente.

O uso do sistema de reforço externo indica incrementos na capacidade de resistência final das vigas de concreto armado reforçadas à flexão, bem como ganhos na rigidez e redução da largura de fissuras (YANG et al., 2003; CHAGES et al., 1994; KACHLAKEV; McCURRY, 2000; DALFRÉ et al., 2021). Acréscimos na resistência também foram observados em reforços com o sistema EBR na região de tensão cisalhante (BELARBI et al., 2012; BAGGIO et al., 2014; DIAS et al., 2021; LEE et al., 2017; BOROWSKI, 2018). Estudos envolvendo a torção de elementos reforçados com PRF também indicaram aumento de torque final, comprovado numericamente (AMELI et al., 2007; CHALIORIS, 2007).

Estudo realizado por Toutanji et al. (2006) com vigas de concreto armado reforçadas com tecidos de fibra de carbono, considerando como variáveis a quantidade de camadas, indicaram que a adição de três, quatro, cinco e seis camadas de PRFC aumentou o momento final das vigas em 42,6%, 49,2%, 67,8% e 70,2%, respectivamente, em comparação com a viga de controle, porém com menor ductilidade que essa. Outro importante ponto observado foi que o modo de ruptura das vigas com até quatro camadas de reforço foi de falha no PRFC, enquanto que, para as outras variáveis de camadas estudadas, a ruptura ocorreu pela delaminação do compósito da superfície de concreto, indicando um enfraquecimento na aderência entre o concreto e o reforço quando são aplicadas mais de quatro camadas.

A variação no comprimento do reforço em vigas de concreto armado pré-carregadas reforçadas à flexão com laminados de PRFC foi pesquisada por Obaidat et al. (2011). Os autores destacam que quanto maior o comprimento do laminado maior é a rigidez obtida. Segundo o estudo, isso se deve ao fato de que o reforço possui um comprimento de ancoragem que ultrapassa a região de momento máximo suportada pela viga. Além disso, os autores também analisaram o modo de falha encontrado nas vigas reforçadas, caracterizado como ruptura frágil, sendo grande parte por delaminação na interface entre o concreto e a resina, indicando alta concentração de tensões

cisalhantes nas extremidades do PRFC, comportamento observado com maior intensidade para comprimentos menores de ancoragem.

Vigas de concreto armado foram reforçadas com lâminas de PRFC e submetidas à intervalos de temperaturas entre 20 °C e 80 °C em estudo realizado por Krzywoń (2017). A temperatura é maior que a T_g e foram observados impactos no sistema a partir de 50 °C, e uma degradação significativa da capacidade de carga foi observada a partir de 65 °C. Além disso, a falha observada foi delaminação de forma rápida e inesperada com deflexão inferior à observada na viga de controle.

Pesquisa sobre o comportamento do descolamento de vigas de concreto armado reforçado com PRF híbrido, variando entre PRFC e PRFV, foi realizado por Choi et al. (2013). Os resultados demonstraram que as vigas reforçadas apenas com PRFC apresentaram melhor resistência à descolagem do sistema, diferente do observado nas amostras com PRFV, devido ao fato de as lâminas de PRFC serem mais espessas, e isso significativamente alterou os resultados. Além disso, quando as camadas de PRFC e PRFV foram aplicadas conjuntamente, o melhor comportamento à delaminação foi observado nos casos em que a fibra de carbono é aplicada primeiro.

2.4.2 Técnicas alternativas de aderência aumentada: NSM, EBRIG, EBROG

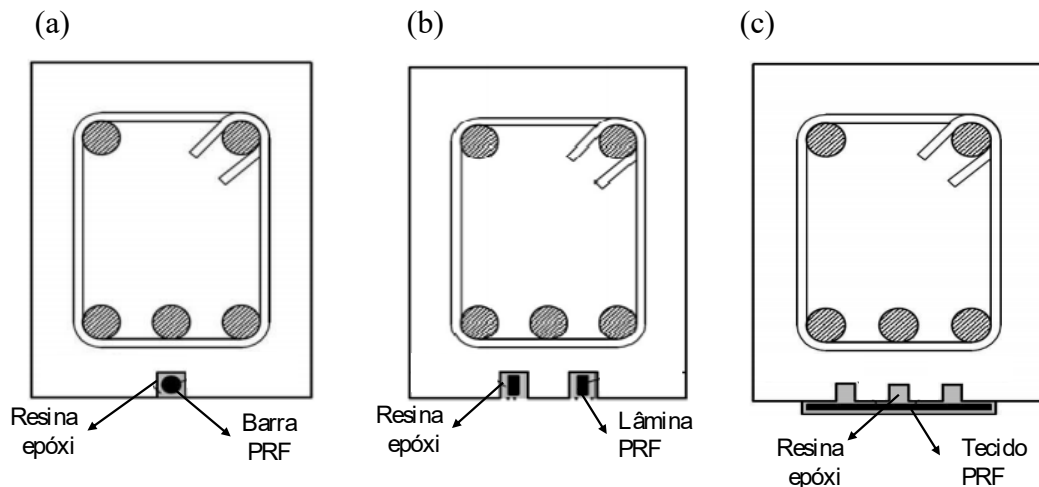
Muitos estudos foram realizados ao longo das últimas décadas sobre o uso do reforço de PRF aplicado externamente em estruturas de concreto que relataram o descolamento prematuro na interface concreto adesivo. Neste sentido, técnicas de aderência aumentada como, bem como sistemas de ancoragem foram tópicos profundamente abordados de modo a melhorar esse modo de falha nas estruturas reforçadas.

O método NSM (*Near-surface mounted*), corresponde à inserção de varões ou barras longitudinais na superfície de flexão de elementos de concreto armado (Figura 2.7 (a); (b)). As etapas de aplicação são: corte das ranhuras longitudinais com dimensões especificadas por meio de uma lâmina de diamante com posterior limpeza dessas com jato de ar; preenchimento da ranhura até 2/3 da profundidade com resina epóxi; inserção das barras ou lâminas, de maneira a garantir o total preenchimento das lacunas, bem como completar os espaços vazios se necessário, de forma a assegurar o nivelamento (DE LORENZIS; NANNI, 2001).

O método EBROG (*Externally Bonded Reinforcement On Groves*) foi estudado em 2010 pelos autores Mostofinejad e Mahmoudabadi (2010), que desenvolveram a técnica de aderência

externa do PRF ao substrato sobre ranhuras longitudinais, conforme pode ser visualizado na Figura 2.7 (c). A técnica aumentou a força de ruptura final em até 27% e 80% com ranhuras longitudinais de 2 mm e 10 mm, respectivamente, quando comparada ao sistema EBR. O modo de aplicação do reforço é consideravelmente simples. Consiste em realizar as ranhuras ao longo da direção longitudinal do elemento e limpá-las com jato de ar. Posteriormente, essas são preenchidas completamente por resina e cobertas pelo sistema de reforço PRF. O compósito é saturado com a resina epóxi e o excesso de cola é removido (BANIJAMALI et al., 2015).

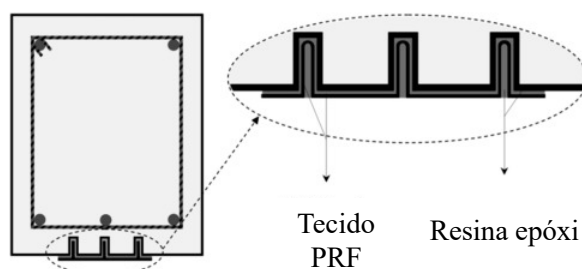
Figura 2.7 – (a) Sistema NSM com barras; (b) Sistema NSM com lâminas; (c) Sistema EBROG



(fonte: adaptada de BANIJAMALI et al., 2015)

Outra técnica de aderência aumentada idealizada pelos autores Mostofinejad e Shameli (2013), foi a EBRIG (*Externally Bonded Reinforcement In Groves*). A forma de aplicação do sistema é semelhante ao EBROG, porém com o tecido de PRF inserido juntamente com resina à ranhura longitudinal, conforme ilustrado na Figura 2.8. No estudo, os autores compararam as técnicas EBR, NSM, EBROG e EBRIG, obtendo como resultados incrementos na carga de ruptura em relação a uma superfície sem nenhum tratamento de 10%, 121%, 139% e 142% respectivamente, com uso de uma camada de FRP.

Figura 2.8 – Sistema EBRIG



(fonte: adaptada de MOSTOFINEJAD; SHAMELI, 2013)

Os métodos alternativos conferem maior resistência de aderência ao sistema, como o esperado, e possuem diferentes abordagens com relações às suas vantagens e desvantagens, conforme pode ser observado com maiores detalhes na Quadro 2.1. É possível perceber que uma das grandes vantagens consiste em evitar o descolamento do substrato de concreto, porém os métodos EBRIG e EBROG são expostos ao intemperismo, e todos os processos demandam a execução de ranhuras, o que provoca poluição ambiental.

Quadro 2.1 – Vantagens e desvantagens dos sistemas NSM, EBRIG e EBROG.

Sistema de reforço	Vantagens	Desvantagens
NSM	<ul style="list-style-type: none"> • Redução considerável do trabalho despendido no preparo da superfície em comparação do método EBR; • Adiar ou eliminar o fenômeno de descolamento; • Preservação dos materiais contra abrasão e intempéries. 	<ul style="list-style-type: none"> • Processo de elaboração das ranhuras é caro e demorado; • Poluição ambiental causada pelo processo de ranhura.
EBRIG	<ul style="list-style-type: none"> • Atingir carga final até 142% mais alta com relação à espécie de referência; • Eliminar o fenômeno de descolamento da interface PRF/concreto; • Uso imediato das estruturas reforçadas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Materiais de reforço expostos ao intemperismo; • Mudanças na aparência da estrutura; • Poluição ambiental causada pelo processo de ranhura.
EBROG	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento da capacidade de flexão em até 80% com relação à espécie de referência; • Adiar ou eliminar o fenômeno de descolamento; • Uso imediato das estruturas reforçadas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Materiais de reforço expostos ao intemperismo; • Mudanças na aparência da estrutura; • Poluição ambiental causada pelo processo de ranhura.

(BANIJAMALI et al., 2015)

Bilotta et al. (2015) desenvolveram um estudo comparando as técnicas EBR e NSM com diferentes tipos de carregamentos, concentrado e distribuído, e analisaram a influência em termos de cargas e modos de falhas. Os autores constataram a maior eficiência em carga final do sistema NSM comparando com a técnica EBR. Além disso, o modo de falha por descolagem no sistema EBR é mais crítico para cargas distribuídas, enquanto no sistema NSM a falha em carga distribuídas passa a ser por cisalhamento, demonstrando a maior aderência e resistência à tração do PRF.

A técnica usual EBR também foi comparada com os métodos EBRIG e EBROG, utilizando como método de confrontação entre esses dois métodos a diferença nas ranhuras em circulares, retangulares e triangulares. Um aumento da capacidade de carga foi observado nos sistemas EBROG e EBRIG em cerca de 62% e 95%, respectivamente, além de indicar que a ranhura retangular apresentou melhores benefícios ao sistema, devido a maior área de contato proporcionada (MASHREI et al., 2019).

Recentemente, Mostofinejad e Mohammadi (2020) analisaram o efeito dos ciclos de congelamento e descongelamento em corpos de prova de concreto reforçados com as técnicas EBR e EBROG com PRFC, com variações de 200 a 500 ciclos. As espécies reforçadas com o sistema EBROG apresentaram queda de apenas 4% após 500 ciclos de congelamento-descongelamento em comparação com a amostra de controle, enquanto o método EBR apresentou queda de 25%. Além disso as ranhuras do método de aderência aumentada permitiram a mudança no modo de falha do sistema de descolamento para ruptura do PRF, indicando o aumento da aderência ao substrato.

2.4.3 Dimensionamento à flexão de elementos reforçados com PRF segundo a ACI 440.2R-17

A norma americana ACI 440.2R-17 (ACI, 2017) descreve em seu item 10 os procedimentos e diretrizes de dimensionamento de reforço à flexão de elementos de concreto armado com polímeros reforçados com fibras através da técnica de aderência externa, compreendendo os estados limites últimos (ELU) e de serviço (ELS). O procedimento de cálculo definido leva em consideração a compatibilidade de deformações, o equilíbrio de forças e o modo de falha da seção. Segundo a norma os possíveis modos de falhas são:

- a) esmagamento do concreto à compressão previamente ao escoamento do aço;
- b) escoamento do aço com posterior ruptura do PRF;
- c) escoamento do aço seguido do esmagamento do concreto;
- d) delaminação por tensão/cisalhamento da cobertura de concreto;
- e) descolagem do PRF do substrato de concreto.

Os três primeiros modos caracterizam o grupo das rupturas clássicas, onde existe a perfeita ligação entre o substrato de concreto e o PRF. Os outros modos representam o grupo de falhas

prematuras das estruturas, em que ocorre algum desprendimento antes que o sistema compósito consiga atingir considerável resistência à tração (JUVANDES, 1999).

A delaminação é o modo de falha com maior ocorrência, sendo uma desvantagem dos sistemas compósitos, visto que sua capacidade à tração acaba não sendo aproveitada (AL-SAAWANI et al., 2020). Nesse modo de falha ocorre o rompimento de todo ou parte do cobrimento do concreto juntamente com o sistema de reforço, devido às altas tensões interfaciais geradas na extremidade do sistema (descolagem final) ou devido às fendas geradas no meio do elemento (descolagem intermediária) (TENG et al., 2003; ARAM et al., 2008).

Segundo Bakis et al. (2002), o modo de ruptura mais desejado é o escoamento do aço seguido do esmagamento do concreto, e os modos “d” e “e” podem ser evitados utilizando dispositivos de ancoragem que permitem a melhor aderência do reforço ao substrato de concreto nas extremidades.

O dimensionamento segundo o ACI 440.2R-17 (ACI, 2017) leva em consideração a deformação gerada mediante os modos de falha, e tem como premissas básicas de cálculo as seguintes suposições:

- a) os cálculos são baseados nas dimensões, arranjos de armadura interna, e nas propriedades dos materiais já existentes que serão reforçados;
- b) as deformações no aço e no concreto são diretamente proporcionais à linha neutra da seção, mantendo a teoria da seção plana antes e após o carregamento;
- c) não há deslizamento relativo entre a superfície de concreto e o sistema de reforço PRF, categorizando perfeita aderência;
- d) a deformação por cisalhamento na camada de resina é desprezada, isso devido a pequena espessura dessa;
- e) a máxima deformação de compressão permitida ao concreto é de 0,003 (0,3%), que difere da norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014) que considera a deformação máxima em 0,35%; e
- f) o comportamento do material de reforço é elástico-linear até a ruptura.

A norma ainda indica que as propriedades iniciais do compósito devem ser reduzidas mediante o ambiente ao qual o sistema será empregado, através de um fator de redução externo (C_E). A

exposição à longo prazo a diferentes ambientes pode reduzir algumas propriedades, como resistência à tração, à fadiga e à ruptura do PRF, nesse sentido, a resistência à tração e deformação última dos compósitos são multiplicados pelo coeficiente conforme Tabela 2.1, que varia de acordo com a fibra do compósito. A norma enfatiza que ambientes fechados com determinadas condições que favoreçam a durabilidade do sistema tem coeficientes próximos de um, enquanto ambientes mais suscetíveis a intempéries oferecem uma maior redução das propriedades.

Tabela 2.1 – Fator de redução ambiental das propriedades iniciais dos PRF

Condição de exposição	Tipo de fibra	Fator de redução (C_E)
Ambientes internos	Carbono	0,95
	Vidro	0,75
	Aramida	0,85
Ambientes externos	Carbono	0,85
	Vidro	0,65
	Aramida	0,75
Ambientes agressivos	Carbono	0,85
	Vidro	0,50
	Aramida	0,70

(ACI, 2017)

A tensão de tração última (f_{fu}) do sistema compósito reforçado com fibras pode ser determinada através da Equação 2.1, conforme recomendado no item 9.4 da norma ACI 440.2R-17 (ACI, 2017), que depende do coeficiente de fator externo (C_E) e da resistência à tração fornecida pelo fabricante ou determinada por meio de ensaios (f_{fu}^*):

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (2.1)$$

Da mesma forma, a deformação última do PRF (ε_{fu}) pode ser determinada através da Equação 2.2 a seguir, onde ε_{fu}^* corresponde à deformação última fornecida pelo fabricante ou por meio de ensaios, conforme item 9.4 da ACI 440.2R-17 (ACI, 2017).

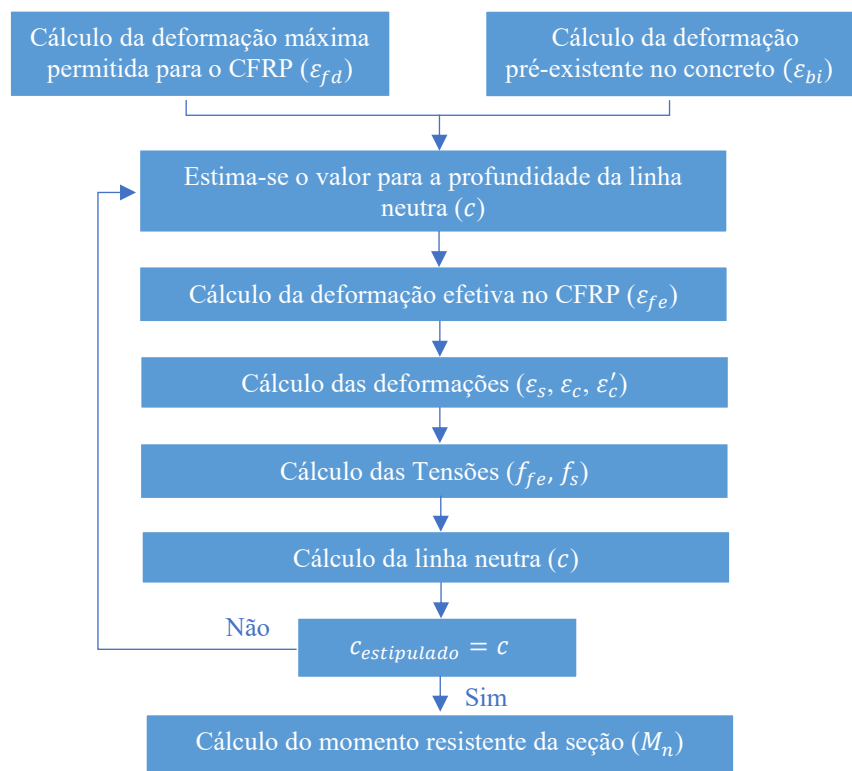
$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* \quad (2.2)$$

A norma ainda se refere ao módulo de elasticidade (E_f) como sendo determinado através da Equação 2.3, por meio da equação elástica de Hooke, devido à propriedade da fibra apresentar comportamento elástico-linear até a sua ruptura, portanto não sofre redução devido a exposição à ambientes:

$$E_f = \frac{f_{fu}}{\varepsilon_{fu}} \quad (2.3)$$

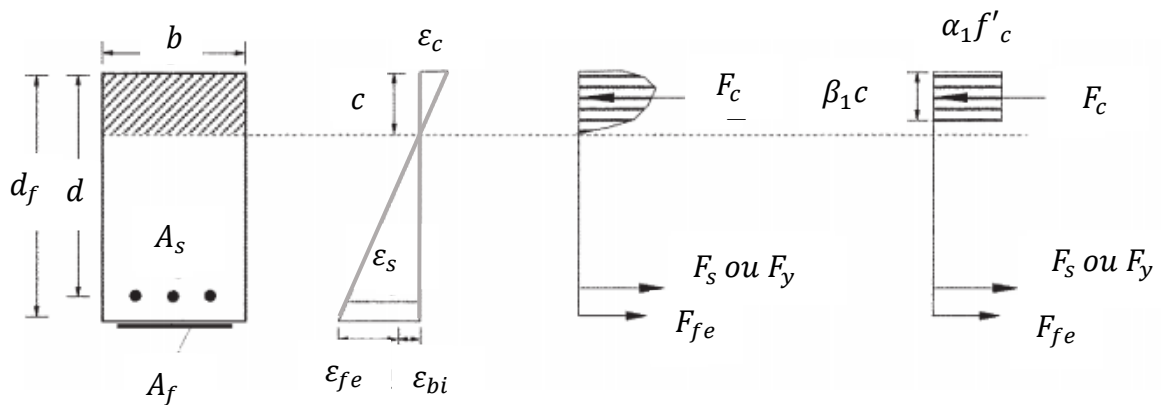
Referente ao Estado Limite Último (ELU) das seções, o procedimento de cálculo da norma é apresentado no fluxograma da Figura 2.9 e é um método iterativo de soluções que arbitra um valor para a linha neutra c e compreende o equilíbrio de forças ilustrado na Figura 2.10. O parâmetro b é a largura da viga, d é a distância da face comprimida até o centro de inércia da armadura de tração de aço, d_f é a distância até o reforço tomando como referência a seção comprimida de concreto, A_s é a área da armadura de tração, A_f a área do reforço de PRF, c a distância da face de compressão do concreto até a linha neutra. As deformações no concreto e aço correspondem a ε_c e ε_s , nessa ordem, enquanto ε_{fe} e ε_{bi} representam as deformações efetivas no reforço e a deformação pré-existente no concreto antes da instalação do reforço devido as cargas atuantes, respectivamente. Os resultantes F_c , F_s e F_{fe} caracterizam as forças à compressão do concreto, tração do aço e reforço, de modo respectivo, enquanto os parâmetros α_1 e β_1 correspondem nessa ordem a um multiplicador para determinar a distribuição de tensão retangular equivalente e profundidade do bloco retangular das tensões, já f'_c equivale à resistência característica do concreto. O equilíbrio de forças é gerado igualando as forças de compressão do concreto às de tração constituídas pela armadura de aço e o reforço de PRF.

Figura 2.9 – Fluxograma de cálculo para verificação do reforço segundo ACI 440.2R-17 (ACI, 2017)



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 2.10 – Distribuição das tensões e deformações na seção de concreto reforçada com PRF



(fonte: adaptada de ACI, 2017)

A norma determina inicialmente uma deformação máxima permitida ao PRF (ϵ_{fd}) para evitar a ocorrência do modo de falha por descolagem, que, conforme citado anteriormente, é uma ruptura comumente observada nos elementos reforçados com compósitos de fibras. Essa deformação máxima, ainda deve ser menor que 90% da deformação última do PRF, para evitar a ruptura do reforço, sendo indicada a seguinte equação para evitar o destacamento do compósito:

$$\epsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{f'_c}{nE_f t_f}} \leq 0,9 \epsilon_{fu} \quad (2.4)$$

Onde:

n : número de camadas do reforço;

t_f : espessura da camada de PRF.

A deformação efetiva do reforço (ϵ_{fe}) determinada pela Equação 2.5 deve ser limitada à deformação por descolagem, caso seja superior, dispositivos de ancoragem na extremidade do reforço devem ser dimensionados de modo a evitar a falha prematura do sistema, permitindo que grande parte da resistência à tração do compósito possa ser solicitada.

$$\epsilon_{fe} = \epsilon_{cu} \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \epsilon_{bi} \leq \epsilon_{fd} \quad (2.5)$$

Sendo:

ϵ_{cu} : deformação última do concreto (0,30%).

A Equação 2.5 inicia o processo iterativo, arbitrando um valor para a linha neutra c e, portanto, se torna a equação governante dos modos de falha. Se o termo esquerdo for maior, o modo de

falha será a compressão do concreto, se o termo direito da igualdade for maior, o descolamento ou ruptura do PRF governa a falha da seção, permitindo as seguintes observações:

- a) $\varepsilon_{fe} < \varepsilon_{fd}$; ε_{fu} – o modo de ruptura é caracterizado pelo esmagamento compressivo do concreto;
- b) $\varepsilon_{fd} < \varepsilon_{fe}$; ε_{fu} – ocorre o descolamento do reforço do substrato de concreto; e
- c) $\varepsilon_{fu} < \varepsilon_{fe}$; ε_{fd} – a falha do PRF governa a ruptura da seção.

Após arbitrar a linha neutra e determinar a deformação efetiva no PRF, a norma prescreve o cálculo da tensão efetiva (f_{fe}) no reforço, que é obtida através da Equação 2.6, e posteriormente as deformações e tensões no aço (ε_s e f_s) e deformações no concreto (ε_c) por intermédio das equações 2.7, 2.8 e 2.9 são calculadas, respectivamente.

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{d-c}{d_f-c} \right) \quad (2.7)$$

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_{yd} \quad (2.8)$$

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{c}{d_f-c} \right) \quad (2.9)$$

Em que:

E_s : módulo de elasticidade do aço;

f_{yd} : tensão de escoamento do aço.

Com as tensões e deformações no reforço, aço e concreto calculadas, o equilíbrio interno da seção pode ser determinado através da Equação 2.10, segundo item 10.2.10 da ACI 440.2R-17 (ACI, 2017):

$$c = \left(\frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f'_c \beta_1 b} \right) \quad (2.10)$$

Onde α_1 e β_1 são parâmetros que definem o diagrama de tensão retangular equivalente do concreto e assumem o valor de 0,85 caso o modo dominante de falha da seção seja o esmagamento do concreto e para concretos com classe de resistência característica a compressão no intervalo de 17 e 27 MPa, para outras faixas de resistência β_1 reduz linearmente

0,05 a cada 7 MPa, nunca sendo menor que 0,65. Em outros casos, os parâmetros são calculados através das seguintes equações:

$$\alpha_1 = \left(\frac{3\varepsilon'_c \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1 \varepsilon_c'^2} \right) \quad (2.11)$$

$$\beta_1 = \left(\frac{4\varepsilon_c' - \varepsilon_c}{6\varepsilon_c' - 2\varepsilon_c} \right) \quad (2.12)$$

Em que ε'_c é a deformação máxima no concreto e é obtida por:

$$\varepsilon'_c = \left(\frac{1,71f'_c}{E_c} \right) \quad (2.13)$$

Segundo a ACI 440.2R-17 (2017) a profundidade da linha neutra c é encontrada satisfazendo simultaneamente as equações 2.5 a 2.10, estabelecendo o equilíbrio de forças internas e a compatibilidade de deformações, caso contrário, outro valor para c deve ser estipulado, e uma nova iteração realizada. Por fim, o momento resistente da seção é obtido através da Equação 2.14 onde Ψ_f é o fator de redução de resistência, igual a 0,85, obtido através de análises de confiabilidade, responsável pelos diferentes modos de falha que podem ser observados no reforço.

$$M_n = F_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \Psi_f F_f \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (2.14)$$

Onde o primeiro termo da somatória corresponde ao momento resistente pela armadura tracionada de aço, enquanto o segundo, ao momento proporcionado pelo reforço de PRF. Finalmente, o momento resistente de cálculo da seção (M_u) pode ser obtido por intermédio da Equação 2.15, onde ϕ representa o fator de redução, determinado de acordo com a Equação 2.16, no qual ε_{sy} é a deformação correspondente à resistência ao escoamento do aço.

$$M_u = \phi M_n \quad (2.15)$$

$$\phi = \begin{cases} 0,90 & \text{para } \varepsilon_s \geq 0,005 \\ 0,65 + \frac{0,25(\varepsilon_s - \varepsilon_{sy})}{0,005 - \varepsilon_{sy}} & \text{para } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_s < 0,005 \\ 0,65 & \text{para } \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy} \end{cases} \quad (2.16)$$

Além da resistência à flexão das vigas reforçadas através da técnica EBR, a norma ACI 440.2R-17 (ACI, 2017) também demonstra modelos de cálculo para o método NSM, resistência do reforço ao cisalhamento de elementos e cálculos das tensões para cargas de serviço, de modo a

evitar rupturas por fadiga e cargas cíclicas no material de reforço. A tensão no aço ($f_{s,s}$) e no reforço ($f_{f,s}$) sob cargas de serviço podem ser determinadas através das equações 2.17 e 2.18, respectivamente, onde kd pode ser obtido tomando o primeiro momento das áreas da seção transformada.

$$f_{s,s} = \frac{M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f \left(d_f - \frac{kd}{3}\right) (d - kd) E_s}{A_s E_s \left(d - \frac{kd}{3}\right) (d - kd) + A_f E_f \left(d_f - \frac{kd}{3}\right) (d_f - kd)} \quad (2.17)$$

$$f_{f,s} = f_{s,s} \left(\frac{E_f}{E_s}\right) \frac{d_f - kd}{d - kd} - \varepsilon_{bi} E_f \quad (2.18)$$

A norma recomenda que a tensão de serviço no aço seja limitada a 80% da tensão de escoamento (f_{yd}), enquanto a tensão de compressão no concreto deve ser menor que 60% da resistência característica do concreto (f'_c). As limitações em tensão de serviço no reforço de PRF devem obedecer aos limites impostos pela Tabela 10.2.9 da norma ACI 440.2R-17 (ACI, 2017), sendo 55% da resistência à tração (f_{fu}) para PRFC.

2.5 PROTENSÃO DOS LAMINADOS DE POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS

Apesar da notável aplicação em reforços de estruturas de concreto armado do sistema EBR e de diretrizes normativas sobre o dimensionamento, projeto e durabilidade, grande parte da resistência à tração dos compósitos de PRF não são utilizadas em função da falha no sistema acontecer prematuramente, seja por delaminação ou ruptura dos elementos. Nesse sentido, a protensão dos laminados de PRF pode melhorar a capacidade de resistência última do sistema, aplicando uma deformação inicial no compósito e permitindo uma maior resistência, viabilizando seu uso de maneira efetiva.

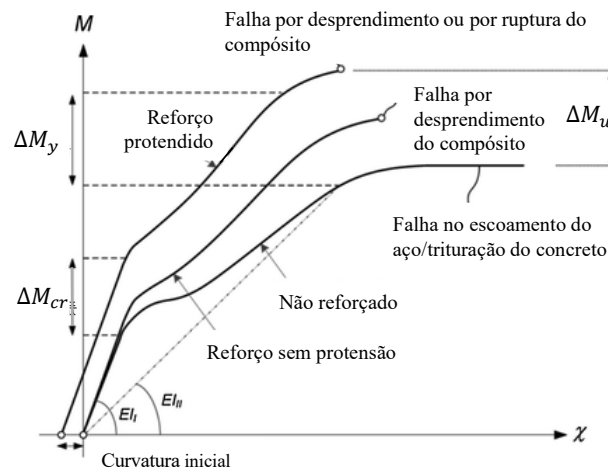
Os elementos reforçados com laminados de PRF protendidos possuem benefícios que aliam as vantagens da técnica EBR com a protensão, como (EL-HACHA et al., 2001):

- a) deflexão reduzida;
- b) redução da abertura de fissuras e retardo do aparecimento dessas;
- c) alívio das tensões na armadura interna;
- d) maior resistência a falhas por fadiga;

- e) eficiência do uso das resistências do concreto e PRF;
- f) redução do risco de falha prematura, quando devidamente ancorado;
- g) capacidade de cisalhamento aumentada pelas tensões longitudinais; e
- h) aumento da carga última e a rigidez dos elementos reforçados.

A Figura 2.11 demonstra a relação entre o momento e a curvatura de vigas sem reforço e vigas reforçadas com laminados de PRF, com e sem protensão. É possível perceber o aumento do momento último (ΔM_u), de fissuração (ΔM_{cr}) e de escoamento (ΔM_y) das vigas com reforço protendido em relação às não reforçadas e reforçadas sem protensão. Além disso, percebe-se a redução da ductilidade, observada pela menor curvatura das vigas reforçadas com PRF protendido. Outro importante aspecto é o modo de ruptura das vigas, que podem ser por ruptura do compósito, se reforçadas com laminados protendidos com ancoragem eficiente.

Figura 2.11 – Comparação momento x curvatura de vigas sem reforço, com reforço de PRF protendido e sem protensão

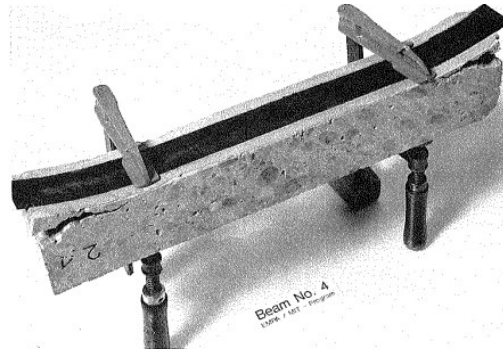


(fonte: adaptada de MICHELS et al., 2016)

O estudo da protensão de laminados se iniciou no início dos anos 90, com as pesquisas de Saadatmanesh e Ehsani (1991), Triantafillou e Deskovic (1991) e Triantafillou et al. (1992). Triantafillou e Deskovic (1991) desenvolveram inicialmente um modelo analítico de previsão da máxima força de tração que poderia ser aplicada ao compósito sem que ocorresse o desprendimento do substrato de concreto nas extremidades. Triantafillou et al. (1992) realizaram uma pesquisa experimental com vigas de concreto armado reforçadas com PRFC protendido por meio de dispositivos externos. Os resultados demonstraram comportamento superior das vigas reforçadas protendidas em comparação às vigas referências, principalmente

em termos de resistência mecânica, com valores até quatro vezes mais elevados, além disso, também observaram aumento da rigidez. Os autores puderam ainda, compreender a necessidade do dispositivo de ancoragem nas extremidades, que foram desprendidas do concreto devido às altas tensões geradas imediatamente após a liberação do esforço, conforme demonstra a Figura 2.12 a seguir.

Figura 2.12 – Desprendimento da cobertura de concreto nas extremidades da viga após liberação do esforço



(fonte: TRIANTAFILLOU et al., 1992)

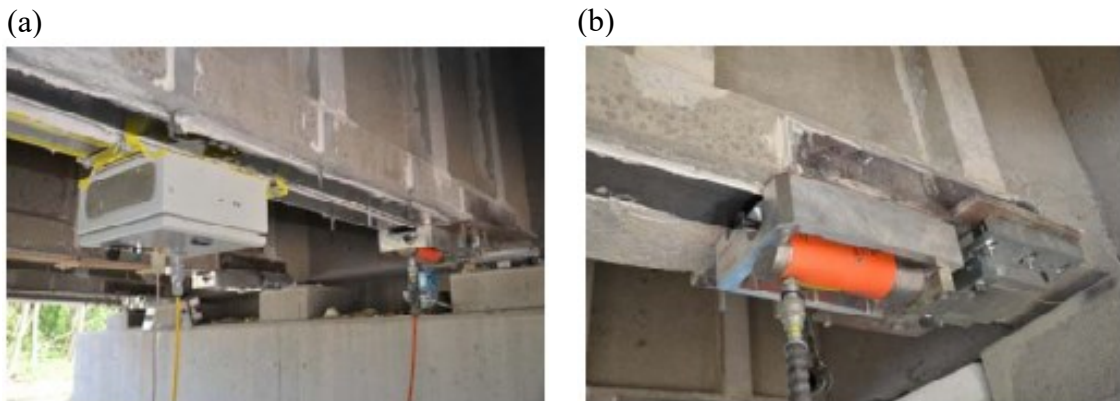
Deuring (1993) foi outro autor pioneiro no estudo de protensão em laminados de PRFC, desenvolvendo uma pesquisa experimental com vigas de seções retangulares e T, com dois sistemas de protensão distintos. Os ensaios realizados foram estáticos para as seções retangulares, e estáticos e de fadiga para as seções T, ambas as espécies possuíam sistema de ancoragem metálico com placas de aço e parafusos, que comprimiam as extremidades do reforço. Os resultados demonstraram aumento na resistência última das vigas com PRFC protendidos em relação às vigas com sistema EBR, além disso houve redução da deflexão e da abertura de fissuras.

A aplicação do sistema de laminados protendidos foi observada na prática com inúmeras recuperações de construções, uma delas foi em 2002, na ponte sobre o canal Escher localizada na auto estrada A3 na cidade de Zurique (Suíça). Segundo Berset et al. (2002), essa foi a primeira ponte a ser reforçada com laminados de PRFC protendidos no país. A recuperação era necessária devido a uma fenda longitudinal localizada próxima ao centro, no convés, em função da inadequada resistência transversal à flexão, tanto para os esforços positivos, quanto momentos negativos. Depois de verificar vários sistemas de reforço, os laminados de PRFC protendidos foram os que apresentaram mais vantagens, aplicando uma força equivalente à 55% da resistência à tração das tiras, através de um sistema com ancoragem passiva em cunhas e uma extremidade ativa.

Outro exemplo de aplicação real foi em uma ponte na Itália, localizada na entrada do porto de Ravenna com um vão de 32 metros de comprimento. A ponte necessitava de reparo em uma de suas seis vigas, devido a danos causados na armadura de aço em razão do impacto de um veículo de altura elevada. A solução foi reforçar a área de flexão da viga com 4 laminados protendidos de PRFC, com força total de 640 kN (LENZI et al., 2006 apud FRANÇA, 2008).

Recentemente, segundo Kotynia et al. (2015), a ponte rodoviária sobre o rio Pilsia localizada em Szczercowska Wieś (Polônia), que possui cinco vigas principais com seção I, teve que ser reforçada para aumentar a classe de carregamento. O processo de modernização consistia em duas etapas, primeiro o alargamento da ponte e estrada de 7,4 m e 6,0 m para 9,7 m e 8,4 m, respectivamente, e a segunda etapa, de reforço ao cisalhamento com PRFC no sistema EBR, e reforço à flexão com lâminas de PRFC protendidas. A protensão foi realizada com dois laminados em cada viga, através do sistema de ancoragem gradual (Figura 2.13), evitando a necessidade de placas e parafusos de aderência nas extremidades das vigas, sendo liberada a força em quatro etapas de carregamento, cujo o primeiro intervalo era de 75 kN. Posteriormente à aplicação dos reforços, os compósitos foram revestidos com epóxi e quartzo areia, para fins de acabamento de toda a superfície das vigas com escumação de gesso e pintura.

Figura 2.13 – Protensão de laminados de PRFC na ponte rio Pilsia localizada em Szczercowska Wieś (Polônia).
(a) ancoragem gradiente; (b) equipamento de protensão



(fonte: KOTYNIA et al., 2015)

2.5.1 Técnicas de protensão de laminados de PRFC

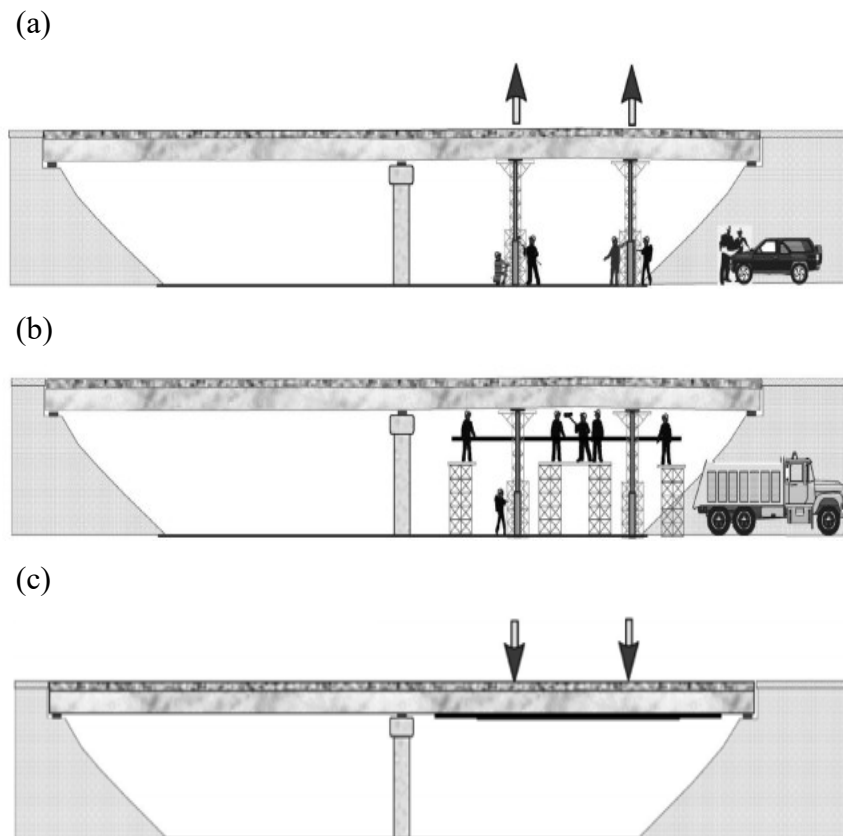
Conforme mencionado no Capítulo 1, existem três diferentes técnicas conhecidas para protender laminados de PRF: sistemas com vigas curvadas, pré-esforçados contra um sistema externo independente e sistemas de reações contra o próprio elemento reforçado.

2.5.1.1 Pré-esforço através de sistemas com vigas curvadas

Nesse sistema de protensão, os laminados de PRF são indiretamente protendidos através da curvatura do centro da viga por macacos hidráulicos, conforme mostra a Figura 2.14 (a), com posterior aderência do laminado à face tracionada da viga através de resina (Figura 2.14 (b)). Após essa estar totalmente seca, os macacos hidráulicos são liberados, e a viga volta a sua posição original, protendendo o laminado (Figura 2.14 (c)). Esse sistema é considerado ineficiente, pois são necessárias altas tensões para suspender a viga e apenas um nível baixo de pré-esforço é induzido ao PRF (EL-HACHA et al., 2001).

O preceito básico da técnica é a imposição de forças contrárias à deflexão no meio da viga, provocando um diagrama de momentos fletores em formato triangular, fazendo com que a delaminação do substrato de concreto possa ser evitada, pois a tensão cisalhante na interface da cola se torna constante e com menor intensidade. A tensão que é imposta ao laminado é limitada pela força dos macacos hidráulicos, que depende da capacidade de deformação compressiva do concreto, de modo a não originar trincas ou fendas na superfície da viga (AZEVEDO, 2015).

Figura 2.14 – Sistema de protensão com curvatura do elemento de reforço. (a) Elevação do centro da viga com macacos hidráulicos; (b) aplicação do laminado de PRF; (c) retirada dos macacos hidráulicos após a resina estar seca



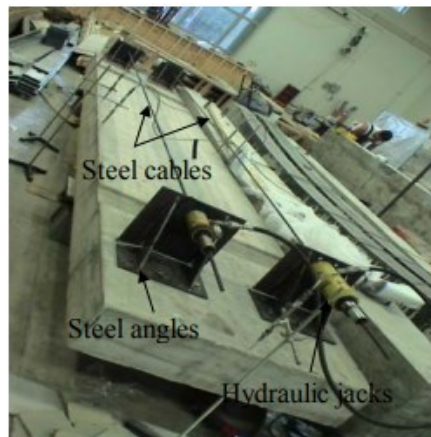
(fonte: adaptada de EL-HACHA et al., 2001)

Os estudos envolvendo essa técnica são escassos, com tecnologia limitada à dificuldade de obter maior protensão, sendo esse o método pioneiro de protensão de compósitos PRF. Os autores Saadatmanesh e Ehsani (1991) realizaram um estudo com 6 vigas de concreto armado reforçadas com PRFV, sendo que duas delas foram curvadas anteriormente à aplicação do laminado, protendendo-o. O sistema de protensão consistiu em inicialmente colocar a viga com a face inferior para cima, onde foram aplicados dois pontos de carregamento sobre a mesma, e então aplicados os laminados com a resina, permitindo a aderência do sistema. Depois de curada a cola, os pontos de carga foram liberados e então a viga foi colocada em sua posição original. De modo a não provocar falhas na viga, a força de curvatura provocada foi de aproximadamente 36 kN. Houve aumento da resistência última e o modo de ruptura característico foi de delaminação da cobertura de concreto.

Mais tarde, em 1994 os autores Char, Saadatmanesh e Ehsani publicaram um estudo paramétrico com os resultados experimentais de Saadatmanesh e Ehsani (1991). Foi constatada a alta correlação entre o método proposto e os resultados obtidos experimentalmente, além de aumento significativo da resistência última em sistemas reforçados com laminados de PRFV protendidos, apesar da pouca protensão obtida através do método de curvatura.

Um processo semelhante para reforçar lajes de concreto armado com tecidos de PRFC protendidos foi realizado por Piyong et al. (2003). O sistema empregado para protender o compósito era composto por cabos de aço, perfis L com ângulos de aço e macacos hidráulicos, como mostra a Figura 2.15. O processo consistia em três etapas, sendo que na primeira o sistema de protensão era fixado à laje temporariamente com parafusos de ancoragem. Na sequência, foram aplicadas forças aos cabos de aço na ordem de 44 kN, utilizando uma única bomba. A segunda etapa envolvia a colagem de dois tecidos na face comprimida pelo sistema de cabos de aço e fixados à laje através de 6 âncoras de PRFV em cada faixa de tecido. A última etapa compreendia a liberação dos macacos hidráulicos, permitindo a protensão dos tecidos. Os autores obtiveram incrementos da capacidade de flexão de aproximadamente 80% em relação à amostra de controle. Além disso, o modo de ruptura observado foi de falha no PRFC, com desprendimento superficial no meio do vão, não ocorrendo a delaminação devido à presença das âncoras de PRFV.

Figura 2.15 – Sistema de curvatura da viga através de cabos de aço, chapas em L e macacos hidráulicos



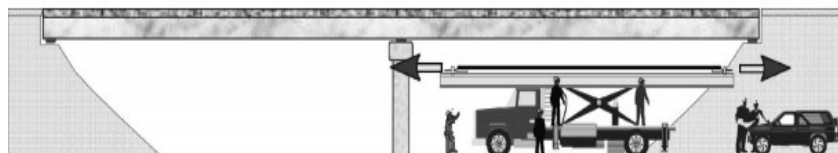
(fonte: PIYONG et al., 2003)

2.5.1.2 Pré-esforço contra sistema externo independente (Sistemas pré-tensionados)

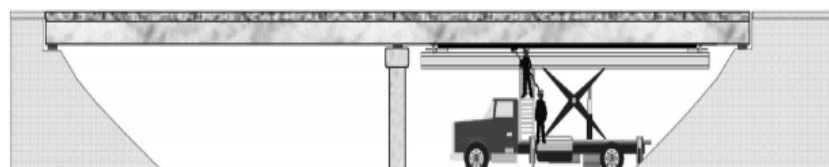
A protensão em laminados de PRF através de um sistema de reação externo independente é mostrado na Figura 2.16. Inicialmente, as extremidades do compósito são fixas à um dispositivo de ancoragem, geralmente de aço, que é conectado à macacos hidráulicos, que por sua vez realizam a protensão (Figura 2.16 (a)), sendo ambos fixos a uma estrutura de reação externa. Posteriormente, o laminado já protendido é aplicado na face inferior da viga, e mantido até que a resina esteja totalmente curada (Figura 2.16 (b)). A última etapa compreende a liberação de tensão dos macacos hidráulicos, logo, o sistema de protensão não é mais necessário e o excesso de comprimento do laminado cortado (Figura 2.16 (c)). Nesse sistema, se torna fundamental um dispositivo de ancoragem, de modo a evitar o descolamento devido às altas tensões cisalhantes provocadas no momento da liberação da protensão.

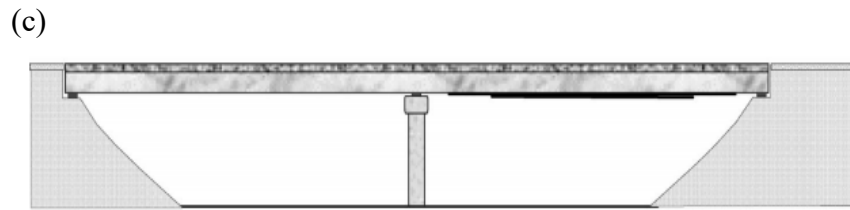
Figura 2.16 – Representação de um reforço com sistema de protensão de laminados contra um suporte externo independente: (a) Fixação dos laminados de PRF em suportes de aço conectados a um dispositivo de protensão, com execução da tensão; (b) aplicação dos laminados protendidos na viga; (c) reforço finalizado

(a)



(b)

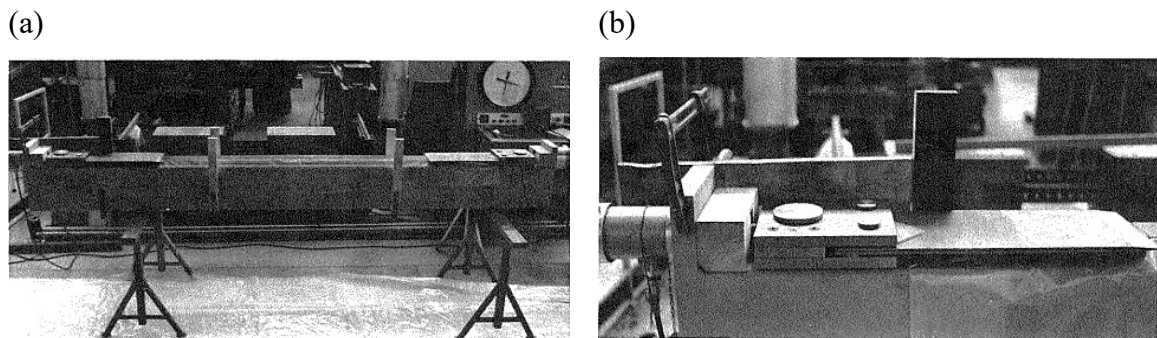




(fonte: adaptada de EL-HACHA et al., 2001)

Os primeiros desenvolvimentos dessa técnica foram efetuados pelos autores Triantafillou et al. em 1992. Os autores realizaram a protensão de laminados através de um sistema de reação contra uma viga de aço, que servia de apoio para a viga de concreto armado que seria reforçada, conforme ilustra a Figura 2.17 (a). O sistema de ancoragem do laminado ao dispositivo de protensão teve que ser composto por duas placas de aço que fixavam o compósito através de uma superfície rugosa, como pode ser observado na Figura 2.17 (b). As duas placas foram conectadas por juntas às dobradiças, que por sua vez eram ligadas nas extremidades ao macaco hidráulico e à uma célula de carga. Como mencionado anteriormente, o empecilho de alcance de maiores cargas no ensaio estático foi a delaminação da cobertura de concreto quando da liberação da protensão, confirmando a necessidade de ancoragens nas extremidades cortadas das lâminas.

Figura 2.17 – Dispositivo de protensão dos laminados de PRF: (a) viga metálica de reação; (b) dispositivo de ancoragem da lâmina para ser protendida

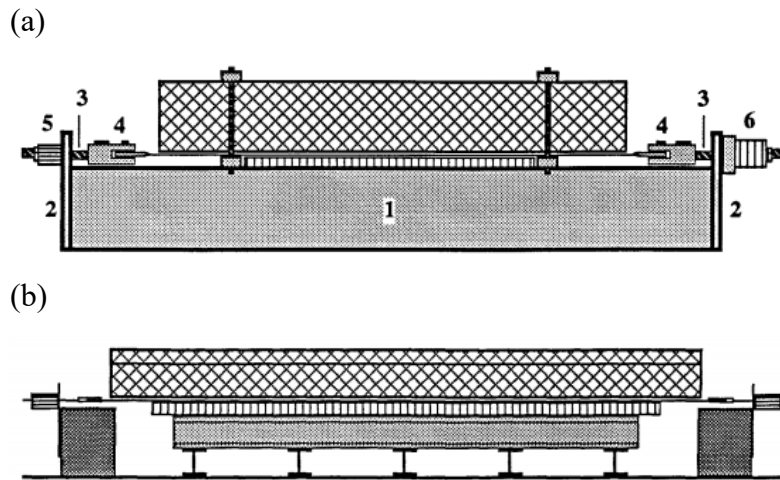


(fonte: TRIANTAFILLOU et al., 1992)

Deuring (1993), também aplicou o sistema de protensão de laminados através de dispositivos de reação externos. Em seu estudo, duas técnicas de protensão foram empregadas, uma delas semelhante ao autor anterior, representada pela Figura 2.18 (a), na qual o dispositivo de reação externo era composto de uma viga metálica, com dispositivos de ancoragem para prender o laminado em suas extremidades. O segundo método era composto de blocos de cisalhamento de aço sólido, com reação externa independente. A distância do chão até a viga foi compensada com uso de vigas metálicas, conforme Figura 2.18 (b). Em ambos os sistemas, a protensão foi

aplicada através de macacos hidráulicos e o nível de tensão aplicado variou de 10 a 75% da resistência última dos laminados.

Figura 2.18 – Sistemas de protensão de laminados de PRF: (a) com viga de aço; (b) com blocos de aço



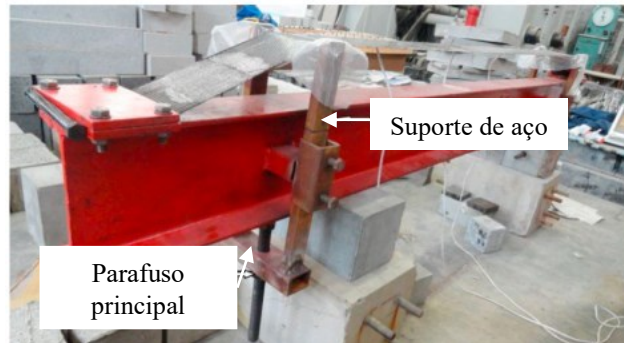
(fonte: DEURING, 1993)

Os aspectos do sistema de protensão externo de laminados de PRFC em termos de modos de ruptura foram estudados pelos autores Garden e Hollaway (1998). As vigas variavam em espécies sem reforço, reforçadas sem protensão de laminados e vigas com PRF tensionados, em níveis que variavam de 25 a 50% da resistência do composto. Seis espécies com reforço protendido possuíam ancoragem metálica com parafusos. Para as vigas reforçadas apenas com a técnica EBR, o modo de ruptura característico foi a separação da placa, na base da rachadura por cisalhamento. Nas vigas com protensão de laminados acima de 40% da resistência do composto, o modo de falha foi a ruptura por tração do PRFC.

Estudo recente realizado por Cao et al. (2019) utilizou um sistema de protensão de laminados com dispositivos externos proposto por Yu et al. (2003). Esse sistema de protensão se difere do método tradicional desenvolvido pelos autores anteriores. Inicialmente, o laminado de PRFC foi fixado à uma viga de aço através de uma cunha com duas placas de aço e quatro parafusos nas duas extremidades (Figura 2.19). Posteriormente, o laminado foi protendido através da elevação dos suportes de aço, com o rosqueamento do parafuso principal. A última etapa do processo consistia em realizar um giro de 180° na viga de aço e prender o laminado à viga de concreto com o auxílio de cola e ancoragem com placas de aço aparafusadas e laços em U de tecido. Quando a cura da resina estava completa, o excesso do comprimento do laminado era cortado e o sistema de protensão removido. Como resultados no ensaio de flexão estática a quatro pontos, obtiveram aumento da carga de fissuração e resistência última, além de

diminuição na abertura de fissuras e aumento da rigidez. Esse comportamento é esperado em vigas reforçadas com laminados protendidos e, também, foi observado pelos autores Garden et al. (1998), Quantrill e Hollaway (1998) e Yu et al. (2004).

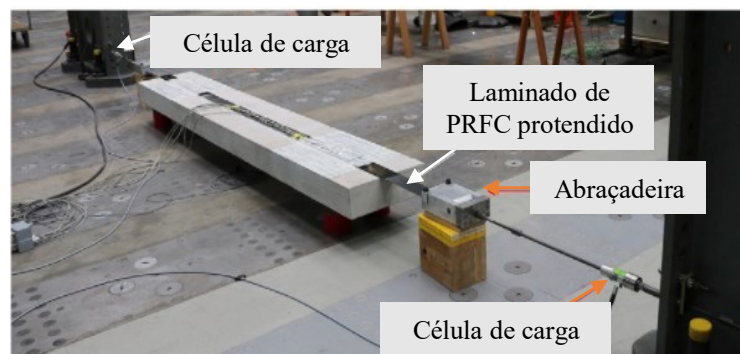
Figura 2.19 – Sistema de protensão do laminado de PRF com viga de aço como suporte de reação



(fonte: adaptada de CAO et al., 2019)

O reforço de lajes por meio da protensão de laminados juntamente com a técnica de aderência aumentada EBROG foi pesquisada pelos autores Moshiri et al. (2020). O método de protensão empregado foi desenvolvido no EMPA (*Swiss Federal Materials Testing and Research Laboratories*), e é semelhante ao processo convencional. Inicialmente, as ranhuras longitudinais foram executadas e preenchidas com resina epóxi, em seguida o laminado de PRFC foi protendido mediante um sistema composto de duas torres de reação. Os laminados eram conectados a um cabo de aço através de um dispositivo metálico denominado pelos autores de “*clamp*” (abraçadeiras na tradução direta), e protendidos pelos macacos hidráulicos fixos às colunas de aço (Figura 2.20). Posteriormente, os laminados eram aderidos às lajes, e após a cura da resina, eram cortados

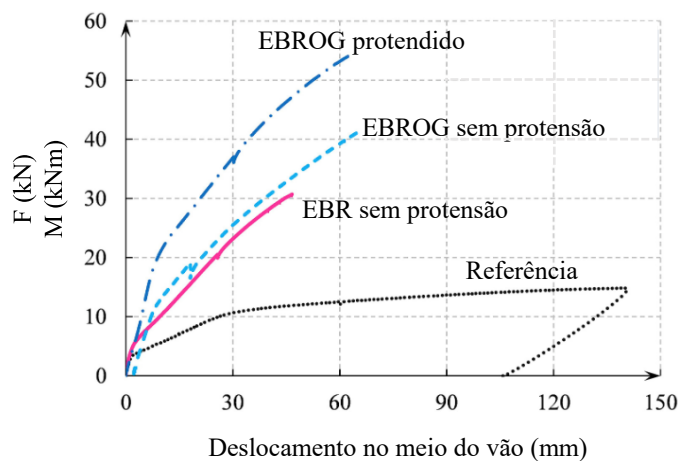
Figura 2.20 – Sistema de protensão e ancoragem de laminados com método EBROG



(fonte: adaptado de MOSHIRI et al., 2020)

Os laminados foram protendidos com 26% da resistência à tração do PRFC, e apresentaram aumento da capacidade de flexão da laje no ensaio de flexão estática a quatro pontos em aproximadamente 77% e 32% quando comparado com o método EBR e EBROG não protendido, respectivamente. Além disso, os autores também observaram aumento da rigidez e redução da ductilidade para todas as lajes reforçadas com PRFC em comparação à viga referência, conforme pode ser visualizado na Figura 2.21 (Moshiri et al., 2020). Resultados observados também por Tehrani et al. (2019), em estudo realizado com vigas reforçadas com laminados de PRFC protendidos juntamente com a técnica de aderência aumentada EBROG.

Figura 2.21 – Relação força x deslocamento para as lajes reforçadas e referência

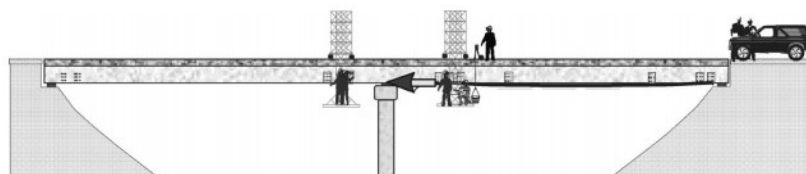


(fonte: adaptada de MOSHIRI et al., 2020)

2.5.1.3 Pré esforço contra o próprio elemento a ser reforçado (Sistema pós-tensionado)

A protensão de laminados de PRF contra o próprio elemento a ser reforçado envolve um sistema composto por ancoragens onde o laminado é fixado à viga. Em uma extremidade do laminado a ancoragem é fixa (extremidade passiva), na outra o macaco hidráulico é posicionado em conjunto com o sistema de ancoragem (geralmente) e a protensão é realizada (extremidade ativa, ou ancoragem móvel), de modo que a reação ocorre contra o próprio elemento (Figura 2.22).

Figura 2.22 – Sistema de protensão de laminados através da reação contra o próprio elemento a ser reforçado



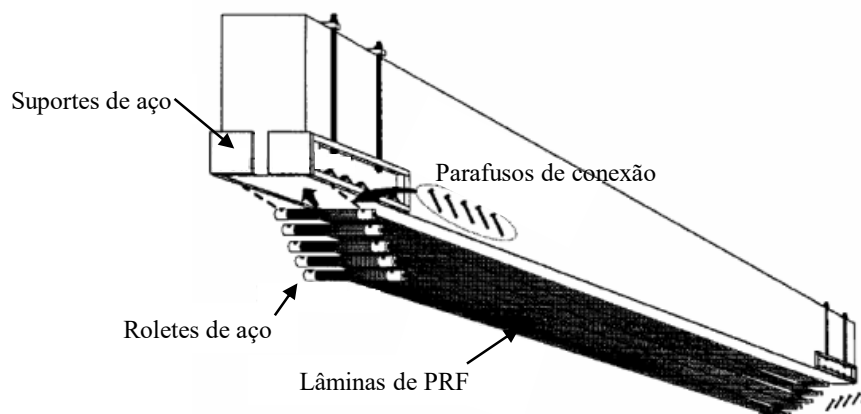
(fonte: EL-HACHA et al., 2001)

Nesse sistema, as perdas imediatas de protensão devido ao encurtamento elástico do concreto podem ser desconsideradas, quando o reforço possui apenas uma camada de laminado. Isso porque quando o laminado está sendo tracionado, o concreto está sendo comprimido, ocorrendo de certa forma uma compensação da tensão de tração aplicada (GARCEZ, 2007).

A primeira pesquisa envolvendo o sistema de protensão contra o elemento reforçado foi desenvolvida por Wight et al. (2001). Os autores empregaram lâminas de PRFC protendidas à face tracionada de vigas de concreto armado empregando o sistema ilustrado na Figura 2.23. Segundo os autores o método de protensão consistia na colagem das lâminas aos roletes de aço, que eram ancorados em suportes de aço fixados à viga. Em uma extremidade os rolos de aço eram fixos, na outra, anexados ao macaco hidráulico através de cabos de aço que realizavam a protensão com reação contra o elemento de concreto, quando os roletes deslizavam para o suporte de aço.

Os autores realizaram um sistema que poderia aplicar a protensão em mais de um laminado, o que proporcionava uma maior resistência à tração ao elemento, utilizando 5 lâminas com aplicação de pré-esforço aproximada de 200 MPa. Observaram aumento de 150% da carga de fissuração das vigas protendidas em relação às referências, que não possuíam nenhum reforço. A aplicação da protensão dos laminados permitiu um aumento da área compressiva da viga, aumentando a capacidade de carga após o escoamento do aço, que aconteceu em cargas até 40% maiores que a da viga de controle. Além disso, houve mudança no modo de falha das vigas com laminados protendidos e sem protensão, enquanto estas sofreram delaminação na cobertura de concreto, as outras falharam por tração do laminado na região de maior momento, no centro do vão.

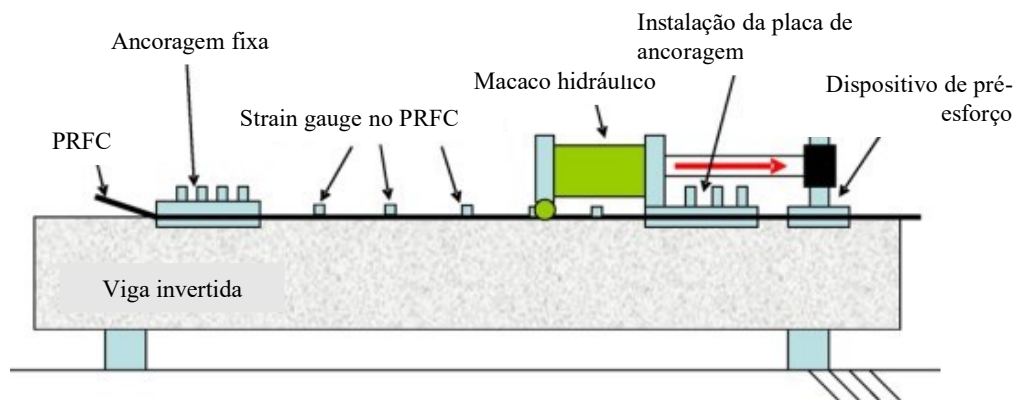
Figura 2.23 – Sistema de protensão de laminados idealizado por Wight et al. (2001)



(fonte: adaptada de WIGHT et al., 2001)

Woo et al. (2008) estudou o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com laminados de PRFC protendidos por meio de um dispositivo de reação contra a viga. O conjunto era composto de um sistema de ancoragem fixo em uma extremidade, e uma ancoragem ativa na outra, ligada a um macaco hidráulico que realizava a protensão através do tracionamento de um pino, anexo à ancoragem ativa (Figura 2.24). O estudo analisou diferentes taxas de armadura de tração, bem como níveis de protensão. Os resultados dos ensaios estáticos indicaram que quanto menor a taxa de armadura de aço na viga, maior é a capacidade de flexão das vigas reforçadas com laminados, que pode aumentar a carga final em até 243%.

Figura 2.24 – Sistema de protensão realizado por Woo et al. (2008)



(fonte: adaptada de WOO et al., 2008)

Variações no nível de protensão, colagem ou não do PRF nas vigas e o comprimento do vão em sistemas de reforço com laminados protendidos foram estudados por Yang et al. (2009). Os autores obtiveram incrementos da carga final das vigas protendidas de até 150%. O modo de falha observado para as vigas com reforço protendido foi de ruptura do PRFC, sendo que as vigas com lâminas coladas mantiveram a sua rigidez desde as cargas iniciais até a de descolamento, com posterior ruptura.

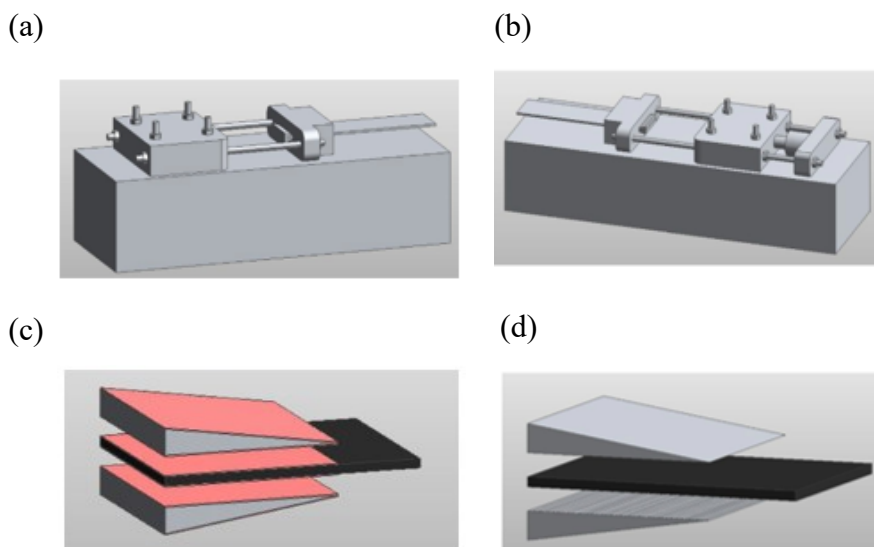
Nesse sistema, as vantagens proporcionadas pela protensão dos laminados de PRF antes de serem aplicados como reforços em estruturas de concreto armado, como, aumento da carga última, carga de fissuração e da carga registrada no momento de escoamento da armadura de tração, redução da largura de fissuras e aumento da rigidez, foram observados por Wang et al. (2012), You et al. (2012), Pellegrino e Modena (2009), Fernandes et al. (2013), Gao et al (2016), Rashid et al. (2019).

Um estudo com vigas de concreto armado de seção T submetidas a carregamentos estáticos e cíclicos foi realizado por Peng et al. (2016). O sistema de protensão utilizado foi proposto pelos

autores, empregando uma tensão de 1000 MPa. Em comparação à viga referência, a eficiência de uso da placa PRFC protendida foi até 83% superior. No ensaio cíclico, as vigas com reforço protendido com menor carga de fadiga (45 kN) sobreviveram a 3 milhões de ciclos de carregamento e a viga protendida com maior carga (70 kN) suportou 2 milhões de ciclos de carregamento.

Wang et al. (2020) realizou um estudo em vigas de concreto armado reforçadas com laminados de PRFC protendidos através de sistemas de protensão de reação contra o elemento, com dois sistemas distintos, nomeados A e B. A (Figura 2.25 (a); (c)) é um sistema de protensão com ancoragem de placas aparafusadas na viga, na extremidade fixa, e utiliza resina no clipe de aço, de modo a prender o laminado. O sistema B é semelhante, possuindo como principal diferença a presença de ranhuras no clipe de aço (Figura 2.25 (d)), sendo por esse motivo considerada uma ancoragem mecânica. A protensão é aplicada através dos macacos hidráulicos e posteriormente é mantida com parafusos de tensionamento. A força de protensão para a placa de PRFC (50 mm x 3 mm) foi de 200 kN (55,6% da carga final da placa). As vigas foram submetidas à ensaio de flexão estática à quatro pontos, obtendo como resultados melhorias nas cargas de ruptura e em capacidade de carga de 60% e 32% respectivamente. Além disso, o sistema de ancoragem mecânica com ranhuras do clipe de aço (Sistema B) provoca ruptura do PRFC como modo de falha, enquanto a ancoragem A provocou escorregamento do laminado.

Figura 2.25 – (a) Sistema de protensão A: extremidade fixa; (b) Sistema de protensão A: extremidade de tensionamento; (c) clipe de aço do sistema A; (d) clipe de aço do sistema B

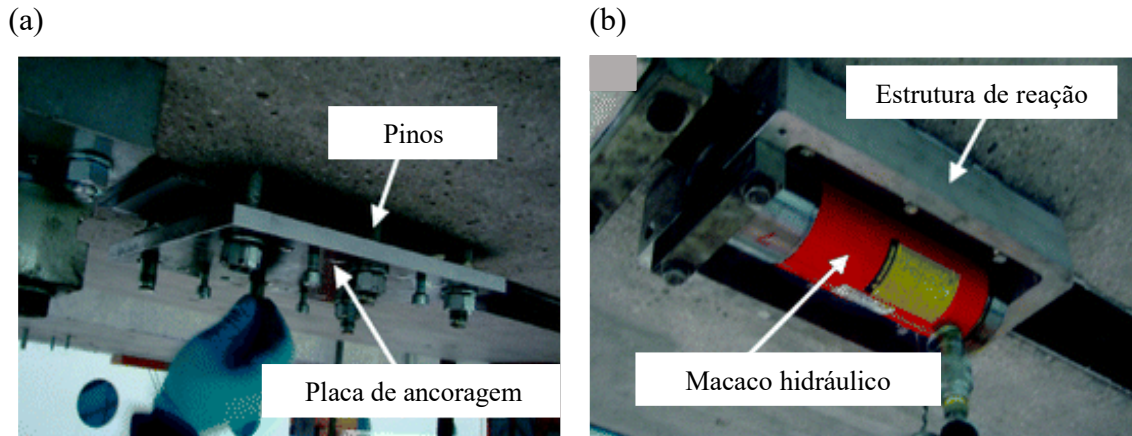


(fonte: WANG et al., 2020)

Alguns sistemas comerciais estão disponíveis atualmente para aplicação da protensão de laminados de PRF, como o dispositivo elaborado pela S&P Clever Reinforcement Company,

representado na Figura 2.26. O sistema é composto por uma ancoragem fixa (Figura 2.26 (a)) e uma extremidade ativa, onde o macaco hidráulico que realiza a protensão é instalado (Figura 2.26 (b)).

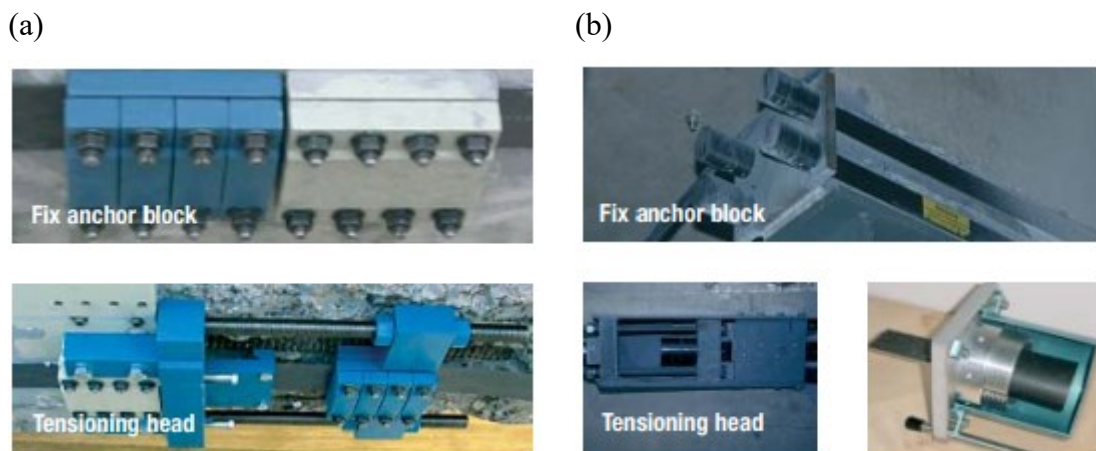
Figura 2.26 – Sistema de protensão de laminados S&P Clever Reinforcement Company: (a) ancoragem fixa; (b) ancoragem que realiza protensão



(fonte: adaptada de MICHELS et al., 2016)

Outros dois sistemas de protensão de laminados são comercializados pela Sika®, nomeados de Sika LEOBA CarboDur LCII e Sika-StressHead, ambos são compostos de um dispositivo de ancoragem de laminados fixo, e uma ancoragem móvel com aplicação da protensão através de macacos hidráulicos. Os sistemas se diferem pelos dispositivos mecânicos de ancoragem, cujo segundo sistema possui uma cabeça de ancoragem específica de inserção do laminado. A Figura 2.27 (a) representa o sistema de protensão de laminados Sika LEOBA, e a Figura 2.27 (b) o Sika-StressHead.

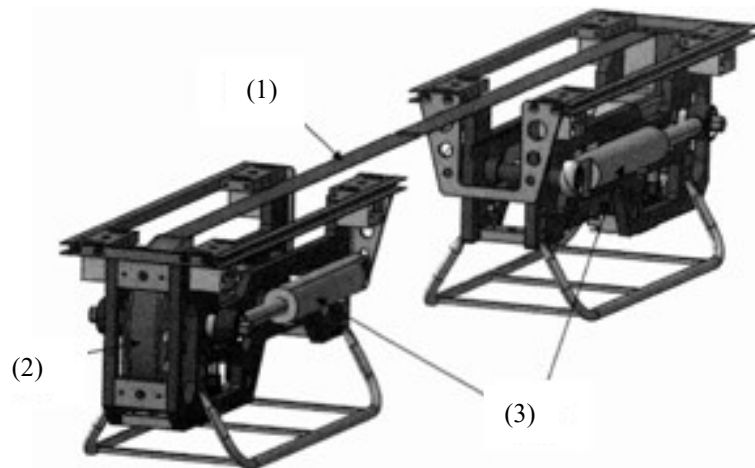
Figura 2.27 – Sistemas de protensão de laminados Sika®: (a) Sika LEOBA CarboDur LCII; (b) Sika-StressHead



(fonte: SIKa, s.d)

Um sistema de protensão de laminados contra o elemento reforçado sem uso de ancoragens mecânicas nas extremidades foi desenvolvido pelos pesquisadores Meier, Stöcklin e Winistörfer em 2002, quando o método foi patenteado. Um dos dispositivos inicialmente empregados para a protensão é mostrado na Figura 2.28, onde o laminado (1) é fixo aos rolos tensores nas extremidades (2) e a tensão de tração é aplicada ao compósito com os quatro atuadores (3) (MEIER, 2007).

Figura 2.28 – Dispositivo de protensão idealizado por Meier, Stöcklin e Winistörfer

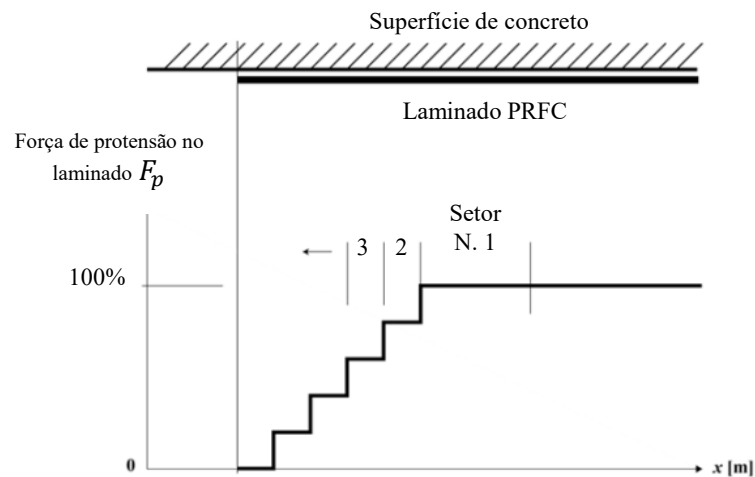


(fonte: adaptada de MEIER, 2007)

O sistema de protensão com ancoragem gradiente consiste em aplicar a protensão dos laminados em setores. Inicialmente, o reforço é dividido em comprimentos que recebem diferentes níveis de protensão, a tensão máxima é aplicada no centro desse, aderindo o laminado através de resina no elemento a ser reforçado e reduzindo o tempo de cura dessa com aquecimento. Posteriormente a resina completamente seca, o nível de protensão é reduzido e aplicado em outro setor, e assim sucessivamente, até alcançar a extremidade do laminado, onde o nível de protensão é aproximadamente zero, dispensando a necessidade de ancoragens. A Figura 2.29 ilustra esquematicamente o sistema de protensão gradual de laminados.

Em estudo realizado por Michels et al. (2013), os autores utilizaram um sistema de protensão com ancoragem gradiente. Segundo os pesquisadores, o sistema é vantajoso quando comparado aos outros métodos devido à sua facilidade de manuseio, aparência mais atraente e durabilidade melhorada, além disso, tem um tempo de aplicação inferior, devido ao processo de cura acelerada da resina por aquecimento. Como resultados experimentais estáticos em vigas, os autores observaram aumento das cargas últimas e de fissuração.

Figura 2.29 – Representação esquemática da protensão de laminados gradual



(fonte: adaptada de CZADERSKI-FORCHMANN, 2012)

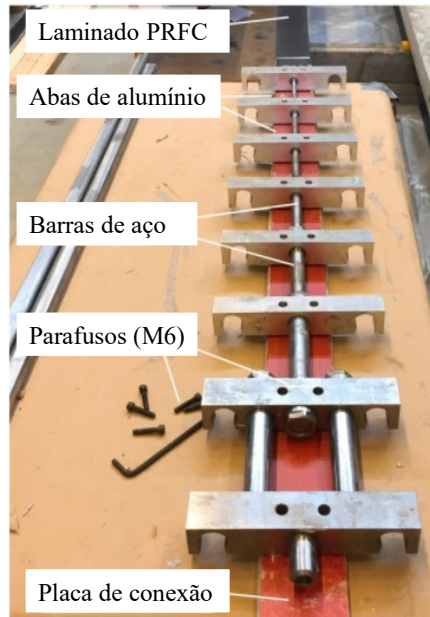
Michels et al. (2014) realizaram um estudo com vigas de concreto armado aplicando o método gradiente de protensão e ancoragem, adicionalmente, desenvolveram uma análise numérica em elementos finitos. Os resultados indicaram que as vigas exibiram comportamento dúctil até a ruptura. Além disso, as fissuras de flexão próximas à ancoragem foram evitadas, permitindo que o descolamento do laminado do substrato de concreto nessa região fosse evitado. A análise numérica permitiu prever o comportamento com proximidade quanto aos resultados experimentais.

Um novo método de protensão gradual de laminados com ausência de ancoragem mecânica foi proposto pelos autores Yang et al. (2019). O sistema de protensão era baseado no conceito de diferentes constantes de rigidez, sendo composto de abas de alumínio e barras de aço, que representavam os “nós” e “molas”, respectivamente (Figura 2.30). O laminado de PRFC era fixado a esse sistema temporário através de uma placa de conexão de PRFV que permanecia após a protensão. Esse sistema de abas e barras de aço era conectada a outro mecanismo temporário, contendo o macaco hidráulico e duas barras de conexão, ambos realizavam a protensão do sistema, que era mantida através das porcas de travamento. A força gradual da protensão era desenvolvida mediante diferentes rigidezes das barras de aço, proporcionada por variados diâmetros. Os autores concluíram que o sistema pode reduzir as tensões interfaciais ao longo da linha de adesão do substrato de concreto.

Em estudo recente, Yang et al. (2021), aplicou o sistema de protensão descrito anteriormente em vigas de concreto armado submetidas à flexão estática a quatro pontos. Os laminados de PRFC foram protendidos a 31% da deformação final do compósito. Após a remoção dos sistemas temporários, foi observada uma perda de protensão de 3,5%, resultando em uma

ancoragem segura. Os ensaios experimentais das vigas com laminados protendidos demonstraram aumento da rigidez à flexão em 103% e 43% quando comparada a viga sem reforço, e simplesmente reforçada, respectivamente. Além disso, observaram redução da largura de fissuras, aumento da carga de escoamento do aço e uma efetividade de uso do laminado em 81%.

Figura 2.30 – Sistema de protensão de laminados de PRFC sem ancoragem mecânica



(fonte: adaptada de YANG et al., 2019)

2.5.2 Sistemas de ancoragem

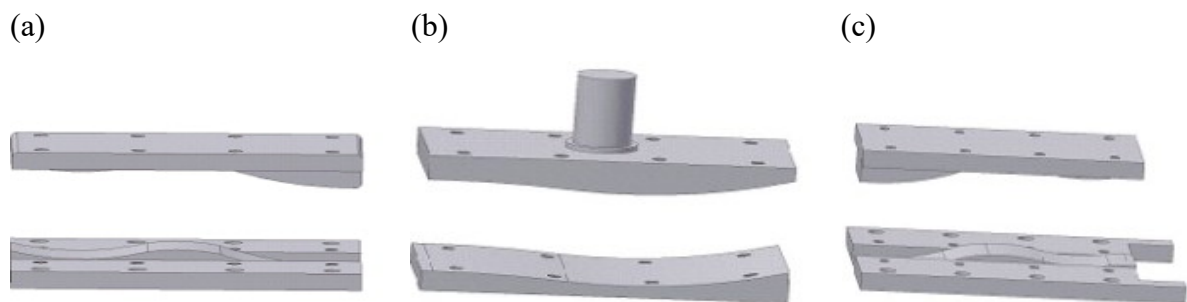
Os estudos iniciais em protensão de laminados de PRF confirmaram a necessidade de ancoragens nas extremidades do reforço, devido à alta concentração de tensões cisalhantes na linha longitudinal de interface do concreto e o compósito, imediatamente após a liberação da protensão. Além disso, as ancoragens também permitem a transferência de tensões para o substrato de concreto, permitindo que níveis satisfatórios de protensão sejam aplicados, propiciando um maior aproveitamento do sistema de reforço.

Os sistemas de ancoragem comumente utilizados podem ser divididos em dois grupos principais: ancoragens metálicas e não metálicas (KIM et al., 2008), também chamadas de ancoragens mecânicas (à base de parafuso ou fricção) e âncoras à base de epóxi, respectivamente (MOHEE et al., 2016).

2.5.2.1 Ancoragens Metálicas

As ancoragens metálicas são compostas principalmente de placas metálicas e parafusos pré-tensionados. Woo et al. (2008) desenvolveram um sistema de ancoragem metálico baseado em placas e parafusos de tensão M12. A Figura 2.31 ilustra o dispositivo idealizado pelos autores, que consiste em um sistema de ancoragem fixo (Figura 2.31 (a)), um dispositivo que realiza a protensão (Figura 2.31 (b)) e um sistema de instalação de placa de ancoragem que fixa o macaco hidráulico (Figura 2.31 (c)). O compósito é impedido de deslizar graças a curvatura da superfície, que aumenta a força de atrito. Os resultados demonstraram comportamento satisfatório do sistema de ancoragem, não ocorrendo deslizamentos ou delaminação das extremidades.

Figura 2.31 – Sistema de ancoragem de laminados protendidos: (a) ancoragem fixa; (b) ancoragem ativa; (c) ancoragem de transição



(fonte: WOO et al., 2008)

Placas de aço fixadas com oito parafusos de 16 mm de diâmetro foram utilizadas como sistema de ancoragem metálico pelos autores Pellegrino e Modena (2009). O sistema era composto de uma extremidade fixa e uma móvel, onde o macaco hidráulico realizava a protensão. O sistema demonstrou deslizamento do laminado conforme mostra a Figura 2.32, embora os resultados da protensão do PRFC tenham sido satisfatórios.

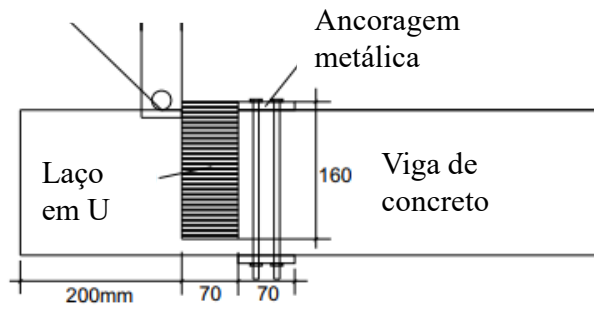
Figura 2.32 – Deslizamento do laminado do dispositivo de ancoragem durante o ensaio estático



(fonte: PELLEGRINO; MODENA, 2009)

Os autores Cao et al. (2019) utilizaram um sistema de ancoragem misto nas extremidades do laminado de PRFC protendido, composto de laços em U de PRFC e ancoragem metálica com duas placas de aço unidas à parafusos que comprimem a extremidade do reforço, evitando o deslizamento do laminado, ambos os sistemas são mostrados na Figura 2.33. Descolamentos do compósito foram observados em uma das amostras testadas.

Figura 2.33 – Sistema misto de ancoragem de laminados de PRFC protendidos



(fonte: adaptada de CAO et al., 2019)

A utilização de 75,54% da resistência à tração do laminado foi obtida através de um sistema metálico de ancoragem, composto por placas e parafusos, nos estudos de Rashid et al. (2019). Uma extremidade era fixa, enquanto a outra era ativa, onde o macaco hidráulico era fixado e a protensão era mantida, até que a resina estivesse totalmente curada e os parafusos pudessem ser apertados. O sistema de ancoragem ainda propiciou pequenas perdas de protensão iniciais, da ordem de 3,55%.

As ancoragens metálicas normalmente são as mais utilizadas, no entanto seu uso está condicionado frequentemente à realização de furos no elemento a ser reforçado, o que provoca concentrações de tensões em pontos não desejados (TWORZEWSKI et al., 2018). Além disso, outros problemas podem acometer ancoragens que usam como principal elemento materiais metálicos, como preocupações sobre seu desempenho a longo prazo, maior necessidade de manutenções, custos inevitáveis para as peças mecânicas e trabalho despendido anteriormente à aplicação do reforço (HAGHANI et al., 2015).

2.5.2.2 Ancoragens não metálicas

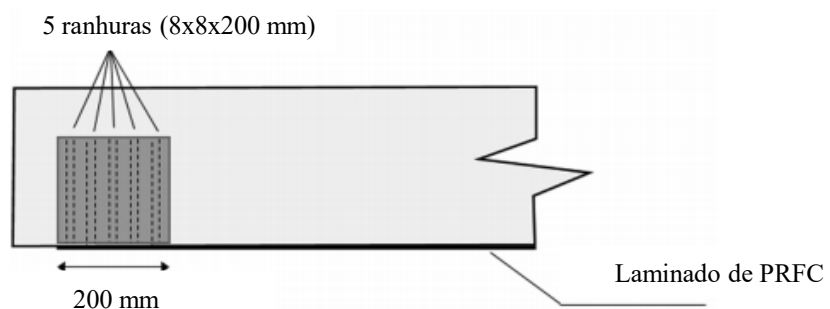
As ancoragens não metálicas utilizam geralmente como material o próprio PRF, tendo como vantagem a aplicação de materiais não corrosivos, diferentemente do sistema que emprega o aço como dispositivo de ancoragem. O sistema mais comum de ancoragem não metálica são os laços de tecido/manta de PRF em formato de U nas extremidades do reforço. Kim et al. (2008) realizaram um estudo comparando diferentes técnicas de envoltórios em U de PRFC como

dispositivos de ancoragem não metálicos para laminados protendidos. Os resultados demonstraram que o tecido em U é capaz de transferir com eficiência os esforços de tração ao substrato de concreto a partir da liberação da força de protensão, com perda de esforço inferior a 1%.

Mukherjee e Rai (2009) aplicaram o mesmo sistema de ancoragem descrito acima nas extremidades de laminados protendidos aplicados como reforço em vigas de concreto armado. Os resultados demonstraram fratura do envoltório de PRFC na parte inferior da viga e delaminação do mesmo nas laterais fixadas no elemento.

Estudos recentes foram realizados por Tehrani et al. (2019), com laminados protendidos comparando a técnica EBROG e EBR, com diferentes níveis de pré-esforço e sistemas com e sem ancoragem em U de PRF. O método mostrado na Figura 2.34, contava ainda com 5 ranhuras nas laterais da viga, de modo a aumentar a aderência do tecido à superfície de concreto. Os autores constataram a eficiência desse método de fixação das extremidades através de melhorias na capacidade de carga e ductilidade das vigas reforçadas. Além disso, o modo de ruptura das vigas reforçadas por meio do método EBROG foi alterado, de delaminação da cobertura de concreto para descolamento interfacial do reforço induzido por fissuras de flexões intermediárias.

Figura 2.34 – Dispositivo de ancoragem em U de PRFC para laminados protendidos



(fonte: adaptada de TEHRANI et al., 2019)

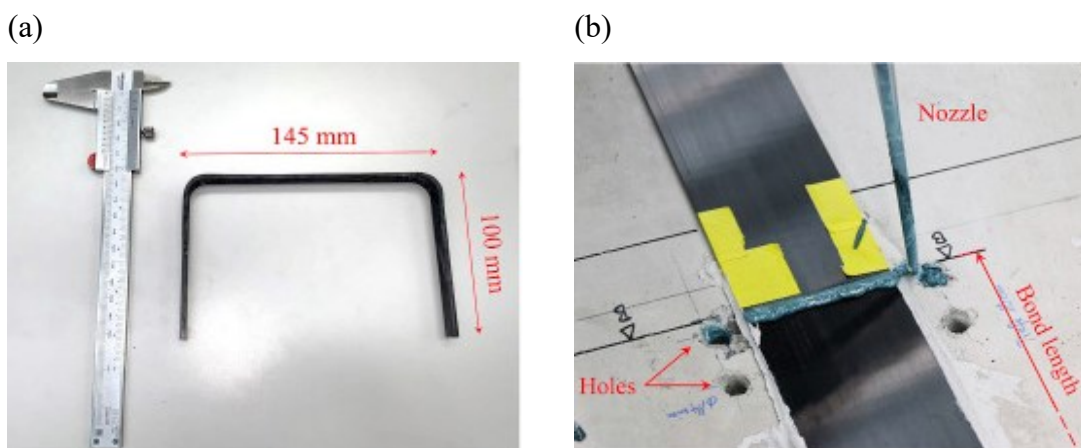
A tensão de cisalhamento provocada nas extremidades do reforço é proporcional à primeira derivada da força axial no laminado. Métodos como a ancoragem gradiente tem permitido a redução setorial da força de protensão, de modo a controlar as tensões interfaciais (HAGHANI et al., 2015). A ancoragem gradiente, conforme mencionada anteriormente, é um método alternativo de aderência em que não é necessária ancoragem adicional, onde a lâmina de PRFC protendida é aderida ao concreto com a cura da resina epóxi em etapas, até que a tensão na

extremidade do laminado seja aproximadamente zero, permitindo que a concentração de tensões que provocariam o descolamento da interface entre o concreto e o compósito seja reduzida, de modo a evitar a falha prematura (MICHELS et al., 2013).

O sistema citado foi comparado à um sistema de ancoragem mecânico nos estudos de Sena-Cruz et al. (2015) e Correia et al. (2015). Os resultados indicaram que o sistema mecânico evita o descolamento prematuro do reforço, permitindo comportamento ligeiramente superior em termos de carga final e deformabilidade, enquanto o sistema gradiente tende a descolar de maneira moderadamente repentina. Comparações analíticas realizadas por Bodzak (2019), demonstraram que independentemente do sistema de ancoragem utilizado, mecânico ou gradiente, o mais importante é o nível de protensão aplicado ao laminado antes de sua aplicação ao elemento a ser reforçado.

Um sistema inovador de ancoragem para laminados de PRFC protendidos empregando âncoras de PRFC em forma de U foi realizado por Moshiri et al. (2020), conforme Figura 2.35 (a). Lajes foram reforçadas através do método EBROG com lâminas de PRFC protendidas. As âncoras foram aplicadas em orifícios pré-furados no concreto localizados na extremidade do reforço (Figura 2.35 (b)) e preenchidos com argamassa de injeção. Os resultados demonstraram que o sistema conseguiu transferir as tensões ao substrato de concreto de maneira significativa, comprovando sua eficácia.

Figura 2.35 – Sistema de ancoragem em U de PRFC: (a) âncora em U; (b) inserção do sistema de ancoragem

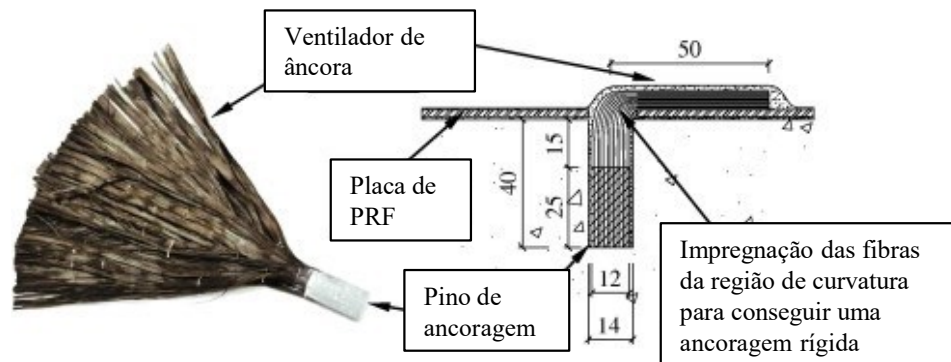


(fonte: MOSHIRI et al., 2020)

Um sistema de ancoragem que emprega âncoras de cordões de PRF é estudado amplamente por diversos pesquisados, principalmente no método de reforço aplicado externamente (EBR). As âncoras são formadas de um feixe de fibras com uma extremidade dispersa em forma circular

ou em leque e a outra extremidade embebida em resina epóxi e aplicada em um orifício pré-perfurado no elemento a ser reforçado (CASTILLO et al., 2019b). A parte inserida no elemento é denominada pino de ancoragem, enquanto a extremidade restante é designada ventilador (ZHANG; SMITH, 2012a), ambas estão ilustradas na Figura 2.36.

Figura 2.36 – Cordão de fibra de carbono aplicado como sistema de ancoragem



(fonte: adaptada de ZHANG. SMITH, 2012a)

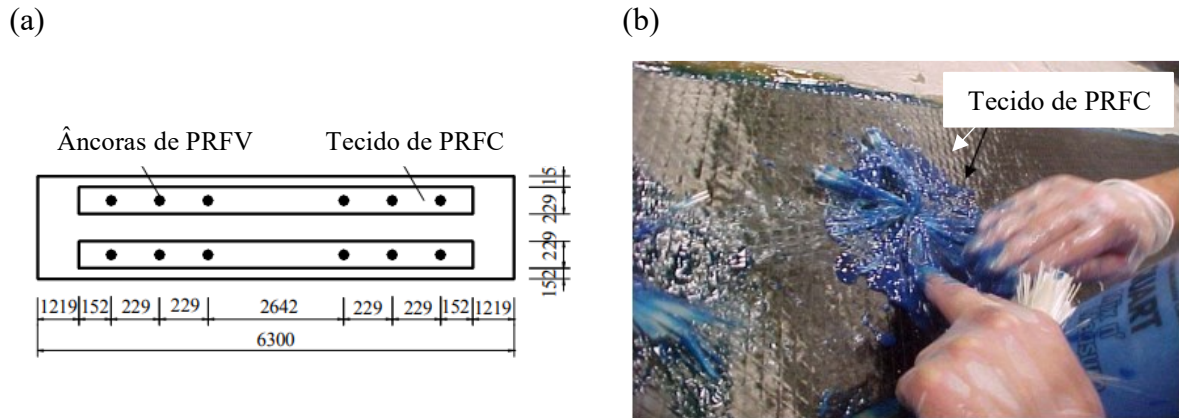
O número de âncoras, sua localização e método de instalação foram investigados por Zhang e Smith (2012a) através de testes de deslocamento controlado. Os resultados demonstraram aumento da deformação proporcionado por esse sistema de ancoragem. A ancoragem rígida se mostrou mais forte que a ancoragem flexível, porém, com menor deformabilidade. Diferentes configurações geométricas e ângulos de inserção do pino de ancoragem foram estudados pelos mesmos autores em 2012 (ZHANG; SMITH, 2012b). Os pesquisadores concluíram que quanto maior o ângulo de inserção da âncora em relação à aplicação da carga, maior era a resistência última obtida nos corpos de prova, porém com redução da ductilidade, devido ao modo de ruptura frágil observado.

Estudos com variação do ângulo do ventilador e profundidades de ancoragem do pino foram realizados por Castillo et al. (2019c). O modo de falha observado em todos os corpos de prova foi de ruptura da âncora de PRFC, além disso, houve a diminuição da eficiência em termos de carga final, com o aumento do ângulo do ventilador. Segundo os autores, ocorre a redução da resistência em função do desalinhamento das fibras em relação a origem da força, que é maior quando o comprimento de abertura do leque aumenta.

Piyong et al. (2003) realizaram um estudo com lajes de concreto armado reforçadas com tecidos de PRFC protendidos através da curvatura do elemento a ser reforçado e ancorados com cordões de PRFV. Três âncoras foram colocadas nas extremidades das lajes, em duas faixas de tecido

conforme Figura 2.37 (a), o pino de ancoragem foi colocado em orifícios no concreto e o restante das fibras dispersa de forma circular sobre o tecido conforme Figura 2.37 (b). Os resultados foram satisfatórios, evitando o descolamento do tecido do substrato de concreto, tendo como modo de ruptura a falha do tecido no centro do vão da laje com aumento da carga final de resistência dessa.

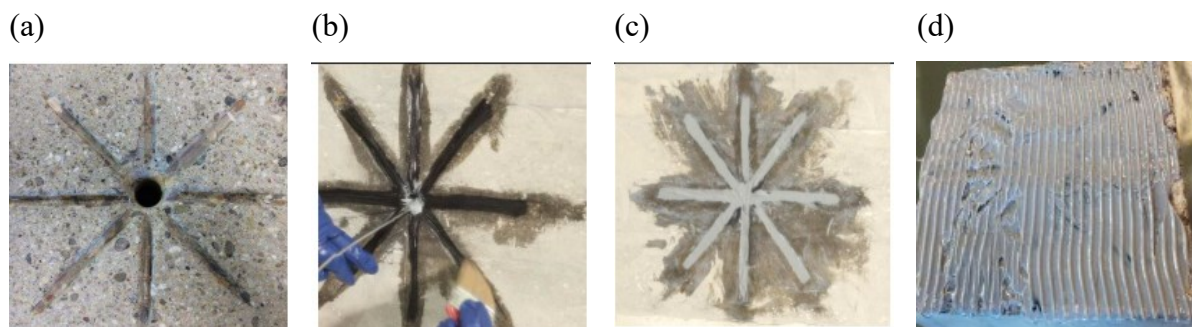
Figura 2.37 – Ancoragem dos cordões de PRFV nas lajes: (a) localização da ancoragem; (b) aplicação do sistema



(fonte: adaptada de PIYONG et al., 2003)

Um diferente formato de extremidades da âncora de PRF foi desenvolvido pela Sika® em seu sistema SikaWrap® FX 50-c. Os feixes de fibras são inicialmente impregnados até a metade e inseridos em orifícios realizados no concreto, o restante do comprimento das fibras que não foram embebidas, são divididas igualmente e aplicadas em 8 fendas na superfície do elemento com posterior aplicação do tecido de PRF sobre essa, conforme Figura 2.38.

Figura 2.38 – Sistema de aplicação do cordão de fibras de carbono em fendas: (a) abertura do orifício e das fendas; (b) inserção do cordão de fibra de carbono; (c) aplicação de resina nas fendas; (d) aplicação de resina para receber o tecido



(fonte: SIKA, 2016)

Estudo realizado por Menon et al. (2020) com vigas de concreto armado simplesmente reforçadas com polímeros reforçados com fibras ancoradas através do sistema acima,

demonstraram resultados satisfatórios em relação a transferência de tensões do elemento de reforço ao substrato de concreto, comprovados por meio da mudança de falha por deslocamento para ruptura do laminado.

2.5.3 Nível de pré-esforço

A tensão de pré-esforço a ser aplicada no laminado de PRF deve ser determinada de modo que não ocorra falha do material e do substrato de concreto quando da liberação dessa. O máximo pré-esforço que pode ser empregado depende das propriedades físicas e características geométricas do laminado. Segundo estudo desenvolvido por Triantafillou et al. (1992), a força de protensão máxima que pode ser aplicada ao laminado sem uso de ancoragem externa corresponde a um intervalo de 15 a 20%, dependendo das propriedades do PRF.

Segundo Meier (1995) níveis de protensão de 50% da capacidade última do laminado de PRF devem ser aplicados para explorar com capacidade suficiente as propriedades do material. Sem nenhuma ancoragem, os estudos realizados demonstravam falha de delaminação das extremidades com apenas 5% de nível de protensão.

Níveis de protensão de 0,4%, 0,6% e 0,8% da deformação do laminado de PRFC foram aplicados por Woo et al. (2008) em vigas de concreto armado reforçadas, submetidas à ensaios estáticos. Os autores observaram que com o aumento do percentual da deformação do laminado, o escoamento da barra de aço e a carga de fissuração foram retardados. Além disso, a maior carga última, foi verificada para o percentual de 0,8%, porém, com baixa alteração em relação às outras porcentagens. Comportamento também constatado por Mukherjee e Rai (2009) que empregaram níveis de pré-esforço de 5 a 20% da resistência axial dos laminados de PRFC em vigas de concreto armado, ensaiadas estaticamente. Os resultados demonstraram que a carga final e de fissuração não foram alteradas significativamente com os diferentes percentuais aplicados, ademais, o deslocamento máximo das vigas diminuiu com o aumento do nível da protensão.

Yang et al. (2009) empregaram níveis de protensão de 20%, 40% e 60% da resistência à tração de laminados de PRFC, que foram aplicados como reforço em vigas de concreto armado. Observaram aumento do índice de ductilidade das vigas reforçadas com laminados protendidos conforme o nível de protensão diminuía. As cargas finais foram semelhantes para ambos os níveis de protensão, indicando comportamento equivalente aos dois estudos anteriores.

Os autores Wang et al. (2012) pesquisaram níveis de protensão de 36%, 40%, 50% e 60% da capacidade dos laminados de PRFC em vigas de concreto armado, constatando que quanto maior o nível de pré-esforço, maior a rigidez flexural da viga, e o fator de ductilidade de deslocamento diminui. Segundo os autores, isso ocorre devido a capacidade de alongamento dos laminados que diminui com a aplicação da deformação inicial. You et al. (2012) também observou ruptura frágil de laminados sem qualquer aviso prévio ou delaminação do concreto, quando empregado nível de protensão de laminados de 70% da capacidade de resistência à tração do PRFC.

Um nível de protensão de laminados maiores que 40% da capacidade de resistência à tração aumenta a carga de fissuração e de escoamento da armadura de aço, enquanto que níveis menores que 60% garante um modo de falha dúctil para as vigas, determinando um valor ideal para protensão em 50% da capacidade de resistência à tração do PRF (YOU et al., 2012). Porcentagem também estabelecida como limite de acordo com estudos realizados por Gao et al. (2016) que afirmaram que um aumento da protensão poderia levar o laminado a um modo de ruptura frágil. Semelhantemente, os autores Rashid et al. (2019) indicam um nível de 40% da resistência máxima do laminado de PRFC como o percentual mais otimizado.

2.5.4 Perdas de pré-esforço

As perdas de pré-esforço de polímeros reforçados com fibras protendidos se assemelham aos observados em sistemas de protensão convencionais de concreto armado, sendo comumente destacadas em perdas imediatas e progressivas. As perdas imediatas são caracterizadas principalmente pela redução de tensões após a liberação da protensão devido ao encurtamento elástico do concreto e a interação do sistema de ancoragem e o PRF. A primeira é observada sobretudo em sistemas pré-tensionados e em pós-tensionados com mais de uma camada de reforço, enquanto o deslizamento da interface no adesivo ou na ancoragem metálica se concentra especialmente nos sistemas de reação contra o próprio elemento a ser reforçado. As perdas por atrito podem ser desconsideradas em sistemas de reforço com PRF em função da lubrificação da interface provocada pela resina (WANG et al., 2012).

Segundo o documento *Bulletin 14* do *fib* (FIB, 2001), a perda devido ao encurtamento elástico do concreto pode ser estimada em 2 a 3%. Estudo realizado com laminados em um sistema pré-tensionado através de diferentes ancoragens com laços em U resultaram em uma perda de pré-esforço imediata inferior a 1% (KIM et al., 2008). A determinação da perda imediata da protensão pode ser aproximada por uma adaptação da equação sugerida pela NBR 6118

(ABNT, 2014) para protensão com cabos de aço através da Equação 2.19, que pode ser expressa tanto para elementos pós-tensionados como pré-tensionados, nesse último caso, a variável k assume valor de unidade.

$$\Delta\sigma_f = \frac{E_f}{E_c} (\sigma_{cp} + \sigma_{cg}) k \quad (2.19)$$

Onde:

$\Delta\sigma_f$: variação da perda de tensão;

σ_{cp} : tensão inicial no concreto no centro de gravidade da protensão devido a protensão de n laminados;

σ_{cg} : tensão no concreto devido à carga permanente mobilizada pela protensão ou simultaneamente aplicada com a protensão;

k : $\frac{n-1}{2n}$ em que n é o número de laminados;

E_f : módulo de elasticidade das fibras;

E_c : módulo de elasticidade do concreto.

Segundo estudo realizado por Wang et al. (2012), a perda de pré-esforço associada ao conjunto de ancoragem em sistemas pós-tensionados pode ser estimada através da seguinte expressão:

$$f_A = E_f \frac{\Delta_a}{L} \quad (2.20)$$

Em que f_A corresponde a perda de tensão derivada dos dispositivos de ancoragem, L o comprimento do laminado entre as fixações e Δ_a é o deslizamento de ancoragem. Os autores determinaram um valor aproximado para a última variável, sendo igual a 0,96 quando a liberação da força de protensão ocorre após a cura da resina no sistema de ancoragem, e igual a 1,2 quando a fixação do laminado é realizada através de parafusos ou a cura da resina ainda está incompleta no momento da liberação do pré-esforço. No estudo foi observado uma perda devido ao sistema de ancoragem de aproximadamente 14% e 18% para liberação da protensão após a cura da resina e sem a cura dessa, respectivamente. Diferentemente, os autores Li et al. (2021) constataram uma perda devido ao conjunto de ancoragem após a liberação da força de protensão de cerca de 3,44% e 7,16% para níveis de pré-esforços iniciais de 20% e 40% da resistência à tração do laminado de PRFC em um sistema de protensão pós-tensionado. Após 28 dias, os autores destacaram perdas no meio do vão e na extremidade da placa de

aproximadamente 2,88% e 5,76 % para 20% tensão inicial de protensão, e uma perda de 5,71% e 5,15% para níveis de 40% de pré-esforço, respectivamente.

Utilizando uma teoria baseada na elasticidade, os autores Kim et al. (2010) representaram a perda de protensão de curto prazo de um sistema pós-tensionado com ancoragens mecânicas. Os autores recomendam uma perda de até 10% da tensão inicial para a ancoragem proposta.

As perdas progressivas da protensão ocorrem devido à retração e fluência do concreto e o relaxamento do PRF. Os autores Wang et al. (2012) determinaram que a perda de pré-estresse devido ao relaxamento de laminados de PRFC é influenciada principalmente pelo nível de protensão efetivo inicial tendo um comportamento não linear nas primeiras 100 horas, com posterior linearidade e alteração significativamente baixa da tensão, podendo ser aproximada por meio das seguintes expressões:

$$f_R = \frac{(1-\beta)f_{fi}}{100} \quad (2.21)$$

$$\beta = 0,275 \frac{f_{fi}}{f_{pu}} - 0,083 \quad (2.22)$$

Onde f_R é a perda por relaxamento do PRFC, f_{fi} e f_{pu} é a tensão inicial imposta ao laminado e a tração final, respectivamente. No estudo os autores destacaram que a perda devido ao relaxamento do PRFC foi de aproximadamente 3,7%, porém a perda esperada baseada nos testes e no nível de tensão inicial aplicado era da ordem de 2,2%.

Segundo a norma ACI 440.4R-04 (ACI, 2004), o relaxamento de polímeros reforçados com fibras é obtido de três fontes, relaxamento da resina, alinhamento das fibras e relaxamento das fibras. Valores de 0,6 a 1,2% podem ser esperados devido ao relaxamento da resina quando originadas de processos de pultrusão dos elementos. O endireitamento das fibras tem um percentual semelhante, sendo somado às perdas por relaxamento um valor aproximado entre 1 a 2%. Quando utilizadas fibras de carbono, o relaxamento das fibras pode ser suposto como zero, para as aramidas o percentual de perdas pode ser de 6 a 18% em 100 anos.

As perdas decorrentes da retração e fluência do concreto podem ser estimadas em 10 a 20% ao longo da vida útil da estrutura, sendo considerada semelhante à perda esperada em estruturas protendidas com aço (FIB, 2001). Um modelo incremental de determinação da perda foi proposto pelos autores Wang et al. (2014), que consideraram que uma viga de concreto armado reforçada com laminados de PRFC protendidos poderia ser considerada como uma viga mista

e entre os materiais estaria uma camada de ligação adesiva. Os autores obtiveram resultados satisfatórios, com maior diferença de 2,2% entre os resultados experimentais.

3 METODOLOGIA DE PESQUISA

O presente estudo compreendeu a análise experimental de vigas de concreto armado reforçadas com laminados de PRFC protendidos e não protendidos, submetidas a ensaios estáticos de flexão à quatro pontos, onde verificou-se a resistência mecânica em termos de carga de fissuração, resistência última e deflexão. Além disso, foi possível entender o comportamento mediante perdas de protensão e modos de falha do sistema de ancoragem não metálicos. Nesse capítulo são apresentadas as características dos materiais utilizados e das vigas estudadas, bem como, o programa experimental realizado, os resultados serão apresentados no Capítulo 4.

3.1 CARACTERÍSTICAS DA PESQUISA E MATERIAIS

A pesquisa foi realizada com 8 vigas de concreto armado, sendo divididas em 4 grupos com dois corpos de prova cada um, os detalhes são apresentados no item 3.2. Os grupos se diferenciam pelo conjunto de reforço empregado e pelo sistema de ancoragem, de modo a compreender a variação do sistema não mecânico em protensão de laminados de PRFC, podendo ser classificados conforme nomenclatura expressa na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 – Nomenclatura e classificação das vigas

Grupo	Descrição	Denominação
1	Vigas testemunho, sem nenhum reforço externo	VT
2	Vigas simplesmente reforçadas com laminados de PRFC	VS
3	Vigas reforçadas com laminados de PRFC ancorados com laços em U de manta de fibra de carbono	VSU
4	Vigas reforçadas com laminados de PRFC protendidos ancorados com sistema não metálico constituído de laços em U	VPU

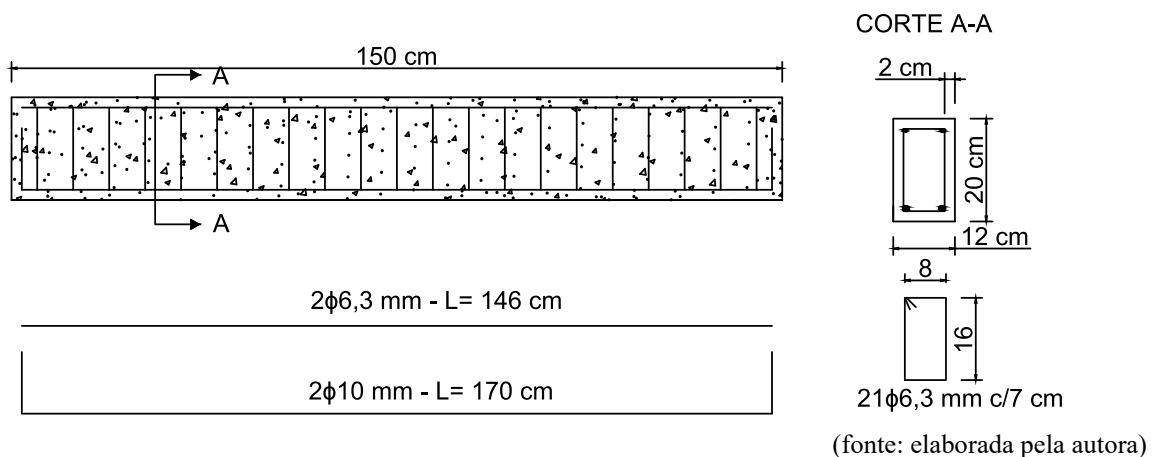
(fonte: elaborada pela autora)

3.1.1 Caracterização das vigas

As vigas idealizadas possuem 12 cm de base e 20 cm de altura, com comprimento de 150 cm. As propriedades geométricas foram definidas tomando como base trabalhos anteriormente realizados e limitações encontradas no equipamento de flexão estática a quatro pontos disponível no Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME).

O dimensionamento das armaduras de flexão foi desenvolvido conforme o Estado Limite Último de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), considerando o diagrama simplificado de distribuição de tensões e deformações em uma seção retangular de concreto, de modo que atuassem no Domínio II de deformação, admitindo o máximo alongamento permitido para a armadura de aço e que o concreto não romperia por compressão. Nesse sentido, a área de aço (A_s) calculada foi de $1,57 \text{ cm}^2$, composta por $2 \phi 10 \text{ mm}$, correspondente a uma taxa de armadura longitudinal de 0,65%. Como armadura de compressão foram considerados $2 \phi 6,3 \text{ mm}$. Os esforços de cisalhamento foram verificados através de barras de $\phi 6,3 \text{ mm}$ a cada 70 mm , o que representa um superdimensionamento da armadura transversal de modo a evitar a ruptura por esforços cortantes nas vigas reforçadas. A configuração geométrica e a armadura a ser empregada em todas as vigas, incluindo as reforçadas com ou sem protensão está representada na Figura 3.1 a seguir.

Figura 3.1 – Seção transversal e detalhamento da armadura longitudinal e transversal das vigas estudadas



3.1.2 Materiais

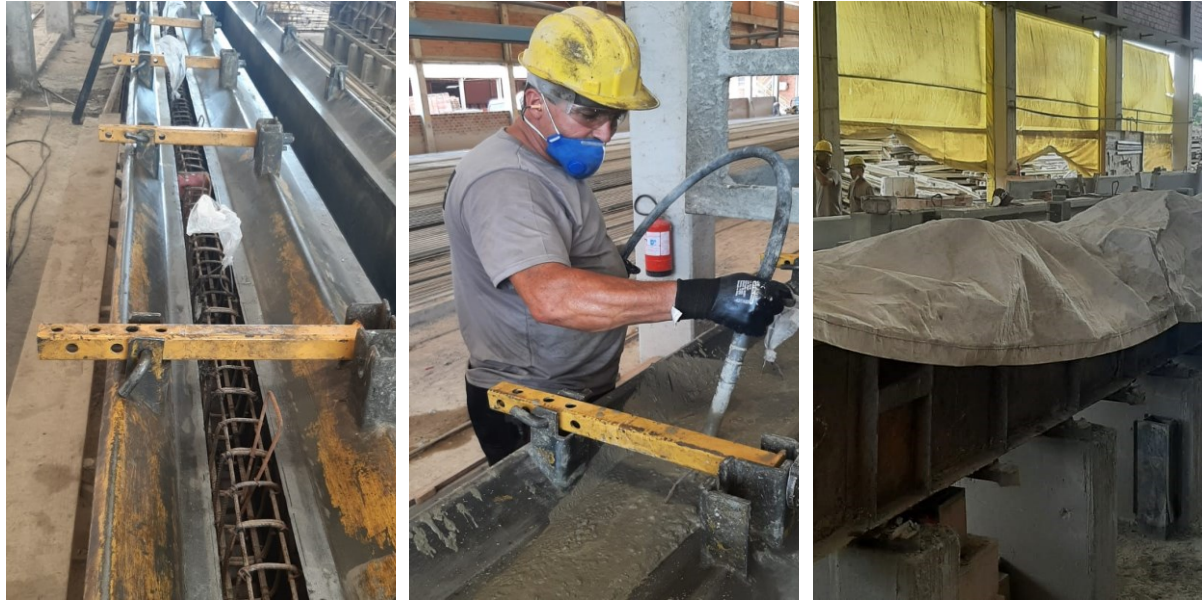
Os materiais utilizados na pesquisa, bem como suas características são apresentados nos itens a seguir.

3.1.2.1 Concreto

As vigas foram concretadas em uma fábrica de pré-moldados da região de Porto Alegre no fim de janeiro desse ano. A Figura 3.2 mostra o processo de lançamento do concreto nas formas pré-moldadas, a vibração e a cura. Definiu-se que a resistência característica à compressão do concreto aos 28 dias seria de 25 MPa, que é uma resistência comumente encontrada nas edificações. Todas as vigas foram moldadas a partir de uma única dosagem do concreto e seguiu

o traço em relação a 1 m³ de concreto exposto na Tabela 3.2 a seguir, conforme as especificações da fábrica.

Figura 3.2 – Processo de concretagem na fábrica de pré-moldados: (a) formas de concretagem; (b) vibração; (c) cura das vigas



(fonte: elaborada pela autora)

Tabela 3.2 – Traço teórico e executado na concretagem

Traço teórico (25 MPa)	Cimento	Areia fina	Areia regular	Brita 0	Água	Aditivo
	270 kg	351 kg	821 kg	778 kg	178 l	1 l
Traço executado	Cimento	Areia fina	Areia regular	Brita 0	Água	Aditivo
	270 kg	250 kg	922 kg	778 kg	178 l	1 l

(fonte: elaborada pela autora)

O controle tecnológico do concreto foi realizado por meio do ensaio de resistência à compressão e módulo de elasticidade. Foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos, sendo 3 utilizados no ensaio de compressão de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018) e 3 conforme NBR 8522 (ABNT, 2017).

O valor da resistência média a compressão do concreto é expressa na Tabela 3.3 a seguir. Os corpos de prova foram ensaiados com 327 dias após a concretagem apresentando um valor médio de 22,08 MPa, abaixo do esperado de 25 MPa aos 28 dias.

Tabela 3.3 – Resistência média a compressão do concreto

Corpo de prova	Resistência a compressão (MPa)
CP1	21,51
CP2	22,29
CP3	22,45
Média	22,08
Desvio Padrão	0,50

(fonte: elaborada pela autora)

O valor médio do módulo de elasticidade do concreto é demonstrado na Tabela 3.4, juntamente com o desvio padrão. Os corpos de prova foram ensaiados com o mesmo tempo de concretagem dos anteriores, resultando em um valor médio de 20,47 GPa. Como é possível perceber, os valores apresentados foram próximos, com um baixo desvio padrão.

Tabela 3.4 – Módulo de elasticidade do concreto

Corpo de prova	Módulo de elasticidade (GPa)
CP1	20,41
CP2	20,34
CP3	20,59
Média	20,47
Desvio Padrão	0,13

(fonte: elaborada pela autora)

3.1.2.2 Laminados de PRFC

Os laminados empregados como reforço nas vigas foram selecionados conforme observado em trabalhos anteriores, cujas dimensões são de 50 mm de largura e 1,4 mm de espessura. A empresa fabricante é a Sika®, denominados Sika® CarboDur® S 514, sendo essa a menor dimensão disponível para aplicação de superfície nessa linha da empresa.

Os laminados foram aderidos à superfície de concreto através da resina S&P *Resin 220*, em um consumo recomendado pela fabricante de até 350 g/m. Os dados de resistência à tração última (f_{fu}^*), módulo de elasticidade (E_f) e deformação última (ε_{fu}^*) disponibilizados pela fabricante são expressos na Tabela 3.5 abaixo, e a Figura 3.4 demonstra o material empregado.

Tabela 3.5 – Propriedades mecânicas do laminado de PRFC

Sika® CarboDur® S 514	
f_{fu}^* (MPa)	3.100
E_f (MPa)	165.000
ε_{fu}^* (‰)	17

(Sika®, 2016)

Figura 3.3 – Laminado de PRFC Sika® CarboDur® S 514



(fonte: elaborada pela autora)

3.1.2.3 Manta de fibra de carbono

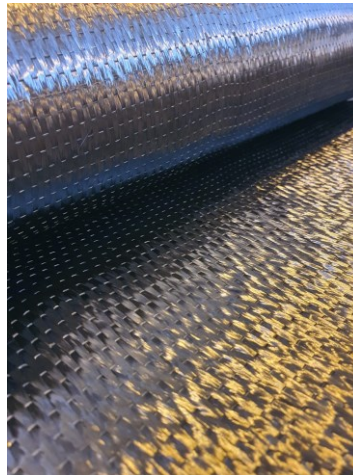
A ancoragem de laços em U foi realizada com manta de fibra de carbono Manta C-Sheet 240 da empresa S&P Clever, cujas propriedades e características estão especificadas na Tabela 3.6 e pode ser observada na Figura 3.5. Segundo a fabricante, o sistema completo de reforço é composto de resina de imprimação, argamassa de regularização (quando necessário regularizar a superfície) e resina de impregnação.

Tabela 3.6 – Características e propriedades da manta de fibra de carbono

Mantas de fibra de carbono Manta C-Sheet 240	
Massa unitária	300 g/m ²
Espessura de projeto	0,168 mm
Resistência à tração de projeto	4.300 MPa
Alongamento na ruptura	1,80 %

(S&P Clever, 2015)

Figura 3.4 – Manta C-Sheet 240

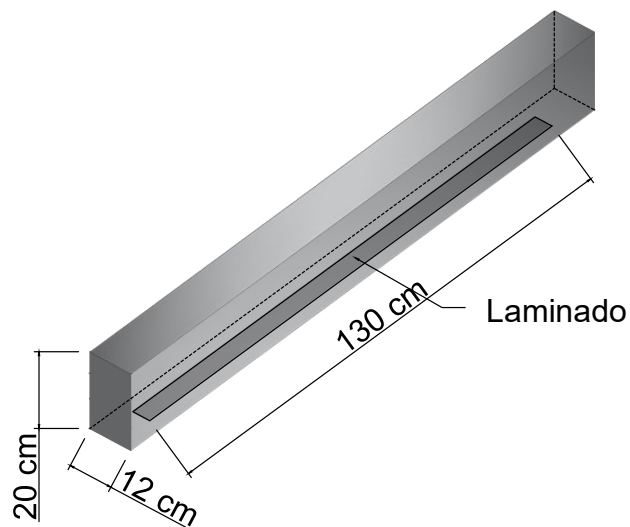


(fonte: elaborada pela autora)

3.2 SISTEMAS DE REFORÇO SIMPLEMENTE ADERIDOS (EBR)

O sistema reforçado com laminados de PRFC simplesmente aderidos na face exterior tracionada na viga foram dimensionados conforme a norma ACI 440.2R-17 (ACI, 2017) e seguem os procedimentos de iteração descritos anteriormente no item 2.4.3, onde foram considerados dados teóricos que posteriormente foram substituídos pelos dados experimentais de modo a ter uma aproximação significativa dos resultados de carga última. Além disso, o reforço foi verificado ao cisalhamento de acordo com *fib Bulletin 14*, (FIB, 2001). A viga mantém as mesmas características geométricas citadas anteriormente, bem como a armadura de flexão dimensionada. Adicionalmente, um laminado de 130 cm é aplicado na face inferior conforme demonstra a Figura 3.6, constituindo o segundo grupo de vigas a serem estudadas (VS).

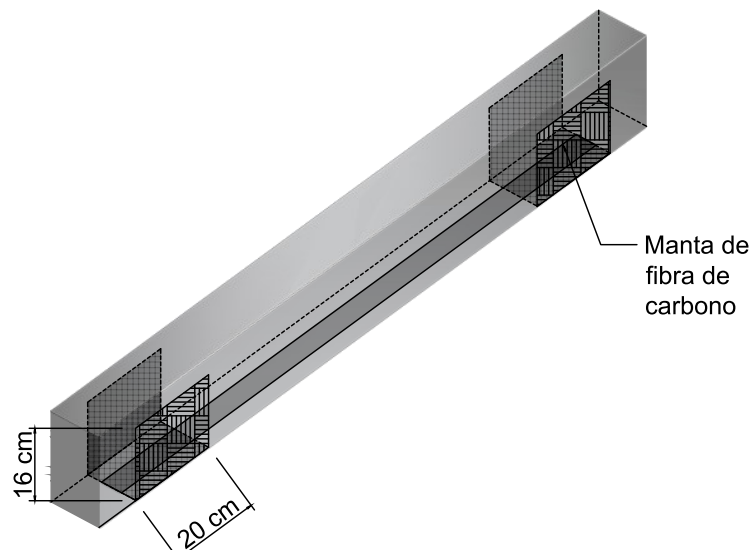
Figura 3.5 – Vigas reforçadas com laminado simplesmente aderido



(fonte: elaborada pela autora)

Segundo o dimensionamento realizado, o laminado tem uma deformação efetiva (ϵ_{fe}) superior à estabelecida para o limite de descolamento do reforço do substrato de concreto (ϵ_{fd}), indicando que essa seria a falha prevista. Nesse sentido, como método de verificação dessa condição do dimensionamento, optou-se por adicionar uma ancoragem de manta de carbono em U na extremidade aderida do laminado, configurando o terceiro grupo de vigas estudadas (VSU), representado pela Figura 3.7.

Figura 3.6 – Vigas simplesmente reforçadas com ancoragem de laços em U

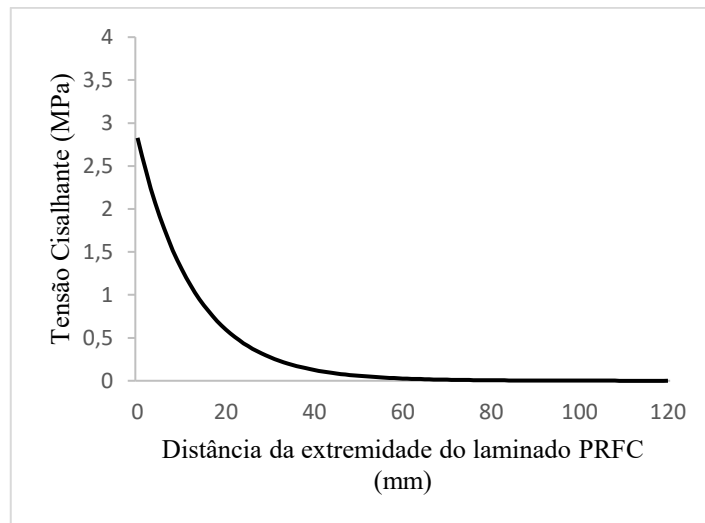


(fonte: elaborada pela autora)

Os laços em U possuem um comprimento de 20 cm e altura que representa 80% da altura da viga, de modo a simular uma limitação devido ao engastamento de uma laje. Os comprimentos dos laços em U foram dimensionados de acordo com estudo realizado por Smith e Teng (2001) no qual uma solução de forma fechada é empregada de modo a prever variações de tensões interfaciais de cisalhamento ao longo do vão da carga, sendo esse um método significativamente explorado.

Utilizando os dados da presente pesquisa, a variação da tensão interfacial em relação à distância da extremidade do laminado em direção ao centro desse está ilustrada no gráfico da Figura 3.8, onde é possível perceber que a uma distância de 100 mm da borda, as tensões cisalhantes na interface entre o concreto e o laminado são aproximadamente zero, portanto esse seria um comprimento efetivo e econômico, porém, de modo a considerar um comprimento conservador, 100 mm fora adicionados, totalizando 200 mm.

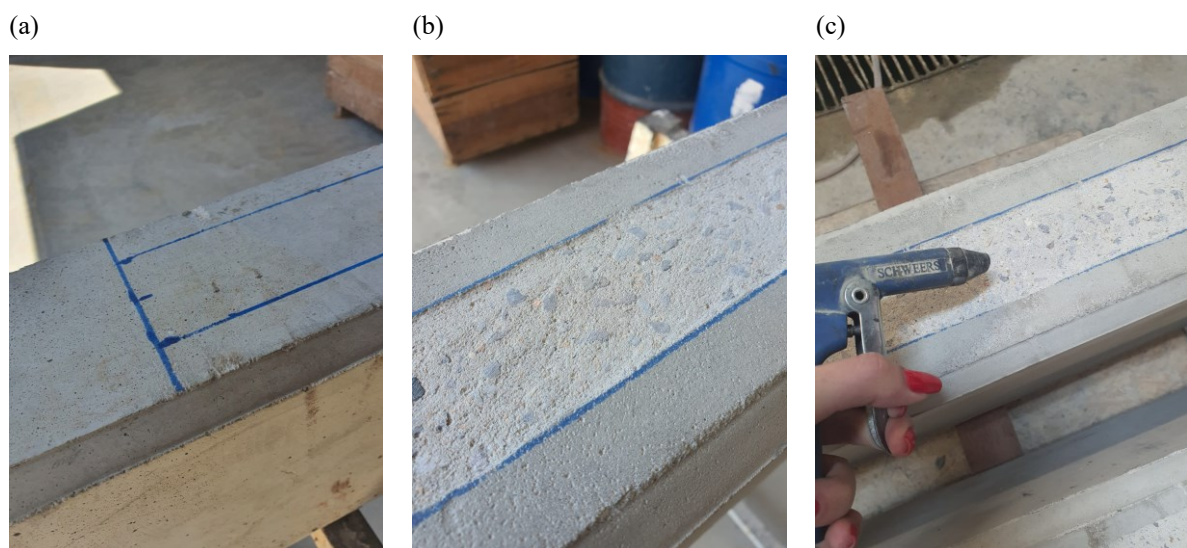
Figura 3.7 – Gráfico da tensão cisalhante interfacial entre o concreto e o laminado



(fonte: elaborada pela autora)

O sistema de reforço externo em vigas de concreto armado com laminados de PRFC seguiu a metodologia apresentada no item 2.4.1. Inicialmente, a área de aplicação do laminado foi demarcada na superfície inferior da viga, com 5 cm de largura e 130 cm de comprimento conforme pode ser observado na Figura 3.9 (a) onde foi deixado o espaço necessário para apoio da viga durante o ensaio de flexão estática a quatro pontos. Posteriormente, essa área foi desgastada com esmerilhadeira com disco diamantado (Figura 3.9 (b)) retirado o excesso de poeira com brocha trinchada retangular e aplicado o pressurizador de ar (Figura 3.9 (c)) para evitar qualquer partícula que pudesse interferir na aderência do laminado com a viga.

Figura 3.8 – Processo de desgaste das vigas reforçadas: (a) demarcação da área; (b) desgaste da superfície; (c) aplicação de ar pressurizado

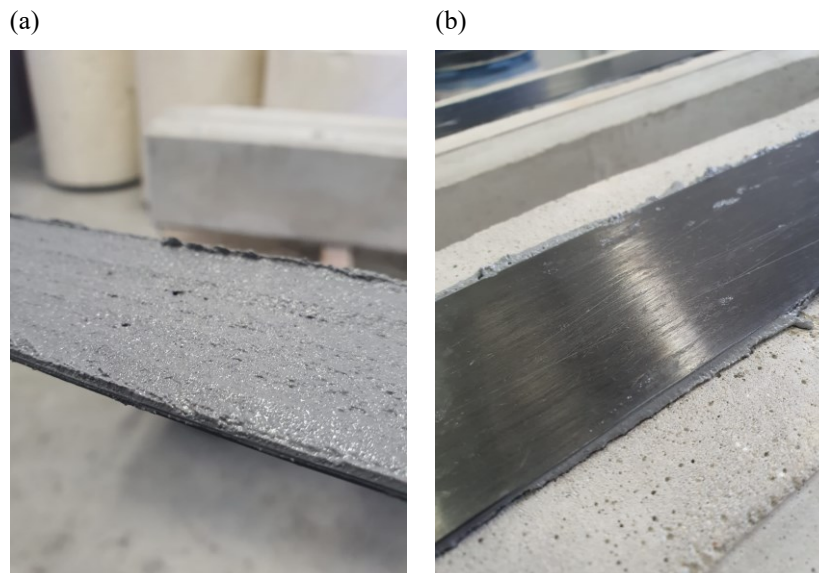


(fonte: elaborada pela autora)

A resina para a aplicação do laminado era composta de componente A e B, no entanto, no momento da abertura do primeiro componente constatou-se que o mesmo havia endurecido. Nesse sentido, a embalagem foi colocada em um recipiente com água quente e misturado até que a consistência voltasse ao normal, segundo recomendações da fabricante, o que aconteceu em aproximadamente 10 minutos. Posteriormente a esse processo, a resina pode ser misturada.

O componente A foi misturado ao B na proporção de 1:0,32g em massa, respectivamente, e aplicado ao laminado com uma espátula em uma espessura aproximada de 3 mm, constatando um consumo de cerca de 320 g/m, conforme demonstra a Figura 3.10 (a) a seguir. Em seguida, o laminado foi aplicado na viga e as bolhas de ar retiradas com o rolo, finalizando a aplicação, como pode ser verificado na Figura 3.10 (b).

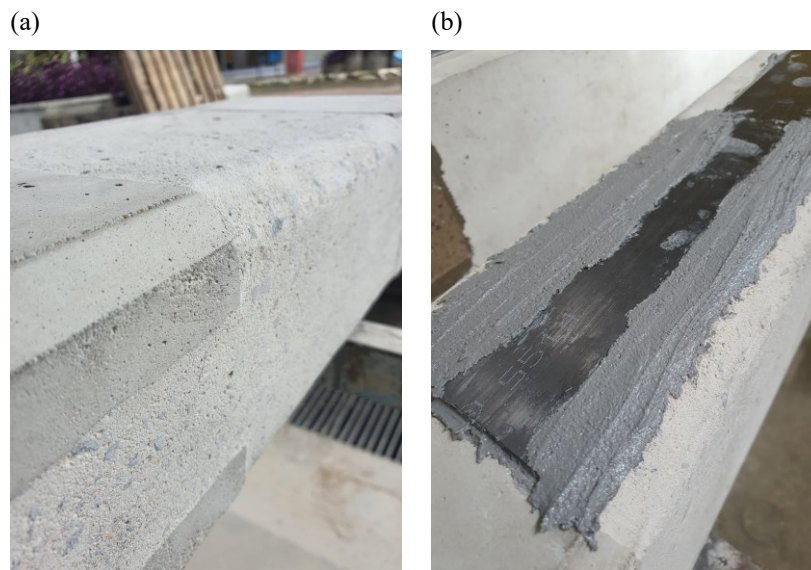
Figura 3.9 – (a) aplicação da resina; (b) laminado fixado a viga após o uso do rolo para tiragem de bolhas de ar



(fonte: elaborada pela autora)

Para o grupo 3 de vigas reforçadas (VS-U) o processo para a aplicação do laminado foi semelhante. Iniciou com a demarcação da área, incluindo os laços nas laterais das vigas. Posteriormente, a área foi degastada e os cantos arredondados de modo a evitar qualquer superfície de corte do sistema de ancoragem, conforme pode ser observado na Figura 3.11 (a). Em seguida, o laminado foi aplicado e a aresta de contato entre o laminado e a manta recebeu resina de modo a regularizar a superfície, impedido uma área de corte (Figura 3.11 (b)).

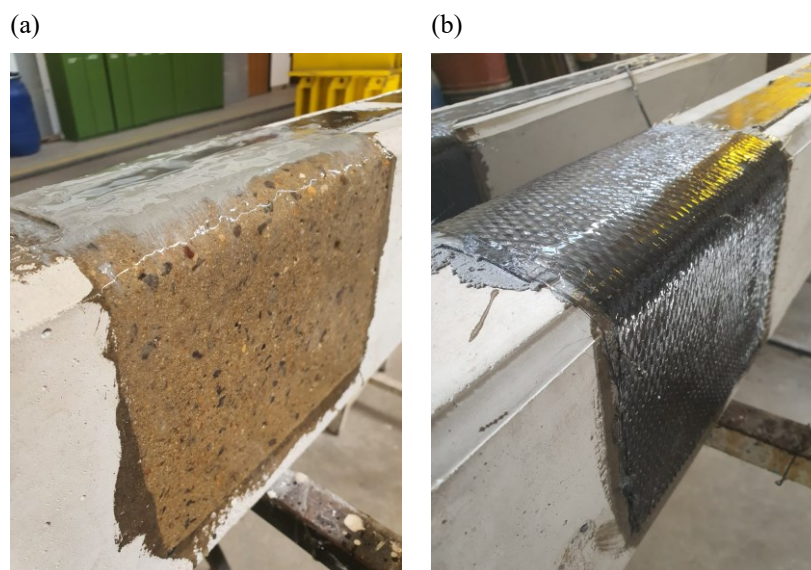
Figura 3.10 – (a) arredondamento das bordas para execução da ancoragem com laço em U; (b) nivelamento da área de contato entre a manta e o laminado



(fonte: elaborada pela autora)

A manta foi aplicada com resina apropriada para a sua aplicação, S&P Resin 55 HP, com a mistura de dois componentes A e B, na proporção de 1:0,82g em massa, respectivamente. Inicialmente, a resina é aplicada na viga de modo a saturar a superfície. Posteriormente, a manta é posicionada e saturada igualmente, permitindo a união do sistema de ancoragem com o laminado conforme pode ser verificado na Figura 3.12 a seguir, configurando o terceiro grupo de vigas (Figura 3.13).

Figura 3.11 – (a) saturação da superfície da viga para aplicação da manta; (b) sistema de ancoragem finalizado



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 3.12 – Vigas simplesmente reforçadas com ancoragem de laço em U em posição de cura, com a superfície inferior voltada para cima

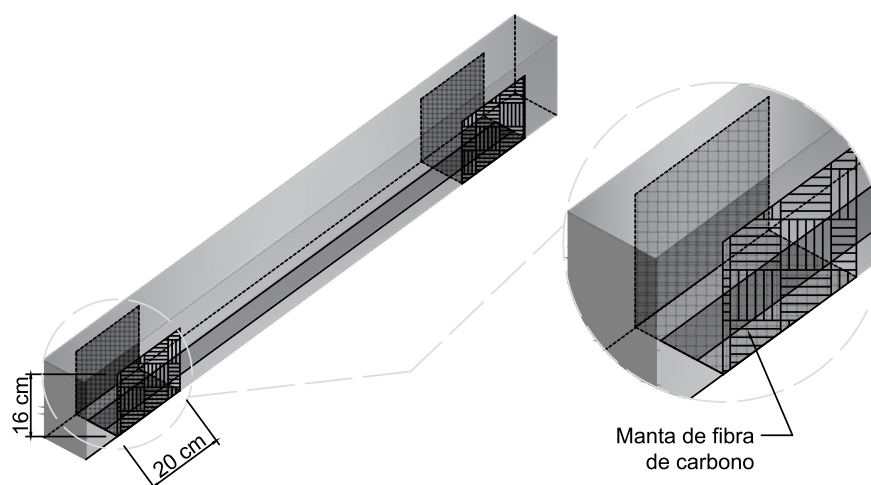


(fonte: elaborada pela autora)

3.3 SISTEMAS DE REFORÇO COM LAMINADOS DE PRFC PROTENDIDOS

As vigas reforçadas com laminados protendidos e ancoradas com sistemas não metálicos constituem o grupo 4 do presente estudo. Estas vigas são ancoradas através de laços de manta em U, ilustrados por meio da Figura 3.14. As dimensões da ancoragem seguem as mesmas considerações e dimensionamento expostos no item anterior.

Figura 3.13 – Viga com laminado protendido com ancoragem de laços em U de manta de fibra de carbono



(fonte: elaborada pela autora)

3.3.1 Sistema de protensão

A protensão foi realizada através de um sistema de reação externo independente, configurando um processo de pré-tensão, sendo desenvolvido no Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME) na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, com as limitações e condições disponíveis para a pesquisa. O conjunto é composto de um suporte externo de ferro com quatro perfis L que eram conectados através de dois perfis soldados nas extremidades apoiados sobre blocos de concreto. Os perfis L foram colocados na posição horizontal com espaço suficiente para que pudesse ser colocada a viga na dimensão anteriormente especificada, o conjunto é demonstrado na Figura 3.15 a seguir

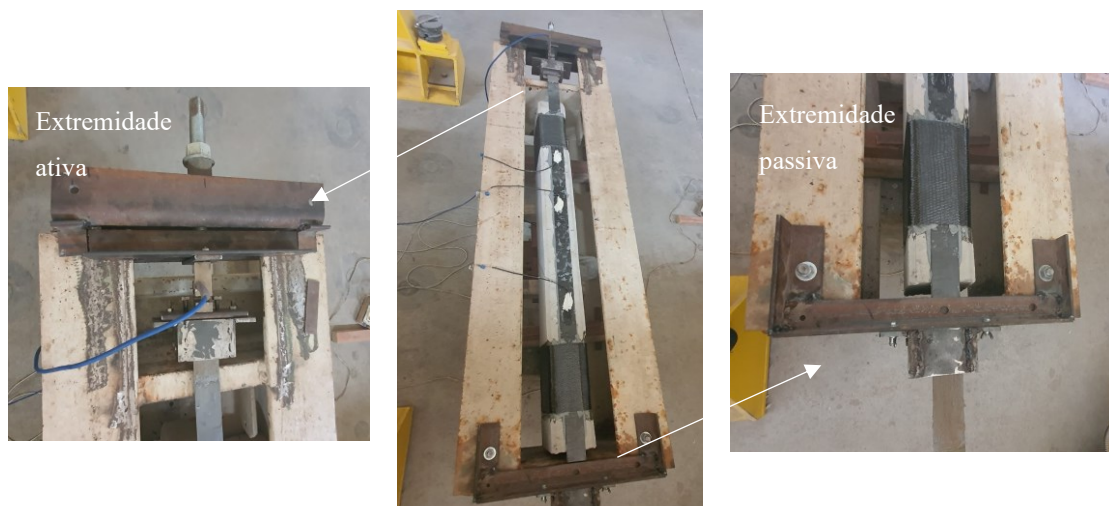
Figura 3.14 – Suporte externo de reação independente para o sistema de protensão



(fonte: elaborada pela autora)

O sistema de ancoragem da protensão foi desenvolvido com uma extremidade passiva e uma ativa, sendo demonstrada uma vista superior na figura 3.16 a seguir, onde é possível observar as extremidades do sistema, que serão descritas em seguida.

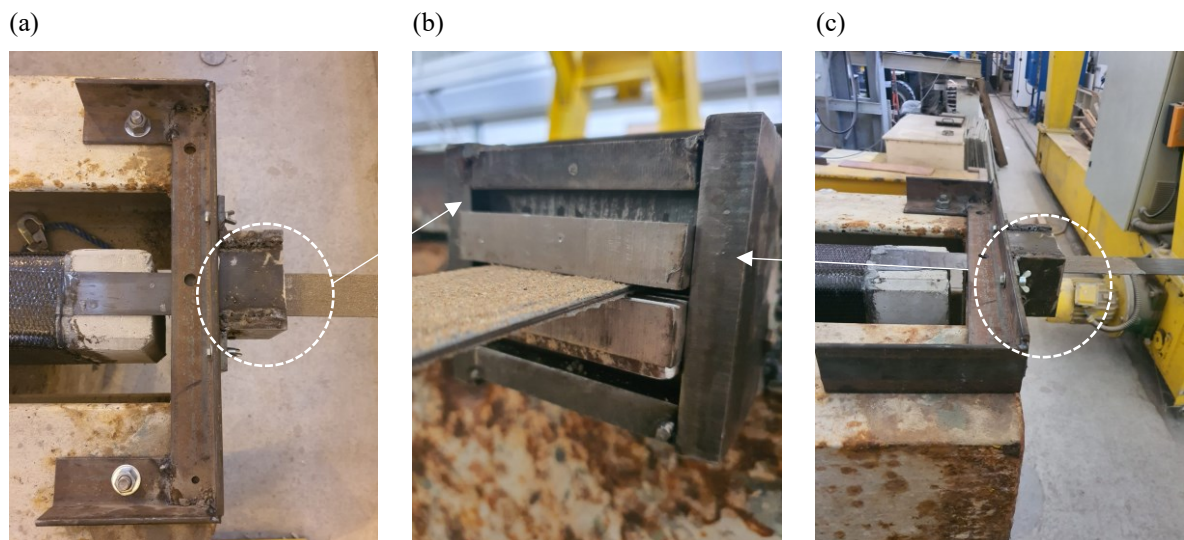
Figura 3.15 – Sistema de protensão com as definições das ancoragens



(fonte: elaborada pela autora)

A extremidade passiva era constituída de três cantoneiras unidas por solda que formavam uma ligação rígida fixada ao suporte externo de ferro através de parafusos, conforme mostra a Figura 3.17 (a). Nessa, o sistema de ancoragem passiva da protensão foi posicionado. Era constituído de 4 peças de aço soldadas que formavam uma caixa de 10,5x8 cm (Figura 3.17 (b)), com espessura de 1,2 mm, onde o sistema de travamento da protensão, em cunhas, foi inserido.

Figura 3.16 – Ancoragem Passiva: (a) vista superior; (b) caixa de ancoragem com sistema de cunhas; (c) sistema de ancoragem

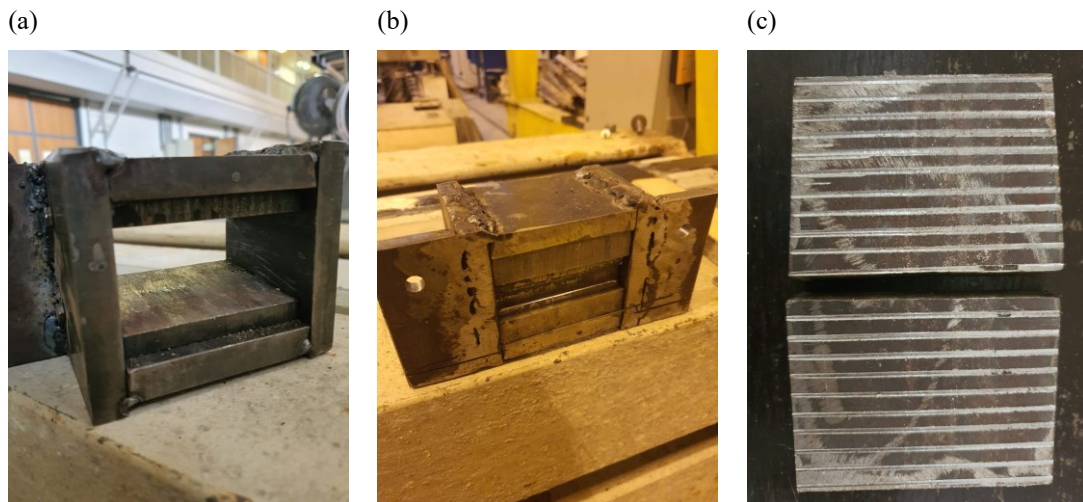


(fonte: elaborada pela autora)

O conjunto de cunhas era composto de 4 peças (Figura 3.18 (b)) que possuíam inclinação suficiente para serem encaixadas e para que realizassem o travamento do laminado conforme fosse tracionado, de modo que quanto maior o deslocamento, maior a restrição ao movimento, sendo duas peças fixas ao conjunto (Figura 3.18 (a)) e duas peças móveis. Adicionalmente, as faces em contato com o laminado, que eram móveis, foram ranhuradas, como mostra a figura 3.18 (c).

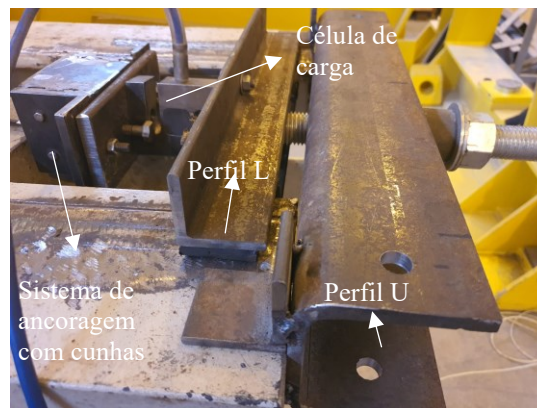
A extremidade ativa da protensão foi ancorada ao suporte externo através de um perfil U e perfis L conforme demonstra a Figura 3.19, onde o mesmo sistema de cunhas foi posicionado para ancoragem do laminado. A protensão foi desenvolvida com o rosqueamento da barra roscada de 32 mm e a leitura da carga realizada através de uma célula de carga com capacidade para 2 kN acoplada ao conjunto, como pode ser observado na Figura 3.20.

Figura 3.17 – Sistema de cunhas: (a) conjunto com partes fixas; (b) conjunto com partes fixas e móveis; (b) ranhuras nas faces das peças móveis



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 3.18 – Sistema de fixação da ancoragem ativa



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 3.19 – Sistema completo da ancoragem ativa da protensão



(fonte: elaborada pela autora)

3.3.2 Aplicação da protensão em vigas de concreto armado

Para aplicação da protensão, a viga foi posicionada sobre dois apoios de madeira sobre o suporte externo, onde foi preparada. Optou-se por realizar o reforço com os laminados e a ancoragem com laço em U anteriormente à aplicação da tensão, no tempo de trabalho da resina de 90 minutos. A viga em sua posição pré-estabelecida, demarcada e devidamente desgastada e livre de qualquer partícula que pudesse prejudicar a aderência da resina, segundo a descrição do item 3.2.1, recebeu o laminado juntamente com a resina (Figura 3.21).

Figura 3.20 – Aplicação do laminado na viga anteriormente a protensão



(fonte: elaborada pela autora)

A fixação da ancoragem com manta de laço em U foi realizada após a aplicação do laminado e do nivelamento com resina da interface de contato entre esse e a manta (Figura 3.22 (a)), evitando uma superfície de corte. Posteriormente ao conjunto de reforço ser aplicado à viga (Figura 3.22 (b)), ela foi posicionada dentro no suporte externo para aplicação da protensão.

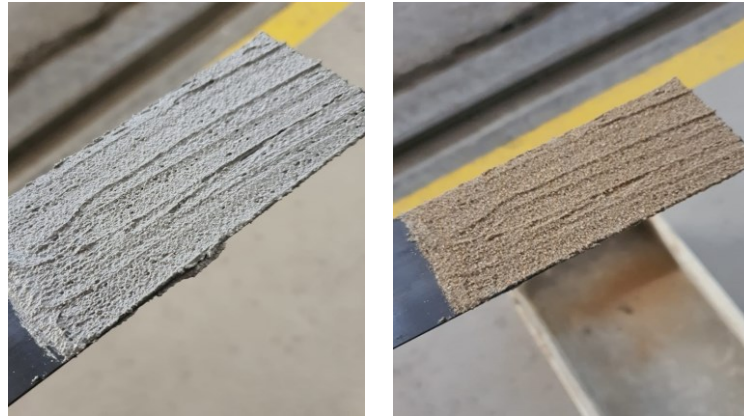
Figura 3.21 – Aplicação da ancoragem de manta com laço em U: (a) resina de nivelamento na interface entre o laminado e a manta; (b) sistema pronto para protensão



(fonte: elaborada pela autora)

De modo a aumentar a aderência do sistema através de um maior atrito durante o tensionamento, as extremidades do laminado em contato com a cunha foram preparadas com a aplicação de resina em uma espessura aproximada de 1 mm e adicionado areia na superfície, conforme pode ser verificado na Figura 3.23(a) e 3.23 (b) que demonstra o processo.

Figura 3.22 – Aumento da aderência do laminado; (a) aplicação da resina; (b) adição de areia



(fonte: elaborada pela autora)

Após o posicionamento dos laminados no sistema de ancoragem passivo e ativo, os extensômetros foram conectados ao Quantum HBM MX840A para leitura, bem como a célula de carga, e realizado a protensão com o rosqueamento da barra rosçada com chave de 1 7/8” finalizando o processo de protensão. Na figura 3.24 a seguir é possível observar o sistema completo de protensão com laminados de PRFC.

Figura 3.23 – Sistema de protensão com suporte de reação externo



(fonte: elaborada pela autora)

A força de protensão aplicada foi de aproximadamente 10 kN, que era o limite correspondente ao rosqueamento do parafuso que realiza a tração, representando um nível de protensão de 4,61% da resistência a tração do laminado de PRFC, sendo mantida a tensão durante a cura de 3 dias. Segundo a recomendação da fabricante o período total de cura das resinas era de 7 dias, no entanto, devido ao tempo disponível de realização dos ensaios, optou-se por aproximar a cura para 3 dias, onde a resina já atinge 92% da capacidade resistente a compressão e 77% da resistência a tração, segundo dados do certificado de ensaio da resina realizado em março de 2022 disponibilizados pela fabricante.

A carga e os deslocamentos foram monitorados no decorrer do período de cura, de modo a verificar as perdas da protensão no sistema de reação contra suporte externo, bem como, acompanhar as deformações ao longo do laminado.

3.4 INSTRUMENTAÇÃO

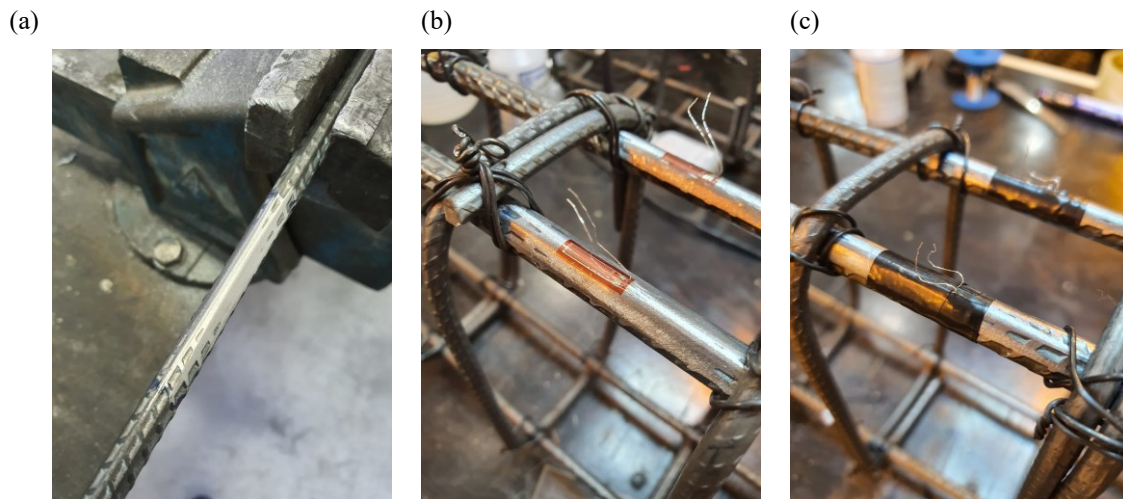
As vigas foram submetidas ao ensaio de flexão estática a quatro pontos após 3 dias de cura da resina, sendo instrumentadas com LVDT (*Linear Variation Displacement Transducer*) para monitoramento dos deslocamentos verticais no centro do vão. Além disso, as vigas reforçadas foram instrumentadas no aço, concreto e laminado, compreendendo 6 vigas, enquanto que as vigas testemunho apenas no aço, de modo a obter resultados sobre variações de deformações durante a aplicação da protensão e ensaio de flexão, corroborando para geração de dados sobre capacidade resistente das vigas, modo de falha da seção e perdas de protensão.

3.4.1 Instrumentação no Aço

O aço foi instrumentando anteriormente a concretagem das vigas, sendo posicionado no centro das duas barras da armadura longitudinal de ϕ 10 mm, apenas desviando dos estribos. Foram utilizados extensômetros da marca Kyowa do tipo KFG-10-120-C1-11, com comprimento de 10 mm e largura de 3 mm. Inicialmente, as barras de 10 mm foram lixadas conforme pode ser observado na Figura 3.25(a) e limpas com éter etílico com teor mínimo de 98%.

Os extensômetros foram posicionados nas barras com o auxílio de fita transparente e fixados com adesivo instantâneo para superfícies rígidas Loctite 496. Em seguida os fios de conexão do extensômetro foram expostos com o auxílio de pinça (Figura 3.25(b)) e isolado com fita preta, tomando o cuidado para isolar o contato dos fios com a barra de aço e entre eles, de modo a evitar um curto circuito (Figura 3.25 (c)).

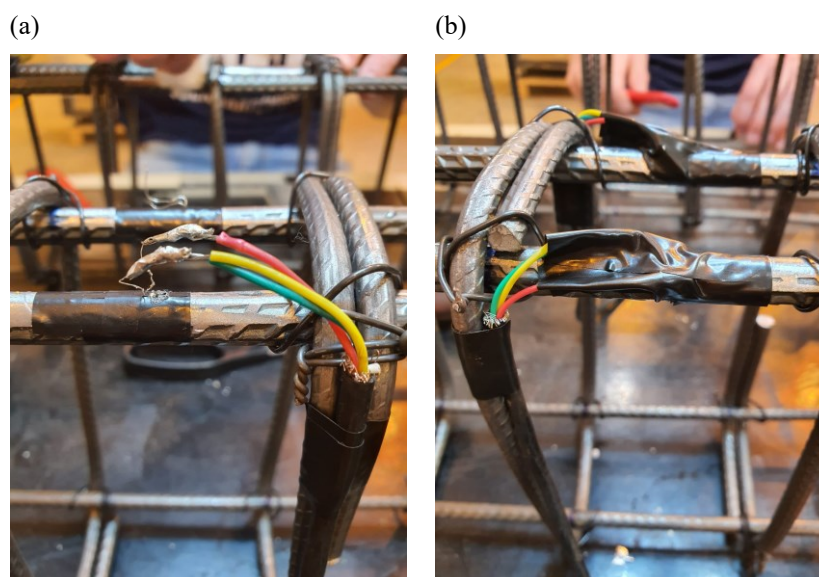
Figura 3.24 – (a) superfície lixada; (b) exposição dos fios; (c) isolamento do extensômetro

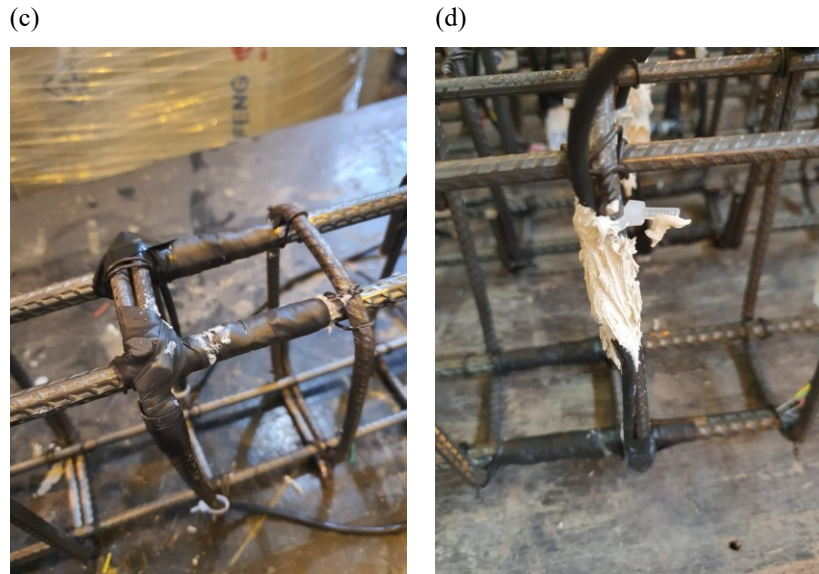


(fonte: elaborada pela autora)

Os fios de conexão do extensômetro foram ligados aos fios de transmissão através de solda, como demonstra a Figura 3.26 (a) onde foram fixados ao estribo mais próximo para evitar deslocamento ou rompimento da ligação. Com o objetivo de proteger a conexão dos fios, inicialmente, foram isolados com fita preta (Figura 3.26 (b)) aplicado adesivo PU40 e envolvido com fita de autofusão (Figura 3.26 (c)). Por fim, foi fixado o cabo de transmissão na extremidade do estribo com abraçadeira de nylon e aplicado massa plástica, para evitar um rompimento do sistema durante a concretagem (Figura 3.26 (d)).

Figura 3.25 – (a) solda do fio de transmissão; (b) isolamento dos fios com cabo preto; (c) proteção com fita de autofusão; (d) aplicação da massa plástica



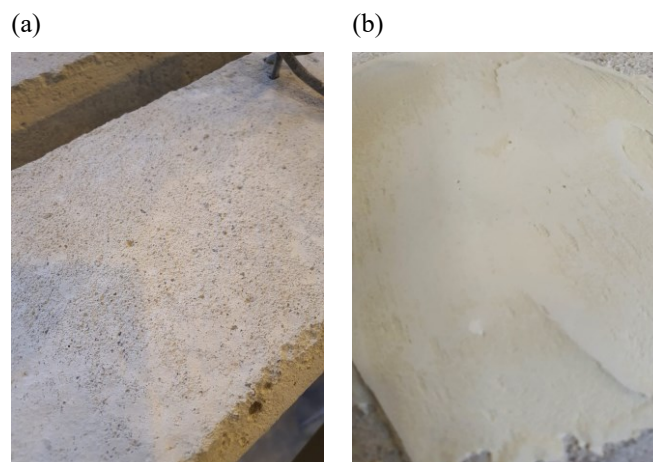


(fonte: elaborada pela autora)

3.4.2 Instrumentação no concreto

Para instrumentar o concreto, foram utilizados extensômetros da marca Kyowa do tipo KFG-20-120-C1-11, com comprimento de 20 mm e largura de 5 mm. Foram posicionados no centro da viga na superfície superior, sendo deslocado apenas o necessário devido a presença dos cabos dos extensômetros de aço. Inicialmente, a superfície foi demarcada e lixada com lixa 60. Posteriormente, foi aplicada a massa plástica universal no local e realizado o lixamento da superfície após a cura, para evitar qualquer rugosidade que pudesse interferir na leitura das deformações (Figura 3.27).

Figura 3.26 – Regularização da superfície de concreto: (a) desgaste da superfície de concreto; (b) desgaste da superfície da massa plástica.

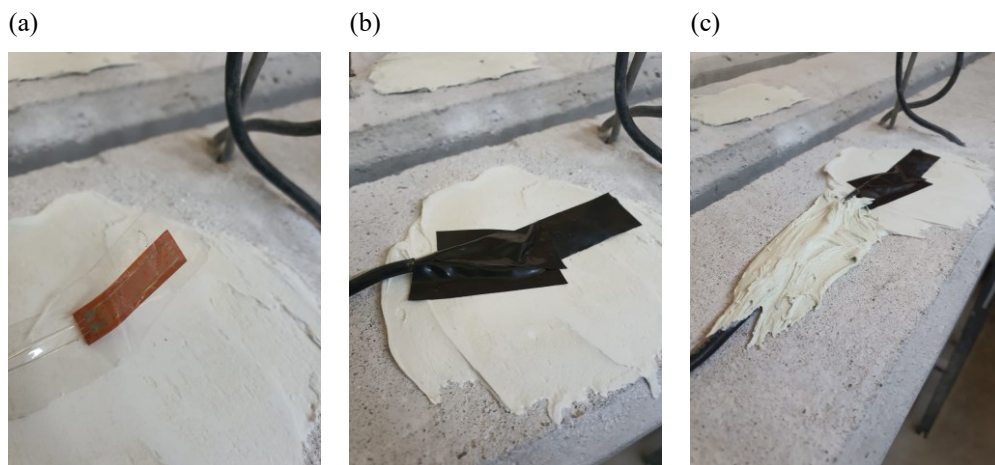


(fonte: elaborada pela autora)

A aplicação dos extensômetros seguiu os procedimentos semelhantes à do aço. A superfície foi limpa com éter etílico e o extensômetro foi posicionado no local com o auxílio de fita

transparente, para que pudessem ser realizados ajustes se necessário. Após correto posicionamento, foram fixados com adesivo instantâneo para superfícies rígidas Loctite 496. Posteriormente, a fita transparente foi cuidadosamente retirada, e com a pinça os fios de contato do extensômetro foram expostos de modo a realizar a solda com o fio de transmissão de dados. Em seguida, foram isolados com fita preta, tanto o extensômetro como os fios, além de serem isolados entre si de modo a evitar curto circuito. Por último, os fios de transmissão foram fixados a viga com massa plástica, com o objetivo de impedir o rompimento do conjunto. O processo pode ser observado na Figura 3.28 a seguir.

Figura 3.27 – Aplicação dos extensômetros no concreto: (a) posicionamento dos extensômetros; (b) isolamento do conjunto; (c) emprego da massa plástica para fixação

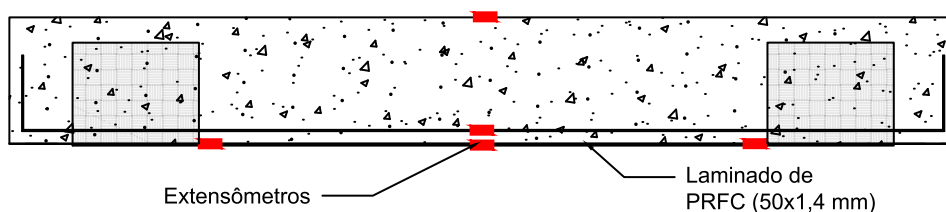


(fonte: elaborada pela autora)

3.4.3 Instrumentação dos laminados de PRFC

Os laminados foram instrumentados com extensômetros da marca Kyowa do tipo KFRPB-5-120-C1-3, com comprimento de 5 mm e largura de 1,4 mm. Nas vigas simplesmente reforçadas, os extensômetros foram posicionados no meio do comprimento do laminado, enquanto que para as protendidas, foram posicionados três extensômetros, um em cada extremidade, logo após o laço em U, e um no centro, conforme demonstra a Figura 3.29 a seguir, onde é possível analisar todos os extensômetros das vigas protendidas.

Figura 3.28 – Instrumentação dos extensômetros das vigas reforçadas com laminados protendidos

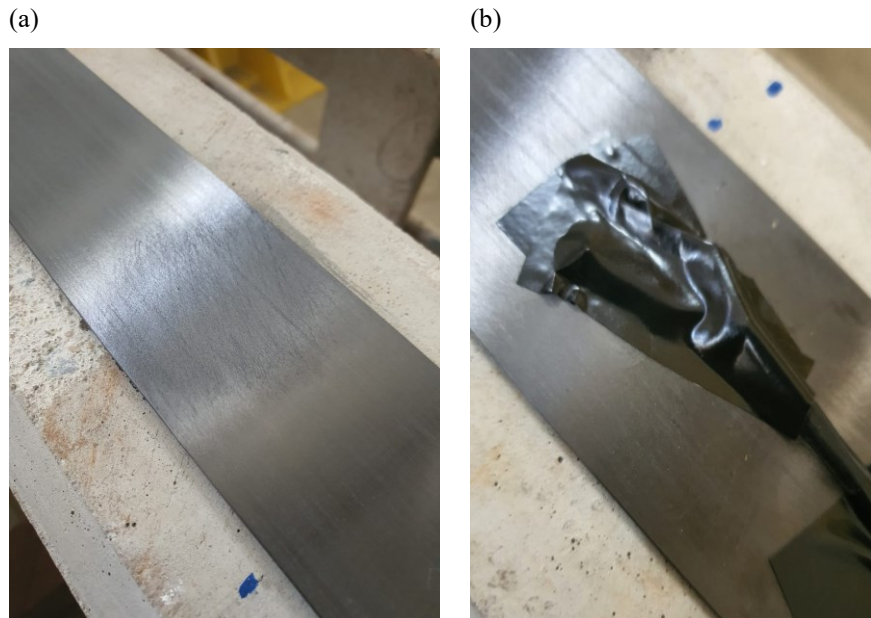


(fonte: elaborada pela autora)

A aplicação dos laminados se iniciou com o lixamento da superfície com lixa 180 e limpeza com éter etílico, como pode ser observado na Figura 3.30 (a). O extensômetro foi posicionado no laminado com o auxílio de fita transparente e fixado com o mesmo adesivo instantâneo utilizado na instrumentação do aço e concreto.

Em seguida, os fios de conexão foram expostos e isolados de modo que não ocorresse o contato dos fios com o laminado. Os cabos de transmissão foram soldados e o conjunto isolado com fita preta (Figura 3.30(b)). Por fim, os cabos foram fixos com massa plástica de modo a evitar movimentações e rompimentos.

Figura 3.29 – Aplicação dos extensômetros no laminado: (a) lixamento da superfície; (b) posicionamento do extensômetro; (c) isolamento dos fios; (d) proteção do conjunto

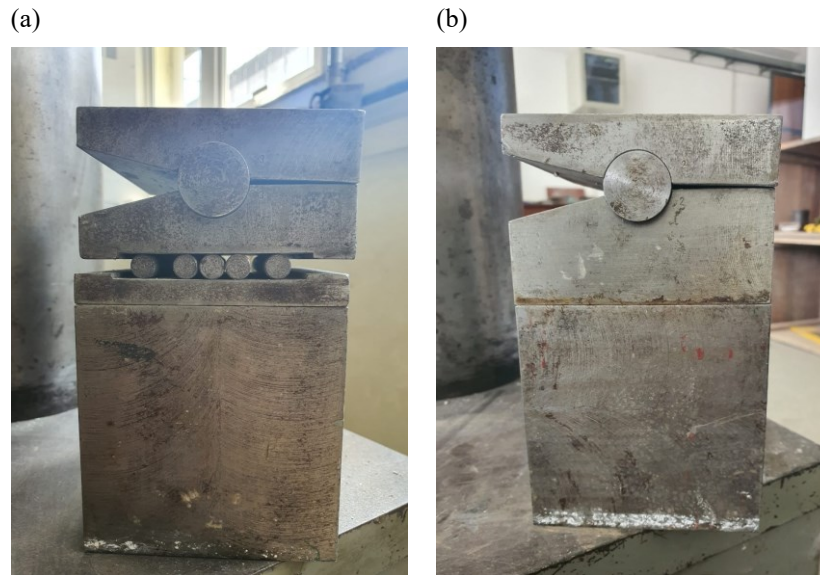


(fonte: elaborada pela autora)

3.5 ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA A QUATRO PONTOS

A capacidade resistente das vigas foi determinada através da máxima carga obtida no ensaio de flexão estática a quatro pontos. As vigas foram submetidas ao ensaio após 323 dias de concretagem. Nesse ensaio, a viga foi posicionada sobre apoios de primeira e segunda ordem, sendo um em cada extremidade que possuíam um comprimento de 10 cm, conforme pode ser observado na Figura 3.31. Logo, a viga tem um comprimento efetivo para efeitos de cálculo de 140 cm.

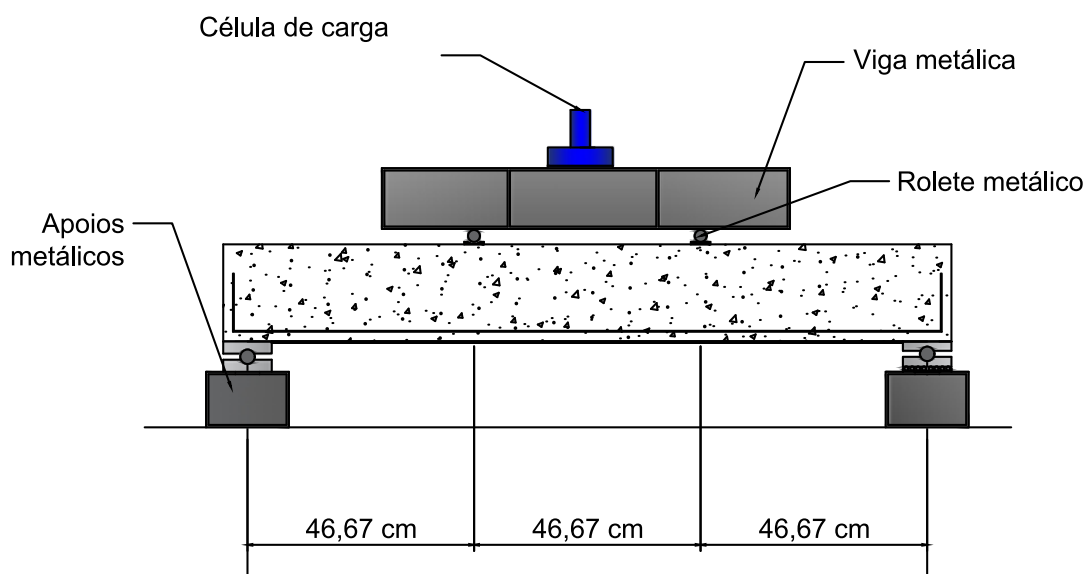
Figura 3.30 – Apoios para ensaio de flexão estática a quatro pontos: (a) apoio de primeira ordem; (b) apoio de segunda ordem



(fonte: elaborada pela autora)

A carga foi posicionada no meio das vigas e transmitida por intermédio de uma viga metálica em dois pontos de apoio nos terços médios do comprimento, conforme apresentada de maneira ilustrativa na Figura 3.32 e de maneira efetiva na Figura 3.33.

Figura 3.31 – Representação ilustrativa do ensaio de flexão estática a quatro pontos



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 3.32 – Configuração do ensaio de flexão estática a quatro pontos



(fonte: elaborada pela autora)

A carga foi aplicada pela Prensa SHIMADZU com capacidade máxima de 2000 kN a uma taxa de carregamento em função do deslocamento vertical de 1 mm/min. A leitura de aplicação de carga, deslocamentos e das deformações dos extensômetros foram realizadas através da aquisição de dados do Quantum HBM MX840A que era conectado ao sistema CATMAN da empresa HBM.

3.6 ABORDAGEM ANALÍTICA DO MOMENTO DE FISSURAÇÃO E RESISTÊNCIA ÚLTIMA DAS VIGAS PROTENDIDAS

Os resultados experimentais obtidos para as vigas testemunho serão comparados com as expressões da NBR 6118 (ABNT, 2014) e além disso, o momento último também foi obtido através da modelagem computacional, descrita no Apêndice C. Para as vigas simplesmente reforçadas serão utilizadas as expressões apresentadas no item 2.4.3 e para as vigas reforçadas com laminados de PRFC protendidos de acordo com uma abordagem analítica.

Para as vigas protendidas, o momento de fissuração e resistência última podem ser calculados analiticamente, sendo desenvolvidos baseado nos conhecimentos tradicionais da mecânica dos materiais assumindo as seguintes suposições:

- a) as deformações na armadura e no concreto são diretamente proporcionais à linha neutra, ou seja, uma seção plana antes do carregamento permanece plana após o carregamento;
- b) para a tensão do concreto em compressão é considerada o diagrama tensão-deformação com bloco de tensão retangular equivalente no Estado Limite Último;
- c) presume-se que o aço do reforço tem um comportamento elástico perfeitamente plástico;
- d) os polímeros reforçados com fibras têm um comportamento elástico linear até a ruptura, sendo perfeitamente ligados à viga, com deformação por cisalhamento da camada adesiva desprezada, devido à fina espessura e pequenas variações ao longo do comprimento dessa; e
- e) a resistência à tração do concreto é ignorada.

3.6.1.1 Momento de fissuração

O momento ou carga de fissuração do concreto corroboram com a durabilidade da estrutura e nesse sentido devem ser presumidos de modo a quantificar a resistência inicial do concreto. São incorporados ao cálculo a adição da rigidez proporcionada pelo reforço de PRF e a protensão desse através da tensão na fibra inferior do concreto causada pelo pré-esforço conforme exposto na Equação 3.1, onde M_{cr} corresponde ao momento de fissuração, buscado no item 17.3.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014). f'_c é a resistência característica do concreto à compressão, f_{pi} a tensão na fibra inferior devido à protensão (MPa) obtido por intermédio da Equação 3.2 calculados analiticamente com os conhecimentos tradicionais da mecânica dos materiais, em que P_p é a força aplicada ao PRF após a introdução das perdas de pré-esforço (N), A a área da seção transversal da viga (mm^2) e e_f a distância do PRF ao eixo neutro da seção bruta. I_g e x_g são o momento de inércia que considera a seção não fissurada (mm^4) e a distância da fibra superior até o eixo neutro (mm) após a introdução da força de pré-esforço, calculados por meio das Equações 3.3 e 3.4, respectivamente, onde n_s e n_f são as relações entre os módulos de elasticidade dos materiais (aço e PRF, nessa ordem) e o concreto.

$$M_{cr} = \frac{(0,315f'_c{}^{2/3} + f_{pi})I_g}{(h - x_g)} \quad (3.1)$$

$$f_{pi} = \frac{P_p}{A} + \frac{P_p e_f (h - x_g)}{I_g} \quad (3.2)$$

$$I_g = \frac{bh^3}{12} + bh \left(x_g - \frac{h}{2} \right)^2 + (n_s - 1) A'_s (x_g - d')^2 + (n_s - 1) A_s (x_g - d)^2 + n_f A_f (x_g - h)^2 \quad (3.3)$$

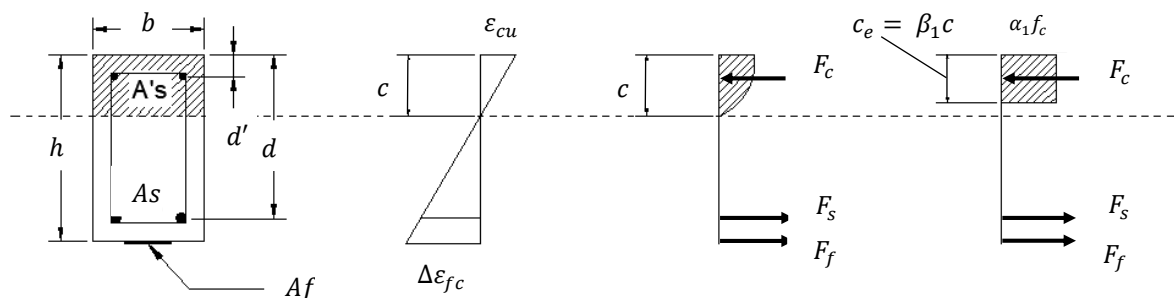
$$x_g = \frac{\frac{bh^2}{2} + (n_s - 1) A'_s d' + (n_s - 1) A_s d + n_f A_f h}{bh + (n_s - 1) A'_s + (n_s - 1) A_s + n_f A_f} \quad (3.4)$$

Em estudo realizado por Rashid et al. (2019) um fator de redução da tensão foi aplicado na Equação 3.2. Conforme os autores, esse coeficiente (ψ_{cr}) é aplicado de modo a atenuar as variações de propriedades dos materiais do reforço, como epóxi ou o PRF, além disso prevê os comportamentos decorrentes da protensão, como a perda de pré-esforço e o sistema de ancoragem. Os pesquisadores recomendam um valor aproximado de 0,80 baseado em 41 dados de pesquisa que comparam o momento de fissuração experimental e o analítico.

3.6.1.2 Momento de resistência última

O equilíbrio de forças internas de uma viga reforçada com PRF protendido é ilustrado na Figura 3.34. As deformações iniciais na viga de concreto armado são decorrentes da força de protensão aplicada ao reforço. A deformação gerada ao PRF (ϵ_{fp}) pode ser calculada através da Equação 3.5. Essa deformação causa uma tensão de compressão na região de interface entre o reforço e o substrato de concreto. Em uma determinada etapa de carregamento a deformação ocasionada dessa tensão é reduzida a zero, ocasionando deformação adicional ao PRF, sendo nomeada de deformação de descompressão (ϵ_{fc}) (WOO et al., 2008) podendo ser obtida a partir da Equação 3.6, onde A_{ct} corresponde à área transformada efetiva da seção transversal do concreto.

Figura 3.33 – Distribuição de tensão da seção transversal da viga com PRF protendido



(fonte: elaborada pela autora)

$$\epsilon_{fp} = \frac{P_p}{E_f A_f} \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_{fc} = \frac{P_p}{E_c A_{ct}} + \frac{P_p e_f^2}{E_c I_{cr}} \quad (3.6)$$

Após a tensão na parte inferior do concreto atingir zero, a deformação de tração ocasionada na região com o incremento de carga ocasiona também incremento de deformação no PRF ($\Delta\varepsilon_{fc}$), calculados a partir da Equação 3.7, onde c corresponde à altura da região compressiva do concreto e ε_c é a deformação compressiva no mesmo. Portanto, a deformação total no laminado de PRF (ε_{ft}) pode ser obtida através das somas das deformações mencionadas, conforme a Fórmula 3.8:

$$\Delta\varepsilon_{fc} = \left(\frac{h-c}{c}\right) \varepsilon_c \quad (3.7)$$

$$\varepsilon_{ft} = \varepsilon_{fp} + \varepsilon_{fc} + \Delta\varepsilon_{fc} \quad (3.8)$$

A previsão da capacidade de carga de uma viga reforçada com PRF protendido pode ser baseado em seus modos de rupturas. Estudos indicam principalmente três falhas possíveis (XUE et al., 2010; RASHID et al., 2019; CAO et al., 2019), esmagamento do concreto em compressão antes da ruptura do reforço, ruptura do reforço antes do concreto atingir sua deformação compressiva final, nesse caso, a deformação última do laminado governa o modo de ruptura, e por último, o descolamento do laminado de PRF.

Normalmente, existe um modo de falha equilibrado entre a ruptura por compressão do concreto e fratura do PRF onde as deformações finais dos materiais se aproximam. A partir da Figura 3.31 é possível desenvolver a seguinte expressão:

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\Delta\varepsilon_{fc}} = \frac{c_b}{h-c_b} \quad (3.9)$$

Onde c_b é a distância da fibra comprimida de concreto até a linha neutra no modo de falha equilibrado.

Os autores Wei et al. (2021) estabeleceram uma altura de compressão relativa no modo de ruptura balanceado ($\xi_{cf,b}$) através das relações de deformações entre os materiais, obtendo a expressão:

$$\xi_{cf,b} = \frac{c_b}{h} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \Delta\varepsilon_{fc}} \quad (3.10)$$

A mesma equação pode ser reescrita de modo a estabelecer uma altura de compressão relativa para qualquer modo de falha (ξ), considerando a relação (WEI et al., 2021):

$$\xi = \frac{c}{\alpha_1 h} \quad (3.11)$$

Onde α_1 corresponde à tensão constante que atua até a profundidade c_e do bloco de tensão retangular, e pode assumir valor igual a 0,85 conforme item 17.2.2 (e) da NBR 6118 (ABNT, 2014).

A altura de compressão relativa pode ser empregada para prever o modo de falha da seção, se $\xi < \xi_{cf,b}$, a ruptura ocorre por fratura ou descolamento do PRF (WEI et al., 2021), e o momento último (M_u) pode ser obtido a partir do equilíbrio de forças da seção transversal do concreto através das Equação 3.14, onde c e ε_c são determinados por meio das Equações 3.12 e 3.13 e β_1 pode assumir valor igual a 0,8 segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014):

$$\beta_1 E_c \varepsilon_c b \alpha_1 c = f_y A_s + E_f A_f [\varepsilon_{fu}] \quad (3.12)$$

$$\frac{c}{h-c} = \frac{\varepsilon_c}{\Delta \varepsilon_{fc}} \quad (3.13)$$

$$M_u = f_y A_s \left(d - \frac{c_e}{2} \right) + E_f A_f \varepsilon_{fu} \left(h - \frac{c_e}{2} \right) \quad (3.14)$$

A variável $[\varepsilon_{fu}]$ pode assumir dois valores, dependendo do modo de ruptura do PRF: tração ou descolamento do substrato de concreto. Presume-se que após o estado de descompressão do concreto, o incremento de deformação no PRF é igual ao determinado para reforços não protendidos (XUE et al., 2010), desse modo, a deformação de modo a evitar o descolamento (ε_{fd}) pode ser obtida através da Equação 2.4 e $[\varepsilon_{fu}]$ pode ser determinado por meio da seguinte relação:

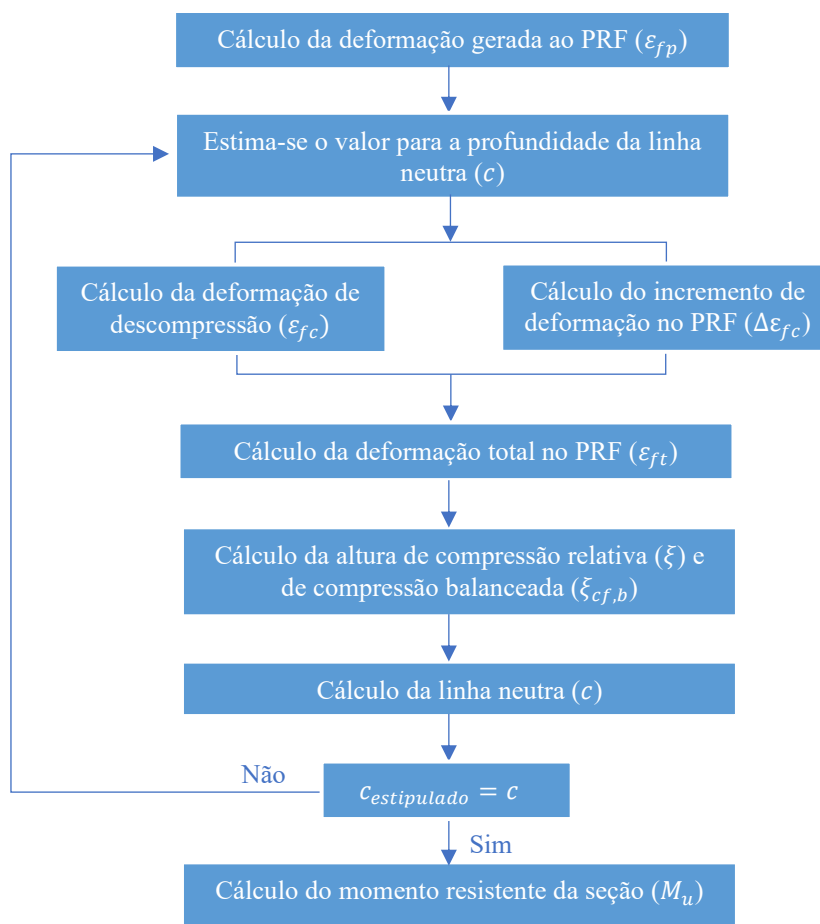
$$[\varepsilon_{fu}] = \begin{cases} \varepsilon_{fp} + \varepsilon_{fc} + \varepsilon_{fd} & \text{se } \varepsilon_{fp} + \varepsilon_{fc} + \varepsilon_{fd} < \varepsilon_{fu} \text{ (Descolamento do PRF)} \\ \varepsilon_{fu} & \text{se } \varepsilon_{fp} + \varepsilon_{fc} + \varepsilon_{fd} \geq \varepsilon_{fu} \text{ (Fratura do PRF)} \end{cases}$$

Considerando $\xi > \xi_{cf,b}$ o modo de ruptura governante da seção é o esmagamento da seção comprimida do concreto (WEI et al., 2021), e o momento último é determinado por meio da Equação 3.15, em que a distância da fibra comprimida até a linha neutra pode ser obtida através de um processo iterativo comparando um valor estabelecido inicialmente nas Equações 3.6 e

3.7 com o resultado obtido na Equação 3.12. O processo é apresentado no Fluxograma da Figura 3.35.

$$M_u = f_y A_s \left(d - \frac{c_e}{2} \right) + E_f A_f \varepsilon_{ft} \left(h - \frac{c_e}{2} \right) \quad (3.15)$$

Figura 3.34 – Fluxograma de cálculo do momento resistente da seção das vigas com PRF protendido



(fonte: elaborada pela autora)

3.7 DUCTILIDADE

A ductilidade é uma propriedade importante quando relacionado ao comportamento das vigas de concreto armado, principalmente quando aplicados reforços de modo a elevar a capacidade resistente das seções. Os reforços de PRFC em vigas de concreto armado tem como principal desvantagem a redução da ductilidade.

Nessa pesquisa optou-se por determinar o índice de ductilidade energético de flecha, que considera todos os índices energéticos por meio de valores de carga e deslocamento compreendendo os estágios de fissuração, escoamento e ruptura da curva.

O método baseia-se no cálculo da energia total e elástica da curva carga e flecha. Para determinar a energia total foi realizada a integração das linhas de tendencia que mais se aproximavam das curvas registradas no ensaio de flexão estática a quatro pontos. A energia elástica ($E_{elástica}$) pode ser calculada de acordo com a Equação 3.16 a seguir, onde P_u é a carga de ruptura observada no ensaio; δ_u a flecha na ruptura e $\bar{\delta}$ a flecha que delimita a área do triângulo que fornece a energia elástica.

$$E_{elástica} = \frac{1}{2}P_u(\delta_u - \bar{\delta}) \quad (3.16)$$

A flecha que delimita a área do triângulo que fornece a energia elástica, pode ser obtida através da Equação 3.17, onde δ pode ser determinado pela Equação 3.18, sendo α o ângulo de inclinação da linha elástica da curva carga e flecha. E o índice de ductilidade energética é obtido através da Equação 3.19.

$$\bar{\delta} = \delta_u - \delta \quad (3.17)$$

$$\delta = \frac{P_u}{tg\alpha} \quad (3.18)$$

$$\mu_{\delta} = \frac{1}{2} \left(\frac{E_{total}}{E_{elástica}} + 1 \right) \quad (3.19)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados e discussões dos procedimentos e metodologias expressos anteriormente de modo a realizar comparações entre os grupos reforçados e as vigas testemunho. Os resultados serão expressos em termos de carga e momento último da seção, modos de ruptura, carga e momento de fissuração e ductilidade. Além disso, serão apresentados resultados referentes ao sistema de protensão, como seu comportamento ao longo do período de cura, logo após a retirada da tensão e a eficiência do sistema de ancoragem no conjunto. Por fim, serão apresentadas as comparações entre os modelos teóricos e experimentais de modo a verificações da confiabilidade dos métodos.

4.1 ANÁLISE TEÓRICA DA CAPACIDADE RESISTENTE DAS SEÇÕES

As vigas testemunho foram dimensionadas conforme o Estado Limite Último de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014). Além disso, foi realizada a análise numérica e modelagem computacional para verificação das cargas de fissuração e momento último com o *software* ANSYS (*Analysis Systems Incorporated*) na versão *Student 2022 R2* conforme apresentado no Apêndice A.

Para análise e verificação dos valores foram utilizados os dados obtidos experimentalmente de modo a uma maior aproximação dos resultados. Foi utilizada a interface gráfica APDL (ANSYS Parametric Design Language), onde foram utilizados os elementos SOLID 65, LINK 180 e SOLID 185 para representar o concreto, aço e placas de apoio e carga, respectivamente. O resultado obtido numericamente indicou uma carga de ruptura de 55,57 kN e a carga de fissuração de aproximadamente 8,8 kN.

Segundo recomendações da ACI 440.2R-17 (ACI, 2017) e conforme especificado anteriormente, a capacidade de flexão das vigas simplesmente reforçadas é governada pelo seu modo de ruptura. Para o caso dimensionado o modo de ruptura previsto foi de descolamento do laminado de PRFC, e por esse motivo o sistema de ancoragem com laço em U foi proposto. O modo de descolamento foi propositalmente considerado de maneira à verificação das recomendações normativas e do sistema de ancoragem não metálico, visto que o modo de descolamento é o mais observado em sistemas de reforços de flexão com aderência externa. Os dados utilizados no dimensionamento inicial foram corrigidos de acordo com os resultados experimentais e são expressos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Dados do dimensionamento para o reforço com PRFC simplesmente aderido

Dados utilizados no cálculo do momento resistente da seção			
Dado	Unidade	Dado	Unidade
b	12 cm	f'_c (corrigido)	22,08 MPa
h	20 cm	E_c (corrigido)	20,47 GPa
d (corrigido)	15,87 cm	E_f	165 GPa
d_f	20,07 cm	t_f	1,4 mm
$cobrimento$ (corrigido)	3 cm	ε_{cu}	0,30%
A_s	1,57 cm ²	ε_{fu}	17‰
A_f	0,62 cm ²	P_p	9,94 kN

(fonte: elaborada pela autora)

O momento último resistente das vigas simplesmente reforçadas com e sem ancoragem foi calculado de acordo com a Equação 2.14, a partir do processo de iteração sugerido pela ACI 440.2R-17 (ACI, 2017) e exposto no item 2.4.3. O cálculo e o processo iterativo foram executados através do Software Excel e estão apresentados no Apêndice A.

As vigas reforçadas com laminados protendidos serão comparadas analiticamente em termos de momento de fissuração e resistência última, através das equações 3.1 e 3.15, respectivamente, essa última considerada por meio de dados teóricos que $\xi > \xi_{cf,b}$ (item 3.6.1.2). O cálculo e o processo iterativo foram executados através do Software Excel e estão apresentados no Anexo B. A Tabela 4.2 demonstra os resultados calculados para o momento último e carga última teórica das seções das vigas.

Tabela 4.2 – Momento último da seção de acordo com previsões analíticas

Espécime	Carga última teórica (kN)	Momento último teórico (kN.m)
Viga testemunho conforme NBR 6118 (ABNT, 2014)	57,5	13,42
Viga testemunho conforme ANSYS	55,57	12,96
Viga simplesmente reforçada, conforme recomendações técnicas ACI 440.2R-17 (ACI, 2017)	79,69	18,59
Viga reforçada com laminado protendido, conforme item 3.6.1.3	94,74	22,11

(fonte: elaborada pela autora)

O momento de fissuração teórico das vigas testemunho foram calculadas de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014) em seu item 17.3.1. Para as vigas protendidas, foram utilizadas as Equações apresentadas no item 3.6.1.1 do presente trabalho, onde são adaptadas para considerar a tensão devido a protensão. Os resultados teóricos do momento e carga de fissuração são apontados na Tabela 4.3 a seguir.

Tabela 4.3 – Momento e carga de fissuração de acordo com análise teórica

Espécime	Carga de fissuração teórica (kN)	Momento de fissuração (kN.m)
Viga testemunho conforme NBR 6118 (ABNT, 2014)	8,50	1,98
Viga testemunho conforme ANSYS	8,8	2,05
Viga reforçada com laminado protendido, conforme item 3.6.1.1	15,34	3,58

(fonte: elaborada pela autora)

4.2 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Nesse item são apresentados os resultados referentes às análises experimentais realizadas nos quatro grupos estudados. Serão organizados em termos de resultados obtidos, comparando as categorias reforçadas com o grupo sem reforço.

4.2.1 Carga e Momento de fissuração

As cargas de fissuração das vigas testemunho e protendida VPU-2 foram obtidas a partir da mudança da rigidez observando a curva carga e deslocamento, pois não foi possível visualizar a olho nu com cargas tão baixas. Para a viga VPU-1 não foi observado mudança na rigidez da curva carga e deslocamento. A Tabela 4.4 demonstra os valores da carga de fissuração e o momento associado, onde é possível perceber o aumento da carga e momento de fissuração das vigas protendidas em relação à viga testemunho de cerca de 109,43%, corroborando com os resultados esperados, retardando o aparecimento das fissuras.

Tabela 4.4 – Carga e Momento de Fissuração

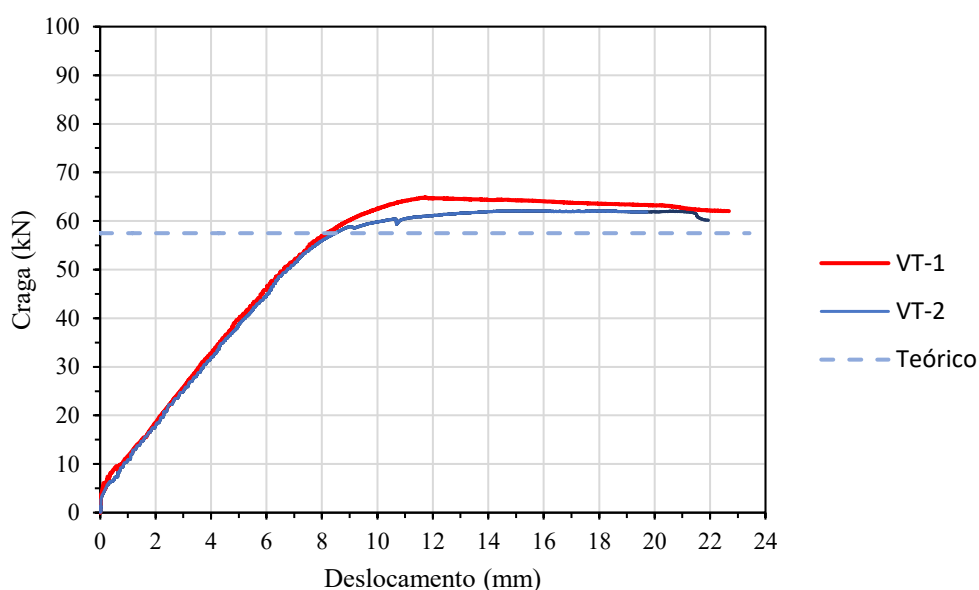
Espécie	Carga de Fissuração (kN)	Momento de Fissuração (kN.m)
VT-1	7,88	1,86
VT-2	7,59	1,77
VPU-2	16,2	3,80

(fonte: elaborada pela autora)

4.2.2 Capacidade resistente das seções

A capacidade resistente das seções foi mensurada através dos resultados da carga e deslocamento vertical, obtidos no ensaio de flexão estática a quatro pontos. A Figura 4.1 a seguir demonstram as curvas alcançadas para o grupo 1 estudado (VT). Para determinar os deslocamentos verticais no centro do vão foi realizada a média das deflexões monitoradas pelos LVDTs.

Figura 4.1 – Carga x deslocamento para o Grupo 1 (VT)



(fonte: elaborada pela autora)

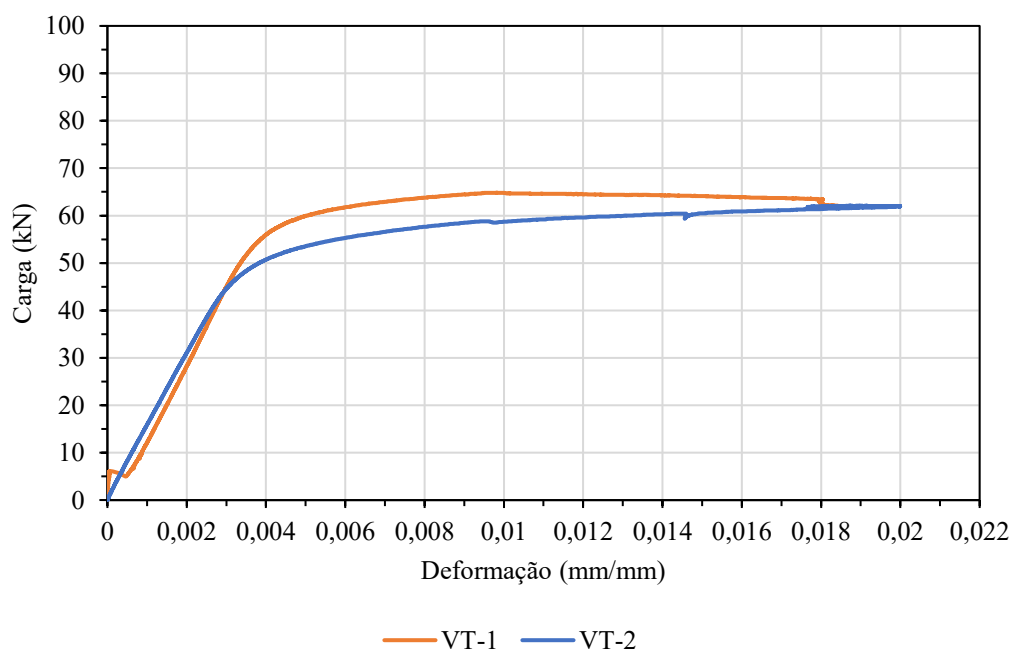
As curvas obtidas para as vigas testemunho apresentam o comportamento clássico esperado para as vigas de concreto armado com os níveis de deformação bem definidos: estágio I, estado elástico, ocorre até uma carga aproximada de 7 kN, onde é possível observar a primeira fissura durante o ensaio, conforme mencionado no item anterior. Em seguida, o estágio II de fissuração que inicia após a primeira fissura e vai até o instante aproximado de 50 kN, e o estágio III,

caracterizado pelo comportamento da curva após o estágio dois, até a ruptura, onde ocorre a plastificação do concreto e o escoamento da armadura.

A carga máxima obtida anteriormente a ruptura foi de 64,83 kN e 62,12 kN, para as espécies VT-1 e VT-2 respectivamente. Ambos os resultados são próximos, indicando a mesma tendência no comportamento da curva carga-deslocamento das vigas testemunho, apresentam também, aproximação com os valores obtidos analiticamente e através do ANSYS de 57,5 kN e 55,57 kN, respectivamente. Além disso, a carga de fissuração observada de 7,73 kN é próxima da teórica de 8,5 kN e de 8,8 kN obtida através da modelagem computacional. As deflexões encontradas no momento da ruptura foram de 11,74 e 15,21 mm para VT-1 e VT-2 respectivamente.

Na Figura 4.2 a seguir é possível observar o comportamento da deformação do aço durante a realização dos ensaios para as vigas testemunho. A deformação foi obtida a partir da média das duas leituras da armadura longitudinal, já que eram bem próximas.

Figura 4.2 – Deformações no aço durante o ensaio de flexão estática a quatro pontos para as vigas do grupo I (VT)



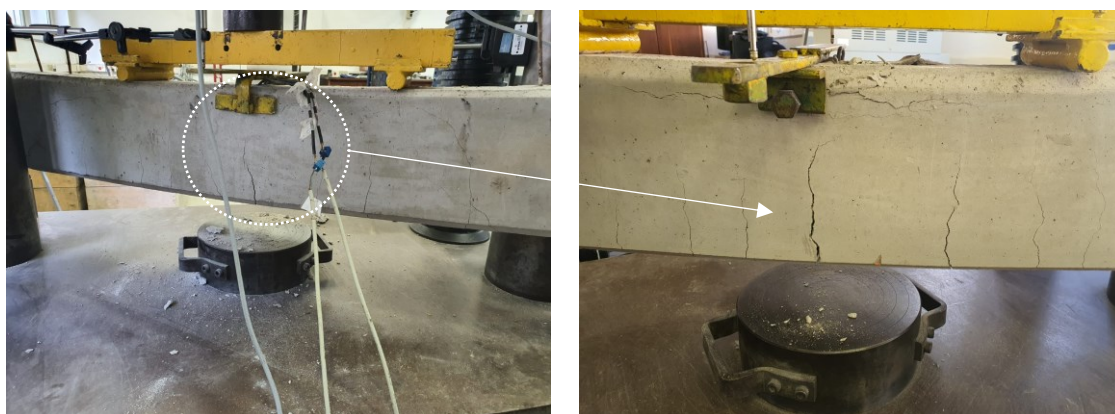
(fonte: elaborada pela autora)

As curvas demonstram que ambos os comportamentos tem a mesma tendência. Logo após a fissuração do concreto o aço foi solicitado e começa a contribuir para a capacidade resistente da seção. A mudança da inclinação da curva ocorre em cerca de 45 kN, onde a deformação no aço é da ordem de 2,5‰ indicando o início aproximado do escoamento. O patamar de

escoamento do aço é em aproximadamente 3%. A deformação na ruptura das vigas foi de aproximadamente 20% e 18%, para as vigas VT-2 e VT-1, respectivamente.

O modo de ruptura observado em ambas as vigas testemunho foi de flexão seguido de esmagamento do concreto na região de compressão, caracterizado pelas fissuras no centro do vão (Figura 4.3) e o deslocamento do concreto na região central superior (Figura 4.4).

Figura 4.3 – Fissuras localizadas no centro do vão durante a ruptura das vigas testemunho



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 4.4 – Esmagamento a compressão do concreto das vigas testemunho



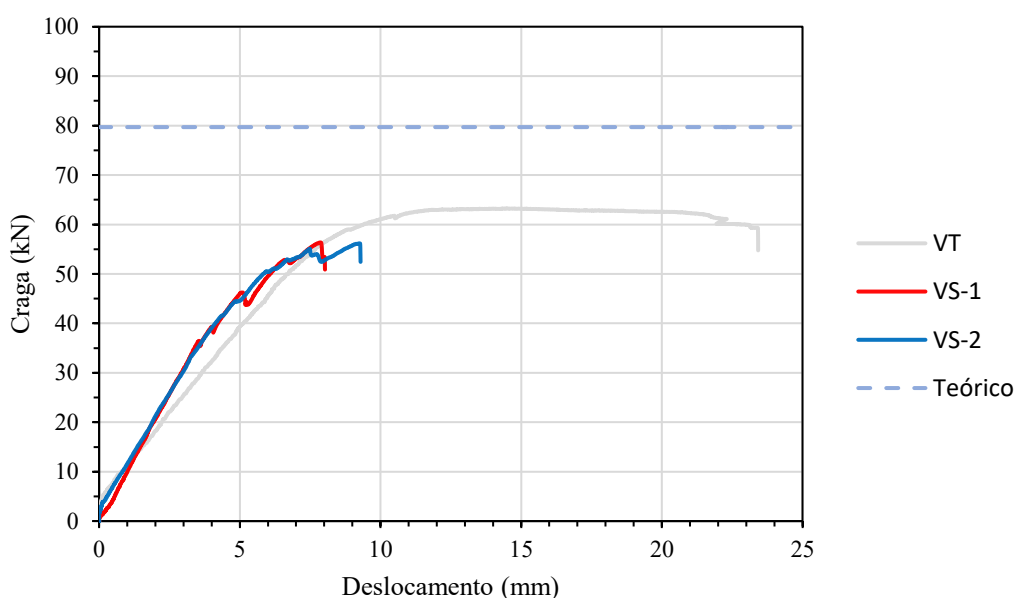
(fonte: elaborada pela autora)

Segundo o dimensionamento realizado, as vigas estariam no domínio 2 de deformação, não rompendo a compressão no concreto, no entanto, as vigas foram inspecionadas após o ensaio e constatado que durante a concretagem o cobrimento foi alterado, sendo concretadas com 3 cm de cobrimento, ao invés de 2 cm, o que alterou o domínio de deformação da viga para 3, caracterizando o modo de ruptura encontrado. No domínio 3 as vigas não necessitariam de

reforço, no entanto, para a resistência a compressão do concreto de 22 MPa, se mostra significativo a contribuição na capacidade resistente das seções proporcionada pelo sistema de reforço.

A Figura 4.5 ilustra o comportamento do segundo grupo ensaiado (VS) que continham o laminado na face inferior da viga, sem ancoragem. A representação das vigas testemunho apresentam a média das cargas e deformações encontradas.

Figura 4.5 – Carga x deslocamento para o grupo 2 (VS)

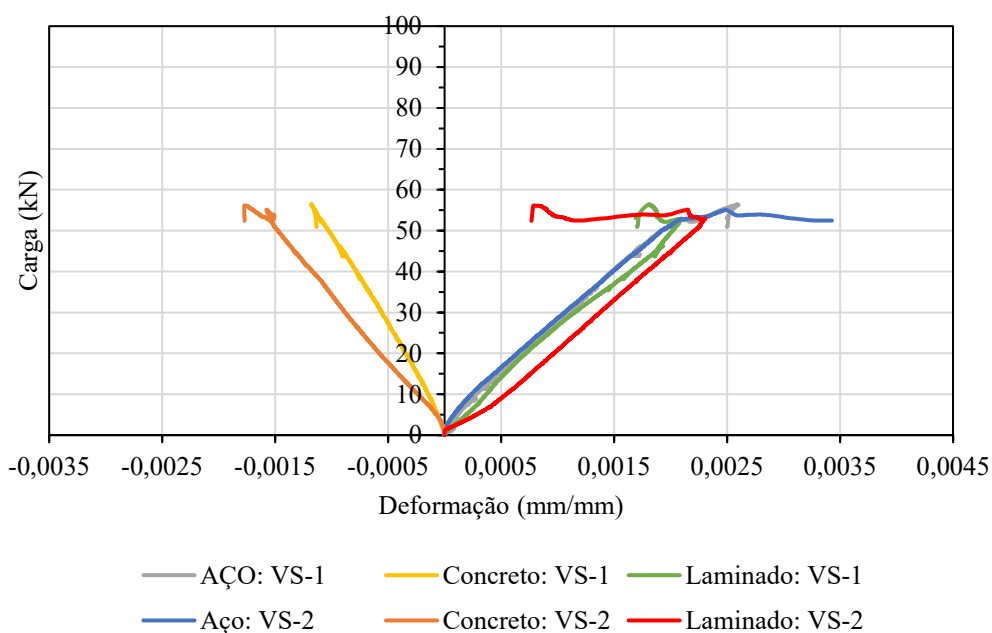


(fonte: elaborada pela autora)

A partir da Figura 4.5 é possível analisar que o comportamento observado nas vigas simplesmente reforçadas é praticamente semelhante. A curva carga-deslocamento é linear até aproximadamente 35 kN, onde houve a primeira queda de carga da viga VS-1. As quedas na carga observadas em ambos os comportamentos se refletem em fissuras geradas entre o laminado e a superfície de concreto durante o carregamento. A carga de ruptura das vigas foram de 56,36 kN e 56,18 kN, para a viga VS-1 e VS-2 respectivamente, com deflexões de 7,87 mm para a primeira e 9,27 mm para a segunda.

As deformações no aço, concreto e laminado são apresentadas na Figura 4.6. As deformações no aço são representadas pela média dos dois valores dos extensômetros, enquanto que para o concreto e laminado correspondem a um valor único.

Figura 4.6 – Deformação do aço, concreto e laminado para as vigas do grupo 2 (VS)



(fonte: elaborada pela autora)

A partir da Figura 4.6 é possível perceber que o comportamento do aço é praticamente semelhante em ambas as vigas, seu escoamento foi atingido em uma carga aproximada de 52 kN com uma deformação aproximada de 2,4‰, muito próximo da carga de ruptura, indicando que o aço foi significativamente solicitado. No entanto, após o escoamento do aço o acréscimo de carga até a ruptura da viga foi baixo, devido ao descolamento do laminado que aconteceu em aproximadamente 56 kN para ambas as vigas, como pode ser observado na redução da deformação do laminado. Não foi atingido o limite de deformação do aço ou concreto.

O modo de ruptura observado na viga VS-1 foi de descolamento do laminado da cobertura de concreto, conforme pode ser observado na Figura 4.7. Conforme dimensionamento realizado de acordo com ACI 440-2R (ACI, 2017) esse seria o modo de falha previsto para a seção, corroborando com a metodologia empregada para determinação dos esforços. Esse tipo de falha é comum em estruturas reforçadas com compósitos, devido à alta tensão de cisalhamento provocada na interface de contato entre o laminado e a superfície de concreto, confirmando a necessidade de ancoragem nas extremidades (CORREIA et al., 2018; MICHELS et al., 2013), comportamento também observado por Tehrani et al. (2019).

Figura 4.7 – Modo de falha da viga VS-1: descolamento do reforço



(fonte: elaborada pela autora)

A viga VS-2 sofreu falha de delaminação da cobertura de concreto juntamente com o laminado. O modo de falha se iniciou com uma fissura em aproximadamente 45 kN a 45° que se propagou a partir da extremidade do laminado até aproximadamente o terço central da viga, conforme demonstra Figura 4.8 (a).

Figura 4.8 – Destacamento da cobertura de concreto juntamente com o laminado: (a) fissura inicial; (b) modo de falha



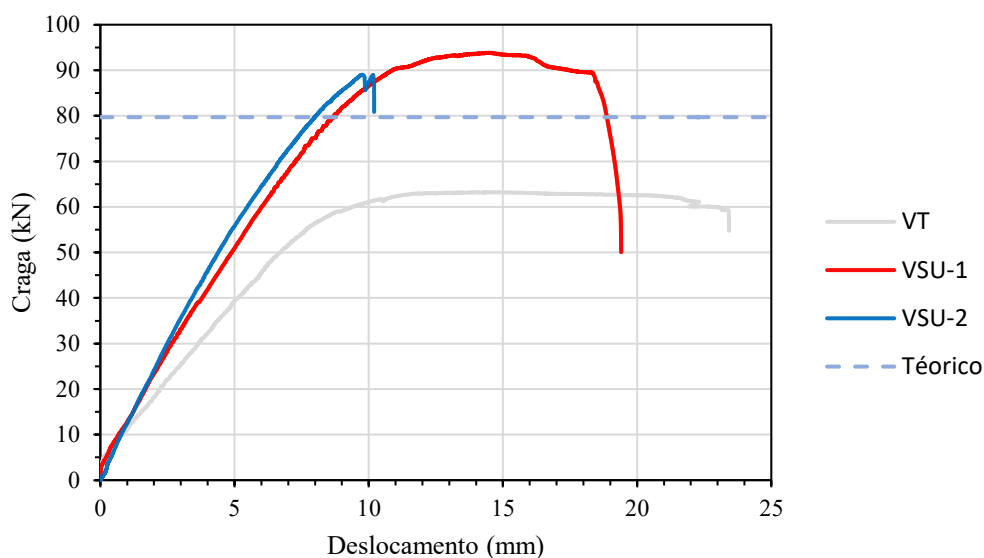
(fonte: elaborada pela autora)

Posteriormente ao aumento gradativo da carga, ocorreu o destacamento da cobertura de concreto na ruptura, como pode ser observado na Figura 4.8 (b). A ruptura mencionada é comum e representa um modo de falha prematuro do reforço, onde não é utilizada a capacidade total de tração desse (CASTILLO et al., 2019a; CHEN et al., 2017). O rompimento é verificado em todo ou parte do cobrimento do concreto em conjunto com o sistema de reforço, devido às altas tensões interfaciais geradas na extremidade do sistema (NERILLI; VAIRO, 2018). Não

houve solicitação significativa do laminado, visto que a deformação encontrada no momento de ruptura é de apenas 2‰, sendo a máxima deformação permitida para o laminado de 17‰.

Para o terceiro grupo de vigas (VSU) que são as vigas reforçadas com laminados e ancoradas com laço em U as curvas do ensaio de flexão estática a quatro pontos estão ilustradas na Figura 4.9. A representação das vigas testemunho demonstram a média das cargas e deformações encontradas.

Figura 4.9 – Curva carga x deslocamento para as vigas do grupo 3 (VSU)

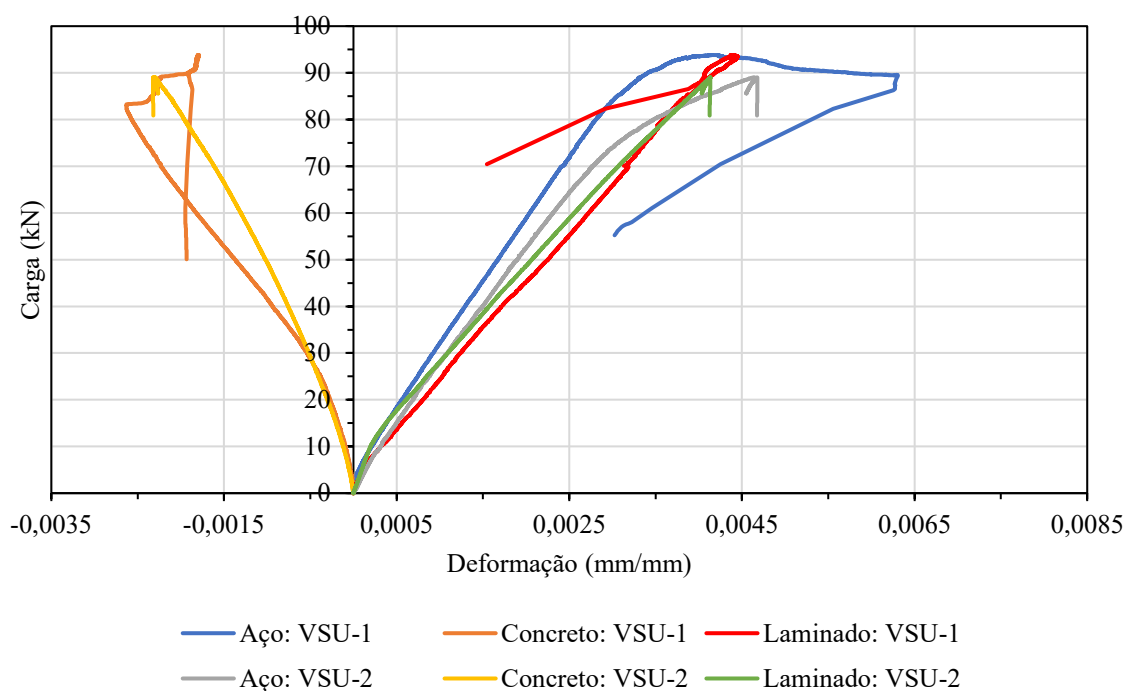


(fonte: elaborada pela autora)

A partir das curvas apresentadas acima é possível observar que as vigas apresentaram aproximadamente a mesma rigidez até cerca de 30 kN, onde houve aumento da inclinação da curva da viga VSU-2 em relação a primeira viga. A máxima carga obtida na ruptura foi de 93,82 kN e 89,01 kN para a viga VSU-1 e VSU-2, respectivamente, próximas a obtida teoricamente, com deslocamento de 14,48 mm para a primeira e 9,76 mm para a segunda.

A Figura 4.10 demonstra as deformações encontradas no aço, laminado e concreto de acordo com as leituras realizadas durante o ensaio de flexão estática a quatro pontos para as vigas do grupo 3 (VSU).

Figura 4.10 – Deformações no aço, concreto e laminado para as vigas do grupo 3 (VSU)

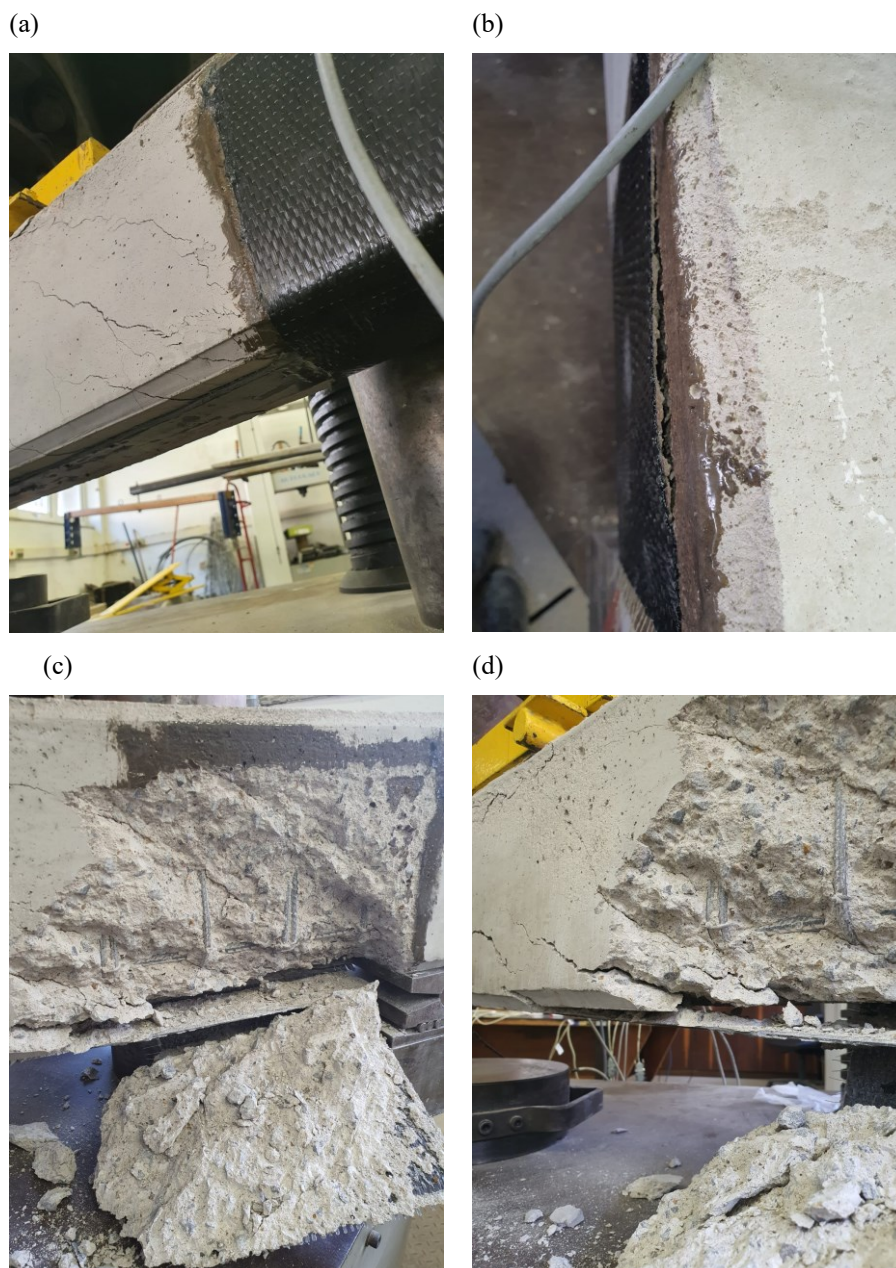


(fonte: elaborada pela autora)

O comportamento do aço no ensaio de flexão estática a quatro pontos para a viga VSU-1 é próximo ao encontrado para a viga VSU-2. Após o seu patamar de escoamento, a carga ainda aumentou cerca de 10 kN até a ruptura, em ambos os corpos de provas. O concreto atingiu uma deformação de aproximadamente 2‰ na ruptura, já tendo sido solicitado a uma deformação de 2,63‰ para uma carga de 83,09 kN para a viga VSU-1. Enquanto para a viga VSU-2 o concreto deformou 2,32‰ na ruptura, sendo a maior deformação lida. Ambas as vigas chegaram próximas ao limite de deformação do concreto. Os laminados tiveram deformação aproximadamente linear até a ruptura das vigas de 4,5‰ e 4,2‰ para a viga VSU-1 e VSU-2, indicando que foram melhores solicitados à aplicação da carga que o grupo anterior (VS).

A viga VSU-1 apresentou ruptura por deslocamento da cobertura de concreto na região da ancoragem com manta de laço em U. As fissuras iniciaram logo após o sistema de ancoragem propagando-se em 45° em direção ao terço médio central da viga, como pode ser observado na Figura 4.11 (a). Com o aumento da carga as bordas da manta iniciaram o descolamento da superfície lateral da viga em aproximadamente 75 kN (Figura 4.11 (b)). Na ruptura houve a delaminação completa do sistema de ancoragem de uma das faces laterais da viga (Figura 4.11 (c) e (d)).

Figura 4.11 – Ruptura por deslocamento da cobertura de concreto da viga VSU-1: (a) fissura a 45°; (b) descolamento do laço em U de manta de carbono

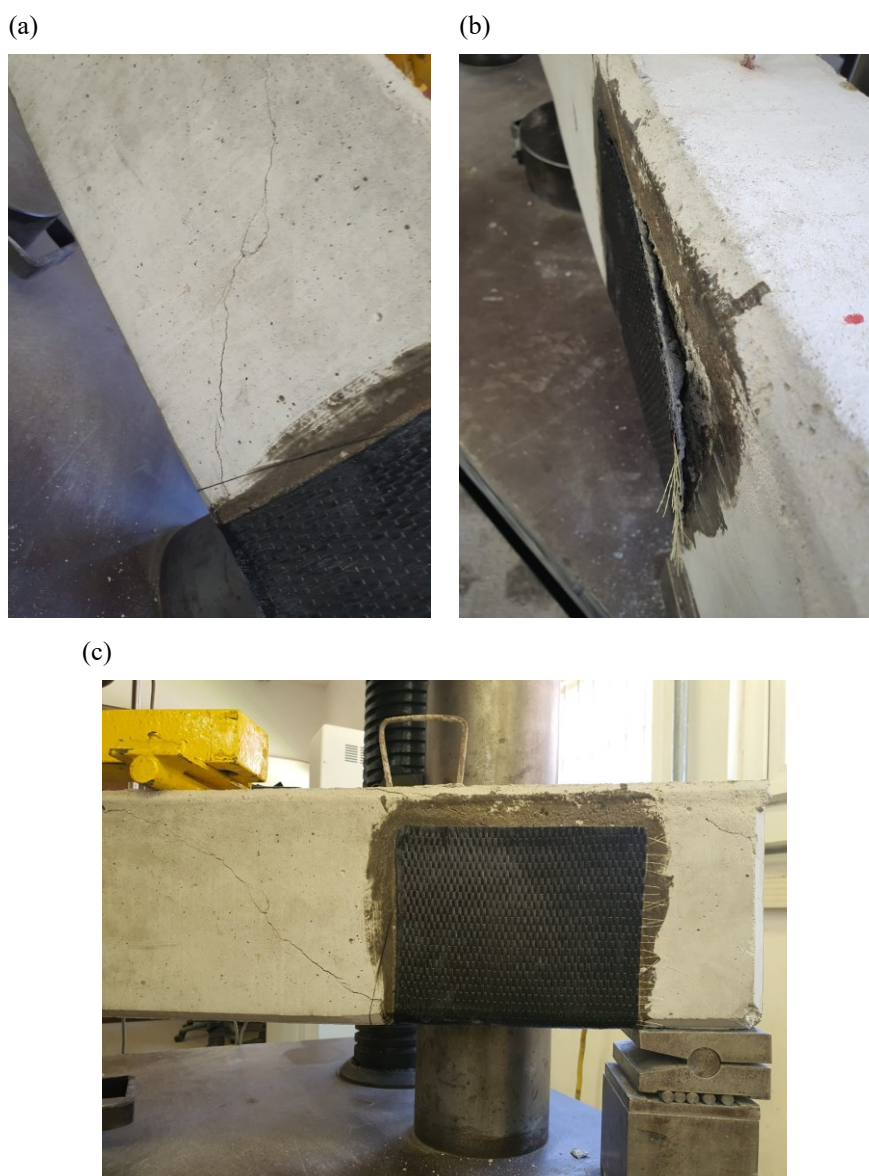


(fonte: elaborada pela autora)

O modo de descolamento observado para a viga VSU-1 indica a perfeita aderência do sistema de ancoragem nas extremidades. A alta tensão de cisalhamento provocada na interface foi transferida através das ancoragens se propagando para o interior da viga de concreto armado, destacando a cobertura de concreto das armaduras longitudinais e transversais, indicando que a capacidade total de flexão das vigas foi utilizado e a força de tração na região da ancoragem supera a tensão resistente de tração no concreto, comportamento também observado no estudo de Mukherjee e Rai (2009).

A viga VSU-2 teve ruptura por descolamento do sistema de ancoragem, também iniciada pela fissura a 45° após a manta em sentido ao terço médio central da viga, conforme pode ser verificado na Figura 4.12 (a). Com o aumento da carga, houve amplificação da abertura da fissura, bem como o descolamento da manta de carbono na região lateral da viga juntamente com parte da superfície de concreto (Figura 4.12 (b); (c)) caracterizando o rompimento da viga.

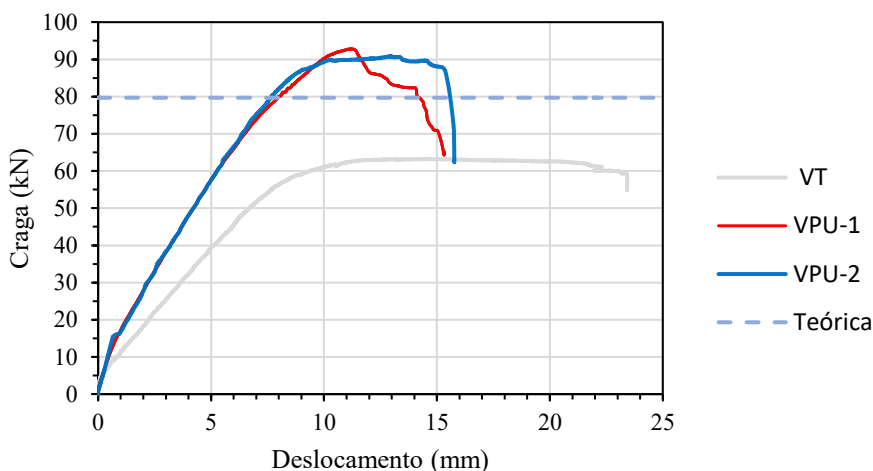
Figura 4.12 – Descolamento da ancoragem de laço em U na ruptura da viga VSU-2: (a) fissura a 45°; (b) descolamento do laço em U de manta de carbono; (c) amplificação da fissura a 45°



(fonte: elaborada pela autora)

As vigas protendidas apresentaram o comportamento carga e flecha observado na Figura 4.13, onde foi realizado a leitura média dos LVDTs também no centro do vão da viga. A representação das vigas testemunho apresentam a média das cargas e deformações encontradas.

Figura 4.13 – Curva carga x deslocamento para o grupo 4 (VPU)

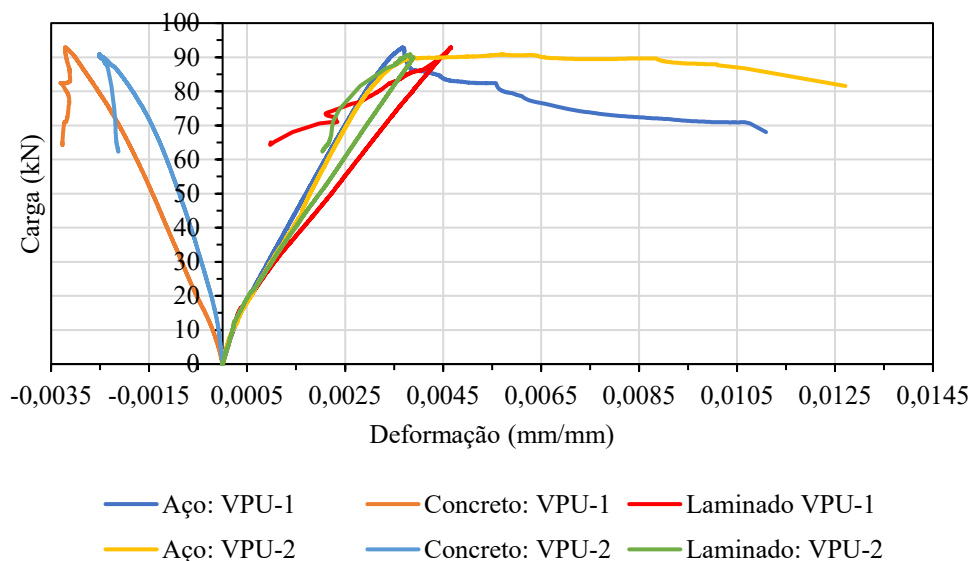


(fonte: elaborada pela autora)

A partir dos dados expostos na Figura 4.13 é possível observar que o comportamento das curvas das vigas protendidas e ancoradas com laço em U foi aproximadamente igual até cerca de 70 kN, onde a VPU-2 exibiu uma leve mudança na inclinação da viga em relação a viga VPU-1. A carga última e flecha na ruptura foram de 92,82 kN e 11,24 mm, respectivamente, para a primeira viga. Enquanto que a VPU-2 apresentou 90,86 kN e 12,87 mm de carga e flecha na ruptura, nessa ordem.

A deformação média do aço, concreto e laminado são exibidos no gráfico da Figura 4.14 para as vigas estudadas no grupo 4.

Figura 4.14 – Deformações no aço, concreto e laminado para as vigas do grupo 4 (VPU)

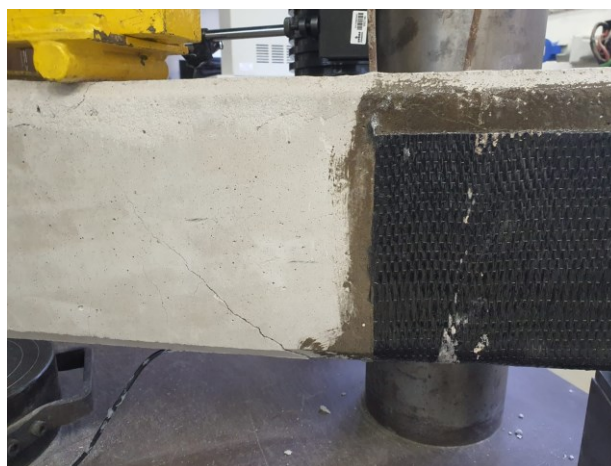


(fonte: elaborada pela autora)

A partir da deformação dos materiais observada na Figura 4.14, o aço e laminado deformaram aproximadamente juntos para ambas as vigas até uma carga aproximada de 25 kN. Nesse momento o aço assume um comportamento mais dúctil tendo uma deformação mais acentuada atingido seu patamar de escoamento em uma deformação de aproximadamente 2,8%, com uma deformação máxima de 10% e 12,5%, para as vigas VPU-1 e VPU-2, nessa ordem, na ruptura a deformação é de 5,74%. O laminado teve a deformação máxima na ruptura de ambas as vigas, sendo de 4,66% e 3,83% para VPU-1 e VPU-2 respectivamente, indicando proximidade na deformação, quando comparado com as vigas anteriores (VSU), logo, a protensão não influenciou no aumento na deformação dos laminados. O concreto teve sua deformação máxima na ruptura estando abaixo do limite recomendado pela norma NBR 6118 (ABNT, 2014) de 3,5%, atingindo 3,3% para a primeira viga, logo, mais solicitado que as vigas do grupo VS e VSU.

O modo de ruptura observado nas vigas VPU-1 e VPU-2 foi o mesmo, escorregamento do laminado da ancoragem. Para ambas as vigas, a falha se iniciou com uma fissura de 45° após a ancoragem em direção ao terço médio central da viga como pode ser observado na Figura 4.15.

Figura 4.15 – Fissura de 45° em direção ao terço médio da viga após o sistema de ancoragem



(fonte: elaborada pela autora)

A viga VPU-1 apresentou a fissura para uma carga aproximada de 75,5 kN, onde foi intensificada até o escorregamento do laminado do sistema de ancoragem, como pode ser observado na Figura 4.16. Como é possível perceber na imagem, o laminado foi descolado do substrato de concreto, representado um modo de falha prematuro da seção, com o consequente escorregamento no laço em U, representado pelo direcionamento lateral que as fibras tiveram, como pode ser verificado na Figura 4.17.

Figura 4.16 – Modo de ruptura da viga VPU-1: deslizamento do laminado com descolamento do substrato de concreto



(fonte: elaborada pela autora)

Figura 4.17 – Direcionamento lateral das fibras da ancoragem de laço em U



(fonte: elaborada pela autora)

Para a viga VPU-2 a fissura inclinada surgiu para uma carga de aproximadamente 79,40 kN. Esta se propagou até a ruptura da viga nesse local em aproximadamente 88 kN (Figura 4.18) no entanto, mesmo com a ruptura da seção transversal da viga a carga continuou aumentando, sendo resistido pelo aço e laminado até aproximadamente 90 kN com o deslizamento do laminado do sistema de ancoragem de um dos lados (Figura 4.19). O acréscimo da deformação entre a ruptura da seção transversal e o deslizamento do laminado foi de 2,19‰ para o aço e 0,02‰ para o laminado, indicando que o laminado apenas manteve parte da estabilidade do comprimento longitudinal da viga para a deformação da armadura longitudinal. O sistema de ancoragem também apresentou descolamento da interface de concreto nas faces laterais da viga, no entanto, de forma menos significativa que a encontrada para o grupo 3.

Figura 4.18 – Ruptura da seção transversal da viga VPU-2



(fonte: elaborada pela autora)

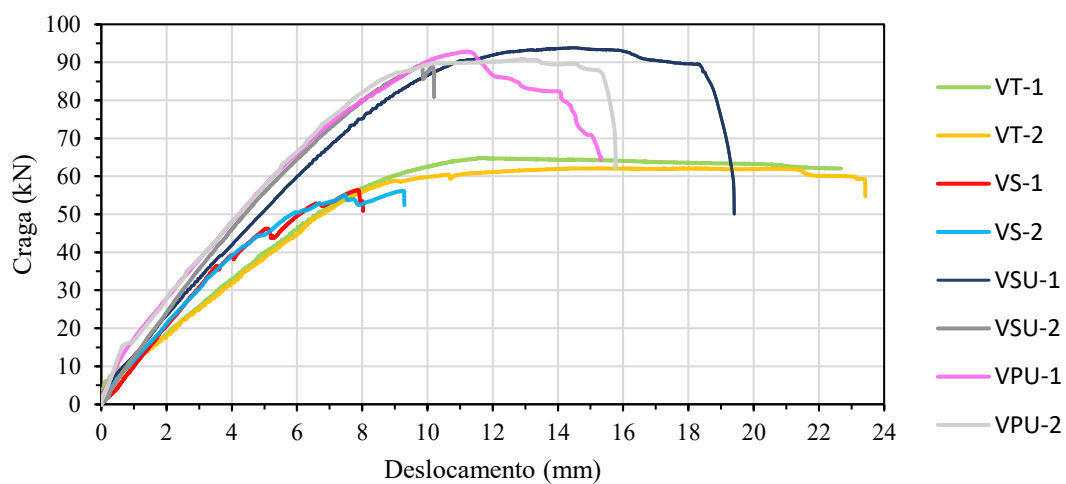
Figura 4.19 – Deslizamento do laminado do sistema de ancoragem da viga VPU-2



(fonte: elaborada pela autora)

A Figura 4.20 compara as curvas carga e deslocamento de todas as vigas ensaiadas, considerando os 4 grupos estudados.

Figura 4.20 – Curva carga x deslocamento de todos os grupos



(fonte: elaborada pela autora)

As vigas simplesmente reforçadas (VSU) apresentaram um comportamento superior em relação a viga testemunho em termos de rigidez, apresentando uma maior inclinação na fase elástica do concreto. No entanto após o início do escoamento do aço, os picos de cargas após fissuras entre o laminado e o concreto ocasionaram o rápido rompimento e decaimento da carga, não atingindo nem mesmo a carga última das vigas testemunho.

Já o grupo 3 (VSU) apresentou aumento da rigidez em relação às vigas testemunho visualmente significativo, onde para o deslocamento limite imposto pela NBR 6118 (ABNT, 2014) de 1/250 a carga média foi de 58,81 kN, e para as vigas testemunho de 42,87 kN, representando um aumento de 37,2%. A carga última alcançada para as vigas reforçadas (VSU) apresenta um valor médio de 91,42 kN, superior ao verificado para as vigas testemunho de 61,98 kN em 47,5%.

As vigas protendidas apresentaram comportamento praticamente semelhante em relação às simplesmente reforçadas com ancoragem de laço em U, com carga média última de 91,84 kN representando um aumento de 48,2 % em relação a viga testemunho. Tiveram uma menor deformação e conseqüentemente uma maior rigidez associada. O reforço permitiu que a carga de fissuração fosse aumentada quando comparada a viga testemunho, corroborado com o resultado esperado de redução da abertura de fissuras. Comportamento também observado nos estudos de Woo et al. (2013), Xue et al. (2008), Mukherjee e Rai (2009).

A Tabela 4.5 a seguir apresenta os momentos e cargas ultimas das seções e o incremento adquirido entre as vigas reforçadas e a viga testemunho.

Tabela 4.5 – Carga e momento último dos grupos estudados

Espécie	Carga		Momento		Incrementos de resultados médios em relação à viga testemunho
	Última (kN)	Média (DP)	Último (kN.m)	Média (DP)	
VT-1	64,84		15,13		
VT-2	62,12	63,48 (1,92)	14,49	14,81 (0,45)	-
VS-1	56,36		13,15		
VS-2	56,18	56,27 (0,13)	13,11	13,13 (0,028)	Não houve incremento
VSU-1	93,82		21,89		
VSU-2	89,01	91,42 (3,40)	20,77	21,33 (0,79)	47,5%
VPU-1	92,81		21,66		
VPU-2	90,86	91,84 (1,38)	21,20	21,43 (0,33)	48,2%

(fonte: elaborada pela autora)

É possível observar um aumento significativo das vigas reforçadas com ancoragem e vigas protendidas em relação a viga testemunho. Para as simplesmente reforçadas sem ancoragem, a carga última não foi superior devido ao descolamento prematuro do laminado, indicando a necessidade de ancoragem, validando o modo de falha previsto no dimensionamento.

Como método de avaliação se houve diferença significativa entre os grupos ensaiados empregou-se o método estatístico de análise de variância (ANOVA) com nível de confiabilidade de 95%, sendo assim um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). Os resultados constam na Tabela 4.6, e o valor de P obtido está relacionado com a relevância, se menor ou igual a 0,05, indica com 95% de precisão que os resultados diferem estatisticamente entre si. Outro aspecto a ser observado é a distribuição F de Fisher-Snedecor onde, o fator F deve ser maior que $F_{crítico}$ para ser considerado que houve distinção estatística.

Tabela 4.6 – Análise estatística

Análise	F	$F_{crítico}$	-P
Carga na ruptura do grupo 3 (VSU)	102,22	18,51	0,0096
Carga na ruptura do grupo 4 (VPU)	287,12	18,51	0,0035
Carga na ruptura entre o grupo 4 e 3	0,026	18,51	0,88

(fonte: elaborada pela autora)

Com base nos resultados obtidos, a estatística mostrou que houve diferença significativa para a carga na ruptura, através do acréscimo entre as médias das cargas das vigas simplesmente aderidas com ancoragem (VSU) em relação às vigas testemunho em 47,5%. Bem como houve significância com o incremento na carga última em 48,2% das vigas protendidas em relação as vigas testemunho. No entanto, quando realizado a análise para verificação da diferença estatística entre a carga de ruptura do grupo 4 e o grupo 3 de modo de validar a eficácia da protensão em relação ao aumento da resistência na ruptura das vigas, o resultado não teve inferência significativa.

4.2.3 Ductilidade

A partir dos dados obtidos experimentalmente referente as cargas e flechas últimas foi possível determinar o índice de ductilidade energética através da Equação 3.19 e compara-los por meio da Tabela 4.7, onde é possível observar que as vigas reforçadas apresentaram um índice de ductilidade energética de flecha inferior ao encontrado para as vigas do Grupo 1 (VT). Um comportamento já esperado, visto que o reforço aumenta a rigidez da viga, reduzindo sua deformação. A diferença é mais acentuada para o grupo 2 (VS) com o menor índice de

ductilidade para a viga VS-1 que sofreu o modo de ruptura por descolamento prematuro do laminado.

Tabela 4.7 – Índice de ductilidade energética de flecha

Espécie	Índice de ductilidade energética de flecha (μ_{δ})
VT-1	2,49
VT-2	2,44
VS-1	1,41
VS-2	1,54
VSU-1	1,95
VSU-2	1,27
VPU-1	1,69
VPU-2	1,84

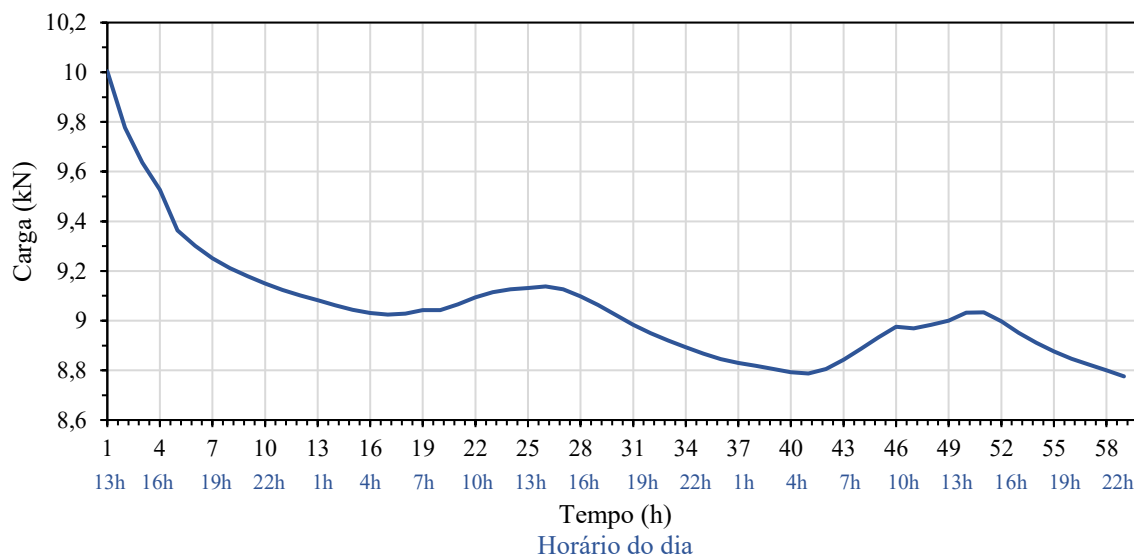
(fonte: elaborada pela autora)

4.2.4 Sistema de protensão

A análise do sistema de protensão se deu pelo monitoramento da célula de carga e de três extensômetros localizados nas extremidades e no centro do laminado durante o período de cura da resina, que totalizou 68 horas. Não foi realizado um estudo detalhado da perda da protensão por se tratarem de poucas unidades, não gerando uma confiabilidade para maiores aprofundamentos.

Os dados do monitoramento da célula de carga da primeira viga protendida (VPU-1) são apresentados na Figura 4.21.

Figura 4.21 – Monitoramento da célula de carga da viga protendida 1 (VPU-1)



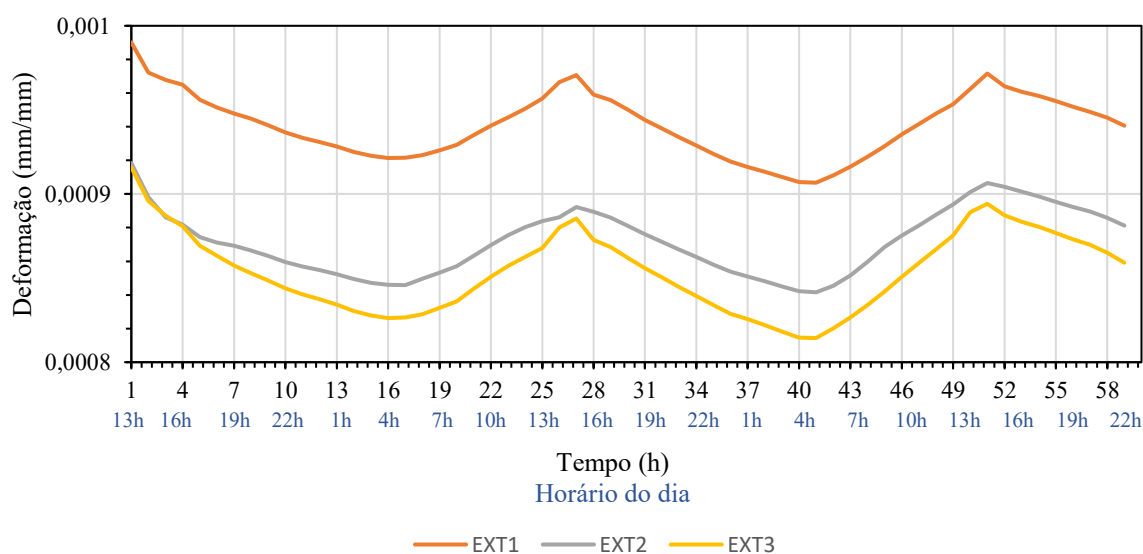
(fonte: elaborada pela autora)

De acordo com a curva apresentada acima é possível observar um decréscimo da carga inicial da protensão, sendo estimada em aproximadamente 1kN nas primeiras 16 horas de monitoramento. Essa pode ser considerada como uma perda imediata devido principalmente a interação do sistema de ancoragem e o PRFC. Posteriormente a esse decréscimo de carga houveram dois aumentos da carga de protensão, relacionados à dilatação térmica do laminado, onde é possível perceber relações entre os horários do dia em que houve esse acréscimo. O ensaio iniciou no dia 6 de dezembro às 13 hrs e os picos de aumento de carga ficaram entre às 12 horas e 14 horas dos dias subsequentes, onde ocorreram as maiores temperaturas do dia 7 de dezembro e 8 de dezembro, registrando 31°C e 35°C de máxima.

Ao final das 58 horas de análise, o equipamento de monitoramento registrou um erro não realizando a leitura das 10 horas seguintes. Sendo possível determinar que a força média do sistema de protensão para a viga VPU-1 foi de 9,05 KN, totalizando uma perda desde o início da carga de cerca de 0,95 kN.

Na figura 4.22 é demonstrado o monitoramento das deformações nos três extensômetros, sendo o EXT.1 posicionado na extremidade do laminado no lado ativo da protensão, EXT. 2 no centro do comprimento longitudinal do laminado, e o EXT.3 localizado na extremidade do laminado no lado passivo da protensão.

Figura 4.22 – Deformações no laminado durante a protensão da viga VPU-1

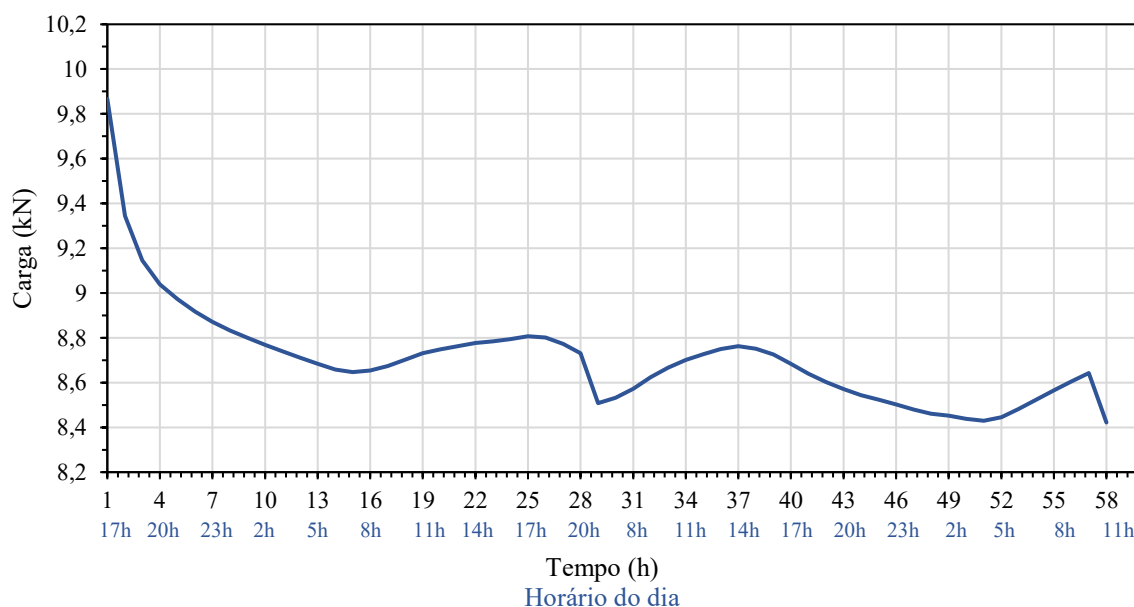


(fonte: elaborada pela autora)

É possível verificar a partir da Figura 4.22 que a deformação no laminado na extremidade ativa é maior em relação aos outros extensômetros, iniciando com uma deformação de aproximadamente 1‰ enquanto para o Ext.2 e 3 ficam inferiores a 0,90‰. Nota-se também o aumento da deformação do laminado nas temperaturas já citadas anteriormente. De acordo com Tabela 4.2.2 da norma ACI 440.4R-04 (ACI, 2004), o PRFC possui coeficiente de expansão térmica negativo da ordem de -1.10^{-6} °C a 0, logo, a tendência do material é encurtar com o aumento de temperatura, no entanto, como ele está sendo tracionado pelo sistema de protensão a carga de protensão aumenta e a deformação também. A deformação média do laminado foi de 0,89‰.

Os dados do monitoramento da célula de carga para a segunda viga protendida são apresentados na Figura 4.23. No início da 28ª hora de cura, ocorreu um erro no sistema de captação e o programa não apresentou os dados durante as 12 horas seguintes. O comportamento da carga no decorrer do tempo é semelhante ao observado para a viga VPU-1. A carga máxima no início dos ensaios foi de 9,87 kN, ocorrendo uma perda imediata de aproximadamente 1,22 kN nas primeiras 16 horas de cura da resina. Posteriormente, o mesmo comportamento das variações da carga com o aumento da temperatura é observado. A viga foi protendida no dia 12 de dezembro de 2022, e os dias subsequentes 13 e 14, apresentaram 26°C e 30°C de máxima, respectivamente.

Figura 4.23 – Monitoramento da célula de carga da viga protendida 2 (VPU-2)

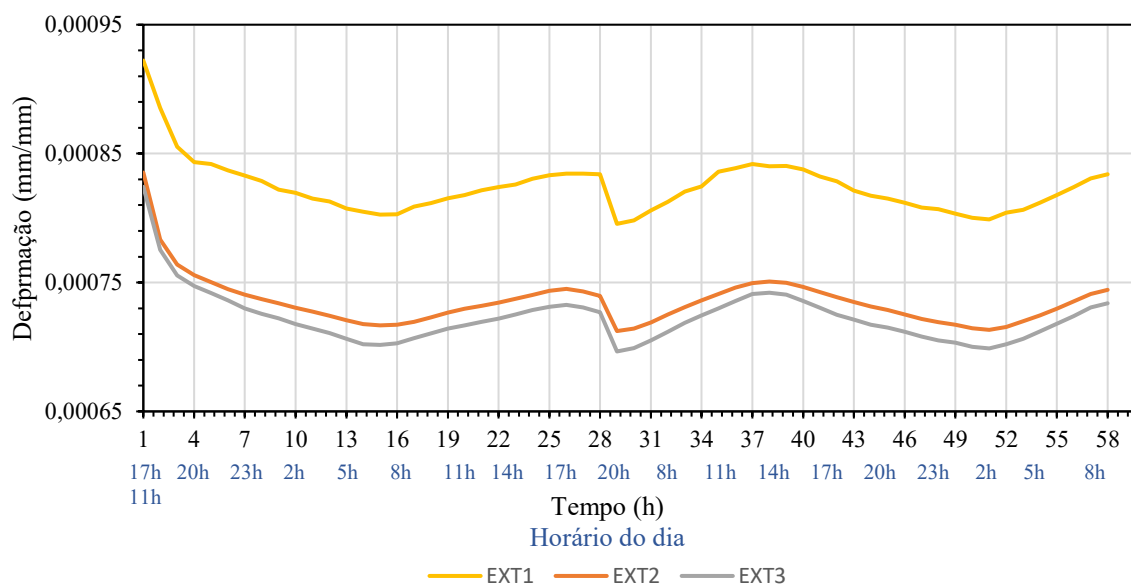


(fonte: elaborada pela autora)

A carga média monitorada durante as 68 horas de aplicação da protensão foi de 8,71 kN, totalizando uma perda total no sistema de 1,16 kN, correspondendo a cerca de 13,32%.

A Figura 4.24 demonstra o comportamento das deformações monitoradas durante a protensão no laminado. O EXT.1 foi posicionado na extremidade ativa do laminado, EXT. 2 no centro e o EXT.3 na extremidade passiva do laminado.

Figura 4.24 – Deformações no laminado durante a protensão da viga VPU-2



(fonte: elaborada pela autora)

A partir da Figura 4.24 nota-se comportamento parecido ao observado para a deformação do laminado na viga VPU-1. Próximo ao sistema de ancoragem ativo da protensão a deformação é maior do que no centro e na extremidade passiva da protensão, cujo dois últimos apresentam valores muito próximos de deformações. O mesmo comportamento de variação da deformação com a temperatura ao longo do dia foi observado para a viga VPU-2 corroborando com o discutido anteriormente. A máxima deformação foi obtida no início do carregamento com 0,92 % para o EXT.1, enquanto que o EXT.2 e EXT. 3 apresentaram 0,84% e 0,82%, respectivamente A deformação média foi de 0,76%.

A Tabela 4.8 demonstra os principais valores em termos de carga e perdas associadas ao sistema de protensão contra suporte externo idealizado para o estudo, de modo comparativo. De acordo com os resultados experimentais apresentados, é possível perceber que o nível médio de protensão aplicado no estudo é de 4,10% da capacidade resistente a tração do laminado e a

perda média associada ao sistema de protensão com ancoragem em suporte externo é de 10,6% da carga média aplicada para protensão.

Tabela 4.8 – Nível e perda de protensão associado ao sistema de protensão contra suporte externo

Espécie	Carga máxima aplicada (kN)	Perda de protensão (kN)	Carga de protensão média (kN)	Nível de protensão médio ($\%f_{fu}$)
VPU-1	10,00	0,95	9,05	4,17
VPU-2	9,87	1,16	8,71	4,03
Média	9,94	1,05	8,89	4,10

(fonte: elaborada pela autora)

4.3 ANÁLISE TEÓRICA-EXPERIMENTAL

O momento de fissuração obtido analiticamente e experimentalmente para as vigas testemunho e protendida são apresentados comparativamente na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Comparação entre carga de fissuração teórica e experimental

Espécie	Carga de fissuração experimental (kN)	Carga de fissuração teórica	Carga de fissuração teórica conforme ANSYS
VT	7,74	8,50	8,8
VPU	16,20	15,34	-

(fonte: elaborada pela autora)

A relação entre os valores é próxima, da ordem de 1,10 para as vigas testemunho em relação ao valor obtido através da NBR 6118 (ABNT, 2014) e 1,14 para os valores obtidos através do ANSYS. Para as vigas protendidas a relação entre a carga de fissuração teórica e a experimental é de 0,95, indicando proximidade nos resultados e validação do modelo teórico.

A capacidade resistente das seções em termos de carga e momento último são comparados analiticamente e experimentalmente na Tabela 4.10 a seguir. Os valores experimentais são apresentados em seu valor médio. É possível perceber a similaridade entre os valores calculados analiticamente e obtidos experimentalmente. Para as vigas testemunho, a relação entre os valores teóricos e experimentais é de 0,91, indicando proximidade entre os resultados. Já para o segundo grupo (VS) a relação é de 1,41, sendo a maior diferença observada entre os resultados analíticos e experimentais, visto que o modo de ruptura prematuro prejudicou o aumento da carga.

Tabela 4.10 – Comparação entre carga e momento último teórico e experimental

Espécie	Carga última experimental (kN)	Carga última experimental média (kN)	Carga última teórica (kN)	Momento Último (kN.m)	Momento último teórico (kN.m)
VT-1	64,84	63,48	57,5	14,81	13,42
VT-2	62,12				
VS-1	56,36	56,27	79,69	13,13	18,59
VS-2	56,18				
VSU-1	93,82	91,42	79,69	21,33	18,59
VSU-2	89,01				
VPU-1	92,81	91,84	94,74	21,43	22,11
VPU-2	90,86				

(fonte: elaborada pela autora)

As vigas simplesmente reforçadas com laço em U apresentaram valores próximos aos teóricos calculados de acordo com a ACI 440.2R-17 (ACI, 2017) com uma relação de 0,87, indicando a validação do sistema de ancoragem para permitir um maior aproveitamento do conjunto de reforço.

Para as vigas com laminado protendido ancorados com laço em U (VPU) os resultados obtidos analiticamente através do item 3.6.1.2 são próximos aos experimentais, com uma relação de 1,03, corroborando para a validação do método proposto.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas com a análise teórica e experimental de vigas de concreto armado reforçadas com laminados de PRFC com e sem protensão através de um sistema de reação contra suporte externo. Os resultados foram comparados com vigas testemunho e simplesmente reforçadas em termos de momento e carga de fissuração, momento e carga último e ductilidade.

5.1 CONCLUSÕES

No estudo foram obtidos os resultados estáticos experimentais em termos de capacidade de resistência de vigas testemunho sem nenhum sistema de reforço, com vigas de concreto armado reforçadas à flexão com laminados de PRFC simplesmente aderidos e vigas reforçadas com laminados protendidos ancorados com sistema não metálicos.

As vigas simplesmente reforçadas apresentaram comportamento inferior às vigas testemunho em termos de carga último, devido ao modo de ruptura prematuro de descolamento do laminado e destacamento da camada de reforço da viga de concreto armado, impedindo que a viga atingisse maiores cargas ou deflexões. No entanto, a rigidez proporcionada pelo reforço é superior a encontrada para as vigas testemunho.

De acordo com os dados apresentados, as vigas simplesmente reforçadas e ancoradas com laço em U apresentaram comportamento satisfatório em relação às vigas testemunho, com aumento da capacidade resistente das seções em termos de carga de ruptura em aproximadamente 47,5%.

O método de dimensionamento proposto pela norma ACI 440.2R-17 (ACI, 2017) e exposto no item 2.4.3. do presente estudo demonstrou ser suficientemente adequado em termos de previsões de momento último da seção reforçada com compósitos, quando a relação entre os resultados teóricos e experimentais para as vigas do terceiro grupo foi de 0,87, apresentando boa aproximação, levando em consideração que não foram utilizados os coeficientes de minoração. Além disso, a previsão da ruptura prematura da seção através de descolamento ou delaminação foi confirmado para o grupo 2, sendo evitado com a ancoragem no grupo 3.

Segundo os resultados dos grupos a previsão de aumento da rigidez dos elementos reforçados e da redução da abertura das fissuras foi confirmada, reduzindo a ductilidade das vigas reforçadas em relação as vigas testemunho. O grupo 2 foi o que apresentou menor ductilidade devido a falha abrupta do sistema de reforço.

Conforme os resultados obtidos para as vigas protendidas, foi possível constatar que apresentaram comportamento superior às vigas testemunho, indicando acréscimos na carga última de aproximadamente 48,2%, e na carga de fissuração de 109,3%. No entanto, em comparação com as vigas do grupo 3 (VSU) não houve diferença significativa nos resultados, comprovado utilizando a análise de variância ANOVA, indicando que a tensão aplicada na protensão se mostrou insuficiente para um aumento significativo da carga total do sistema, bem como o sistema de ancoragem não propiciou maiores cargas durante o ensaio de flexão estática a quatro pontos, além disso, a resistência média do concreto de aproximadamente 22 MPa prejudicou o alcance de melhores resultados.

O sistema de protensão idealizado na presente pesquisa limitou a aplicação de maiores cargas de tração ao laminado, resultando em uso de apenas 4,10% da resistência a tração do compósito. As perdas de protensão observadas foram de 10,6% da carga média aplicada para protensão, resultado do sistema de ancoragem e do encurtamento elástico do concreto no momento da liberação da protensão.

O sistema de ancoragem proposto para a protensão se mostrou eficiente, pois não houve a sua ruptura. No entanto, demonstrou falhas com relação ao deslizamento do laminado, indicando uma necessidade de maior comprimento de ancoragem, evidenciado pelas fissuras a 45° após o laço de manta em U durante o ensaio de flexão estática a quatro pontos.

As deformações observadas no laminado durante a protensão foram mais evidenciadas próximas à ancoragem ativa da protensão, e diminuía ao longo do comprimento longitudinal do compósito. A deformação do laminado durante o ensaio de flexão estática a quatro pontos foi 4,66‰ e 3,83‰ para a viga VPU-1 e VPU-2, utilizando apenas 27,41% e 22,53% da deformação última do compósito, indicando baixa eficiência de uso.

Os resultados obtidos com a metodologia proposta no item 3.6.1.2 para determinação do momento último teórico de vigas de concreto armado protendidas com laminados de PRFC se mostrou eficiente, visto que os resultados teóricos e experimentais foram muito próximos, com relação entre eles da ordem de 1,03, indicando uma referência para dimensionamentos dos sistemas protendidos com laminados.

Considera-se que as vigas reforçadas com laminados de PRFC protendidos obtiveram resultados satisfatórios com a baixa tensão ao qual foi submetida, visto que o modo de ruptura foi de deslizamento no sistema de ancoragem, indicando falha prematura do sistema.

Mediante o exposto, os sistemas reforçados com laminados de PRFC, protendidos ou não, aumentam a capacidade resistente das vigas de concreto armado de modo que possam ser usualmente aplicados mediante diretrizes normativas a ser investigadas.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De acordo com os resultados e conclusões obtidas nesta pesquisa com laminados de PRFC, simplesmente aderidos e protendidos são indicadas algumas sugestões de pesquisa para trabalhos futuros:

- a) Análise das perdas imediatas de protensão em laminados de PRFC aplicados como reforço em vigas de concreto armado através de um sistema de reação contra suporte externo por meio de diferentes níveis de protensão, possibilitando uma metodologia analítica do cálculo da perda para o sistema proposto, além da verificação da influência dos diferentes níveis de tensão;
- b) Estudo das perdas ao longo do tempo da protensão em laminados de PRFC aplicados como reforço em vigas de concreto armado;
- c) Verificação da protensão em laminados de PRFC aplicados como reforço em vigas de concreto armado com diferentes sistemas de ancoragem, metálicos e não metálicos;
- d) Verificação do modo de ruptura de vigas protendidas com laminados de PRFC com ancoragem não-metálica com maior comprimento de ancoragem;
- e) Estudo de um sistema de protensão em laminados de PRFC através da reação em suporte externo com duas ancoragens ativas;
- f) Análise de um sistema de protensão de laminados de PRFC com reação no próprio elemento a ser reforçado de modo a diminuir as perdas da protensão;
- g) Modelagem computacional da metodologia analítica proposta neste trabalho para validação do método de previsão do momento último da seção.

REFERÊNCIAS

- AL-SAAWANI, M. A.; EL-SAYED, A. K.; AL-NEGHEIMISH, A. I. Assessment of plate-end debonding design provisions for RC beams strengthened with FRP. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 17, n. 2, 2020.
- AMELI, M.; RONAGH, H. R.; DUX, P. F. Behavior of FRP Strengthened Reinforced Concrete Beams under Torsion. **Journal of Composites for Construction**, v. 11, n. 2, p. 192-200, 2007.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures: ACI 440.2R-17**. Farmington Hills, 2017.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons: ACI 440.4R-04**. Farmington Hills, 2004.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: ACI 440.R-07**. Farmington Hills, 2007.
- AMRAN, Y. H. M; ALYOUSEF, R.; RASHID, R. S. M.; ALABDULJABBAR, H.; HUNG, C. C. Properties and applications of FRP in strengthening RC structures: A review. **Structures**, v.16, p. 208–238, 2018.
- ARAM, M. R.; CZADERSKI, C.; MOTAVALLI, M. Debonding failure modes of flexural FRP-strengthened RC beams. **Composites Part B: Engineering**, v. 39, n. 5, p. 826-841, 2008.
- ARQUEZ, A. P. **Aplicação de Laminado de Polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) inserido em substrato de microconcreto com fibras de aço para reforço à flexão de vigas de concreto armado**. 2010. 242 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013. **NBR ISO 6892-1:2013 Versão Corrigida/2015: Materiais metálicos - Ensaio de Tração. Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1: Edificações habitacionais – Desempenho - Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto -Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto: procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.
- AZEVEDO, J. R. R. **Reforço à flexão de lajes de betão armado com laminados de CFRP pré-esforçados**. 2015. 140 p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Geotecnia) – Escola de Engenharia. Universidade do Minho, Braga, 2015.

BAGGIO, D.; SOUDKI, K.; NOËL, M. Strengthening of shear critical RC beams with various FRP systems. **Construction and Building Materials**, v. 66, p. 634-644, 2014.

BAKIS, C. E.; BANK, L. C.; BROWN, V. L.; COSENZA, E.; DAVALOS, J. F.; LESKO, J. J.; MACHIDA, A.; RIZKALLA, S. H.; TRIANTAFILLOU, T. C. Fiber Reinforced Polymer Composites for Construction – State-of-the-Art Review. **Journal of Composites for Construction**, v. 6, n. 2, p. 73-87, 2002.

BANIJAMALI, S. M.; ESFAHANI, M. R.; NOSRATOLLAHI, S.; SOHRABI, M. R.; MOUSAVI, S. R. Reviewing the FRP Strengthening Systems. **American Journal of Civil Engineering**, v. 3, n. 2, p. 38-43, 2015.

BEBER, A.J. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

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**, v. 32, p. 27-40, 2012.

BERSET, T.; SCHWEGLER, G.; TRAUSCH, L. Post-strengthening of a motorway bridge with prestressed CFRP strips. **Tec 21 – Sika**, v. 22, p. 26-29, 2002.

BILOTTA, A.; CERONI, F.; NIGRO, E.; PECCE, M. Efficiency of CFRP NSM strips and EBR plates for flexural strengthening of RC beams and loading pattern influence. **Composite Structures**, v. 124, p. 163-175, 2015.

BISCHOFF, P. H. Reevaluation of Deflection Prediction for Concrete Beams Reinforced with Steel and Fiber Reinforced Polymer Bars. **J. Struct. Eng.**, v. 131, n. 5, p. 752-767, 2005.

BODZAK, P. Prestressing and preloading effect in RC slabs strengthened with normal and pretensioned CFRP EBR strips. **Composites Part B: Engineering**, v. 169, p. 19-28, 2019.

BOROWSKI, G. C. **Estudo experimental e numérico de vigas curtas reforçadas com PRFC à força cortante**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

CAO, Q.; ZHOU, J.; WU, Z.; MA, Z. J. Flexural behavior of prestressed CFRP reinforced concrete beams by two different tensioning methods. **Engineering Structures**, v. 189, p. 411-422, 2019.

CARNEIRO, L. A. V.; TEIXEIRA, A. M. A. J. Propriedades e características dos materiais compósitos poliméricos aplicados na Engenharia de Construção. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, n.3, p. 54-66, 2008.

CASTILLO, E. D. R.; DIZHUR, D.; GRIFFITH, M.; INGHAM, J. Experimental testing and design model for bent FRP anchors exhibiting fiber rupture failure mode. **Composite Structures**, v. 210, p. 618-627, 2019c.

CASTILLO, E. D. R.; DIZHUR, D.; GRIFFITH, M.; INGHAM, J. Strengthening RC structures using FRP spike anchors in combination with EBR systems. **Composite Structures**, v. 209, p. 668-685, 2019b.

CASTILLO, E. R.; GRIFFITH, M.; INGHAM, J. Straight FRP anchors exhibiting fiber rupture failure mode. **Composite Structures**, v. 207, p. 612-624, 2019a.

CAUICH, P. J. P.; MOLINA, R. M.; MARRUFO, J. L. G.; FRANCO, P. J. H. Adhesion, strengthening and durability issues in the retrofitting of Reinforced Concrete (RC) beams using Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) – A Review. **Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Const...**, v.9, n.2, p. 130-151, 2019.

CERNIAUSKAS, G.; TETTA, Z.; BOURNAS, D. A.; BISBY, L. A. Concrete confinement with TRM versus FRP jackets at elevated temperatures. **Materials and Structures**, v. 53, n. 3, 2020.

CHAJES, M. J.; THOMSON, T. A.; JANUSZKA, T. F.; FINCH, W. W. Flexural strengthening of concrete beams using externally bonded composite materials. **Construction and Building Materials**, v. 8, n. 3, p. 191-201, 1994.

CHALIORIS, C. E. Analytical model for the torsional behaviour of reinforced concrete beams retrofitted with FRP materials. **Engineering Structures**, v. 29, n. 12, p. 3263-3276, 2007.

CHAR, M. S.; SAADATMANESH, H.; EHSANI, M. R. Concrete Girders Externally Prestressed With Composite Plates. **PCI JOURNAL**, p. 40-51, 1994.

CHEN, G. M.; LI, S. W.; FERNANDO, D.; LIU, P. C.; CHEN, J. F. Full-range FRP failure behaviour in RC beams shear-strengthened with FRP wraps. **International Journal of Solids and Structures**, v. 125, p. 1-21, 2017.

CHOI, E.; UTUI, N.; KIM, H. S. Experimental and analytical investigations on debonding of hybrid FRPs for flexural strengthening of RC beams. **Composites Part B: Engineering**, v. 45, n. 1, p. 248-256, 2013.

CHOWDHURY, E. U.; EEDSON, R.; BISBY, L. A.; GREEN, M. F.; BENICHO, N. Mechanical Characterization of Fibre Reinforced Polymers Materials at High Temperature. **Fire Technology**, v. 47, n. 4, p. 1063–1080, 2011.

CNR – Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction. **DT 200 R1: Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures**. Roma, 2013.

CORREIA, L. L. G. **Durability and long-term behaviour of RC slabs strengthened in flexure with prestressed CFRP laminate strips** 2018. Thesis (Doctorate in Civil Engineering) – Escola de Engenharia. Universidade do Minho, Portugal.

CORREIA, L.; SENA-CRUZ, J.; FRANÇA, P. Estudos numéricos de lajes de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP pré-esforçados. In: ENCONTRO NACIONAL BETÃO ESTRUTURAL, 2018, Lisboa. **Anais...** Lisboa: [s.n.], 2018.

CORREIA, L.; TEIXEIRA, T.; MICHELS, J.; ALMEIDA, J. A. P. P.; SENA-CRUZ, J. Flexural behaviour of RC slabs strengthened with prestressed CFRP strips using different anchorage systems. **Composites Part B: Engineering**, v. 81, p. 158-170, 2015.

COSTA, R. M. M. **Estudo teórico do dimensionamento do reforço de almas de pontes celulares em concreto utilizando polímero reforçado com fibra de carbono: estudo de caso do Viaduto Av. Joseph Wagner (BR-101/BA)**. 2019. 255 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Mestrado em Engenharia de Estruturas. Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2019.

CZADERSKI, C.; MEIER, U. EBR strengthening technique for concrete, long-term behaviour and historical survey. **Polymers**, v.10, n.1, 2018.

CZADERSKI-FORCHMANN, C. **Strengthening of Reinforced Concrete Members by Prestressed, Externally Bonded Reinforcement With Gradient Anchorage**. 2012. Tese (Doutorado) - ETH Zurich, Zurich.

DALFRÉ, G. M.; PARSEKIAN, G. A.; FERREIRA, D. C. Degradation of the EBR CFRP strengthening system applied to reinforced concrete beams exposed to weathering. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 14, n. 2, 2021.

DE LORENZIS, L.; NANNI, A. Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Near-Surface Mounted Fiber-Reinforced Polymer rods. **ACI Structural Journal**, v. 98, n. 1, p. 60-68, 2001.

DEURING, M. **Verstärken von Stahlbeton mit gespannten Faserverbundwerkstoffen**. Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, EMPA – Relatório 224, Dübendorf, 1993.

DIAS, S. J. E.; SILVA, J. R. M.; BARROS, J. A. O. Flexural and shear strengthening of reinforced concrete beams with a hybrid CFRP solution. **Composite Structures**, v. 256, 2021.

DUTHINH, D.; STARNES, M. Strength and Ductility of Concrete Beams Reinforced with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Plates and Steel. **J. Compos. Constr.**, v. 8, n. 1, p. 59-69, 2004.

EL-HACHA, R.; WIGHT, R. G.; GREEN, M. F. Prestressed fibre-reinforced Polymer laminates for strengthening structures. **Progress in Structural Engineering and Materials**, v. 3, n. 2, p. 111-121, 2001.

ESCOBAR, C. J. **Avaliação do desempenho estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com lâminas de CFRP tensionadas**. 2003. 206 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Setor de Engenharia. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BETÓN. **Externally bonded FRP reinforcement for RC structures - Bulletin 14**. Lausanne: FIB, 2001. Technical Report – Fédération Internationale du Béton, 2001.

FERNANDES, P.; SENA-CRUZ, J.; FERNANDES, C.; SILVA, P.; DIAS-DA COSTA, D.; JÚLIO, E. Flexural response of HSC girders strengthened with non-and prestressed CFRP laminates. In: FRPRCS-11. **Anais...** Guimarães: Universidade do Minho, 2013.

FIKRY, M. J. M.; OGIHARA, S.; VINOGRADOV, V. The effect of matrix cracking on mechanical properties in FRP laminates. **Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes**, v. 4, n. 3, 2018.

FRANÇA, P. M. M. **Reinforced Concrete Beams Strengthened with Prestressed CFRP Laminates**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

GAO, P.; GU, X.; MOSALLAM, A. S. Flexural behavior of preloaded reinforced concrete beams strengthened by prestressed CFRP laminates. **Composite Structures**, v. 157, p. 33-50, 2016.

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

GARDEN, H. N.; HOLLAWAY, L. C. An experimental study of the failure modes of reinforced concrete beams strengthened with prestressed carbon composite plates. **Composites Part B**, v. 29, p. 411-424, 1998.

GARDEN, H. N.; HOLLAWAY, L. C.; THORNE, A. M. The strengthening and deformation behaviour of reinforced concrete beams upgraded using prestressed composite plates. **Materials and Structures/Matériaux et Constructions**, v. 31, p. 247-258, 1998.

GOOGLE EARTH, 2019. Av. dos Andrades, SP. Coordenadas -19°92'03,03"s, -43° 93'49,74"w. Acesso em: 27 ago. 2021. Data da imagem: ago. 2019.

HAGHANI, R.; AL-EMRANI, M.; KLIGER, R. A new method for strengtheng concrete structures using prestressed FRP laminates. **Implementing Innovative Ideas in Structural Engineering and Project Management**, 2015.

JUNG, W.-T.; PARK, Y.-H.; PARK, J.-S.; KANG, J.-Y.; YOU, Y.-J. Experimental Investigation on Flexural Behavior of RC Beams Strengthened by NSM CFRP Reinforcements. In: Seventh International Symposium of the Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-7), 2005, Kansas City **Anais...** Missouri: [s.n.], 2005.

JUVANDES, L. F. P. **Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de “CFRP”**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) –Departamento de Engenharia Civil. Universidade do Porto, Porto.

KACHLAKEV, D.; MCCURRY, D. D. Behavior of full-scale reinforced concrete beams retrofitted for shear and flexural with FRP laminates. **Composites: Part B**, v. 31, p. 445-452, 2000.

KIM, Y. J.; GREEN, M. F.; WIGHT, R. G. Bond and short-term prestress losses of prestressed composites for strengthening PC beams with integrated anchorage. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 29, n. 9, p. 1277-1294, 2010.

KIM, Y. J.; WIGHT, R. G.; GREEN, M. F. Flexural Strengthening of RC Beams with Prestressed CFRP Sheets: Development of Nonmetallic Anchor Systems. **J. Compos. Constr.**, v. 12, n. 1, p. 35-43, 2008.

KODUR, V. K. R.; BISBY, L. A.; GREEN, M. F. Preliminary guidance for the design of FRP-strengthened concrete members exposed to fire. **Journal of Fire Protection Engineering**, v. 17, p. 5-26, 2007.

KOTYNIA, R. **FRP Composites for Flexural Strengthening of Concrete Structures Theory, Testing, Design**. Polônia: Lodz University Of Technology Press, 2019. 242 p.

KOTYNIA, R.; STASKIEWICZ, M.; MICHELS, J.; CZADERSKI, C.; MOTAVALLI, M. Pioneering strengthening of bridge girders with pretensioned CFRP laminates in Poland. In: SMAR 2015: Third Conference on Smart Monitoring, Assessment & Rehabilitation of Civil Structures. **Anais...** Turquia: [s.n.], 2015.

KRZYWOŃ, R. Behavior of EBR FRP Strengthened Beams Exposed to Elevated Temperature. **Procedia Engineering**, v. 193, p. 297-304, 2017.

LEE, D. H.; HAN, S. J.; KIM, K. S.; LAFAVE, J. M. Shear strength of reinforced concrete beams strengthened in shear using externally-bonded FRP composites. **Composite Structures**, v. 173, p. 177-187, 2017.

LI, X.; DENG, J.; WANG, Y.; XIE, Y.; LIU, T.; RASHID, K. RC beams strengthened by prestressed CFRP plate subjected to sustained loading and continuous wetting condition: Time-dependent prestress loss. **Construction and Building Materials**, v. 275, 2021.

LIU, I. S. T.; OEHLERS, D. J.; SERACINO, R. Study of Intermediate Crack Debonding in Adhesively Plated Beams. **Journal of composites for construction**, v. 11, n. 2, p. 175-183, mar./abr. 2007.

MACHADO, A. P. **Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono**. Edição Viapol, 2006.

MACHADO, A. P.; MACHADO B. A. **Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Sistemas Compostos FRP**, Editora Pini, 2015.

MASHREI, M.A.; MAKKI, J. S.; SULTAN, A. A. Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Sheets with Grooves. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 16, n. 4, 2019.

MEIER, U. Composite Materials in Bridge Repair. **Applied Composite Materials**, v. 7, p. 75-94, 2000.

MEIER, U. Designing and producing materials by combination. **Materials and Structures/Matériaux et Constructions**, v. 21, p. 85-89, 1988.

- MEIER, U. Is there a future for automated application of cfrp strips for post strengthening? In: 8th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures, FRPRCS-8. **Anais...** Patras: [s.n], 2007.
- MEIER, U. Rehabilitation and Retrofitting of Structures Trough External Bonding of Thin Carbon Fibre Sheets. In: PROCEEDINGS OF THE 7TH EUROPEAN CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS ECCM 7, London. **Anais...** UK, 1996.
- MEIER, U. Réparation des ponts avec des matériaux composites hautes performances. **Material und Technik**, n. 4, p. 125-128, 1987.
- MEIER, U. Strengthening of structures using carbon fibre/epoxy composites. **Construction and Building Materials**, v. 9, n. 6, p. 341-351, 1995.
- MEIER, U.; STÖCKLIN, I.; WINISTÖRFER, A. **Method and device for applying pretensed tension-proof reinforcing strips to a construction**. Patente No. US 6'464'811 B1, 2002.
- MELO, R. H.; TEIXEIRA, A. M. A. J.; CARNEIRO, L. A. V. Vigas de concreto armado reforçadas à flexão com barras de aço e FRP no cobrimento do concreto. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.9, n.3, p.234-250, 2018.
- MENEGHETTI, L. C. **Análise do comportamento à fadiga de vigas de concreto armado reforçadas com PRF de vidro, carbono e aramida**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- MENON, N. V.; RISSON, A. V.; ARCINE, M. F. Sistema de ancoragem por cordão de fibras de carbono em vigas reforçadas à flexão com PRFC - estudo experimental. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 12, p. 102746-102759, 2020.
- MICHELS, J.; BARROS, J.; COSTA, I.; SENA-CRUZ, J.; CZADERSKI, C.; GIACOMIN, G.; KOTYNIA, R.; LEES, J.; PELLEGRINO, C.; ZILE, E. Prestressed FRP Systems. In: PELLEGRINO C.; SENA-CRUZ, J. **Design Procedures for the Use of Composites in Strengthening of Reinforced Concrete Structures - RILEM State of-the-Art Reports**. New York: RILEM, v. 19, 2016, p. 263-302.
- MICHELS, J.; MARTINELLI, E.; CZADERSKI, C.; MOTAVALLI, M. Prestressed CFRP strips with gradient anchorage for structural concrete retrofitting: Experiments and numerical modeling. **Polymers**, v. 6, n. 1, p. 114-131, 2014.
- MICHELS, J.; SENA-CRUZ, J.; CZADERSKI, C.; MOTAVALLI, M. Structural Strengthening with Prestressed CFRP Strips with Gradient Anchorage. **Journal of Composites for Construction**, v.17, n.5, p. 651–661, 2013.
- MOHAMMADI, T.; WAN, B.; DAI, J. G.; ZHU, C. Prediction of load capacity variation in FRP bonded concrete specimens using brownian motion. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2015, 2015.
- MOHEE, F. M.; AL-MAYAH, A.; PLUMTREE, A. Anchors for CFRP plates: State-of-the-art review and future potential. **Composites Part B: Engineering**, v. 90, p. 432-442, 2016.

MOSHIRI, N.; CZADERSKI, C.; MOSTOFINEJAD, D.; HOSSEINI, A.; SANGINABADI, K.; BREVEGLIERI, M.; MOTAVALLI, M. Flexural strengthening of RC slabs with nonprestressed and prestressed CFRP strips using EBROG method. **Composites Part B: Engineering**, v. 201, 2020.

MOSTOFINEJAD, D.; MAHMOUDABADI, E. Grooving as Alternative Method of Surface Preparation to Postpone Debonding of FRP Laminates in Concrete Beams. **Journal of composites for construction**, v. 14, n. 6, p. 804-811, 2010.

MOSTOFINEJAD, D.; MOHAMMADI, M. Effect of Freeze–Thaw Cycles on FRP Concrete Bond Strength in EBR and EBROG Systems. **Journal of Composites for Construction**, v. 24, n. 3, 2020.

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**, v. 38, p. 751-758, 2013.

MOTAVALLI, M.; CZADERSKI, C.; PFYL-LANG, K. Prestressed CFRP for Strengthening of Reinforced Concrete Structures: Recent Developments at Empa, Switzerland. **Journal of Composites for Construction**, v.15, n. 2, p. 194-205, 2011.

MUKHERJEE, A.; RAI, G. L. Performance of reinforced concrete beams externally prestressed with fiber composites. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 822-828, 2009.

NERILLI, F.; VAIRO, G. Experimental investigation on the debonding failure mode of basalt-based FRP sheets from concrete. **Composites Part B: Engineering**, v. 153, p. 205-216, 2018.

NGUYEN, B. D. M.; CHAN, T. K.; CHEONG, H. K. Brittle failure and bond development length of CFRP - Concrete Beams. **Journal of composites for construction**, v. 5, n. 1, p. 12-17, fev. 2001.

OBAIDAT, Y. T.; HEYDEN, S.; DAHLBLOM, O.; ABU-FARSAKH, G.; ABDEL JAWAD, Y. Retrofitting of reinforced concrete beams using composite laminates. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 591-597, 2011.

ORLANDO, I. D. G. **Projeto de estruturas de concreto armado reforçada com compósitos FRP: Dimensionamento à flexão e à força cortante**. 2019. 196 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo.

PELLEGRINO, C.; MODENA, C. Flexural Strengthening of Real-Scale RC and PRC Beams with End-Anchored Pretensioned FRP Laminates **ACI Structural Journal**, v. 106, n. 3, p. 319-328, 2009.

PENG, H.; ZHANG, J.; SHANG, S.; LIU, Y.; CAI, C. S. Experimental study of flexural fatigue performance of reinforced concrete beams strengthened with prestressed CFRP plates. **Engineering Structures**, v. 127, p. 62-72, 2016.

PIYONG, Y.; SILVA, P. F.; NANNI, A. Flexural Strengthening of Concrete Slabs by a Three-stage Prestressing FRP System Enhanced with the Presence of GFRP Anchor Spikes. IN: Proceedings of the International Conference Composites in Construction (CCC2003). **Anais... Italia**: [s.n.], 2003.

QUANTRILL, R. J.; HOLLAWAY, L. C. The flexural rehabilitation of reinforced concrete beams by the use of prestressed advanced composite plates. **Composites Science and Technology**, v. 58, p. 1259-1275, 1998.

RASHID, K.; LI, X.; DENG, J.; XIE, Y.; WANG, Y.; CHEN, S. Experimental and analytical study on the flexural performance of CFRP-strengthened RC beams at various pre-stressing levels. **Composite Structures**, v. 227, 2019.

S&P. **S&P C-Laminate: Laminados de fibra de carbono para reforço estrutural**. 2018.

SAADATMANESH, H.; EHSANI, M. R. RC beams strengthened with GFRP plates. I: experimental study. **J. Struct. Eng.**, v. 117, n. 11 p. 3417-3433, 1991.

SENA CRUZ, J.; BARROS, J.; DIAS, S. **1º Seminário sobre o projecto de reforço de estruturas de betão com FRP's**. Portugal: Universidade do Minho, 2011.

SENA-CRUZ, J.; CORREIA, L.; BARRIS, C. Efeito da temperatura no comportamento de ancoragens mecânicas para confinamento transversal de FRP. In: ENCONTRO NACIONAL BETÃO ESTRUTURAL, 2018, Lisboa. **Anais... Lisboa**: [s.n.], 2018.

SENA-CRUZ, J.; MICHELS, J.; HARMANCI, Y. E.; CORREIA, L. Flexural strengthening of RC slabs with prestressed CFRP strips using different Anchorage systems. **Polymers**, v. 7, n. 10, p. 2100-2118, 2015.

SIKA. **Ficha técnica de produto - SikaWrap® FX-50 C**. São Paulo, 2017.

SIKA. **Structural Strengthening with Prestressed Sika®CarboDur® CFRP Plate Systems**. Switzerland, s.d.

SIKA. **Technical Information Manual- SikaWrap® FX Fibre Connector**. Switzerland, 2016.

SILVA, G. M. **Análise comparativa do uso de PRFC através dos sistemas EBR, NSM e NSM protendido para reforço à flexão em vigas de concreto armado**. 2018. 54 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Curso de Engenharia Civil. Centro Universitário Dinâmica das Cataratas, Foz do Iguaçu.

SIWOWSKI, T.; PIĄTEK, B.; SIWOWSKA, P.; WIATER, A. Development and implementation of CFRP post-tensioning system for bridge strengthening. **Engineering Structures**, v. 207, 2020.

SMITH, S. T.; TENG, J. G. Interfacial stresses in plated beams. **Engineering Structures**, v. 23, p. 857-871, 2001.

SOARES, S. R. R. **Estruturas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP: caracterização da aderência e do comportamento em flexão**. 2017. 282 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Portugal, 2017.

SOUZA, V. C. D.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo, 1998.

TEHRANI, B. N.; MOSTOFINEJAD, D; HOSSEINI, S. M. Experimental and analytical study on flexural strengthening of RC beams via prestressed EBROG CFRP plates. **Engineering Structures**, v. 197, 2019.

TENG, J.G.; CHEN, J.F.; SMITH, S.T.; LAM L. Behaviour and strength of FRP strengthened RC structures: a state-of-the-art review. **Structures & Buildings**, v. 156, p. 51-62, 2003.

TOUTANJI, H.; ZHAO, L.; ZHANG, Y. Flexural behavior of reinforced concrete beams externally strengthened with CFRP sheets bonded with an inorganic matrix. **Engineering Structures**, v. 28, n. 4, p. 557-566, 2006.

TRIANTAFLLOU, T. C.; DESKOVIC, N. Innovative Prestressing with FRP sheets: Mechanics of Short-Term Behavior. **J. Eng. Mech.**, v. 117, n. 7, p. 1652-1672, 1991.

TRIANTAFLLOU, T. C.; DESKOVIC, N.; DEURING, M. Strengthening of concrete structures with Prestressed Fiber Reinforced Plastic Sheets. **ACI Structural Journal**, v. 89, n. 3, p. 235-244, 1992.

TWORZEWSKI, P.; BACHARZ, K. MICHAŁOWSKA-MAZIEJUK, D. Anchorage systems in FRP-strengthened reinforced concrete. **Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture**, v. 35, p. 101-110, 2018.

WANG, G.; YANG, C.; MENG, C.; XIA, Z.; PAN, Y.; WANG, M. Experimental study on the mechanical and self-sensing behaviors of prestressed carbon fiber-reinforced polymer reinforced concrete composite structures. **Advances in Structural Engineering**, v. 23, n. 8, p. 1507-1520, 2020.

WANG, W. W.; DAI, J. G.; HARRIES, K. A.; ZHANG, L. Prediction of prestress losses in RC beams externally strengthened with prestressed CFRP sheets/plates. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 33, n. 8, p. 699-713, 2014.

WANG, W.-W.; DAI, J.-G.; HARRIES, K. A.; BAO, Q.-H. Prestress Losses and Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Posttensioned CFRP Sheets. **J. Compos. Constr.**, v. 16, n. 2, p. 207-216, 2012.

WEBER. **weber.rep fiber C: Sistema de reforço estrutural com fibra de carbono-Boletim Técnico**. 2015.

WEI, M. W.; XIE, J. H.; LI, J. L.; XIANG, C. Y.; HUANG, P. Y.; LIU, F. Effect of the chloride environmental exposure on the flexural performance of strengthened RC beams with self-anchored prestressed CFRP plates. **Engineering Structures**, v. 231, 2021.

WIGHT, R. G.; GREEN, M. F.; ERKI, M. A. Prestressed FRP sheets for poststrengthening reinforced concrete beams. **J. Compos. Constr.**, v. 5, n. 4, p. 214-220, 2001.

WOO, S. K.; KIM, J. H. J.; BYUN, K. J.; SONG, Y. C. Bond-slip parameter determination procedure of RC flexure member strengthened with prestressed CFRP plates. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 17, n. 1, p. 179-191, 2013.

WOO, S. K.; NAM, J. W.; KIM, J. H. J.; HAN, S. H.; BYUN, K. J. Suggestion of flexural capacity evaluation and prediction of prestressed CFRP strengthened design. **Engineering Structures**, v. 30, n. 12, p. 3751-3763, 2008.

XUE, W.; TAN, Y.; ZENG, L. Experimental studies of concrete beams strengthened with prestressed CFRP laminates. **PCI Journal**, p. 70-85, 2008.

XUE, W.; TAN, Y.; ZENG, L. Flexural response predictions of reinforced concrete beams strengthened with prestressed CFRP plates. **Composite Structures**, v. 92, n. 3, p. 612-622, 2010.

YANG, D. S.; PARK, S. K.; NEALE, K. W. Flexural behaviour of reinforced concrete beams strengthened with prestressed carbon composites. **Composite Structures**, v. 88, n. 4, p. 497-508, 2009.

YANG, J.; HAGHANI, R.; AL-EMRANI, M. Innovative prestressing method for externally bonded CFRP laminates without mechanical anchorage. **Engineering Structures**, v. 197, 2019.

YANG, J.; JOHANSSON, M.; AL-EMRANI, M.; HAGHANI, R. Innovative flexural strengthening of RC beams using self-anchored prestressed CFRP plates: Experimental and numerical investigations. **Engineering Structures**, v. 243, 2021.

YANG, Z. J.; CHEN, J. F.; PROVERBS, D. Finite element modelling of concrete cover separation failure in FRP plated RC beams. **Construction and Building Materials**, v. 17, p. 3-13, 2003.

YOU, Y. C.; CHOI, K. S.; KIM, J. An experimental investigation on flexural behavior of RC beams strengthened with prestressed CFRP strips using a durable Anchorage system. **Composites Part B: Engineering**, v. 43, n. 8, p. 3026-3036, 2012.

YU, P.; SILVA, P.; NANNI, A. Flexural Performance of RC Beams Strengthened With Prestressed CFRP Sheets. In: 49th International SAMPE symposium and exhibition: materials and processing technology – 60 Years of SAMPE Progress. **Anais...** Long Beach: [s.n.], 2004.

ZHANG, H. W.; SMITH, S. T. FRP-to-concrete joint assemblages anchored with multiple FRP anchors. **Composite Structures**, v. 94, n. 2, p. 403-414, 2012a.

ZHANG, H. W.; SMITH, S. T. Influence of FRP anchor fan configuration and dowel angle on anchoring FRP plates. **Composites Part B: Engineering**, v. 43, n. 8, p. 3516 -3527, 2012b.

Apêndice A – Modelagem computacional das vigas testemunho

Foi realizada a análise numérica e modelagem computacional para verificação das cargas de fissuração e momento último das vigas testemunho com o *software* ANSYS na versão *Student* 2022 R2 pelo aluno de engenharia civil e bolsista de iniciação científica Felipe Pereira Vergara (UFRGS/PIBIC/CNPq), sob orientação da Prof.^a Paula Manica Lazzari.

A modelagem computacional utiliza o método dos elementos finitos (MEF) para a análise numérica. O MEF consiste na discretização de um elemento infinito em um número finito de partes, formando uma malha interligada por nós. Para determinação da resposta de cada elemento são utilizadas funções de interpolação dependentes dos deslocamentos nodais, fornecendo como resultados tensões e deformações no interior dos elementos, bem como reações em pontos de apoio.

Cada elemento utilizado no método dos elementos finitos, tem propriedades pré-estabelecidas que consideram seus comportamentos reológicos, conseguindo dessa forma apresentar resultados satisfatórios quando comparados aos estudos experimentais empregando as mesmas características geométricas e físicas.

O programa possui duas interfaces de trabalho: *workbench* e APDL (*ANSYS Parametric Design Language*). A primeira possui uma interface mais simples e clara, enquanto o segundo, utilizado na presente modelagem, é uma linguagem de programação inserida na forma de texto (.txt) que permite uma maior variabilidade de ações para a inserção de dados. No arquivo de texto são inseridos dados como propriedades mecânicas e geométricas dos materiais, apoios, carregamentos e demais parâmetros para análise numérica.

Inicialmente foram determinados os elementos finitos correspondentes a cada material a ser modelado dentro da plataforma, utilizando para isso, elementos disponíveis na própria biblioteca do ANSYS.

Para representar o concreto na modelagem do sistema, o elemento SOLID 65 foi empregado, tendo como característica principal a capacidade de demonstrar a não linearidade do material, esse elemento é definido pela existência de 8 nós, com 3 graus de liberdade (u_x , u_y e u_z) em cada um.

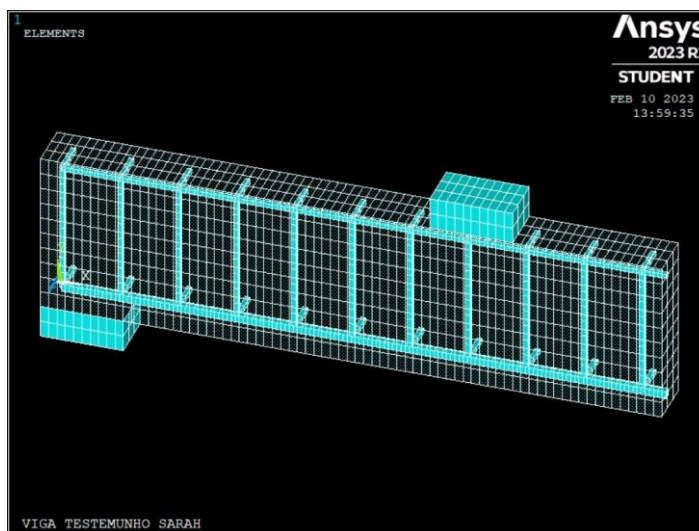
O elemento LINK180 foi utilizado para representar as armaduras na modelagem, tanto para as barras longitudinais quanto os estribos. Este é um elemento unidimensional, composto de dois

nós, com três graus de liberdade cada um (u_x , u_y e u_z). Esse componente representa de forma discreta a armadura, considerando perfeita aderência entre aço e concreto.

Os pontos de apoio foram representados nesta análise pelo elemento SOLID185. Este elemento possui oito nós com três graus de liberdade cada um (u_x , u_y e u_z). Caracterizam a localização de onde os esforços são aplicados, bem como as reações destes, tendo como objetivo evitar o acúmulo de tensões em um nó.

Posteriormente a definição de todos os materiais e parâmetros reológicos de cada um, bem como suas características à deformações, foi realizado a modelagem dos elementos conforme pode ser observado na Figura A.1 e obteve-se os resultados em termos de carga e momento último, deformação e tensões.

Figura A.1 – Modelagem computacional da viga testemunho



(fonte: elaborada pela autora)

Apêndice B – Verificação do sistema de reforço de acordo com ACI 440-2R (ACI, 2017)

O processo foi realizado no Excel com os dados apresentados na Tabela A.1 a seguir e demonstra o seguinte processo:

Tabela A.1 – Dados para cálculo da verificação do laminado de CFRP

Dados utilizados no cálculo do momento resistente da seção			
Parâmetros do concreto	Valor	Parâmetros do laminado	Valor
b	12 cm	E_f	168 GPa
h	20 cm	t_f	1,4 mm
d (corrigido)	15,87 cm	ε_{cu}	0,30%
d_f	20,07 cm	ε_{fu}	17‰
$cobramento$ (corrigido)	3 cm	P_p	9,94 kN
A_s	1,57 cm ²		
A_{ts}	0,62 cm ²		
f'_c (corrigido)	22,08 MPa		
E_c (corrigido)	20,47 GPa		

Passo 1: Cálculo da deformação máxima permitida para o CFRP (ε_{fd})

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

$$\varepsilon_{fd} = 0,003972 \leq 0,0153$$

Passo 2: Cálculo da deformação efetiva no CFRP (ε_{fe})

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

Em que ε_{bi} é a deformação pré-existente no concreto no momento da instalação do reforço, podendo ser calculada por:

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_g}{IE_c} (d_f - cb_{crit})$$

Onde M_g é o momento fletor devido ao peso próprio da viga; e cb_{crit} a distância da fibra comprimida de concreto até a linha neutra no modo de falha crítico da seção, sendo obtida através da equação:

$$cb_{crit} = \frac{0,5bh^2 + (n-1)A_s d}{bh + (n-1)A_s}$$

Onde n é a relação entre os módulos de elasticidade do aço e concreto.

No entanto, ε_{bi} considerou-se com valor nulo, visto que o reforço foi aplicado na superfície da viga com a posição invertida, podendo esse valor de deformação inicial ser desconsiderado, logo, estipulando um c para o cálculo de 67,8055 mm, resulta em:

$$\varepsilon_{fe} = 0,00587 \frac{mm}{mm} \geq 0,003973 \text{ mm/mm}$$

***Destacamento ou delaminação da cobertura de concreto

Passo 3: Cálculo da Tensão efetiva no reforço

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe}$$

$$f_{fe} = 667,3813 \text{ MPa}$$

Passo 4: Cálculo da deformação no aço (ε_s):

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

$$\varepsilon_s = 0,0027 \text{ mm/m}$$

Passo 5: Cálculo da Tensão no aço (f_s):

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_{yd}$$

$$f_s = 570,5777 \text{ MPa} < 500 \text{ MPa utiliza-se } 500 \text{ MPa}$$

Passo 6: Cálculo da deformação no concreto (ε_c):

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

$$\varepsilon_c = 0,002031 \text{ mm/mm}$$

Passo 7: Cálculo da deformação máxima no concreto não confinado (ε'_c):

$$\varepsilon'_c = \left(\frac{1,71 f'_c}{E_c} \right)$$

$$\varepsilon'_c = 0,001844 \text{ mm/mm}$$

Passo 8: Cálculo dos parâmetros α_1 e β_1 :

$$\alpha_1 = \left(\frac{3\varepsilon'_c \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1 \varepsilon_c'^2} \right) = 0,91$$

$$\beta_1 = \left(\frac{4\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6\varepsilon'_c - 2\varepsilon_c} \right) = 0,76$$

Passo 9: Cálculo da linha neutra:

$$c = \left(\frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f'_c \beta_1 b} \right)$$

$$c = 67,8055 \text{ mm}$$

$$c_{estipulado} = 67,8055 \text{ mm}$$

Logo, $c_{estipulado} = c$, podendo ser calculado o momento resistente da seção. Caso os valores fossem divergentes, o processo entre os passos 2 e 9 deveriam ser refeitos até que houvesse a convergência.

Passo 10: Cálculo do momento resistente da seção (M_n):

$$M_n = F_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \Psi_f F_f \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$$

$$M_n = 18,59 \text{ kN.m}$$

Apêndice C – Verificação do momento último das vigas protendidas de acordo com metodologia analítica expressa em 3.6.1.2

O processo foi realizado no Excel com os dados apresentados na Tabela B.1 a seguir e demonstra o seguinte processo:

Tabela B.1 – Dados para cálculo da verificação do laminado protendido de CFRP

Parâmetros do concreto	Valor	Parâmetros do laminado	Valor
b	120 mm	f_{fu}	3100 MPa
h	200 mm	l	50 mm
d (corrigido)	158,7 mm	t_f	1,4 mm
d_f	200,7 mm	σ_{cf0}	124 MPa
I_0	80000000 mm ⁴	A_f	70 mm ²
c_{estip}	82,171 mm	E_f	168 GPa
y_c	117,829 mm	ε_{fu}	17‰
e_f	118,529 mm	P_p	9,94 kN
A_s	1,57 cm ²		
A_{ts}	0,62 cm ²		
E_s	210000 N/mm ²		
ε_{cu}	0,30%		
F_y	500 N/mm ²		
f'_c (corrigido)	22,08 MPa		
E_c (corrigido)	20,47 GPa		

Passo 1: Cálculo da deformação gerada ao PRF (ε_{fp}):

$$\varepsilon_{fp} = \frac{P_p}{E_f A_f}$$

$$\varepsilon_{fp} = 0,0007381 \text{ mm/mm}$$

Passo 2: Cálculo da deformação de descompressão (ε_{fc}) (Considerando $c_{estip} = 82,171 \text{ mm}$ para o cálculo da distância da fibra até a linha neutra e_f)

$$\varepsilon_{fc} = \frac{P_p}{E_c A_{ct}} + \frac{P_p e_f^2}{E_c I_{cr}}$$

$$\varepsilon_{fc} = 0,0000907 \text{ mm/mm}$$

Passo 3: Cálculo do incremento de deformação no PRF ($\Delta\varepsilon_{fc}$):

$$\Delta\varepsilon_{fc} = \left(\frac{h-c}{c}\right) \varepsilon_c$$

$$\Delta\varepsilon_{fc} = 0,004302 \text{ mm/mm}$$

Passo 4: Cálculo da deformação total no PRF (ε_{ft}):

$$\begin{aligned}\varepsilon_{ft} &= \varepsilon_{fp} + \varepsilon_{fc} + \Delta\varepsilon_{fc} \\ \varepsilon_{ft} &= 0,00513063 \text{ mm/mm}\end{aligned}$$

Passo 5: Cálculo da altura de compressão relativa (ξ):

$$\xi = \frac{c}{\alpha_1 h}$$

$$\xi = 0,483$$

Passo 6: Cálculo da altura de compressão balanceada ($\xi_{cf,b}$):

$$\begin{aligned}\xi_{cf,b} &= \frac{c_b}{h} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \Delta\varepsilon_{fc}} \\ \xi_{cf,b} &= 0,41\end{aligned}$$

Passo 7: Cálculo da linha neutra:

$$c = \left(\frac{A_s f_y + E_f A_f \varepsilon_{ft}}{\alpha_1 f'_c \beta_1 b} \right)$$

$$c = 82,171 \text{ mm}$$

Logo, $c_{estip} = c$, podendo ser calculado o momento resistente da seção. Caso os valores fossem divergentes, o processo entre os passos 2 e 7 deveriam ser refeitos até que houvesse a convergência.

Passo 8: Cálculo do momento resistente da seção (M_u), como $\xi = 0,483 > \xi_{cf,b} = 0,41$:

$$\begin{aligned}M_u &= f_y A_s \left(d - \frac{c_e}{2} \right) + E_f A_f \varepsilon_{ft} \left(h - \frac{c_e}{2} \right) \\ M_u &= 22,11 \text{ kN.m}\end{aligned}$$