

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**REABILITAÇÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM
REFORÇO À FLEXÃO COM LAMINADOS DE CFRP
PASSIVOS E PROTENDIDOS**

Marcelo Fernandes Pereira

São Carlos
2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**REABILITAÇÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM
REFORÇO À FLEXÃO COM LAMINADOS DE CFRP PASSIVOS E
PROTENDIDOS**

Marcelo Fernandes Pereira

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Área de Concentração: Estruturas e Geotecnia

Orientadora: Profa. Dra. Gláucia Maria Dalfré

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo de Araújo Ferreira

São Carlos
2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Marcelo Fernandes Pereira, realizada em 01/08/2024.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Gláucia Maria Dalfré (UFSCar)

Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian (UFSCar)

Prof. Dr. Joaquim António Oliveira de Barros (UMinho)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus por ter me concedido as ferramentas necessárias para a concretização deste trabalho, assim como, por ter colocado nesta jornada pessoas de bom coração e colaborativas, as quais sem elas e a devida sintonia o presente estudo não se realizaria.

Agradeço aos meus pais, Cileide e Raimundo, os quais não tiveram adequadas oportunidades nos estudos na infância, mas tiveram a bravura de se mudarem do interior do Ceará para São Paulo, com o objetivo de promover melhores condições de vida e acesso à estudos para seus quatro filhos.

Agradeço à minha esposa, Karina, que me apoiou e ajudou de forma direta durante todo o processo deste desafio, me incentivando em todos os momentos. Obrigado pelo seu amor, companheirismo, paciência e ensinamentos.

Agradeço à minha filha Lívia, que veio ao mundo dias antes da conclusão desta pesquisa, sendo o principal combustível na reta final deste trabalho e, com certeza, será das próximas jornadas e desafios.

Agradeço à minha competente orientadora, Prof^a. Dr^a. Gláucia Dalfré, a qual gentilmente abriu as portas da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) para que eu pudesse ingressar no meio acadêmico e me auxiliou de forma incansável em todas as etapas da pesquisa, desde as pesadas etapas experimentais às discussões e análises técnicas, sempre disposta em contribuir e exigir o meu melhor, para que fosse possível avançarmos no conhecimento, de forma correta e honesta.

Agradeço ao meu competente coorientador, Prof^o. Dr^o. Marcelo Ferreira, que gentilmente aceitou nos auxiliar neste desafio, sendo o principal viabilizador do programa experimental da presente pesquisa, disponibilizando a excelente estrutura do Núcleo de Estudo e Tecnologia em Pré-Moldados de Concreto (NetPre) e participando diretamente em todos os processos do estudo.

Agradeço em especial ao técnico de laboratório José Roberto, este que se mostrou um grande amigo e foi peça fundamental na etapa experimental desta pesquisa, abraçando este desafio e me auxiliando de forma incansável, sendo um grande professor durante todo o processo.

Agradeço também aos Eng^o. Ricardo Canato e Eng^a. Bruna Catoia, responsáveis por laboratórios utilizados na presente pesquisas, os quais auxiliaram em diversas etapas experimentais. Também ao meu sogro, Ronaldo, e engenheiro e colega Renato, que me auxiliaram em etapas experimentais importantes.

Agradeço ao engenheiro, colega e professor Michel Haddad, este comprometido com a boa engenharia e que foi o provocador do presente tema, nos desafiando a realizar este trabalho de grande responsabilidade.

Agradeço ao engenheiro e colega Jeremias, este que acreditou em nossa pesquisa e com muita gentileza abriu as portas de sua empresa, e nos forneceu as vigas em escala real, utilizadas na presente pesquisas.

Agradeço aos colegas e engenheiros Paulo e João Victor, os quais foram responsáveis pelo fornecimento dos materiais e sistemas de reforço, assim como apoiaram e incentivaram a nossa pesquisa, participando de diferentes etapas do processo. Agradecimento especial ao colega e amigo João Victor, que se mostrou solícito durante todo o processo, contribuindo de maneira direta na etapa experimental.

Agradeço também ao colega e engenheiro Wesley Oliveira, que gentilmente abraçou o propósito da presente pesquisa e, por meio da empresa que representa, nos forneceu o sistema de fixação utilizado no programa experimental, assim como, se mostrou solícito para esclarecimento de dúvidas.

Agradeço ao meu amigo Milton Camargo, que sempre me auxiliou com os seus conselhos e ensinamentos, não só durante o mestrado, mas desde a minha graduação e início na engenharia.

Agradeço aos professores Guilherme Parsekian e Joaquim Barros que, com muita competência, me auxiliaram em tempos de qualificação com os devidos apontamentos, estes que foram fundamentais para que fosse possível entregar um trabalho com grande qualidade técnica.

Agradeço ao Prof. Sena Cruz, este que se mostrou muito solícito durante sua passagem em nossa universidade, compartilhando de seu conhecimento sobre o tema da pesquisa, assim como, auxiliando de forma remota em etapas importantes do programa experimental.

Agradeço aos meus colegas de pós-graduação Amanda Mazzú, Arthur Vasconcelos, Leandro Santos, Mariana Bandeira, Mariana Nuccitelli, Matheus Cardoso, Pedro Jardim, Raul Scarpa, Ricardo Correia e Tiago Padilha, tanto pela parceria durante o mestrado, como pelo auxílio, seja de forma direta ou indireta, durante o processo de pesquisa.

Agradeço também ao NetPre, ao Laboratório de Sistemas Estruturais (LSE), ao Laboratório de Materiais e Componentes da Construção Civil (LMC) e ao Laboratório de Polímeros do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) da UFSCar.

RESUMO

PEREIRA, Marcelo F. **Reabilitação de vigas de concreto armado em escala real com reforço à flexão com laminados de CFRP passivos e protendidos.** 2024. 202p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2024.

RESUMO

Entre os possíveis métodos de reforço estrutural, pode-se destacar aumento de seção transversal, reforço com materiais compósitos, perfis metálicos, colagem de chapas metálicas e protensão externa. Dos métodos citados, destaca-se o uso compósitos de FRP (*Fiber Reinforced Polymers*, em língua inglesa) face a sua rápida e prática aplicação e boas propriedades mecânicas. A eficácia e desempenho estrutural da aplicação de laminados e/ou mantas de FRP em sistemas de reforço passivos à flexão de elementos de concreto armado é comprovada por diferentes estudos. Em sistemas de reforço com FRP passivo, os modos de ruptura dos elementos são comumente caracterizados pelo destacamento do material de reforço sob solicitações de apenas 20 a 50% da capacidade última do FRP. Com o objetivo de melhorar o aproveitamento dos materiais utilizados nos sistemas de reforço baseados na colagem externa de FRP, na última década, diferentes estudos passaram a analisar o comportamento de estruturas com laminados de FRP protendidos. Tais estudos indicam maiores incrementos de capacidade resistentes nos elementos reforçados e melhor aproveitamento do material de reforço, quando comparados com a técnica de colagem passiva. Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo analisar, por meio de um programa experimental, o comportamento mecânico de vigas de concreto armado em escala real, pré-fissuradas ou não, reforçadas à flexão com laminados de CFRP protendidos e passivos, como também, propor e avaliar modelos de dimensionamento com os resultados experimentais obtidos. Para tanto, realizou-se programa experimental com cinco vigas de concreto armado submetidas à ensaio de flexão de quatro pontos até sua ruptura, sendo uma viga não reforçada (referência), duas vigas reforçadas à flexão com colagem externa de laminado de CFRP passivo e duas vigas reforçadas à flexão colagem externa de laminado de CFRP protendido, sendo uma viga de cada tipo de reforço submetida à pré-fissuração. Os resultados demonstraram que o reforço passivo permitiu aumento da força no momento do escoamento da armadura de até 16,9 % quando comparada à viga sem reforço. Um aumento de até 23,3 % foi verificado na força máxima em comparação à viga de referência. O uso do reforço protendido promoveu aumento de até 37,9 % e 41,9% nas forças de início de escoamento e máxima do elemento, respectivamente, quando comparado à viga de referência. Verifica-se a maior efetividade do uso do laminado protendido no aumento da capacidade resistente dos elementos. Com relação às deformações no material de reforço, considerando-se que o laminado de CFRP apresentou deformação estimada na ruptura de aproximadamente 14,61 ‰, um aproveitamento de até 44,4 e 68,4 % foi obtido para o reforço passivo e protendido, respectivamente. Assim, é evidenciada a capacidade do sistema de reforço protendido em conferir maiores níveis de solicitação ao material de reforço quando comparado ao reforço passivo. Ainda, verificou-se a capacidade do sistema de reforço com laminado de CFRP protendido em reduzir deslocamentos verticais e aberturas de fissuras pré-existentes em elementos estruturais. O modelo analítico simplificado para determinação da capacidade resistente de elementos de concreto armado reforçados à flexão com laminados de CFRP protendido aqui proposto se mostrou eficaz para a estimativa da capacidade resistente das vigas à flexão. Entretanto, é importante destacar a necessidade da correta definição da deformação a ser atribuída ao material de reforço para a determinação do momento resistente último da seção transversal.

Palavras-chave: Laminado; CFRP protendido; CFRP passivo; reforço estrutural; concreto armado; escala real.

ABSTRACT

PEREIRA, Marcelo F. Rehabilitation of full-scale reinforced concrete beams flexurally strengthened with passive and prestressed CFRP laminates. 2024. 202p. Dissertation (Master's in Civil Engineering) – Federal University of São Carlos, São Carlos, 2024.

ABSTRACT

Among the possible methods of structural strengthening which can be highlighted are: the section enlargement, reinforcement with composite materials, metallic profiles, use of metal plates, and external prestressing. Of these mentioned methods, the use of Fiber Reinforced Polymers (FRP) stands out due to their quick and practical application and good mechanical properties. The effectiveness and structural performance of the use of FRP laminates, and/or sheets, in passive flexural strengthening systems of reinforced concrete elements has been proven by different studies. In passive FRP strengthening systems, the failure modes of the elements are commonly characterized by the detachment of the strengthening material under loads corresponding to only 20 to 50% of the ultimate capacity of the FRP. To improve the use of the FRP systems based on externally bonded materials, different studies have analyzed the behavior of structures with prestressed FRP laminates over the past decade. These studies indicate greater increases in the load-carrying of strengthened elements and higher utilization levels in the strengthening material compared to the passive bonding technique. In this context, the present work aims to analyze, through an experimental program, the mechanical behavior of full-scale reinforced concrete beams, either pre-cracked or not, flexurally strengthened with prestressed and passive CFRP laminates. The work also proposes and evaluates design models with the experimental obtained results. For this purpose, an experimental program was carried out with five reinforced concrete beams subjected to four-point bending tests until failure, one unstrengthened beam (reference), two beams flexurally strengthened with externally bonded passive CFRP laminates, and two beams flexurally strengthened with externally bonded prestressed CFRP laminates. One beam of each strengthening type was subjected to pre-cracking. The results showed that the passive strengthening increased the yielding load of up to 16.9% compared to the unstrengthened beam. An increase of up to 23.3% was observed at the ultimate load compared to the reference beam. The use of prestressed strengthening promoted an increase of up to 37.9% and 41.9% in the loads at the yielding of the steel reinforcement and at the ultimate load, respectively, compared to the reference beam. The use of prestressed laminate is more effective to increase the load-carrying of the elements. Regarding the strains in the strengthening material, considering that the CFRP laminate showed an estimated maximum strain of approximately 14.61‰, an effectiveness of up to 44.4% and 68.4% was obtained for passive and prestressed strengthening, respectively. Thus, the ability of the prestressed strengthening system to attain higher strain levels for the strengthening material compared to passive strengthening is highlighted. Furthermore, the ability of the prestressed CFRP laminate strengthening system to reduce vertical displacements and pre-existing crack openings in structural elements was verified. The simplified analytical model herein proposed for determining the load-bearing capacity of reinforced concrete elements flexurally strengthened with prestressed CFRP laminates proved to be effective for estimating the load-carrying capacity of beams subject to flexure. However, it is important to highlight the need for the correct definition of the strain to be attributed to the strengthening material in determining the ultimate resistant moment of the cross-section.

Keywords: Laminate; prestressed CFRP; Passive CFRP; structural strengthening; reinforced concrete; real scale.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Aplicações práticas das técnicas EBR (a) e NSM (b)..... | 12 |
| Figura 2 – Ruptura por descolamento do FRP em viga de concreto armado submetida à ensaio de flexão..... | 13 |
| Figura 3 – Sistema de reforço com laminado de FRP protendidos | 14 |
| Figura 4 – Sistemas de reforço estrutural: (a) encamisamento, (b) chapas metálicas, (c) protensão externa e (d) FRPs..... | 19 |
| Figura 5 – Representação esquemática de um compósito FRP. | 21 |
| Figura 6 – Digrama tensão <i>versus</i> deformação dos diferentes tipos de Fibras e aço | 23 |
| Figura 7 – Processo de aplicação de reforço passivo em vigas de concreto armado com FRP segundo a técnica EBR..... | 24 |
| Figura 8 – Processo de aplicação de reforço em faixas de laje de concreto armado com FRP segundo a técnica NSM | 25 |
| Figura 9 – Representação esquemática das técnicas EBR, NSM, MF-EBR, EBROG e EBRIG | 26 |
| Figura 10 – Interfaces de aderência entre o FRP e substrato | 27 |
| Figura 11 – Modos de ruptura de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com FRP..... | 28 |
| Figura 12 – Vigas de concreto simples, armado e protendido. | 29 |
| Figura 13 – Equilíbrio de tensões em viga protendida | 30 |
| Figura 14 – Sistemas de protensão: (a) pré-tração com aderência, (b) pós-tração com aderência e (c) pós-tração sem aderência | 31 |
| Figura 15 – Protensão dos cabos em uma viga de concreto armado | 32 |
| Figura 16 – Perdas da força de protensão na pós-tração | 34 |
| Figura 17 – Reforço com protensão externa em ponte rodoviária..... | 34 |
| Figura 18 – Sistema de protensão externa com cabos tracionados e utilização de desviadores..... | 35 |
| Figura 19 – Reforço com FRP protendido segundo o método por encurvamento | 36 |
| Figura 20 – Reforço com FRP protendido segundo o método com o uso de estruturas externas | 37 |
| Figura 21 – Reforço com FRP protendido segundo o método com o uso de ancoragens fixadas ao elemento reforçado | 38 |
| Figura 22 – Representação de uma viga reforçada com FRP protendido com uso de ancoragens mecânicas | 38 |
| Figura 23 – Aplicações práticas de sistemas de protensão externa com laminado de FRP | 39 |
| Figura 24 – Diagrama momento-curvatura de elementos não reforçado e reforçado com FRP passivo e protendido | 40 |
| Figura 25 – Etapas da aplicação de um sistema de reforço com FRP protendido com o uso de ancoragens mecânicas..... | 41 |
| Figura 26 – Etapas da aplicação de um sistema de reforço com FRP protendido com o uso de ancoragens por gradiente..... | 42 |
| Figura 27 – Sistema de ancoragem mecânica e por gradientes | 43 |
| Figura 28 – Esquema de ensaio à flexão e instrumentação das lajes adotado por Correia <i>et al.</i> (2015) (dimensões em cm)..... | 46 |
| Figura 29 – Diagramas de força <i>versus</i> deslocamento e deformação no CFRP da série S1 | 48 |

| | |
|--|-----|
| Figura 30 – Modo de ruptura das lajes reforçadas | 49 |
| Figura 31 – Diagrama Força <i>versus</i> Deslocamento da série S2 | 51 |
| Figura 32 – Esquemas de sistemas de reforço adotadas (dimensões em mm) | 53 |
| Figura 33 – Sistema de protensão externa com laminado de CFRP..... | 54 |
| Figura 34 – Esquema de ensaio à flexão e instrumentação das vigas (dimensões em cm)..... | 54 |
| Figura 35 – Diagramas Força <i>versus</i> Deslocamento vertical | 56 |
| Figura 36 – Sistema de protensão externa com laminado de CFRP..... | 58 |
| Figura 37 – Sistema de FRP protendido utilizado por Garcez (2007) | 60 |
| Figura 38 – Modos de ruptura observado por Garcez (2007) | 61 |
| Figura 39 – Sistema de FRP protendido utilizado por Wang <i>et al.</i> (2012)..... | 61 |
| Figura 40 – Sistema de FRP protendido utilizado por Woo, Kim e Byun (2012) | 62 |
| Figura 41 – Sistema de FRP protendido | 64 |
| Figura 42 – Gráficos Força <i>versus</i> deslocamento das vigas ensaiadas por Peng <i>et al.</i> (2016)..... | 66 |
| Figura 43 – Ancoragens passiva e ativa de sistema de FRP protendido adotado por Hong e Park (2017)..... | 68 |
| Figura 44 – Modos de ruptura observados por Sena-Cruz <i>et al.</i> (2017) | 69 |
| Figura 45 – Sistema de FRP protendido adotado por Liu <i>et al.</i> (2021) | 70 |
| Figura 46 – Diagramas Forças <i>versus</i> deslocamento das vigas ensaiadas por Liu <i>et al.</i> (2021)..... | 71 |
| Figura 47 – Sistemas de protensão e ancoragem utilizados por Pessi (2022)..... | 73 |
| Figura 48 – Comparação de perdas de protensão em sistemas com cordoalhas metálicas e FRP protendido | 74 |
| Figura 49 – Domínios de estado-limite último de uma seção transversal, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2023)..... | 80 |
| Figura 50 – Equilíbrio de forças normais em uma seção transversal segundo a NBR 6118 (ABNT, 2023) | 81 |
| Figura 51 – Diagrama retangular equivalente, segundo a ACI 318 (2019) | 82 |
| Figura 52 – Diagrama retangular equivalente | 84 |
| Figura 53 – Deformação inicial da seção não reforçada | 88 |
| Figura 54 – Comprimento de ancoragem em sistema de FRP..... | 89 |
| Figura 55 – Distribuição de tensões e esforços internos de seção transversal reforçada com FRP | 91 |
| Figura 56 – Domínios de deformação possíveis para elementos protendidos à flexão | 94 |
| Figura 57 – Tensões e deformação no ELU em seção retangular protendida | 95 |
| Figura 58 – Tensões atuantes em uma seção reforçada com FRP protendido | 99 |
| Figura 59 – Fluxograma das etapas da pesquisa..... | 102 |
| Figura 60 – Fluxograma da aplicação e validação dos modelos de dimensionamento | 104 |
| Figura 61 – Fluxograma do programa experimental..... | 108 |
| Figura 62 – Detalhamento das vigas de concreto armado (Dimensões em cm). | 109 |
| Figura 63 – Moldagem das vigas de concreto armado..... | 110 |
| Figura 64 – Ensaio de espalhamento e moldagem dos corpos de prova | 112 |
| Figura 65 – Etapas dos ensaios de compressão axial e módulo de elasticidade do concreto | 112 |
| Figura 66 – Etapas do ensaio de tração uniaxial do aço: (a) medida do comprimento, (b) aferição do diâmetro, (c) exemplo de ensaio e (d) região de ruptura | 114 |
| Figura 67 – Confecção de CPs e ensaio de caracterização do laminado de CFRP..... | 115 |

| | |
|---|-----|
| Figura 68 – CPs e ensaio de caracterização da resina epóxi | 116 |
| Figura 69 – Configuração do reforço passivo à flexão (dimensões em cm)..... | 117 |
| Figura 70 – Preparação do substrato do elemento a ser reforçado | 118 |
| Figura 71 – Preparação dos materiais a serem aplicados do reforço passivo | 119 |
| Figura 72 – Aplicação do reforço à flexão passivo segundo a técnica EBR..... | 119 |
| Figura 73 – Configuração do reforço à flexão com FRP protendido (dimensões em cm)..... | 120 |
| Figura 74 – Equipamentos e dispositivos do sistema de protensão..... | 121 |
| Figura 75 – Preparação do substrato do elemento a ser reforçado do reforço protendido | 122 |
| Figura 76 – Marcação e execução dos furos para os chumbadores | 122 |
| Figura 77 – Limpeza dos furos dos chumbadores..... | 123 |
| Figura 78 – Aplicação dos chumbadores químicos | 124 |
| Figura 79 – Preparação da ancoragem passiva..... | 124 |
| Figura 80 – Aplicação da resina e colagem do laminado de CFRP | 125 |
| Figura 81 – Fixação da placa metálica na ancoragem passiva | 125 |
| Figura 82 – Preparação do dispositivo de fixação móvel | 126 |
| Figura 83 – Preparação da moldura metálica e cilindro hidráulico | 126 |
| Figura 84 – Colagem e fixação do laminado de CFRP | 127 |
| Figura 85 – Instalação dos dispositivos de protensão | 128 |
| Figura 86 – Instalação dos parafusos de travamento e liberação do cilindro hidráulico | 129 |
| Figura 87 – Remoção dos dispositivos móveis e aspecto final do sistema de reforço | 129 |
| Figura 88 – Esquema do ensaio de flexão por quatro pontos das vigas (dimensões em cm) | 130 |
| Figura 89 – Elementos e dispositivos do ensaio de flexão das vigas..... | 131 |
| Figura 90 – Detalhamento dos dispositivos de apoio e aplicação de força (dimensões em mm)..... | 132 |
| Figura 91 – Instrumentação das vigas (dimensões em cm) | 133 |
| Figura 92 – Transdutores de deslocamento utilizados nos ensaios das vigas | 134 |
| Figura 93 – Extensômetros elétricos utilizados nos ensaios das vigas | 135 |
| Figura 94 – Aquisitor de dados e célula de carga | 135 |
| Figura 95 – Aferição da abertura de fissuras com microscópio digital | 136 |
| Figura 96 – Ensaio de <i>pull-off</i> | 137 |
| Figura 97 – Modos de ruptura do ensaio de <i>pull-off</i> | 138 |
| Figura 98 – Comparação - vigas de referências..... | 139 |
| Figura 99 – Comparação - viga com reforço passivo | 141 |
| Figura 100 – Comparação - viga com reforço protendido | 142 |
| Figura 101 – Diagrama tensão <i>versus</i> deformação do aço: diâmetros de (a) 6,3 mm, (b) 10,0 mm e (c) 20,0 mm..... | 145 |
| Figura 102 – (a) Exemplo do aspecto final do laminado após o ensaio e (b) diagrama Tensão <i>versus</i> Deformação do laminado de CFRP | 147 |
| Figura 103 – Exemplo de corpos-de-prova de resina após ensaio de tração | 148 |
| Figura 104 – Diagrama Força <i>versus</i> deslocamento orientativo, para determinação dos pontos de fissuração do concreto e escoamento das armaduras de tração | 149 |
| Figura 105 – Diagrama Força <i>versus</i> Deslocamento da viga B1-0-0 | 150 |
| Figura 106 – Diagramas força <i>versus</i> Deformação dos materiais da viga B1-0-0... 150 | |
| Figura 107 – Diagrama Força <i>versus</i> Deslocamento da viga B2-NPC-NP | 151 |

| | |
|---|-----|
| Figura 108 – Diagramas Força <i>versus</i> Deformação do concreto e aço | 151 |
| Figura 109 – Diagramas Força <i>versus</i> Deformação do laminado de CFRP da viga B2-NPC-NP | 151 |
| Figura 110 – Diagrama Força <i>versus</i> Deslocamento da viga B3-PC-NP | 152 |
| Figura 111 – Diagramas Força <i>versus</i> Deformação do concreto e aço | 153 |
| Figura 112 – Diagramas Força <i>versus</i> Deformação do laminado de CFRP da viga B3-PC-NP | 153 |
| Figura 113 – Diagramas Força <i>versus</i> Deformação do concreto, aço e laminado de CFRP no ato da protensão da viga B4-NPC-P | 155 |
| Figura 114 – Diagrama Força <i>versus</i> Deslocamento da viga B4-NPC-P | 155 |
| Figura 115 – Diagramas Força <i>versus</i> Deformação do concreto e aço | 156 |
| Figura 116 – Diagramas Força <i>versus</i> Deformação do laminado de CFRP da viga B4-NPC-P | 156 |
| Figura 117 – Diagramas Força <i>versus</i> Deformação do concreto, aço e laminado de CFRP no ato da protensão da viga B5-PC-P | 158 |
| Figura 118 – Diagrama Força <i>versus</i> Deslocamento da viga B5-PC-P | 158 |
| Figura 119 – Diagramas Força <i>versus</i> Deformação do concreto e aço | 159 |
| Figura 120 – Diagramas Força <i>versus</i> Deformação do laminado de CFRP da viga B5-PC-P | 159 |
| Figura 121 – Comparações dos diagramas Força <i>versus</i> Deslocamento das vigas | 161 |
| Figura 122 – Diagramas força <i>versus</i> deformação do laminado de CFRP das vigas reforçadas | 170 |
| Figura 123 – Distribuição das deformações no laminado de CFRP das vigas reforçadas | 171 |
| Figura 124 – Modo de ruptura da viga B1-0-0 | 172 |
| Figura 125 – Modo de ruptura da viga B2-NPC-NP | 172 |
| Figura 126 – Pré-fissuração e modo de ruptura da viga B3-PC-NP | 173 |
| Figura 127 – Modo de modo de ruptura da viga B4-NPC-P | 174 |
| Figura 128 – Pré-fissuração e modo de ruptura da viga B5-PC-P | 174 |
| Figura 129 – Padrão fissuratório final das vigas ensaiadas | 175 |
| Figura 130 – Aberturas de fissuras da viga B1-0-0: $L/250$ | 177 |
| Figura 131 – Aberturas de fissuras da viga B2-NPC-NP: (a-c) $L/350$ e (d-f) $L/250$ | 177 |
| Figura 132 – Aberturas de fissuras da viga B3-PC-NP: (a-c) $L/350$ e (d-f) $L/250$ | 178 |
| Figura 133 – Aberturas de fissuras da viga B4-NPC-P: (a-c) $L/350$ e (d-f) $L/250$ | 178 |
| Figura 134 – Aberturas de fissuras da viga B5-PC-P: (a-c) $L/350$ e (d-f) $L/250$ | 179 |
| Figura 135 – Aberturas de fissuras da viga B3-PC-NP: (a-c) antes da aplicação do reforço; e (d-f) após a aplicação do reforço passivo | 180 |
| Figura 136 – Aberturas de fissuras da viga B5-PC-P: (a-c) antes da aplicação do reforço; e (d-f) após a aplicação do reforço protendido | 180 |
| Figura 137 – Perdas de protensão imediatas e iniciais: (a) B4-NPC-P (b) B5-PC-P | 182 |
| Figura 138 – Travamento dos dispositivos da ancoragem ativa para remoção do cilindro hidráulico | 183 |
| Figura 139 – Modo de ruptura no ensaio <i>pull-off</i> | 184 |
| Figura 140 – Diagramas força <i>versus</i> deslocamento: (a) deslocamento horizontal e (b) deslocamento vertical dos apoios - B1-0-0 | 200 |
| Figura 141 – Diagramas força <i>versus</i> deslocamento: (a) deslocamento horizontal e (b) deslocamento vertical dos apoios - B2-NPC-NP | 200 |

| | |
|---|-----|
| Figura 142 – Diagramas força <i>versus</i> deslocamento: (a) deslocamento horizontal e (b) deslocamento vertical dos apoios - B3-PC-NP | 201 |
| Figura 143 – Diagramas força <i>versus</i> deslocamento: (a) deslocamento horizontal e (b) deslocamento vertical dos apoios - B4-NPC-P | 201 |
| Figura 144 – Diagramas força <i>versus</i> deslocamento: (a) deslocamento horizontal e (b) deslocamento vertical dos apoios - B5-PC-NP | 202 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 – Propriedades mecânicas das Fibras | 21 |
| Tabela 2 – Resumo dos dados dos programas experimentais analisados | 44 |
| Tabela 3 – Resumo dos principais resultados | 47 |
| Tabela 4 – Resumo das características das vigas | 52 |
| Tabela 5 – Resumo dos principais resultados | 55 |
| Tabela 6 – Resumo das perdas de protensão observadas nos trabalhos analisados | 78 |
| Tabela 7 - Fator de redução relacionado às condições de exposição do FRP | 86 |
| Tabela 8 – Limites de domínios de deformação de um elemento protendido à flexão | 95 |
| Tabela 9 – Limites de tensões em seção transversal com protensão | 100 |
| Tabela 10 – Resumo e nomenclatura das vigas ensaiadas | 107 |
| Tabela 11 – Traço do concreto | 111 |
| Tabela 12 – Dados técnicos do laminado de CFRP | 114 |
| Tabela 13 – Dados técnicos do adesivo estrutural | 116 |
| Tabela 14 – Comparação entre resultados experimentais e teóricos | 140 |
| Tabela 15 – Resultados do dimensionamento das vigas a serem ensaiadas | 143 |
| Tabela 16 – Propriedades mecânicas do concreto | 145 |
| Tabela 17 – Propriedades mecânicas do aço | 146 |
| Tabela 18 – Propriedades mecânicas do laminado de CFRP | 147 |
| Tabela 19 – Propriedades mecânicas da resina epóxi | 148 |
| Tabela 20 – Resumo dos resultados dos ensaios de flexão das vigas | 162 |
| Tabela 21 – Comparação das vigas em serviço | 169 |
| Tabela 22 – Deformações e níveis de solicitação do laminado de CFRP | 170 |
| Tabela 23 – Resumo dos principais resultados | 179 |
| Tabela 24 – Perdas de protensão imediatas | 182 |
| Tabela 25 – Resumo dos principais resultados do ensaio <i>pull-off</i> | 184 |
| Tabela 26 – Parâmetros utilizados para determinação da capacidade resistente das vigas | 185 |
| Tabela 27 – Comparação entre os resultados teóricos e experimentais | 186 |
| Tabela 28 – Comparação entre os momentos fletores últimos e de cálculo | 187 |

| | |
|---|------------|
| 1. INTRODUÇÃO | 12 |
| 1.1 OBJETIVOS | 15 |
| 1.1.1 Geral..... | 15 |
| 1.1.2 Específicos..... | 15 |
| 1.2 JUSTIFICATIVA | 16 |
| 1.3 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS | 17 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 18 |
| 2.1 REFORÇO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO: BREVE RESUMO 18 | |
| 2.2 POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS | 20 |
| 2.3 REFORÇO PASSIVO COM FRP | 23 |
| 2.3.1 Técnicas de reforço passivo com FRP | 23 |
| 2.3.2 Modos de ruptura de reforço passivo com FRP..... | 27 |
| 2.4 REFORÇO COM PROTENSÃO EXTERNA | 29 |
| 2.4.1 Conceitos básicos do concreto protendido..... | 29 |
| 2.4.2 Tipos de protensão..... | 31 |
| 2.4.3 Perdas de protensão..... | 32 |
| 2.4.4 Protensão externa com cordoalhas metálicas | 34 |
| 2.5 REFORÇO COM FRP PROTENDIDO | 36 |
| 2.5.1 Métodos de reforço com frp protendido..... | 36 |
| 2.5.2 Vantagens e desvantagens do frp protendido..... | 39 |
| 2.5.3 Técnicas de reforço com frp protendido | 40 |
| 2.6 COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADOS À FLEXÃO COM LAMINADOS DE FRP PASSIVOS E PROTENDIDOS | 43 |
| 2.6.1 Estudo conduzido por Correia <i>et al.</i> (2015)..... | 46 |
| 2.6.2 Estudo conduzido por Wang <i>et al.</i> (2022) | 51 |
| 2.6.3 Demais estudos..... | 59 |
| 2.7 PERDAS DE PROTENSÃO COM FRP PROTENDIDO | 74 |
| 2.8 MODELOS DE DIMENSIONAMENTO | 79 |
| 2.8.1 Dimensionamento à flexão segundo a NBR 6118 (ABNT, 2023) | 79 |
| 2.8.2 Dimensionamento à flexão segundo a ACI 318 (2019)..... | 82 |
| 2.8.3 Dimensionamento de reforço à flexão com FRP segundo a ACI PRC-440.2 | |
| (2023) | 84 |
| 2.8.4 Dimensionamento de reforço à flexão com FRP segundo a <i>Fib Bulletin</i> 90 | |
| (2019) | 88 |
| 2.8.5 Dimensionamento de reforço à flexão com frp protendido..... | 93 |
| 2.8.6 Verificações de tensões com FRP protendido | 98 |
| 2.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS QUANTO A FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 100 |

| | |
|---|------------|
| 3. METODOLOGIA | 101 |
| 3.1 ESTRATÉGIA DE PESQUISA | 101 |
| 3.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA | 102 |
| 3.3 APLICAÇÃO DE MODELOS DE DIMENSIONAMENTO | 103 |
| 3.4 PROGRAMA EXPERIMENTAL | 107 |
| 3.4.1 Características das vigas de concreto armado | 109 |
| 3.4.2 Confecção das vigas de concreto armado | 110 |
| 3.4.3 Caracterização mecânica do concreto..... | 111 |
| 3.4.4 Caracterização mecânica do aço | 113 |
| 3.4.5 Caracterização mecânica do laminado de CFRP | 113 |
| 3.4.6 Caracterização mecânica da resina epóxi..... | 115 |
| 3.4.7 Aplicação do sistema de reforço à flexão (passivo)..... | 116 |
| 3.4.8 Aplicação do sistema de reforço à flexão (protendido)..... | 120 |
| 3.4.9 Configurações do ensaio de flexão das vigas..... | 129 |
| 3.4.10 Instrumentação dos materiais e elementos..... | 132 |
| 3.4.11 Ensaio de <i>pull-off</i> (arrancamento) | 136 |
| 4. RESULTADOS E ANÁLISE | 139 |
| 4.1 APLICAÇÃO DE MODELOS DE DIMENSIONAMENTO | 139 |
| 4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS | 144 |
| 4.2.1 Caracterização mecânica do concreto..... | 144 |
| 4.2.2 Caracterização mecânica do aço | 145 |
| 4.2.3 Caracterização mecânica do laminado de CFRP | 147 |
| 4.2.4 Caracterização mecânica da resina epóxi..... | 147 |
| 4.3 COMPORTAMENTO À FLEXÃO DAS VIGAS | 148 |
| 4.3.1 Viga de referência (B1-0-0)..... | 149 |
| 4.3.2 Viga com reforço passivo - sem pré-fissuração (B2-NPC-NP) | 150 |
| 4.3.3 Viga com reforço passivo - com pré-fissuração (B3-PC-NP)..... | 152 |
| 4.3.4 Viga com reforço protendido - sem pré-fissuração (B4-NPC-P)..... | 154 |
| 4.3.5 Viga com reforço protendido - com pré-fissuração (B5-PC-P)..... | 157 |
| 4.3.6 Comparação entre os sistemas de reforço..... | 160 |
| 4.3.7 Efeito da pré-fissuração nas vigas | 167 |
| 4.3.8 Comportamento das vigas em serviço | 168 |
| 4.3.9 Deformações nos laminados de CFRP | 169 |
| 4.3.10 Modo de ruptura das vigas | 171 |
| 4.3.11 Padrão de fissuração e abertura de fissuras..... | 175 |
| 4.4 PERDAS DE PROTENSÃO NO LAMINADO DE CFRP | 181 |
| 4.5 ENSAIO DE <i>PULL-OFF</i> | 183 |
| 4.6 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E TEÓRICOS 184 | |
| 5. CONCLUSÕES | 190 |
| 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 193 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 195 |
| 7. APÊNDICE | 200 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 7.1 | DESLOCAMENTO LATERAL DAS VIGAS E DESLOCAMENTO VERTICAL DOS PERFIS METÁLICOS DE APOIO..... | 200 |
| 7.1.1 | Viga B1-0-0 | 200 |
| 7.1.2 | Viga B2-NPC-NP | 200 |
| 7.1.3 | Viga B3-PC-NP | 201 |
| 7.1.4 | Viga B4-NPC-P | 201 |
| 7.1.5 | Viga B5-PC-P | 202 |

1. INTRODUÇÃO

Diferentes sistemas de reforço estrutural são utilizados para aumentar e/ou restabelecer a capacidade de elementos estruturais podendo-se citar o aumento de seção (encamisamento), colagem de chapas metálicas, colagem de polímeros reforçados com Fibras, conhecidos como FRP (*Fiber Reinforced Polymers*, em língua inglesa), protensão externa, dentre outras técnicas (SOUZA; RIPPER, 1998; WOO; KIM; BYUN, 2012; ACI PRC-440.2, 2023; DALFRÉ, 2022;).

Nas últimas décadas, o uso de FRP na construção civil cresceu consideravelmente, sendo objeto de diversos estudos e aplicações, destacando-se a utilização de mantas, tecidos e/ou laminados externamente colados, de forma passiva, à elementos estruturais com o objetivo de aumentar a sua capacidade à flexão e/ou força cortante (ZHANG; DENG; LIAO, 2013; LIU; PENG; CAI, 2015; GAO; GU; MOSALLAM, 2016; WANG *et al.*, 2022).

Entre as técnicas de reforço passivo com FRP tem-se como a básica e mais utilizada a EBR (*Externally Bonded Reinforcement*, em língua inglesa), também conhecida como SBR (*Surface Bonded Reinforcement*, em língua inglesa), Figura 1a, onde o material de reforço é comumente colado ao substrato do elemento reforçado com resina epóxi, em forma de manta, tecido ou laminado com suas Fibras principais posicionadas na mesma direção dos esforços que se deseja combater (CORREIA *et al.*, 2015). Pode-se destacar também a técnica NSM (*Near-Surface Mounted*, em língua inglesa), Figura 1b, que é subsequente a EBR/SBR, referindo-se a inserção do material de reforço, em forma de laminados esbeltos (tiras), em rasgos ou entalhes executados no elemento reforçado (*Fib BULLETIN 90*, 2019).

Figura 1 – Aplicações práticas das técnicas EBR (a) e NSM (b)



Fonte: *Fib Bulletin 90* (2019)

A utilização dos FRP em técnicas de reforço estrutural se destaca pelas suas boas propriedades mecânicas e baixo peso específico, o que facilita seu manuseio e transporte em áreas ou acessos em que os materiais de técnicas tradicionais são de difíceis aplicações, assim como, os FRP possuem elevada resistência a corrosão e fadiga, se mostrando como uma boa alternativa em relação ao uso de chapas metálicas (WANG *et al.*, 2012; WOO; KIM; BYUN, 2012; ALVES, 2015; CORREIA *et al.*, 2015; ACI PRC-440.2, 2023; LIU *et al.*, 2021).

A eficiência do reforço à flexão de vigas e lajes de concreto armado por meio da colagem externa passiva de FRP é comprovada em diversos programas experimentais, sendo observados incrementos significativos na capacidade última dos elementos reforçados, da ordem de até 50 %, quando comparadas com os elementos não reforçados (DALFRÉ, 2013; CORREIA *et al.*, 2015; GAO; GU; MOSALLAM, 2016; HONG; PARK, 2017; LIU *et al.*, 2021; SARTI JUNIOR, 2020; FERREIRA, 2019; WANG *et al.*, 2022). Os critérios e requisitos de dimensionamento e aplicação de sistemas de reforço estrutural com FRP são estabelecidos por normas técnicas, destacando-se a do *American Concrete Institute (ACI PRC-440.2, 2023)* e da *Fédération Internationale du Béton (Fib Bulletin 90, 2019)*.

Embora as técnicas de reforço estrutural com colagem externa passiva de FRP possuam as vantagens supracitadas, tais técnicas apresentam algumas desvantagens, como modo de ruptura associado ao descolamento brusco ou frágil do FRP do substrato de concreto, Figuras 2a-b, sendo que nesta condição, apenas 20 % a 50 % da capacidade última do material de reforço é efetivamente utilizada (WOO; KIM; BYUN, 2012; ZHANG; DENG; LIAO, 2013; KANG; ZHANG; LIU, 2012; LIU; PENG; CAI, 2015; MICHELS *et al.*, 2015; HONG; PARK, 2017; LI *et al.*, 2021; LIU *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2022; DUSHIMIMANA *et al.*, 2023). Segundo a norma ACI PRC-440.2 (2023), devido ao modo de ruptura caracterizado pelo destacamento do material de reforço, limitações conservadoras quanto a deformação no FRP são impostas nos procedimentos de dimensionamento.

Figura 2 – Ruptura por descolamento do FRP em viga de concreto armado submetida à ensaio de flexão

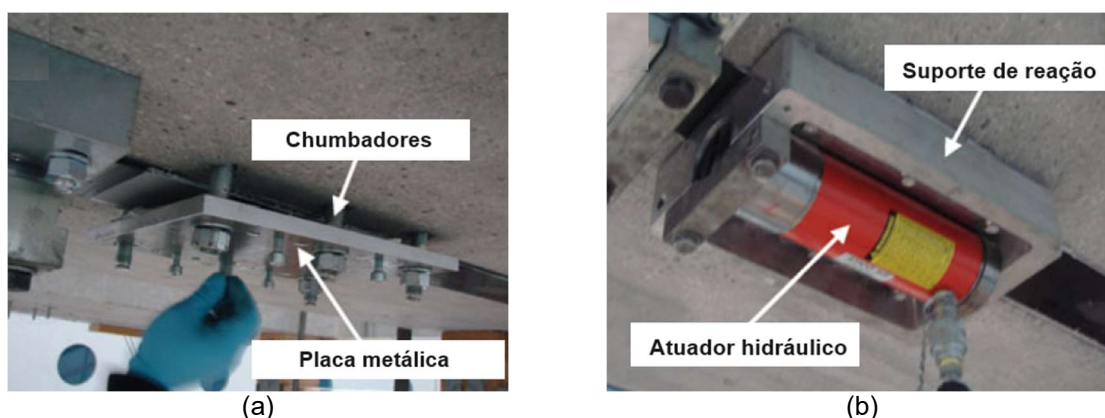


Fonte: Sarti Junior (2020)

Outro aspecto a destacar é a limitação dos sistemas de reforço com colagem passiva de FRP em aumentar a rigidez da seção transversal reforçada, não sendo eficazes para melhorar o comportamento em serviço dos elementos reforçados (WANG *et al.*, 2012; ALVES, 2015; PENG *et al.*, 2016).

De modo a resolver as limitações da colagem externa passiva de FRP, diferentes estudos passaram a avaliar o comportamento de sistemas de reforço com laminados de FRP protendidos, (GARCEZ, 2007; WOO; KIM; BYUN, 2012; KANG; ZHANG; LIU, 2012; ZHANG; DENG; LIAO, 2013; CORREIA *et al.*, 2015; MICHELS *et al.*, 2015; GAO; GU; MOSALLAM, 2016; HONG; PARK, 2017; LIU *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2022). Além de ser colado ao elemento reforçado com o uso de resina, como ocorre nas técnicas EBR e NSM, o laminado ou manta de FRP também é fixado em suas extremidades por meio de ancoragem metálicas e chumbadores (Figura 3a), condição que permite aplicar força de protensão com o uso de atuador hidráulico (Figura 3b).

Figura 3 – Sistema de reforço com laminado de FRP protendidos



Fonte: adaptado de Michels *et al.* (2015)

De acordo com os estudos supracitados, quando comparado com a técnica de colagem passiva, a protensão do FRP resulta em melhor comportamento em serviço do elemento reforçado, condição que se dá em função da força de protensão aplicada no ato do reforço, assim como, proporciona maiores capacidades últimas devido aos sistemas de ancoragens comumente utilizado na referida técnica. Quanto aos níveis de solicitação do material de reforço, enquanto no reforço passivo a solicitação do laminado geralmente é inferior a 50 % de sua capacidade última, no reforço protendido tal solicitação e aproveitamento chega a ser superior a 80 %.

Os sistemas de reforço com laminados de FRP protendidos são uma combinação das técnicas de reforço com colagem externa passiva de FRP e dos conceitos do concreto protendido, em especial, a protensão externa, resultando em um melhor aproveitamento dos materiais envolvidos e melhorando o comportamento em serviço do elemento reforçado, com capacidade de fechar fissuras e reduzir deslocamentos existentes (ZHANG; DENG; LIAO,

2013; CORREIA *et al.*, 2015; MICHELS *et al.*, 2015; SENA-CRUZ *et al.*, 2017; BARRIS; CORREIA; SENA-CRUZ, 2018).

No presente trabalho é estudado e analisado o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP protendidos e passivos. Esta pesquisa se justifica devido ao desconhecimento do uso de tal técnica de reforço no Brasil, adicionado a falta de resultados experimentais com elementos em escala real relacionados ao tema no País.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 GERAL

O objetivo geral da presente dissertação foi avaliar a influência do sistema de reforço passivo ou protendido no comportamento mecânico de vigas de concreto armado biapoiadas, em escala real, reforçadas à flexão com laminados de CFRP.

1.1.2 ESPECÍFICOS

A partir desse objetivo geral foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Apresentar o estado da arte de sistemas de reforço à flexão com laminados de FRP, aplicados segundo a técnica EBR, em elementos de concreto armado, tanto de forma passiva como protendida;
- Compreender e aplicar os modelos de dimensionamento de elementos de concreto armado à flexão previstos nas normas NBR 6118 (ABNT, 2023) e ACI 318 (2019) assim como de sistemas de reforço à flexão passivo com FRP previstos nas normas ACI PRC-440.2 (2023) e *Fib Bulletin 90* (2019), comparando-se os valores teóricos com resultados experimentais obtidos em literatura e, também, com os resultados dos ensaios de flexão das vigas de concreto armado desta pesquisa;
- Avaliar a influência do tipo de reforço aplicado (passivo ou protendido) na capacidade resistente, ductilidade, deformações dos materiais, abertura de fissuras, padrão de fissuração e deslocamentos verticais de vigas de concreto armado;
- Identificar os modos de falha que governam o comportamento de vigas biapoiadas de concreto armado não reforçadas ou reforçadas com laminados de CFRP, aplicados de forma passiva ou protendida, quando submetidas a forças estáticas; e
- Avaliar os efeitos produzidos pela pré-fissuração no comportamento de elementos de concreto armado reforçados;
- Identificar as perdas de protensão imediatas no sistema de reforço com laminado de CFRP protendido; e

- Propor um modelo analítico simplificado para determinação da capacidade resistente de elementos de concreto armado reforçados à flexão com laminados de CFRP protendido.

1.2 JUSTIFICATIVA

A necessidade de encontrar soluções de recuperação e reforço de estruturas cada vez mais eficientes aumentou de forma significativa nos últimos anos, com o objetivo de se obter estruturas de concreto mais sustentáveis, duráveis e com menor custo de manutenção, minimizando e/ou evitando prejuízos com intervenções onerosas ou demolições precoces de estruturas existentes (ALVES, 2015; PELED; MOBASHER; BENTUR, 2017).

O reforço de estruturas de concreto armado com a utilização de tecidos, mantas e/ou laminados de FRP cresceu consideravelmente nas últimas décadas, em especial com o uso das técnicas de reforço por colagem externa passiva (EBR e NSM). Embora se trate de sistemas com comprovada eficiência no aumento de capacidade última de elementos estruturais reforçados à flexão e aos esforços cortantes, a colagem passiva de FRP não melhora de forma significativa o comportamento em serviço e, comumente, seu modo de ruptura está associado ao descolamento do material de reforço, o que limita o aproveitamento da capacidade última do material de reforço (WOO; KIM; BYUN, 2012; KANG; ZHANG; LIU, 2012; ZHANG; DENG; LIAO, 2013; LIU; PENG; CAI, 2015; MICHELS *et al.*, 2015; GAO; GU; MOSALLAM, 2016; HONG; PARK, 2017; LIU *et al.*, 2021; SU; WANG; UEDA, 2022; WANG *et al.*, 2022; DUSHIMIMANA *et al.*, 2023).

No sentido de aumentar a eficiência de sistemas de reforço estrutural com a utilização de FRP, nos últimos anos, atenção especial foi dada a aplicação de sistemas de reforço com laminados de FRP protendidos, estes que, além de receberem um estado prévio de tensão promovido pela protensão, também são fixados ao elemento estrutural, geralmente, por meio de sistemas de ancoragens mecânicas (WOO; KIM; BYUN, 2012; KANG; ZHANG; LIU, 2012; ZHANG; DENG; LIAO, 2013; LIU; PENG; CAI, 2015; MICHELS *et al.*, 2015; HONG; PARK, 2017; LIU *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2022; DUSHIMIMANA *et al.*, 2023).

A eficiência da aplicação da protensão em laminados de FRP é comprovada por diferentes programas experimentais (WOO; KIM; BYUN, 2012; CORREIA *et al.*, 2015; GAO; GU; MOSALLAM, 2016; HONG; PARK, 2017; LIU *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2022), podendo-se destacar como principais resultados o melhor controle na formação das fissuras, condição que resulta em maior rigidez à flexão do elemento reforçado e melhora do comportamento em serviço, e maior capacidade última e alteração do modo de ruptura em razão dos sistemas de ancoragens comumente utilizados, quando comparados aos elementos não reforçados e/ou

reforçados com sistema passivo. Segundo o *FIB Bulletin 90* (2019), trata-se de um sistema com significativa contribuição para o desenvolvimento das técnicas de reforço com FRP.

Aplicações práticas de sistemas de reforço com laminados de FRP protendidos são apresentados por Michels *et al.* (2015), destacando-se o uso do sistema em pontes, viadutos e prédios comerciais na Europa. Embora já exista um histórico de aplicações práticas do sistema em questão, os referidos autores destacam a necessidade de se avançar no conhecimento sobre este tipo de sistema de reforço, sendo ainda necessário validar modelos de dimensionamento, ponto este também destacado por Zhang, Deng e Liao (2013), avaliar sua durabilidade e desenvolver diferentes técnicas de protensão e sistema de ancoragem dos laminados.

Tendo em vista o acima exposto, o presente trabalho tem como objetivo analisar, por meio de um programa experimental, o comportamento mecânico de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP protendidos e passivos, de modo a avaliar a influência do tipo de sistema de reforço aplicado e os efeitos da pré-fissuração nas vigas, como também, validar modelo de dimensionamento com os resultados experimentais obtidos, visando definir uma rotina de cálculo que viabilize sua aplicação e contribua com as normas e recomendações técnicas inerentes.

1.3 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

O presente estudo é composto por mais 4 capítulos, além deste capítulo introdutório. No capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica sobre o tema em questão, sendo realizada uma breve revisão bibliográfica sobre os sistemas de reforços estruturais e concreto protendido. São apresentados estudos anteriores que investigaram o comportamento estrutural de elementos de concreto armado reforçadas à flexão com laminados de FRP passivos e protendidos, analisando e discutindo-se os resultados obtidos nos trabalhos consultados, de modo a compreender o estado da arte do objeto da presente pesquisa. Por fim, são apresentados os modelos de dimensionamentos aplicáveis aos elementos e sistemas de reforço analisados.

O capítulo 3 apresenta os procedimentos metodológicos definidos para a realização do programa experimental, sendo detalhados os ensaios e procedimentos adotados, assim como, indicadas as normas técnicas, critérios e referências bibliográficas em que o programa experimental se fundamentou.

No capítulo 4 são apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos da presente pesquisa, tanto experimentais como teóricos. No capítulo 5 são apresentadas as conclusões finais e sugestões para trabalhos futuros, enquanto no Apêndice foram incluídos os resultados adicionais do programa experimental realizado.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No presente capítulo é apresentada uma revisão da literatura sobre a aplicação de sistemas de reforço estrutural com laminados de FRP passivos e protendidos, de modo apresentar o estado da arte do objeto da presente pesquisa, assim como, fornecer subsídios para uma melhor compreensão de seu comportamento estrutural.

Inicialmente, são apresentadas as principais técnicas de reforço em estruturas de concreto armado, sendo na sequência, destacados os principais aspectos das técnicas de reforço, com e sem protensão, com a utilização de FRP. Posteriormente são apresentados e discutidos resultados de trabalhos experimentais disponíveis na literatura, que analisaram o comportamento de elementos em concreto armado reforçados à flexão com laminados de FRP, tanto de forma passiva como ativa (protendida). O presente capítulo termina com a abordagem de modelos de dimensionamento aplicáveis.

2.1 REFORÇO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO: BREVE RESUMO

Procedimentos de recuperação e reforço estrutural podem ser requeridos no decorrer da vida útil de uma estrutura por diferentes motivos tais como deterioração precoce, ausência de planos de manutenção e inspeções, falhas de projeto e/ou execução, e alterações arquitetônicas ou de uso (SOUZA; RIPPER, 1998; GARCEZ, 2007; MACHADO; MACHADO, 2015; DALFRÉ, 2022; WANG *et al.*, 2022).

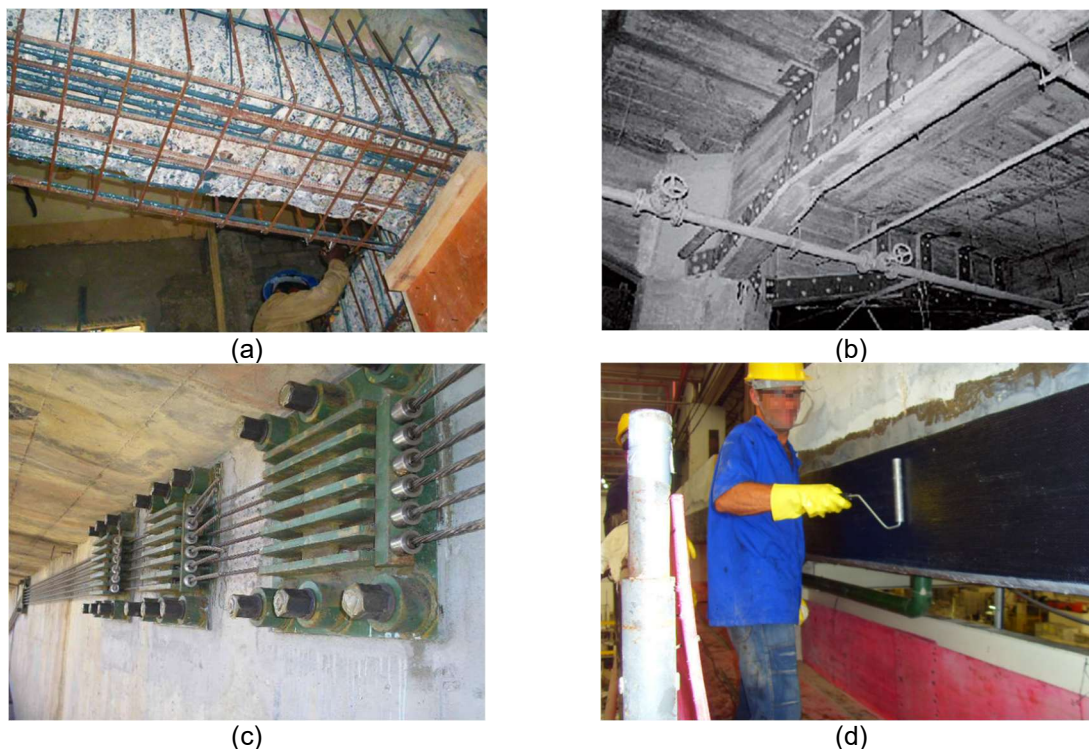
De forma resumida, pode-se definir que os trabalhos de recuperação estrutural têm como objetivo devolver à estrutura suas condições originais, enquanto o reforço estrutural tem como finalidade aumentar a capacidade resistente do elemento reforçado.

Segundo Helene *et al.* (2003), na definição de um tipo de intervenção, seja ela um simples reparo ou reforço estrutural, aspectos técnicos, operacionais, arquitetônicos e ambientais devem ser considerados. Souza e Ripper (1998) destacam a necessidade de levar em conta fatores como a concepção original da estrutura, sua história, defeitos e novas exigências requeridas em um projeto de reforço estrutural. Ainda, os referidos autores destacam que a escolha da técnica de recuperação e/ou reforço de uma estrutura passa imprescindivelmente por um adequado diagnóstico de seu quadro patológico, caso necessário.

Em relação às técnicas de reforço, pode-se destacar métodos como o aumento de seção transversal (encamisamento), reforço com materiais compósitos, perfis metálicos ou colagem de chapas metálicas, incorporação de novos elementos estruturais e protensão

externa (HELENE *et al.*, 2003; DALFRÉ, 2022). Na Figura 4 são apresentados os principais sistemas de reforço utilizados em estruturas de concreto armado.

Figura 4 – Sistemas de reforço estrutural: (a) encamisamento, (b) chapas metálicas, (c) protensão externa e (d) FRPs



Fonte: (a) Solidus Engenharia (2023), (b), Souza e Ripper (1998), (c) Vítório e Barros (2011) e (d) Clever Solutions (2023)

O reforço estrutural por encamisamento (Figura 4a) é uma alternativa muito conhecida e utilizada para o aumento da capacidade resistente e rigidez do elemento reforçado, sendo utilizados materiais convencionais para sua execução (concreto armado, graute e armaduras) e seu dimensionamento segue as recomendações da norma NBR 6118 (ABNT, 2023). Entretanto, o referido sistema resulta em significativa alteração da geometria do elemento reforçado, aumento de seu peso próprio e demanda maior tempo de execução/cura do sistema, o que em muitos casos pode inviabilizar seu uso (CÁNOVAS, 1988; DALFRÉ, 2022).

Já o reforço estrutural com a colagem de chapas metálicas (Figura 4b) resulta em alterações mais discretas, podendo contar com sistemas de ancoragem (chumbadores), e seu dimensionamento pode ser feito combinando-se os critérios e recomendações das normas NBR 6118 (ABNT, 2023) e NBR 8800 (ABNT, 2008). Entretanto, tais chapas são suscetíveis ao processo de corrosão, seu peso próprio pode dificultar seu transporte e manuseio, é fornecido comercialmente em comprimento limitados, e sua aplicação requer preparações superficiais rigorosas (nivelamento) (GARCEZ, 2007; MACHADO; MACHADO, 2015; DALFRÉ, 2022).

Em relação ao reforço estrutural com protensão externa com a utilização de cordoalhas metálicas (Figura 4c), tal sistema se mostra competitivo para situações em que é necessário inibir deslocamentos em um elemento estrutural, reduzir ou fechar fissuras existentes, redistribuir esforços entre elementos de uma estrutura e aumentar a capacidade de carga (SOUZA; RIPPER, 1998). Ainda, diferente das demais técnicas, sua aplicação pode ser realizada com a estrutura em uso, sem necessidade de reduzir os carregamentos atuantes no ato da aplicação do reforço. Seu dimensionamento também segue os critérios e requisitos da NBR 6118 (ABNT, 2023).

Alternativamente aos sistemas supracitados, pode-se destacar o uso de FRP face sua rápida e prática aplicação, boas propriedades mecânicas e elevada resistência à corrosão, resultando em mudanças insignificativas na geometria e peso próprio do elemento reforçado. Porém, cuidados devem ser tomados em sua aplicação, principalmente em relação a preparação da superfície e preparação dos materiais, de modo garantir sua aderência e eficiência estrutural (SOUZA; RIPPER, 1998; WANG *et al.*, 2022). Na Figura 4d é apresentada a aplicação de um reforço estrutural com colagem externa passiva de manta de FRP. O dimensionamento do referido sistema pode ser feito considerando-se os critérios e requisitos das normas ACI PRC-440.2 (2023) e *Fib Bulletin 90* (2019).

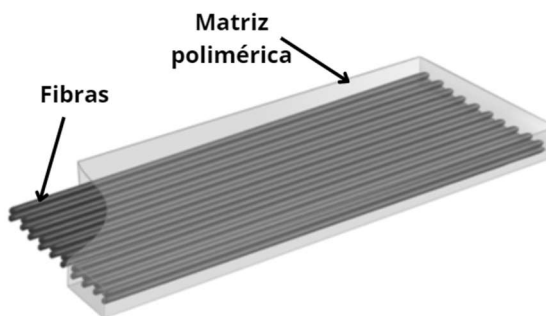
Quando comparado ao sistema de reforço com colagem de chapas metálicas, o FRP se destaca pelo seu fácil manuseio, tendo em vista se tratar de um material mais leve e possuir maior versatilidade em sua aplicação. Ainda, reduz a quantidade de material de fixação (parafusos) e possui elevada resistência à corrosão (AZEVEDO, 2015). Já em relação ao reforço com protensão externa, o reforço com colagem externa passiva de FRP não é eficiente para resolver deficiências de elementos estruturais relacionados à fissuração e deslocamentos (ALVES, 2015).

2.2 POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS

Os FRP (*Fiber Reinforced Polymer*, em língua inglesa) são materiais compósitos constituídos por Fibras contínuas embebidas em uma matriz tipicamente polimérica, conforme representação esquemática da Figura 5.

Os FRP podem ser encontrados comercialmente em diferentes tamanhos e formatos, assim como, pré-curados (laminados, barras e perfis) e curados *in situ* (mantas e tecidos) (ALVES, 2015; ACI PRC-440.2, 2023; *Fib Bulletin 90*, 2019; DALFRÉ, 2022). De acordo com Dalfré (2022, p. 25) as mantas possuem Fibras dispostas unidirecionalmente, enquanto os tecidos possuem Fibras em direções ortogonais ou multidirecionais, podendo então o FRP apresentar comportamento anisotrópico, ortótropo ou quase isotrópico.

Figura 5 – Representação esquemática de um compósito FRP.



Fonte: Adaptado de Machado e Machado (2015)

Entre os tipos de Fibras utilizadas no FRP, destacam-se as de carbono, vidro, aramida, basalto e aço, denominadas na língua inglesa CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*), GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*), AFRP (*Aramid Fiber Reinforced Polymer*), BFRP (*Basalt Fiber Reinforced Polymer*) e SFRP (*Steel Fiber Reinforced Polymer*), respectivamente. Na Tabela 1 são apresentadas as principais propriedades mecânicas das Fibras mais utilizadas em sistemas de reforço.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas das Fibras

| Material | | Modulo de elasticidade (MPa) | Tensão à tração última (MPa) | Deformação última à tração (%) |
|-----------------|------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| Carbono | Alta resistência | 215-235 | 3500-4800 | 1,4-2,0 |
| | Ultra alta resistência | 215-235 | 4800-6000 | 2,0-2,3 |
| | Alto módulo | 350-500 | 2500-3100 | 0,5-0,9 |
| | Ultra alto módulo | 500-700 | 2100-2400 | 0,2-0,4 |
| Vidro | E | 70 | 1900-3000 | 3,0-4,5 |
| | S | 85-90 | 3500-4800 | 4,5-5,5 |
| Aramida | Baixo módulo | 70-80 | 3500-4100 | 4,3-5,0 |
| | Alto módulo | 115-130 | 3500-4000 | 2,5-3,5 |
| Basalto | | 80-90 | 2500-3200 | 3,0-3,5 |
| Aço | | 185 | 3070 | 1,7 |
| Fibras naturais | Cânhamo | 30-70 | 500-700 | 2,0-4,0 |
| | Linho | 30-40 | 500-1500 | 2,5-3,5 |
| | Kenaf | 30-50 | 500-900 | 1,2-2,0 |

Fonte: Adaptado de *Fib Bulletin 90* (2019)

De acordo com a *FIB Bulletin 90* (2019, p. 8), bem como propriedades apresentadas na Tabela 1: (i) as Fibras de carbono são as que apresentam os maiores módulos de elasticidade e tensões últimas; (ii) as Fibras de vidro do tipo E e S não são resistentes à ambientes alcalinos, sendo necessário adições em sua fabricação para corrigir tal deficiência; (iii) as Fibras de aramida são fornecidas por poucos fabricantes e são significativamente sensíveis à ação de raios ultravioleta; (iv) as Fibras de basalto apresentam propriedades similares às Fibras de vidros e seu comportamento a longo prazo ainda carece de estudos; e (v) as Fibras naturais dependem diretamente de sua origem geográfica e suas propriedades

mecânicas necessitam ser determinadas por meio de ensaios para aplicação em sistemas de reforço.

No que diz respeito às matrizes poliméricas, estas têm como função proteger as Fibras contra ações mecânicas e químicas, assim como, proporcionar ligação entre as Fibras contínuas de modo a distribuir os esforços solicitantes e garantir a adequada aderência do material FRP ao substrato do elemento reforçado (*Fib BULLETIN 90*, 2019).

As matrizes poliméricas podem ser do tipo termoplástica (polietileno, poliestireno, entre outros) ou termorrígida (epóxi, fenol, poliéster, entre outros), sendo o uso desta última mais comum em sistemas de reforço. As resinas termoplásticas possuem maiores resistência a impactos e microfissuração, quando comparadas com as termorrígidas, entretanto, apresentam maior viscosidade, o que dificulta a impregnação das Fibras, e podem ser fundidas quando aquecidas, diferentemente, das resinas termorrígidas que apresentam endurecimento irreversível, degradando-se somente em elevadas temperaturas (DALFRÉ, 2022, p. 21). Segundo a *Fib Bulletin 90* (2019, p. 9), as resinas epóxi, poliéster e vinil éster são as mais utilizadas nos FRP, entretanto, entre as três resinas citadas, a epóxi é a matriz com melhores propriedades mecânicas e durabilidade.

De acordo com a *Fib Bulletin 90* (2019, p. 193), as resinas devem atender às especificações de projetos, sendo necessária a devida validação de suas propriedades por meio de ensaios, por parte do fabricante. No Quadro 1 são destacadas as principais características requeridas para os adesivos utilizados nos FRP, recomendadas pela referida norma.

Quadro 1 – Propriedades recomendadas para os adesivos estruturais

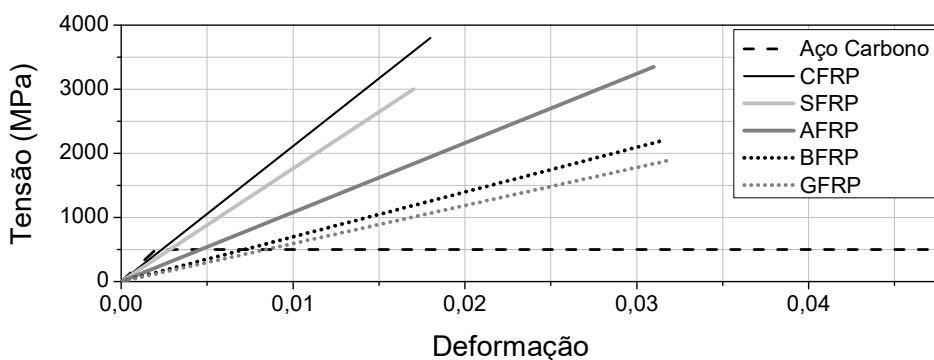
| Propriedade | Especificação |
|---|---|
| Viscosidade e tixotropia | determinada em função do tipo de aplicação (superfícies verticais, côncavas e/ou horizontais) |
| Cura e retração | capacidade de cura em condições extremas, em temperatura mínima de 5 °C e umidade relativa máxima de 80 % |
| Pot life, open time e shelf life | <i>pot life</i> superior a 40 minutos a 20°C, <i>open time</i> superior a 20 minutos a 20°C; e <i>shelf life</i> superior a 6 meses quando armazenado em embalagem original e entre 5 e 25 °C |
| Temperatura de transição vítrea | de 10 a 20°C superior a temperatura de serviço e superior a 40°C |
| Absorção de água | até 3 %, em massa |
| Cargas de preenchimento | não condutores de eletricidade, altamente resistentes à umidade e capazes suportar temperaturas superiores a 120°C |
| Módulo de elasticidade a curto prazo | de 2 a 15 GPa |
| Capacidade ao cisalhamento a curto prazo | mínimo de 12 MPa |
| Tensão de aderência a curto prazo | superior a 14 MPa a 20 °C |

Fonte: adaptado de *Fib Bulletin 90* (2019).

Do Quadro 1, o termo *pot life*, em língua inglesa, se refere ao tempo de manuseio da resina após a mistura de seus componentes, o termo *open time*, em língua inglesa, diz respeito ao tempo em que após a aplicação nos materiais a resina encontra-se em estado fresco, e o termo *shelf life*, em língua inglesa, refere-se a vida útil da resina em estoque. Já a temperatura de transição vítrea se refere a temperatura em que a resina passa de um estado flexível e dúctil para um estado rígido e frágil.

Na Figura 6 é apresentada, por meio de diagramas de tensão *versus* deformação, a comparação do comportamento mecânico à tração dos principais tipos de FRP e do aço. Nota-se pela referida Figura que, diferentemente do comportamento do aço carbono, o FRP apresenta comportamento elástico linear até sua ruptura, esta que ocorre de maneira brusca e frágil, não apresentando patamar de escoamento, ainda, a sua resistência à tração do FRP pode ser 10 vezes superior ao do aço carbono.

Figura 6 – Digrama tensão *versus* deformação dos diferentes tipos de Fibras e aço



Fonte: adaptado de *Fib Bulletin 90* (2019)

Comparando-se o comportamento das diferentes Fibras, por meio dos diagramas da Figura 6, pode-se observar que as Fibras de carbono (CFRP) conferem maior rigidez quando comparada às demais Fibras, entretanto, apresentam baixa ductilidade, principalmente quando comparada com as Fibras de vidro (GFRP). Já as Fibras de aramida (AFRP) apresentam comportamento intermediário em relação às Fibras citadas. Comparações das propriedades básicas das Fibras utilizadas em materiais FRP são listadas e descritas por Garcez (2007, p. 73).

2.3 REFORÇO PASSIVO COM FRP

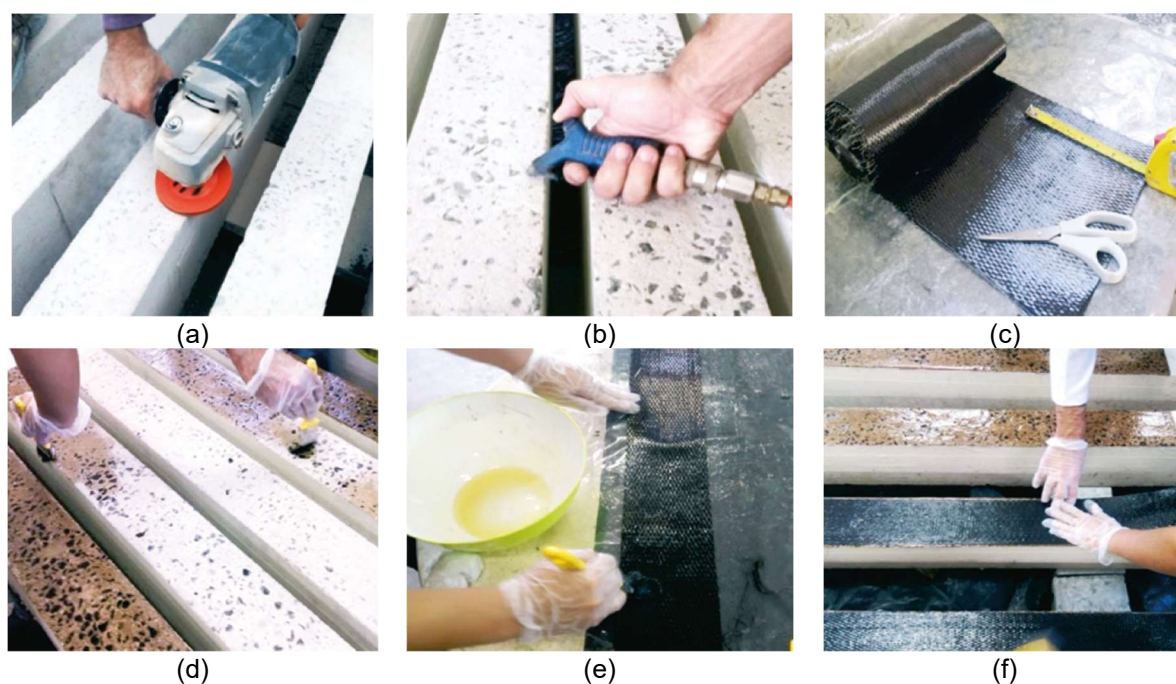
2.3.1 TÉCNICAS DE REFORÇO PASSIVO COM FRP

Como já mencionado, entre as técnicas de reforço passivo com FRP tem-se como as mais utilizadas, a EBR (*Externally Bonded Reinforcement*, em língua inglesa), na qual o

material de reforço é colado ao substrato do elemento reforçado, em forma de manta, tecido ou laminado, e a técnica NSM (*Near-Surface Mounted*, em língua inglesa), onde ocorre a inserção do material de reforço, em forma de laminados esbeltos (tiras), em rasgos ou entalhes executados no elemento reforçado.

O processo de aplicação de reforço passivo com FRP pela técnica EBR pode ser separado nas seguintes etapas: (i) preparo da superfície de concreto com remoção da camada de nata de cimento e exposição dos agregados, para melhorar sua rugosidade (Figura 7a); (ii) limpeza de resíduos e partículas soltas (Figura 7b); (iii) medição e corte do FRP nas dimensões requeridas (Figura 7c); (iv) aplicação de resina de regularização, se necessário (Figura 7d); (v) aplicação da resina epoxídica no FRP e substrato (Figura 7e); (vi) posicionamento e colagem do FRP, removendo-se eventuais excessos (Figura 7f) (SOUZA; RIPPER, 1998; DALFRÉ; ALVES; OLIVEIRA, 2019; DALFRÉ, 2022).

Figura 7 – Processo de aplicação de reforço passivo em vigas de concreto armado com FRP segundo a técnica EBR

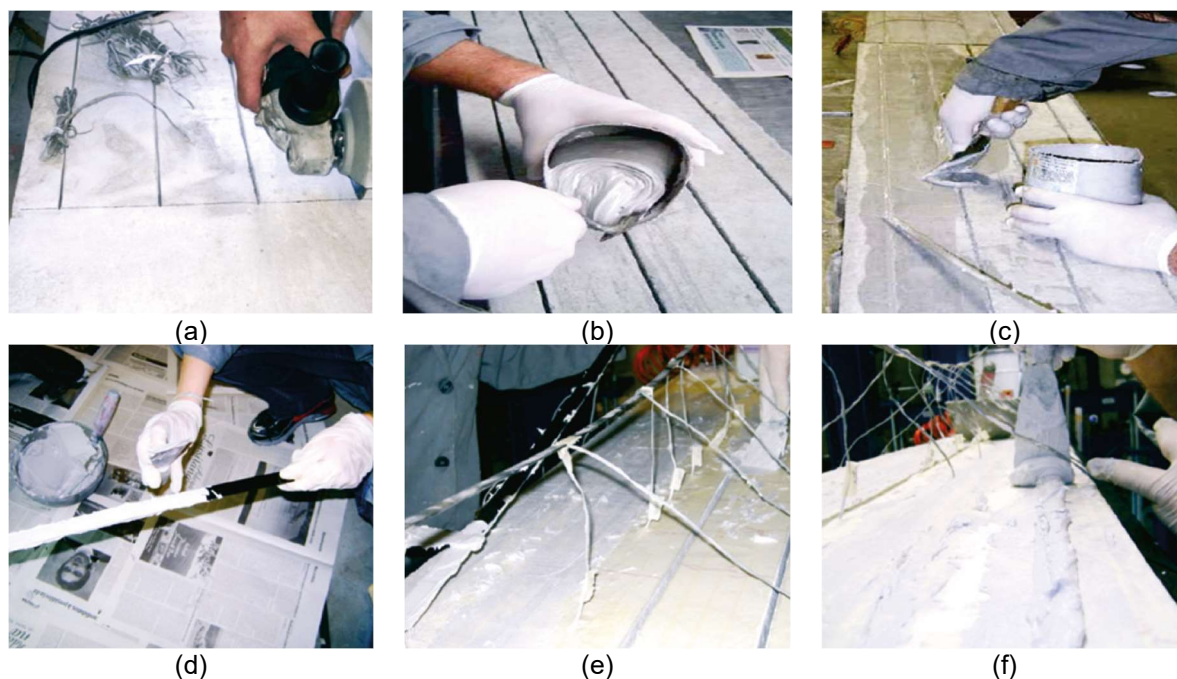


Fonte: Dalfré, Alves e Oliveira (2019)

Já o processo de aplicação de reforço passivo com FRP pela técnica NSM pode ser separado nas seguintes etapas: (i) abertura de rasgos ou entalhes no concreto de cobertura e limpeza com ar comprimido (Figura 8a); (ii) preparação do adesivo (Figura 8b); (iii) corte e limpeza do FRP e aplicação de adesivo epóxi nos entalhes executados (Figura 8c); (iv) aplicação do adesivo epóxi no FRP (Figura 8d); (v) inserção do FRP nos entalhes executados no concreto de cobertura (Figura 8e); e (vi) remoção do excesso de adesivo epóxi (Figura 8f) (DALFRÉ; ALVES; OLIVEIRA, 2019). De acordo com Dalfré, Alves e Oliveira (2019), quando comparado com a técnica EBR, a técnica NSM possui algumas vantagens em sua

aplicação, visto que há redução das etapas, já que não requer preparações rigorosas da superfície.

Figura 8 – Processo de aplicação de reforço em faixas de laje de concreto armado com FRP segundo a técnica NSM



Fonte: Dalfré (2013)

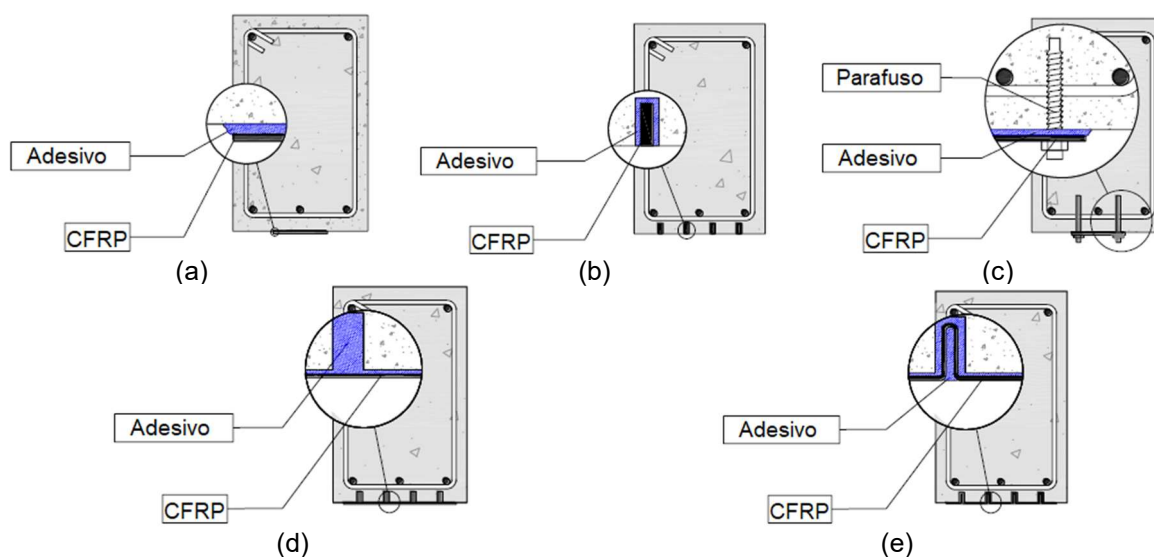
O substrato de concreto a ser reforçado deve possuir resistência à compressão superior a 17 MPa e ser preparado de forma adequada, estando devidamente nivelado e com superfície rugosa, livre de contaminações e com temperatura e umidade dentro das recomendações do fabricante da resina/adesivo, de modo que o sistema de reforço apresente tensão de aderência superior a 1,4 e 1,5 MPa, limites impostos pelas normas ACI PRC-440.2 (2023) e *Fib Bulletin 90* (2019) respectivamente, a qual pode ser verificada por meio de ensaio de arrancamento (*pullout*, em língua inglesa) (DALFRÉ, 2022).

O desempenho de sistemas de reforço com colagem externa passiva de FRP, como a técnica EBR e NSM, depende significativamente da aderência do material de reforço ao substrato do elemento reforçado. Com o objetivo de evitar modos de ruptura prematuros de tais sistemas, diferentes formas de colagem passiva podem ser utilizadas, conforme apresenta a Figura 9, dando origem as técnicas MF-EBR (*Mechanically Fastened and Externally Bonded Reinforcement*, em língua inglesa), EBROG (*Externally Bonded Reinforcement on Grooves*, em língua inglesa) e EBRIG (*Externally Bonded Reinforcement in Grooves*, em língua inglesa) (CORREIA, 2018).

Apesar de melhorar a aderência do sistema de reforço e aumentar a capacidade última dos elementos reforçados, quando comparado às técnicas tradicionais (EBR/NSM), as diferentes técnicas de reforço passivo com ancoragem, listadas acima e apresentadas na

Figura 9, também tendem a apresentar um modo de ruptura associado ao descolamento do material de reforço, sendo o FRP solicitado à tensões significativamente inferiores a sua capacidade última, e o comportamento em serviço do elemento reforçado não é significativamente melhorado (CORREIA, 2018; WANG *et al.*, 2022).

Figura 9 – Representação esquemática das técnicas EBR, NSM, MF-EBR, EBROG e EBRIG



Fonte: adaptado de Correia (2018)

De acordo com Alves (2015), resultados de estudos experimentais já realizados indicam que a técnica NSM é mais eficiente do que a técnica EBR, uma vez que a inserção do laminado no elemento reforçado resulta em um maior grau de fixação (colagem em 3 faces do laminado) proporcionando maiores capacidades resistentes, o material de reforço passa a possuir uma maior proteção contra à exposição ambiental e atos de vandalismos e sua aplicação não requer preparação de superfície rigorosa, como ocorre com a técnica EBR.

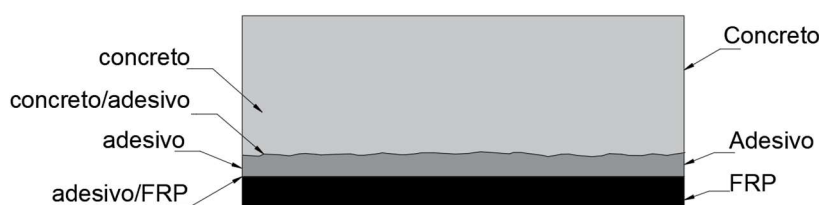
Importante destacar que as técnicas de reforço com FRP supracitadas constituem-se na colagem externa do material de reforço ao elemento estrutural, ou seja, trata-se de um sistema passivo, sendo que, em níveis de deformações e deslocamentos relacionados a estados limites de serviço (ELS), a eficácia de tais técnicas não é significativa face ao baixo aumento de rigidez que o sistema proporciona ao elemento reforçado (WANG *et al.*, 2012; ALVES, 2015).

Ainda, conforme preconizado pelas normas ACI PRC-440.2 (2023) e *Fib Bulletin 90* (2019), a aplicação de sistemas de reforço em estrutura não corrige danos ou anomalias pré-existentes, tornando-se sempre necessário os devidos serviços de recuperação estrutural, como descontaminação, limpeza de armaduras, recomposições, para que num segundo momento, sejam aplicados os materiais dos sistemas de reforço.

2.3.2 MODOS DE RUPTURA DE REFORÇO PASSIVO COM FRP

A transferência de esforços entre o substrato de concreto do elemento reforçado e o material de reforço em FRP se dá por mecanismos de aderência entre os referidos materiais. De acordo com o *Fib Bulletin 90* (2019), para o caso da aplicação da técnica EBR, as falhas ou modos de ruptura da aderência entre os materiais pode ocorrer nas interfaces ou camadas indicadas na Figura 10, sendo elas: concreto; adesivo e/ou FRP.

Figura 10 – Interfaces de aderência entre o FRP e substrato



Fonte: adaptado de *Fib Bulletin 90* (2019)

Em relação ao descolamento na camada de concreto (falha coesiva no concreto), a penetração do adesivo estrutural na microestrutura do concreto aumenta a sua rigidez e resistência à tração, prevenindo descolamentos precoces na interface concreto/FRP. Neste tipo de falha, o descolamento de parte do cobrimento pode ocorrer a poucos milímetros do material de reforço ou em camadas enfraquecidas do concreto, como exemplo, próximas as armaduras. Já o descolamento na camada do adesivo normalmente ocorre quando a resistência à tração do concreto é muito superior ao do adesivo e/ou em situações de temperatura elevada (*FIB BULLETIN 90*, 2019).

No que diz respeito às falhas de aderência nas interfaces concreto/adesivo e adesivo/FRP, as falhas nestas interfaces ocorrem pela inadequada preparação das superfícies antes da aplicação do reforço, desde que a resistência à coesão do adesivo seja inferior a resistência de aderência (*FIB BULLETIN 90*, 2019).

Ainda, a falha à aderência no sistema de reforço pode ocorrer dentro da camada do FRP, quando a resistência ao cisalhamento do compósito é superada, entretanto, trata-se de um tipo de falha bastante raro, visto que as matrizes poliméricas dos materiais FRP comumente apresentam resistências superiores ao do concreto (*FIB BULLETIN 90*, 2019).

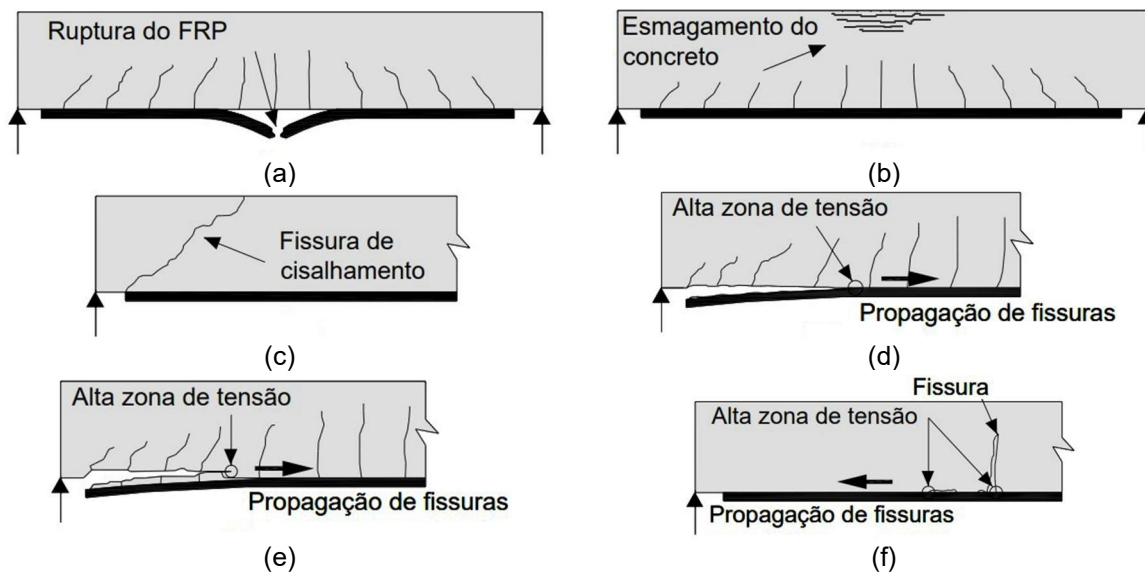
Correlacionando com os possíveis tipos de falhas de aderência, na Figura 11 são apresentados os principais modos de ruptura de um elemento em concreto armado com reforço passivo à flexão com a utilização de FRP, os quais podem ser classificados com base no local de falha (FRP ou concreto).

De acordo com Teng *et al.* (2003), quando as extremidades do material de reforço possuem condições adequadas de ancoragem, a ruptura do elemento reforçado se dá pela ruptura do FRP (Figura 11a), ou pelo esmagamento do concreto (Figura 11b). Para o caso em

que a capacidade à flexão do elemento reforçado supera a sua capacidade ao esforço cortante, a ruptura pode ocorrer de forma frágil ao corte, conforme apresenta a Figura 11c.

Os modos de ruptura relacionados ao destacamento do material de reforço podem ocorrer nas extremidades do FRP, devido a ancoragem insuficiente, ou na região intermediária, face ao surgimentos de fissuras (*FIB BULLETIN 90*, 2019).

Figura 11 – Modos de ruptura de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com FRP



Fonte: adaptado de Teng *et al.* (2003)

Nas regiões de extremidades ou ancoragens, o destacamento do material de reforço ocorre devido a atuação conjunta de tensões normais e cisalhantes próximas à extremidade do FRP. Uma vez o substrato com preparação adequada, assim como, a resistência à tração do concreto inferior à do adesivo, os descolamentos ocorrem da extremidade do FRP com direção a região intermediária, podendo-se destacar uma fina camada de concreto (Figura 11d), falha conhecida na literatura como *Interfacial debonding at the anchorage zone*, ou uma camada de concreto de maior espessura, conhecida como *concrete cover separation* ou *concrete rip-off* (Figura 11e). Este tipo de falha comumente está associada a formação de fissuras de cisalhamento próximas da extremidade do FRP (TENG *et al.*, 2003; *FIB BULLETIN 90*, 2019).

Tais concentrações de tensões podem ocorrer em regiões distantes das ancoragens devido a propagação de fissuras, sejam de flexão ou de esforço cortante (Figura 11f), modo de falha conhecido na literatura como *intermediate crack debonding*, podendo ocorrer devido ao surgimento e propagação das aberturas de fissuras de flexão e/ou cisalhamento, iniciando-se na região intermediária e se expandido para as extremidades (TENG *et al.*, 2003; *FIB BULLETIN 90*, 2019).

A norma *FIB Bulletin 90* (2019, p. 54) destaca que descolamentos pontuais também podem ser ocasionados por irregularidades na superfície de concreto como pequenas concavidades. Tais irregularidades não resultam em descolamento total do material de reforço, e sua ocorrência pode ser evitada com a adequada preparação do substrato.

Como já mencionado, os modos de ruptura descritos acima, caracterizados pelo descolamento do FRP do elemento reforçado, resultam em apenas 20 % a 50 % de solicitação da capacidade última do material de reforço (KANG; ZHANG; LIU, 2012; WOO; KIM; BYUN, 2012; ZHANG; DENG; LIAO, 2013; LIU; PENG; CAI, 2015; MICHELS *et al.*, 2015; HONG; PARK, 2017; LI *et al.*, 2021; LIU *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2022; DUSHIMIMANA *et al.*, 2023).

De acordo com o CT 303 - IBRACON/ABECE (2023, p. 29), no dimensionamento de elementos de concreto reforçados com FRP, deve-se evitar modos de ruptura frágeis, garantindo ductilidade no estado limite último (ELU). Portanto, os modos de ruínas recomendados são: (i) escoamento do aço seguido do esmagamento do concreto comprimido, antes da ruptura do FRP; e (ii) escoamento do aço seguido da ruptura do FRP.

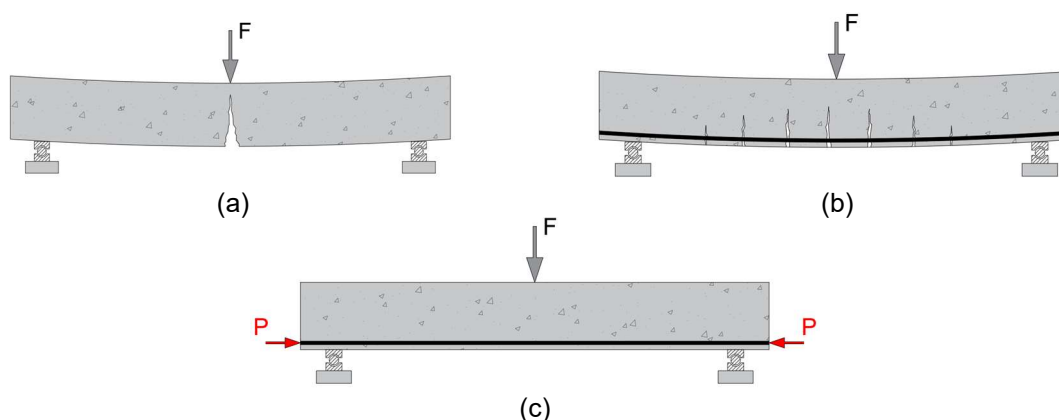
2.4 REFORÇO COM PROTENSÃO EXTERNA

A seguir são apresentados os conceitos básicos sobre o concreto protendido e as técnicas de reforço com protensão externa com o uso de cordoalhas metálicas.

2.4.1 CONCEITOS BÁSICOS DO CONCRETO PROTENDIDO

A protensão consiste na aplicação de um estado prévio de tensão em um determinado elemento com o objetivo principal de melhorar seu comportamento em serviço (RÜSCH, 1980; VERÍSSIMO; CÉSAR JÚNIOR, 1998; VITÓRIO; BARROS, 2011; BASTOS, 2021). Na Figura 12 são apresentados três esquemas de vigas de concreto, sendo elas: concreto simples, concreto armado e concreto protendido, respectivamente.

Figura 12 – Vigas de concreto simples, armado e protendido.



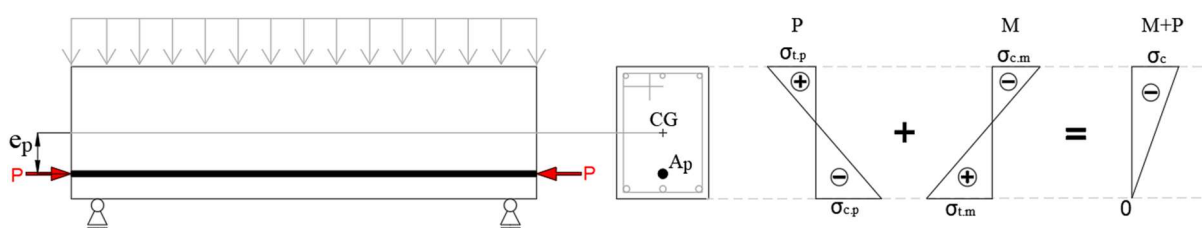
Fonte: adaptado de Bastos (2021)

No concreto simples a viga rompe de forma brusca logo após o surgimento da primeira fissura na região tracionada, face a baixa resistência à tração do concreto (Figura 12a). Na viga de concreto armado a armadura posicionada na região tracionada passa a ser solicitada após o surgimento das fissuras no concreto, servindo de ponte entre as fissuras e resultando em uma capacidade resistente muito mais elevada que a do concreto simples, entretanto, resultando em deslocamentos consideráveis (Figura 12b). Já no concreto protendido (Figura 12c), a aplicação de uma força de protensão excêntrica ao centro de gravidade da viga equilibra-se com as tensões de tração devido aos esforços externos, prevenindo-se a fissuração e diminuindo os deslocamentos (BASTOS, 2021).

A aplicação de esforços prévios de compressão nos elementos de concreto armado por meio da protensão reduz ou anula as tensões de tração provenientes das solicitações em serviço, sendo que nessas condições a fissuração do concreto deixa de ser fator determinante no dimensionamento, assim como, ocorre um maior aproveitamento dos materiais (VERÍSSIMO; CÉSAR JÚNIOR, 1998; FRANÇA; ISHITANI; GRAZIANO, 2004; CHOLFE; BONILHA, 2018;).

Na Figura 13 é apresentado, de forma resumida, o equilíbrio de tensões que a protensão proporciona ao elemento protendido, onde as tensões de tração ($\sigma_{t,m}$) e compressão ($\sigma_{c,m}$) na seção transversal provocadas por solicitações externas ao elemento (M) são equilibradas pelas tensões de tração ($\sigma_{t,p}$) e compressão ($\sigma_{c,p}$) devido a força de protensão excêntrica (P).

Figura 13 – Equilíbrio de tensões em viga protendida



Fonte: adaptado de Bastos (2021)

Nota-se pela análise da Figura 13 que a protensão tem como conceito básico aplicar tensões contrárias às tensões atuantes no elemento para que, em condições de serviço, as tensões de tração sejam consideravelmente diminuídas ou até mesmo anuladas (BASTOS, 2021). As verificações das tensões no elemento protendido são definidas pela norma NBR 6118 (ABNT, 2023).

De acordo com Bastos (2021, p. 2), quando o efeito da protensão resulta na anulação de tensões de tração tem-se a chamada protensão completa, enquanto que para os casos em

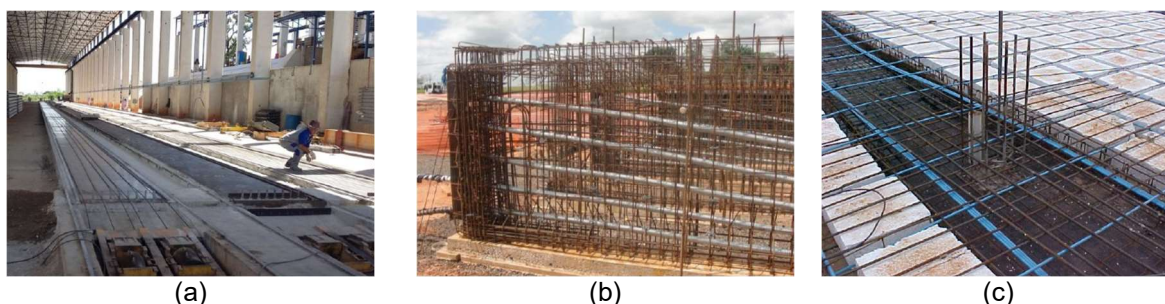
que tais tensões não são totalmente anuladas, tem-se as protensões dos tipos parcial e limitada.

De forma resumida, a protensão completa se destaca em obras que requerem níveis mais rigorosos de durabilidade, como aquelas em ambientes agressivos, entretanto, se trata do tipo de protensão mais onerosa. Já a limitada é a mais comum, respeitando-se os limites de descompressão e de fissuras de forma adequada, se mostrando mais efetiva do que a protensão parcial, que permite maiores tensões de tração no concreto (VERÍSSIMO; CÉSAR JÚNIOR, 1998).

2.4.2 TIPOS DE PROTENSÃO

Existem dois principais sistemas de protensão, aderente e não aderente, os quais podem ser aplicados em duas modalidades: na pré-tração (antes da concretagem do elemento) ou na pós-tração (após o endurecimento do concreto do elemento) (CHOLFE; BONILHA, 2018). Tais sistemas são apresentados nas imagens da Figura 14.

Figura 14 – Sistemas de protensão: (a) pré-tração com aderência, (b) pós-tração com aderência e (c) pós-tração sem aderência

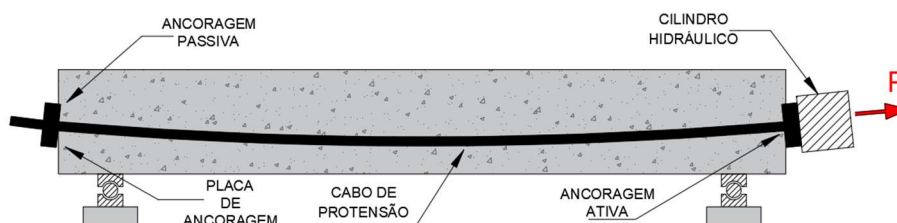


Fonte: Bastos (2021)

Em relação ao sistema aderente na pré-tração (Figura 14a), destacam-se os elementos pré-fabricados, onde a aderência entre o cabo protendido e o concreto se dá pelo contato direto entre os materiais, uma vez que o elemento é concretado com os cabos tracionados e ancorados em equipamentos externos ao elemento (pista de protensão). Já quando na protensão com aderência na pós-tração, a aderência é garantida com o preenchimento das bainhas metálicas com microconcreto (Figura 14b), e os cabos que são ancorados no próprio elemento são tracionados por atuadores hidráulicos após uma determinada cura do concreto, sendo esta aplicação comum em elementos moldados *in loco*. Já em relação ao sistema não aderente (Figura 14c), mais viável na pós-tração, o procedimento de execução é similar ao sistema aderente, porém, as bainhas plásticas são preenchidas com graxa, não havendo aderência entre o concreto e os cabos, sendo estes apenas ancorados em suas extremidades (VERÍSSIMO; CÉSAR JÚNIOR, 1998).

Destaca-se que a protensão das cordoalhas metálicas geralmente ocorre por uma das extremidades dos cabos, conforme representação da Figura 15, denominando-se tal ponto como ancoragem ativa (local de instalação do atuador ou cilindro hidráulico). Neste caso, a extremidade oposta recebe o nome de ancoragem passiva. Em alguns casos, a protensão também pode ocorrer por ambas as extremidades dos cabos.

Figura 15 – Protensão dos cabos em uma viga de concreto armado



Fonte: adaptado de Bastos (2021)

Como vantagens do concreto protendido pode-se destacar a possibilidade de projetar elementos mais leves e com seções mais esbeltas, um maior controle de deslocamentos e fissuras, melhor aproveitamento dos materiais, além de proporcionar uma maior durabilidade, uma vez que as tensões de tração no concreto são anuladas ou significativamente reduzidas devido ao estado prévio de compressão aplicado, evitando-se ou diminuindo a abertura de fissuras (VERÍSSIMO; CÉSAR JÚNIOR, 1998; BUCHAIM, 2007; VITÓRIO; BARROS, 2011; CHOLFE; BONILHA, 2018).

Como desvantagens ou fatores dificultadores pode-se destacar a exigência de um controle de execução mais rigoroso e necessidade de mão de obra mais especializada, quando comparado ao concreto armado e, também, são necessários cuidados especiais para proteção dos aços de alta resistência contra o processo de corrosão (VERÍSSIMO; CÉSAR JÚNIOR, 1998; BUCHAIM, 2007; VITÓRIO; BARROS, 2011; CHOLFE; BONILHA, 2018).

2.4.3 PERDAS DE PROTENSÃO

O dimensionamento dos elementos de concreto protendido segue as recomendações da norma NBR 6118 (ABNT, 2023), na qual são estabelecidos os critérios e requisitos para as verificações em serviço e estado limite último, definindo-se os limites de tensões para cada tipo de combinação, assim como, estabelece rotinas de cálculo para a determinação das perdas da força de protensão.

Os sistemas de protensão combinam diferentes etapas e procedimentos em sua execução tais como acionamento de cilindros hidráulicos, liberação de cabos, dispositivos de ancoragens, desviadores, transferências de esforços, entre outros, resultando em uma

diminuição da força de protensão aplicada inicialmente, a qual é comumente chamada de perdas de protensão (VITÓRIO; BARROS, 2011).

De acordo com Cholfe e Bonilha (2018, p. 133), as perdas na força de protensão devem ser previstas em projetos, as quais podem ocorrer antes da transferência da protensão ao concreto (perdas iniciais, características da pré-tração), durante a transferência (perdas imediatas) e durante a vida útil da estrutura (perdas progressivas).

As perdas iniciais dizem respeito a protensão na pré-tração e ocorrem antes da liberação do dispositivo de tração (pistas de protensão), podendo ser classificadas em: por atrito, devido a pontos de desvios (para os casos de protensão com traçado reto dos cabos este tipo de perda pode ser desprezado); por escorregamento da armadura, sendo necessário estudos experimentais ou dados fornecidos pelo fabricante para o seu cálculo; por relaxação inicial da armadura devido ao seu alongamento; e por retração inicial do concreto (CHOLFE; BONILHA, 2018).

As perdas imediatas (pós-tração) são provenientes de: atrito entre o cabo e bainha durante seu alongamento, face os desvios no traçado do cabo; acomodação ou escorregamento do cabo nas ancoragens (encunhamento); e encurtamento imediato do concreto durante a operação de protensão sucessivas de cabos (para os caso de protensão única dos cabos, este tipo de perda pode ser desprezada) (FRANÇA; ISHITANI; GRAZIANO, 2004; BUCHAIM, 2007; CHOLFE; BONILHA, 2018).

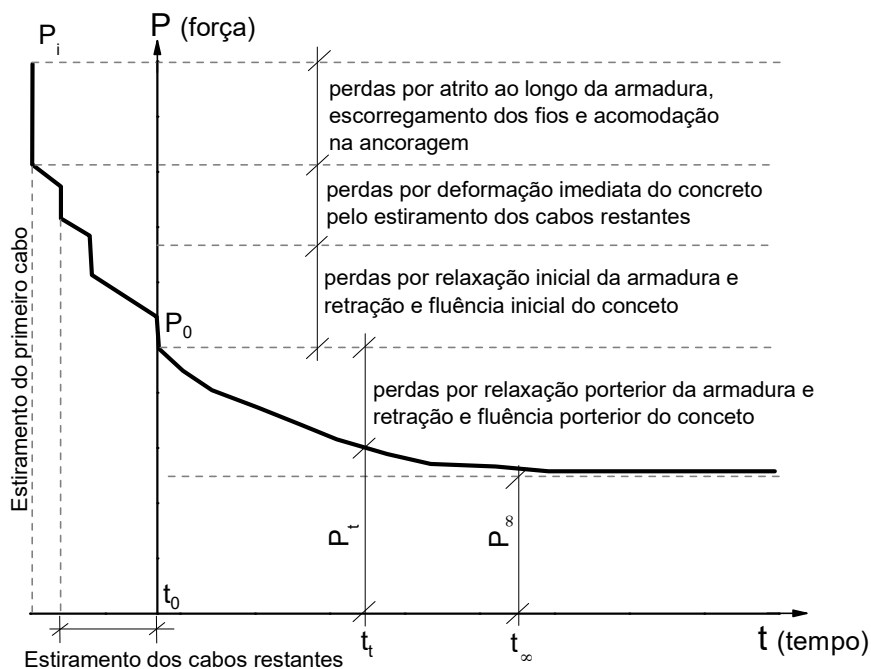
Já as perdas progressivas são provocadas pela retração e fluência do concreto e relaxação da armadura de protensão durante a vida útil da estrutura (FRANÇA; ISHITANI; GRAZIANO, 2004; BUCHAIM, 2007; CHOLFE; BONILHA, 2018).

As perdas de protensão citadas acima estão apresentadas de forma resumida no gráfico da Figura 16 considerando-se o caso de pós tração. Nota-se que a força inicial de protensão (P_i) sofre reduções devido às perdas imediatas e progressivas durante suas etapas executivas e vida útil, até atingir a força de protensão final (P_∞), a qual deve ser estimada em cálculo e considerada no dimensionamento do elemento pretendido.

Destaca-se que a determinação das perdas de protensão depende de diferentes fatores tais como a geometria do elemento, condições ambientais e comportamento dos materiais ao longo prazo. Logo, os valores de perdas obtidos por meio de equações propostas na literatura e/ou normas técnicas como a NBR 6118 (ABNT, 2023) se referem a estimativas do comportamento do sistema (CHOLFE; BONILHA, 2018).

Cholfe e Bonilha (2018, p. 168) destacam a necessidade de se determinar todas as perdas de protensão previstas em um elemento em concreto pretendido, de modo a confirmar se a força final ou remanescente é suficiente para atender aos estados-limite normativos.

Figura 16 – Perdas da força de protensão na pós-tração

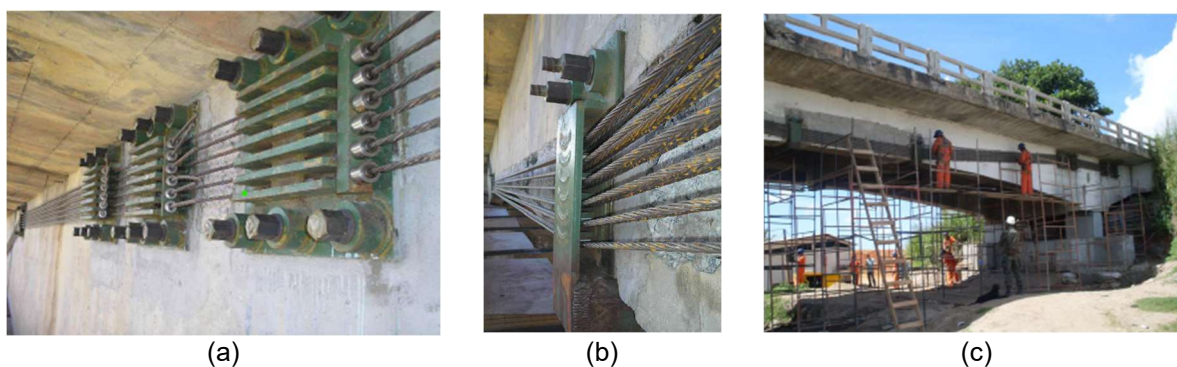


Fonte: adaptado de Bastos (2021)

2.4.4 PROTENSÃO EXTERNA COM CORDOALHAS METÁLICAS

Em relação aos sistemas de protensão sem aderência na pós-tração, pode-se destacar também a protensão externa ao elemento de concreto armado, comumente utilizado em procedimentos de reforço estrutural de estruturas existentes. Na Figura 17 são apresentadas imagens de uma ponte rodoviária reforçada pela referida técnica.

Figura 17 – Reforço com protensão externa em ponte rodoviária



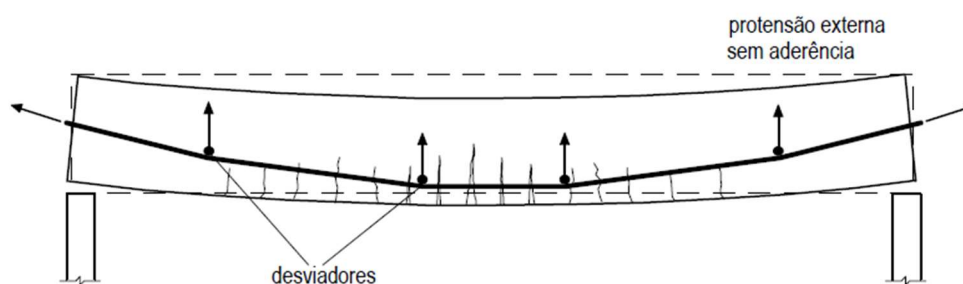
Fonte: Vitório e Barros (2011)

Na técnica de reforço com protensão externa as cordoalhas metálicas são ancoradas externamente a estrutura por meio de dispositivos metálicos de ancoragem (Figura 17a), sendo que o traçado dos cabos é executado com a utilização de desviadores (Figura 17b) e definido com base nos esforços que se desejam combater (Figura 17c). Posteriormente, os

cabos são tracionados, sendo aplicada a força de protensão no elemento reforçado (VERÍSSIMO; CÉSAR JÚNIOR, 1998; PINHEIRO, 2018).

De acordo com Veríssimo e César Júnior (1998), a definição do traçado do cabo é de fundamental importância no comportamento do elemento protendido, visto que deve ser projetado de modo a atuar no sentido oposto aos esforços solicitantes, conforme demonstrando no esquema da Figura 18.

Figura 18 – Sistema de protensão externa com cabos tracionados e utilização de desviadores



Fonte: Veríssimo e César Júnior (1998)

Em sua análise paramétrica sobre a aplicação de reforço com protensão externa em uma ponte rodoviária, Pinheiro (2018) constatou que quanto mais excêntrico o posicionamento dos desviadores em relação ao centro de gravidade da peça reforçada, maior é a eficiência do reforço. Entretanto, o referido autor destaca que a geometria e disposição do sistema de reforço depende também de questões construtivas e os raios mínimos que podem ser adotados nas curvaturas das cordoalhas.

De acordo com Vitório e Barros (2011), mesmo existindo outras técnicas de reforço estrutural, a protensão externa, além de aumentar a capacidade de carga última da estrutura reforçada, se destaca também por melhorar seu comportamento em serviço, aumentando sua rigidez, diminuindo significativamente a fissuração e deslocamentos e, a depender do traçado dos cabos, também contribui no aumento de capacidade ao esforço cortante.

Segundo Pinheiro (2018), a técnica de reforço com protensão externa com cordoalhas metálicas possui as seguintes vantagens: (i) possibilidade de combater diferentes esforços com um mesmo traçado de cabos; (ii) economias de formas e escoramentos, pois elimina a necessidade aumento de seção; (iii) pouca ou nenhuma interrupção no uso da estrutura durante sua aplicação; (iv) menores perdas de protensão por atrito por utilizar cabos sem aderência; e (v) dispensa a correção de deformações da estrutura antes da aplicação do reforço.

Já em relação às desvantagens ou dificuldades, o referido autor destaca: (i) necessidade de equipamentos e mão de obra especializados; (ii) necessidade de proteção

contra à corrosão das peças metálicas; (iii) dimensionamento complexo e pouco difundido, permitindo possíveis erros de projeto, e (iv) limitação de aplicação do sistema em estrutura com concreto com baixa resistência à compressão.

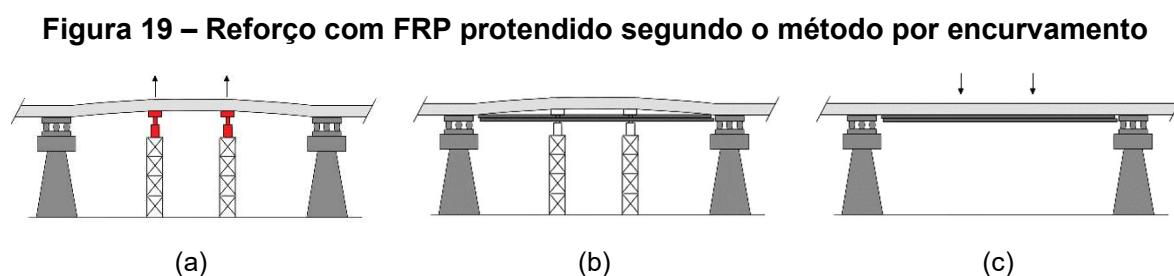
2.5 REFORÇO COM FRP PROTENDIDO

Segundo o *FIB Bulletin 90* (2019), o FRP protendido é um sistema com significativa contribuição para o desenvolvimento das técnicas de reforço com materiais compósitos. De acordo com a referida norma, as principais vantagens do sistema são: (i) maior rigidez do elemento reforçado face ao estado prévio de tensão aplicado na protensão, contribuindo para uma maior momento fletor resistente; (ii) aumento da capacidade à fissuração; (iii) capacidade de fechar fissuras pré-existentes em estruturas; (iv) melhoria das condições de serviço e durabilidade devido à redução de fissuras na estrutura; (v) aumento da capacidade ao esforço cortante; e (vi) ocupação da mesma área de um reforço passivo com FRP.

O reforço estrutural com laminado de FRP protendido é uma combinação das técnicas de reforço passivo EBR e dos conceitos do concreto protendido, em especial, a protensão externa, possuindo a capacidade de atuar diretamente no sentido oposto de cargas permanentes e melhorar o comportamento em serviço do elemento reforçado, podendo reduzir fissuras e deslocamentos pré-existentes (ZHANG; DENG; LIAO, 2013; AZEVEDO, 2015; MICHELS *et al.*, 2015). A seguir são apresentados os principais aspectos do referido sistema.

2.5.1 MÉTODOS DE REFORÇO COM FRP PROTENDIDO

Existem diferentes métodos para aplicar protensão em sistemas de reforço com FRP em uma estrutura de concreto armado (MICHELS *et al.*, 2015; CORREIA, 2018). Nas Figuras 19a-c são apresentadas as etapas da aplicação de reforço protendido segundo o método conhecido na literatura como *cambered prestressing systems*, em língua inglesa, o qual no presente trabalho receberá o nome de método por encurvamento.

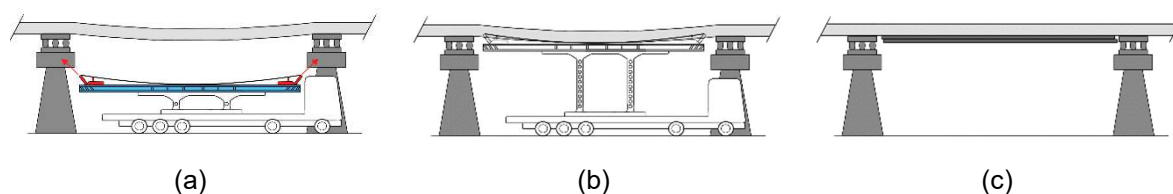


Fonte: adaptado de Correia (2018)

Conforme o apresentado na Figura 19a, o elemento a ser reforçado é encurvado (aplicação de contra-flecha) no sentido oposto de seu deslocamento natural e carregamentos atuantes com o auxílio de atuadores hidráulicos, sendo nesta condição aplicado o FRP somente por meio de colagem (Figura 19b). Após a cura do material de reforço, os atuadores hidráulicos são removidos e o FRP é indiretamente protendido com o deslocamento natural do elemento, Figura 19c (MICHELS *et al.*, 2015; CORREIA, 2018). Wang *et al.* (2012) destacam que, em situações reais, o encurvamento de elementos estruturais pode não se mostrar como uma alternativa prática.

Na Figura 20 é apresentada a sequência de execução de um segundo método de reforço com FRP protendido, o qual utiliza-se de estrutura externa ao elemento reforçado. Neste método, o FRP é protendido em ancoragens e suportes totalmente externos ao elemento reforçado (Figuras 20a-b) e, após a colagem ao substrato e cura do FRP (na condição protendida), a ancoragem externa é removida e a força de protensão é transferida ao concreto somente pelo próprio FRP, tal como o indicado na Figura 20c (MICHELS *et al.*, 2015; CORREIA, 2018).

Figura 20 – Reforço com FRP protendido segundo o método com o uso de estruturas externas



Fonte: adaptado de Correia (2018)

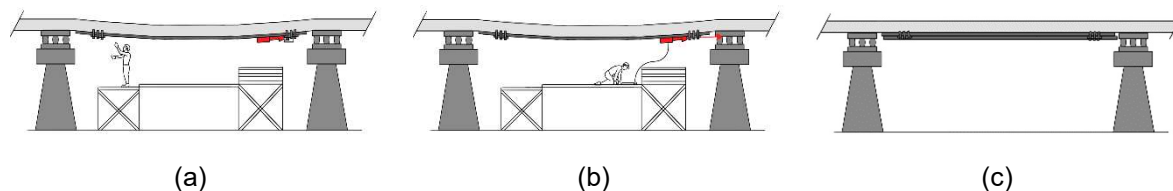
De acordo com Garcez (2007, p. 85), a ausência de sistemas de ancoragem permanente nas extremidades do laminado de FRP protendido, fixadas ao elemento reforçado, limita o nível de protensão que pode ser aplicado no material de reforço, visto facilitar modos de ruptura caracterizados por destacamento do laminado em suas extremidades face às altas concentrações de tensões de cisalhamento atuantes entre os materiais envolvidos.

Na Figura 21 é apresentado o método com o uso de ancoragens permanentes fixadas ao elemento reforçado. Trata-se do sistema mais comum e prático, adotado em sistemas de reforço com FRP protendido, o qual será objeto e foco da presente pesquisa.

Conforme o apresentado na Figura 21a, o laminado é fixado ao substrato em suas extremidades por meio de sistemas de ancoragem, os quais atuam como pontos de reações durante a aplicação da força de protensão com o uso de atuadores hidráulicos, formando de um lado uma ancoragem passiva e do outro uma ancoragem ativa (Figura 21b). Após a devida colagem ao substrato do FRP, os dispositivos temporários de protensão são removidos,

restando apenas as ancoragens definitivas do sistema (Figura 21c) (MICHELS *et al.*, 2015; CORREIA, 2018).

Figura 21 – Reforço com FRP protendido segundo o método com o uso de ancoragens fixadas ao elemento reforçado

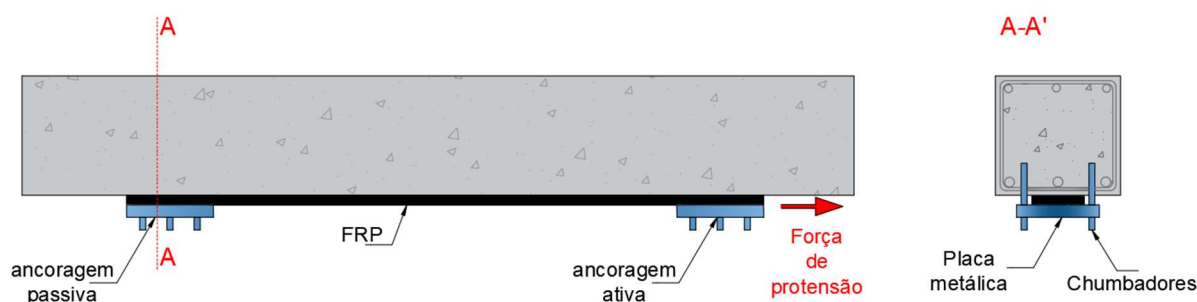


Fonte: adaptado de Correia (2018)

De forma resumida, a protensão externa de elementos estruturais com FRP se divide nas seguintes etapas: (i) preparação do substrato; (ii) instalação de sistemas de ancoragem; (iii) fixação nos pontos de ancoragens e colagem do FRP ao substrato; (iv) aplicação da força de protensão no FRP; e (v) transferência da força de protensão ao elemento reforçado.

Na Figura 22 é apresentada, de forma mais detalhada, um esquema de uma viga de concreto armado reforçada à flexão com laminado de FRP protendido, com a utilização de ancoragem mecânica permanentes fixadas ao elemento reforçado. Nota-se na referida Figura que, além de colado ao substrato, o laminado de FRP também é fixado em suas extremidades por meio de ancoragens ativas e passivas com a utilização de placas e chumbadores metálicos, condição que permite a aplicação da força de protensão prevista em projeto. De acordo com Peng *et al.* (2016) tal sistema de ancoragem é imprescindível para evitar o destacamento precoce do material de reforço, visto que a protensão resulta em tensões elevadas na interface concreto/FRP, principalmente nas extremidades do material.

Figura 22 – Representação de uma viga reforçada com FRP protendido com uso de ancoragens mecânicas



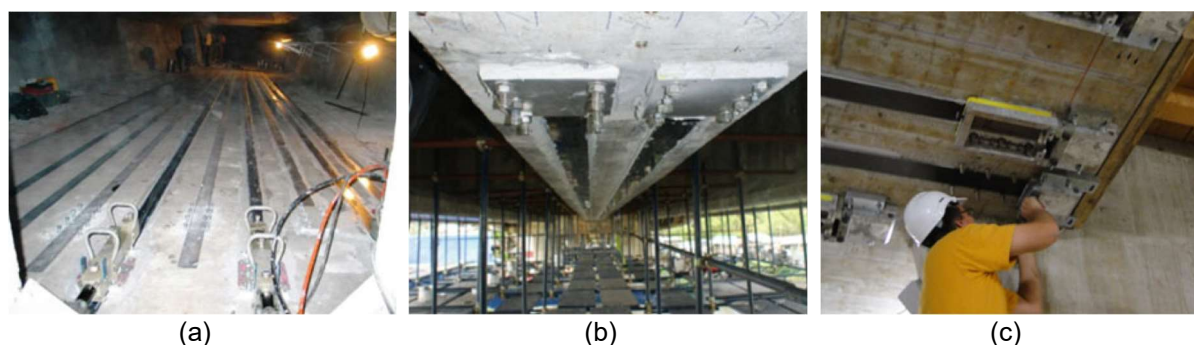
Fonte: Adaptado de Correia (2018)

Entre os três métodos de protensão com FRP acima apresentados, o terceiro se apresenta como o mais conveniente para aplicações práticas, uma vez que demanda equipamentos menores e mais leves, utiliza o próprio elemento para aplicação da força de

protensão, resultando em maiores níveis de protensão do FRP. Em relação ao primeiro método apresentado, o nível de protensão do FRP não é tão efetivo, enquanto o segundo método é mais utilizado em estudos experimentais (WANG *et al.*, 2022). Wang *et al.* (2012) destacam que a utilização de ancoragens mecânicas, como as apresentadas na Figura 22, contribuem para um melhor aproveitamento do FRP, podendo o modo seu modo de ruptura passar de descolamento para ruptura total ou parcial do material de reforço.

A técnica com FRP protendido já possui aplicações práticas em reforço de estruturas existentes tais como pontes, viadutos e edificações. Na Figura 23 são apresentadas aplicações do sistema em duas pontes e em um edifício comercial, respectivamente, sendo que na Figura 23a é apresentada uma vista geral do sistema, na Figura 23b um detalhe da ancoragem passiva, e na Figura 23c um detalhe da ancoragem ativa, onde o atuador hidráulico é posicionado para aplicação da força de protensão no FRP.

Figura 23 – Aplicações práticas de sistemas de protensão externa com laminado de FRP



Fonte: Michels *et al.* (2015)

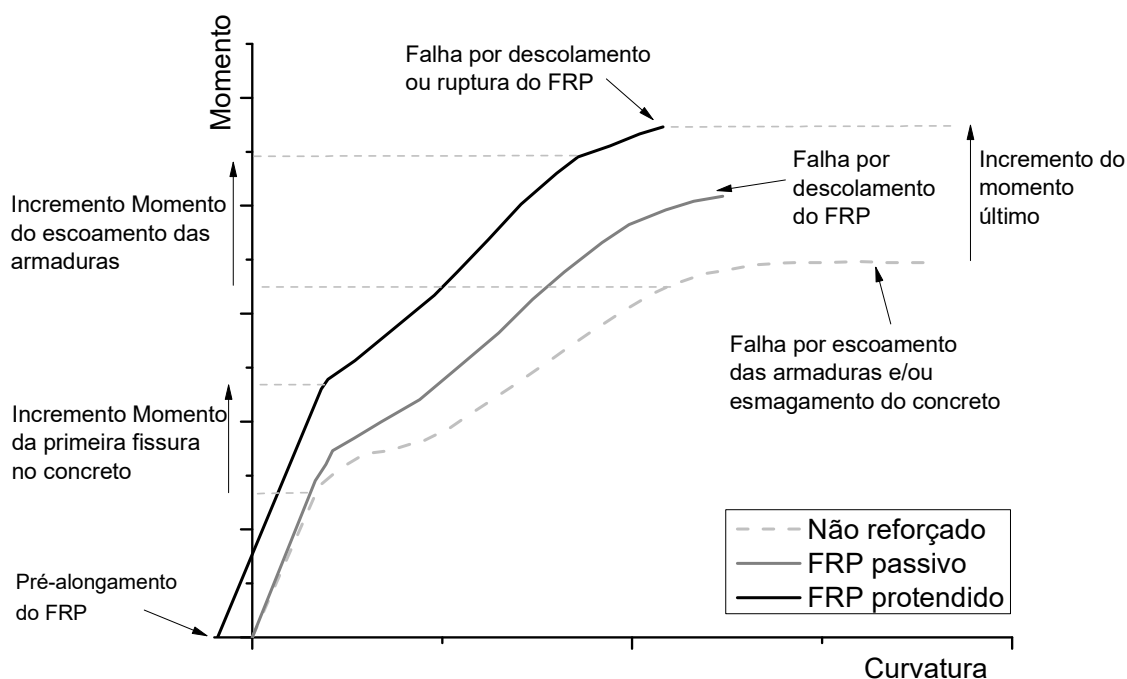
2.5.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO FRP PROTENDIDO

Os principais aspectos positivos do desempenho estrutural da técnica de reforço com FRP protendido são destacados por Michels *et al.* (2015) por meio de diagrama momento-curvatura, no qual são comparados os comportamentos de elementos de concreto armado não reforçado e reforçados com FRP passivo e protendido (Figura 24).

De acordo com os referidos autores, com a aplicação de um pré-alongamento no FRP por meio da protensão, é possível obter-se uma maior rigidez à flexão e consideráveis incrementos da capacidade à fissuração do elemento reforçado, quando comparado com o elemento de referência não reforçado. A mesma condição ocorre para a capacidade de escoamento das armaduras e capacidade última dos elementos. Ainda, enquanto no FRP passivo comumente se observa a ruptura do elemento pelo destacamento do material de reforço, com o FRP protendido o material pode falhar por sua ruptura uma vez que, além de

colado, o material de reforço está fixado ao elemento reforçado pelas ancoragens em suas extremidades.

Figura 24 – Diagrama momento-curvatura de elementos não reforçado e reforçado com FRP passivo e protendido



Fonte: adaptado de Michels *et al.* (2015)

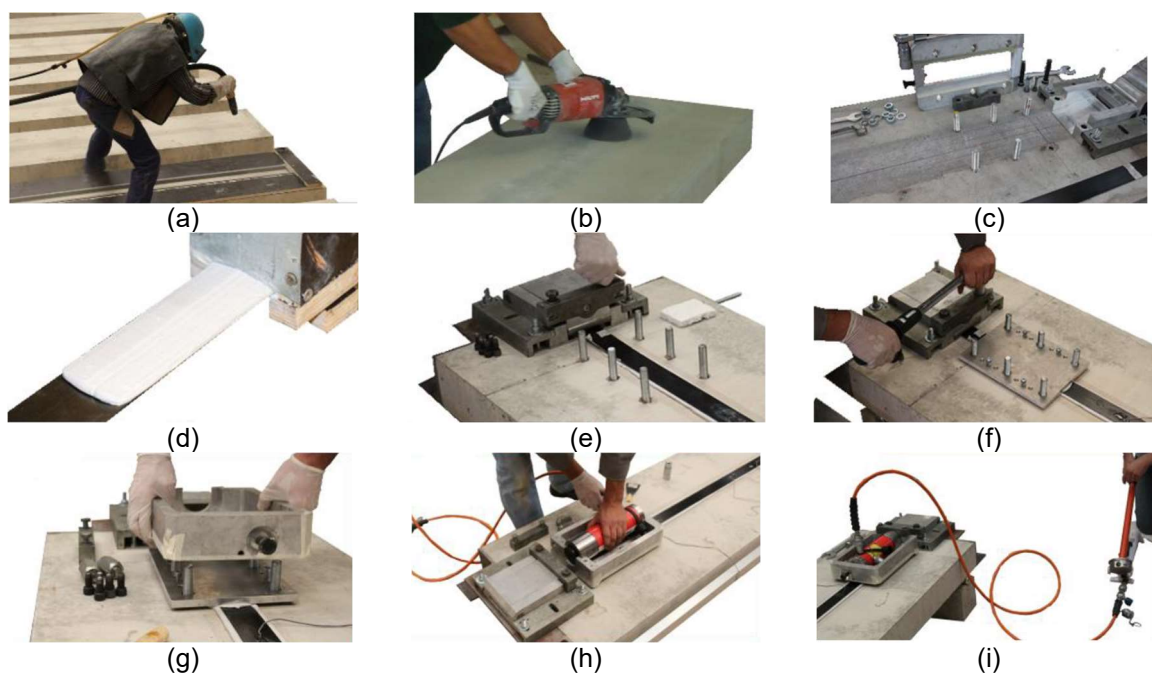
Já em relação às desvantagens dos sistemas de reforço com laminados de FRP protendidos, pode-se destacar: (i) trata-se de uma técnica mais onerosa e complexa quando comparada com as técnicas tradicionais de colagem externa passiva, como a EBR e NSM; e (ii) devido ao grande número de operações e equipamentos requeridos, sua aplicação demanda mais tempo de execução (FIB BULLETIN 90, 2019).

2.5.3 TÉCNICAS DE REFORÇO COM FRP PROTENDIDO

Existem diferentes sistemas de protensão com laminados de FRP propostos na literatura e disponíveis no mercado, os quais variam o tipo e geometria do FRP utilizado, tipo de ancoragem e sistema de encunhamento, assim como o processo de instalação e aplicação da força de protensão no laminado. Entre os possíveis tipos de ancoragem propostos, pode-se destacar a ancoragem mecânica (MA, *mechanical anchorage*, em língua inglesa) e a ancoragem por gradiente de esforços (GA, *gradient anchorage*, em língua inglesa)

As principais etapas para a aplicação de um sistema de reforço em estrutura de concreto armado com a utilização de laminados de FRP protendidos com o uso de ancoragens mecânicas (MA) são apresentadas na Figura 25, onde utilizou-se de um sistema comercialmente disponível aplicado em faixas de laje de concreto armado (CORREIA, 2018).

Figura 25 – Etapas da aplicação de um sistema de reforço com FRP protendido com o uso de ancoragens mecânicas



Fonte: Correia (2018)

A primeira etapa refere-se à preparação da superfície do substrato do elemento a ser reforçado com o uso de esmerilhadeira com disco de pedra ou jato de areia para a devida remoção da camada superficial de nata de cimento, de forma a expor os agregados (Figuras 25a-b), uma vez que o laminado de FRP, além de protendido, também será colado ao elemento de concreto armado. Destaca-se que, por se tratar de trabalho experimental em laboratório, as referidas faixas de laje tiveram suas faces inferiores invertidas para facilitar a execução do sistema de reforço.

Numa segunda etapa são instalados os chumbadores permanentes e temporários (que podem ser do tipo mecânico ou químico), e os dispositivos metálicos responsáveis por prender o laminado de FRP em suas extremidades (Figura 25c). Posteriormente, é aplicada a resina epóxi no laminado de FRP (Figura 25d). Destaca-se que a resina deve ser preparada respeitando-se as recomendações do fabricante e o laminado de FRP deve ser limpo. A resina é aplicada no laminado, resultando em uma camada de resina com no mínimo de 2mm de espessura, sendo o laminado pressionado ao substrato após seu posicionamento na área previamente preparada.

Em uma quarta etapa, o laminado é posicionado no substrato e fixado no dispositivo móvel de ancoragem em sua extremidade (Figura 25e). Na sequência, Figura 25f, a placa metálica é posicionada sobre o laminado, esta que deve ter sua face em contato com o laminado ligeiramente lixada e limpa com solvente, e com o auxílio de torquímetro de estalo,

um torque de 170 N·m é aplicado nos chumbadores do dispositivo móvel, de modo prender por confinamento a extremidade do laminado de FRP.

Já na Figura 25g são apresentadas as etapas de instalação do suporte metálico temporário para o posicionamento do cilindro hidráulico. Por fim, é aplicada a força de protensão com o auxílio de uma bomba hidráulica, sendo monitorada a deformação aplicada no laminado até se atingir o alongamento previsto no dimensionamento e projeto (Figura 26i).

Com a utilização de parafusos adicionais é possível travar o posicionamento do dispositivo móvel para garantir a cura do adesivo na condição pretendida e assim liberar o cilindro hidráulico. Um torque de 150 N·m é aplicado nos chumbadores da placa metálica de modo a pressionar o laminado ao substrato. Após 24 horas da realização das etapas detalhadas acima, para condições de temperatura superiores a 20°C, os dispositivos metálicos temporários e o excesso de chumbadores são removidos (CORREIA *et al.*, 2015).

Um outro tipo de ancoragem é destacada na literatura, a ancoragem por gradiente de esforços (GA), cujas etapas finais são apresentadas na Figura 26 (AZEVEDO, 2015; CORREIA *et al.*, 2015; SENA-CRUZ *et al.*, 2017; CORREIA, 2018).

Figura 26 – Etapas da aplicação de um sistema de reforço com FRP protendido com o uso de ancoragens por gradiente



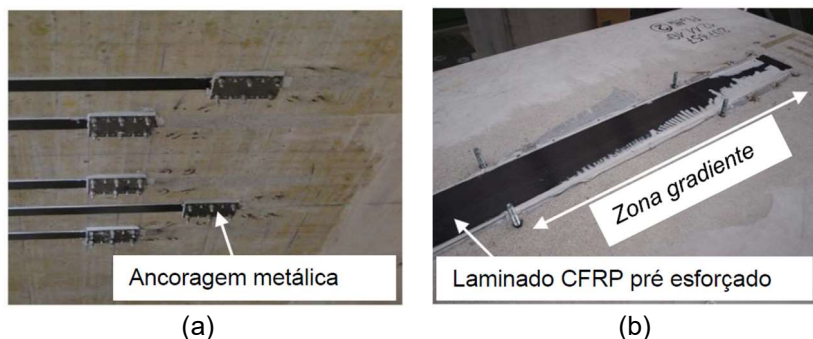
Fonte: Correia (2018).

Em tal técnica, para o programa experimental realizado por Correia (2018), um comprimento de 600 mm foi utilizado na zona de gradiente, a qual foi dividida em três trechos de 200 mm (Figura 26a). Em cada trecho foi aplicada um terço da força de protensão prevista em projeto e, com o auxílio de um dispositivo de aquecimento, a resina foi submetida a um ciclo de temperatura com aquecimento de 160°C por 15 minutos e resfriamento por 20 minutos (Figura 26b). O aquecimento do trecho seguinte começou 10 minutos após o início do resfriamento do trecho anterior.

O objetivo da ancoragem por gradiente de esforços é promover uma cura rápida da resina com a protensão aplicada por etapas, dispensando o uso de ancoragens mecânicas definitivas. Entretanto, conforme o apresentado na Figura 26b, nota-se a necessidade de utilizar chumbadores e dispositivos móveis em quantidade similar ao do sistema de protensão com ancoragens metálicas para a aplicação da força de protensão antes do processo de

colagem e cura por gradientes. Na Figura 27 são apresentados os aspectos finais dos sistemas de ancoragem mecânica e por gradientes.

Figura 27 – Sistema de ancoragem mecânica e por gradientes



Fonte: Azevedo (2015)

Diferentes tipos de ancoragem em sistemas de reforço com FRP protendido, sejam mecânicos ou por gradiente de esforços, são propostos na literatura (WOO; KIM; BYUN, 2012; LIU; PENG; CAI, 2015; ALVES, 2015; CORREIA *et al.*, 2015; GAO; GU; MOSALLAM, 2016; HONG; PARK, 2017; LIU *et al.*, 2021; PESSI, 2022; WANG *et al.*, 2022). Entretanto, todos seguem os mesmos conceitos de execução das ancoragens MA e GA descritas acima, variando-se os formatos dos dispositivos de ancoragem, sistema de encunhamento do laminado e equipamentos utilizados.

Embora exista um histórico de aplicações práticas do sistema de reforço com FRP protendido, assim como diversas vantagens já detalhadas na literatura, diferentes autores destacam a necessidade de avançar no conhecimento sobre este tipo de sistema de reforço, sendo ainda necessário validar modelos de dimensionamento, avaliar sua durabilidade e desenvolver diferentes técnicas de protensão e sistemas de ancoragem dos laminados (ZHANG; DENG; LIAO, 2013; CORREIA *et al.*, 2015; MICHELS *et al.*, 2015).

2.6 COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADOS À FLEXÃO COM LAMINADOS DE FRP PASSIVOS E PROTENDIDOS

A seguir são apresentados diferentes estudos que analisaram o comportamento estrutural de elementos de concreto armado reforçados à flexão com FRP passivo e protendido, descrevendo-se os procedimentos adotados e os principais resultados obtidos por cada autor ou grupo de pesquisa. Na Tabela 2 são apresentados, de forma resumida, os principais dados e características dos programas experimentais analisados neste item.

Tabela 2 – Resumo dos dados dos programas experimentais analisados

| Programa experimental | País | Tipo de elemento | Dimensões elemento (cm) ¹ | | | | | f_{ck} (MPa) | Armaduras (mm) | | | | FRP | | | | Reforço passivo | Reforço protendido | | Ensaio à flexão | | | |
|------------------------------|---------------|------------------|--------------------------------------|----|----|----|-----|----------------|------------------------|----------|---------------|---------------------------|------------------|----------------------------------|---------------------|--------------------|-----------------|------------------------------|---------------------------------------|-------------------|------------------|----------------|--------------------------------------|
| | | | b | h | m | a | c | | Inferior | Superior | Estribo | Tensão última do aço | Tipo e material | Geometria (mm ³) | Tensão última (MPa) | Deform. última (%) | | Resina | Nível de protensão no FRP | Tipo de ancoragem | Quant. de pontos | Vão livre (cm) | Dist. pontos de aplic. da força (cm) |
| Correia <i>et al.</i> (2015) | Portugal | Lajes | 60 | 12 | | | 260 | 40/53 | 5 Ø8 | 3 Ø6 | Ø6 c/30 | 593 a 699 | Laminado de CFRP | (1,2x50/1,4x50/1,4x80)x2200 | 2375; 2944 | N.I. ² | Epóxi | EBR | 0,4 %, deform. imposta | MA e GA | 4 | 240 | 60 |
| Wang <i>et al.</i> (2022) | China | Vigas | 35 | 50 | 50 | 10 | 600 | 26,8 | 2 Ø22 e 1 Ø25 | 5 Ø10 | Ø8 c/12 ou 15 | 612 a 677 | Laminado de CFRP | (1,4x100; 2,0x100 e 2,0x50)x4000 | 2625, 2516 e 1838 | 1,7; 1,6 e 1,6 | Epóxi | EBR, com ancoragem mecânicas | 30 e 50 % da tensão última | MA | 4 | 560 | 100 |
| Garcez (2007) | Brasil | Vigas | 100 | 22 | | | 650 | 44 | 7 Ø12 | 7 Ø8 | Ø8 c 9 | 622 e 688 | Laminado de CFRP | (1,2x50; 0,6x50) | 2235 e 2800 | 1,5 e 1,7 | Epóxi | EBR | 35 e 43 % da deform. última | GA | 6 | 600 | 120 |
| Wang <i>et al.</i> (2012) | China | Vigas | 15 | 30 | | | 200 | 52,8 | 2 Ø14 | 2 Ø4 | Ø8 c/5 ou 10 | 335 | Laminado de CFRP | (0,167x14)x150 | 3522 | N.I. ² | Epóxi | EBR | 36, 40, 50 e 60 % da tensão última | MA | 4 | 180 | 60 |
| Woo, Kim e Byun (2012) | Coreia do Sul | Vigas | 40 | 22 | | | 330 | 20,6 a 44,1 | 3 Ø10, Ø13, Ø16 ou Ø19 | 2 Ø10 | Ø10 c 15 | 626, 622,2, 732,1 e 683,1 | Laminado de CFRP | (50x1,4)x2640 | 2850 | 1,2 | Epóxi | EBR | 0,4; 0,6, 0,7 e 0,8 % deform. imposta | MA | 4 | 300 | 60 |
| Alves (2015) | Portugal | Lajes | 12 | 60 | | | 260 | 39,9 | 4 Ø8 | 3 Ø6 | Ø6 c/30 | 651,4 e 679,9 | Laminado de CFRP | (1,4x20)x2200 | 2770,1 | 1,58 | Epóxi | - | 20 e 40 % da tensão última | NSM | 4 | 240 | 60 |

Continuação...

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---------------|-------|----|----|----|----|-------------------|-------------|-------|--------|------------------|----------------|--------------------------|--------------------------------|------------------|-------------------|-------|-----|---|---------|-------|-----------------|------------|
| Gao, Gu e Mosallam (2016) | China | Vigas | 15 | 30 | | | 260 | 19,8 a 33 | 2 Ø14 | 2 Ø14 | Ø8 c/10 | 510 | Laminado de CFRP | 0,111x(80, 120 ou 150)x2200 | 4286 | 1,64 | Epóxi | EBR | 0,21; 0,27, 0,33 e 0,43 % deform. imposta | MA | 4 | 240 | 80 |
| Peng <i>et al.</i> (2016) | China | Vigas | 16 | 40 | 40 | 10 | 500 | 42,3 | 2 Ø20 | 4 Ø10 | Ø10 c/10 | 389 | Laminado de CFRP | 1,4x100 x3600 | 2800 | 1,69 | Epóxi | EBR | 1000 MPa, tensão imposta | MA | 4 | 480 | 60 |
| Hong & Park, (2017) | Coreia do Sul | Vigas | 20 | 30 | | | 270 480 630 | 16,4 | 2 Ø10 | 2 Ø13 | Ø10 c/10 | 466 e 475 | Laminado de CFRP | 1,3x50x (2400, 4000 ou 5500) | 2350 | 1,36 | Epóxi | EBR | 20, 40 e 60 % da tensão última | MA | 3 e 4 | 240, 450 ou 600 | 245 ou 300 |
| Sena-Cruz <i>et al.</i> (2017) | Portugal | Lajes | 12 | 60 | | | 260 | 40,2 a 50,2 | 5 Ø8 | 3 Ø6 | Ø6 c/30 | 593 a 699 | Laminado de CFRP | (1,2x50/1,4 x50/ 1,4x80) x2200 | 2944 | N.º | Epóxi | EBR | 0,4 %, deform. imposta | MA e GA | 4 | 240 | 60 |
| Liu <i>et al.</i> (2021) | China | Vigas | 35 | 35 | 50 | 10 | 520 | 23,3 | 2 Ø20 | 5 Ø10 | Ø10 c/12,5 ou 15 | 626, 562 e 571 | Laminados de BFRP e CFRP | (2 ou 5)x50 x4800 | 312, 1339 e 1367 | 1,91, 2,56 e 2,42 | Epóxi | EBR | 35, 45 e 55 % da tensão última | MA | 4 | 500 | 110 |
| Deng <i>et al.</i> (2021) | China | Vigas | 16 | 30 | | | 280 | 63,3 | 2 Ø20 | 2 Ø20 | Ø10 c/10 | 540 e 560 | Laminado de CFRP | 3x50x1300 | 2450 | 1,64 | Epóxi | EBR | 20 e 40 da tensão última | MA | 3 | 260 | - |
| Pessi (2022) | Brasil | Vigas | 12 | 20 | | | 150 | 22,08 | 2 Ø10 | 2 Ø6,3 | Ø6,3 c/7 | N.I. | Laminado de CFRP | 1,4x50 x1300 | 3100 | 1,4 | Epóxi | EBR | 4,61 % da tensão última | "U" | 4 | 46,67 | 140 |

Nota 1: (b) largura; (h) altura; (m) mesa; (a) altura da mesa; (c) comprimento

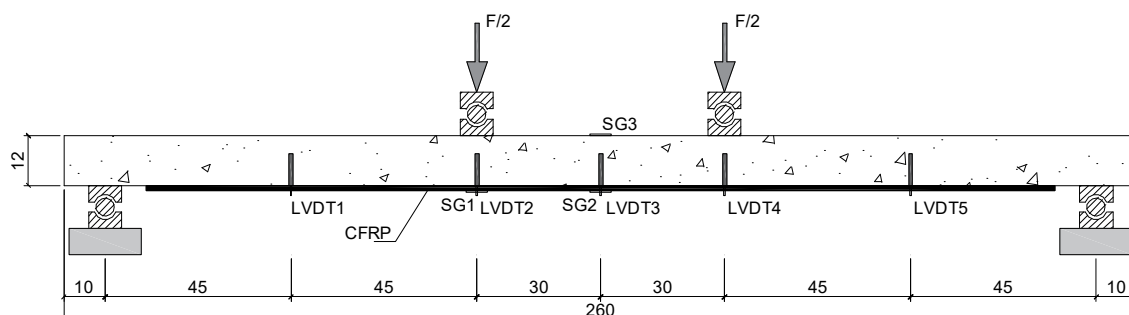
Nota 2: (N.I) Não informado no estudo analisado

2.6.1 ESTUDO CONDUZIDO POR CORREIA ET AL. (2015)

Um primeiro estudo que merece destaque, por tratar de maneira ampla e orientativa o tema, foi desenvolvido por Correia *et al.* (2015), os quais realizaram programa experimental com faixas de laje de concreto armado nas condições não reforçadas e reforçadas com laminado de CFRP passivo e protendido com o objetivo de avaliar a influência da aplicação da protensão no laminado, do tipo de sistema de ancoragem adotado, das dimensões do laminado e do modo de preparação do substrato no comportamento à flexão dos elementos avaliados.

Na Tabela 2 estão indicadas as principais características dos materiais utilizados no programa experimental realizado por Correia *et al.* (2015), enquanto a Figura 28 apresenta o esquema de ensaio à flexão por quatro pontos e instrumentação adotada pelos referidos autores, os quais utilizaram de 5 transdutores de deslocamento variável linear (LVDT) e 3 extensômetros (SG), sendo dois destes instalados no laminado de CFRP e um na face superior do concreto.

Figura 28 – Esquema de ensaio à flexão e instrumentação das lajes adotado por Correia *et al.* (2015) (dimensões em cm)



Fonte: adaptado de Correia *et al.* (2015)

Os referidos autores executaram ensaio em doze lajes, sendo que oito tiveram suas superfícies preparadas com esmerilhadeira com disco de pedra previamente a aplicação do reforço com laminado de CFRP (denominadas como série S1), e as quatro restantes preparadas com jato de areia (denominadas série S2). Em ambos os casos, o objetivo era remover a camada de cimento frágil e expor os agregados para melhorar a aderência entre o material de reforço e o substrato do elemento reforçado.

Ainda, das doze lajes, três lajes serviram de referência (não reforçadas) e para cada tipo de preparação do substrato, uma laje foi reforçada pela técnica EBR de forma passiva com laminado de CFRP. As demais lajes foram reforçadas com o laminado de CFRP protendido, variando-se as dimensões do laminado e o método de ancoragem: ancoragem mecânica (MA) ou por gradiente de esforços (GA).

Os autores utilizaram de laminados de CFRP com diferentes seções transversais (50x1,2; 50x1,4 e 80x1,2 mm²) e comprimento efetivo de 2200 mm, os quais, por meio de ensaios de caracterização, apresentaram tensões últimas entre 2375 e 2944 MPa. A resina utilizada é do tipo epóxi, bicomponente, livre de solventes, com comportamento tixotrópico em estado fresco.

Para identificação das lajes ensaiadas, Correia *et al.* (2015) adotaram a nomenclatura X_LY_Z, onde X refere-se ao tipo de preparação do substrato (séries S1 e S2), Y a seção transversal do laminado em mm² (50x1.4, 50x1.2 ou 80x1.4) e Z o tipo de ancoragem ou reforço (MA, GA ou EBR, este último para o caso do reforço passivo).

A etapas de execução e sistema de reforço protendido adotado por Correia *et al.* (2015) são as mesmas apresentadas no item 2.5.3 deste Capítulo, sendo adotado pelo autores uma deformação imposta no laminado de CFRP da ordem de 4 ‰ no ato da protensão, a qual foi monitorada com os extensômetros instalados no mesmo, conforme esquema apresentado na Figura 28. Destaca-se que na ancoragem mecânica adotada a fixação do laminado se dá pelo confinamento devido ao uso de placas metálicas.

Na Tabela 3 são resumidos os principais resultados obtidos pelos referidos autores, tais como capacidade de carga no momento da fissuração do concreto (F_{cr}), no escoamento das armaduras (F_y) e a capacidade última (F_u) das faixas de laje ensaiadas, sendo η percentual referente ao incremento de capacidade em relação à laje de referência não reforçada da correspondente série.

Tabela 3 – Resumo dos principais resultados

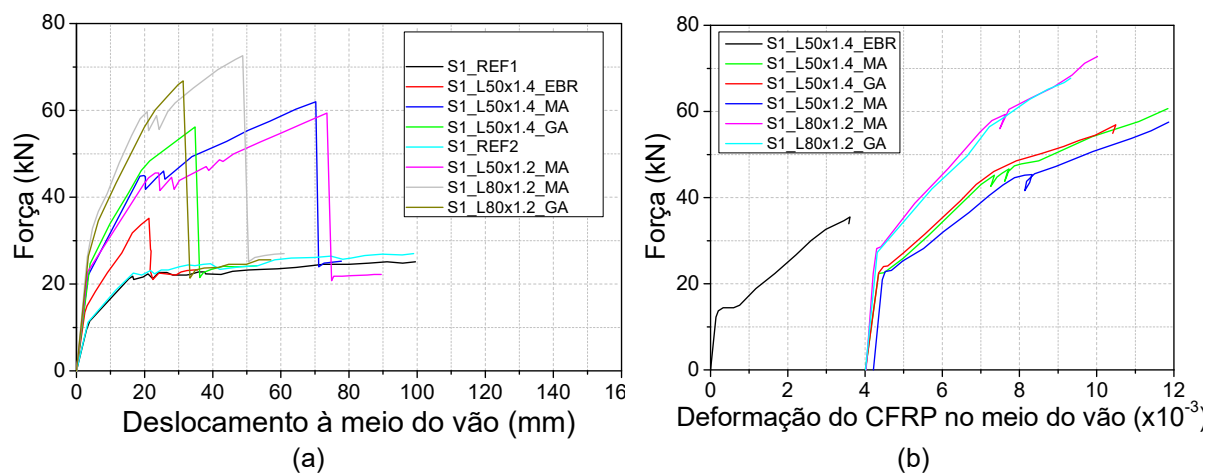
| Laje | Cargas, deslocamentos verticais e incrementos de capacidade | | | | | | | | |
|----------------|---|-----------------------|--------------------|---------------|--------------------|-----------------|---------------|--------------------|-----------------|
| | F_{cr} (kN) | δ_{cr} (mm) | η_{cr} (%) | F_y (kN) | δ_y (mm) | η_y (%) | F_u (kN) | δ_u (mm) | η_u (%) |
| S1_REF1 | 11,04 | 2,47 | - | 21,50 | 15,74 | - | 25,42 | 100,02 | - |
| S1_L50x1.4_EBR | 14,73 | 1,64 | 33 | 33,30 | 17,00 | 55 | 35,06 | 20,47 | 38 |
| S1_L50x1.4_MA | 22,07 | 2,25 | 100 | 44,32 | 17,80 | 106 | 61,76 | 69,84 | 143 |
| S1_L50x1.4_GA | 23,84 | 2,25 | 116 | 48,35 | 18,86 | 125 | 56,02 | 34,39 | 120 |
| S1_REF2 | 11,12 | 2,49 | - | 22,90 | 15,96 | - | 26,94 | 100,00 | - |
| S1_L50x1.2_MA | 22,81 | 2,53 | 105 | 44,89 | 20,57 | 99 | 59,09 | 73,23 | 119 |
| S1_L80x1.2_MA | 28,71 | 2,51 | 158 | 58,67 | 18,43 | 156 | 72,58 | 48,62 | 169 |
| S1_L80x1.2_GA | 28,56 | 2,88 | 157 | 58,31 | 20,31 | 155 | 66,21 | 30,61 | 146 |
| S2_REF | 7,88 | 0,71 | - | 24,54 | 18,90 | - | 28,07 | 100,00 | - |
| S2_L50x1.2_EBR | 8,49 | 0,68 | 8 | 37,05 | 25,87 | 51 | 43,98 | 40,69 | 57 |
| S2_L50x1.2_MA | 17,87 | 1,82 | 127 | 50,58 | 26,88 | 106 | 67,46 | 84,78 | 140 |
| S2_L50x1.2_GA | 16,16 | 1,55 | 105 | 50,20 | 29,04 | 105 | 57,38 | 43,31 | 104 |

Fonte: Adaptado de Correia *et al.* (2015)

Na Figura 29 são apresentados os diagramas Força *versus* deslocamento e Força *versus* deformação no CFRP das lajes da série S1. Os autores constataram que as lajes reforçadas com FRP (passivo e protendido) apresentaram comportamento similares em seu

regime elástico e aumento da rigidez à flexão após a fissuração do concreto, resultando em incrementos de F_{σ} , F_y e F_u , quando comparada com a laje de referência não reforçada (Figura 29a).

Figura 29 – Diagramas de força versus deslocamento e deformação do CFRP da série S1



No que diz respeito ao reforço passivo segundo à técnica EBR, Correia *et al.* (2015) constataram incrementos de F_{σ} , F_y e F_u da ordem de 33 %, 55 % e 38 %, respectivamente, quando comparada com a laje de referência não reforçada. Os referidos autores observaram redução da ductilidade da viga com a aplicação do reforço passivo, que se dá pelo descolamento brusco do FRP do substrato quando a laje atinge sua F_u . Também se observou uma deformação máxima no laminado de CFRP de 4,64 ‰ (Figura 29b).

Já em relação ao reforço com o uso de laminado de CFRP protendido de seção 50x1,4mm² e ancoragem do tipo MA, foram obtidos incrementos de F_{σ} , F_y e F_u da ordem de 100 %, 106 % e 143 %, respectivamente, quando comparados com a laje de referência não reforçada, enquanto com a ancoragem do tipo GA, incrementos de 116 %, 125% e 120%, respectivamente, foram obtidos. Com o laminado de seção 80x1,2 cm², tais incrementos foram ainda maiores, da ordem de 160 %, 156 % e 169 % para a ancoragem MA e 157 %, 155 % e 156 % para a ancoragem GA, respectivamente, o que se dá pela maior área transversal do material, a qual também demandou maiores forças de protensão. Os referidos autores observaram deformações máximas no laminado de CFRP de 11,97 ‰ e 10,29 ‰ para as ancoragens MA e GA, respectivamente.

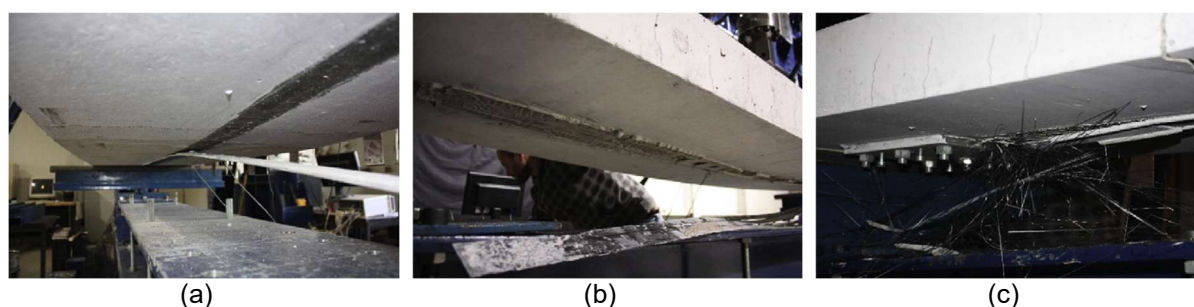
Correia *et al.* (2015) constataram que a protensão do laminado de CFRP resulta em melhora significativa do comportamento a flexão das lajes em relação ao reforço passivo, aperfeiçoando sua ductilidade e rigidez à flexão, assim como, postergando o surgimento da

primeira fissura no concreto e escoamento das armaduras, resultando em incrementos consideráveis na capacidade última das lajes, conforme demonstrado na Figura 29a.

Analisando-se a Figura 29b, Correia *et al.* (2015) também observaram que as deformações finais atingidas no laminado de CFRP protendidos da ordem de 12 ‰, as quais são significativamente superiores às atingidas com o reforço passivo, onde valores da ordem de 4,6 ‰ foram registrados, confirmando o melhor aproveitamento do FRP com o sistema de protensão. Os referidos autores também observaram maiores deformações no concreto nas lajes com reforço protendido, indicando a capacidade do FRP protendido em proporcionar melhor aproveitamento dos materiais envolvidos.

Em relação ao modo de ruptura, de acordo com Correia *et al.* (2015), todas as lajes reforçadas com o laminado de CFRP tiveram ruína baseada pelo destacamento do material em uma de suas extremidades (Figura 30a), seguindo para o meio do vão, após o escoamento das armaduras, sendo que no caso do reforço protendido com ancoragem MA tal ruptura foi caracterizada por uma falha interfacial entre laminado e adesivo (Figura 30b). Ainda, uma das lajes com ancoragem do tipo MA e da série S2 rompeu por ruptura do laminado de CFRP, confirmando a capacidade da ancoragem mecânica em prevenir o descolamento prematuro do FRP do substrato (Figura 30c). Quanto ao padrão de fissuras, Correia *et al.* (2015) observaram redução das aberturas e espaçamentos das fissuras nas lajes reforçadas, sendo tal efeito mais acentuado nas lajes com reforço protendido.

Figura 30 – Modo de ruptura das lajes reforçadas



Fonte: Correia *et al.* (2015)

Na comparação entre os sistemas de ancoragem utilizados (MA e GA), o comportamento até o escoamento das armaduras foi similar para os dois tipos analisados, sendo que o aumento de F_y nas lajes reforçadas se dá pela contribuição do laminado de CFRP logo após o escoamento das armaduras inferiores em função de seu maior módulo de elasticidade e comportamento elástico linear (CORREIA *et al.*, 2015).

Os pontos de oscilações nos diagramas das lajes com reforço protendido, Figura 29a, após o início do escoamento das armaduras, se referem à descolamentos do laminado de CFRP no trecho entre a ancoragem e pontos de aplicação de força, sendo possível observar

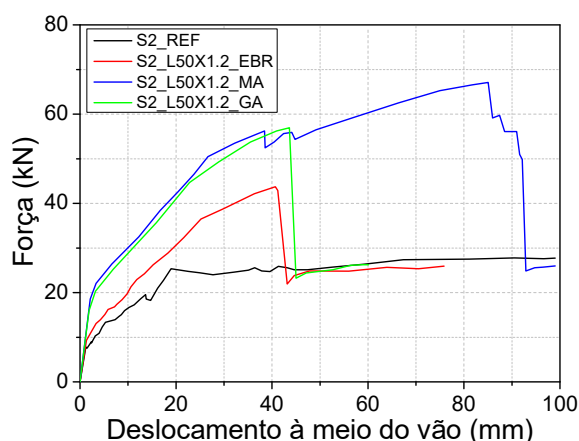
que tal comportamento ocorre em deslocamentos similares ao momento de destacamento do material de reforço passivo (EBR). De acordo com Correia *et al.* (2015), após a referida oscilação, o laminado passa a trabalhar parcialmente descolado do substrato e fixado somente por suas extremidades ancoradas, prevenindo-se a ruptura prematura do material de reforço e permitindo que o laminado contribua com a capacidade do elemento após os pontos de destacamento, diferentemente do comportamento observado com a ancoragem GA, onde o destacamento do laminado ocorre de forma brusca e com menores níveis de deformação.

De forma resumida, Correia *et al.* (2015) observaram que a ancoragem MA se mostrou mais eficiente que o GA, resultando em capacidade última das lajes e dos laminados até 16 % e 28 % superiores, a depender da geometria do laminado de CFRP utilizado. Também é destacado que devido a ancoragem GA demandar um maior comprimento de ancoragem, face aos trechos de zona gradiente, o comprimento efetivo (livre entre ancoragens) do laminado é menor quando comparado com a ancoragem MA, ficando dessa forma localizada mais próxima dos pontos de aplicação de força, permitindo que o sistema de ancoragem GA seja comprometido pela presença de fissuras de forma antecipada. De acordo com os referidos autores, alguns trabalhos na literatura indicam que para comprimentos maiores de ancoragem com o sistema GA, o comportamento tende a ser mais parecido com o sistema MA.

No que diz respeito a influência da espessura e largura do laminado no comportamento das lajes reforçadas, Correia *et al.* (2015) constataram que a espessura do laminado teve pouca influência no comportamento à flexão das lajes, diferentemente da largura, visto que a laje reforçada com laminado com maior largura (1,2x80 mm²) resultou no melhor comportamento entre as lajes ensaiadas, assim como, em menores tensões de cisalhamento na região das ancoragens, mesmo aplicando-se o mesmo torque nos chumbadores das ancoragens.

Correia *et al.* (2015) também avaliaram a influência do tipo de tratamento do substrato das lajes antes da aplicação do laminado de CFRP, variando-se com o uso de esmerilhadeira (S1) e com jato de areia (S2). De acordo com os referidos autores, o tratamento com jato de areia levou a um melhor desempenho, resultando em maior capacidade à flexão. Além disso, tal preparação foi responsável por ocasionar a única ruptura total do laminado observada no experimento (Figura 30c), atingindo deformação última da ordem de 14,76 ‰ (próximo da deformação última do laminado), diferentemente do destacamento observado com a preparação com o uso de esmerilhadeira. Por fim, tal tipo de preparação do substrato implicou na postergação dos pontos de destacamentos do laminado de CFRP observados no diagrama Força *versus* deslocamento (Figura 31).

Figura 31 – Diagrama Força versus Deslocamento da série S2



Fonte: Adaptado de Correia *et al.* (2015)

Em relação ao reforço passivo segundo a técnica EBR, Correia *et al.* (2015) constaram que a laje reforçada da série S2 resultou em incremento de 57 % na capacidade última quando comparada com a laje de referência não reforçada, enquanto a laje com reforço passivo da série S1 resultou em incremento de 38 %, confirmando a eficiência do preparo do substrato com jato de areia. De acordo com Correia *et al.* (2015), a influência do tipo de preparação do substrato se dá pela rugosidade que cada procedimento proporciona ao substrato de concreto, condição esta que afeta diretamente no mecanismo de aderência entre o material de reforço e o substrato de concreto.

2.6.2 ESTUDO CONDUZIDO POR WANG ET AL. (2022)

Um segundo estudo aqui destacado foi desenvolvido por Wang *et al.* (2022), os quais realizaram programa experimental com vigas de concreto armado de seção “T”, em escala real, não reforçadas e reforçadas de forma passiva e protendida com laminados de CFRP, com o objetivo de analisar a influência do nível de protensão, taxa de material de reforço, tipo do laminado de FRP e posição de instalação do material de reforço no comportamento à flexão das vigas. Na Tabela 2 são apresentadas as principais características das vigas ensaiadas e os materiais utilizados pelos referidos autores.

Wang *et al.* (2022) confeccionaram 8 vigas, sendo que uma delas não recebeu nenhum tipo de reforço, servindo de referência e denominando-se BU, e as demais vigas do experimental foram reforçadas com laminado de CFRP, tanto de forma passiva como protendida. Dois tipos de laminados de CFRP foram analisados, os quais foram denominados de alta-resistência (HS-CFRP) e baixa-resistência (LS-CFRP) com tensões últimas indicadas em 2625/2516 MPa e 1838 MPa e deformações últimas de 17/16 ‰ e 12 ‰, respectivamente. Em termos de dimensões, os referidos autores utilizaram laminados com espessuras de 1,4 e 2,0 mm e larguras de 50 e 100 mm.

Para as vigas reforçadas, os referidos autores adotaram a nomenclatura do tipo B00-000X, onde a letra B refere-se ao termo *Beam*, em língua inglesa, os dois primeiros números se referem ao nível de protensão do laminado, os três números na sequência se referem a área transversal do laminado de CFRP em mm², e a letra X refere-se à: (i) “S” para o caso do reforço instalado nas faces laterais da viga e (ii) “L” para o caso uso do laminado de baixa-resistência (LS-CFRP). Para um melhor entendimento, na Tabela 4 estão resumidas as características de cada viga ensaiada por Wang *et al.* (2022).

Tabela 4 – Resumo das características das vigas

| Viga | Características do FRP | | | | |
|----------|------------------------|----------------|------------------------|--------------------|------------------|
| | Largura (mm) | Espessura (mm) | Nível de protensão (%) | Posição do reforço | Tipo do laminado |
| BU | - | - | - | - | - |
| B0-140 | 100 | 1,4 | 0 | face inferior | HS-CFRP |
| B30-140 | 100 | 1,4 | 30 | face inferior | HS-CFRP |
| B50-140 | 100 | 1,4 | 50 | face inferior | HS-CFRP |
| B30-100 | 50 | 2,0 | 30 | face inferior | HS-CFRP |
| B30-200 | 100 | 2,0 | 30 | face inferior | HS-CFRP |
| B30-140L | 100 | 1,4 | 30 | face inferior | LS-CFRP |
| B30-200S | 50 x 2 | 2,0 | 30 | laterais | HS-CFRP |

Fonte: adaptado de Wang *et al.* (2022)

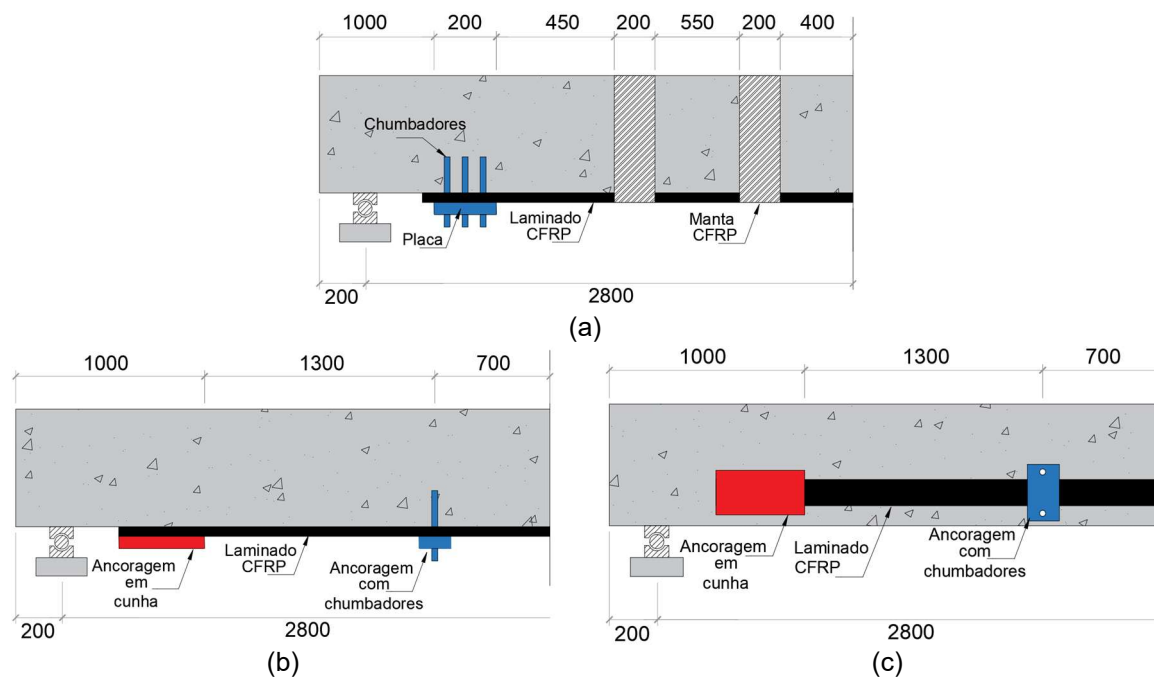
Os níveis de protensão aplicados nos laminados de CFRP foram expressos em percentuais referentes a sua tensão máxima resistida pelo laminado de CFRP, a qual foi fixada em 2400 MPa, condição imposta pela norma chinesa, conforme indicado pelos autores, sendo considerado no estudo em questão níveis de protensão de 0 % (reforço passivo), 30 % e 50 %. Todos os laminados utilizados possuíam comprimento efetivo de 400 cm e foram ancorados em suas extremidades com dispositivos metálicos (ancoragem mecânica, MA). No experimento em questão, utilizou-se de resina epóxi bicomponente para a colagem dos laminados nas vigas.

Na Figura 32 são apresentados os esquemas de reforço adotados por Wang *et al.* (2022). Note-se que a viga com reforço passivo aplicado segundo à técnica EBR, denominada por B0-140 (Figura 32a), além da colagem com resina epóxi, também possui ancoragem do laminado de CFRP com dispositivos metálicos nas extremidades laminado de CFRP e ancoragens intermediárias com mantas de CFRP envolvidas na seção transversal em formato “U”. Nas ancoragens metálicas foram utilizadas placas metálicas de 12x200x200 mm³ e seis chumbadores com diâmetros de 16 mm, já nas ancoragens não metálicas intermediárias, utilizaram-se mantas de CFRP com espessura de 0,167 mm e largura de 200 mm.

Na Figura 32b apresenta-se o esquema de reforço das vigas em sua face inferior, enquanto na Figura 32c a viga com reforço aplicado somente em suas faces laterais, ambos referente ao reforço com laminado de CFRP protendido. Nota-se que nas referidas Figuras,

além das ancoragens consideradas nas extremidades do laminado de CFRP, também foram consideradas ancoragens metálicas intermediárias. Para as vigas com reforço protendido, Wang *et al.* (2022) utilizaram chumbadores de diâmetros de 24 mm nas ancoragens metálicas.

Figura 32 – Esquemas de sistemas de reforço adotadas (dimensões em mm)



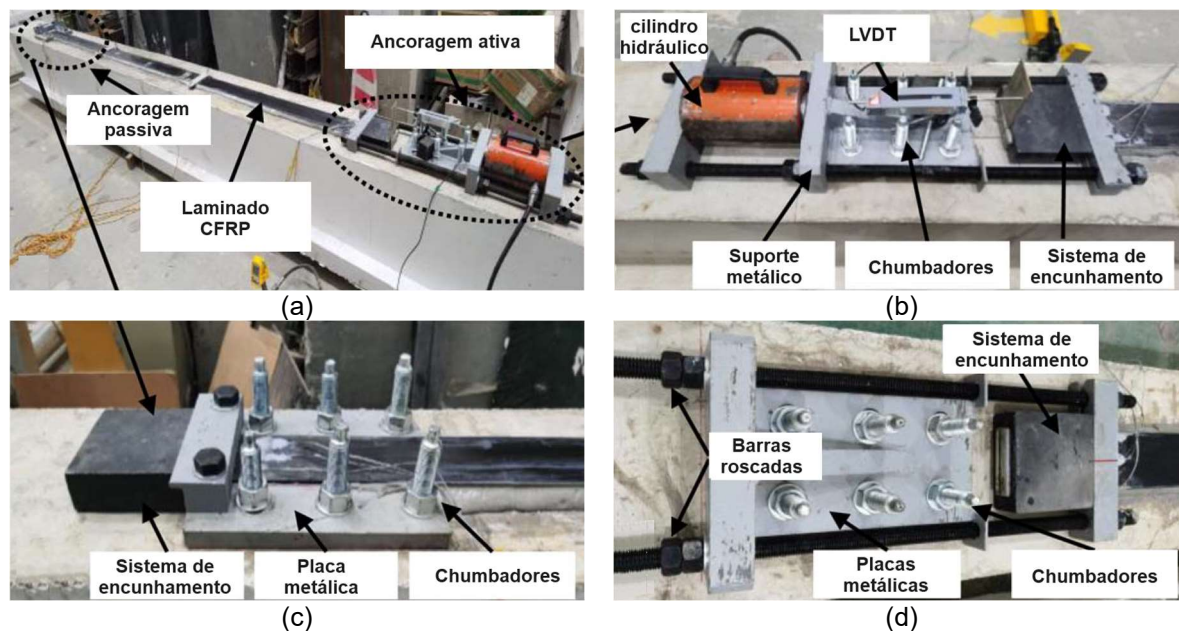
Fonte: adaptado de Wang *et al.* (2022)

Na Figura 33a é apresentada uma visão geral do sistema de protensão adotado por Wang *et al.* (2022). Na Figura 33b é apresentada a ancoragem ativa do sistema, com a indicação dos suportes metálicos fixados por chumbadores na viga, assim como, o posicionamento do cilindro hidráulico em suporte móvel com barras roscadas, o qual foi utilizado para aplicar a força de protensão no laminado. Na Figura 33c é apresentada a ancoragem passiva do sistema, enquanto na Figura 33d é apresentada uma vista com o aspecto final do sistema, após a aplicação da protensão. Destaca-se que os referidos autores utilizaram de sistema de encunhamento para fixação do laminado de CFRP na ancoragem.

Para a aplicação da força de protensão no laminado de CFRP, Wang *et al.* (2022) utilizaram um LVDT para monitoramento do deslocamento do dispositivo metálico móvel da ancoragem ativa do sistema (Figura 33b). As seguintes etapas de protensão foram realizadas: (i) aplicação de 15 % da força total de protensão prevista para teste do sistema; (ii) remoção da força inicial de protensão e aplicação da resina epóxi entre o laminado e substrato; (iii) aplicação da força de protensão em quatro etapas, aplicando-se 20 % da força prevista, com cinco minutos de pausa entre as etapas para estabilização das tensões geradas pela protensão. Para compensar eventuais perdas de protensão, os referidos autores optaram por aplicar um acréscimo da ordem de 5 % à força de protensão na última etapa. O nível de

deformação imposto no laminado de CFRP foi da ordem de 7,5 ‰ para a viga B50-140 e 4,5 ‰ para as demais vigas do estudo.

Figura 33 – Sistema de protensão externa com laminado de CFRP

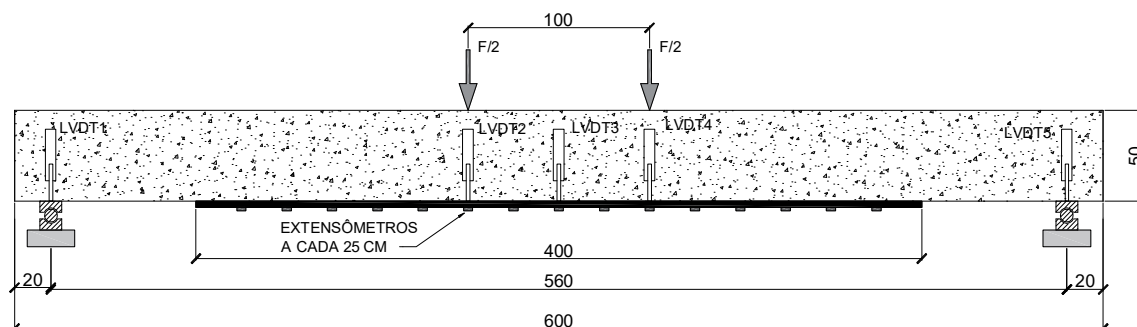


Fonte: adaptado de Wang *et al.* (2022)

Destaca-se que, por se tratar de aplicação de sistema de reforço em laboratório, os referidos autores inverteram a face inferior das vigas de modo a facilitar a aplicação dos sistemas de reforço. Ainda, antes da instalação das ancoragens, as vigas reforçadas tiveram suas superfícies tratadas uma vez que os laminados protendidos também são colados ao substrato com uso de resina epóxi.

As condições de ensaio e instrumentação das vigas adotadas por Wang *et al.* (2022) são apresentadas na Figura 34, sendo consideradas instalações de 5 LVDTs, para monitoramento dos deslocamentos e extensômetros para monitoramento das deformações no laminado de CFRP, os quais foram espaçados a cada 25 cm. Os autores também utilizaram extensômetros instalados nas barras longitudinais inferiores, a meio vão das vigas.

Figura 34 – Esquema de ensaio à flexão e instrumentação das vigas (dimensões em cm)



Fonte: adaptado de Wang *et al.* (2022)

Na Tabela 5 estão resumidos os principais resultados obtidos Wang *et al.* (2022) com indicação das forças no momento de fissuração do concreto (F_{cr}), escoamento das armaduras (F_y) e capacidade última (F_u), assim como, os incrementos de capacidade das vigas quando comparada com a viga de referência não reforçada, o qual é representado na referida tabela por η .

Tabela 5 – Resumo dos principais resultados

| Viga | Cargas e incrementos de capacidade | | | | | |
|----------|------------------------------------|-----------------|------------|--------------|------------|--------------|
| | F_{cr} (kN) | η_{cr} (%) | F_y (kN) | η_y (%) | F_u (kN) | η_u (%) |
| BU | 16 | - | 193 | - | 221 | - |
| B0-140 | 26 | 63 | 223 | 16 | 247 | 12 |
| B30-140 | 42 | 163 | 268 | 39 | 343 | 55 |
| B50-140 | 54 | 238 | 292 | 51 | 305 | 38 |
| B30-100 | 36 | 125 | 249 | 29 | 275 | 24 |
| B30-200 | 50 | 213 | 295 | 53 | 355 | 61 |
| B30-140L | 40 | 150 | 263 | 36 | 318 | 44 |
| B30-200S | 36 | 125 | 246 | 27 | 275 | 24 |

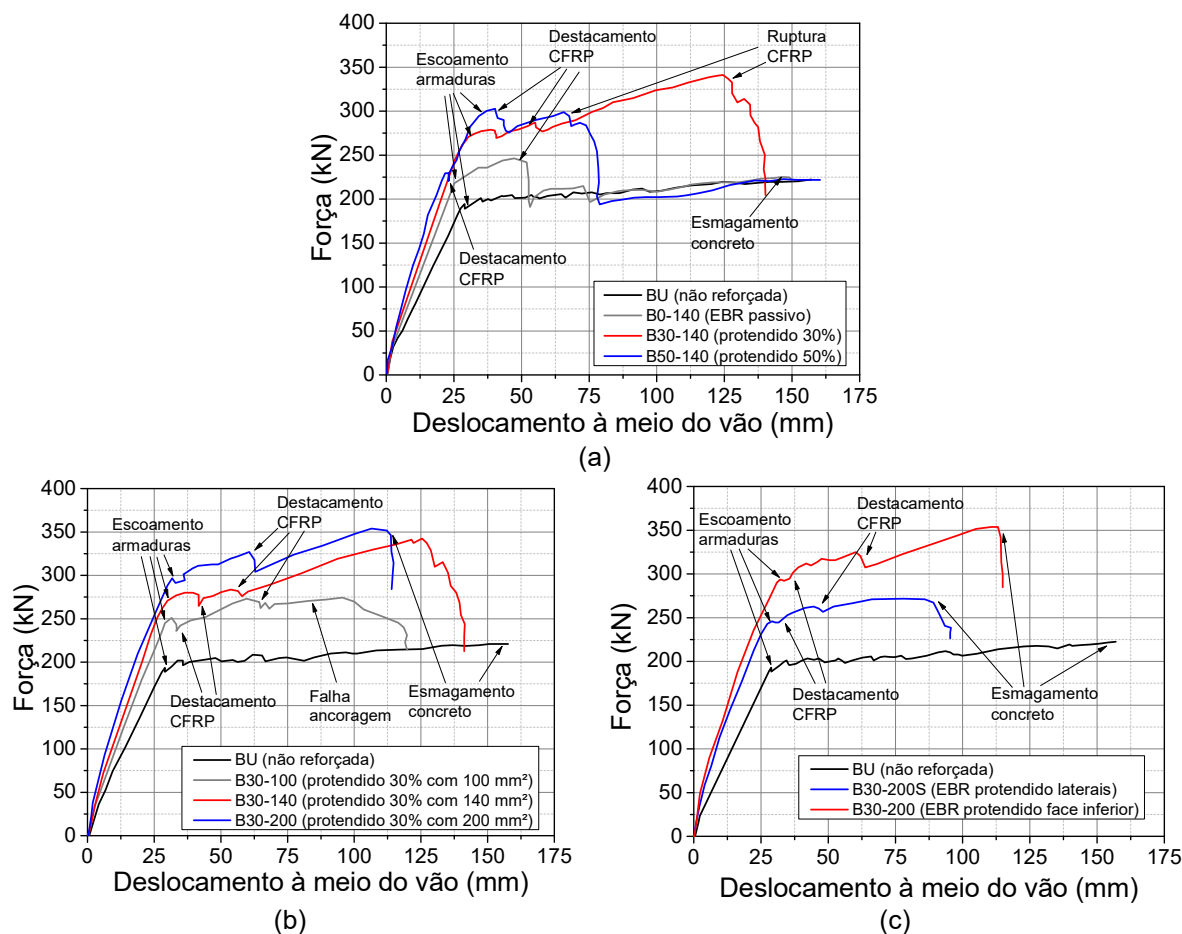
Fonte: adaptado de Wang *et al.* (2022)

Na Figura 35 são apresentados os diagramas Força *versus* deslocamento vertical das vigas ensaiadas por Wang *et al.* (2022), sendo realizadas as seguintes comparações e análises: (i) efeito do nível da protensão do laminado de CFRP (Figura 35a); (ii) efeito da taxa de material de reforço (Figura 35b); e (iii) efeito da posição do sistema de reforço (Figura 35c).

No que diz respeito ao reforço passivo aplicado segundo à técnica EBR (Figura 35a), Wang *et al.* (2022) observaram que o reforço passivo aumentou a rigidez à flexão da viga quando comparada à viga de referência (não reforçada), resultando em incrementos de F_{cr} , F_y e F_u da ordem de 63 %, 16 % e 12 %, respectivamente. Por se tratar de reforço passivo com sistema de ancoragens, o destacamento do laminado de CFRP não ocorreu de forma prematura logo após o escoamento das armaduras, resultando em uma melhor ductilidade quando comparado com sistemas de reforço EBR passivos que não dispõem de sistemas de ancoragem.

Em relação às vigas reforçadas com laminados protendidos, Wang *et al.* (2022) constataram incrementos de rigidez e capacidades à flexão significativos, sendo observados incrementos de F_{cr} , F_y e F_u de até 238 %, 53 % e 61 %, respectivamente, quando comparadas com as vigas de referência, se mostrando mais efetivo em relação ao reforço passivo. Entretanto, as vigas reforçadas apresentaram ductilidade reduzida sendo tal efeito atenuado com o aumento do nível de protensão e taxa de material de reforço (Figura 35b).

Figura 35 – Diagramas Força versus Deslocamento vertical



Fonte: adaptado de Wang *et al.* (2022)

Quanto ao nível de protensão aplicado nos laminados de CFRP, observou-se que a viga B50-140, com 50 % de nível de protensão, apresentou força máxima 11 % inferior a observada na viga B30-140, a qual possuiu 30 % de nível de protensão. Assim o aumento do nível de protensão resultou em uma menor ductilidade e capacidade última. Entretanto, no que diz respeito as forças no momento de fissuração do concreto e escoamento das armaduras, o nível de protensão de 50 % foi o que demonstrou mais efetivo, indicando melhor desempenho em condições de serviço da viga.

De acordo com Wang *et al.* (2022), o menor incremento de capacidade última e redução da ductilidade obtido com o aumento do nível de protensão do laminado de FRP se refere a um comportamento já previsto na literatura. Tal comportamento se deve ao maior alongamento imposto no laminado de CFRP no ato da protensão, resultando no adiamento do surgimento dos pontos de destacamento do laminado quando comparados à níveis de protensão inferiores. Logo, os referidos autores destacam que o aumento do nível de protensão do laminado de CFRP não é benéfico quando se tem como objetivo no reforço o aumento da capacidade última do elemento.

No diagrama Força *versus* deslocamento da Figura 35b são comparadas a vigas reforçadas com FRP protendido, variando-se a seção transversal do laminado de CFRP (100, 140 e 200 mm²) para um mesmo nível de protensão (30 %). Wang *et al.* (2022) constataram que a rigidez à flexão das vigas, assim como as capacidades resistentes, tende a aumentar com o aumento da taxa de material de reforço. Como exemplo, o laminado com seção transversal de 100 mm² resultou em incrementos de F_{σ} , F_y e F_u da ordem de 125 %, 29 % e 24 %, respectivamente, quando comparado com a viga de referência, enquanto a viga reforçada com o laminado de 200 mm² apresentou incrementos de 213 %, 53 % e 61 %.

Os referidos autores observaram que o aumento da taxa de material também tende a alterar o modo de ruptura das vigas, alterando-se do destacamento/ruptura do FRP para o esmagamento do concreto. Ainda, a viga reforçada com FRP protendido com a menor taxa de material de reforço (B30-100) apresentou melhor desempenho do que a viga com reforço passivo com laminado de seção maior (B0-140), evidenciando a eficiência da protensão do laminado de CFRP.

Na Figura 35c é apresentada a comparação de diagramas Força *versus* deslocamento das vigas de referência e de duas vigas com reforço de FRP protendido, as quais possuem a mesma taxa de material de reforço, sendo uma com o reforço instalado na face inferior da viga (B30-200) e outra com o reforço instalado nas faces laterais (B30-200S). De acordo com Wang *et al.* (2022) tal comparação se mostra importante uma vez que em situações práticas a aplicação do reforço nas laterais das vigas podem ser necessária.

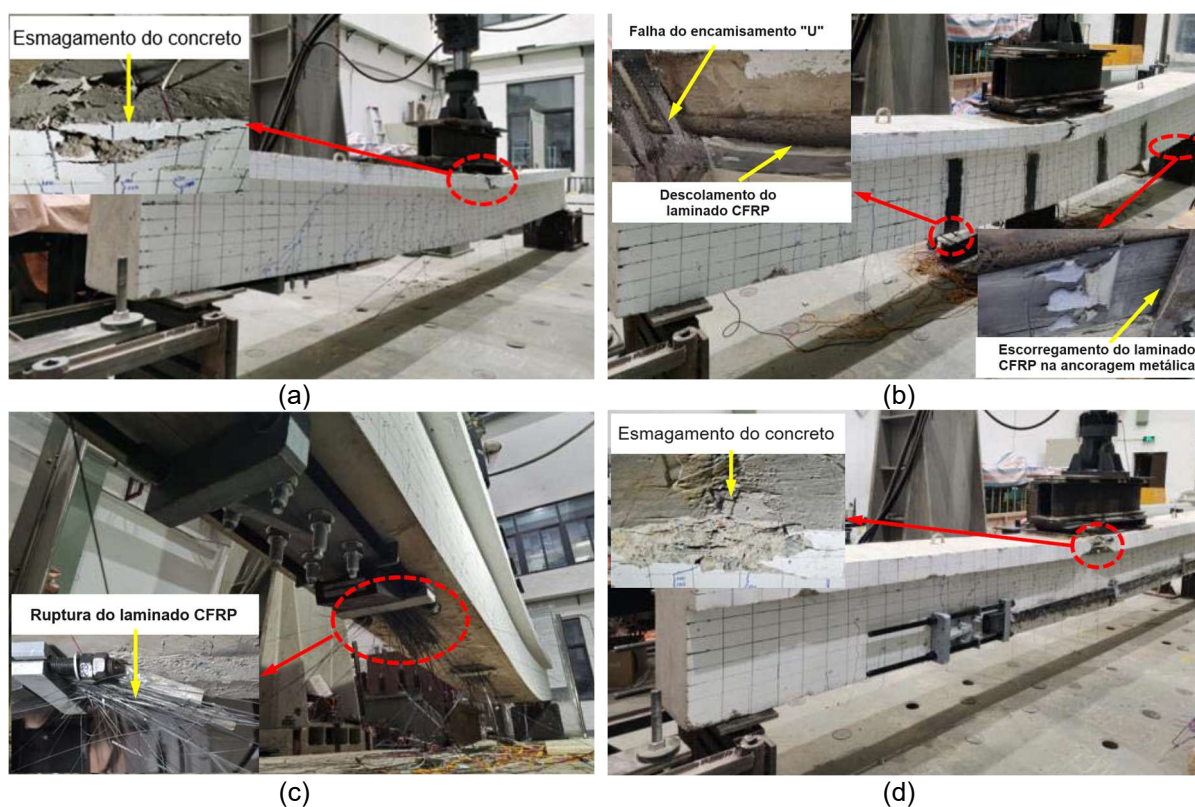
Os referidos autores verificaram que a viga B30-200 apresentou incrementos de F_{σ} , F_y e F_u da ordem de 212 %, 53 % e 61 %, respectivamente, quando comparado com a viga de referência, enquanto a viga B30-200S apresentou incrementos de 125 %, 27 % e 24 %, respectivamente. Analisando-se os resultados é possível verificar que a aplicação do reforço nas laterais da viga não é tão eficiente quanto a aplicação em sua face inferior, indicando que incrementos de rigidez e capacidades à flexão da primeira técnica são da ordem de 50 % do observado com a segunda. De acordo com Wang *et al.* (2022) tal comportamento se dá pelo fato do braço de alavanca do momento fletor resistente ser menor com o reforço nas laterais, assim como, a distribuição de tensões na largura do laminado de CFRP aplicado nas laterais da viga não é tão uniforme como o observado na face inferior.

Em relação ao tipo de laminado de FRP utilizado nas vigas com reforço protendido, Wang *et al.* (2022) verificaram que as vigas da mesma série, porém, com laminados diferentes, apresentaram comportamento similares, atingindo incrementos de F_{σ} e F_y praticamente iguais. Em termos de capacidade última, a viga com laminado de alta resistência

(B30-140) apresentou F_u 7 % superior à da viga com laminado de baixa resistência (B30-140L), assim como maior ductilidade, o que se deve a maior tensão última que o laminado de alta resistência apresenta.

Quanto aos modos de ruptura das vigas ensaiadas, para a viga de referência (BU), Wang *et al.* (2022) observaram esmagamento do concreto na região comprimida da viga (face superior), seguido pelo escoamento das armaduras, (Figura 36a). Já a viga com reforço passivo aplicado segundo à técnica EBR com ancoragens (B0-140), após o escoamento das armaduras, apresentou modo de ruptura caracterizado pelo escorregamento do laminado de CFRP nas ancoragens metálicas e falha do encamisamento “U” com destacamento do laminado sob uma deformação no material de reforço de 5,04 % (Figura 36b).

Figura 36 – Sistema de protensão externa com laminado de CFRP



Fonte: adaptado de Wang *et al.* (2022)

Em relação ao modo de ruptura das vigas com reforço protendido, Wang *et al.* (2022) constataram que as vigas B30-140e B50-140 e B30-140L, reforçadas com laminados de CFRP protendidos de seção 1,4x100 mm², apresentaram ruptura total do material de reforço após o escoamento das armaduras sob uma deformação no material de reforço de até 13,93 % (Figura 36c), confirmando a eficiência do sistema de ancoragem adotado e confirmação do melhor aproveitamento dos materiais proporcionados pela protensão.

As vigas B30-200 e B30-200S, que receberam reforço protendido com laminados de CFRP de seção 2,0x100 mm², apresentaram modo de ruptura por escoamento das armaduras

seguido pelo esmagamento do concreto (Figura 36d), indicando que a quantidade de material de reforço possui efeito no modo de ruptura das vigas. Quanto a viga B30-100, a única a receber a menor quantidade de material de reforço com laminado de CFRP de seção de $2,0 \times 50 \text{ mm}^2$, os referidos autores constaram escorregamento do laminado na região da ancoragem do sistema, o que pode ser atribuído a uma provável execução inadequada da ancoragem.

Ainda, Wang *et al.* (2022) observaram durante os ensaios das vigas que pontos de destacamento do laminado de CFRP protendido começam a surgir após o escoamento da armadura. Entretanto, para a viga com maior nível de protensão (B50-140), esses pontos surgiram antes mesmo do escoamento das armaduras.

Quanto ao comportamento das vigas à fissuração do concreto, Wang *et al.* (2022) constaram que, para um mesmo nível de carregamento, a aplicação dos sistemas de reforço passivo e protendido tendem a diminuir as aberturas das fissuras quando comparado com a viga de referência, sendo tal redução ainda mais evidente nas vigas com reforço protendido. Ainda, a diminuição da abertura das fissuras é mais eficiente com o aumento do nível de protensão e da taxa de material de reforço.

2.6.3 DEMAIS ESTUDOS

A seguir serão apresentados, em ordem cronológica, outros estudos inerentes ao tema desta pesquisa e desenvolvidos por diferentes autores. Porém, aqui serão discutidos de forma mais resumida, e as principais características e dados dos referidos trabalhos podem ser encontrados na Tabela 2.

Em sua análise sobre alternativas para melhorias no desempenho de estruturas de concreto armado reforçadas com FRP, Garcez (2007) conduziu estudo com vigas de concreto armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP segundo à técnica de reforço EBR, tanto de forma passiva como protendida. Para tanto, os comportamentos à flexão de seis vigas foram analisados e comparados, sendo uma viga sem reforço (referência), uma viga reforçada com laminado de CFRP de forma passiva e quatro vigas reforçadas com FRP protendido, variando-se os tipos de distribuição do FRP no elemento reforçado para uma mesma taxa de reforço e o nível de protensão aplicado, o qual variou entre 35 % e 43 % da deformação última do laminado. Ainda, das vigas com reforço com FRP protendido, duas foram submetidas a carregamento estático e outras duas a carregamento cíclico.

Para a protensão dos laminados de CFRP, Garcez (2007) utilizou de técnica similar à ancoragem por gradiente de esforços (GA), conforme já detalhado no item 2.5.3 deste Capítulo, sendo a força de protensão aplicada em sua totalidade na região central da viga e aliviadas na região das extremidades do laminado, resultando em reduções graduais dos

níveis de protensão, dispensando o sistema de ancoragem. Na Figura 37 são apresentadas imagens do sistema de protensão utilizado pela referida autora, com uma vista geral da aplicação do reforço e detalhes da ancoragem do laminado de CFRP no equipamento de protensão (Figura 37).

Figura 37 – Sistema de FRP protendido utilizado por Garcez (2007)



Fonte: Garcez (2007)

Em termos de capacidade última das vigas, Garcez (2007) constatou que a viga com reforço passivo, aplicado segundo a técnica EBR, resultou em incremento de 27 % quando comparada com a viga de referência, enquanto as vigas reforçadas com laminados de CFRP protendidos apresentaram incrementos de 62 % a 65 %, a depender da quantidade de laminados utilizados e nível de protensão. De acordo com a referida autora, a diferença de incremento entre os sistemas de reforço passivo e ativo, se dá pelo efeito da protensão no elemento reforçado, uma vez que as tensões de compressão impostas combatem as tensões de tração, retardando o surgimento de fissuras e escoamento das armaduras e resultando em maiores capacidades à flexão de serviço (fissuração do concreto e escoamento do aço de tração).

Em relação ao modo de ruptura das vigas, Garcez (2007) observou destacamento do laminado de CFRP nas vigas com o reforço passivo e protendido (Figura 38a). Além disso, o reforço protendido apresentou deformações últimas no laminado de até 14,22 ‰, enquanto no reforço passivo foram verificadas deformações da ordem de 5,46 ‰, evidenciando-se o melhor aproveitamento dos materiais proporcionados pela protensão do laminado.

Ainda, mantendo-se a taxa de material de reforço, porém, utilizando-se quatro laminados em vez de dois laminados protendidos, obteve-se a ruptura do material de reforço (Figura 38b), indicando que uma melhor distribuição do FRP no elemento reforçado contribui para uma melhor distribuição de tensões nas regiões de ancoragem por gradiente e melhor aproveitamento do FRP, que neste caso atingiu uma deformação última de 16,29 ‰.

Assim como nos estudos anteriores apresentados, Garcez (2007) também observou em seu estudo incrementos de força no momento de fissuração do concreto e no escoamento das armaduras das vigas com o uso dos sistemas de reforço com FRP, sendo tais aumentos ainda mais significativos para as vigas com reforço protendido. Em relação a ductilidade das vigas, em seu experimento, verificou-se menor ductilidade com o reforço passivo.

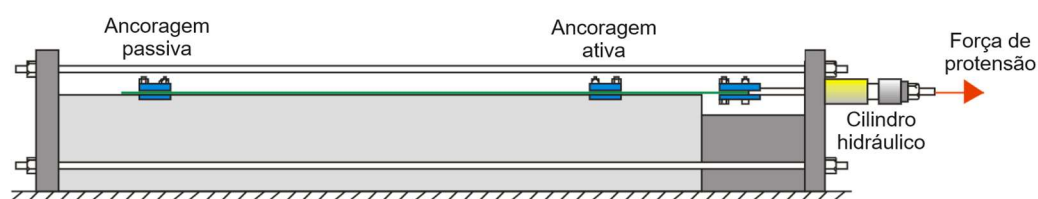
Figura 38 – Modos de ruptura observado por Garcez (2007)



Fonte: Garcez (2007)

Wang *et al.* (2012) ensaiaram à flexão oito vigas de concreto armado ($15 \times 30 \times 200 \text{ cm}^3$), sendo uma não reforçada (referência), e as demais reforçadas à flexão com o uso de manta de CFRP aplicada segundo à técnica EBR, com e sem protensão, de modo a analisar o comportamento à flexão das vigas com diferentes níveis de protensão e taxa de material de reforço (uma e duas camadas). O sistema de FRP protendido utilizado pelos referidos autores é apresentado na Figura 39, sendo utilizadas ancoragens mecânicas com chumbadores e dispositivos metálicos externos ao elemento para a aplicação da força de protensão.

Figura 39 – Sistema de FRP protendido utilizado por Wang *et al.* (2012)



Fonte: adaptado de Wang *et al.* (2012)

Inicialmente, as vigas foram submetidas à pré-fissuração, a qual foi realizada aplicando-se carregamento correspondente a 63 % da capacidade última da viga de referência. Posteriormente, as vigas foram descarregadas e os sistemas de reforço aplicados, de modo a simular, de forma mais realista, seu uso em um elemento estrutural danificado. No sistema de reforço protendido, foram aplicados níveis de protensão da ordem de 36 %, 40 %, 50 % e 60 % da capacidade última da manta de CFRP.

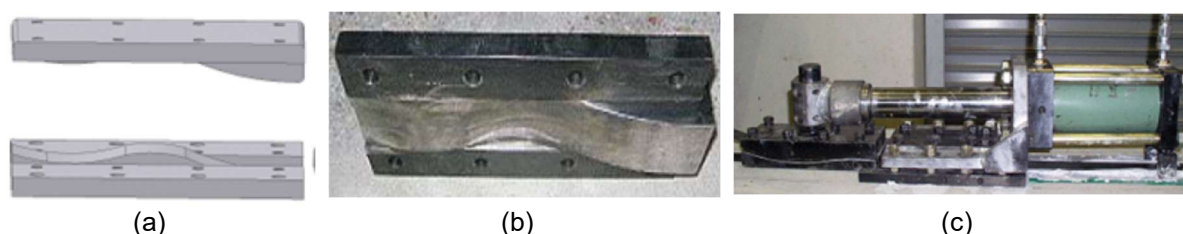
Em relação ao reforço passivo, Wang *et al.* (2012) observaram incrementos de capacidade última da ordem de 65 % quando comparada com a viga de referência, e o modo de ruptura foi caracterizado pelo destacamento da manta de CFRP. Ainda, a capacidade à fissuração do concreto aumentou em 31,8 % com a aplicação do reforço passivo, fato este que, segundo os autores, se deve ao fechamento natural das fissuras após a retirada do carregamento do ensaio de pré-fissuração e antes da aplicação do reforço passivo.

Já nas vigas reforçadas com manta de CFRP protendida o incremento da capacidade à fissuração do concreto, quando comparada com a viga de referência, foi da ordem de 100 %, indicando a eficácia da protensão no comportamento em serviço do elemento reforçado. Em termos de capacidade última, o reforço com FRP protendido resultou em incremento da ordem de 80 % para as vigas reforçadas com uma camada de manta CFRP protendida, com ruptura do material de reforço, e 145 % para o reforço com duas camadas protendidas, observando-se ruptura do material de reforço e esmagamento do concreto simultaneamente. Ainda, Wang *et al.* (2012) observaram diminuição da ductilidade e aumento da rigidez à flexão das vigas com o aumento do nível de protensão e taxa de material de reforço.

No que diz respeito às deformações nas mantas de CFRP, Wang *et al.* (2012) verificaram deformações da ordem de 10 ‰ no momento da ruptura do sistema de reforço para todas as vigas, evidenciando o melhor aproveitamento dos materiais que a protensão proporciona, assim como, da capacidade da ancoragem mecânica em reforço passivo em resultar em maiores níveis de solicitações do material de reforço.

Woo, Kim e Byun (2012) realizaram programa experimental com vigas de concreto armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP aplicados segundo à técnica EBR, com e sem protensão, variando-se a resistência à compressão do concreto, o nível de protensão do laminado e taxa de armadura passiva. No reforço com FRP protendido os referidos autores utilizaram um sistema de ancoragem mecânico, com ondulações, fixados ao elemento reforçado com o uso de chumbadores, tal como o apresentado na Figura 40.

Figura 40 – Sistema de FRP protendido utilizado por Woo, Kim e Byun (2012)



Fonte: Woo, Kim e Byun (2012)

Woo, Kim e Byun (2012) observaram que o reforço passivo promoveu um aumento de 27,3 %, 23,8 % e 20,6 % de F_{cr} , F_y e F_u , respectivamente, sob uma deformação máxima no laminado de 6,71 ‰, quando comparado com a viga de referência (não reforçada),

enquanto o reforço com FRP protendido (nível de deformação do laminado de 8 ‰) resultou em incrementos significativos de 258 %, 87 % e 68,4 %, respectivamente, para uma mesma classe de resistência à compressão do concreto e taxa de armadura, sob uma deformação máxima no laminado de 14,17 ‰, evidenciando-se a eficiência do FRP protendido em termos de serviço, capacidade última e aproveitamento dos materiais. O modo de ruptura do reforço passivo foi caracterizado pelo destacamento do laminado em uma de suas extremidades, enquanto o reforço protendido apresentou ruptura do laminado.

Alves (2015) avaliou experimentalmente o comportamento de lajes de concreto armado submetidas a ensaio de pré-fissuração antes da aplicação do reforço à flexão com laminados de CFRP protendidos com diferentes níveis de protensão (20 % e 40 % da capacidade última do material de reforço), aplicados segundo a técnica NSM. Alves (2015) aplicou o sistema de reforço protendido com dispositivos externos ao elemento reforçado e, por ter sido adotada a técnica NSM, não foram considerados sistemas de ancoragem, assim como, não foram confeccionadas lajes de referência sem pré-fissuração, com ou sem reforço, visto o presente estudo ser complementar a estudos anteriores realizados pelo mesmo grupo de pesquisa. Para a pré-fissuração foram aplicados dois níveis de carregamentos, o primeiro até atingir o deslocamento limite recomendado por normas $L/250$ (vão dividido por 250, para elementos bi apoiados) e o segundo 50 % superior ao primeiro.

A referida autora observou que, independentemente do nível de pré-fissuração, o aumento do nível de protensão no laminado resulta em maior rigidez inicial à flexão do elemento reforçado, assim como, maior capacidade à flexão em serviço (correspondente ao deslocamento vertical de $L/250$). Entretanto foi observada a redução do deslocamento vertical das lajes quando a máxima força foi atingida com o maior nível de protensão, indicando redução da ductilidade.

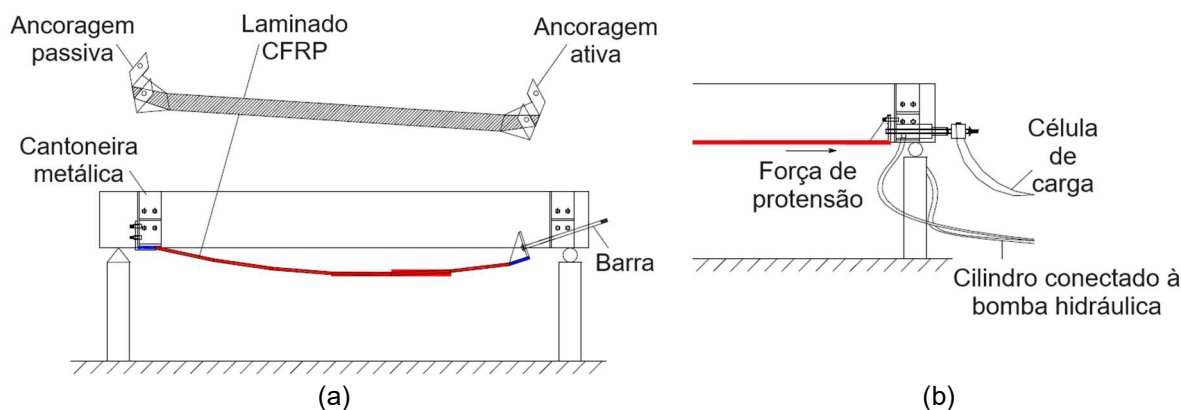
Comparando-se a capacidade à flexão das lajes, Alves (2015) observou que o nível de protensão de 40 % resultou em capacidade última apenas 4,08 % superior a capacidade observada com o nível de protensão de 20 %, enquanto em termo de capacidade em serviço ($L/250$), com aumento do nível de protensão, a capacidade à flexão foi 27,53 % superior, indicando que o nível de protensão tem maior efeito no comportamento em serviço do elemento reforçado e pouca influência em sua capacidade última no caso analisado, independentemente do nível de pré-fissuração aplicado. Em relação à deformação máxima do laminado de CFRP, a referida autora verificou deformações da ordem de 15 ‰ no momento da ruptura das lajes.

Ainda, ao comparar os resultados com os estudos anteriores do mesmo grupo de pesquisa, com lajes sem pré-fissuração, Alves (2015) observou que as lajes submetidas ao ensaio de pré-fissuração apresentaram uma menor rigidez inicial à flexão quando comparada

as lajes reforçadas não fissuradas, entretanto, o mesmo modo de ruptura foi observado para as lajes. Ainda, a referida autora observou para as lajes sem pré-fissuração três estádios no comportamento à flexão (concreto não fissurado, concreto fissurado com o aço no regime elástico e escoamento das armaduras), enquanto para as lajes pré-fissuradas, apenas os dois últimos estádios citados foram observados. Por fim, Alves (2015) verificou capacidade à flexão levemente maior para as lajes sem pré-fissuração quando comparado com as lajes pré-fissuradas.

Gao, Gu e Mosallam (2016) realizaram programa experimental com vigas de concreto armado reforçadas à flexão com laminado de CFRP, com e sem protensão, aplicados segundo a técnica EBR. Foram avaliadas a influência do nível de protensão, taxa de material de reforço e pré-fissuração no comportamento à flexão das vigas. Ainda, para fins de comparação, também foi ensaiada uma viga de referência não reforçada. Para a pré-fissuração, os referidos autores adotaram carregamento equivalente ao momento de fissuração da viga de referência (sem reforço). Na Figura 41a é apresentado o sistema de reforço com FRP protendido, destacando-se a ancoragem ativa do sistema na Figura 41b.

Figura 41 – Sistema de FRP protendido



Fonte: adaptado de Gao, Gu e Mosallam (2016)

No que diz respeito a viga com reforço passivo, os autores observaram incrementos de F_{cr} , F_y e F_u da ordem de 37 %, 18 % e 37 %, respectivamente, quando comparado com a viga de referência, a qual apresentou ruína baseada no escoamento das armaduras com posterior esmagamento do concreto, enquanto a viga com reforço passivo apresentou destacamento do laminado de CFRP, sem a ocorrência do esmagamento do concreto. A deformação registrada no laminado de CFRP na ruptura da viga com o reforço passivo foi de 8,73 %.

Diferentemente do reforço passivo, Gao, Gu e Mosallam (2016) observaram que as vigas reforçadas com FRP protendido apresentaram modo de ruptura caracterizado pela ruptura progressiva do laminado de CFRP, a qual ocorreu após o escoamento das armaduras

e antes do esmagamento do concreto, condição que é permitida devido a eficiência das ancoragens mecânicas utilizadas nas extremidades do laminado, as quais preveniram seu destacamento precoce após descolamentos pontuais que ocorrem com o acréscimo da força. Ainda, o reforço com FRP protendido resultou em incrementos de até 62 %, 29 % e 57 % de F_{σ} , F_y e F_u , respectivamente, quando comparado com a viga de referência, com deformação no laminado 13,30 %.

Em relação ao padrão fissuratório das vigas, Gao, Gu e Mosallam (2016) constataram que a aplicação do reforço com FRP protendido resulta em uma melhor distribuição e menores aberturas das fissuras nas vigas quando comparado com a situação sem reforço, para um mesmo nível de carregamento. Como exemplo, enquanto aberturas da ordem de 0,10 mm são observadas na viga não reforçada em nível de carregamento de 36 kN, com o reforço protendido, o surgimento de fissura com tal abertura pode ser postergada para carregamento de até 87 kN, evidenciando a eficiência da protensão no comportamento em serviço das vigas.

Quanto à variação da taxa de material de reforço, Gao, Gu e Mosallam (2016) observaram aumento da capacidade resistente e da rigidez à flexão das vigas com maiores taxas de FRP e níveis de protensão. Em relação às vigas submetidas ao ensaio de pré-fissuração, os referidos autores observaram uma leve redução da rigidez à flexão das vigas, quando comparadas às vigas sem pré-fissuração, entretanto, sem um padrão bem definido.

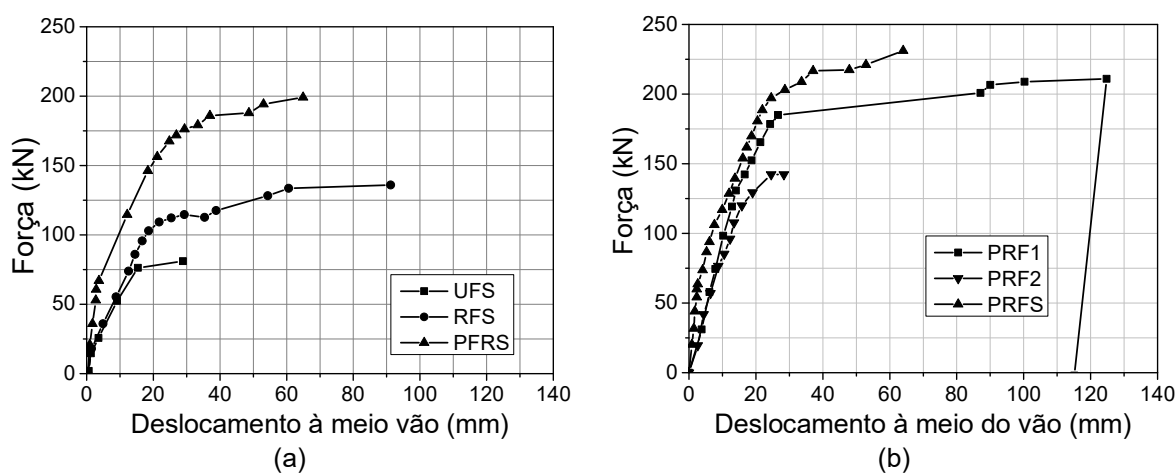
Peng *et al.* (2016) analisaram experimentalmente o comportamento à fadiga de vigas de concreto armado reforçadas com FRP com e sem protensão, aplicadas segundo a técnica EBR. Para tanto, sete vigas foram ensaiadas, sendo três submetidas a ensaio de carregamento estático, uma viga não reforçada (UFS), uma reforçada com colagem passiva de laminado de CFRP (RFS) e uma viga reforçada com FRP protendido (PFRS). As quatro vigas restantes foram submetidas a ensaio de carregamento dinâmico, variando-se o pré-carregamento entre 5 a 70 kN em ciclos de 192 mil a 3 milhões de repetições com frequência de 5Hz, sendo uma viga não reforçada (UF), uma reforçada com reforço passivo (RF) e duas vigas reforçadas com laminado protendido (PRF1 e PRF2). Das nomenclaturas adotadas pelos referidos autores: (i) U, *unstrengthened*; (ii) FS, *static test*; (iii) R, *strengthened*; (iv); PR, *prestressed strengthening* e (v) F, *fatigue*, em língua inglesa.

No que diz respeito às vigas submetidas ao ensaio estático, a viga de referência (UFS) apresentou F_{σ} , F_y e F_u de 15 kN, 80 kN e 85 kN, respectivamente, enquanto a viga com reforço passivo (RFS) atingiu 18 kN, 100 kN e 150 kN, o que indica incrementos devido ao reforço passivo de 20 %, 25 % e 76 %, respectivamente. Já a viga reforçada com laminado protendido (PRFS) resultou em F_{σ} , F_y e F_u de 60 kN, 170 kN e 217 kN, respectivamente, sendo a força de fissuração 233 % superior à obtida na viga RFS e 300 % da viga UFS,

demonstrando a eficiência do sistema com laminado protendido em condições de serviço, além de incrementos na força F_u .

Na Figura 42a são apresentados os diagramas Força *versus* deslocamento de tais vigas, sendo possível observar o incremento de rigidez à flexão e capacidade última que o FRP protendido proporciona. Assim como nos trabalhos anteriores, o FRP passivo apresentou modo de ruptura caracterizado pelo destacamento do material de reforço com uma deformação máxima no laminado de 6,39 ‰ e o destacamento do FRP protendido seguido de sua ruptura, com deformação máxima de 8,21 ‰, para a viga PRFS.

Figura 42 – Gráficos Força versus deslocamento das vigas ensaiadas por Peng *et al.* (2016)



Fonte: adaptado de Peng *et al.* (2016)

No que diz respeito ao ensaio à fadiga, a viga de referência (UF) e a com reforço passivo (RF) apresentaram modo de ruptura caracterizado por escoamento da armadura passiva, seguida pelo destacamento do material de reforço, para o caso da viga com reforço passivo após 192 mil e 658 mil ciclos de carregamento, respectivamente. Já as vigas reforçadas com FRP protendido (PRF1 e PRF2), após 2 ou 3 milhões de ciclos, foram submetidas a ensaio de flexão estático de modo a investigar a influência de eventuais danos no comportamento à flexão das vigas. Na Figura 42b é feita uma comparação direta entre os gráficos de Força *versus* deslocamento das vigas reforçadas com FRP protendido submetidas tanto ao ensaio estático como dinâmico.

Os autores constataram que a viga PRF1, submetida a um ciclo de pré-carregamento com força entre 10 e 55 kN, apresentou comportamento similar a viga que foi submetida apenas ao ensaio estático (PRFS) até o estágio de escoamento das armaduras. Entretanto, face aos danos causados com o ensaio dinâmico, a viga PRF1 apresentou uma menor rigidez à flexão. Em termos de capacidade última, ambas as vigas apresentaram modo de ruptura caracterizado pela ruptura do laminado de CFRP após descolamento parcial do material de reforço, porém, tal ruptura ocorreu sob um carregamento de 190 kN para a viga PRF1 e de

217 kN para a viga PRFS. Já a viga PRF2, submetida a um ciclo de pré-carregamento com forças entre 10 e 70 kN, sua capacidade no escoamento das armaduras foi 45 kN inferior à viga PFR1, assim como, o destacamento do laminado de CFRP ocorreu sob carregamento 25 % inferior, ocorrendo destacamento da ancoragem mecânica e ruptura da viga sob um carregamento de 135 kN.

De acordo com Peng *et al.* (2016) os resultados indicam que o ensaio à fadiga resultou em redução da rigidez e capacidade à flexão das vigas, sendo tal efeito amplificado quando são aplicados maiores níveis de solicitações nos ensaios dinâmicos. O desempenho à fadiga das vigas foi melhorado com a aplicação do sistema de reforço com FRP protendido, uma vez que reduziu as tensões nas armaduras passivas, evitando-se os modos de ruptura à fadiga observados nas vigas de referência não reforçada e reforçada com FRP passivo.

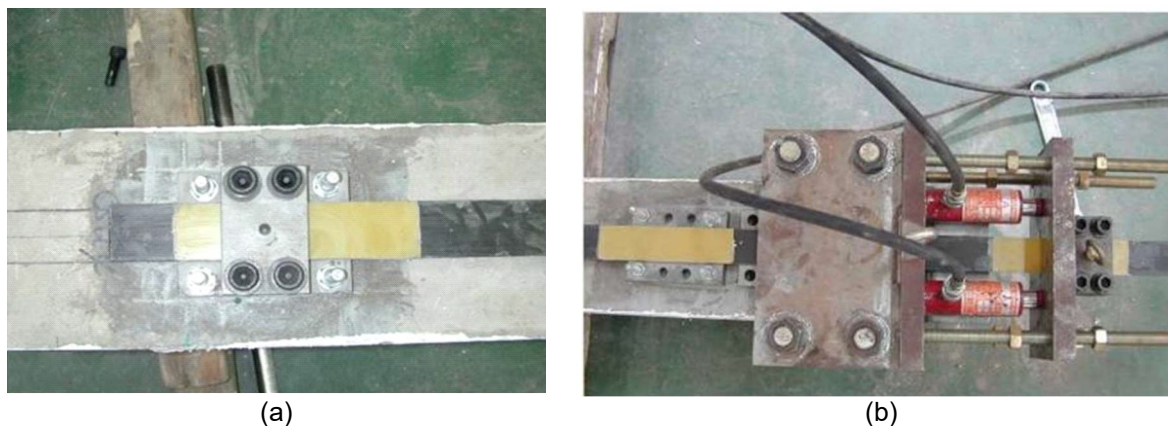
Hong e Park (2017) analisaram experimentalmente o comportamento à flexão de vigas de concreto armado reforçadas com FRP passivo e protendido aplicado segundo à técnica EBR. Para tanto, os autores ensaiaram dez vigas, sendo seis classificadas como de pequena escala, com comprimento de 270 cm, onde uma viga não foi reforçada (referência), uma foi reforçada com colagem externa passiva de laminado de CFRP e as demais reforçadas com o FRP protendido com diferentes níveis de protensão (0 %, 20 %, 40 % e 60 % da capacidade última do laminado). Das quatro vigas restantes, duas possuíam comprimento de 480 cm, média escala, e outras duas de 630 cm, larga escala, sendo todas reforçadas com FRP protendido variando-se o nível de protensão entre 40 % e 60%.

Em relação as vigas reforçadas com FRP protendido, os referidos autores optaram por não colar com resina epóxi o laminado de CFRP ao substrato, havendo um espaçamento entre o laminado e substrato com distância igual a espessura da placa metálica da ancoragem, sendo a ligação do material de reforço com o elemento conferido apenas pelos sistemas de ancoragens nas extremidades do laminado. Os sistemas de protensão e ancoragem utilizados por Hong e Park (2017) são apresentados nas Figuras 43a-b.

Na avaliação do modo de ruptura das vigas de pequena escala, Hong e Park (2017) observaram que a viga de referência (não reforçada) apresentou ruptura baseada no esmagamento do concreto, após o escoamento das armaduras, enquanto a viga reforçada com colagem passiva do laminado apresentou descolamento do laminado de CFRP. Já as vigas reforçadas com laminados protendidos, independente da escala, falharam pela ruptura do laminado, a qual ocorreu de forma brusca face a ausência de adesivo na interface laminado/substrato.

Entre as vigas de pequena escala, Hong e Park (2017) ensaiaram duas vigas reforçadas com FRP passivo, sendo uma reforçada segundo à técnica EBR, denominada SBB0, e outra ligada ao substrato somente pelas ancoragem mecânicas, denominada SBU0, equivalente ao FRP protendido com nível 0 % de protensão.

Figura 43 – Ancoragens passiva e ativa de sistema de FRP protendido adotado por Hong e Park (2017)



Fonte: Hong e Park (2017)

Comparando-se o comportamento das vigas, os referidos autores observaram que a viga SBB0 apresentou capacidades à fissuração do concreto e escoamento das armaduras superiores à viga SBU0, o que se deve ao fato do laminado estar colado ao substrato, resultando em distribuição de tensões nos materiais que não ocorre com a viga SBU0, esta que apresentou comportamento em serviço similar a viga de referência não reforçada. Entretanto, verificou-se capacidade última similar as vigas com FRP protendido para a viga SBU0. Tais resultados indicam que o laminado somente fixado pelas ancoragens tem baixo potencial de melhoria do comportamento em serviço do elemento reforçado, porém, possui alto potencial de aumento da capacidade última, similar a condição protendida.

Assim como nos trabalhos anteriores, Hong e Park (2017) observaram incrementos significativos de F_c , F_y e F_u para as vigas reforçadas com FRP protendido, assim como, aumento da rigidez à flexão, diminuição da ductilidade das vigas com o aumento do nível de protensão dos laminados e maiores níveis de deformação no material de reforço, já que deformações últimas de 6,85 % e 11,2 % foram observadas para o reforço passivo e protendido, respectivamente.

Ainda, os referidos autores verificaram que níveis de protensão equivalentes a até 40 % ou da tensão última do laminado resultam em um melhor aproveitamento do material de reforço e melhor ductilidade da viga reforçada, uma vez que em tais níveis de protensão tem-se uma melhor utilização do laminado na fase plástica da viga durante o ensaio de flexão.

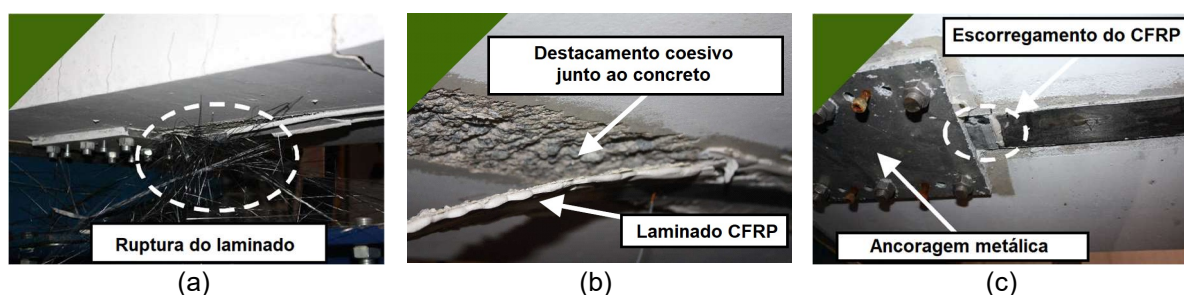
Em relação às vigas de média e larga escalas, Hong e Park (2017) observaram que as capacidades de fissuração do concreto, escoamento das armaduras e força máxima das vigas com maiores dimensões diminuíram em função do aumento do comprimento da viga e, conseqüentemente, do vão livre de ensaio, indicando que fatores de correção devem ser considerados no caso de estruturas reais (escalas maiores).

Sena-Cruz *et al.* (2017) analisaram faixas de laje de concreto armado ($60 \times 12 \times 260 \text{ cm}^3$) reforçadas à flexão com laminado de CFRP protendido ($50 \times 1,2 \text{ mm}^2$), avaliando-se o comportamento mecânico das lajes, variando-se o tipo de ancoragem (mecânica ou gradiente) e submetendo os elementos a diferentes tipos de exposições.

No referido experimento, os autores submeteram as faixas de laje, por um período de oito meses a ciclos de molhagem e secagem, com solução de água contendo 3,5 % de íons cloretos e em ambiente de laboratório com umidade e temperatura controlada. Em tal período de exposição, as faixas de laje também foram submetidas a carregamento correspondente a um terço de sua capacidade máxima. Foram ensaiadas vigas sem reforço, reforço com colagem passiva do laminado de CFRP e reforço com laminado de CFRP protendido, sem exposição aos diferentes ambientes citados, para as devidas comparações.

Como esperado, Sena-Cruz *et al.* (2017) observaram que o sistema de reforço com laminado de CFRP protendido resultou em aumento significativo da rigidez das elementos e diminuição dos deslocamentos medidos à meio do vão. Com relação ao modo de ruptura, os referidos autores constataram: (i) ruptura do laminado de CFRP para as faixas de laje reforçadas com laminado protendido e não expostas aos ambientes de degradação (Figura 44a); (ii) destacamento do laminado de CFRP para a laje reforçada por colagem passiva e em todas as lajes com sistema de ancoragem por gradiente (Figura 44b); e (iii) escorregamento do laminado junto a ancoragem metálica para as lajes submetidas ao período de exposição (Figura 44c).

Figura 44 – Modos de ruptura observados por Sena-Cruz *et al.* (2017)



Fonte: adaptado de Sena-Cruz *et al.* (2017)

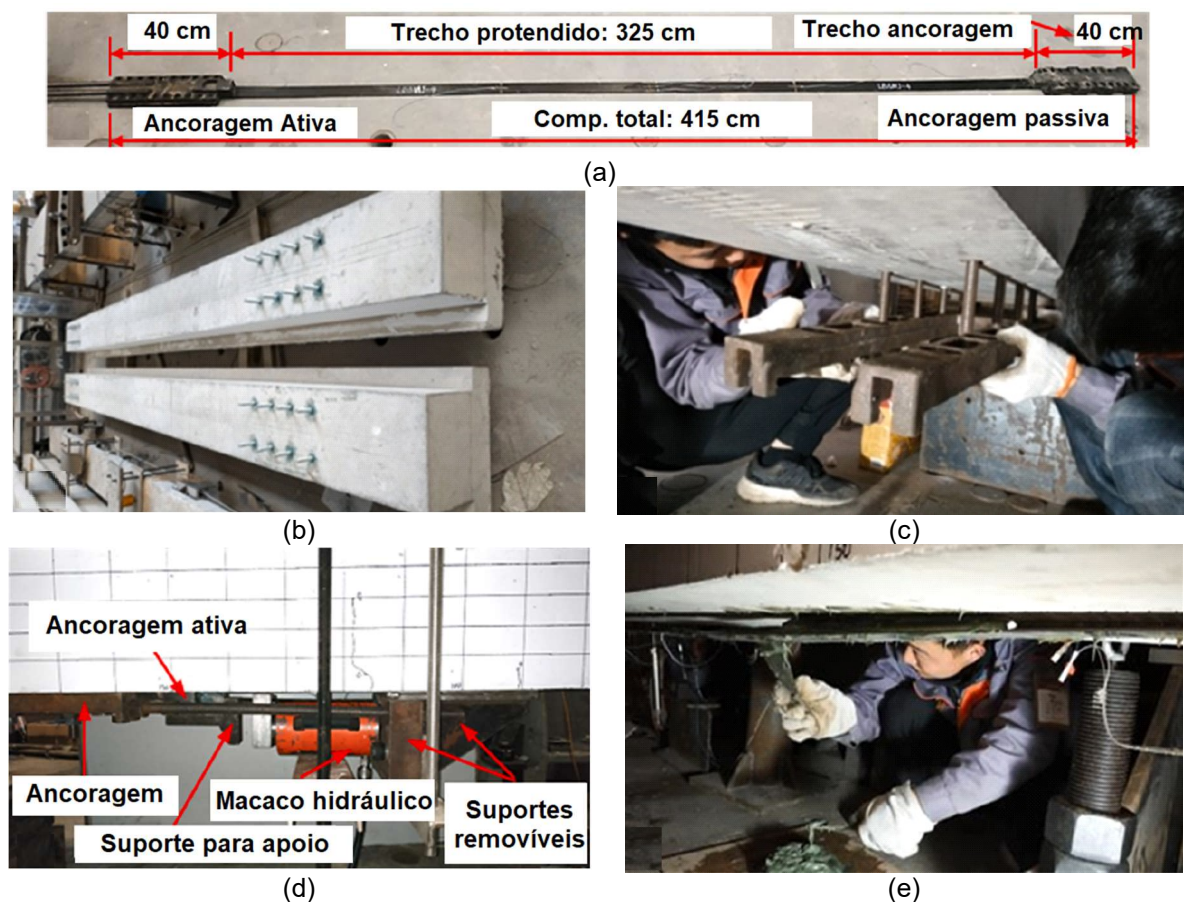
De acordo com Sena-Cruz *et al.* (2017), os dois tipos de sistema de ancoragem testados apresentaram comportamentos similares até o escoamento do aço. Além disso, verifica-se que a utilização de sistema de ancoragem mecânica nos sistemas de reforço com laminados de CFRP protendidos previne modos de ruptura frágeis. Ainda, os autores verificaram que as faixas de laje, após oito meses de exposição a ambiente controlado e com pré-carregamento aplicado, apresentaram diminuição em sua capacidade última, além de alteração em seu modo de ruptura, indicando que a combinação de ações de carregamentos

e exposições ambientais podem impactar significativamente no comportamento de elementos reforçados com laminados de CFRP protendidos.

Liu *et al.* (2021) conduziram programa experimental com nove vigas de concreto armado, sendo uma viga sem reforço (referência), uma com colagem passiva de laminado BFRP com ancoragens nas extremidades com manta CFRP em formato “U”, e demais vigas reforçadas com laminados protendidos de CFRP ou BFRP com ancoragens mecânicas metálicas, variando-se a espessura do laminado (2 ou 5 mm), taxa de armadura da viga (0,72 e 2,90 % da seção de concreto), nível de protensão (35 %, 45 % e 55 % da tensão última do laminado), com e sem aplicação de adesivo epóxi na interface laminado/viga.

O sistema de reforço com laminado de FRP protendido utilizado por Liu *et al.* (2021) é apresentado na Figura 45, com uma visão geral do sistema com suas dimensões (Figura 45a), o posicionamento dos chumbadores na face inferior das vigas (Figura 45b), a instalação dos suportes metálicos (Figura 45c), o detalhamento da ancoragem ativa, com indicação do macaco hidráulico e suportes removíveis (Figura 45d), e a aplicação da resina epóxi entre o laminado e o substrato de concreto (Figura 45e).

Figura 45 – Sistema de FRP protendido adotado por Liu *et al.* (2021)



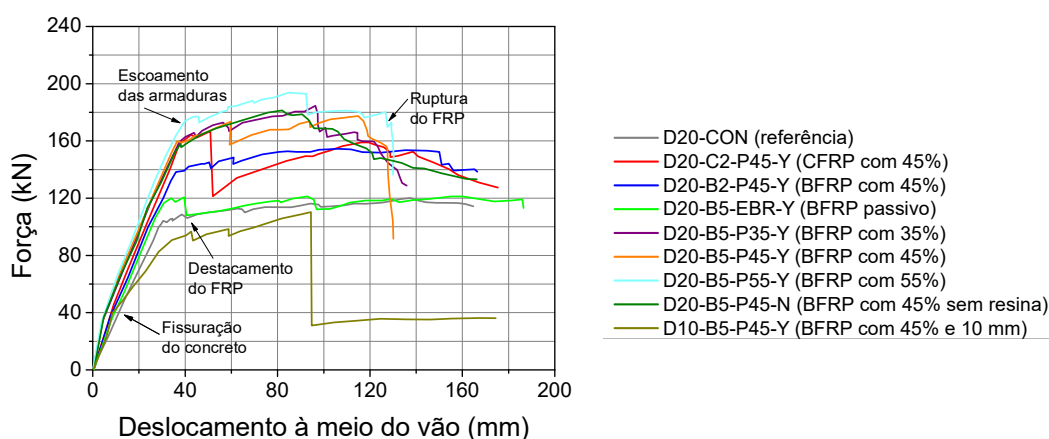
Fonte: adaptado de Liu *et al.* (2021)

Na análise do modo de ruptura, Liu *et al.* (2021) verificaram que a viga reforçada com laminado de CFRP passivo apresentou destacamento do material de reforço, enquanto a viga reforçada com laminado de BFRP passivo teve ruína baseada no escoamento das armaduras seguido do esmagamento do concreto, indicando que o laminado de BFRP confere uma melhor ductilidade e aderência ao substrato quando comparado com o laminado de CFRP. De acordo com os referidos autores, isso se dá pelo fato dos laminados de BFRP possuírem menor módulo de elasticidade, assim como, uma superfície mais rugosa, o que contribui em sua aderência ao substrato.

As vigas reforçadas com laminados protendidos tiveram ruptura caracterizadas pela ruptura total ou parcial do laminado após o escoamento das armaduras e esmagamento do concreto. Ainda, segundo os autores, constatou-se um maior nível de esmagamento do concreto nas vigas com reforço protendido, evidenciando o aproveitamento dos materiais com a protensão.

No que diz respeito à capacidade à flexão, de forma resumida, Liu *et al.* (2021) observaram que o reforço com laminado protendido resultou em maiores incrementos de capacidades resistentes e aumento da rigidez das vigas quando comparado com o reforço passivo, além de diminuir o deslocamento para mesmo níveis de carregamento, conforme o demonstrado nos diagramas Força *versus* deslocamento das vigas ensaiadas (Figura 46), sendo o valor entre parênteses na legenda referente a taxa de armadura do elemento.

Figura 46 – Diagramas Forças *versus* deslocamento das vigas ensaiadas por Liu *et al.* (2021)



Na comparação direta entre os sistemas de reforço protendido com laminados de BFRP e CFRP, constatou-se que a viga reforçada com laminado de BFRP atingiu 67 % e 90 % da forças F_{cr} e F_u , respectivamente, atingidas pela viga com o mesmo tipo de reforço com o laminado de CFRP, indicando menor incremento de capacidade do laminado de BFRP em relação ao de CFRP. Porém, uma melhor ductilidade foi observada com o laminado de BFRP.

Com relação a espessura dos laminados, a viga reforçada com laminado de BFRP protendido com 5 mm apresentou capacidade à flexão similar à viga reforçada com laminado de CFRP com 2 mm, indicando a capacidade do laminado de CFRP de fornecer maiores incrementos de força ao elemento reforçado com menores taxas de materiais. No que diz respeito ao nível de protensão aplicados nos laminados, diferentemente do observado em outros estudos com laminado de CFRP, o aumento do nível de protensão com o laminado de BFRP resultou em maior capacidade à flexão com maiores deslocamentos verticais, entretanto, a ductilidade final da viga continua a ser reduzida com o aumento da força de protensão.

Ainda, Liu *et al.* (2021) constataram que com a aplicação de adesivo na interface laminado e substrato o comportamento à flexão foi similar ao da viga com laminado protendido não aderido. Entretanto, observou-se que com a aplicação do adesivo houve uma melhor distribuição de fissuras e um leve aumento da rigidez dos elementos reforçados.

Deng *et al.* (2021) realizaram programa experimental com onze vigas de concreto armado reforçadas à flexão com laminado de CFRP protendido, variando-se e combinando-se diferentes níveis de protensão, ambientes de exposição (seco e úmido) e níveis de pré-fissuração, de modo a analisar o efeito da degradação dos laminados no comportamento das vigas reforçadas. Os autores ensaiaram vigas de seção retangular ($15 \times 30 \times 280 \text{ cm}^3$) à flexão por 4 pontos, sendo que as vigas foram ensaiadas após um ano de exposição a diferentes climas de exposição.

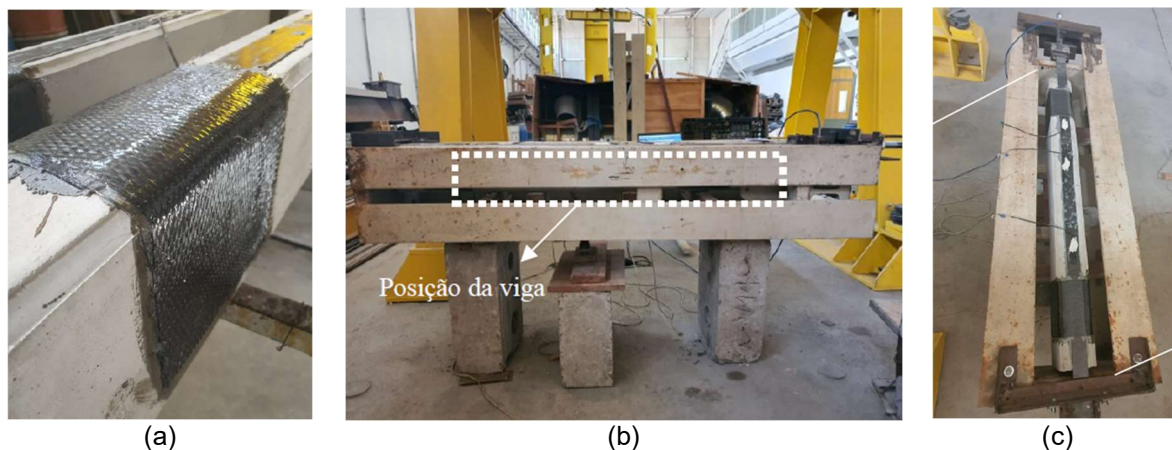
De forma resumida, Deng *et al.*, (2021) observaram que as vigas submetidas a pré-fissuração e umidade apresentaram redução considerável na força de fissuração quando comparadas com as vigas de referência mantidas em ambientes secos e sem pré-fissuração, sendo que não houve redução significativa para as forças de escoamento das armaduras e força última das vigas para as condições analisadas. Verificou-se, também, que os deslocamentos das vigas aumentaram levemente com a exposição das vigas ao ambiente úmido.

Pessi (2022) conduziu estudo com vigas de concreto armado em pequena escala, reforçadas à flexão segundo à técnica EBR com laminados de CFRP com e sem protensão. Para tanto, a referida autora ensaiou oito vigas, as quais foram divididas nos seguintes grupos: referência (não reforçada), com reforço passivo sem ancoragem; com reforço passivo com ancoragem não metálica; e com reforço protendido com ancoragem não metálica.

Na Figura 47a é apresentada a ancoragem não metálica utilizada por Pessi (2022), a qual se caracteriza pela aplicação de manta de CFRP em formato “U” nas extremidades das vigas, sem placas metálicas e chumbadores. Nas Figuras 47b-c é apresentado o sistema de protensão, o qual conta com estrutura de reação externa ao elemento reforçado, sendo a força de protensão aplicada no laminado de CFRP por meio de barras rosqueadas e medida com o

uso de célula de carga. O nível de protensão utilizado foi de 4,61 % da tensão à tração última do laminado face a limitação da barra roscada utilizada.

Figura 47 – Sistemas de protensão e ancoragem utilizados por Pessi (2022)



Fonte: Pessi (2022)

Em termos de capacidade última, Pessi (2022) constatou que as vigas com reforço passivo sem ancoragem não apresentaram incrementos de capacidade à flexão, assim como, apresentaram deformação máxima no laminado de apenas 2,0 %. Já com o reforço passivo com ancoragem não metálica observou-se um incremento na capacidade última de 47,5 % em relação à viga de referência, com deformação máxima do laminado de 4,5 %, indicando um melhor aproveitamento dos materiais proporcionado pela ancoragem nas extremidades do laminado.

Em relação as vigas reforçadas com FRP protendido, Pessi (2022) observou capacidades últimas similares às vigas com reforço passivo com ancoragem não metálica, com incremento de 48,2 % em relação à viga de referência, entretanto, com deformação máxima no laminado de 4,66 %, indicando que a protensão não resultou em maior aproveitamento/solicitação do material de reforço para o caso analisado, sendo indicado pela referida autora estar relacionado ao baixo nível de protensão aplicado no laminado de CFRP, limitação do dispositivo utilizado e baixa resistência à compressão do concreto das vigas do estudo.

Assim como nos trabalhos anteriormente estudados, Pessi (2022) também constatou aumento da rigidez à flexão e retardamento do surgimento de fissuras com a aplicação dos sistemas de reforço protendido. Por fim, também foram observadas redução da ductilidade das vigas reforçadas com laminado de CFRP protendido.

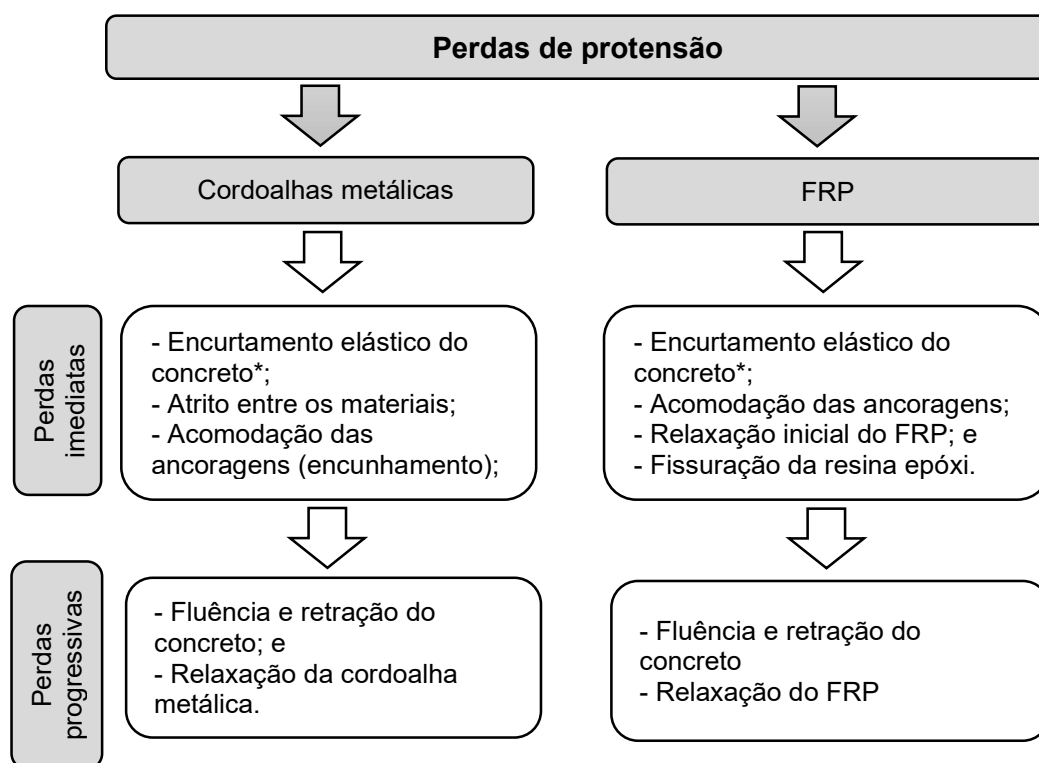
2.7 PERDAS DE PROTENSÃO COM FRP PROTENDIDO

De acordo com Wang *et al.* (2012), em sistemas de reforço com FRP protendidos, as perdas de protensão imediatas podem ocorrer devido ao encurtamento elástico do concreto, ao escorregamento/acomodação do material de reforço junto ao sistema de ancoragem e atrito entre os materiais.

Os referidos autores destacam que, embora as perdas imediatas de um sistema de FRP protendido sejam análogas às perdas observadas nos sistemas com cordoalhas metálicas, estas não ocorrem instantaneamente ao ato da protensão face a natureza da resina epóxi utilizada na colagem do FRP, podendo ocorrer nas primeiras horas após a aplicação do sistema perdas não imediatas devido a relaxação inicial do FRP e fissuração da resina de colagem nas regiões de ancoragem durante o processo de cura.

Já as perdas de protensão progressivas no reforço com FRP protendido, similar ao que ocorre na protensão com cordoalha metálicas, são provenientes da retração e fluência do concreto e relaxação do FRP ao longo da vida útil do sistema (WANG *et al.*, 2012). Na Figura 48 é apresentada de forma resumida os tipos e perdas de protensão que ocorrem em sistemas de reforço estrutural com protensão externa com a utilização de cordoalhas metálicas e FRP.

Figura 48 – Comparação de perdas de protensão em sistemas com cordoalhas metálicas e FRP protendido



*perdas por encurtamento elástico do concreto ocorrem para os casos de aplicação de protensão em mais de um etapa

Fonte: Próprio Autor

Diferentes estudos disponíveis na literatura já analisaram as perdas de protensão que ocorrem em sistemas de FRP protendido aplicados em elementos de concreto armado.

Wang *et al.* (2012) realizaram ensaio de relaxação em corpos de provas (CP) de mantas de CFRP saturadas com resina epóxi, realizando-se ensaio de tração axial nos referidos CPs com aplicação de forças constantes da ordem de 40 %, 48 % e 56 % de sua capacidade última, equivalentes a níveis de protensão adotados em sistema de reforço com FRP protendido. Os CPs foram mantidos em ambiente com temperatura e umidade controladas pelo período de 2500 horas.

Os resultados dos ensaios indicaram redução na força de tração inicialmente aplicada de até 2,2 %, 5,9 % e 6,6 % para os níveis de protensão 40 %, 48 % e 56 % respectivamente, devido a relaxação do compósito de CFRP, condição que, segundo os referidos autores, se dá pela relaxação da resina epóxi e acomodação ou endireitamento das Fibras durante a aplicação da tração. Ainda, foram observadas perdas de tensões maiores para níveis de protensão mais elevados, assim como, verificou-se que a maior parte das perdas de protensão ocorrem nas primeiras 100 horas de exposição do sistema.

Wang *et al.* (2012) também analisaram as perdas de protensão em vigas de concreto armado reforçadas com FRP protendido, definindo as perdas iniciais aquelas ocorridas nas primeiras 72 horas após a aplicação do reforço, e as perdas progressivas ocorridas entre 72 e 2500 horas. Foram analisadas vigas com FRP protendido com diferentes níveis de protensão e taxa de material de reforço nas vigas, mantidas em ambiente controlado.

Por meio do monitoramento das deformações na manta de CFRP foram constatadas perdas imediatas de 12,6 % a 18,2 %, a depender da taxa de material de reforço e nível de protensão do FRP. De acordo com os referidos autores, perdas devido ao atrito entre os materiais podem ser desconsideradas em função da utilização da resina epóxi, assim como, perdas devido ao encurtamento elástico do concreto também podem ser desprezadas para o caso do FRP protendido com apenas um laminado, sendo relevante apenas quando se tem dois ou mais laminados/mantas protendidos de forma não simultânea. Esta última condição também é indicada para a protensão com cordoalhas metálicas por Cholfe e Bonilha (2018, p. 163) e para o FRP protendido por Garcez (2007, p. 81).

Logo, para os casos de reforço com FRP protendido em única protensão, as perdas imediatas registradas se devem exclusivamente pela acomodação do FRP no sistema de ancoragem. Ainda, Wang *et al.* (2012) constataram que tais perdas podem ser mitigadas se a cura da resina ocorrer antes da transferência dos esforços de protensão ao elemento reforçado.

Já em relação às perdas progressivas, Wang *et al.* (2012) constataram que, similar ao observado nos ensaios dos CPs das mantas CFRP, a relaxação do material de reforço foi maior nas primeiras 100 horas de exposição das vigas, sendo obtidas perdas na força de

protensão, após 2500 horas de exposição das vigas, da ordem 3,6 % para o nível de protensão de 40 %. A perda adicional observada na viga, quando comparada com o CP de manta CFRP, de acordo com os referidos autores, se dá pela fissuração da resina entre a manta e o concreto, a qual está submetida à elevadas tensões devido a protensão do elemento. Os autores descartaram perdas progressivas devido à fluência e retração do concreto face à exposição das vigas à ambiente controlado.

Sena-Cruz *et al.* (2017) analisaram faixas de laje de concreto armado reforçadas à flexão com laminado de CFRP protendido, avaliando-se o comportamento estrutural das lajes, variando-se o tipo de ancoragem (mecânica ou gradiente) e submetidas a diferentes tipos de exposições.

Por meio do monitoramento das deformações nos laminados de CFRP com a utilização de extensômetros, Sena-Cruz *et al.* (2017) observaram perdas imediatas no ato da protensão, relativamente similares para os dois tipos de ancoragem adotados, com a perda média de 2,7 % da força de protensão aplicada nas faixas de laje.

Correia (2018) analisou o comportamento estrutural de faixas de laje de concreto armado, reforçadas à flexão com FRP protendido, expostas a diferentes ambientes e pré-fissuração. De acordo os resultados obtidos experimentalmente pelo referido autor, as perdas imediatas constatadas foram da ordem de 2,5 %, proveniente diretamente do sistema de protensão utilizado, uma vez que as perdas por atrito deformação elástica do concreto foram desprezadas pelos autores.

Com relação às perdas progressivas, Correia (2018) observou maiores valores de deformação no laminado de CFRP para as faixas de laje expostas a saturação e ciclos de molhagem e secagem. Entretanto, de maneira geral, foram observadas pequenas variações de tensão no laminado de CFRP, podendo até mesmo serem desprezadas.

Segundo Costa (2014), a literatura e estudos experimentais indicam que a relaxação de laminados de FRP a longo prazo não é um fator relevante. De acordo com a referida autora, devido os laminados serem industrializados e passarem por um controle de qualidade mais preciso em sua fabricação, quando comparado com as mantas/tecidos moldados *in loco*, estes apresentam melhores distribuições de materiais (Fibras e resinas), resultando em um alto volume de Fibras e uma porção pequena de adesivo, e insignificantes excentricidades das Fibras, o que ajuda a controlar a relaxação do material.

Li *et al.* (2021) analisaram, por meio de um programa experimental, as perdas imediatas e progressivas em vigas de concreto armado reforçadas à flexão com sistema de laminados protendidos de CFRP variando-se o nível de protensão aplicado (20 e 40 % da capacidade última do laminado), nível de pré-carregamento aplicado (94 e 120 kN) e exposição a ambientes secos e úmidos. No referido experimento foram ensaiadas vigas de concreto armado de 16x30x280cm³, utilizados laminados de CFRP com 3 mm de espessura,

5 cm de largura e 130 cm de comprimento e sistema de ancoragem metálica, este fixado à viga por meio de chumbadores. Além das ancoragens, a superfície do substrato das vigas foi preparada e o laminado colado com a utilização de resina epóxi.

Li *et al.* (2021) classificaram as perdas de protensão como imediatas, no ato da aplicação, e iniciais, aos 28 dias após a aplicação. As perdas foram monitoradas por meios de extensômetros instalados na superfície do laminado de CFRP.

Em relação às perdas imediatas, o encurtamento imediato do concreto foi descartado pelos referidos autores, os quais justificaram uma cura apropriada das vigas antes da aplicação do reforço. O atrito entre o laminado e o substrato também não foi considerado uma vez que o adesivo evitar um atrito direto entre os materiais no ato da protensão. Logo, foram consideradas apenas perdas imediatas referente a acomodação do sistema de ancoragem, as quais apresentaram valores médios de 3,44 % e 7,16 %, para os níveis de protensão de 20 % e 40%, respectivamente. Tais resultados indicam que a perda de protensão devido a acomodação do sistema de ancoragem tende a ser maior com o aumento do nível de protensão aplicado no laminado.

Com relação às perdas de protensão iniciais, até 28 dias de idade das vigas, Li *et al.* (2021) constataram perdas de 2,88 % à meio vão do laminado e 5,76% em suas extremidades para o nível de protensão de 40 %. Para o nível de protensão de 20 % foram observadas perdas de 2,71 % e 5,15 % à meio vão e extremidades do laminado, respectivamente. De acordo com os referidos autores, os resultados indicaram que o nível de protensão possui menor impacto nas perdas iniciais, assim como, maiores perdas ocorrem junto ao sistema de ancoragem face ao escorregamento entre o laminado e os dispositivos metálicos, uma vez que à meio vão o adesivo contribui para controlar a deformação do material.

Após os 28 dias de idade, Li *et al.* (2021) submeteram as vigas a diferentes carregamentos e exposição a ambientes úmidos ou secos por 170 dias para avaliação das perdas progressivas da força de protensão. Os autores constataram perdas máximas de 3,59 % e 3,97 % nas extremidades dos laminados de CFRP para vigas com níveis de protensão de 20 % e 40 %, respectivamente. Tais resultados indicaram que as perdas progressivas apresentam valores inferiores às perdas imediatas e iniciais, demonstrando, para o caso em questão, que os sistemas de reforço com laminados de CFRP pretendido apresentam bom desempenho a longo prazo.

Em seu estudo experimental com vigas de concreto armado reforçadas à flexão com laminado de CFRP protendido, Wang *et al.* (2022) monitoraram por 48 horas variações de deformações no laminado, antes e após a remoção do cilindro hidráulico, com o objetivo de constatar eventuais perdas iniciais e imediatas no sistema de reforço. Para o caso em questão, os autores constataram que as maiores variações de deformações ocorreram nas primeiras 12 horas e resultaram em perdas de protensão inferiores à 5 %, confirmando a

eficiência do sistema de ancoragem adotado, o qual utilizou cunhas para o travamento das extremidades do laminado nas ancoragens mecânicas metálicas.

Pessi (2022), em seu estudo experimental com vigas em pequena escala, reforçadas com laminado de CFRP protendido, com sistema de protensão externa a viga e ancoragem não metálica, verificou perdas iniciais da ordem de 10,6 %, as quais foram registradas pelo monitoramento realizado nas primeiras 68 horas após a protensão do laminado.

Tendo em vista os trabalhos acima discutidos, os quais analisaram as perdas de protensão observadas experimentalmente em sistemas de reforço com FRP protendido em elementos de concreto armado, a Tabela 6 apresenta um compilado dos resultados obtidos nos diferentes estudos analisados.

Analisando-se as perdas de protensão indicadas na Tabela 6, assim como o destacado por Wang *et al.* (2012), os resultados indicam que as perdas imediatas são mais significativas que as perdas progressivas, e as perdas totais de protensão (imediatas e progressivas) do sistema de reforço com FRP protendido são da ordem de 20 %. Entretanto, os referidos autores destacam a necessidade de se avançar no estudo sobre o tema.

Tabela 6 – Resumo das perdas de protensão observadas nos trabalhos analisados

| Estudo | Perdas de protensão observadas (%) | |
|--------------------------------|------------------------------------|--------------|
| | imediatas | progressivas |
| Wang <i>et al.</i> (2012) | 12,6 a 18,2 | 3,6 |
| Sena-Cruz <i>et al.</i> (2017) | 2,7 | - |
| Correia (2018) | 2,5 | - |
| Li <i>et al.</i> (2021) | 8,59 a 12,92* | 3,59 a 3,97 |
| Wang <i>et al.</i> (2022) | 5 | - |
| Pessi (2022) | 10,6 | |

* somadas as perdas imediatas e iniciais

De acordo com Garcez (2007, p. 181), em sistemas de protensão com cordoalhas metálicas, as perdas totais de protensão são da ordem de 15 a 20 %. Logo, para os estudos acima citados, as perdas totais de protensão observadas se apresentam similares as perdas comumente observadas em cordoalhas metálicas.

A norma NBR 6118 (ABNT, 2023), em seu item 9.6.3.3, define rotinas de cálculo das perdas imediatas e progressivas para elementos de concreto protendido com cordoalhas metálicas. Para as perdas imediatas devido ao encurtamento imediato do concreto e por atrito, são definidas Equações no referido item da norma. Entretanto, para as perdas relacionadas a acomodação da ancoragem, a norma recomenda adotar valores obtidos experimentalmente ou fornecidos pelos fabricantes dos dispositivos de ancoragens.

Já as perdas progressivas podem ser calculadas por método simplificado proposto pela NBR 6118 (ABNT, 2023), o a qual considera a interação entre a fluência e retração do concreto e relaxação da armadura.

Para os casos de sistemas de reforço com FRP protendido pode-se adaptar às rotinas de cálculos das perdas de protensão propostas pela NBR 6118 (ABNT, 2023). Para tanto, faz-se necessário definir valores para a acomodação do FRP nas ancoragens e coeficientes de relaxação do FRP ao longo do tempo.

2.8 MODELOS DE DIMENSIONAMENTO

Para o dimensionamento de estruturas de concreto armado, em âmbito nacional, têm-se como referência principal a norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2023), a qual estabelece os critérios e requisitos para atendimento aos estados-limites últimos (ELU) e os estados-limites em serviço (ELS). Já no âmbito internacional, pode-se destacar a norma norte americana ACI 318 (2019) do *American Concrete Institute*.

No que diz respeito aos sistemas de reforço estrutural com a colagem externa passiva de FRP, os critérios e requisitos de dimensionamento são preconizados pelas normas norte americana ACI PRC-440.2 (2023) e a europeia *Fib Bulletin 90* (2019).

Embora as duas últimas normas supracitadas tratem dos conceitos de sistema de reforço com a colagem externa de FRP, os critérios e requisitos de dimensionamento de sistemas de reforço com FRP protendido, objeto da presente pesquisa, não são abordados em tais documentos.

Isto posto, no presente trabalho serão considerados e combinados diferentes modelos de dimensionamento propostos na literatura e em normas e recomendações técnicas inerentes, de modo a definir uma rotina de dimensionamento de reforço à flexão em elementos de concreto armado com aplicação de FRP protendido.

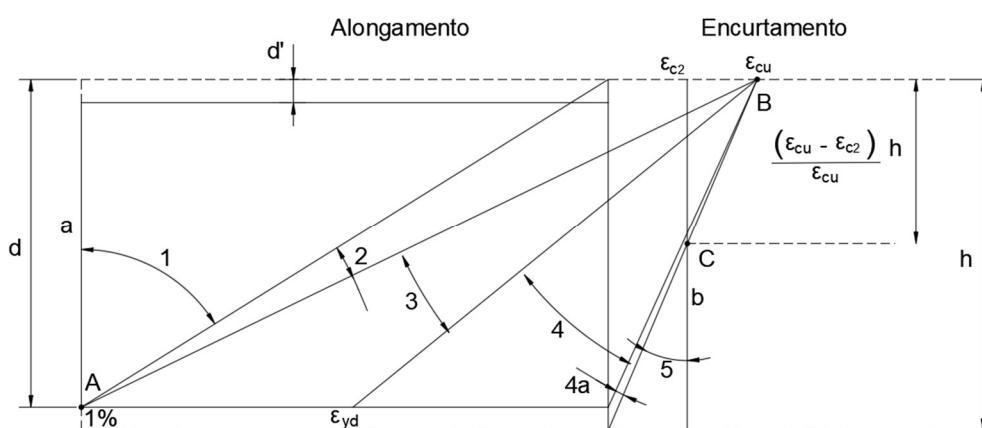
A seguir, são apresentadas as rotinas de cálculo adotadas para o dimensionamento de vigas de concreto armado não reforçadas e reforçadas à flexão com FRP passivo e protendido. Importante destacar que nas rotinas de dimensionamento apresentadas a seguir, pretende-se determinar exclusivamente a capacidade última à flexão das vigas tendo como base a geometria, armaduras e características de materiais pré-estabelecidas.

2.8.1 DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO SEGUNDO A NBR 6118 (ABNT, 2023)

Para o dimensionamento de elementos lineares de concreto armado como vigas, a norma NBR 6118 (ABNT, 2023) estabelece as seguintes hipóteses de cálculo: (i) seções transversais se mantêm planas após a deformação, conforme princípio de Bernoulli; (ii) as

deformações nas barras passivas são as mesmas do concreto em seu entorno; (iii) as tensões de tração no concreto, normais às seções transversais, devem ser desprezadas no ELU; (iv) pode-se adotar um diagrama parábola-retângulo na distribuição de tensões no concreto; (v) as tensões nas armaduras são obtidas por meio dos diagramas tensão-deformação; e (vi) o ELU é caracterizado quando as distribuições das deformações na seção transversal do elemento pertencem a um dos domínios apresentados na Figura 49.

Figura 49 – Domínios de estado-limite último de uma seção transversal, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2023)



Fonte: adaptado de NBR 6118 (ABNT, 2023)

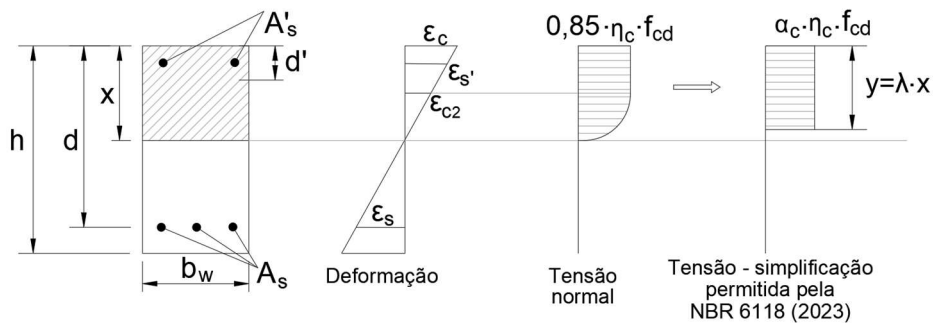
Na Figura 49, a reta vertical “a” se refere à tração uniforme, enquanto o domínio 1 à tração não uniforme, ambos sem esforços de compressão. O domínio 2 se refere a uma flexão simples ou composta, não ocorrendo a ruptura do concreto à compressão. No domínio 3 ocorre a flexão simples ou composta considerando a ruptura do concreto à compressão, com o escoamento do aço. O domínio 4 ocorre flexão simples ou composta com a ruptura do concreto à compressão, porém sem o escoamento do aço. Já no domínio 4a se refere à flexão composta com armaduras comprimidas. No domínio 5 ocorre a compressão não uniforme sem tração, enquanto a reta “b” se refere a compressão uniforme, também sem tração.

Definidas as hipóteses de cálculo e domínios de deformação, o dimensionamento é realizado a partir do equilíbrio das reações atuantes na seção transversal da viga, realizando-se o equilíbrio de forças normais e de momentos fletores. A Figura 50 apresenta o equilíbrio de tensões e deformações em uma seção transversal, onde considera-se um diagrama retangular simplificado de distribuição de tensões à compressão no concreto, assim como, desconsiderada a sua resistência à tração.

De acordo a norma NBR 6118 (ABNT, 2023), as vigas de concreto armado devem apresentar comportamento dúctil, sendo que a posição da linha neutra deve se situar nos domínios 2 ou 3, de modo que o escoamento da armadura provoque fissuras no concreto,

evitando-se ruptura frágil, ou seja, sem aviso prévio, a qual está associada à posições de linhas neutras no domínio 4.

Figura 50 – Equilíbrio de forças normais em uma seção transversal segundo a NBR 6118 (ABNT, 2023)



Fonte: adaptado de NBR 6118 (ABNT, 2023)

Uma vez conhecidas as áreas de armadura, geometria da seção transversal, definidos as características dos materiais utilizados (aço e concreto) e, considerando-se armadura simples e escoamento das armaduras, a posição da linha neutra (λ) pode ser determinada por meio da Equação 1.

$$x = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{\alpha_c \cdot \eta_c \cdot f_{cd} \cdot \lambda \cdot b_w} \quad (1)$$

Na Equação 1, A_s é a área de armadura, f_{yd} é a tensão ao escoamento de cálculo do aço, α_c vale 0,85 para concreto com resistência de até 50 MPa, η_c vale 1,0 para concreto com resistência de até 40 MPa, f_{cd} é a resistência à compressão de cálculo do concreto, λ vale 0,80 para concreto com resistência de até 50 MPa, b_w é a largura da seção transversal da viga, conforme NBR 6118 (ABNT, 2023).

Determinada a posição da linha neutra, com base nos diagramas da Figura 49, determina-se do domínio de deformação do elemento e verifica-se se a condição de que as armaduras escoam, inicialmente imposta, é válida. Após, o momento fletor resistente da seção pode ser obtido por meio do equilíbrio dos blocos comprimido e tracionado, conforme Equações 2 e 3, respectivamente.

$$M_{rc} = \alpha_c \cdot \eta_c \cdot f_{cd} \cdot \lambda \cdot b_w \cdot x \cdot \left(d - \frac{\lambda \cdot x}{2} \right) \quad (2)$$

$$M_{rt} = A_s \cdot f_{yd} \cdot \left(d - \frac{\lambda \cdot x}{2} \right) \quad (3)$$

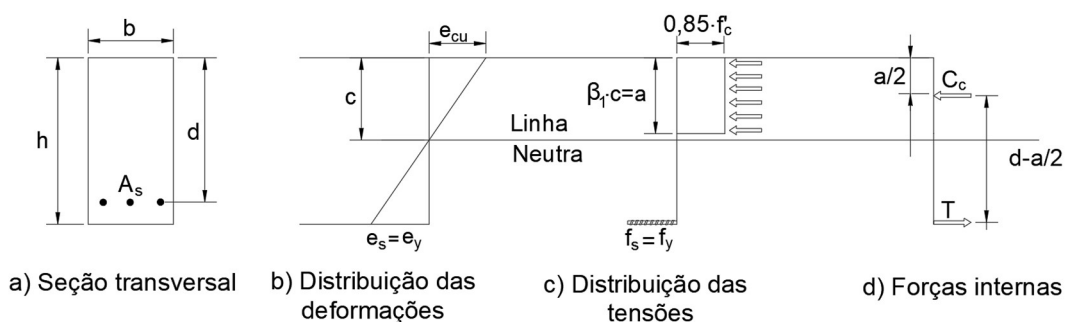
Nas Equações 2 e 3, d é altura útil da seção transversal da viga. Em relação aos valores de cálculos das resistências do concreto e do aço, os valores característicos devem ser reduzidos por coeficientes definidos na norma NBR 6118 (ABNT, 2023), sendo em combinações normais, 1,4 para o concreto (γ_c) e 1,15 para o aço (γ_s).

2.8.2 DIMENSIONAMENTO À FLEXÃO SEGUNDO A ACI 318 (2019)

A norma técnica norte americana ACI 318 (2019) estabelece os requisitos e critérios mínimos de dimensionamento, materiais e detalhamento de estruturas de concreto armado. Na referida norma, são estabelecidas as seguintes condições e hipóteses para dimensionamento de vigas sujeitas a esforços de flexão e forças axiais: (i) equilíbrio e compatibilização de tensões; (ii) a máxima deformação no concreto à compressão deve ser igual a 3 ‰; (iii) a resistência à tração do concreto deve ser desconsiderada; e (iv) a relação entre a tensão de compressão e a deformação pode ser representada por um diagrama retângulo, trapézio ou parábola.

Assim como a norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2023), a norma norte americana também permite simplificação da distribuição de tensões no concreto, com uso de diagrama retangular equivalente. Na Figura 51 estão apresentadas a seção transversal de uma viga de concreto armado com as distribuições de deformações, tensões e equilíbrio das forças internas, respectivamente.

Figura 51 – Diagrama retangular equivalente, segundo a ACI 318 (2019)



Fonte: adaptado de Dalfré, Parsekian e Ferreira (2019)

O dimensionamento é realizado com base nos diagramas da Figura 51, onde o coeficiente β_1 é determinado pela Equação 4, conforme o indicado na norma ACI 318 (2019).

$$\begin{aligned}
 & 0,85 \rightarrow f'_c \leq 28 \text{MPa} \\
 \beta_1 = 0,85 \cdot \beta_1 = 0,85 - \frac{0,05 \cdot (f'_c - 28 \text{MPa})}{7 \text{MPa}} & \rightarrow 28 \text{MPa} < f'_c < 55 \text{MPa} \\
 & 0,65 \rightarrow f'_c \geq 55 \text{MPa}
 \end{aligned} \tag{4}$$

Na Equação 4, $\beta_1 = a/c$, conforme mostrado na Figura 51, e f'_c é a resistência característica do concreto à compressão e, a profundidade da linha neutra C pode ser determinada por meio da Equação 5.

$$\beta_1 \cdot c = \frac{A_s \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot b} \tag{5}$$

Na Equação 5, A_s é a área de armadura da seção transversal, f_y é a tensão de escoamento característica do aço, e b é a largura da seção transversal da viga. Determinada a profundidade da linha neutra, a deformação do aço ε_s é calculada pela Equação 6, e a deformação do início do escoamento do aço ε_{sy} pela Equação 7, onde d é a altura útil da viga, ε_u é a deformação última do concreto definida em 3‰, e E_s é o módulo de elasticidade do aço, determinado em 200 GPa, segundo a ACI 318 (2019).

$$\varepsilon_s = \left(\frac{d-c}{c} \right) \cdot \varepsilon_{cu} \tag{6}$$

$$\varepsilon_{sy} = \frac{f_y}{E_s} \tag{7}$$

Para a situação em que há o escoamento do aço, o momento fletor resistente do bloco de tração é calculado pela Equação 8.

$$M_n = A_s \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) \tag{8}$$

Diferentemente da norma brasileira, na norma norte americana o dimensionamento é realizado com os valores característicos das resistências e ações, sendo tais valores ponderados apenas no final do cálculo. O momento fletor resistente de cálculo (M_u) é obtido aplicando-se o coeficiente de redução ϕ , conforme o apresentado na Equação 9.

$$M_u = M_n \cdot \phi \tag{9}$$

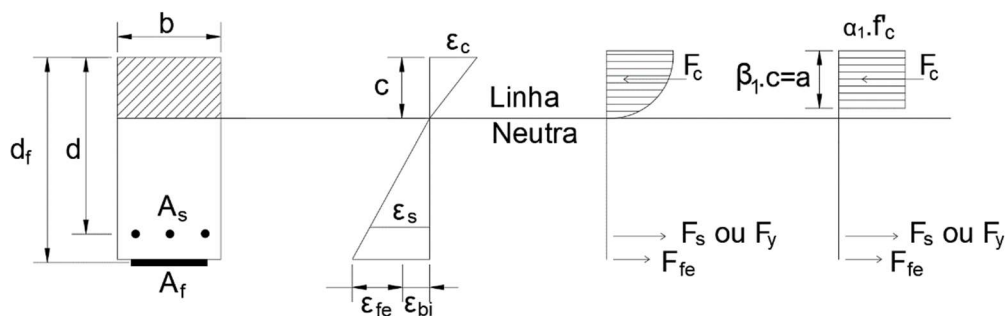
O coeficiente de redução ϕ pode ser calculado por meio da Equação 10, o qual é calculado em função da deformação no aço. Nota-se na Equação abaixo que o fator de redução da resistência do elemento aumenta com a diminuição da deformação no aço, o que está associado a ductilidade do elemento, de modo a evitar sua ruptura frágil.

$$\phi = \begin{cases} 0,90 \rightarrow \varepsilon_s \geq 0,005 \\ 0,65 + \frac{0,25 \cdot (\varepsilon_s - \varepsilon_{sy})}{0,005 - \varepsilon_{sy}} \rightarrow \varepsilon_{sy} < \varepsilon_s < 0,005 \\ 0,65 \rightarrow \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy} \end{cases} \quad (10)$$

2.8.3 DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO À FLEXÃO COM FRP SEGUNDO A ACI PRC-440.2 (2023)

Assim como nas rotinas de dimensionamento apresentadas nos subitens anteriores, a capacidade à flexão da seção transversal de um elemento de concreto armado reforçado à flexão com FRP é determinada por meio da compatibilidade de deformações e o equilíbrio das forças internas, considerando-se agora o material de reforço e controlando-se o modo de ruína do elemento, conforme diagramas apresentados na Figura 52.

Figura 52 – Diagrama retangular equivalente



Fonte: adaptado de ACI PRC-440.2 (2023).

De acordo com a ACI PRC-440.2 (2023) são consideradas as seguintes hipóteses de dimensionamento: (i) é necessário o conhecimento das características do elemento a ser reforçado (geometria, arranjo das armaduras e propriedades dos materiais); (ii) seções planas permanecem planas após a aplicação de carregamentos (princípio de Euler-Bernoulli); (iii) deformação máxima de compressão no concreto de 3 ‰; (iv) a resistência à tração do concreto é desprezada; (v) considera-se diagrama tensão *versus* deformação do aço elástico linear até o escoamento da armadura e após, comportamento plástico perfeito; (vi) comportamento do FRP elástico linear até sua ruptura; e (vii) tensões de cisalhamento na camada de adesivo são desprezadas.

A deformação inicial do concreto na Fibra mais tracionada, ε_{bi} , frente as cargas permanentes atuantes no ato do reforço, pode ser determinada por meio da Equação 11.

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL} \cdot (d_f - k \cdot d)}{I_{cr} \cdot E_c} \quad (11)$$

Na Equação 11, M_{DL} é o momento fletor provenientes dos carregamentos permanentes, d_f é a altura útil do reforço em relação ao centro de gravidade da viga, d é a altura útil da armadura, e E_c é módulo de elasticidade do concreto, determinado segundo a ACI 318 (2019). Ainda na Equação 11, o coeficiente k e o momento de inércia da seção uniformizada I_{cr} são determinados pelas Equações 12 e 13, respectivamente.

$$k \cdot d = \frac{(\sqrt{2 \cdot d \cdot B + 1} - 1)}{B} \quad (12)$$

$$I_{cr} = \frac{b \cdot k^3 \cdot d^3}{3} + n \cdot A_s \cdot (d - k \cdot d)^2 \quad (13)$$

Nas Equações 12 e 13, b é a largura da seção transversal e A_s é a área de armadura da seção transversal. Ainda, os coeficientes B e n são calculados por meio das Equações 14 e 15, respectivamente, onde E_s é o módulo de elasticidade do aço, que pode ser determinado segundo a ACI 318 (2019).

$$B = \frac{b}{n \cdot A_s} \quad (14)$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} \quad (15)$$

A tensão e deformação últimas do compósito de FRP a serem consideradas na rotina de dimensionamento, Equações 16 e 17, são multiplicados por coeficiente de ponderação, conforme Tabela 7, a qual considera o tipo de exposição do sistema de reforço.

$$f_{fu} = C_E \cdot f_{fu}^* \quad (16)$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \cdot \varepsilon_{cu}^* \quad (17)$$

Nas Equações 16 e 17, C_E é o fator de redução ambiental, conforme Tabela 17, f_{fu}^* é a tensão última do material FRP e ε_{cu}^* é a deformação última do FRP, ambas fornecidas

pele fabricante ou obtidas em ensaio de caracterização. A deformação máxima permitida no material de reforço é determinada pela Equação 18.

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \cdot \sqrt{\frac{f_c}{N \cdot E_f \cdot t_f}} \leq 0,9 \cdot \varepsilon_{fu} \quad (18)$$

Tabela 7 - Fator de redução relacionado às condições de exposição do FRP

| Condições de exposição | Tipo da Fibra | Fator de redução ambiental (C_E) |
|---|---------------|--------------------------------------|
| Exposição interna | Carbono | 0,95 |
| | Vidro | 0,75 |
| | Basalto | 0,75 |
| | Aramida | 0,85 |
| Exposição externa (pontes, piers, estacionamentos abertos) | Carbono | 0,85 |
| | Vidro | 0,65 |
| | Basalto | 0,65 |
| | Aramida | 0,75 |
| Ambiente agressivo (exposição a produtos químicos e esgotos) | Carbono | 0,85 |
| | Vidro | 0,50 |
| | Basalto | 0,50 |
| | Aramida | 0,70 |

Fonte: adaptado de ACI PRC-440.2 (2023)

Na Equação 18, N é o número de camadas de material de reforço adotado, E_f é o módulo de elasticidade do FRP, fornecida pelo fabricante ou obtida em ensaio de caracterização, e t_f é a espessura por camada do FRP.

Atendida a condição da Equação 18, entende-se que o destacamento do material FRP controla o dimensionamento do sistema de reforço. Após, determina-se a deformação efetiva ε_{fe} que pode ser atingida pelo reforço com FRP por meio da Equação 19. Para esta etapa, torna-se necessário arbitrar a posição da linha neutra C , que pode ser estimada inicialmente como 20 % da altura útil da seção transversal.

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \cdot \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad (19)$$

Na Equação 19, ε_{cu} é a deformação última do concreto, definida em 3 ‰ pela ACI PRC-440.2 (2023). Respeitada a condição da Equação 19, a tensão efetiva no material de reforço FRP pode ser determinada por meio da Lei de Hooke. As deformações do aço e do concreto são determinadas por meio das Equações 20 e 21, respectivamente.

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{d-c}{d_f-c} \right) \quad (20)$$

$$\varepsilon_c = \frac{\varepsilon_s}{d_f-c} \quad (21)$$

Verificadas as deformações no concreto e aço, pela Equação 22, realiza-se a confirmação da posição da linha neutra, a qual foi arbitrada inicialmente.

$$c = \frac{A_s \cdot f_s + A_f \cdot f_{fe}}{\alpha_1 \cdot f_c \cdot \beta_1 \cdot b} \quad (22)$$

Na Equação 22, f_s é a tensão de escoamento do aço, A_f é a área transversal do material FRP, e f_{fe} é a tensão efetiva no material FRP, determinada em função da deformação efetiva por meio da Lei de Hooke. Os coeficientes β_1 e α_1 são determinados por meio das Equações 23 e 24, respectivamente, sendo ε_c' determinado pela Equação 25.

$$\beta_1 = \frac{4 \cdot \varepsilon_c' - \varepsilon_c}{6 \cdot \varepsilon_c' - 2 \cdot \varepsilon_c} \quad (23)$$

$$\alpha_1 = \frac{3 \cdot \varepsilon_c' \cdot \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3 \cdot \beta_1 \cdot \varepsilon_c'^2} \quad (24)$$

$$\varepsilon_c' = 1,71 \cdot \frac{f_c}{E_c} \quad (25)$$

Uma vez convergida a posição da linha neutra calculada com a linha neutra inicialmente estimada, determina-se o momento fletor resistente característico da seção transversal, conforme Equação 26, onde ψ é um coeficiente adicional de redução, com valor definido em 0,85 pela ACI PRC-440.2 (2023).

$$M_n = A_s \cdot f_s \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + \psi \cdot A_f \cdot f_{fe} \cdot \left(h - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) \quad (26)$$

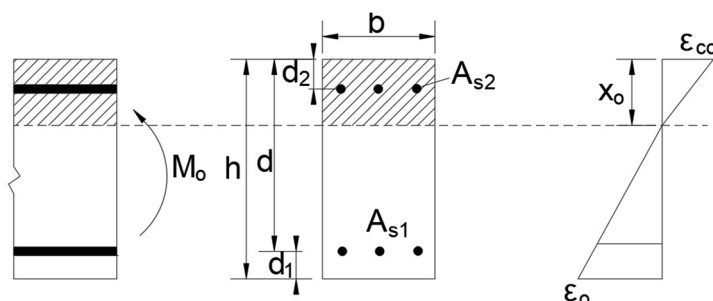
O momento fletor resistente de cálculo e o coeficiente de minoração, este que é definido em função da deformação no aço, são calculados seguindo-se as mesmas rotinas das Equações 9 e 10, já apresentadas.

2.8.4 DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO À FLEXÃO COM FRP SEGUNDO A FIB BULLETIN 90 (2019)

Em seu Apêndice 6.1, a norma europeia *Fib Bulletin 90* (2019, p.111) apresenta uma rotina de cálculo para análise de uma seção transversal de elementos em concreto armado, reforçada à flexão com FRP.

Assim como na norma norte americana, a *Fib Bulletin 90* (2019) recomenda que seja determinada a deformação inicial no elemento a ser reforçado devido aos carregamentos atuantes no ato da aplicação do reforço. Para tanto, a referida norma recomenda consultar a seção 4.2 da norma *Fib Bulletin 14* (2001), a qual indica a compatibilização de deformações da seção transversal não reforçada apresentada na Figura 53.

Figura 53 – Deformação inicial da seção não reforçada



Fonte: adaptado de *Fib Bulletin 14* (2001)

Com base na compatibilização de deformações apresentada na Figura 53, a profundidade da linha neutra da seção não reforçada (x_0), no ato da aplicação do reforço, pode ser calculada por meio da Equação 27. Entretanto, cabe destacar que na referida Equação é realizado somente o equilíbrio estático da seção, sem consideração do momento fletor solicitante. Logo, mostra-se necessário levar em consideração o momento fletor devido aos carregamentos atuantes no ato do reforço para determinação de x_0 , condição mais coerente para situações práticas de projeto.

$$\frac{1}{2} \cdot b \cdot (x_0)^2 + (\alpha_s - 1) \cdot A_{s2} \cdot (x_0 - d_2) = \alpha_s \cdot A_{s1} \cdot (d - x_0) \quad (27)$$

Na Equação 27, b é a largura da seção transversal, A_{s2} e d_2 são a área de aço e altura útil da armadura superior, respectivamente, A_{s1} e d são a área de aço e altura útil da armadura inferior, respectivamente, e α_s é calculado por meio da Equação 28, onde E_s e E_{cm} são os módulos de elasticidade do aço e do concreto, respectivamente.

$$\alpha_s = \frac{E_s}{E_{cm}} \quad (28)$$

Determinada a profundidade da linha neutra, a deformação na Fibra mais tracionada da seção não reforçada (ε_0) pode ser determinada por meio da Equação 29.

$$\varepsilon_0 = \frac{M_o \cdot (h - x_0)}{E_{cm} \cdot I_0} \quad (29)$$

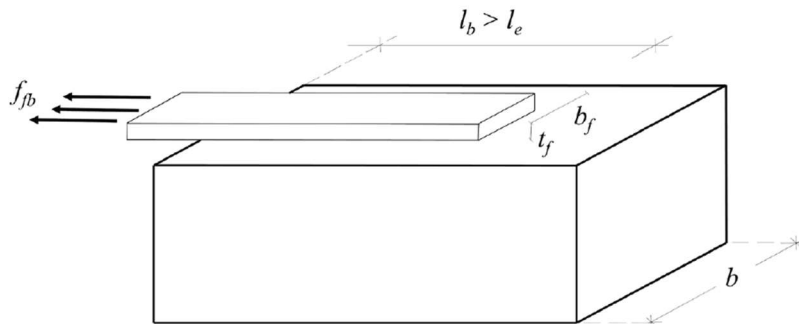
Na Equação 29, M_o é o momento fletor solicitante, referente aos carregamentos permanentes atuantes no ato do reforço, h é a altura da seção transversal e I_0 é o momento de inércia da seção fissurada transformada, a qual pode ser calculada pela Equação 30.

$$I_0 = \frac{1}{3} \cdot b \cdot (x_0)^3 + (\alpha_s - 1) \cdot A_{s2} \cdot (x_0 - d_2)^2 + \alpha_s \cdot A_{s1} \cdot (d - x_0)^2 \quad (30)$$

De acordo com a *Fib Bulletin 90* (2019, p.112), o cálculo de ε_0 pode ser desprezado para os casos em que M_o é inferior ao momento de fissuração resistido pela seção analisada.

Numa segunda etapa, conforme o item 5.3.1 da *FIB Bulletin 90* (2019), para a verificação da segurança quanto ao destacamento do FRP, é necessário determinar a máxima tensão de tração que o FRP pode suportar ou transferir ao substrato. Tal tensão, identificada como f_{fb} , depende diretamente do comprimento de ancoragem, indicado no esquema de ensaio de aderência da Figura 54.

Figura 54 – Comprimento de ancoragem em sistema de FRP



Fonte: *Fib Bulletin 90* (2019)

Na Figura 54, o comprimento efetivo de colagem (l_e) é o comprimento mínimo capaz de transferir os esforços máximos do FRP ao substrato reforçado. Para valores médios de resistência pode ser calculado por meio da Equação 31.

$$l_e = \frac{\pi \cdot s_0}{k_b \cdot k} \cdot \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{8 \cdot (f_{cm})^2}} \quad (31)$$

Na Equação 30, E_f e t_f são o módulo de elasticidade e espessura do FRP, f_{cm} é a resistência à compressão do concreto, k e s_0 podem ser assumidos como 0,17 e 0,25 mm, respectivamente, conforme o indicado no *FIB Bulletin 90* (2019), e o fator de forma k_b pode ser calculado pela Equação 32, conforme o indicado no item 5.3.1 da referida norma, onde b é a largura do elemento reforçado e b_f é a largura do FRP, conforme demonstrado na Figura 54.

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{b}}} \quad (32)$$

Conforme o indicado no *Fib Bulletin 90* (2019), o recomendável é que o comprimento da ancoragem adotado para o sistema de reforço (l_b) seja maior que o comprimento de ancoragem efetivo (l_e), calculado conforme rotina de cálculo acima apresentada. Para os casos em que tal condição não é atendida, um fator que depende da ancoragem adotada, β_l , é calculado conforme o apresentado na Equação 33.

$$\beta_l = \frac{l_b}{l_e} \cdot \left(2 - \frac{l_b}{l_e} \right) \quad (33)$$

Uma vez definido β_l , a tensão de aderência característica no FRP em sua zona de ancoragem, f_{fbk} , considerando à técnica de reforço EBR, pode ser determinada por meio da Equação 34, onde o fator k_k pode ser definido como 0,17, conforme o apresentado no item 5.3.2.3 da *Fib Bulletin 90* (2019).

$$f_{fbk} = k_k \cdot k_b \cdot \beta_1 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f}{t_f} \cdot (f_{cm})^2} \quad (34)$$

Conforme modelo aproximado baseado na máxima tensão no FRP, apresentado no item 5.3.3.1 da *Fib Bulletin 90* (2019), a máxima tensão característica devido ao destacamento por fissuras intermediárias (IC) pode ser calculada por meio da Equação 35, onde $k_{cr.k}$ é definido em 1,8 pela referida norma.

$$f_{fbk.IC} = k_{cr.k} \cdot f_{fbk} \quad (35)$$

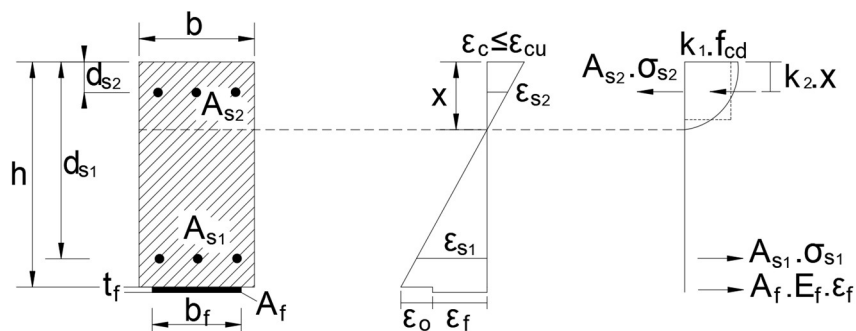
Com aplicação de um fator de segurança γ_f de 1,5, conforme *Fib Bulletin 90* (2019), é possível obter a tensão de cálculo no FRP, conforme Equação 36, assumindo-se que o dimensionamento será governado pela falha do FRP, limitando-se $f_{fbd.IC}$ à tensão última do FRP (f_{fu}). A correspondente deformação no FRP ($\varepsilon_{fbd.IC}$) pode ser calculada conforme o apresentado na Equação 37.

$$f_{fbd.IC} = \frac{f_{fbk.IC}}{\gamma_f} \quad (36)$$

$$\varepsilon_{fbd.IC} = \frac{f_{fbd.IC}}{E_f} \quad (37)$$

De acordo com o Apêndice 6.1 da *Fib Bulletin 90* (2019), para a verificação de uma seção transversal reforçada à flexão com FRP no ELU, são seguidos os mesmos princípios do concreto armado, sendo calculado inicialmente a profundidade da linha neutra por meio da compatibilidade de deformações e equilíbrio das forças interna, para depois determinar o momento fletor de equilíbrio, conforme o indicado na Figura 55.

Figura 55 – Distribuição de tensões e esforços internos de seção transversal reforçada com FRP



Fonte: adaptado de *Fib Bulletin 90* (2019)

Inicialmente a deformação no concreto (ε_c) pode ser determinada por meio da compatibilização de deformação apresentada na Equação 38, onde ε_f é a deformação no FRP, que pode ser tomada como $\varepsilon_{fbd.IC}$ e x é a profundidade da linha neutra, a qual deve ser arbitrada nesta etapa.

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f \cdot \left(\frac{x}{h-x} \right) + \varepsilon_o \quad (38)$$

Após, determina-se os fatores de tensão média de compressão e braço de alavanca da distribuição de tensões parábola retângulo do concreto, denominados k_1 e k_2 , respectivamente, os quais podem ser determinados conforme o apresentado nas Equações 39 e 40.

$$k_1 = \begin{cases} \frac{1000 \cdot \varepsilon_c \cdot \left(0.5 - \frac{1000}{12} \cdot \varepsilon_c \right)}{2} \rightarrow \varepsilon_c \leq 0,002 \\ 1 - \frac{2}{3000 \cdot \varepsilon_c} \rightarrow 0,002 \leq \varepsilon_c \leq 0,0035 \end{cases} \quad (39)$$

$$k_2 = \begin{cases} \frac{8 - 1000 \cdot \varepsilon_c}{4 \cdot (6 - 1000 \cdot \varepsilon_c)} \rightarrow \varepsilon_c \leq 0,002 \\ \frac{1000 \cdot \varepsilon_c \cdot (3000 \cdot \varepsilon_c - 4) + 2}{2000 \cdot \varepsilon_c \cdot (3000 \cdot \varepsilon_c - 2)} \rightarrow 0,002 \leq \varepsilon_c \leq 0,0035 \end{cases} \quad (40)$$

As tensões nas armaduras inferiores e superiores podem ser determinadas conforme Equações 41 e 42, respectivamente, onde f_{yd} e E_s são a tensão de escoamento de cálculo e é módulo de elasticidade do aço, d_{s1} e d_{s2} são as alturas úteis das armaduras inferiores e superiores, respectivamente, conforme o apresentado na Figura 55.

$$\sigma_{s1} = \min \left(\varepsilon_c \cdot \frac{d_{s1} - x}{x}; \frac{f_{yd}}{E_s} \right) \cdot E_s \quad (41)$$

$$\sigma_{s2} = \min \left(\varepsilon_c \cdot \frac{x - d_{s2}}{x}; \frac{f_{yd}}{E_s} \right) \cdot E_s \quad (42)$$

Determinadas as tensões, deformações e fatores, a profundidade da linha neutra pode ser calculada por meio da Equação 43, onde A_{s1} e A_{s2} são as áreas das armaduras inferiores e superiores, respectivamente, e E_f é o módulo de elasticidade do FRP.

$$k_1 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} = A_{s1} \cdot \sigma_{s1} + A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f \quad (43)$$

Por fim, convergida a profundidade da linha neutra estimada inicialmente com a calculada por meio da Equação 43, o momento fletor resistente da seção transversal reforçada à flexão com FRP pode ser determinado por meio da Equação 44.

$$M_{RD} = A_{s1} \cdot \sigma_{s1} \cdot (d_{s1} - k_2 \cdot x) + A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f \cdot (h - k_2 \cdot x) + A_{s2} \cdot \sigma_{s2} \cdot (k_2 \cdot x - d_{s2}) \quad (44)$$

Em relação aos valores de cálculos das resistências do concreto e do aço, os valores característicos devem ser ponderados por coeficientes definidos na norma *Fib Bulletin 90* (2019), sendo em combinações normais, 1,5 para o concreto (γ_c) e 1,15 para o aço (γ_s).

2.8.5 DIMENSIONAMENTO DE REFORÇO À FLEXÃO COM FRP PROTENDIDO

Como já exposto anteriormente, as normas ACI PRC-440.2 (2023) e *FIB Bulletin 90* (2019) tratam somente dos critérios e requisitos de dimensionamento de sistemas de reforço com a colagem externa passiva de FRP. Assim os critérios de dimensionamento de sistemas FRP protendido, objeto da presente pesquisa, não são abordados nas referidas normas.

Alguns modelos de dimensionamento de sistemas de reforço à flexão com FRP protendido foram propostos na literatura (DUSHIMIMANA et al., 2023; GARCEZ, 2007; LIU; PENG; CAI, 2015; WOO; KIM; BYUN, 2012; ZHANG; DENG; LIAO, 2013), tendo-se como base hipóteses de cálculo similares às adotadas pelas normas brasileira e norte americanas, já apresentadas anteriormente, como compatibilidade de deformações e tensões e equilíbrio de forças resultantes na seção transversal da peça reforçada.

Além disso, no dimensionamento de sistema de reforço com FRP protendido se faz necessário, para determinar a capacidade última do elemento reforçado, conhecer ou estimar o modo de ruptura do elemento reforçado (LIU; PENG; CAI, 2015; WOO; KIM; BYUN, 2012; ZHANG; DENG; LIAO, 2013).

Segundo Liu, Peng e Cai (2015), considerando-se os resultados obtidos experimentalmente em diferentes estudos, os principais modos de ruptura de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com FRP protendido são: (i) escoamento das armaduras seguido do destacamento ou ruptura do laminado de CFRP, antes de ocorrer o esmagamento

do concreto; (ii) escoamento das armaduras seguido do esmagamento do concreto, antes da ruptura do laminado de CFRP; (iii) esmagamento do concreto antes do escoamento das armaduras e ruptura do laminado de CFRP. Tais modos de ruptura também são destacados por (WOO; KIM; BYUN, 2012).

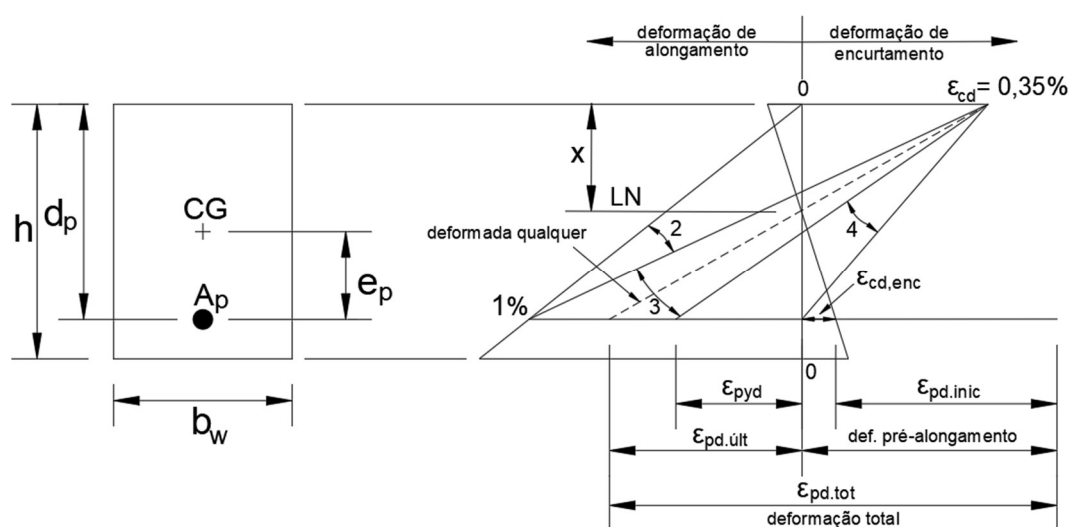
De acordo com Woo, Kim e Byun (2012), em sistemas de reforço com FRP protendido, em que o destacamento do FRP governa o dimensionamento, se faz necessário limitar as tensões e deformações no material de reforço a serem consideradas no dimensionamento.

Tendo em vista o acima exposto, no presente trabalho é proposta uma rotina de dimensionamento de sistemas de reforço à flexão com a utilização de FRP protendido, considerando-se os conceitos de concreto armado e protendido previstos na norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2023), assim como, baseando-se na rotina para determinação do momento resistente de viga com armadura de protensão apresentada por Bastos (2021), adaptando-se os critérios para o sistema de reforço com FRP.

Destaca-se que, por se tratar de dimensionamento da capacidade última das vigas reforçadas à flexão com laminados de CFRP protendidos, num primeiro momento, não serão consideradas as perdas de protensão na presente análise, uma vez que tais perdas possuem influência sobre as condições em serviço.

De acordo com Bastos (2021), em elementos fletidos protendidos com cordoalhas metálicas aderidas, os possíveis domínios de deformações são os 2, 3 e 4, estes apresentados na Figura 56, com as rupturas possíveis: deformação plástica da armadura sob tração (domínio 2) ou esmagamento do concreto (domínios 3 e 4).

Figura 56 – Domínios de deformação possíveis para elementos protendidos à flexão



Fonte: adaptado de Bastos (2021)

Fonte:

Em elementos de concreto armado à flexão, a deformação na armadura e concreto em seu entorno é igual para qualquer nível de carregamento externo. Nota-se que para elementos

em concreto protendido, conforme o apresentado na Figura 56, a armadura protendida já possui um pré-alongamento em função da protensão aplicada. Logo, a deformação na armadura protendida, para qualquer nível de carregamento externo, é igual ao pré-alongamento imposto no ato da protensão somado ao incremento de deformação provocado pelo carregamento externo aplicado (BASTOS, 2021).

O domínio de deformação de um elemento protendido à flexão pode ser definido com base na deformação última atingida pela armadura de protensão ($\epsilon_{pd.últ}$), comparando-se com a deformação de escoamento da referida armadura (ϵ_{pyd}) e o limite de deformação do aço devido ao momento fletor último recomendado em 1%, tal como apresentado na Tabela 8.

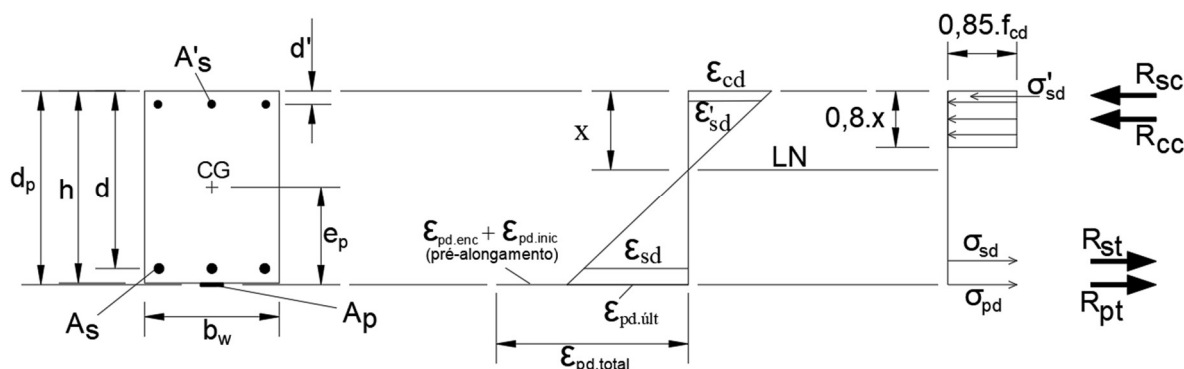
Tabela 8 – Limites de domínios de deformação de um elemento protendido à flexão

| Domínio | | |
|---------------------------|--|--|
| 2 | 3 | 4 |
| $\epsilon_{pd.últ} > 1\%$ | $\epsilon_{pyd} < \epsilon_{pd.últ} < 1\%$ | $0 < \epsilon_{pd.últ} < \epsilon_{pyd}$ |

Fonte: adaptado de Bastos (2021)

Para a determinação do momento fletor último de elementos com armadura de protensão também são admitidas as hipóteses básicas adotadas no dimensionamento de estrutura de concreto armado tais como domínios de deformações, equações de equilíbrio de forças e momentos fletores, assim como, compatibilidade de deformações (BASTOS, 2021). Na Figura 57 são apresentadas as tensões e deformações no ELU de uma viga com seção retangular reforçada à flexão com FRP protendido, considerando-se aderência perfeita entre o concreto e material de reforço.

Figura 57 – Tensões e deformação no ELU em seção retangular protendida



Fonte: adaptado de Bastos (2021)

As deformações de pré-alongamento provenientes do ato de protensão, indicadas na Figura 57, referem-se à deformação devido ao encurtamento elástico imediato do concreto,

$\varepsilon_{cd.enc}$, e a deformação devido a aplicação da força de protensão no regime elástico, $\varepsilon_{pd.inic}$, as quais podem ser calculadas pelas Equações 45 e 46, respectivamente.

$$\varepsilon_{cd.enc} = \frac{1}{E_c} \cdot \left(\frac{P_d}{A_c} + \frac{P_d \cdot e_p^2}{I_c} \right) \quad (45)$$

$$\varepsilon_{pd.inic} = \frac{P_d}{E_p \cdot A_p} \quad (46)$$

Nas Equações 44 e 45, P_d é a força de protensão final de cálculo, considerando-se as devidas perdas, E_c é o módulo de elasticidade do concreto, A_c é a área da seção transversal do elemento, e_p é a excentricidade entre o centro de gravidade da seção transversal e armadura de protensão ou material de reforço, I_c momento de inércia da seção transversal, E_p é o módulo de elasticidade da armadura de protensão ou material de reforço, e A_p é a área da armadura protensão ou material de reforço.

Assim como adotado por Bastos (2021), por simplificação, a homogeneização da seção transversal não será considerada. Para seguir com o dimensionamento, deve-se adotar um valor para a tensão máxima no material de reforço (σ_{pd}), a qual corresponde ao momento fletor resistente último, admitindo-se um dos domínios indicados na Tabela 8. Cabe destacar que se trata de um cálculo por tentativas para validação posterior das deformações nos materiais. Isto posto, segue-se para o cálculo da posição da linha neutra, Equação 47, admitindo-se escoamento do aço das armaduras existentes.

$$x = \frac{\sigma_{pd} \cdot A_p + f_{yd} \cdot A_s - f_{yd}' \cdot A_s'}{0,85 \cdot f_{cd} \cdot 0,8 \cdot b_w} \quad (47)$$

Na Equação 46, f_{yd} é a tensão de escoamento de cálculo do aço passivo inferior, A_s é a área de armadura passiva inferior, f_{yd}' é a tensão de escoamento de cálculo do aço passivo superior, A_s' é a área de armadura passiva superior, f_{cd} é a resistência à compressão de cálculo do concreto, e b_w é a largura da seção transversal.

A deformação no material de reforço protendido ($\varepsilon_{pd.últ}$), proveniente do carregamento externo, pode ser determinada pela Equação 48, onde ε_{cd} é a deformação última no concreto, a qual é definida em 3,5 ‰ pela NBR 6118 (ABNT, 2023).

$$\varepsilon_{pd.últ} = \varepsilon_{cd} \cdot \left(\frac{d_p - x}{x} \right) \quad (48)$$

Importante destacar que, tanto no concreto armado convencional quanto no concreto protendido com cordoalhas metálicas, a deformação de alongamento da armadura de protensão provocada pelas solicitações externas deve ser limitada em 10 ‰, conforme preconizado pela NBR 6118 (ABNT, 2023), de modo a evitar fissuração excessiva do elemento em sua borda mais tracionada.

Com o valor de $\varepsilon_{pd.últ}$ se define o domínio de deformação da seção transversal analisada, conforme classificação da Tabela 8, assim como, se determina a deformação total do material de reforço protendido ($\varepsilon_{pd.tot}$) com o uso da Equação 49.

$$\varepsilon_{pd.tot} = \varepsilon_{pd.enc} + \varepsilon_{pd.inic} + \varepsilon_{pd.últ} \quad (49)$$

Para o caso do FRP protendido, a deformação total do material de reforço deve ser limitada a deformação última do FRP fornecida pelo fabricante ou determinado por meio de ensaio de caracterização, sendo que $\varepsilon_{pd.últ}$ não pode exceder 10 ‰, de modo a evitar fissuração excessiva no concreto.

Após a confirmação da tensão no material de reforço, torna-se necessário confirmar as deformações nos materiais, por meio de compatibilidade de deformações, com o uso das Equações 50, 51 e 52, para validação do domínio adotado corrigindo-se suas tensões, se necessário, de modo a resultar em variação inferior a 1,5 % entre os valores estimados e calculados, conforme recomendado por Bastos (2021).

$$\frac{\varepsilon_{cd}}{\varepsilon_{sd}} = \frac{x}{d_s - x} \quad (50)$$

$$\frac{\varepsilon_{cd}}{\varepsilon_{sd}} = \frac{x}{x - d'} \quad (51)$$

$$\frac{\varepsilon_{cd}}{\varepsilon_{pd.últ}} = \frac{x}{d_p - x} \quad (52)$$

Nas Equações 50 a 52, ε_{sd} é a deformação na armadura passiva inferior, ε_{sd}' é a deformação na armadura passiva superior, d_s é a altura útil da armadura passiva inferior, d' é a altura útil da armadura passiva superior, e d_p é altura útil da armadura ativa ou material de reforço. Realizadas todas as verificações, o momento fletor resistente pode ser estimado por meio da Equação 53.

$$M_{Rd} = \sigma_{pd} \cdot A_p \cdot (d_p - 0,4 \cdot x) + f_{yd} \cdot A_s \cdot (d_s - 0,4 \cdot x) + f_{yd}' \cdot A_s' \cdot (0,4 \cdot x - d') \quad (53)$$

Em relação aos valores de cálculos das resistências do concreto e do aço, os valores característicos devem ser reduzidos por coeficientes definidos na norma NBR 6118 (ABNT, 2023), sendo em combinações normais, 1,4 para o concreto (γ_c) e 1,15 para o aço (γ_s).

2.8.6 VERIFICAÇÕES DE TENSÕES COM FRP PROTENDIDO

Conforme preconizado pela NBR 6118 (ABNT, 2023), em elementos protendidos, torna-se necessário verificar as tensões de compressão e tração no concreto no ato da protensão e em condições em serviço. Para tanto, calcula-se os módulos resistentes da seção transversal, conforme o apresentado nas Equações 54 e 55.

$$W_{inf} = \frac{I_c}{y_{inf}} \quad (54)$$

$$W_{sup} = \frac{I_c}{y_{sup}} \quad (55)$$

Nas Equações 54 e 55, I_c é o momento de inércia da seção transversal, y_{inf} e y_{sup} são as distâncias do cento de gravidade da seção transversal do elemento às Fibras mais comprimidas e tracionadas, respectivamente. A tensão gerada pelo ato de protensão em toda a seção transversal da viga pode ser determinada por meio da Equação 56.

$$\sigma_{c,prot} = \frac{P_d}{A_c} \quad (56)$$

Na Equação 56, P_d é a força de protensão final de cálculo, considerando-se as devidas perdas, e A_c área da seção transversal do elemento. As tensões geradas pelo traçado do laminado protendido na seção transversal, considerando-se excentricidade do sistema de

reforço em relação ao centro de gravidade do elemento reforçado, podem ser calculadas por meio das Equações 57 e 58, onde e_p é a excentricidade entre o centro de gravidade da seção transversal e armadura de protensão ou material de reforço.

$$\sigma_{\text{inf.prot}} = \frac{P_d \cdot e_p}{W_{\text{inf}}} \quad (57)$$

$$\sigma_{\text{sup.prot}} = \frac{P_d \cdot e_p}{W_{\text{sup}}} \quad (58)$$

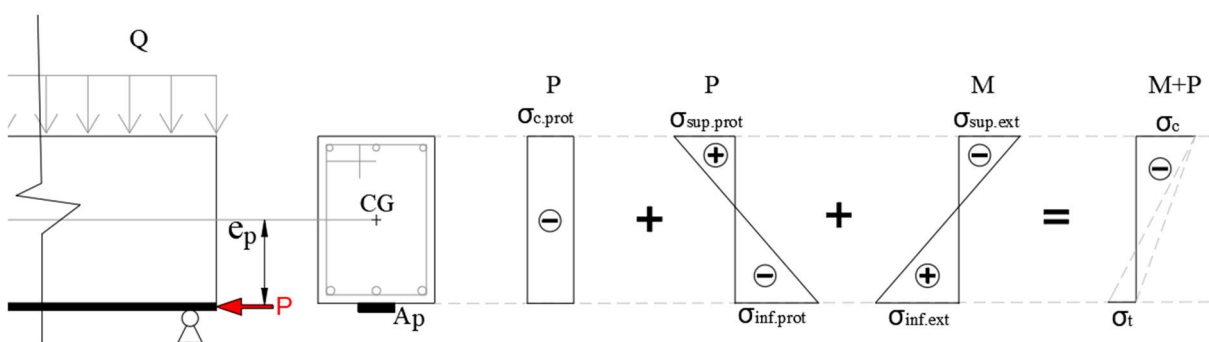
As tensões geradas pelos carregamentos atuantes no elemento reforçado, podem ser determinadas por meio das Equações 59 e 60, M_{ext} onde refere-se ao momento fletor atuante proveniente dos carregamentos de peso próprio, permanentes e acidentais.

$$\sigma_{\text{inf.ext}} = \frac{M_{\text{ext}}}{W_{\text{inf}}} \quad (59)$$

$$\sigma_{\text{sup.ext}} = \frac{M_{\text{ext}}}{W_{\text{sup}}} \quad (60)$$

Uma vez determinadas as tensões acima indicadas, estas podem ser somadas conforme o apresentado na Figura 58, resultando nas tensões finais atuantes nas Fibras mais comprimidas e tracionadas do elemento reforçado à flexão.

Figura 58 – Tensões atuantes em uma seção reforçada com FRP protendido



As tensões resultantes na seção transversal analisada podem ser comparadas com as tensões limites de tração e compressão previstas nos itens 17.2.4.3.2 e 17.2.4.4 da NBR 6118 (ABNT, 2023), as quais são apresentadas na Tabela 9.

Na Tabela 9, f_{ck} é a resistência características à compressão do concreto, $f_{ck,j}$ é a resistência à compressão do concreto na idade “j”, α assume valor de 1,2 para seções “T” e

1,5 para seções retangulares, e $f_{ct,m}$ e $f_{ctk,inf}$ são calculados por meio das Equações 61 e 62, respectivamente, para concretos de resistência à compressão de até 50 MPa.

Tabela 9 – Limites de tensões em seção transversal com protensão

| Verificação | Combinação | Limite de tração | Limite de compressão |
|-------------|------------------|--|--|
| ELS | Quase permanente | 0 | $\sigma_{c,máx} \leq 0,45 \cdot f_{ck}$ |
| ELS | Frequente | $\sigma_{t,máx} \leq \alpha \cdot f_{ctk,inf}$ | $\sigma_{c,máx} \leq 0,6 \cdot f_{ck}$ |
| ELU | Ato da protensão | $\sigma_{t,máx} \leq 1,2 \cdot f_{ct,m}$ | $\sigma_{c,máx} \leq 0,7 \cdot f_{ck,j}$ |

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} \quad (61)$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7 \cdot f_{ct,m} \quad (62)$$

2.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS QUANTO A FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo teve como objetivo compilar os principais aspectos dos sistemas de reforço à flexão com a utilização de FRP, aplicáveis às estruturas de concreto armado, destacando-se a técnica EBR, aplicada nas modalidades passiva e protendida.

Os programas experimentais apresentados e discutidos neste capítulo confirmam a eficiência da aplicação de tais sistemas. Entretanto, nota-se a necessidade em avançar no conhecimento sobre o tema, principalmente no que diz respeito ao sistema de reforço com laminado de FRP protendido, visto que grande parte dos estudos analisados não se utilizam de elementos estruturais em escala real e não apresentam de forma detalhada os efeitos da pré-fissuração no desempenho mecânico do elemento reforçado. Observam-se, também, diferentes sistemas e técnicas de ancoragem e protensão propostas na literatura ou mercado, o que indica a necessidade de novos estudos e análises experimentais.

Por fim, nota-se a necessidade da validação de modelos de dimensionamento de sistemas de reforço com FRP protendido, de modo a validar analiticamente seu comportamento estrutural e contribuir com a elaboração de normas técnicas inerentes ao tema.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os procedimentos metodológicos adotados na presente pesquisa, sendo detalhadas as etapas consideradas, assim como as normas técnicas, critérios e referências bibliográficas em que o trabalho se fundamenta.

3.1 ESTRATÉGIA DE PESQUISA

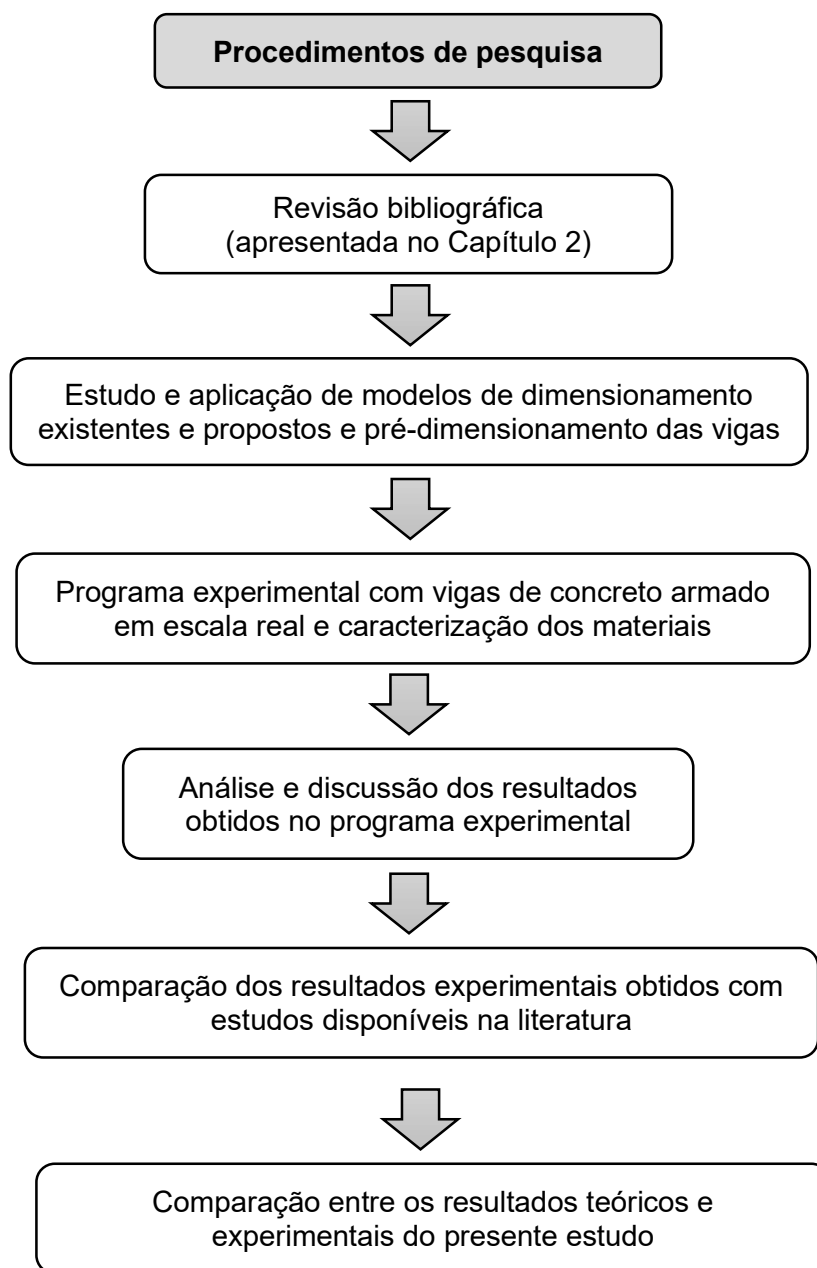
Adotou-se como estratégia de pesquisa dividir o presente estudo em seis etapas, conforme apresentado na Figura 59, sendo elas: (i) revisão bibliográfica; (ii) estudo e aplicação de modelos teóricos de dimensionamento existentes e propostos e pré-dimensionamento das vigas; (iii) realização de programa experimental com vigas de concreto armado em escala real, reforçadas à flexão com laminados de CFRP passivos e protendidos, e caracterização dos materiais utilizados; (iv) análise e discussão dos resultados obtidos no programa experimental; (v) comparação dos resultados experimentais obtidos na presente pesquisa com resultados experimentais de estudos disponíveis na literatura; e (vi) comparação entre os resultados teóricos (obtidos por meio da aplicação dos modelos de dimensionamento) e experimentais obtidos no ensaios.

A primeira etapa refere-se à fundamentação teórica, a qual foi apresentada e detalhada no capítulo anterior, sendo pesquisados e estudados, de forma sistemática, trabalhos disponíveis na literatura que investigaram o comportamento de elementos de concreto armado reforçados com FRP protendido e seus assuntos correlatos, visando compreender o atual estado da arte do tema objeto da presente pesquisa.

A segunda etapa objetiva a definição e utilização de modelos teóricos de dimensionamento existentes, de modo a estimar analiticamente a capacidade portante das vigas a serem ensaiadas, também na proposição um modelo de dimensionamento, em especial, para o sistema de reforço com laminado de CFRP protendido.

Já na terceira etapa, para análise do comportamento estrutural de vigas de concreto armado em escala real, reforçadas à flexão com laminados de CFRP passivos e protendidos, um programa experimental com ensaios à flexão das vigas e caracterização das propriedades mecânicas dos materiais utilizados foi realizado.

Adicionalmente, os resultados experimentais foram analisados e comparados com os resultados experimentais de estudos disponíveis na literatura e com os resultados teóricos obtidos pelas aplicações dos modelos de dimensionamento.

Figura 59 – Fluxograma das etapas da pesquisa

Fonte: Próprio autor

3.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA

Para a realização da revisão bibliográfica sistemática, já apresentada no capítulo anterior, foram definidas para consultas as bases de dados indicadas no Quadro 2, as quais foram escolhidas com base em uma revisão bibliográfica baseada na leitura de normas e artigos inerentes ao tema, assim como, consultas a especialistas e pesquisadores da área.

Quadro 2 – Bases de dados consultadas

| Bases de dados consultadas | Endereço eletrônico |
|--|---|
| <i>Google Scholar</i> | https://scholar.google.com.br/ |
| Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD) | https://bdtb.ibict.br |
| Catálogo de Teses e Dissertações CAPES | https://catalogodeteses.capes.gov.br |
| Periódicos CAPES | https://www.periodicos.capes.gov.br |
| <i>Scopus</i> | https://www.elsevier.com/pt-br/solutions/scopus |
| <i>Web of Science</i> | https://www.webofscience.com |
| <i>Engineering Village</i> | https://www.engineeringvillage.com |
| <i>Science Direct</i> | https://www.sciencedirect.com |
| Banco de Teses e Dissertações da Universidade do Minho | http://repositorium.sdum.uminho.pt |
| Banco de Teses e Dissertações da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) | https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/1538 |

Fonte: Próprio autor

Com o objetivo de encontrar trabalhos acadêmicos e científicos aderentes ao objeto de estudo, formulou-se a seguinte *String* de busca: *CFRP AND prestress AND strengthening AND reinforced AND concrete*. A *String* definida foi configurada nos dispositivos de buscas de cada base de dado de modo seus termos serem encontrados em títulos, resumos e palavras-chave.

Tais configurações foram definidas com o objetivo de conseguir trabalhos com boa aderência ao tema de pesquisa, uma vez que, se tais termos não se encontram nos títulos, resumos e palavras-chave, possivelmente se referem a trabalhos que não tiveram como foco principal o objeto da presente pesquisa. Optou-se também por não limitar as buscas a vigas, assim como, fixar o período de até 10 anos e filtrar textos disponíveis em inglês, espanhol e português.

Para gerenciamento dos trabalhos obtidos nas buscas, foi utilizado o *software* StArt, desenvolvido pelo Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Software (LaPES), da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

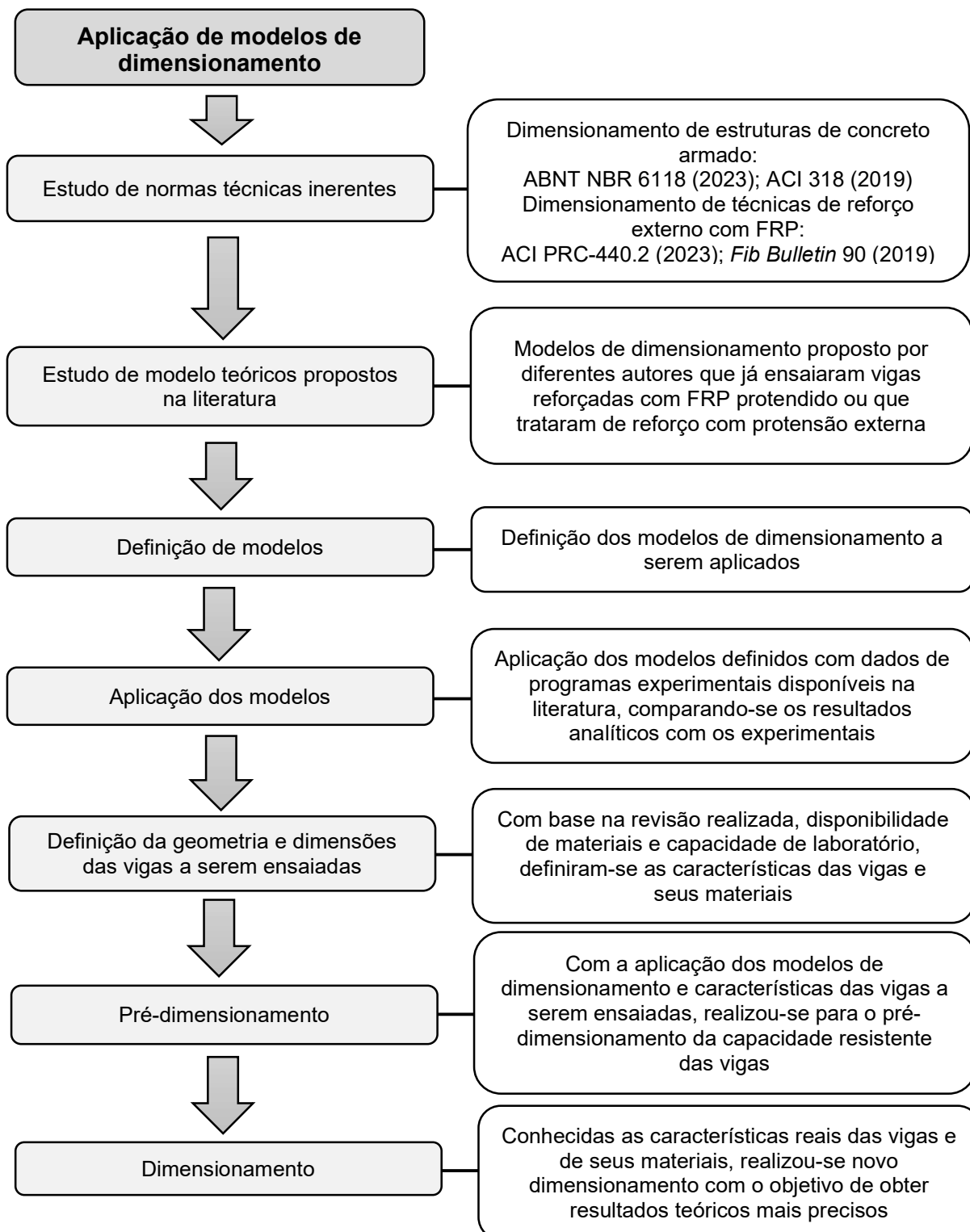
3.3 APLICAÇÃO DE MODELOS DE DIMENSIONAMENTO

Para a aplicação e análise dos modelos de dimensionamento propostos por normas técnicas e/ou trabalhos disponíveis na literatura, adotou-se as etapas indicadas no fluxograma apresentado na Figura 60.

Inicialmente, foram consultadas as principais normas técnicas que tratam do dimensionamento de elementos de concreto armado, tais como a NBR 6118 (ABNT, 2023) e ACI 318 (2019). Também, foram consultadas as principais normas técnicas que abordam o

dimensionamento e detalhamento de estruturas de concreto armado reforçadas à flexão com FRP, tais como as normas ACI PRC-440.2 (2023) e *Fib Bulletin 90* (2019).

Figura 60 – Fluxograma da aplicação e validação dos modelos de dimensionamento



Fonte: Próprio autor

As consultas e estudos dos modelos de dimensionamento propostos nas normas técnicas acima citadas tiveram como objetivo fornecer base para a definição de rotinas de cálculo da capacidade à flexão da viga de referência (não reforçada) e vigas reforçadas com colagem passiva de FRP - estas últimas tiveram seus conceitos de dimensionamento, aplicação e detalhamento fundamentados também em trabalhos relevantes disponíveis na literatura (SOUZA; RIPPER, 1998; MACHADO; MACHADO, 2015; DALFRÉ; PARSEKIAN; FERREIRA, 2019; FERREIRA, 2019; SARTI JUNIOR, 2020; DALFRÉ, 2022, IBRACON/ABECE, 2023). As referidas rotinas de cálculos foram detalhadas nos itens 2.8.1 a 2.8.4 do capítulo anterior.

Numa segunda etapa, para familiarização dos conceitos de concreto protendido e reforço com protensão externa, foram estudados diferentes trabalhos disponíveis na literatura (RÜSCH, 1980; VERÍSSIMO; CÉSAR JÚNIOR, 1998; FRANÇA; ISHITANI; GRAZIANO, 2004; HANAI, 2005; BUCHAIM, 2007; PINHEIRO *et al.*, 2007; VITÓRIO; BARROS, 2011; CHOLFE; BONILHA, 2018; PINHEIRO, 2018; BASTOS, 2021).

Na sequência, combinando-se conceitos e modelos de dimensionamento propostos em diferentes trabalhos (WOO; KIM; BYUN, 2012; ZHANG; DENG; LIAO, 2013; LIU; PENG; CAI, 2015; BASTOS, 2021; DUSHIMIMANA *et al.*, 2023; NBR 6118, ABNT, 2023), foi proposto um modelo de dimensionamento para o cálculo da capacidade última de vigas reforçadas à flexão com FRP protendido. Tal modelo foi detalhado no item 2.8.5 do capítulo anterior.

Numa quarta etapa, aplicou-se os modelos de dimensionamento definidos considerando-se dados de trabalhos experimentais disponíveis na literatura (GAO; GU; MOSALLAM, 2016; HONG; PARK, 2017; LIU *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2022). Os resultados analíticos obtidos foram analisados e comparados com os resultados experimentais dos diferentes trabalhos considerados.

Destaca-se que os resultados teóricos aqui avaliados referem-se às forças últimas estimadas para o ensaio de flexão das vigas, sendo adotadas as seguintes premissas nos dimensionamentos: (i) adotados valores médios das resistências dos materiais indicados nos programas experimentais analisados, sem adoção de coeficiente de segurança, de modo a se obter resultados teóricos mais próximos dos resultados experimentais; (ii) para o reforço à flexão com laminado de CFRP considerou-se coeficiente referente a exposição ambiental igual 1,0, visto não ter sido considerados na presente análise elementos expostos à ambientes externos ou ensaios acelerados; (iii) para o reforço à flexão com FRP também não foi considerado o uso dos coeficientes de redução em função da ductilidade e aproximação de cálculo; (iv) foram selecionados dos estudos analisados vigas de uma mesma série, com características e condições de reforço similares; (v) na aplicação do modelo de dimensionamento da viga com reforço passivo segundo a norma *FIB Bulletin 90* (2019) considerou-se que o comprimento efetivo de colagem foi atendido, sendo tal condição

confirmada por meio de decalagem do diagrama do momento fletor; e (vi) no dimensionamento das vigas reforçadas com laminados de FRP protendidos, considerou-se no cálculo, em um primeiro momento, a máxima deformação atingida pelo material de reforço no ensaio de flexão das vigas conforme o indicado nos estudos experimentais analisados. Entretanto, limitou-se a deformação máxima atingida pelo material de reforço devido a aplicação do carregamento externo em 10 ‰, conforme recomendado pela NBR 6118 (ABNT, 2023), com o objetivo de evitar abertura excessivas de fissuras no concreto em função da deformação das armaduras.

Após a aplicação e análise dos modelos de dimensionamento propostos, foram definidas as características das vigas do programa experimental, tais como geometria, armaduras longitudinais e transversais, características do concreto e materiais de reforço.

Tais características foram definidas combinando-se parâmetros relacionados a capacidade de ensaio do laboratório a ser utilizado no programa experimental, disponibilidade de materiais a serem adquiridos ou recebidos por doações e similaridade com estudos disponíveis na literatura, os quais analisaram experimentalmente o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com FRP passivo e protendido (KANG; ZHANG; LIU, 2012; GAO; GU; MOSALLAM, 2016; PENG *et al.*, 2016; HONG; PARK, 2017; DENG *et al.*, 2021; LIU *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2022), de modo que fosse possível efetuar comparações na etapa de análise dos resultados.

Na sequência, realizou-se o pré-dimensionamento das vigas a serem avaliadas na etapa do programa experimental, sendo calculadas as capacidades últimas e estimados os modos de ruptura da viga de referência (sem reforço), reforçadas à flexão com colagem passiva e protendida utilizando laminados de CFRP protendido. Esta etapa foi de extrema importância para compatibilização com a capacidade dos equipamentos de ensaio do laboratório utilizado para os ensaios das referidas vigas, assim como, disponibilidade de materiais adquiridos.

No pré-dimensionamento das vigas do presente estudo, utilizou-se as propriedades mecânicas dos materiais com base em indicações comerciais e áreas nominais das seções transversais dos elementos. Os módulos de elasticidade do concreto e do aço foram determinados por meio de modelos e recomendações previstas nas normas NBR 6118 (ABNT, 2023) e ACI 318 (2019). Já módulo de elasticidade do material de reforço, neste primeiro momento, foi considerado como o valor indicado pelo fabricante.

Em relação a deformações dos materiais, considerou-se uma deformação máxima nas armaduras longitudinais inferiores igual a 10 ‰ para a aplicação do modelo previsto na norma NBR 6118 (ABNT, 2023), considerando-se domínio de deformação 2, enquanto na aplicação do modelo da norma ACI 318 (2019), a deformação no concreto foi considerada como sendo 3 ‰, sem imposição de limite de ductilidade para as armaduras. A deformação efetiva no

material de reforço aplicado pela técnica passiva, foi estimada com base nas rotinas de dimensionamento das normas ACI PRC-440.2 (2023) e *Fib Bulletin 90* (2019).

Para o pré-dimensionamento das vigas com o sistema de reforço com FRP protendido, num primeiro momento, a deformação máxima no material de reforço foi definida como a deformação média observada em ensaios de *pullout* conduzidos por Barris, Correia e Sena-Cruz (2018), que utilizaram dos mesmos sistemas de protensão e ancoragem considerados no presente programa experimental.

3.4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O presente estudo teve como objetivo analisar o comportamento estrutural de vigas de concreto armado em escala real, reabilitadas e/ou reforçadas à flexão com laminados de CFRP passivos e protendidos, aplicado segundo à técnica EBR, de modo a analisar os seguintes aspectos: (i) incrementos de capacidade à flexão; (ii) modos de ruptura; (iii) rigidez à flexão; (iv) ductilidade; (v) deformações nos materiais; (vi) padrão fissuratório; (vii) abertura/fechamento de fissuras; (viii) deslocamento vertical das vigas e (ix) perdas de protensão.

Para tanto, realizou-se programa experimental com cinco vigas de concreto armado submetidas à ensaio de flexão por quatro pontos até sua ruptura, sendo parte das vigas submetidas à pré-fissuração. Adotou-se a identificação BX-Y-Z, onde “B” se refere ao termo viga (Beam), em língua inglesa, “X” se refere ao número do elemento ensaiado, o termo “Y” indica se as vigas foram submetidas ou não à pré-fissuração, sendo “PC” de *Pre-Cracked*, e “NPC” de *Non Pre-Cracked*, ambos em língua inglesa. Por fim, o termo “Z” se refere ao tipo de reforço, sendo “P” de *Prestressed*, para as vigas com reforço protendido, e “NP” de *Non Prestressed* para as vigas com reforço passivo, também em língua inglesa.

Na Tabela 10 é apresentado o resumo das cinco vigas do presente programa experimental. Adotou-se uma viga não reforçada (B1-0-0, a qual serviu de referência para comparação com as vigas reforçadas), duas vigas reforçadas à flexão com colagem externa de laminado de CFRP passivo (B2-NPC-NP e B3-PC-NP, esta última submetida à pré-fissuração) e duas vigas reforçadas à flexão colagem externa de laminado de CFRP protendido (B4-NPC-P e B5-PC-P, esta última submetida à pré-fissuração).

Tabela 10 – Resumo e nomenclatura das vigas ensaiadas

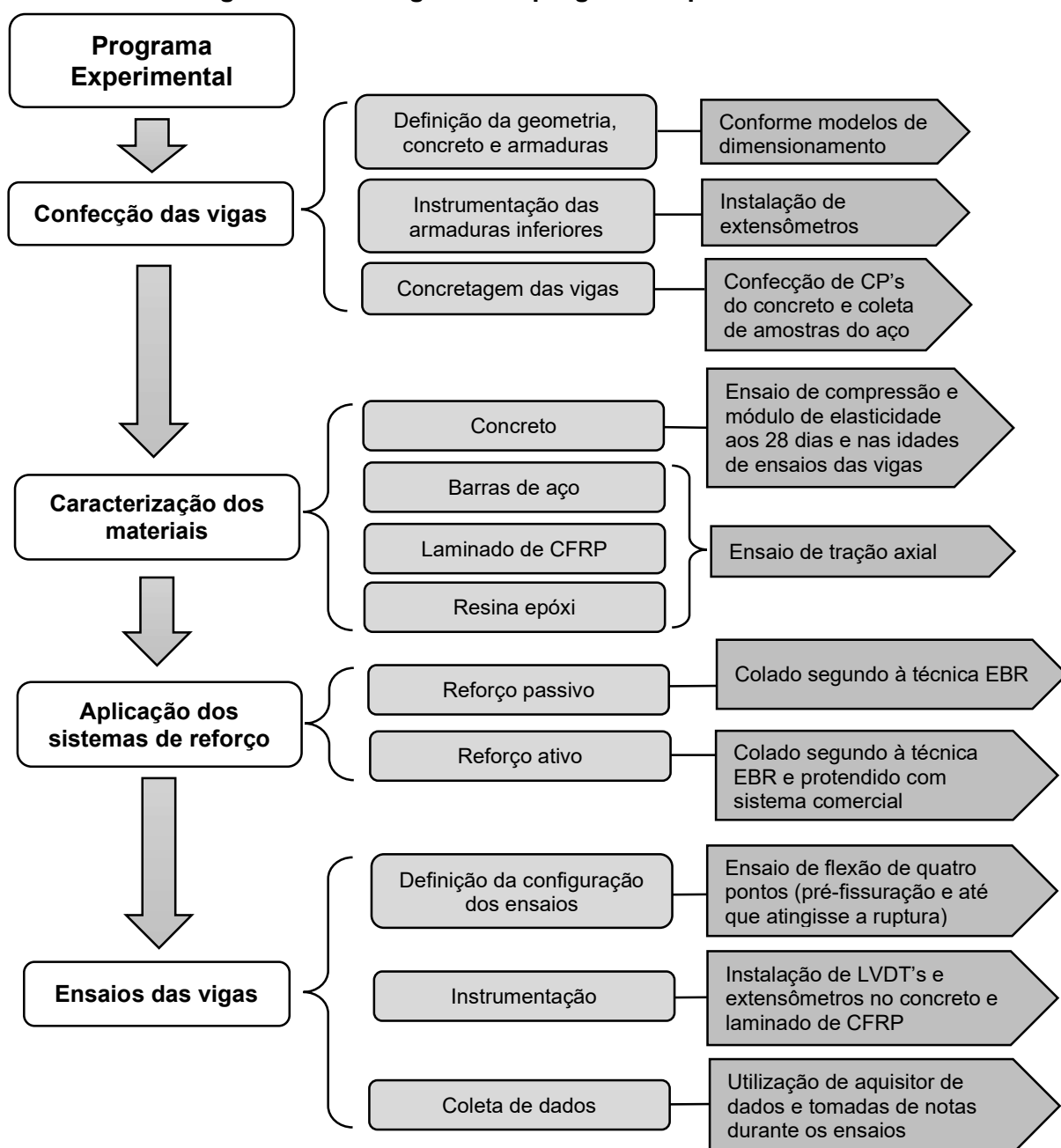
| Identificação | Características das vigas | |
|---------------|---------------------------|-------------------------------------|
| | Reforço à flexão | Ensaio |
| B1-0-0 | Sem reforço (referência) | Flexão até ruptura |
| B2-NPC-NP | EBR passivo | Flexão até ruptura |
| B3-PC-NP | EBR passivo | Pré-fissuração e flexão até ruptura |
| B4-NPC-P | EBR protendido | Flexão até ruptura |
| B5-PC-P | EBR protendido | Pré-fissuração e flexão até ruptura |

Fonte: Próprio autor

Em relação à pré-fissuração, as vigas foram submetidas à ensaio prévio de flexão com aplicação de carregamento até que se atingisse o deslocamento vertical de $L/250$, limite recomendado pela norma NBR 6118 (ABNT, 2023) para aceitabilidade sensorial, sendo tal ensaio realizado antes da aplicação dos sistemas de reforço.

Paralelamente aos ensaios das vigas, também foram realizados ensaios de caracterização dos materiais utilizados no presente trabalho, como o concreto, aço, laminado de CFRP e resina epóxi. Na Figura 61 é apresentando o fluxograma com o resumo das etapas do presente programa experimental.

Figura 61 – Fluxograma do programa experimental

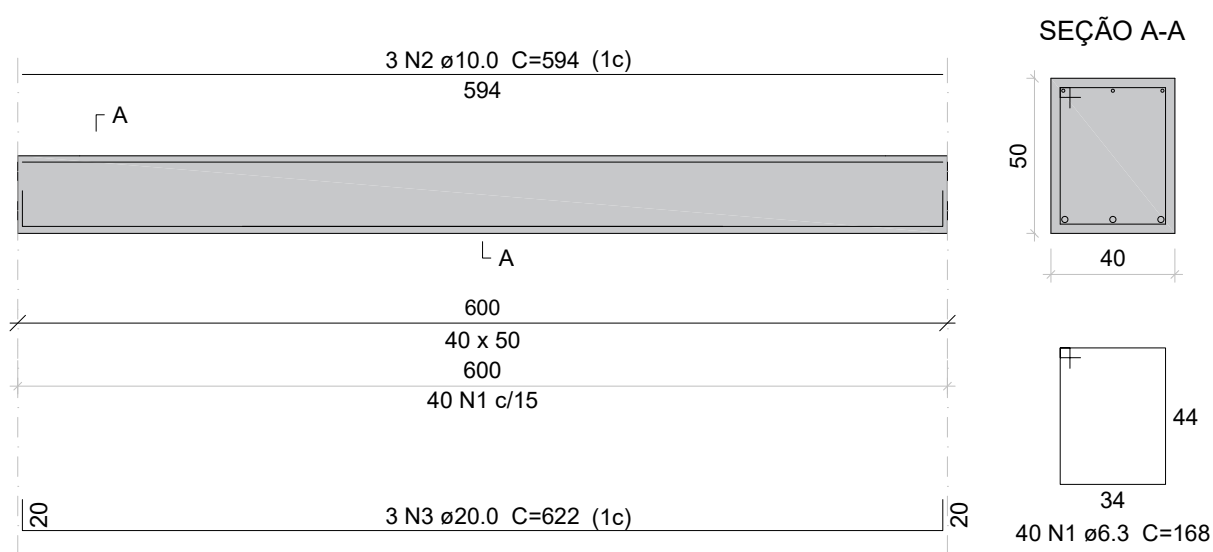


Fonte: Próprio autor

3.4.1 CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS DE CONCRETO ARMADO

Na Figura 62 é apresentado o detalhamento das vigas de concreto armado consideradas no presente programa experimental. Todas as vigas, de seção retangular, possuem 40 cm de largura, 50 cm de altura e 600 cm de comprimento. Adotou-se armadura longitudinal inferior composta por 3 barras com diâmetro de 20,0 mm, armadura longitudinal superior composta por 3 barras de 10,0 mm, e armadura transversal com estribos de 6,3 mm espaçados a cada 15 cm, sendo todas as armaduras indicadas comercialmente como aço CA-50. O cobrimento adotado para as armaduras foi de 3 cm.

Figura 62 – Detalhamento das vigas de concreto armado (Dimensões em cm)



Fonte: Próprio autor

Como já mencionado, a definição das características da viga se deu com base em três premissas: (i) disponibilidade e características dos materiais a serem fornecidos e/ou adquiridos para os ensaios; (ii) dimensionamento da capacidade resistente das vigas e compatibilização com os equipamentos de laboratório; e (iii) similaridade com trabalhos disponíveis na literatura que também avaliaram o comportamento à flexão de vigas de concreto armado em escala real reforçadas à flexão com FRP passivo e protendido.

Salienta-se que as referidas vigas tiveram a sua capacidade a força cortante previamente verificadas, respeitando-se os critérios da norma NBR 6118 (ABNT, 2023), sendo adotada configuração de estribos de modo as vigas não apresentem ruína devido à força cortante e possibilitando que seu comportamento à flexão seja analisado de forma adequada e clara no presente estudo.

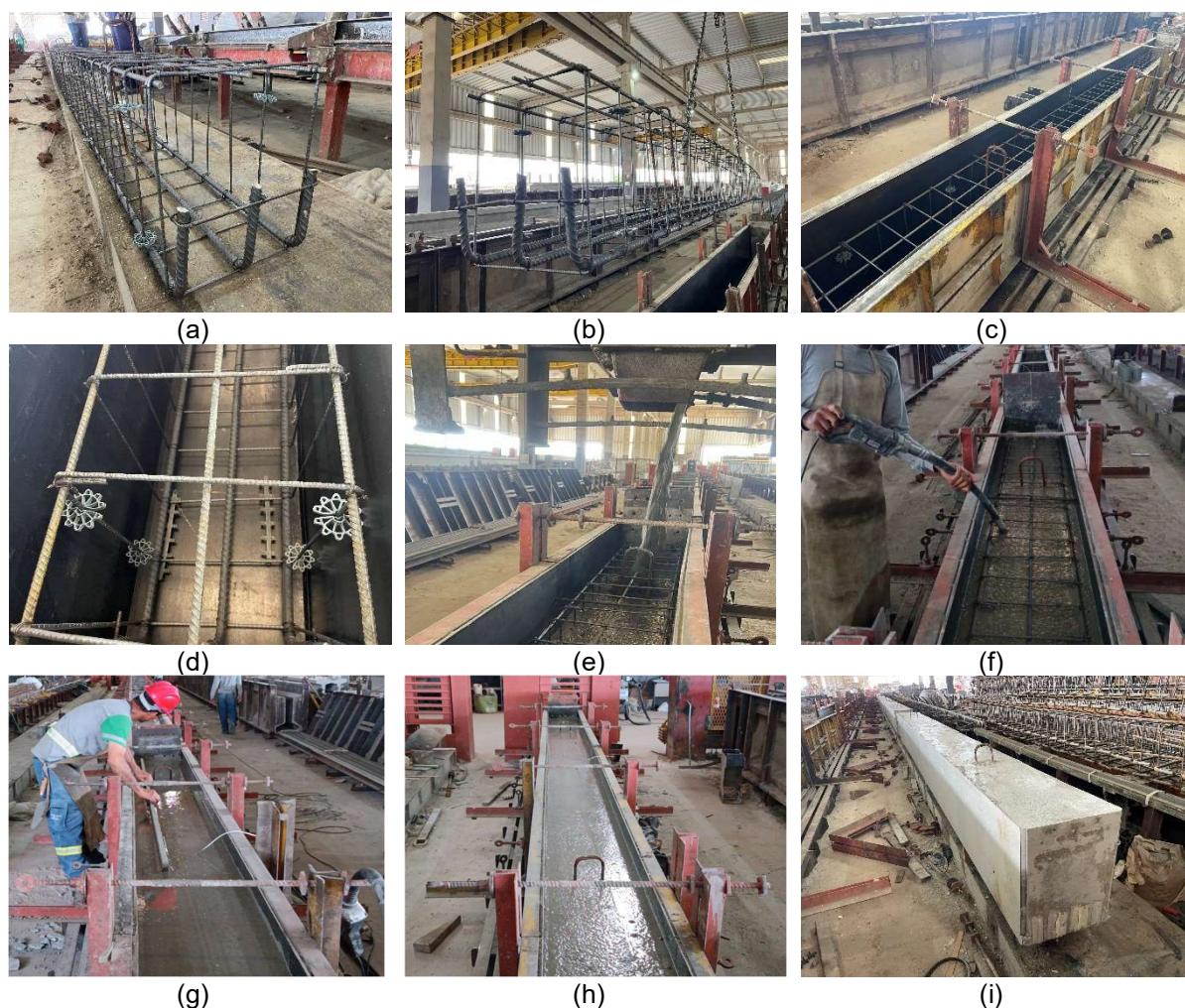
Ainda, um dimensionamento preliminar à flexão das vigas, com aplicação da norma NBR 6118 (ABNT, 2023), permitiu adotar uma geometria, características dos materiais e taxas de armaduras que resultassem em domínio de deformação 2 da seção transversal, com

baixos níveis iniciais de deformação do concreto na região comprimida, condição que permite maiores incrementos quando da aplicação dos sistemas de reforço na região tracionada.

3.4.2 CONFEÇÃO DAS VIGAS DE CONCRETO ARMADO

As vigas de concreto armado foram doadas pela empresa Usicon Construções Pré-Fabricadas®, com sede na cidade de Araraquara/SP. Logo, a confecção das referidas vigas, no que diz respeito montagem das armaduras, fôrmas e concretagem, realizou-se em ambiente industrial seguindo-se os procedimentos de execução e controle de materiais da referida empresa. Na Figura 63 são apresentadas as principais etapas do processo de moldagem das vigas. Note-se que as vigas e os corpos-de-prova (CP) de concreto foram moldados em uma única concretagem de forma a reduzir a variabilidade do material.

Figura 63 – Moldagem das vigas de concreto armado



Fonte: Próprio autor

Na Figura 63a apresentam-se as armaduras das vigas, conforme detalhamento apresentado na Figura 62, sendo as mesmas dobradas no local e amarradas com a utilização de arame recozido. Na Figura 63b é mostrado o içamento das armaduras, seu posicionamento nas

formas metálicas (Figura 63c), e o detalhe dos espaçadores utilizados nas armaduras longitudinais e transversais, de modo a garantir o cobrimento de 3 cm considerado no detalhamento (Figura 63d).

A Figura 63e apresenta o lançamento do concreto, a utilização de vibrador para o devido adensamento do concreto nas formas (Figura 63f), a regularização da superfície superior das vigas (Figura 63g), e seu aspecto após a concretagem (Figura 63h). Por fim, a Figura 63i apresenta o aspecto final das vigas após a desmoldagem, a qual ocorreu após 2 dias da concretagem.

Na Tabela 11 é apresentado o traço do concreto utilizado na confecção das vigas, com as indicações das massas específicas e aparente de cada material utilizado. O concreto foi produzido em usina interna à empresa fornecedora das vigas, sendo classificado como concreto autoadensável, com utilização de cimento CPV-ARI (Cimento Portland de alta resistência inicia), fator água cimento de 0,55, aditivo redutor de água à base de policarboxilatos e resistência média à compressão estimada em 50 MPa aos 28 dias.

Tabela 11 – Traço do concreto

| Material | Quantidade (kg/m³) | Massa específica (g/cm³) |
|-------------------------|--------------------------------------|--|
| Cimento | 400 | 3,05 |
| Areia Natural | 826 | 2,63 |
| Brita 0 | 886 | 2,88 |
| Água | 222 | 1,00 |
| Aditivo Redutor de Água | 3,6 | 1,20 |

Fonte: Próprio autor

Ainda na etapa de concretagem das vigas, realizou-se o ensaio de espalhamento (Figuras 64a-c), também conhecido como *slump-flow* (em língua inglesa), para a avaliação da fluidez do concreto autoadensável seguindo as recomendações da norma NBR 15823-2 (ABNT, 2017).

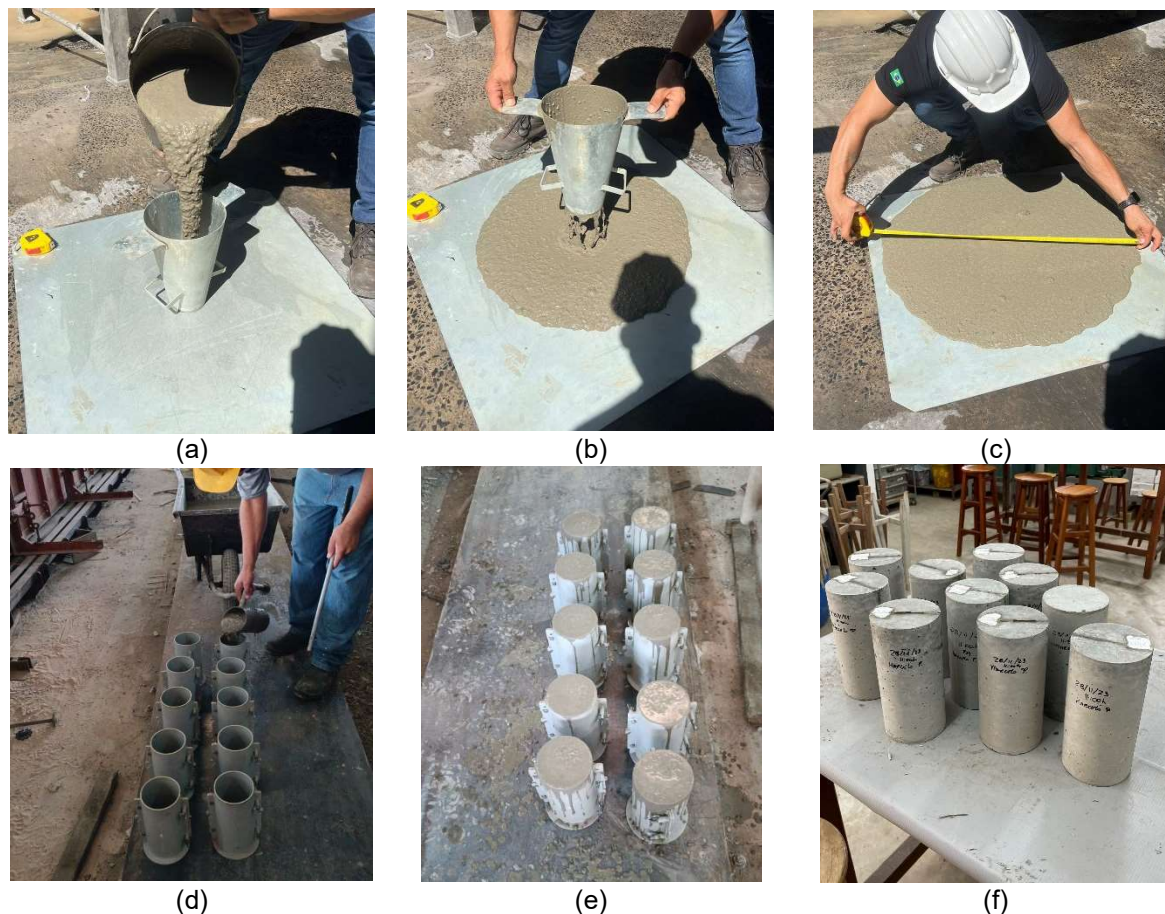
Também foram moldados 10 corpos de prova (CP's) cilíndricos do concreto, com 200 mm de altura e 100 mm de diâmetro, seguindo-se os critérios da norma NBR 5738 (ABNT, 2016). A desforma dos CP's ocorreu após 48 horas, respeitando-se o período de cura inicial do concreto. Posteriormente, os CP's foram armazenados juntos às vigas concretadas, estando submetidos às mesmas condições de armazenamento até a data de ensaio (Figuras 64d-f).

3.4.3 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO CONCRETO

Para a caracterização das propriedades mecânicas do concreto ensaios para determinação da resistência à compressão axial e módulo de elasticidade dos CP's moldados,

os quais foram confeccionados seguindo-se os critérios da norma NBR 5738 (ABNT, 2016), foram realizados.

Figura 64 – Ensaio de espalhamento e moldagem dos corpos de prova



Fonte: Próprio autor

O ensaio de compressão axial (Figura 65a) foi realizado segundo as especificações na norma NBR 5739 (ABNT, 2018). O ensaio para determinação do módulo de elasticidade (Figura 65b) foi realizado seguindo-se os parâmetros da norma NBR 8522-1 (ABNT, 2021), sendo cada CP instrumentado com um extensômetro eletrônico removível de marca EMIC, com comprimento de leitura de 150 mm e faixa de medição entre 0,0001 e 2,5 mm, com o objetivo de monitorar a deformação dos CP's durante o ensaio.

Ambos os ensaios foram realizados no Laboratório de Sistemas Estruturais (LSE) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), com a utilização da máquina de ensaios universal da marca EMIC, modelo DL 60000, com célula de carga com capacidade máxima de 600 kN com resolução de leitura de 0,1 kN, sendo aplicado velocidade de carregamento de 10mm/min.

Ao todo, foram ensaiados nove dos corpos de prova de concreto, divididos em três grupos e ensaiados em três diferentes datas, sendo elas: (i) aos 28 dias; (ii) ao início e (iii) ao término da etapa de ensaios das vigas.

Figura 65 – Etapas dos ensaios de compressão axial e módulo de elasticidade do concreto



Fonte: Próprio autor

3.4.4 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO AÇO

Para a caracterização das propriedades mecânicas do aço realizou-se ensaio de tração axial em amostras das armaduras utilizadas na confecção da viga, retiradas do mesmo lote, de forma aleatória. Para tanto, foram seguidos os critérios da norma NBR ISO 6892-1 (ABNT, 2018), versão vigente na época da realização dos ensaios.

Foram ensaiadas três barras para cada diâmetro previsto no detalhamento das vigas, (Figura 62), perfazendo um total de 9 amostras, sendo três com diâmetro de 6,3 mm, três com diâmetro 10,0 mm e três com diâmetro de 20,0 mm, respectivamente, todas com comprimento inicial médio de 80,0 cm.

Na Figura 66 são apresentadas as principais etapas do ensaio de tração axial do aço, o qual também foi realizado no LSE da UFSCar, com a utilização da máquina de ensaios universal da marca EMIC, já descrita anteriormente, sendo aplicado velocidade de carregamento de 10mm/min. Ainda, as barras foram instrumentadas com extensômetro eletrônico removível da marca EMIC, este também já descrito anteriormente, com objetivo de monitorar a deformação nas amostras durante os ensaios.

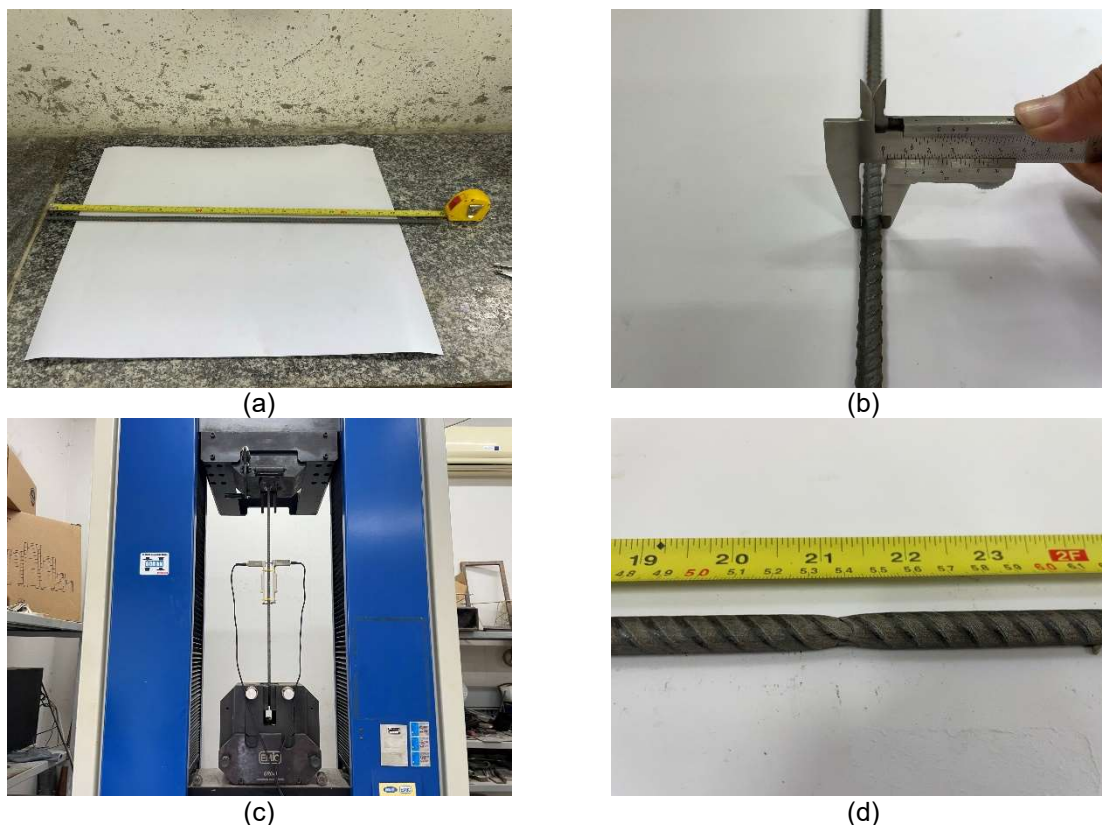
O ensaio de tração uniaxial nas amostras das armaduras teve como objetivo determinar: (i) tensão de escoamento (f_s); (ii) tensão última (f_u); (iii) deformação no escoamento (ε_s); e (iv) módulo de elasticidade do aço (E_s). Destaca-se que antes da ruptura das amostras, o extensômetro eletrônico foi removido, de modo a evitar danos ao mesmo, logo, a deformação última das barras não foi registrada.

3.4.5 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO LAMINADO DE CFRP

O laminado de FRP adotado nos sistemas de reforço do presente estudo é do tipo pré-fabricado, produzido por meio de processo de pultrusão, e composto por resina epóxi e Fibras

de carbono unidirecionais de CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*). Na Tabela 12 são apresentados os principais dados técnicos do laminado tal como o especificado no catálogo técnico do fabricante.

Figura 66 – Etapas do ensaio de tração uniaxial do aço: (a) medida do comprimento, (b) aferição do diâmetro, (c) exemplo de ensaio e (d) região de ruptura



Fonte: Próprio autor

Tabela 12 – Dados técnicos do laminado de CFRP

| Características | | |
|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| Dimensões | Largura | 100 mm |
| | Espessura | 1,4 mm |
| | Seção transversal | 140 mm ² |
| Propriedades mecânicas | Tensão de tração (média) | 2800 MPa |
| | Módulo de elasticidade (médio) | 170 GPa |
| | Alongamento na ruptura | 16 ‰ |
| Propriedades físicas | Densidade | 1,6 g/cm ³ |
| | Volume de Fibras | 68 % |

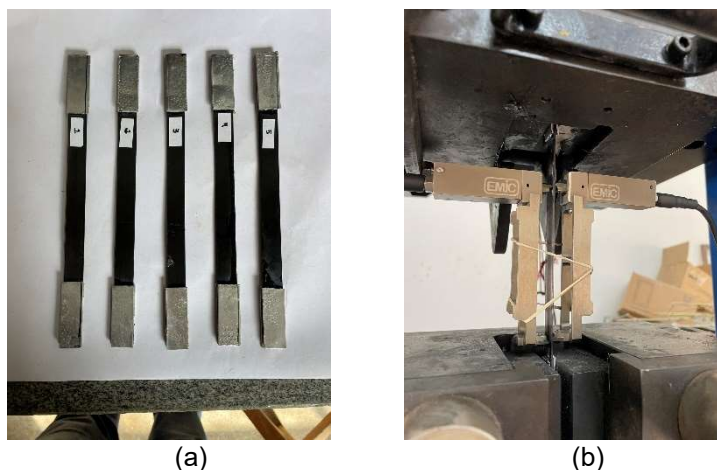
Fonte: *Clever Solutions (2022a)*

A caracterização mecânica do laminado de CFRP, para determinação de sua tensão à tração última e módulo de elasticidade, foi realizada por meio de ensaios de tração uniaxial na mesma direção das Fibras unidirecionais (Figura 67). Para tanto, foram adotados

procedimentos de ensaios em conformidade com os princípios gerais indicados na norma ISO 527-1 (2012), principalmente ao que diz respeito a velocidade de ensaio (2 mm/min), acondicionamento e preparo dos CPs em mesmas condições de exposição, determinação das dimensões de cada CP (medições realizadas na porção central e à 5 mm das extremidades), e determinação do módulo de elasticidade com base na deformação monitorada durante os ensaios (inclinação da curva tensão/deformação entre os pontos de deformação de 0,05 % e 0,25 %).

Foram ensaiados 5 corpos de provas (Figura 67a), a quantidade mínima indicada pela norma ISO 527-1 (2012), os quais foram confeccionados em conformidade com a norma ISO 527-5 (2021).

Figura 67 – Confeção de CPs e ensaio de caracterização do laminado de CFRP



Fonte: Próprio autor

Tal ensaio foi realizado no LSE da UFSCar, na máquina de ensaios universal da marca EMIC, com velocidade de aplicação de carga de 2 mm/min. Para tanto, foi utilizado extensômetro eletrônico removível da marca EMIC, com comprimento de leitura de 100 mm, o qual foi instalado na parte central dos CPs para obtenção da deformação do material durante o ensaio (Figura 67b).

3.4.6 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA RESINA EPÓXI

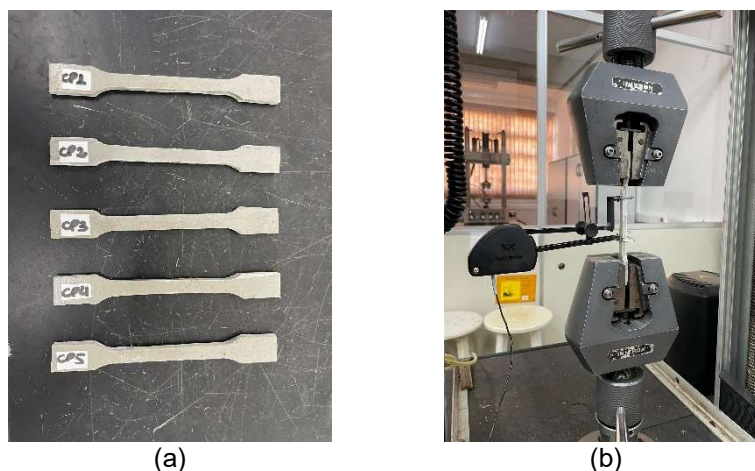
A resina utilizada nos sistemas de reforço do presente trabalho é um adesivo estrutural à base de resina epóxi, com consistência pastosa, tixotrópico, bi-componente, isenta de solventes, de alta viscosidade e pega normal, tal como o especificado no catálogo técnico do fabricante. Na Tabela 13 são apresentados os principais dados técnicos da referida resina epóxi.

Tabela 13 – Dados técnicos do adesivo estrutural

| Características | |
|---|---------------------------|
| Tempo de trabalho | 90 minutos |
| Tempo de cura inicial (1000g a 25°C) | 24 horas |
| Cura final | 7 dias |
| Resistência à compressão (após 24 horas) | 34,1 MPa |
| Resistência à compressão (após 7 dias) | 57 MPa |
| Resistência à aderência (após 7 dias) | 4 MPa (falha no concreto) |

Fonte: *Clever Solutions* (2022b)

Para a caracterização mecânica da resina epóxi teve-se com base os princípios gerais preconizados pela norma normas ISO 527-1 (2012), assim como as recomendações da norma. Foram confeccionados 5 CPs da resina epóxi (Figura 68a) e os ensaios foram realizados aos 7 dias após as moldagens. O ensaio de tração uniaxial (Figura 68b) foi realizado no Laboratório de Polímeros da UFSCar, na máquina de ensaios universal da marca Instron, modelo 5569, com velocidade de aplicação de carga de 2 mm/min. Para tanto, foi utilizado extensômetro eletrônico, marca Instron, com comprimento de leitura de 50 mm, o qual foi instalado na parte central dos CPs.

Figura 68 – CPs e ensaio de caracterização da resina epóxi

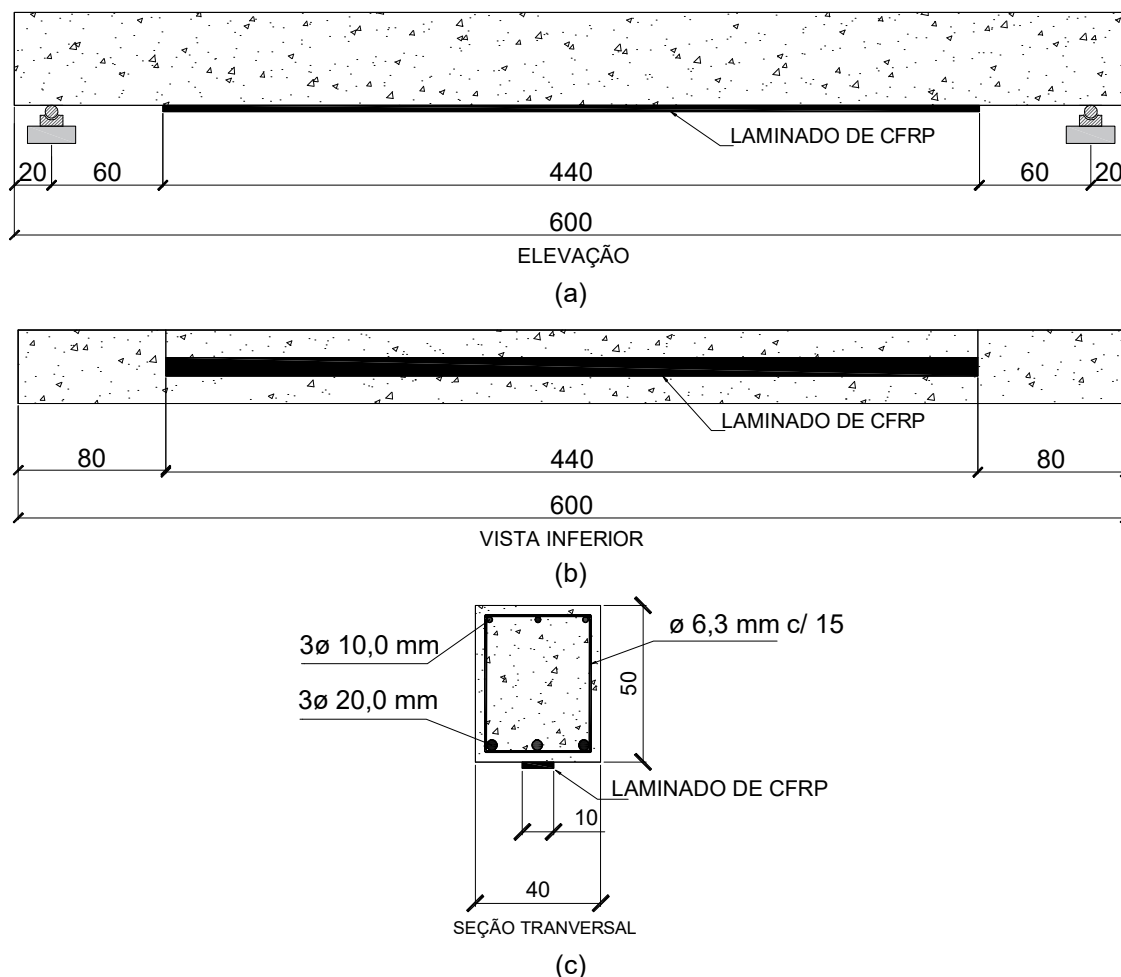
Fonte: Próprio autor

3.4.7 APLICAÇÃO DO SISTEMA DE REFORÇO À FLEXÃO (PASSIVO)

O sistema de reforço utilizado no programa experimental é composto por laminados de CFRP e resinas epoxídicas. Para o reforço à flexão passivo das vigas de concreto armado utilizou-se da técnica EBR (*Externally Bonded Reinforcement*, em língua inglesa), a qual consiste, de forma resumida, na colagem do laminado de CFRP ao substrato tracionado da viga. Nas Figuras 69a-c são apresentados detalhes do referido reforço, com elevação lateral,

vista inferior e seção transversal, respectivamente, no qual o laminado de CFRP, de seção de $1,4 \times 100 \text{ mm}^2$, é colado na face inferior da viga, em seu eixo central, com um comprimento total de 440 cm.

Figura 69 – Configuração do reforço passivo à flexão (dimensões em cm)



Fonte: Próprio autor

Destaca-se que a definição do comprimento do laminado de CFRP se deu com base na disponibilidade de espaço físico para a acomodação, junto às regiões de apoio, do sistema de protensão do reforço ativo.

Os procedimentos adotados para a aplicação do referido reforço tiveram como base as normas ACI PRC-440.2 (2023) e *Fib Bulletin 90* (2019), assim como estudos disponíveis na literatura nacional, como Dalfré (2022) e PRÁTICA RECOMENDADA DO CT 303 (IBRACON/ABECE, 2023), além das recomendações do fabricante do laminado de CFRP e resina epóxi.

A primeira etapa da aplicação do reforço passivo se refere a preparação do substrato do elemento a ser reforçado (Figura 70). Para tanto, fez-se a demarcação da posição do laminado de CFRP (Figura 70a).

Figura 70 – Preparação do substrato do elemento a ser reforçado

Fonte: Próprio autor

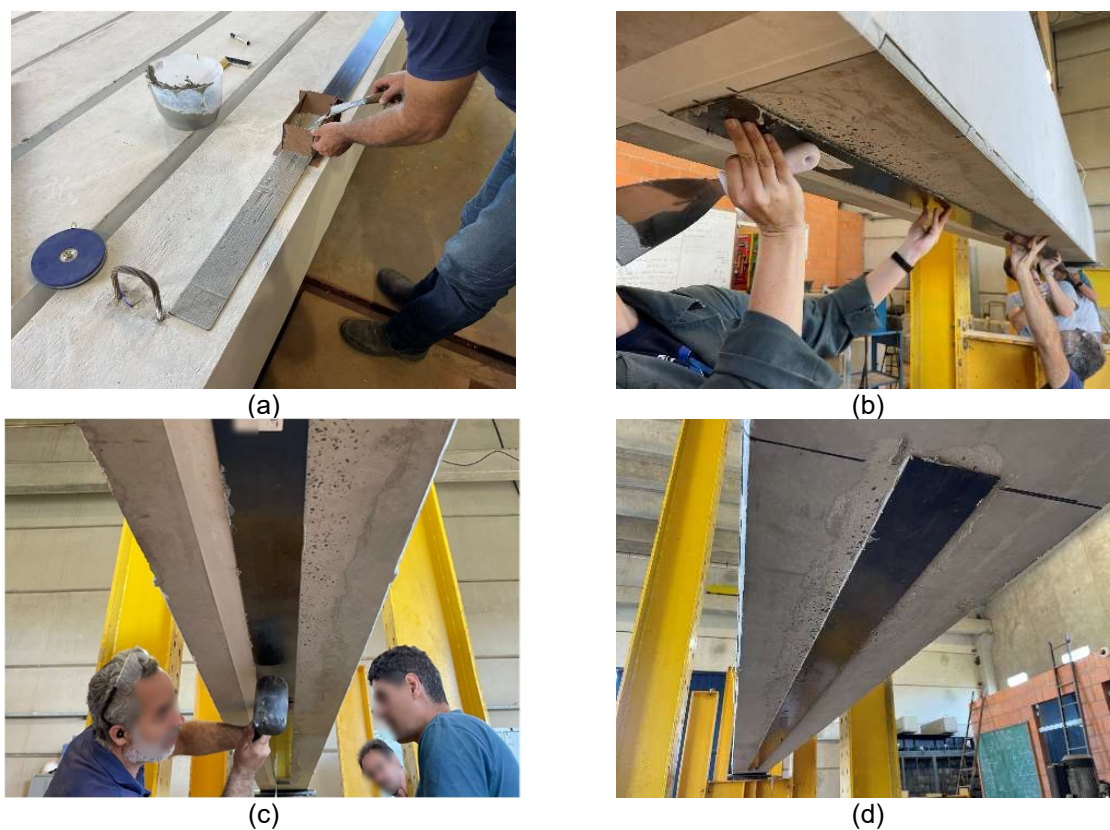
Em seguida a área demarcada foi preparada com o uso de esmerilhadeira com disco de desbaste diamantado acoplado (equipamento disponível em laboratório), conforme Figura 70b. Tal etapa é de extrema importância para garantir a adequada aderência do sistema de reforço ao substrato, uma vez que retira eventuais oleosidades, manchas de graxas ou desmoldantes utilizados nas formas de concretagem, assim como, remover a camada de nata de cimento superficial e expõe os agregados. Na sequência, utilizou-se de ar comprimido para remoção de eventuais partículas soltas e poeira proveniente da etapa anterior (Figura 70c). Após, verificou-se a umidade superficial do substrato (Figura 70d), comparando-se os resultados obtidos com os apresentados em normas vigentes.

Numa segunda etapa, após cortado nas dimensões previstas em projeto, o laminado de CFRP deve ter a superfície, que ficará em contato com a resina epóxi, devidamente limpa com o uso de álcool etílico absoluto 99,8 % (Figura 71a). Em seguida, preparou-se a resina epóxi seguindo as recomendações do fabricante, sendo as proporções dos componentes A e B devidamente pesadas para a correta dosagem, fez-se sua mistura e homogeneização com o auxílio de misturador mecânico pelo tempo recomendado pelo fabricante (Figura 71b).

Figura 71 – Preparação dos materiais a serem aplicados do reforço passivo

Fonte: Próprio autor

Em uma terceira etapa fez-se a aplicação da resina epóxi no laminado de CFRP, sendo que no presente estudo utilizou-se de gabarito em madeira para a adequada aplicação do adesivo estrutural, garantindo-se a espessura de 2 mm recomendada pelo fabricante (Figura 72a). Uma vez aplicada a resina epóxi no laminado de CFRP, este foi colado na posição já demarcada e preparada do elemento a ser reforçado (Figura 72b), promovendo a colagem adequada do sistema. Estas duas últimas etapas ocorreram dentro do tempo de trabalho da resina especificado pelo fabricante.

Figura 72 – Aplicação do reforço à flexão passivo segundo a técnica EBR

Fonte: Próprio autor

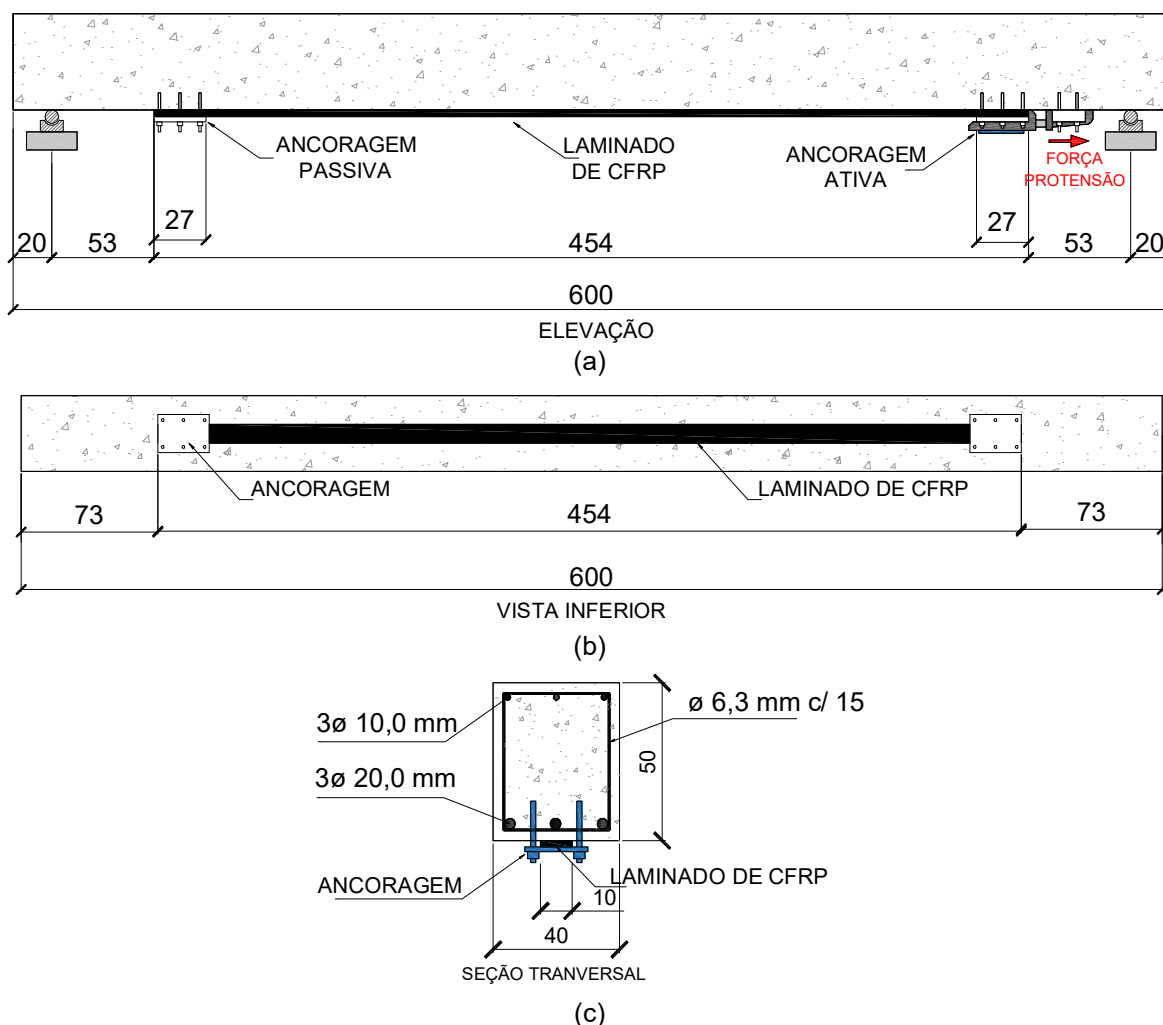
Ainda na etapa de colagem, realizou-se uma inspeção visual do sistema aplicado e com o auxílio de um martelo de borracha, com o intuito de garantir a adequada aderência do sistema ao substrato (Figura 73c).

Na Figura 72d é apresentado o aspecto final do reforço passivo à flexão. Destaca-se que a aplicação do reforço passivo se deu com a viga já posicionada na condição de ensaio e em condições similares de uma aplicação prática. Após a aplicação do reforço, a viga foi mantida em ambiente laboratorial por 7 dias para a correta cura do adesivo estrutural, tal como o recomendado pelo fabricante.

3.4.8 APLICAÇÃO DO SISTEMA DE REFORÇO À FLEXÃO (PROTENDIDO)

Nas Figuras 73a-c são apresentados os arranjos do reforço à flexão com o laminado de CFRP protendido, o qual foi colado na face inferior da viga, em seu eixo central, com um comprimento total de 454 cm, também fixado em suas extremidades com o uso de ancoragem mecânica (passiva e ativa), as quais possuem comprimento de 27 cm e largura de 22 cm.

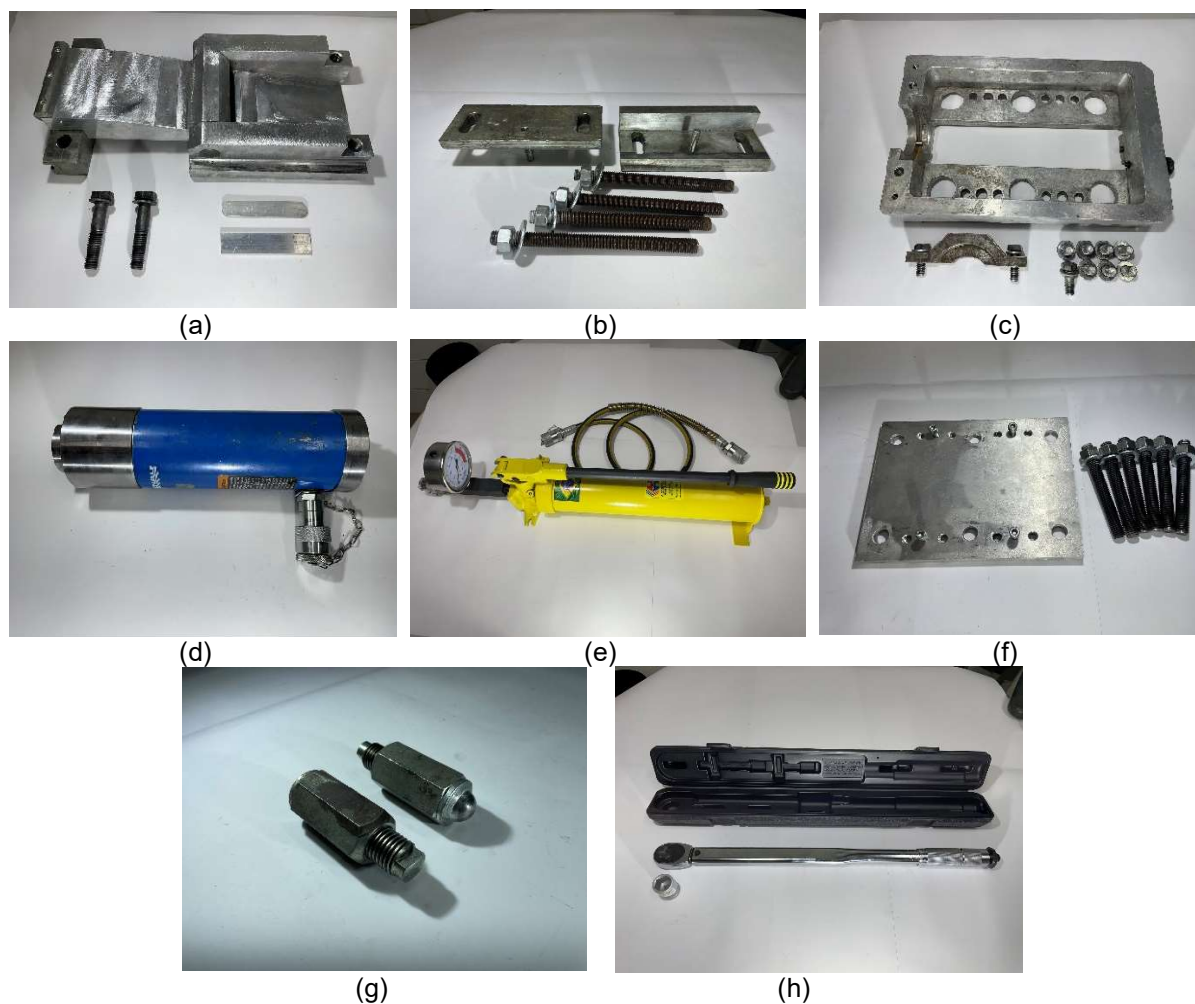
Figura 73 – Configuração do reforço à flexão com FRP protendido (dimensões em cm)



Destaca-se que a definição do comprimento do laminado de CFRP se deu com base na disponibilidade de espaço físico para a acomodação, junto às regiões de apoio, do sistema de protensão do reforço ativo.

Na presente pesquisa, utilizou-se um sistema de protensão de laminados de CFRP comercialmente disponível no Brasil (Figura 74), o qual é formado por diferentes equipamentos e dispositivos: (a) elemento móvel de fixação do laminado de CFRP; (b) guias metálicas para a movimentação do dispositivo de fixação; (c) moldura metálica para encaixe do cilindro hidráulico; (d) cilindro hidráulico; (e) bomba hidráulica; (f) placas metálicas de ancoragem e chumbadores; (g) parafusos de travamento do dispositivo de fixação; e (h) torquímetro de estalo.

Figura 74 – Equipamentos e dispositivos do sistema de protensão



Fonte: Próprio autor

Para a aplicação do referido sistema de reforço foram adotadas as etapas sugeridas por Correia (2018), já apresentadas no item 2.5.3, combinadas com as recomendações do fabricante (CLEVER SOLUTIONS, 2021). Tendo em vista que o referido sistema de reforço também envolve a colagem externa de laminado de CFRP segundo a técnica EBR, as

recomendações das normas ACI PRC-440.2 (2023) e *Fib Bulletin 90* (2019) também foram seguidas.

Assim como no reforço passivo, a primeira etapa da aplicação do reforço se refere a preparação do substrato do elemento a ser reforçado. Assim, fez-se a determinação da posição do laminado de CFRP e das ancoragens (Figura 75a). Na sequência, a área demarcada foi preparada com o uso de esmerilhadeira com disco de desbaste diamantado acoplado (equipamento disponível em laboratório) para garantir a adequada aderência do sistema de reforço ao substrato, removendo-se oleosidades, manchas de graxas ou desmoldantes utilizados nas formas de concretagem, assim como, a camada de nata de cimento superficial, de modo a expor os agregados (Figura 75b).

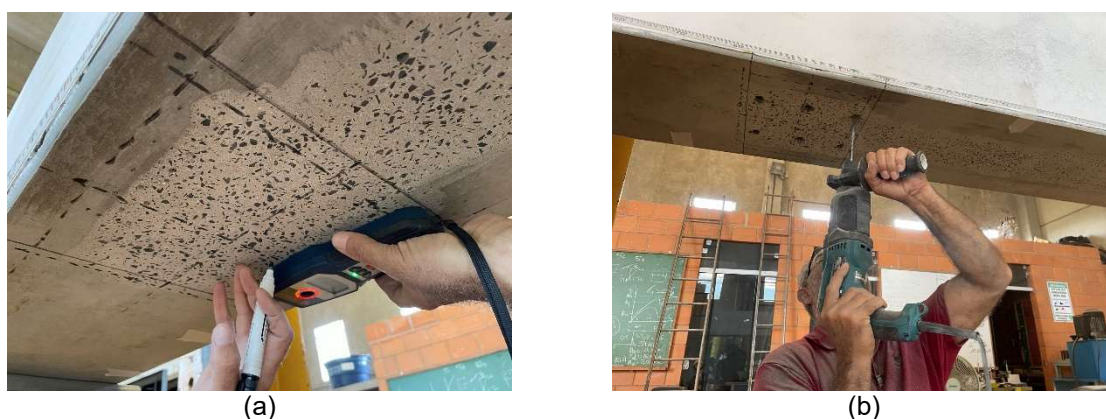
Figura 75 – Preparação do substrato do elemento a ser reforçado do reforço protendido



Fonte: Próprio autor

Em seguida, com o auxílio de um detector de metais (Figura 76a), as posições das barras longitudinais e estribos foram confirmadas e com o uso de martete perfurador, foram executados os furos, com os diâmetros e profundidades especificadas pelo fabricante, para fixação dos chumbadores. Nesta etapa deve-se evitar danos aos estribos e armaduras longitudinais existentes (Figura 76b).

Figura 76 – Marcação e execução dos furos para os chumbadores



Fonte: Próprio autor

Uma vez realizados os furos dos chumbadores, fez-se a limpeza dos furos com o uso de jato de ar comprimido e posteriormente com o uso de escova metálica específica para furos, de forma a remover excesso de poeira ou partes soltas nos furos executados (Figura 77).

Figura 77 – Limpeza dos furos dos chumbadores



Fonte: Próprio autor

Após a adequada limpeza dos furos, iniciou-se a instalação dos chumbadores. Neste trabalho utilizou-se um adesivo bicomponente à base de metacrilato/viniléster, tixotrópico para a ancoragem química dos chumbadores, o qual foi aplicado nos furos por meio de injeção com aplicador manual e bico misturador, seguindo-se as recomendações do fabricante de modo a se obter uma mistura homogênea do produto (Figura 78). Na sequência, as barras roscadas de aço ASTM A193-B7 (ASTM, 2023) foram manualmente inseridas nos furos com movimento giratórios. Na Figura 78d é apresentado o aspecto final dos chumbadores.

Posteriormente, realizou-se a aplicação da ancoragem passiva. Para tanto, a área demarcada na viga para a ancoragem foi devidamente limpa com jato de ar comprimido, e a placa metálica de ancoragem teve a sua superfície de contato com o laminado de CFRP tratada com lixa manual e com o uso de álcool etílico absoluto 99,8 % para remoção de poeiras e/ou partes soltas (Figura 79). A umidade superficial do substrato também foi verificada nesta etapa. Em seguida, a superfície de colagem do laminado de CFRP foi devidamente limpa com o uso de álcool etílico absoluto 99,8 %, fez-se a mistura da resina epóxi (Figura 79d).

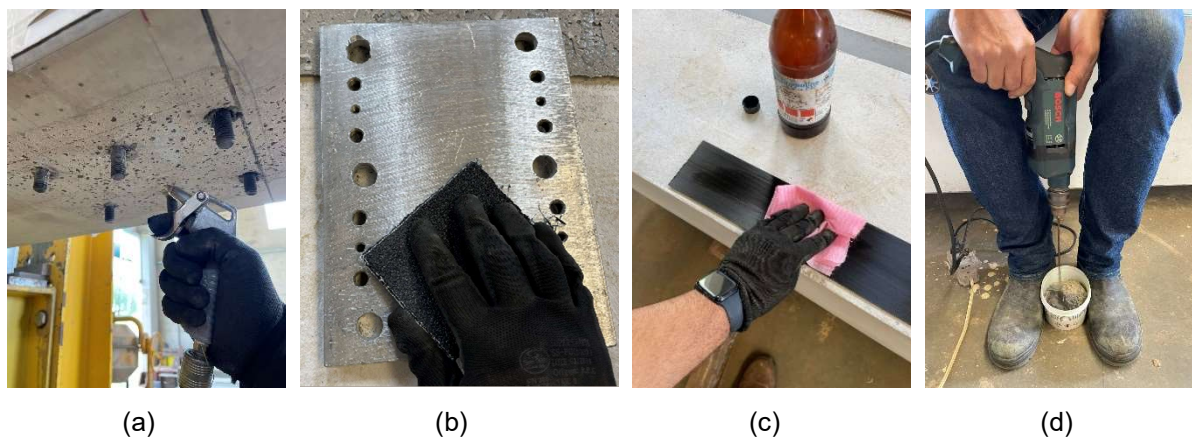
Uma vez preparada a resina epóxi, dentro do tempo de trabalho especificado pelo fabricante, aplicou-se manualmente, com o auxílio de espátulas, a resina no laminado de CFRP na região da ancoragem passiva (Figura 80a) e no laminado que fica em contato com a chapa metálica, fazendo a colagem na posição previamente demarcada (Figura 80b-c).

Figura 78 – Aplicação dos chumbadores químicos



Fonte: Próprio autor

Figura 79 – Preparação da ancoragem passiva

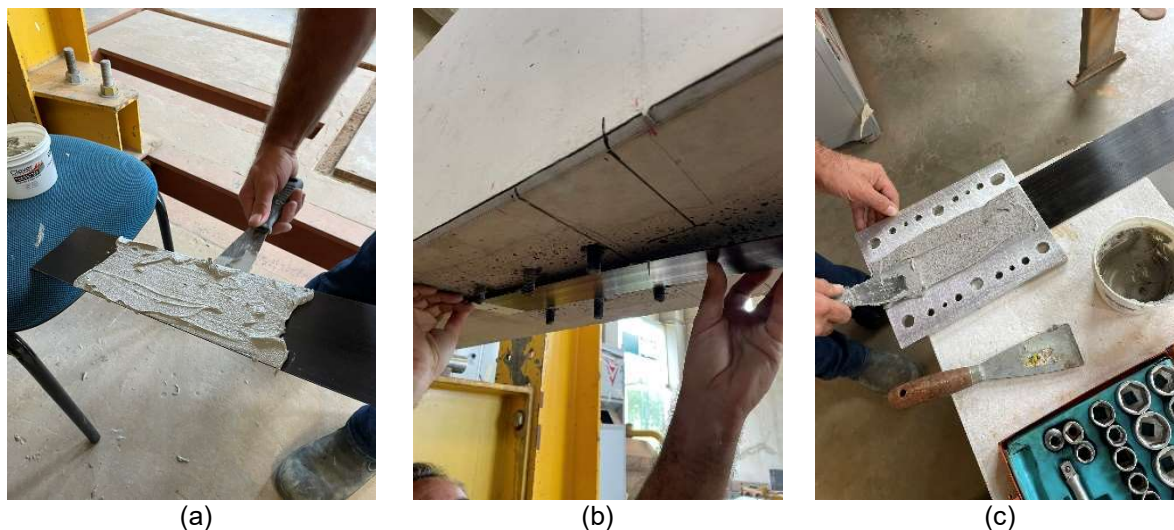


Fonte: Próprio autor

Na sequência, a placa metálica foi posicionada junto aos chumbadores, e, com o auxílio de um torquímetro de estalo, aplicou-se um torque de 170 N·m em cada chumbador, de modo a confinar por compressão o laminado de CFRP na região de ancoragem passiva. O torque aplicado, além de atender às recomendações do fabricante, encontra-se dentro dos níveis indicados por Barris, Correia e Sena-Cruz (2018), os quais analisaram por meio de

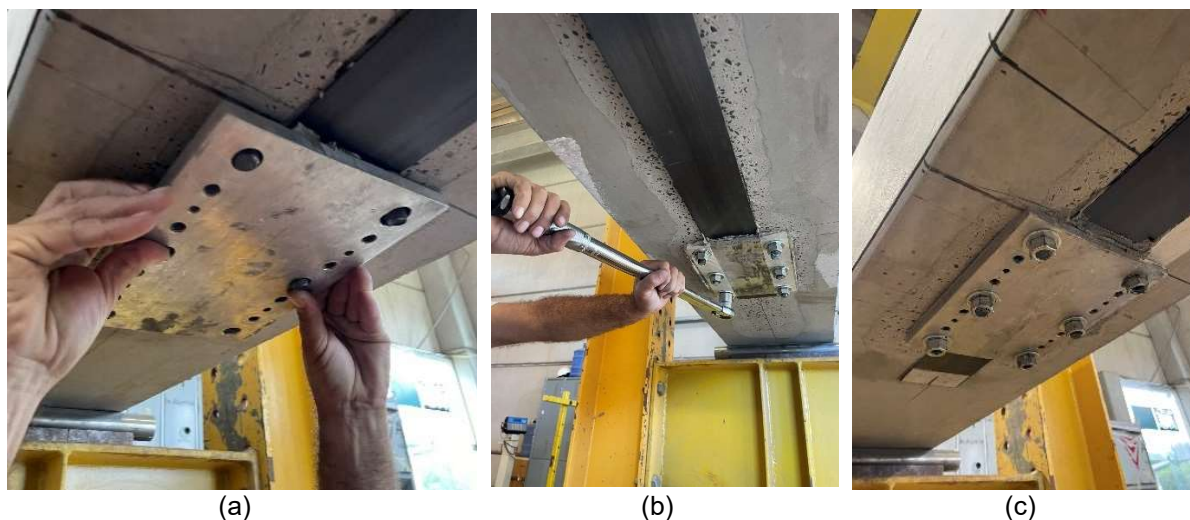
ensaio de *pullout* a eficiência de diferentes níveis de confinamento transversal das ancoragens mecânicas. Na Figura 81 é apresentado o aspecto final da ancoragem passiva.

Figura 80 – Aplicação da resina e colagem do laminado de CFRP



Fonte: Próprio autor

Figura 81 – Fixação da placa metálica na ancoragem passiva



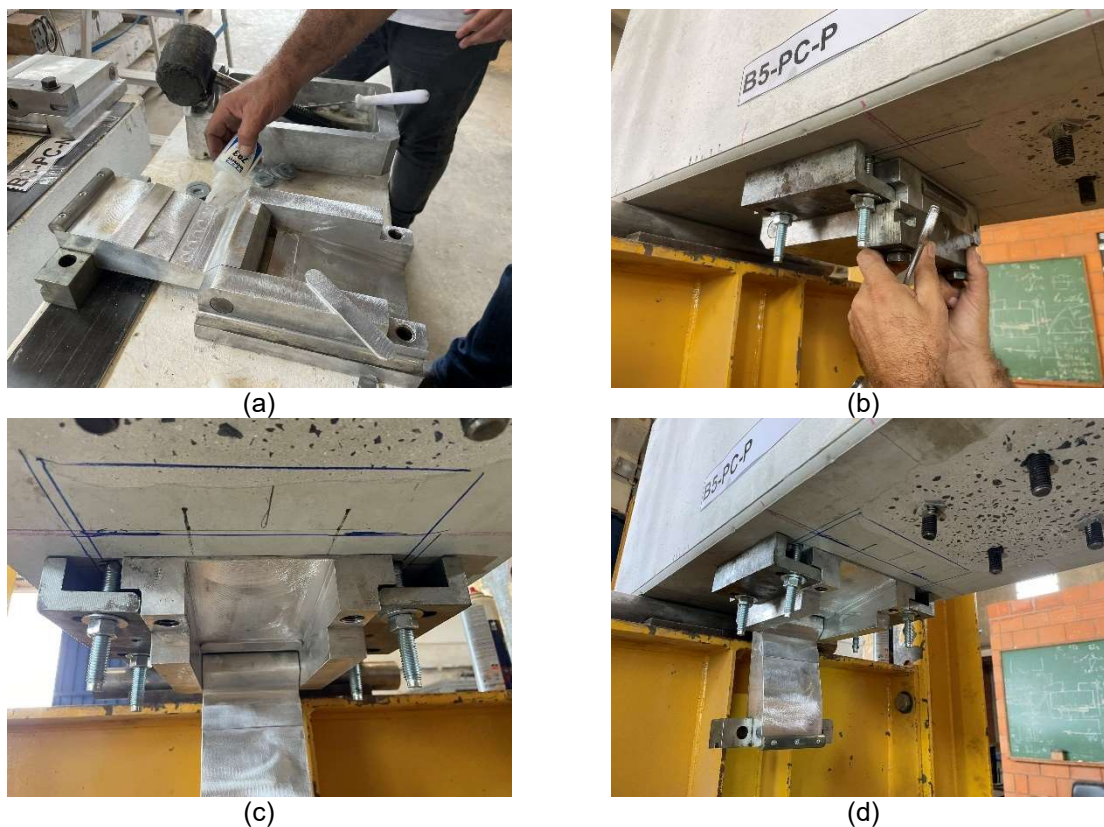
Fonte: Próprio autor

Após 24 horas da aplicação da ancoragem passiva e cura inicial da resina epóxi aplicada (previsão de cura indicada pelo fabricante), iniciou-se a colagem do laminado de CFRP e a instalação da ancoragem ativa e seus dispositivos.

Inicialmente, o dispositivo de fixação móvel tem sua superfície preparada e limpa, de modo que sejam coladas, com uso de adesivo instantâneo, às placas de alumínio responsáveis por apertar e segurar o laminado de CFRP durante o ato de protensão, (Figura 82a). Na sequência, o referido dispositivo foi colocado em guias metálicas previamente instaladas na viga a ser reforçada, fixada por chumbadores provisórios ajustando-

se os parafusos de modo a estabilizar as guias metálicas e permitir o deslizamento do dispositivo de fixação (Figuras 82b-c). Nas Figuras 82d é apresentado o aspecto final do dispositivo instalado junto à ancoragem ativa.

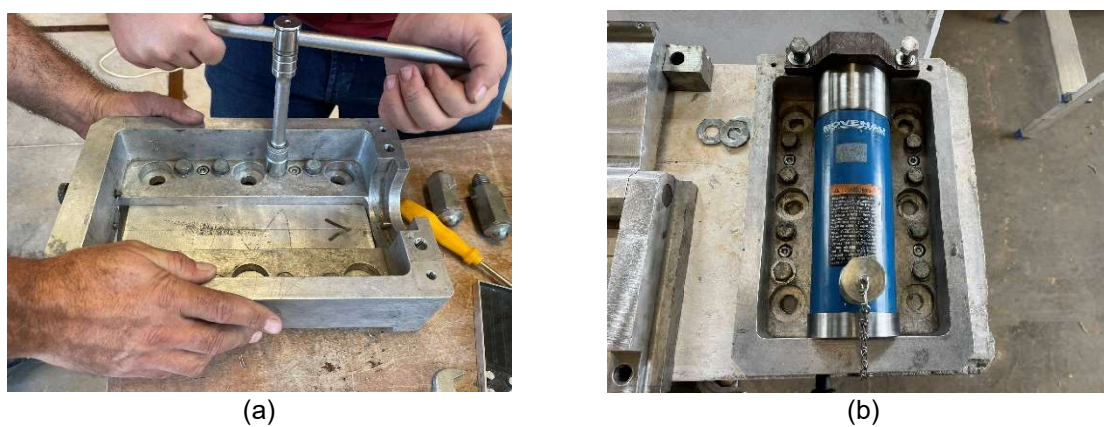
Figura 82 – Preparação do dispositivo de fixação móvel



Fonte: Próprio autor

Na sequência, o cilindro hidráulico foi posicionado e travado em uma moldura metálica, a qual foi fixa à placa metálica da ancoragem ativa com o uso de parafusos de fixação (Figuras 83a-b).

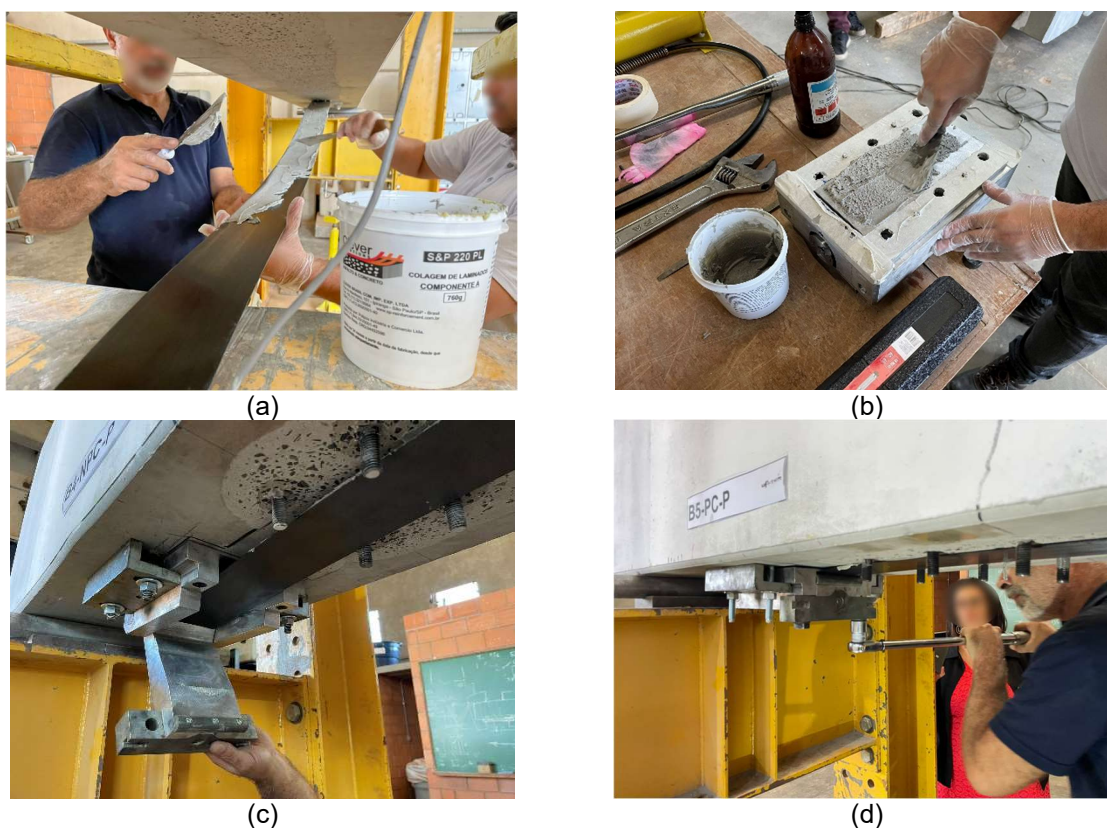
Figura 83 – Preparação da moldura metálica e cilindro hidráulico



Fonte: Próprio autor

Preparados os dispositivos da ancoragem ativa, faz-se a limpeza do substrato de concreto e do laminado de CFRP e a mistura da resina epóxi. Em seguida, aplicou-se a resina epóxi de forma manual com o uso de espátula no laminado de CFRP e na placa metálica da ancoragem ativa, com a exceção do trecho a ser inserido no dispositivo de fixação móvel (Figuras 84a-b). Após colado, o trecho do laminado de CFRP não aderido foi encaixado no dispositivo de fixação (Figura 84c). Por fim, o dispositivo de fixação foi fechado e aplicou-se um torque de 170 N·m nos parafusos de fixação, de modo a confinar o laminado de CFRP (Figura 84d).

Figura 84 – Colagem e fixação do laminado de CFRP

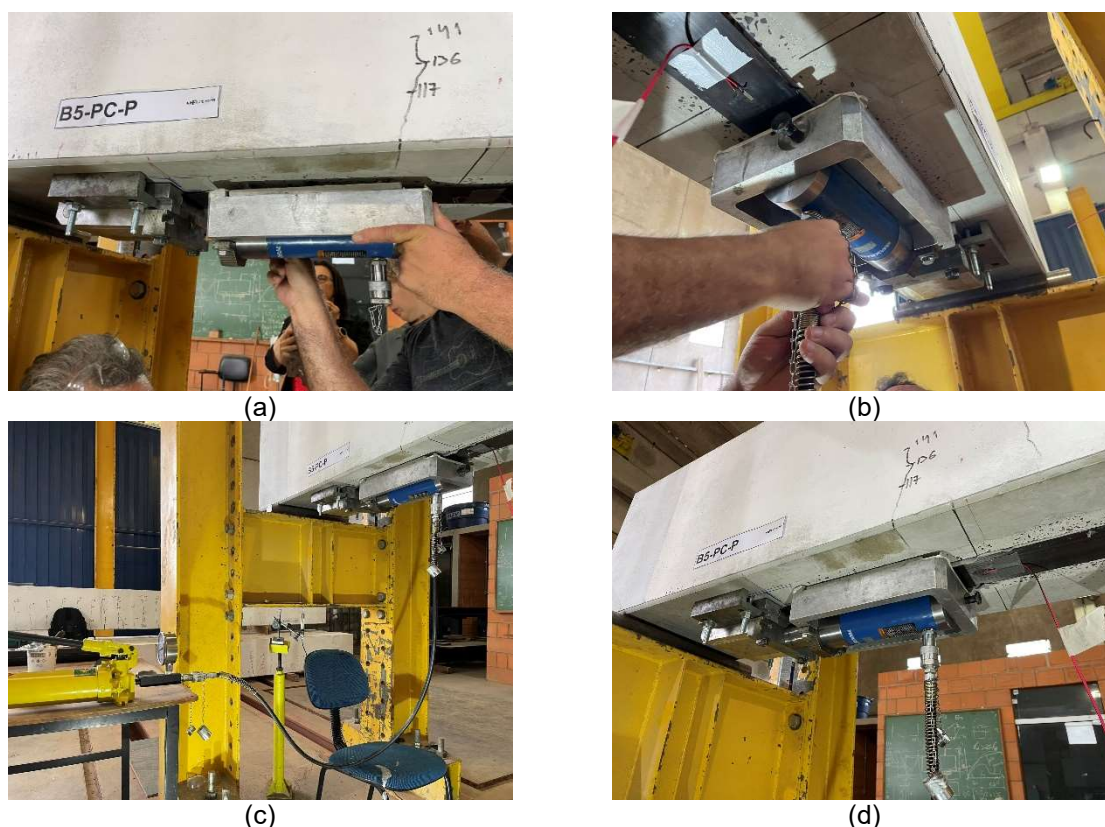


Fonte: Próprio autor

Após a colagem e fixação do laminado de CFRP, a placa e moldura metálica com o cilindro hidráulico foram instalados junto à viga (Figura 85a). Na sequência, o cilindro hidráulico foi conectado à mangueira da bomba hidráulica (Figuras 85b-c). Nas Figuras 85c-d são apresentados os aspectos finais do sistema, o qual nesta etapa encontrava-se apto para a aplicação da força de protensão.

No presente estudo, considerou-se uma deformação média de 4 ‰ no laminado de CFRP no ato da protensão, a qual foi monitorada por meio de extensômetros elétricos instalados no material de reforço.

Figura 85 – Instalação dos dispositivos de protensão



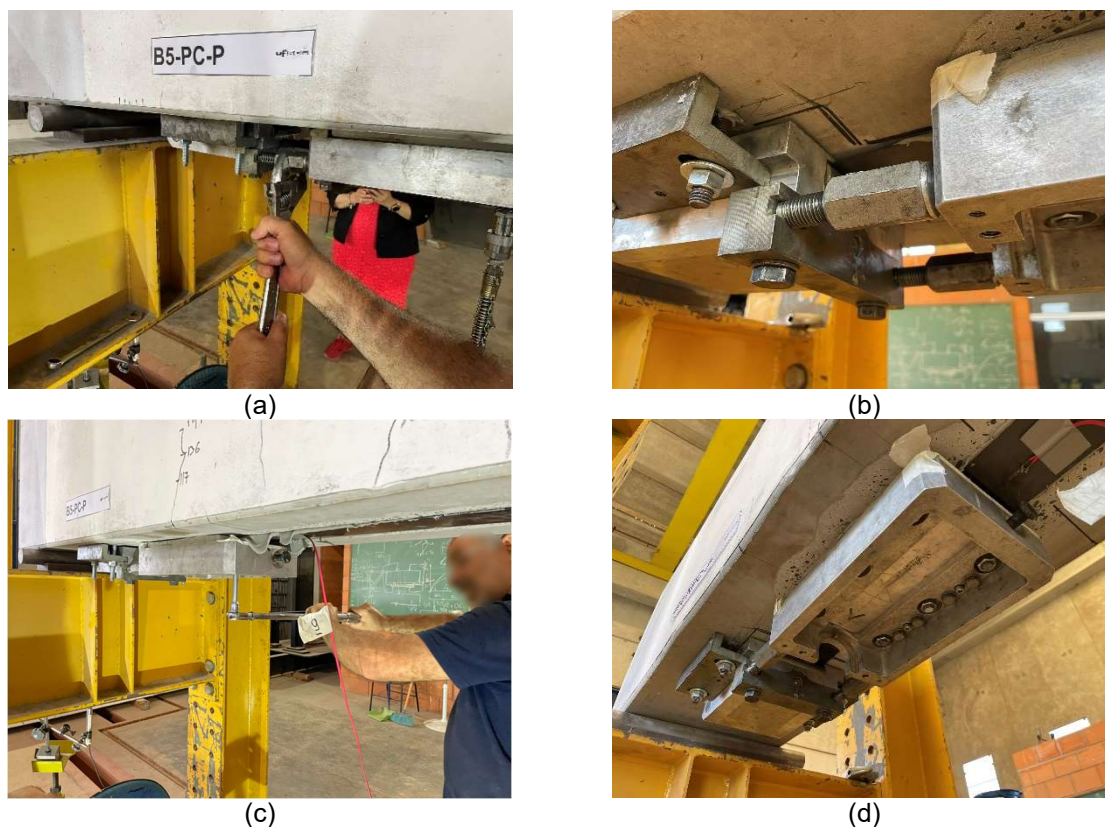
Fonte: Próprio autor

Uma vez aplicada a força de protensão prevista em projeto, foram instalados parafusos de travamentos entre o dispositivo de fixação móvel e a moldura metálica de modo a manter a deformação aplicada no laminado no ato da protensão laminado de CFRP após a remoção do cilindro hidráulico (Figuras 86a-b).

Posteriormente, os chumbadores das placas metálicas da ancoragem foram apertados com torquímetro de estalo aplicando-se um torque de 170 N·m em cada chumbador (Figura 86c). Na Figura 86d é apresentado o aspecto final da ancoragem ativa após o procedimento de protensão.

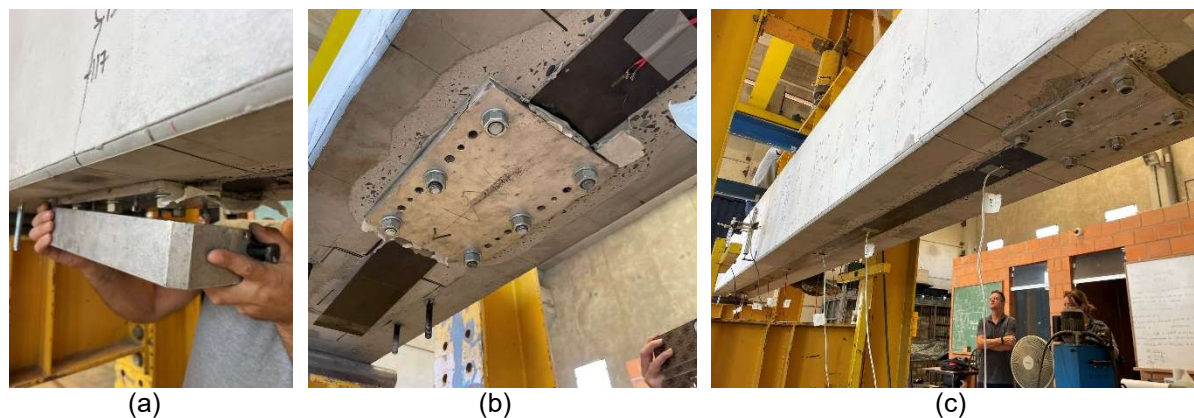
Por fim, após o período de cura da resina epóxi (7 dias, tal como recomendação do fabricante), os dispositivos móveis foram removidos, restando apenas as placas metálicas, chumbadores e laminado de CFRP (Figuras 87c-b). Destaca-se que, assim como no reforço passivo, a aplicação do reforço pretendido se deu com a viga já posicionada na condição de ensaio e em condições similares à aplicação prática.

Figura 86 – Instalação dos parafusos de travamento e liberação do cilindro hidráulico



Fonte: Próprio autor

Figura 87 – Remoção dos dispositivos móveis e aspecto final do sistema de reforço



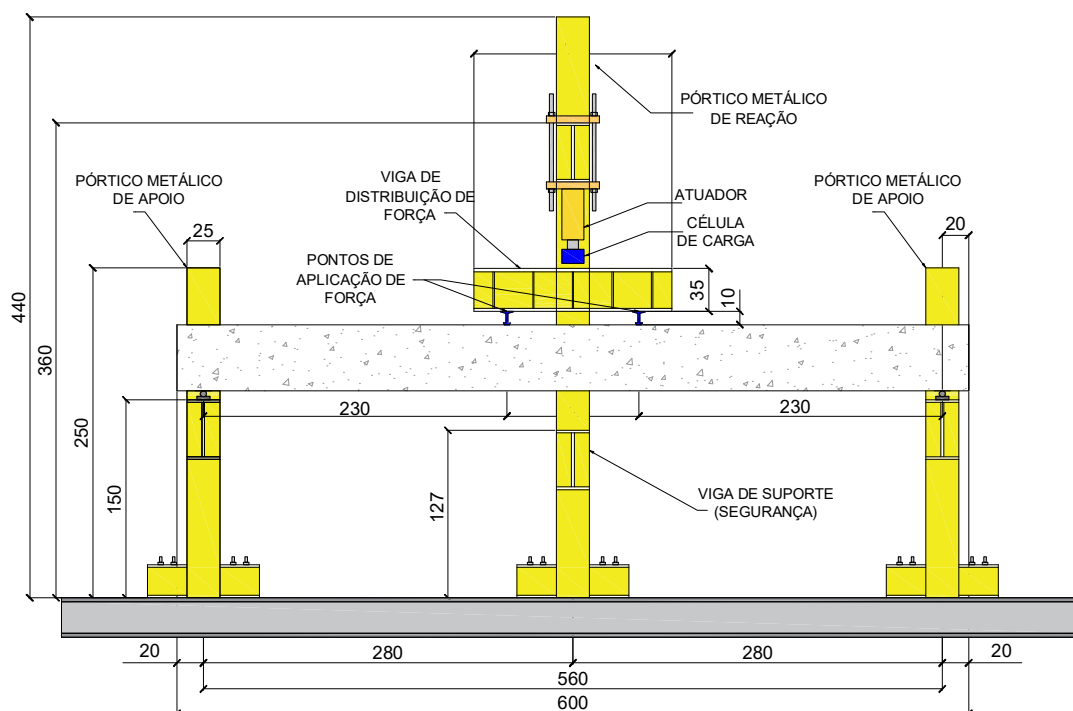
Fonte: Próprio autor

3.4.9 CONFIGURAÇÕES DO ENSAIO DE FLEXÃO DAS VIGAS

O comportamento das vigas foi avaliado por meio de ensaios de flexão de quatro pontos, os quais foram realizados no Núcleo de Estudo e Tecnologia em Pré-Moldados de Concreto (NetPre) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), com o objetivo de obter parâmetros como capacidade resistente, modos de ruptura, padrão fissuratório e deformações no concreto, na armadura longitudinal e no material de reforço frente a aplicação de

carregamento. Na Figura 88 é apresentado o esquema de ensaio de flexão adotado no presente estudo, enquanto na Figura 89 são apresentados os elementos e dispositivos utilizados no ensaio de flexão.

Figura 88 – Esquema do ensaio de flexão por quatro pontos das vigas (dimensões em cm)



Fonte: Próprio autor

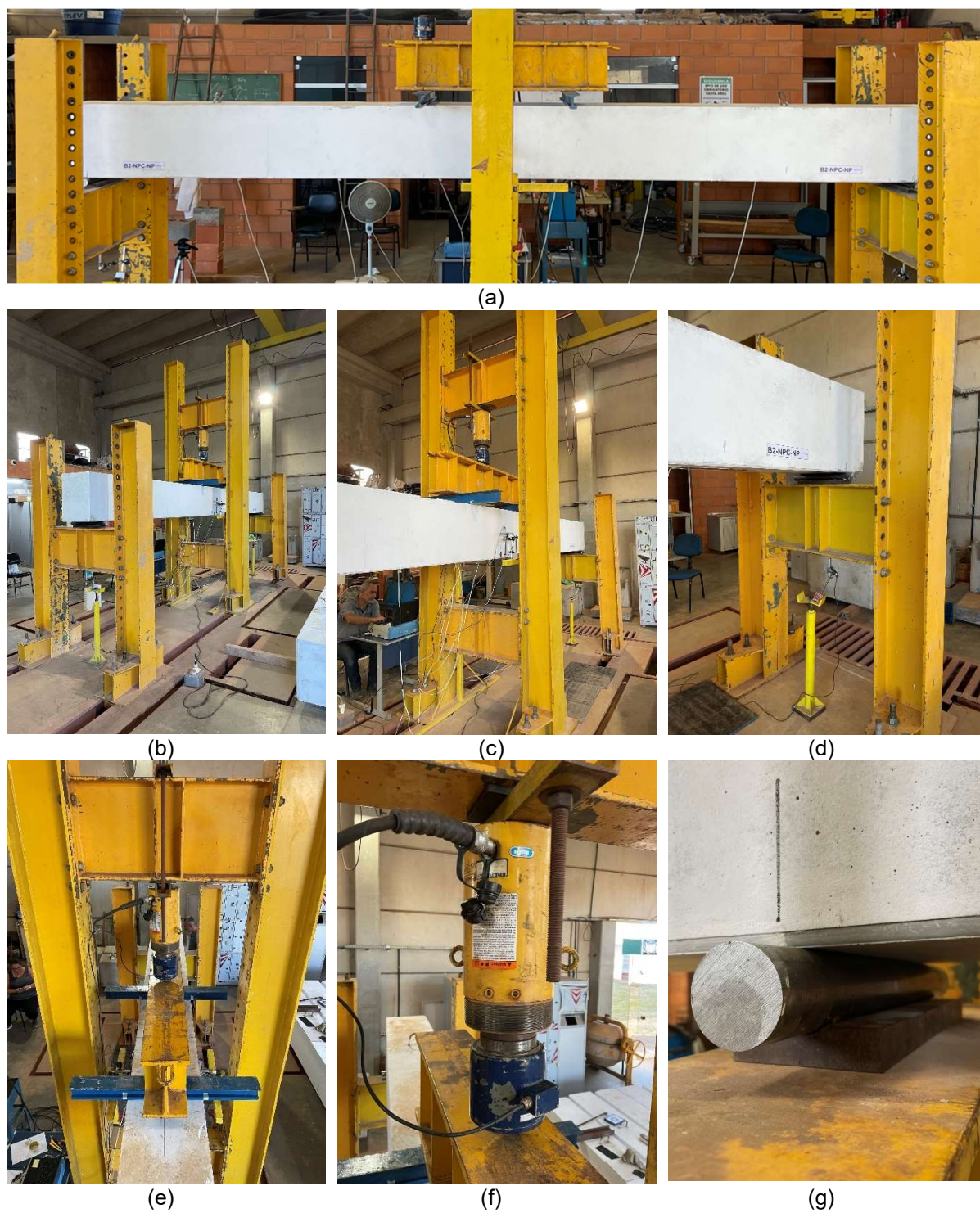
Três diferentes tipos de ensaios de flexão foram realizados nesta pesquisa. No primeiro, o ensaio era formado por uma única etapa, onde as vigas foram submetidas a carregamento até sua ruína/ruptura. No segundo, o ensaio foi realizado em 2 etapas: a primeira baseada na aplicação do sistema de reforço, sem pré-fissuração, e espera da cura da resina (7 dias), e a segunda com o carregamento das vigas até sua ruína/ruptura. Por fim, o terceiro tipo de ensaio foi dividido em 3 etapas: a primeira era baseada na pré-fissuração, onde as vigas foram carregadas até que se atingisse um deslocamento vertical equivalente a $L/250$, com posterior descarregamento; a segunda consistia na aplicação do sistema de reforço e espera da cura da resina (7 dias), e a terceira com o carregamento das vigas até sua ruína/ruptura.

Para isso utilizaram-se pórticos metálicos com capacidade de 500 kN, atuador hidráulico Enerpac modelo RC-506 (capacidade de 50 tf), o qual estava ligado a uma bomba hidráulica elétrica para aplicação de carregamento incremental monotônico.

Conforme detalhado na Figura 88, adotou-se vão livre de 560 cm, com apoios (fixo e móvel) posicionados a uma distância de 20 cm das extremidades da viga. A aplicação da força foi feita com a utilização de trilhos metálicos posicionados sob a viga de distribuição de força, distantes 100 cm

entre si e 50 cm do eixo central da viga. A presente configuração de ensaio foi definida com base na disponibilidade de elementos e dispositivos disponíveis no NetPre, assim como em estudos disponíveis na literatura que também ensaiaram vigas de concreto armado em escala real (GARCEZ, 2007; HONG; PARK, 2017; LIU *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2022).

Figura 89 – Elementos e dispositivos do ensaio de flexão das vigas



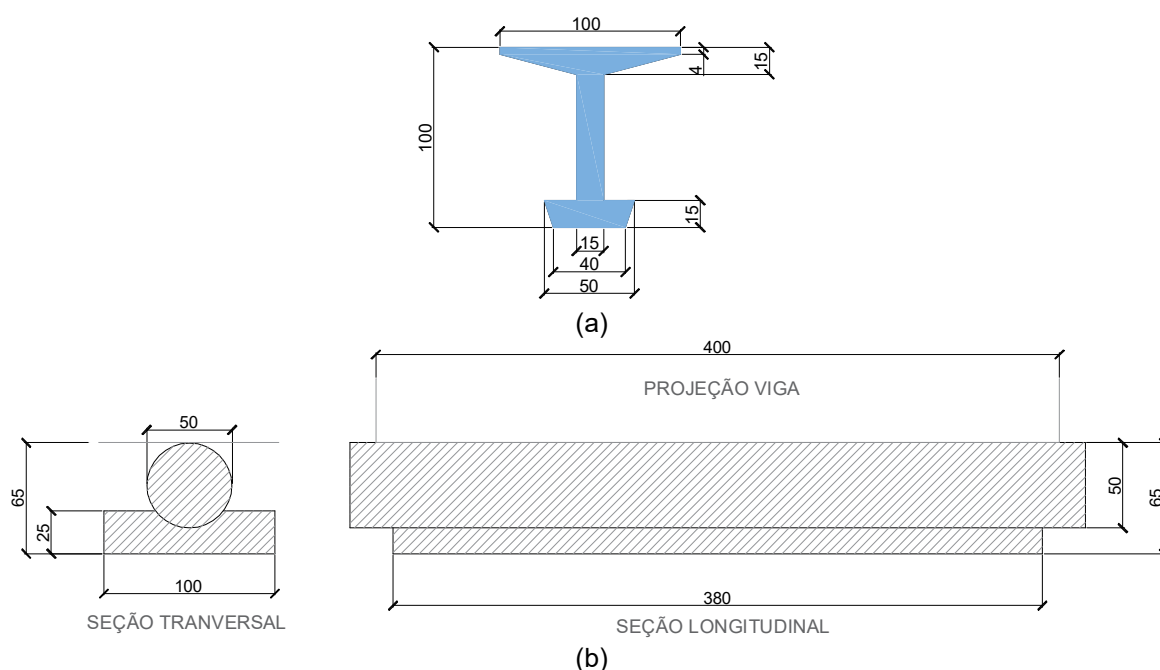
Fonte: Próprio autor

Destaca-se também que a altura dos apoios das vigas no ensaio de flexão foi definida com o objetivo de promover espaço físico e área de trabalho adequados para aplicação dos sistemas de reforço na face inferior das vigas, de modo a obter condições similares de aplicações práticas de sistemas de reforço em estruturas existentes.

Na Figura 89 são apresentados os elementos e dispositivos do ensaio de flexão das vigas. Nas Figuras 89a-b apresentam-se vistas gerais do ensaio de flexão, enquanto nas Figuras 89b-c são mostrados os pórticos de reação e apoio, respectivamente. Já na Figura 89d é destacada a viga de distribuição de força e trilhos posicionados nos pontos de aplicação de força. Por fim, as Figuras 89e-g apresentam o detalhe do atuador, célula de carga e o sistema de apoio da viga no pórtico, composto por base e roletes metálicos, respectivamente.

Na Figura 90a é detalhada a seção transversal dos trilhos metálicos utilizados na aplicação de força, situados sob a viga metálica de distribuição de força, os quais possuem um comprimento total de 100 cm. Já na Figura 90b é detalhado o dispositivo de apoio (base e rolete metálicos), sendo apresentadas as seções transversal e longitudinal.

Figura 90 – Detalhamento dos dispositivos de apoio e aplicação de força (dimensões em mm)



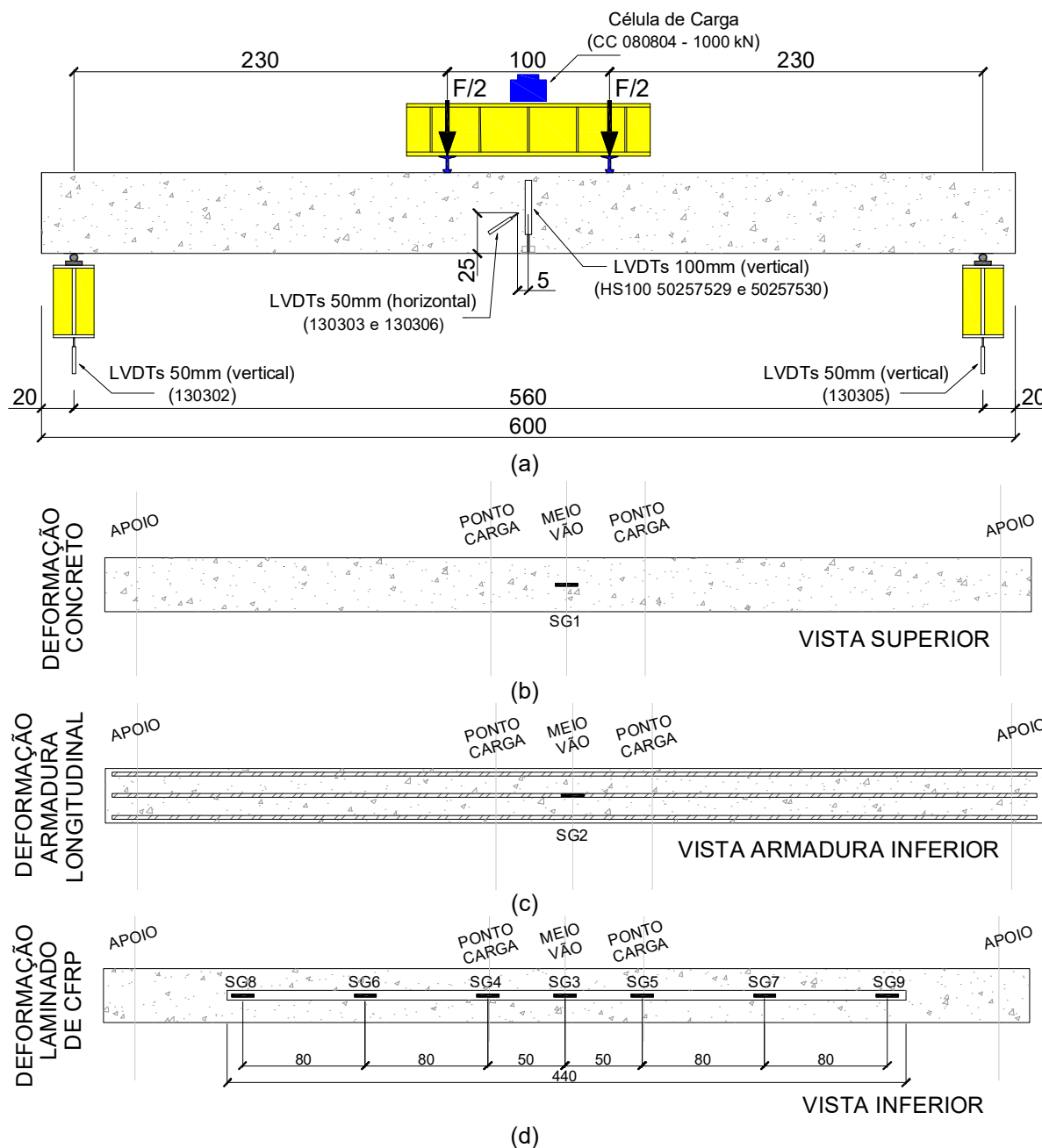
Fonte: Próprio autor

3.4.10 INSTRUMENTAÇÃO DOS MATERIAIS E ELEMENTOS

A instrumentação das vigas (Figura 91) consistiu na utilização de transdutores de deslocamento (LVDTs), uma célula de carga e extensômetros elétricos (SGs), os quais foram responsáveis por registrar os deslocamentos verticais e horizontais da viga, assim como a força aplicada e deformações no concreto, na armadura longitudinal e no laminado de CFRP, os quais

estavam conectados a um aquisitor de dados, modelo ADS-2000, da marca Lynx. A célula de carga (CC 080804) utilizada possui capacidade de 1000 kN, com precisão de 0,246 kN.

Figura 91 – Instrumentação das vigas (dimensões em cm)

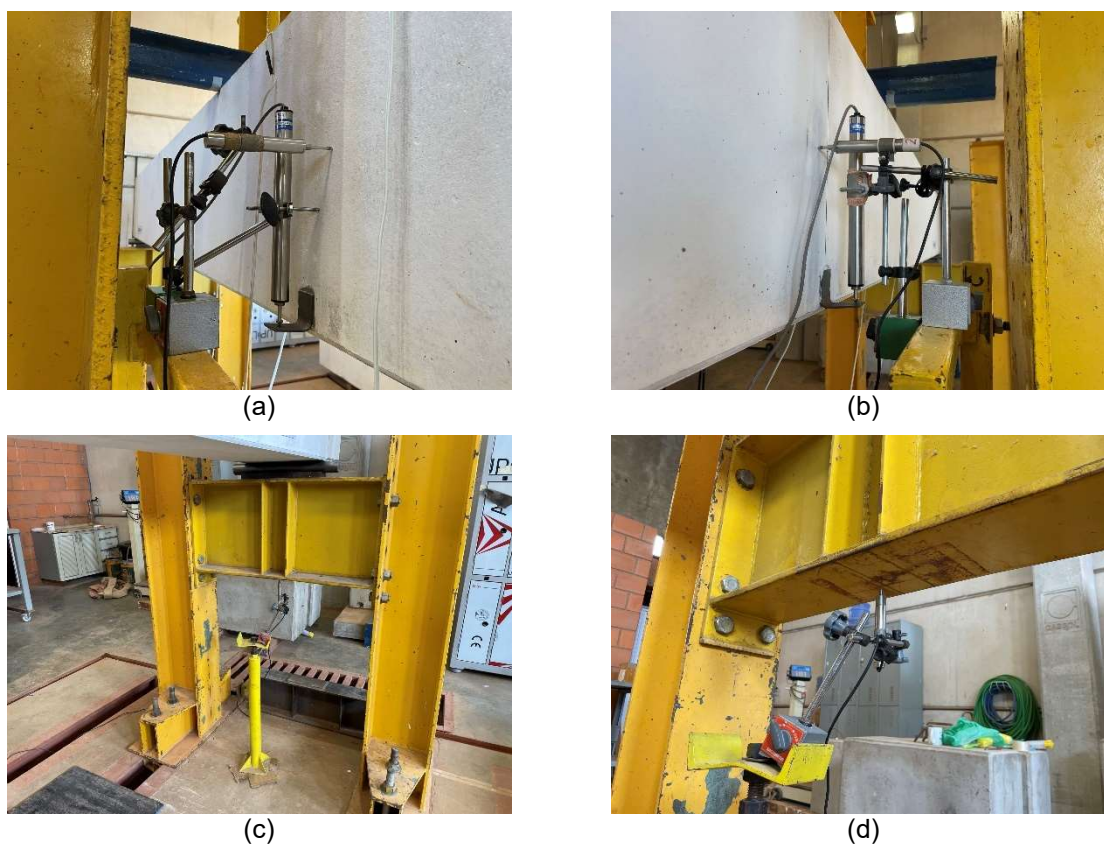


Fonte: Próprio autor

Os deslocamentos verticais das vigas foram aferidos com o uso de dois transdutores de deslocamento (HS100 50257529 e 50257530), da marca *Vishay*, com campo de leitura de 100 mm ($\pm 0,15$ mm), posicionados a meiovão, distantes 230 cm dos apoios (Figura 91a). Ainda a meiovão das vigas, foram posicionados dois LVDTs (130303 e 130306), com campo de leitura de 50 mm ($\pm 0,01$ mm), na direção horizontal à 5 cm do eixo central da viga e na vertical a meia altura da viga, para monitoramento de deslocamentos horizontais. Os referidos

LVDTs (vertical e horizontal) foram fixados em suporte externo ao pórtico de reação, sendo posicionado um de cada tipo em cada lateral viga (Figuras 92a-b). Adicionalmente, também foram utilizados dois LVDT's (130302 e 130305), com campo de leitura de 50 mm ($\pm 0,01$ mm), posicionados na vertical para monitoramento do deslocamento vertical das vigas metálicas dos pórticos de apoio (extremidades das vigas), conforme esquema da Figura 91a e imagens das Figuras 92c-d. Os diagramas Força *versus* deslocamento referente ao deslocamento horizontal das vigas e deslocamento vertical dos apoios podem ser encontrados no Apêndice.

Figura 92 – Transdutores de deslocamento utilizados nos ensaios das vigas

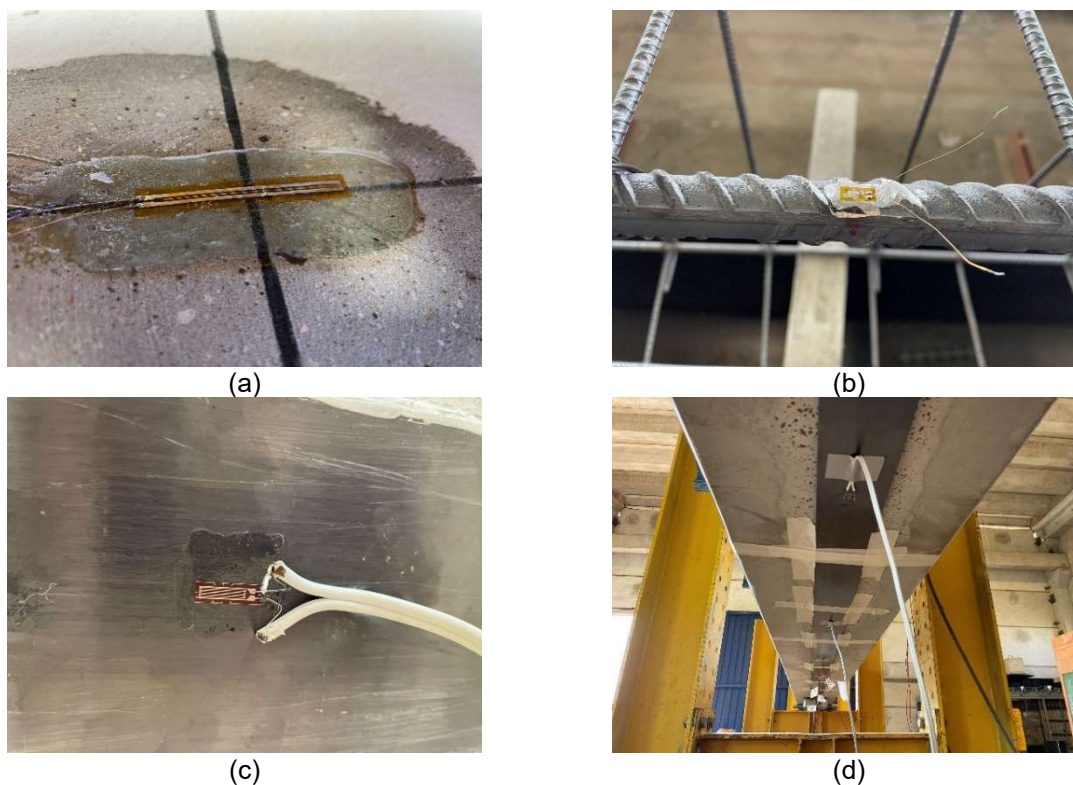


Fonte: Próprio autor

A deformação no concreto foi medida por meio de um extensômetro elétrico tipo PA-06-1500BA-120 (resistência elétrica de 120 Ω e comprimento da grade de leitura de 40 mm), fornecido pela Excel Sensores, posicionado a meio vão e no topo das vigas (SG1), conforme o apresentado pela Figura 93a.

Já a deformação na armadura longitudinal (Figura 93b) foi medida com o uso de um extensômetro elétrico tipo PA-06-250BA-120-L (resistência elétrica de 120 Ω e comprimento da grade de leitura de 6 mm), também fornecido pela Excel Sensores, posicionado a meio vão da armadura longitudinal central (SG2).

Figura 93 – Extensômetros elétricos utilizados nos ensaios das vigas

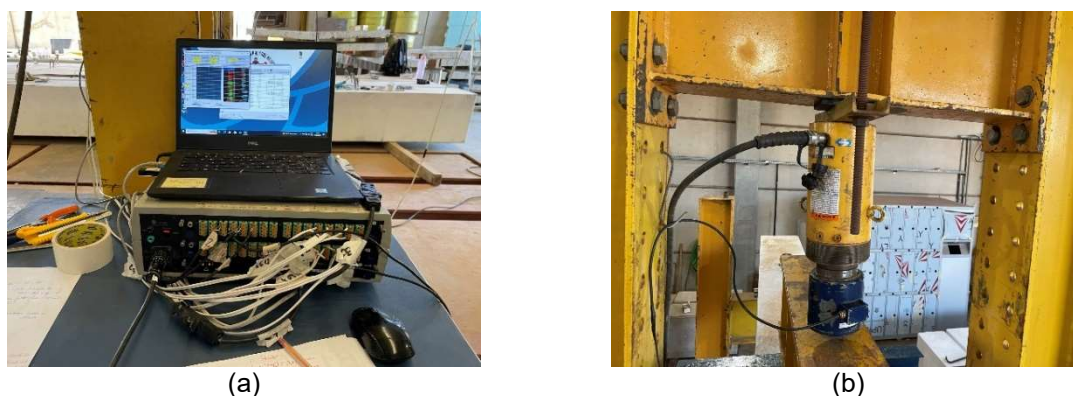


Fonte: Próprio autor

No que diz respeito às deformações no laminado de CFRP, foram utilizados sete extensômetros elétricos tipo KFG-10-120-C1-11 (resistência de 120Ω e comprimento da grade de leitura de 10 mm), fabricados pela KYOWA, os quais foram posicionados ao longo do comprimento do material de reforço, espaçados conforme esquema apresentado na Figura 91d. Nas Figuras 93c-d são apresentados os detalhes e vista geral dos extensômetros elétricos instalados no laminado de CFRP.

Os deslocamentos e as deformações nos materiais durante os ensaios das vigas foram registrados por meio de sistema de aquisição de dados (Figura 94a). Na Figura 94b é destacada a célula de carga utilizada para aplicação da força durante os ensaios.

Figura 94 – Aquisitor de dados e célula de carga



Fonte: Próprio autor

Ressalta-se que o sistema de aquisição de dados utilizado permitiu monitorar o nível de deformação nos laminados de CFRP no ato da protensão do sistema e, também, durante o período de cura do material de reforço (7 dias).

Por fim, também se fez a aferição da abertura de fissuras das vigas com o uso de Microscópio Digital com alcance de foco 0-40mm e ampliação até 1600x quando o deslocamento vertical equivalente à $L/250$ foi atingido (Figura 95).

Figura 95 – Aferição da abertura de fissuras com microscópio digital



Fonte: Próprio autor

3.4.11 ENSAIO DE PULL-OFF (ARRANCAMENTO)

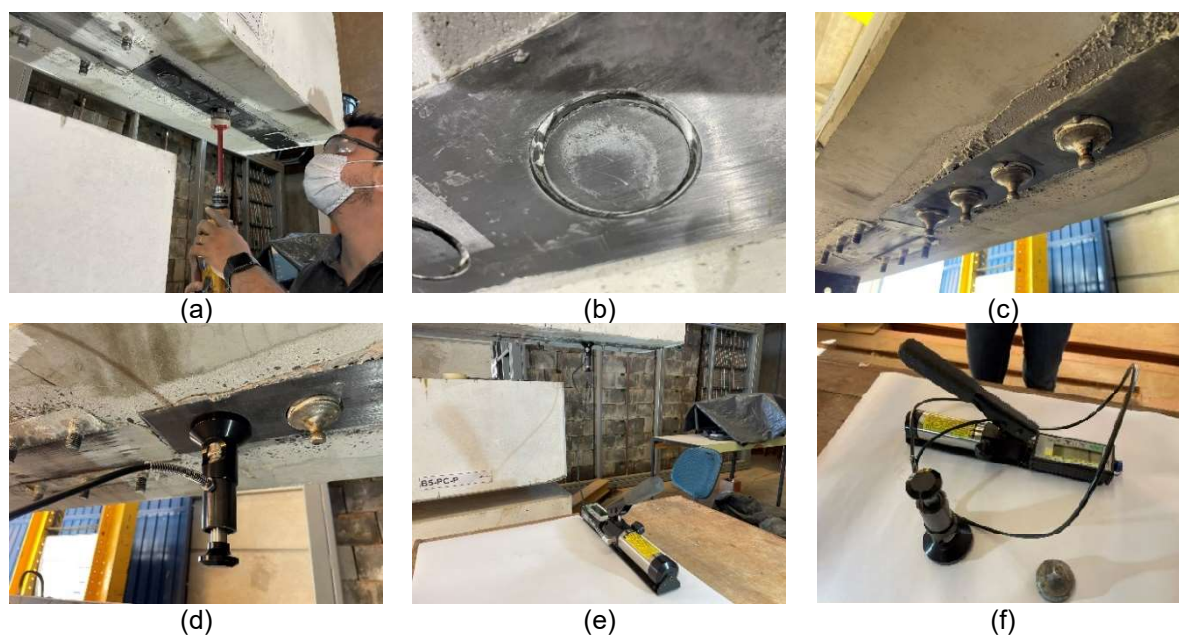
Em conformidade com a norma ACI PRC-440.2 (2023) foram realizados ensaios de *pull-off* (arrancamento) com o objetivo de verificar a aderência do material de reforço ao substrato do elemento reforçado. Conforme o apresentado no item 1.2.1.4 da referida norma, a tensão de aderência do sistema de reforço com FRP, mediante ao ensaio de arrancamento, deve ser superior a 1,4 MPa, assim como, a ruptura deve ocorrer no substrato de concreto.

Inicialmente, fez-se um corte circular, com diâmetro mínimo de 50 mm, com o uso de uma furadeira com serra-copo acoplada (Figura 96a). O corte circular deve atravessar o laminado de CFRP, a camada de resina epóxi e adentrar no substrato de concreto entre 6 e 12 mm (Figura 96b).

A área do corte circular foi preparada com lixa manual e limpa com álcool, para que na sequência fosse colada, com o uso de adesivo epóxi, a pastilha metálica do equipamento de ensaio (Figura 96c). Após o período de cura do adesivo epóxi, conforme recomendações de seu fabricante, a pastilha metálica foi acoplada ao equipamento de ensaio para realização do ensaio de arrancamento (Figura 96e).

O ensaio de arrancamento foi realizado em conformidade com a norma ASTM D7522/D7522M (2021). Para tanto, um trecho de laminado de CFRP foi colado com resina epóxi à uma das vigas de concreto armado, na mesma condição dos sistemas de reforço analisado. Após o período de cura de 7 dias, 5 ensaios em diferentes pontos do material de reforço foi realizado.

Figura 96 – Ensaio de *pull-off*

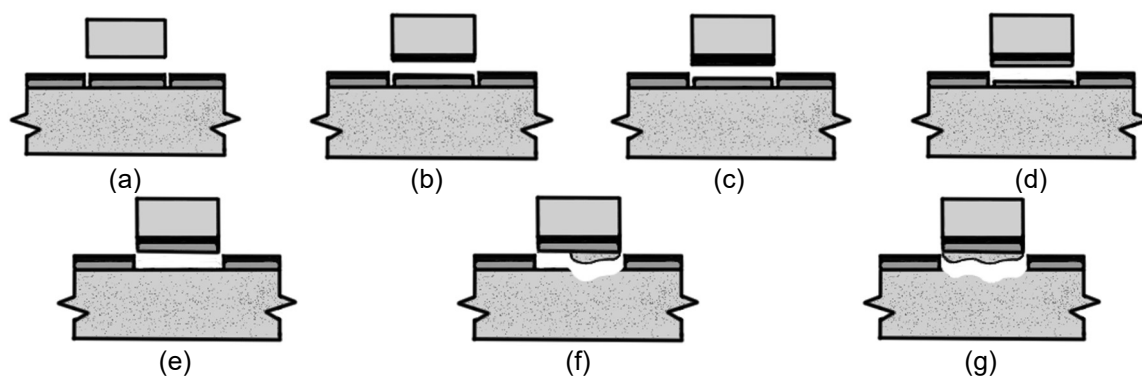


Fonte: Próprio autor

Durante o ensaio, a força foi manualmente aplicada com velocidade inferior a 1 MPa/min, conforme o recomendado pela norma ASTM D7522/D7522M (2021). O equipamento utilizado no ensaio de arrancamento é da marca *DeFelsko*, modelo ATM50, o qual é apresentado na Figura 96f.

De acordo com a norma ASTM D7522/D7522M (2021), os modos de ruptura do ensaio de *pull-off* para colagem externa de FRP, segundo a técnica EBR, são (Figura 97): (a) falha na interface dispositivo metálico/FRP, que comumente está relacionado a colagem inadequada do dispositivo de ensaio; (b) falha na camada de FRP, indicando propriedades inadequadas do FRP em sua espessura, cura inadequada das camadas que compõem o FRP e/ou degradação do FRP; (c) e (e) falha nas interfaces FRP/adesivo e adesivo/substrato, indicando baixa qualidade do adesivo estrutural, contaminações, cura inadequada, preparação inadequada das interface e/ou degradação ambiental; (d) falha na camada do adesivo estrutural, indicando baixa qualidade do adesivo estrutural, contaminações, cura inadequada, e/ou degradação ambiental; (f) falha mista entre substrato e interface substrato/adesivo, com plano de falha com traçado tortuoso; e (g) falha coesiva do substrato, o modo de falha desejado aos sistemas de reforço com colagem externa de FRP, embora desejável, não é automaticamente um resultado que atende a tensão de aderência mínima 1,4 MPa, imposta pela ACI PRC-440.2 (2023), visto que propriedades inadequadas do substrato podem resultar no referido modo de falha sob baixas tensões de tração.

Figura 97 – Modos de ruptura do ensaio de *pull-off*



Fonte: Adaptado de ASTM D7522/D7522M (2021)

Conforme o definido pela norma ASTM D7522/D7522M (2021), a tensão de aderência (σ_p), em MPa, pode ser determinada por meio da Equação 63, onde F_p é a força máxima registrada no ensaio *pull-off* em N e D é o diâmetro do dispositivo metálico, em mm.

$$\sigma_p = \frac{4 \cdot F_p}{\pi \cdot D^2} \quad (63)$$

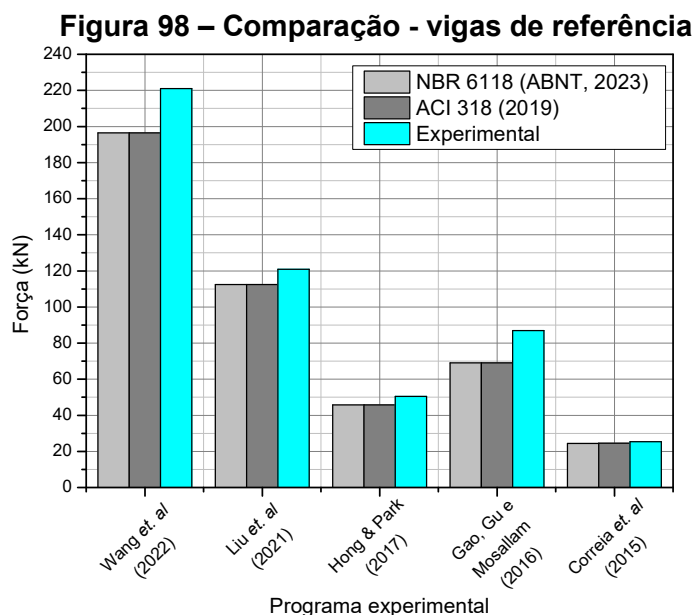
4. RESULTADOS E ANÁLISE

No presente capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nas etapas de aplicação de modelos de dimensionamento e programa experimental das vigas de concreto armado em escala real, não reforçada e reforçadas à flexão com laminado de CFRP passivo e protendido, conforme objetivos propostos na presente pesquisa.

4.1 APLICAÇÃO DE MODELOS DE DIMENSIONAMENTO

Para a aplicação e análise dos modelos de dimensionamento apresentados no item 2.8 deste trabalho, foram utilizados os dados e resultados de programas experimentais disponíveis na literatura indicados e detalhados na Tabela 2 (Capítulo 2). Na Tabela 14 é apresentado um resumo dos resultados obtidos nas análises teóricas com a aplicação dos modelos de dimensionamento, juntamente com os resultados experimentais dos estudos considerados.

No gráfico da Figura 98 é apresentada a comparação entre os resultados teóricos (sem consideração de coeficientes de segurança) e experimentais das vigas de concreto armado de referência (não reforçadas).



Fonte: Próprio autor

Analisando-se o referido gráfico é possível observar proximidade entre os resultados teóricos dos modelos de dimensionamento vigentes e disponíveis nas normas NBR 6118 (ABNT, 2023) e ACI 318 (2019). Os modelos de dimensionamento propostos pelas referidas

normas se mostraram eficazes, com resultados teóricos próximos aos resultados experimentais, assim como, conservadores em relação aos experimentos analisados, mesmo desconsiderando-se os coeficientes de segurança ou redução das propriedades dos materiais.

Tabela 14 – Comparação entre resultados experimentais e teóricos

| Programa experimental analisado | Viga | Força última (kN) | | Ruína | |
|---------------------------------|---|-------------------|---------------|--------------|----------|
| | | Experimental | Teórico | Experimental | Teórico |
| Wang <i>et al.</i> (2022) | Referência (NBR 6118/ACI318) | 221,0 | 196,5 / 196,5 | EA (F) | EA (F) |
| | EBR passivo (ACI PRC-440.2 / <i>FIB Bulletin 90</i>) | 247,0 | 226,4 / 244,3 | DR (F) | DR (F) |
| | EBR protendido (Método proposto) | 343,0 | 354,9 | DR (F) | DR (F) |
| Liu <i>et al.</i> (2021) | Referência (NBR 6118/ACI318) | 120,9 | 112,4 / 112,4 | EA (F) | EA (F) |
| | EBR passivo (ACI PRC-440.2 / <i>FIB Bulletin 90</i>) | 121,8 | 124,1 / 114,5 | DR (F) | DR (F) |
| | EBR protendido (Método proposto) | 185,2 | 197,4 | DRPF (F) | DR (F) |
| Hong & Park (2017) | Referência (NBR 6118/ACI318) | 50,5 | 45,8 / 45,8 | EA (F) | EA (F) |
| | EBR passivo (ACI PRC-440.2 / <i>FIB Bulletin 90</i>) | 77,0 | 59,5 / 48,4 | DR (F) | DR (F) |
| | EBR protendido (Método proposto) | 119,4 | 98,4 | DR (F) | DR (F) |
| Gao; Gu; Mosallam (2016) | Referência (NBR 6118/ACI318) | 87,0 | 69,0 / 69,0 | EA (F) | EA (F) |
| | EBR passivo (ACI PRC-440.2 / <i>Fib Bulletin 90</i>) | 118,0 | 105,6 / 110,1 | DR (F) | DR (F) |
| | EBR protendido (Método proposto) | 137,0 | 124,2 | DR (F) | DREC (F) |
| Correia <i>et al.</i> (2015) | Referência (NBR 6118/ACI318) | 25,42 | 24,4 / 24,5 | EA (F) | EA (F) |
| | EBR passivo (ACI PRC-440.2 / <i>Fib Bulletin 90</i>) | 35,1 | 38,5 / 31,8 | DR (F) | DR (F) |
| | EBR protendido (Método proposto) | 61,8 | 57,3 | DRPF (F) | DR (F) |

Notas: EA (escoamento das armaduras, sem esmagamento do concreto); EAEC (escoamento do aço seguido do esmagamento do concreto); DR (destacamento do material de reforço); DREC (destacamento do material de reforço com seguido do esmagamento do concreto); RF (ruptura do material de reforço); DRPF (destacamento com ruptura parcial do material de reforço); (F) flexão; (C) cisalhamento.

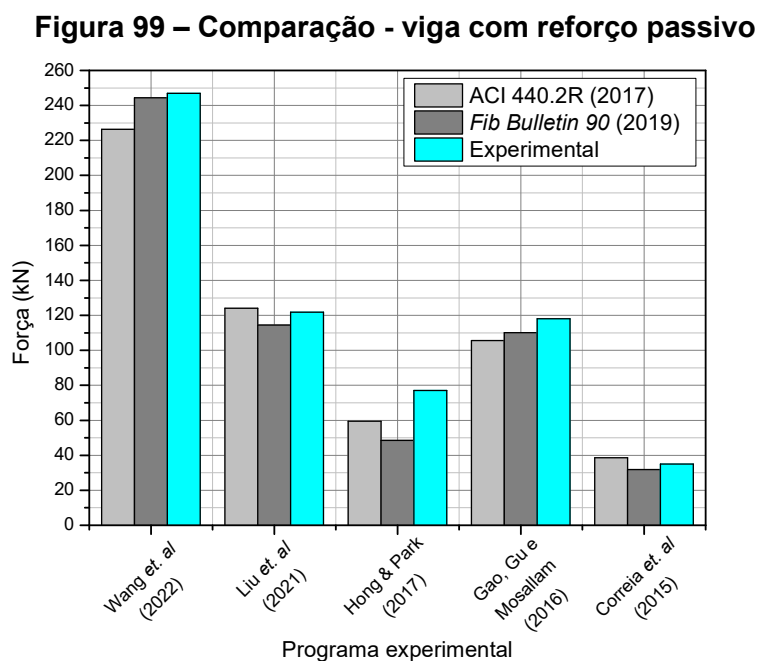
¹ Força obtida para o deslocamento máximo de 100 mm definido no experimento, sem ruptura do elemento.

Fonte: Próprio autor

Destaca-se, também, que os resultados teóricos obtidos por meio dos modelos de dimensionamento propostos pelas normas NBR 6118 (ABNT, 2023) e ACI 318 (2019) são iguais para quase todos os experimentos analisados, uma vez que norma brasileira utiliza formulação de dimensionamento similar a apresentada pela norma americana. Verificou-se variação entre os resultados teóricos apenas para o experimento conduzido por Correia *et al.* (2015), o qual utilizou concreto com resistência à compressão superior a 40 MPa, sendo

necessário utilizar o parâmetro η_c , o qual foi recentemente implementado na rotina de cálculo da NBR 6118 (ABNT, 2023).

Já no gráfico da Figura 99 é apresentada a comparação entre os resultados teóricos (sem consideração de coeficientes de segurança) e experimentais das vigas de concreto armado reforçadas à flexão com FRP passivo, aplicado segundo à técnica EBR, utilizando-se os modelos de dimensionamento apresentados nas normas ACI PRC-440.2 (2023) e *Fib Bulletin 90* (2019).



Fonte: Próprio autor

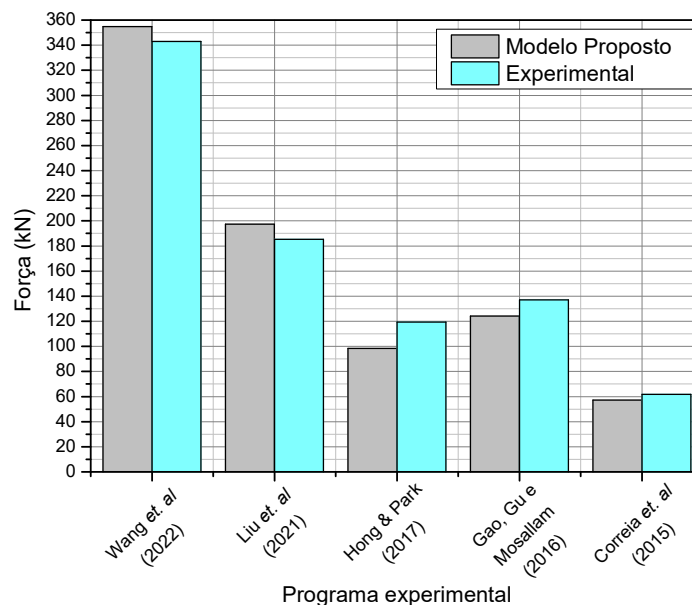
Analisando-se o gráfico da Figura 99 observa-se proximidade entre os resultados teóricos obtidos por meio das aplicações dos modelos de dimensionamento das normas ACI PRC-440.2 (2023) e *Fib Bulletin 90* (2019) em relação aos resultados experimentais dos estudos analisados.

É possível observar também que, a depender das características do programa experimental, os resultados teóricos obtidos pelos diferentes modelos de dimensionamento variam, sendo em alguns casos um mais conservador em relação ao outro. Para os estudos de Wang *et al.* (2022), Gao, Gu e Mosallam (2016) e Correia *et al.* (2015), os resultados teóricos obtidos pelo modelo da *Fib Bulletin 90* (2019) se mostraram mais próximos dos experimentais, enquanto pelo modelo da ACI PRC-440.2 (2023), os resultados teóricos foram mais condizentes aos resultados experimentais nos estudos de Liu *et al.* (2021) e Hong & Park (2017).

Por fim, o gráfico da Figura 100 apresenta a comparação entre os resultados teóricos (sem consideração de coeficientes de segurança) e experimentais das vigas de concreto

armado reforçadas à flexão com FRP protendido utilizando-se o modelo de dimensionamento proposto no item 2.8.5.

Figura 100 – Comparação - viga com reforço protendido



Fonte: Próprio autor

Analisando-se o gráfico da Figura 100 observa-se boa aproximação entre os resultados teóricos e experimentais com a aplicação do modelo de dimensionamento proposto. Observou-se que, para os programas experimentais realizados por LIU *et al.* (2021) e WANG *et al.* (2022), os resultados teóricos apresentaram estimativas levemente superiores as forças máximas observadas nos ensaios. Nos demais estudos (CORREIA *et al.*, 2015; GAO; GU; MOSALLAM, 2016; HONG; PARK, 2017), o modelo de dimensionamento proposto se mostrou levemente conservador, mesmo desconsiderando o uso dos coeficientes de segurança.

O modelo de dimensionamento proposto para o sistema de reforço com FRP protendido se mostrou eficaz para a estimativa da capacidade resistente das vigas à flexão. Entretanto, é importante destacar a necessidade da correta definição da deformação a ser atribuída ao material de reforço para a determinação do momento resistente último da seção transversal, uma vez que, diferentemente do sistema passivo, a aderência do material do reforço não depende apenas da colagem externa, mas também do uso de sistemas de ancoragem que retardam o seu destacamento.

Após a aplicação e melhor entendimento dos modelos teóricos, conforme apresentado acima, realizou-se o pré-dimensionamento das vigas não reforçadas e reforçadas do presente programa experimental, o qual seguiu as mesmas rotinas de cálculo já detalhadas e anteriormente avaliadas neste trabalho.

No pré-dimensionamento das vigas reforças com FRP protendido, a deformação máxima no laminado de CFRP no momento da ruptura do sistema foi estimada nesta etapa em 13,75 ‰, referindo-se à deformação média observada em ensaios de *pullout* conduzidos por Barris, Correia e Sena-Cruz (2018), que utilizaram do mesmo sistema de protensão e laminado de CFRP. A referida deformação máxima foi imposta partindo-se do princípio de que o sistema de ancoragem utilizado na presente pesquisa evitará o destacamento precoce do laminado de CFRP.

Destaca-se que no presente programa experimental, foi imposto uma deformação no laminado CFRP no ato de protensão de 4 ‰, portanto, descontando-se esta deformação da deformação total adotada de 13,75 ‰, a deformação que o material de reforço pode atingir na descompressão em função do carregamento externo é inferior a 10 ‰, respeitando-se o limite imposto pela NBR 6118 (ABNT, 2023) para se evitar a formação excessiva de fissuras.

A Tabela 15 apresenta o resumo das máximas forças a serem obtidas no ensaio de quatro pontos e as deformações estimadas nos materiais (aço, concreto e CFRP), por meio da aplicação dos modelos de dimensionamento para as vigas de referência (B1-0-0), com reforço à flexão passivo (B2-NPC-P e B3-PC-NP), e com reforço à flexão protendido (B4-NPC-P e B5-PC-P).

Tabela 15 – Resultados do dimensionamento das vigas a serem ensaiadas

| Vigas | Modelo | Resultados teóricos | | | | | |
|---|------------------------|---------------------|----------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| | | Força máxima (kN) | Deformação no concreto (‰) | Deformação na armadura inferior (‰) | Deformação no laminado de CFRP (‰) | Profundidade da Linha neutra (cm) | Modo de ruptura previsto |
| B1-0-0 (Referência) | NBR 6118 | 179,80 | 0,80 | 10,00 | --- | 3,73 | EA (F) |
| | ACI318 | 180,24 | 3,00 | 31,00 | --- | 4,00 | |
| B2-NPC-NP B3-PC-NP (FRP passivo) | ACI PRC-440.2 | 223,98 | 1,17 | 5,53 | 5,94 | 7,93 | DR (F) |
| | <i>Fib Bulletin 90</i> | 214,13 | 0,84 | 4,10 | 4,61 | 7,74 | |
| B5-PC-P B4-NPC-P (FRP protendido) | Modelo proposto | 315,29 | 1,43 | 9,00 | 14,00 | 6,25 | DRPF (F) |

Notas: EA (escoamento das armaduras); DR (destacamento do material de reforço); DRPF (destacamento com ruptura parcial do material de reforço); (F) flexão; (C) cisalhamento.

Fonte: Próprio autor

Destaca-se que os resultados da Tabela 15 serão posteriormente comparados aos resultados experimentais das vigas de concreto armado ensaiadas no presente estudo. Salienta-se que a aplicação preliminar dos modelos de dimensionamento para a estimativa

da capacidade resistente à flexão e modos de ruptura das vigas do programa experimental se fez necessária para a compatibilização da capacidade dos equipamentos e dispositivos disponíveis no laboratório dos ensaios, o NetPre, da UFSCar.

Adicionalmente, foram verificadas as tensões nas regiões comprimida e tracionada face ao efeito da protensão do laminado de CFRP na viga reforçada, de modo a se comparar com os limites impostos pela NBR 6118 (ABNT, 2023) para elementos de concreto protendido.

Considerando-se, no ato de protensão, que o laminado de CFRP estará submetido a uma deformação média de 4 ‰ e aplicando-se a rotina de verificação de tensões indicada no item 2.8.6, verificaram-se tensões máximas de compressão nas Fibras inferior e superior da seção transversal, na região intermediária da viga, de 0,589 MPa e 0,291 MPa, respectivamente, as quais atendem aos limites normativos indicados na Tabela 9. Além disso, verificou-se que não ocorrem tensões de tração devido ao ato de protensão na parte superior ou compressão excessiva na parte inferior da viga.

4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS

No presente item são apresentados os resultados obtidos por meio dos ensaios de caracterização dos materiais utilizados na presente pesquisa, tais como: concreto, aço, laminado de CFRP e resina epóxi.

4.2.1 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO CONCRETO

Conforme detalhado no Capítulo 3, o concreto utilizado nas vigas da presente pesquisa foi usinado com sua resistência à compressão nominal indicada em 50 MPa aos 28 dias. Todos os CPs foram moldados utilizando-se concreto de um mesmo lote, assim como, foram confeccionados seguindo-se as recomendações da norma NBR 5738 (ABNT, 2016).

Em relação à resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto, foram realizados ensaios em três idades diferentes, sendo elas: (i) aos 28 dias após a concretagem; (ii) aos 112 dias, referente ao início dos ensaios, e (iii) aos 156 dias, referente ao término dos ensaios de flexão das vigas. Os referidos ensaios foram realizados em conformidade com as normas NBR 5739 (ABNT, 2018) e NBR 8522-1 (ABNT, 2021) e na Tabela 16 são apresentadas as propriedades mecânicas dos CPs de concreto, onde f_{ci} é a resistência à compressão obtida para cada corpo de prova, f_m é a resistência à compressão média e E_{cm} é o módulo de elasticidade médio.

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 16 verifica-se que o concreto utilizado nas vigas apresentou resistência à compressão média aos 28 dias de 44,7 MPa, inferior à resistência nominal de 50 MPa definida previamente.

Entretanto, para as idades referentes ao início e término dos ensaios, verificou-se aumento nas resistências à compressão dos CPs nos ensaios aos 112 e 156 dias. Com relação ao ensaio de espalhamento, obteve-se diâmetro médio de 850 mm.

Tabela 16 – Propriedades mecânicas do concreto

| Idade | Amostra | f_{ci} (MPa) | f_m (MPa) | E_{cm} (GPa) |
|----------|---------|-------------------|----------------|-------------------|
| 28 dias | CP1 | 44,5 | 44,7 (0,78) | 32,4 (4,53) |
| | CP2 | 45,2 | | |
| | CP3 | 44,4 | | |
| 112 dias | CP4 | 48,2 | 48,3 (0,50) | 32,5 (2,02) |
| | CP5 | 48,3 | | |
| | CP6 | 48,7 | | |
| 156 dias | CP7 | 46,6 | 47,5 (2,95) | 31,1 (5,51) |
| | CP8 | 46,4 | | |
| | CP9 | 49,5 | | |

(valor) – Coeficiente de variação (%) = (Desvio Padrão / Média).100

Fonte: Próprio autor

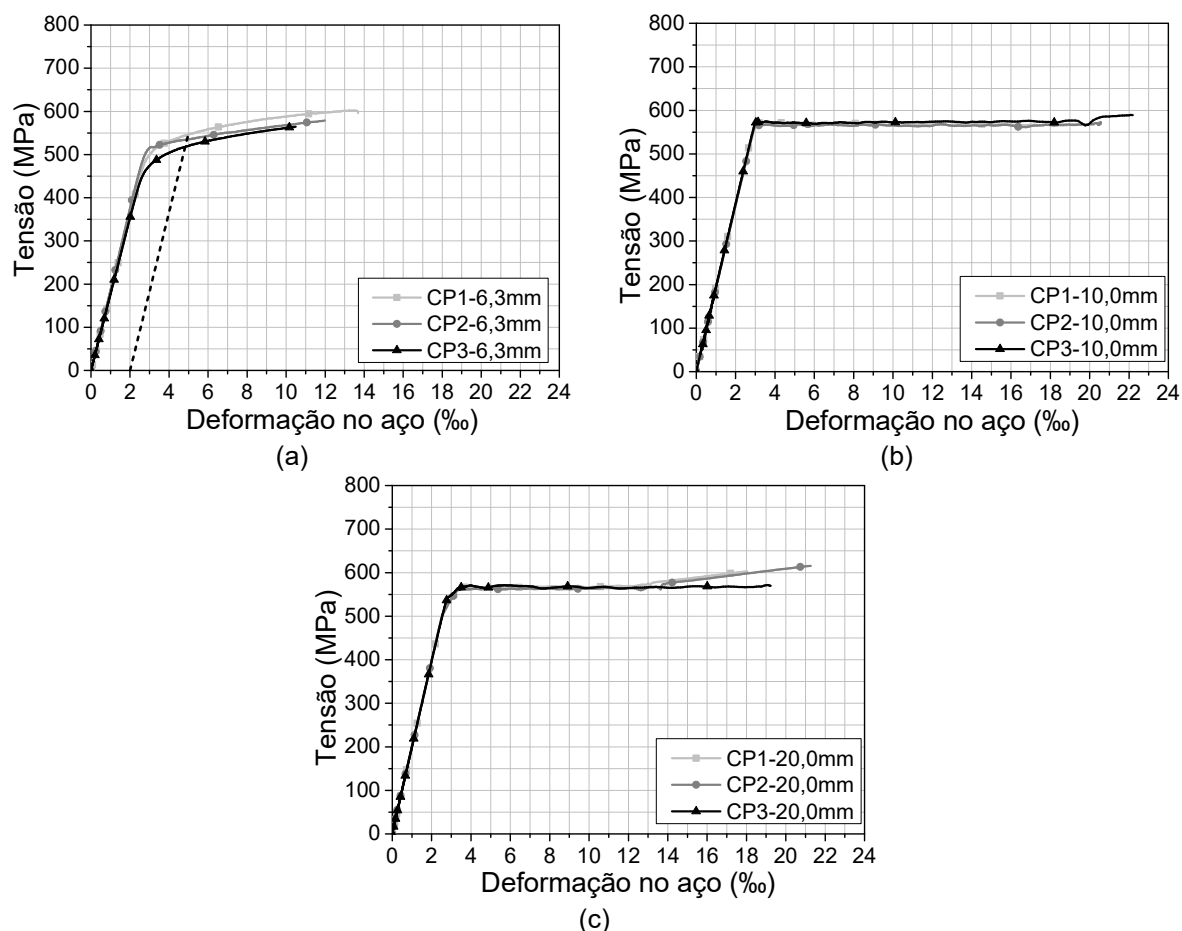
4.2.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO AÇO

Realizou-se ensaio de tração uniaxial em amostras das armaduras utilizadas na confecção da viga seguidos os critérios apresentados pela norma NBR ISO 6892-1 (ABNT, 2018). Na Figura 101 são apresentados os diagramas Tensão *versus* Deformação das barras de aço ensaiadas.

Nota-se, pela avaliação da Figura 101 e da Tabela 17, que todas as barras ensaiadas apresentaram comportamento típico do CA-50, sendo que as barras com diâmetro de 10,0 e 20,0 mm apresentaram patamar de escoamento bem definido, enquanto a barra 6,3 mm não apresentou um patamar de escoamento definido, indicando se tratar de um aço do tipo B. Neste caso, para a determinação da tensão de escoamento das barras com diâmetro de 6,3 mm adotou-se a recomendação da NBR ISO 6892-1 (ABNT, 2018) que, em seu item 13.1, indica a utilização de uma linha paralela à porção linear do diagrama à uma distância equivalente à deformação plástica percentual especificada, no caso, de 2 ‰ (método *offset*).

Na Tabela 17 são apresentadas as propriedades mecânicas das barras, experimentalmente determinadas, onde f_y é a tensão de escoamento, ε_{sy} é a deformação no escoamento da armadura, E_s é o módulo de elasticidade do aço, f_u é a tensão máxima verificada no ensaio.

Figura 101 – Diagrama tensão versus deformação do aço: diâmetros de (a) 6,3 mm, (b) 10,0 mm e (c) 20,0 mm



Fonte: Próprio autor

Tabela 17 – Propriedades mecânicas do aço

| Diâmetro (mm) | Corpo de prova | f_y (MPa) | | ϵ_{sy} (%) | | E_s (GPa) | | f_u (MPa) | |
|---------------|----------------|-------------|------------------|---------------------|----------------|-------------|------------------|-------------|------------------|
| | | | | | | | | | |
| 6,3 | CP1 | 544,85 | 535,32 (2,36) | 2,00 | 2,00 | 180,72 | 182,11 (3,25) | 602,29 | 611,65 (2,78) |
| | CP2 | 543,62 | | 2,00 | | 189,95 | | 635,49 | |
| | CP3 | 517,50 | | 2,00 | | 175,66 | | 597,16 | |
| 10,0 | CP1 | 570,47 | 571,97 (0,21) | 3,01 | 3,08 (1,56) | 192,88 | 192,06 (0,55) | 706,15 | 706,40 (0,39) |
| | CP2 | 571,98 | | 3,12 | | 190,57 | | 703,15 | |
| | CP3 | 573,47 | | 3,10 | | 192,74 | | 709,91 | |
| 20,0 | CP1 | 544,85 | 535,32 (2,36) | 2,59 | 2,69 (3,58) | 197,50 | 196,30 (0,46) | 745,39 | 730,18 (3,26) |
| | CP2 | 543,62 | | 2,66 | | 196,09 | | 748,63 | |
| | CP3 | 517,50 | | 2,82 | | 195,32 | | 696,53 | |

Fonte: Próprio autor

4.2.3 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO LAMINADO DE CFRP

A Tabela 18 apresenta um resumo com as propriedades mecânicas dos laminados de CFRP obtidas para os corpos de prova avaliados. Um exemplo do ensaio e do diagrama Tensão *versus* Deformação é apresentado na Figura 102. Dalfré (2013) também avaliou as propriedades mecânicas de laminados de CFRP com 10 mm e 20 mm de largura, ambos com 1,4 mm de espessura, e obteve valores de tensão última, módulo de elasticidade e deformação última de 2867,63 MPa, 159,30 GPa e 17,67 ‰ e 2782,86 MPa, 156,69 GPa e 17,76 ‰, respectivamente, valores mais próximos aos fornecidos pelo fabricante.

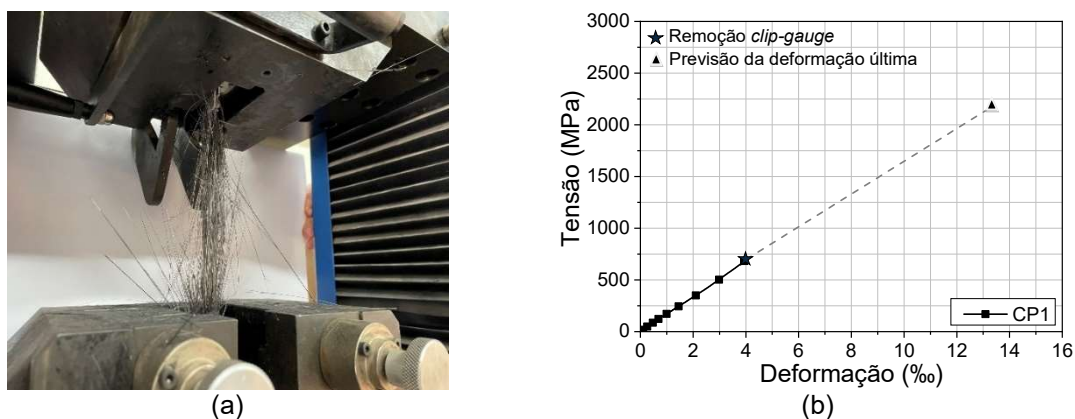
Tabela 18 – Propriedades mecânicas do laminado de CFRP

| Corpo de prova | Largura (mm) | Espessura (mm) | Tensão máxima (MPa) | Módulo de elasticidade (GPa) | Previsão deformação última (‰) ¹ |
|----------------|--------------|----------------|---------------------|------------------------------|---|
| CP1 | 15,36 (0,86) | 1,40 (3,64) | 2248,14 | 157,34 | 14,29 |
| CP2 | 15,60 (1,23) | 1,39 (3,74) | 2175,98 | 163,10 | 13,34 |
| CP3 | 15,04 (0,03) | 1,44 (1,42) | 2299,38 | 162,37 | 14,20 |
| CP4 | 15,89 (0,74) | 1,46 (3,11) | 2477,05 | 156,81 | 15,80 |
| CP5 | 13,71 (1,7) | 1,40 (3,41) | 2382,46 | 154,36 | 15,43 |
| Média | | | 2316,60 (5,05) | 158,80 (2,38) | 14,61 (6,82) |

(valor) – Coeficiente de variação (%) = (Desvio Padrão / Média). 100; ¹ $\varepsilon = \sigma / E$

Fonte: Próprio autor

Figura 102 – (a) Exemplo do aspecto final do laminado após o ensaio e (b) diagrama Tensão *versus* Deformação do laminado de CFRP



Fonte: Próprio autor

4.2.4 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA RESINA EPÓXI

A Tabela 19 apresenta um resumo com as propriedades geométricas e mecânicas da resina epóxi obtidas para os corpos de prova avaliados. Um exemplo de corpos-de-prova de

resina após ensaio de tração é apresentado na Figura 103. Conforme apresentado na referida Tabela, a resina epóxi utilizada nos sistemas de reforço do presente estudo apresentaram tensão máxima média à tração de 14,05 MPa.

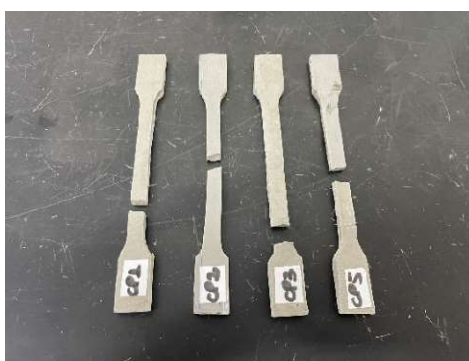
Tabela 19 – Propriedades mecânicas da resina epóxi

| Corpo de prova | Largura (mm) | Espessura (mm) | Tensão máxima à tração (MPa) |
|----------------|---------------|----------------|------------------------------|
| CP1 | 9,41 | 6,31 | 14,95 |
| CP2 | 10,34 | 6,03 | 12,45 |
| CP3 | 9,97 | 5,79 | 14,75 |
| CP4 | 10,36 | 6,30 | 16,41 |
| CP5 | 10,05 | 6,26 | 11,68 |
| Média | 14,05 (13,80) | | |

(valor) – Coeficiente de variação (%) = (Desvio Padrão / Média). 100

Fonte: Próprio autor

Figura 103 – Exemplo de corpos-de-prova de resina após ensaio de tração



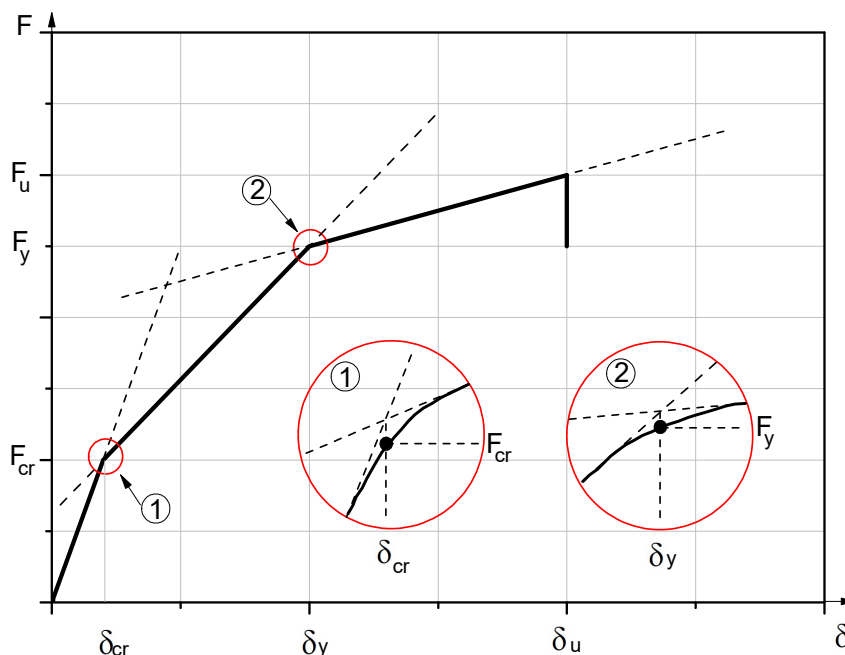
Fonte: Próprio autor

4.3 COMPORTAMENTO À FLEXÃO DAS VIGAS

A seguir são apresentados os resultados obtidos por meio dos ensaios de flexão de 4 pontos das vigas de concreto armado não reforçada (referência), com reforço passivo e com reforço protendido, com o objetivo de analisar, discutir e comparar o comportamento estrutural à flexão das vigas no que diz respeito à ductilidade, incremento de capacidade de carga, deformações nos materiais e modo de ruptura.

De modo a orientar as análises do presente capítulo, no diagrama da Figura 104 são indicados como os pontos selecionados o momento de fissuração do concreto, correspondentes a força F_{cr} e deslocamento δ_{cr} , e o escoamento das armaduras de tração, correspondentes a força F_y e deslocamento δ_y . Note-se que não foi verificado o esmagamento do concreto em nenhuma das vigas avaliadas.

Figura 104 – Diagrama Força versus deslocamento orientativo, para determinação dos pontos de fissuração do concreto e escoamento das armaduras de tração



Fonte: adaptado de Costa (2014)

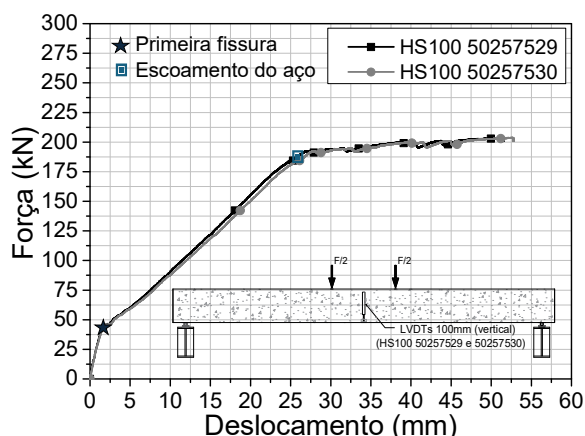
4.3.1 VIGA DE REFERÊNCIA (B1-0-0)

O diagrama Força versus Deslocamento vertical da viga de referência (não reforçada), B1-0-0, assim como os diagramas Força versus Deformações no concreto e aço, são apresentados nas Figuras 105 e 106, respectivamente. Note-se que o ensaio desta viga foi realizado em uma única etapa.

Analisando-se a curva Força versus Deslocamento a meio vão (Figura 105) da viga de referência (B1-0-0) é possível perceber que esta apresenta os três estágios típicos de comportamento de elementos submetidos à flexão: o primeiro representa o concreto não fissurado, o segundo corresponde ao concreto fissurado com o aço no regime elástico, e o terceiro equivale ao concreto fissurado com escoamento da armadura longitudinal de tração.

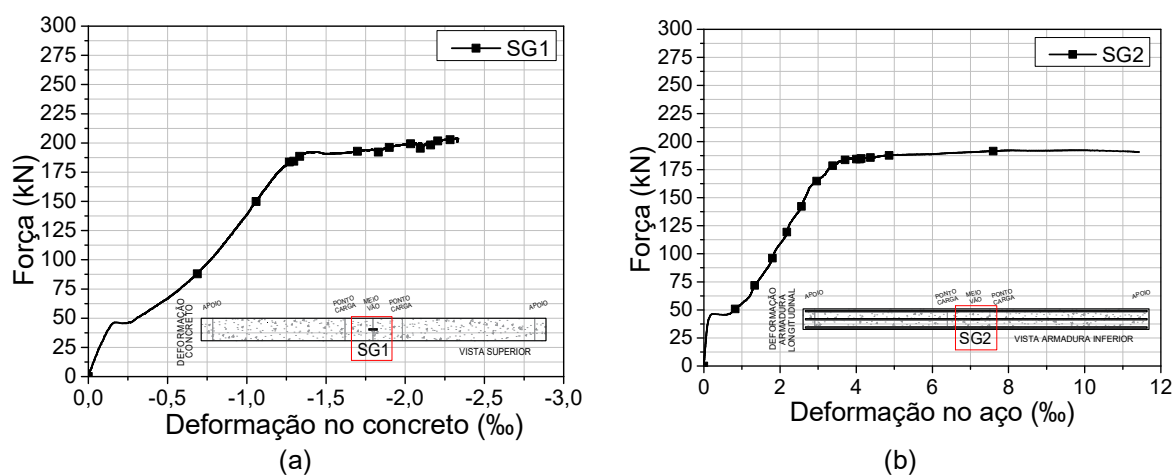
A viga B1-0-0 apresentou abertura de fissura para uma força aplicada de 46,2 kN e deslocamento vertical de 1,77 mm, com deformações no concreto de -0,16 ‰ e no aço de +0,22 ‰. O escoamento da armadura foi verificado para uma força aplicada de 185,9 kN e deslocamento vertical de 26,04 mm, com deformações no concreto de -1,31 ‰ e no aço de 4,39 ‰. Para um deslocamento de 40,94 mm (média do deslocamento aferido na força máxima dos elementos reforçados), uma força de 199,9 kN foi registrada, com deformação no concreto de -2,08 ‰.

Figura 105 – Diagrama Força versus Deslocamento da viga B1-0-0



Fonte: Próprio autor

Figura 106 – Diagramas força versus Deformação dos materiais da viga B1-0-0



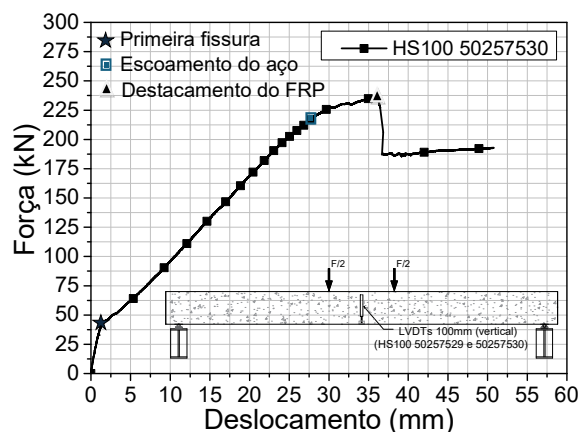
Fonte: Próprio autor

4.3.2 VIGA COM REFORÇO PASSIVO - SEM PRÉ-FISSURAÇÃO (B2-NPC-NP)

O diagrama Força versus Deslocamento vertical da viga reforçada à flexão com colagem externa passiva de laminado de CFRP aplicado segundo à técnica EBR, sem pré-fissuração (B2-NPC-NP), assim como os diagramas Força versus Deformações no concreto, aço e laminado de CFRP, são apresentados nas Figuras 107 a 109, respectivamente. O ensaio de flexão desta viga foi realizado em duas etapas, a primeira com aplicação do sistema de reforço e espera da cura da resina (7 dias), e a segunda com o carregamento da viga até sua ruína/ruptura. Destaca-se que no ensaio da presente viga, somente um dos LVDTs verticais à meio vão apresentou leitura correta, sendo descartada a leitura do segundo transdutor de deslocamento.

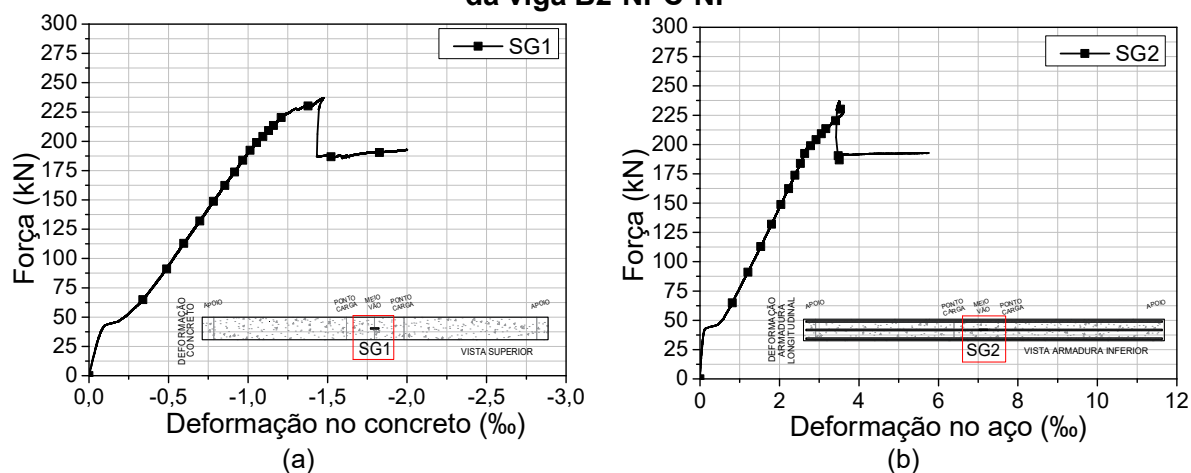
Analisando-se o diagrama da Figura 107, observa-se que a viga B2-NPC-NP (reforço passivo) também apresentou os mesmos três estágios de comportamento da viga de referência. Porém, após o escoamento do aço, verifica-se que o sistema de reforço contribuiu para o aumento da capacidade de carga da viga, justificando o comportamento linear da curva por consequência do comportamento elástico-linear do laminado de CFRP.

Figura 107 – Diagrama Força versus Deslocamento da viga B2-NPC-NP



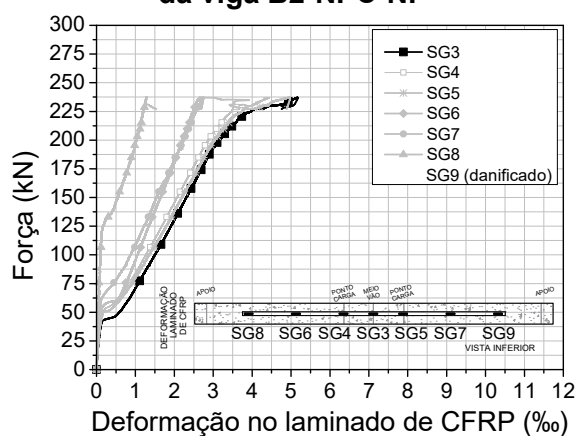
Fonte: Próprio autor

Figura 108 – Diagramas Força versus Deformação do concreto e aço da viga B2-NPC-NP



Fonte: Próprio autor

Figura 109 – Diagramas Força versus Deformação do laminado de CFRP da viga B2-NPC-NP



Fonte: Próprio autor

A viga B2-NPC- apresentou abertura da primeira fissura para uma força aplicada de 43,00 kN e deslocamento vertical de 1,43 mm, com deformações no concreto de -0,10 ‰, no aço de +0,14 ‰ e CFRP de 0,16 ‰. O escoamento da armadura foi verificado para uma força aplicada de 217,30 kN e deslocamento vertical de 27,70 mm, com deformações no concreto de -1,18 ‰, no aço de 3,29 ‰ e CFRP de 3,62 ‰. Para um deslocamento de 36,12 mm, uma força máxima de 237,10 kN foi registrada antes do colapso do sistema de reforço, com deformação no concreto, aço e CFRP de -1,47 ‰, 3,50 ‰ e 5,17 ‰, respectivamente.

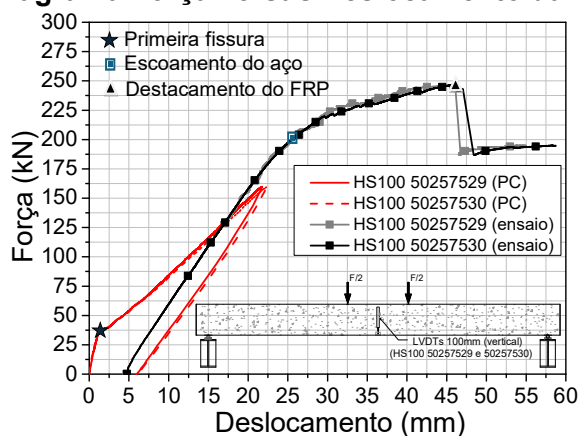
Considerando-se que o laminado de CFRP apresentou deformação estimada na ruptura de aproximadamente 14,61‰, um aproveitamento de 35,4% foi obtido do material de reforço.

4.3.3 VIGA COM REFORÇO PASSIVO - COM PRÉ-FISSURAÇÃO (B3-PC-NP)

O diagrama Força *versus* Deslocamento vertical da viga reforçada à flexão com colagem externa passiva de laminado de CFRP aplicado segundo à técnica EBR, submetida à pré-fissuração (B3-PC-NP), assim como os diagramas Força *versus* Deformações no concreto, aço e laminado de CFRP, são apresentados nas Figuras 110 a 112, respectivamente. O ensaio de flexão desta viga foi dividido em 3 etapas: a primeira foi baseada na pré-fissuração, onde a vigas foi carregada até que se atingisse um deslocamento vertical equivalente a $L/250$, com posterior descarregamento; a segunda consistia na aplicação do sistema de reforço e espera da cura da resina (7 dias), e a terceira com o carregamento da viga até sua ruína/ruptura.

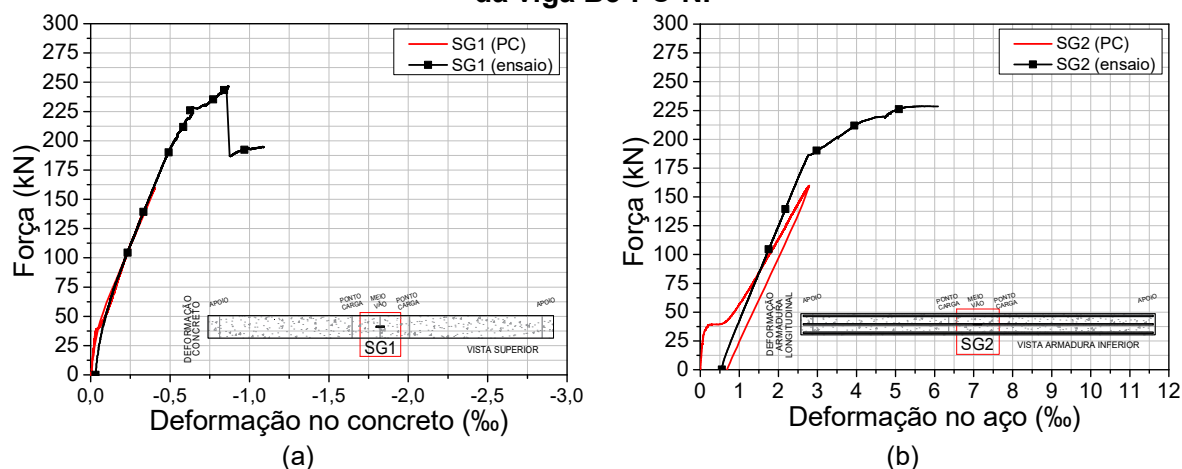
Analisando-se o diagrama da Figura 110 observa-se que a viga B3-PC-NP (reforço passivo com pré-fissuração) também apresentou os mesmos três estágios de comportamento da viga de referência. Porém, o primeiro estágio, referente ao concreto não fissurado, e parte do segundo estágio, referente ao concreto fissurado com o aço no regime elástico, ocorreram na etapa de pré-fissuração (curvas em vermelho), no qual a referida viga foi submetida a um carregamento de 159,57 kN e deslocamento vertical médio de 22,40 mm (correspondente ao limite normativo de $L/250$).

Figura 110 – Diagrama Força *versus* Deslocamento da viga B3-PC-NP



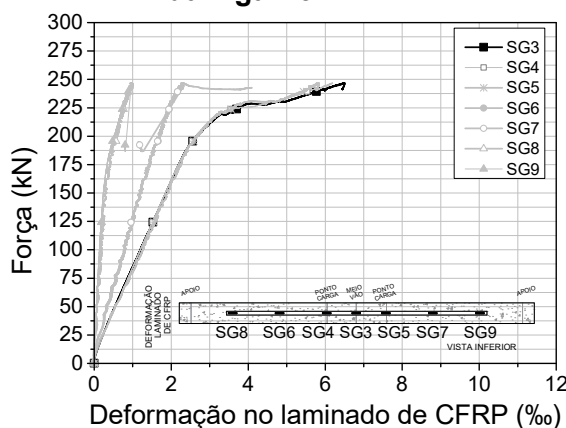
Fonte: Próprio autor

Figura 111 – Diagramas Força versus Deformação do concreto e aço da viga B3-PC-NP



Fonte: Próprio autor

Figura 112 – Diagramas Força versus Deformação do laminado de CFRP da viga B3-PC-NP



Fonte: Próprio autor

Na etapa de pré-fissuração, a viga B3-PC-NP apresentou abertura da primeira fissura para uma força aplicada de 34,61 kN e deslocamento vertical de 1,18 mm, com deformações no concreto de -0,03 ‰ e no aço de 0,13 ‰. Destaca-se que após a finalização e remoção da força aplicada no ensaio de pré-fissuração, observou-se um deslocamento vertical residual médio de 5,55 mm na viga, e deformações residuais no concreto e aço de -0,01 ‰ e 0,63 ‰, respectivamente.

A continuação do segundo e início do terceiro estágio, referente ao concreto fissurado com escoamento da armadura longitudinal de tração, ocorreram na terceira etapa do ensaio de flexão (curvas em preto), o qual se deu até o colapso do sistema de reforço e continuação do escoamento das armaduras. Na terceira etapa do ensaio verificou-se o escoamento da armadura foi verificado para uma força aplicada de 201,23 kN e deslocamento vertical de 25,65 mm, com deformações no concreto de -0,53 ‰, no aço de 3,49 ‰ e CFRP 2,69 ‰. Para um deslocamento de 45,42 mm, uma força máxima de 246,55 kN foi registrada antes do

colapso do sistema de reforço, com deformação no concreto e CFRP de $-0,86\%$ e $6,48\%$, respectivamente. Considerando-se que o laminado de CFRP apresentou deformação estimada na ruptura de aproximadamente $14,61\%$, um aproveitamento de $44,4\%$ foi obtido do material de reforço.

Destaca-se que o extensômetro elétrico instalado no aço foi danificado durante o ensaio de flexão, não registrando a deformação na força máxima. Verifica-se que o sistema de reforço contribui para o aumento da rigidez e capacidade de carga da viga, justificando o comportamento linear da curva por consequência do comportamento elástico-linear do laminado de CFRP.

4.3.4 VIGA COM REFORÇO PROTENDIDO - SEM PRÉ-FISSURAÇÃO (B4-NPC-P)

Note-se que este ensaio foi realizado em duas etapas: a aplicação do sistema de reforço e espera da cura da resina (7 dias), seguido pelo carregamento da viga até sua ruína/ruptura.

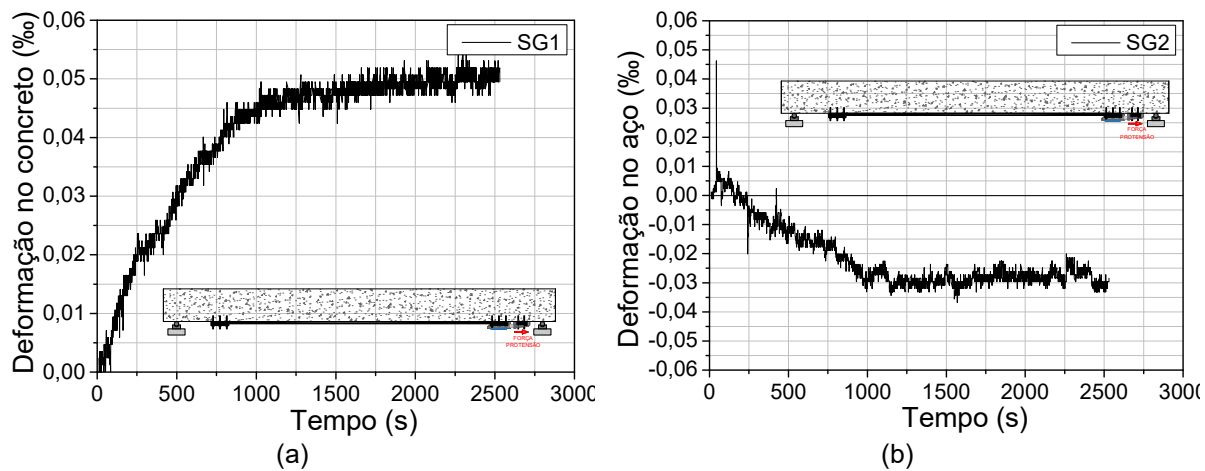
Na Figura 113 são apresentados os diagramas de Deformação *versus* Tempo das deformações no concreto, aço e laminado de CFRP, monitoradas durante o ato de protensão (primeira etapa) e em seus primeiros 2500 segundos. Ao final do referido monitoramento foram verificadas deformações no concreto, aço e laminado de CFRP de $0,05\%$, $-0,03\%$ e $4,26\%$, respectivamente. Verifica-se tração ou descompressão no concreto da face superior da viga e compressão da armadura de tração, comportamento típico do ato da protensão em elementos lineares à flexão.

O diagrama Força *versus* Deslocamento vertical da viga reforçada à flexão com laminado de CFRP protendido aplicado segundo à técnica EBR (B4-NPC-P), sem pré-fissuração, assim como os diagramas de Força *versus* Deformações no concreto, aço e laminado de CFRP, são apresentados nas Figuras 114 a 116, respectivamente.

Analisando-se o diagrama da Figura 114 observa-se que a viga B4-NPC-P (reforço protendido sem pré-fissuração) também apresentou os mesmos três estágios de comportamento da viga de referência. Porém, após o escoamento do aço, verifica-se que o sistema de reforço contribui para o aumento da capacidade de carga da viga, justificando o comportamento linear da curva por consequência do comportamento elástico-linear do laminado de CFRP.

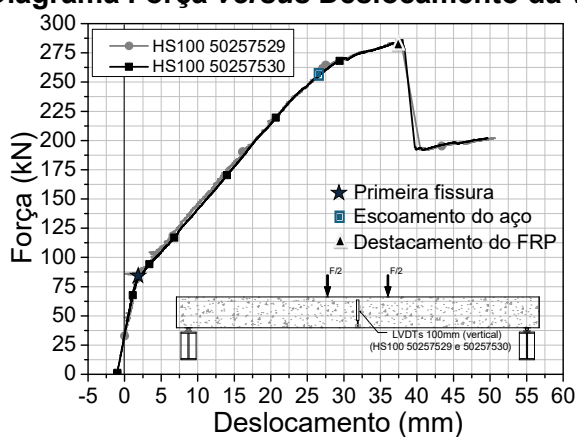
Observa-se, pela análise do diagrama da Figura 114, que o deslocamento vertical da viga B4-NPC-P inicia-se com valores negativos (de aproximadamente $1,0\text{ mm}$), o qual é proveniente da contra-flecha exercida na viga devido ao ato de protensão do reforço, confirmando a capacidade que o sistema de reforço com laminado de CFRP protendido possui em reduzir deslocamentos pré-existentes nos elementos estruturais.

Figura 113 – Diagramas Força versus Deformação do concreto, aço e laminado de CFRP no ato da protensão da viga B4-NPC-P



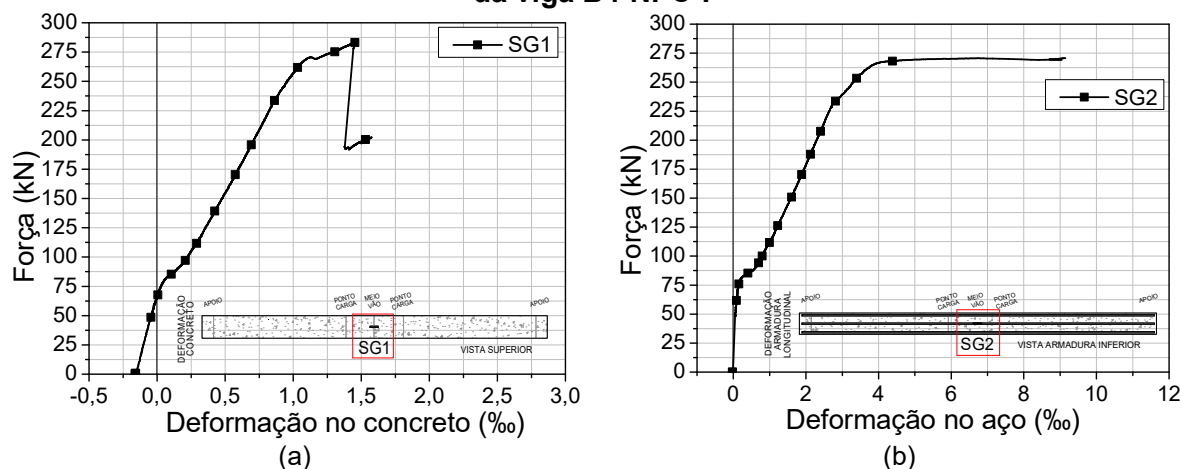
Fonte: Próprio autor

Figura 114 – Diagrama Força versus Deslocamento da viga B4-NPC-P



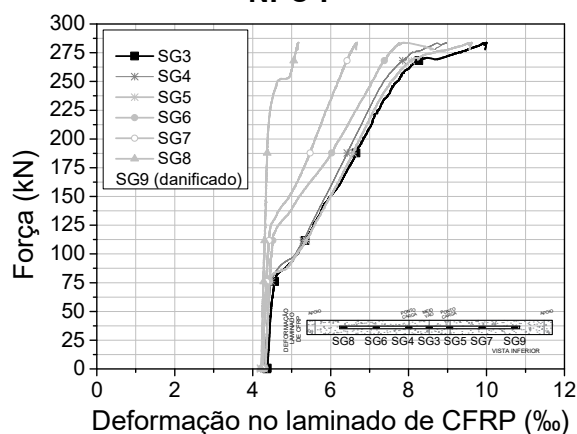
Fonte: Próprio autor

Figura 115 – Diagramas Força versus Deformação do concreto e aço da viga B4-NPC-P



Fonte: Próprio autor

Figura 116 – Diagramas Força versus Deformação do laminado de CFRP da viga B4-NPC-P



Fonte: Próprio autor

A viga B4-NPC-P apresentou abertura da primeira fissura para uma força aplicada de 82,92 kN e deslocamento vertical de 1,95 mm, com deformações no concreto de -0,07 ‰, no aço de 0,27 ‰ e CFRP de 4,64 ‰. O escoamento da armadura foi verificado para uma força aplicada de 256,33 kN e deslocamento vertical de 26,68 mm, com deformações no concreto de -1,00 ‰, no aço de 3,48 ‰ e CFRP 7,82 ‰. Para um deslocamento de 37,88 mm, uma força máxima de 283,74 kN foi registrada antes do colapso do sistema de reforço, com deformações no concreto, aço e CFRP de -1,45 ‰, 3,54 ‰ e 10,00 ‰, respectivamente. Considerando-se que o laminado de CFRP apresentou deformação estimada na ruptura de aproximadamente 14,61‰, um aproveitamento de 68,4% foi obtido do material de reforço.

Destaca-se que durante o ensaio de flexão da viga B4-NPC-P foram observados estalos seguidos de destacamento parcial do material de reforço na região intermediária da viga sob um carregamento da ordem de 240 kN, mesmo nível de carregamento do colapso do sistema de reforço passivo das vigas B2-NPC-NP e B3-PC-NP. Tal condição indica que,

após o referido nível de carregamento ou solicitação do sistema de reforço, a fixação do laminado de CFRP ao substrato da viga passou a depender principalmente dos sistemas de ancoragem mecânica instalados em suas extremidades, justificando o aumento da força máxima da viga com reforço protendido em relação à viga com reforço passivo.

4.3.5 VIGA COM REFORÇO PROTENDIDO - COM PRÉ-FISSURAÇÃO (B5-PC-P)

O ensaio de flexão desta viga foi dividido em 3 etapas: a primeira foi baseada na pré-fissuração, onde a viga foi carregada até que se atingisse um deslocamento vertical equivalente a $L/250$, com posterior descarregamento; a segunda baseada na aplicação do sistema de reforço e espera da cura da resina (7 dias), e a terceira com o carregamento da viga até sua ruína/ruptura.

Na Figura 117 são apresentados os diagramas de Deformação *versus* Tempo referentes às deformações no concreto, aço e laminado de CFRP, monitoradas durante o ato de protensão e em seus primeiros 2500 segundos. Ao final do referido monitoramento foram verificadas deformações no concreto, aço e laminado de CFRP de 0,38 ‰, -0,02 ‰ e 3,83 ‰, respectivamente.

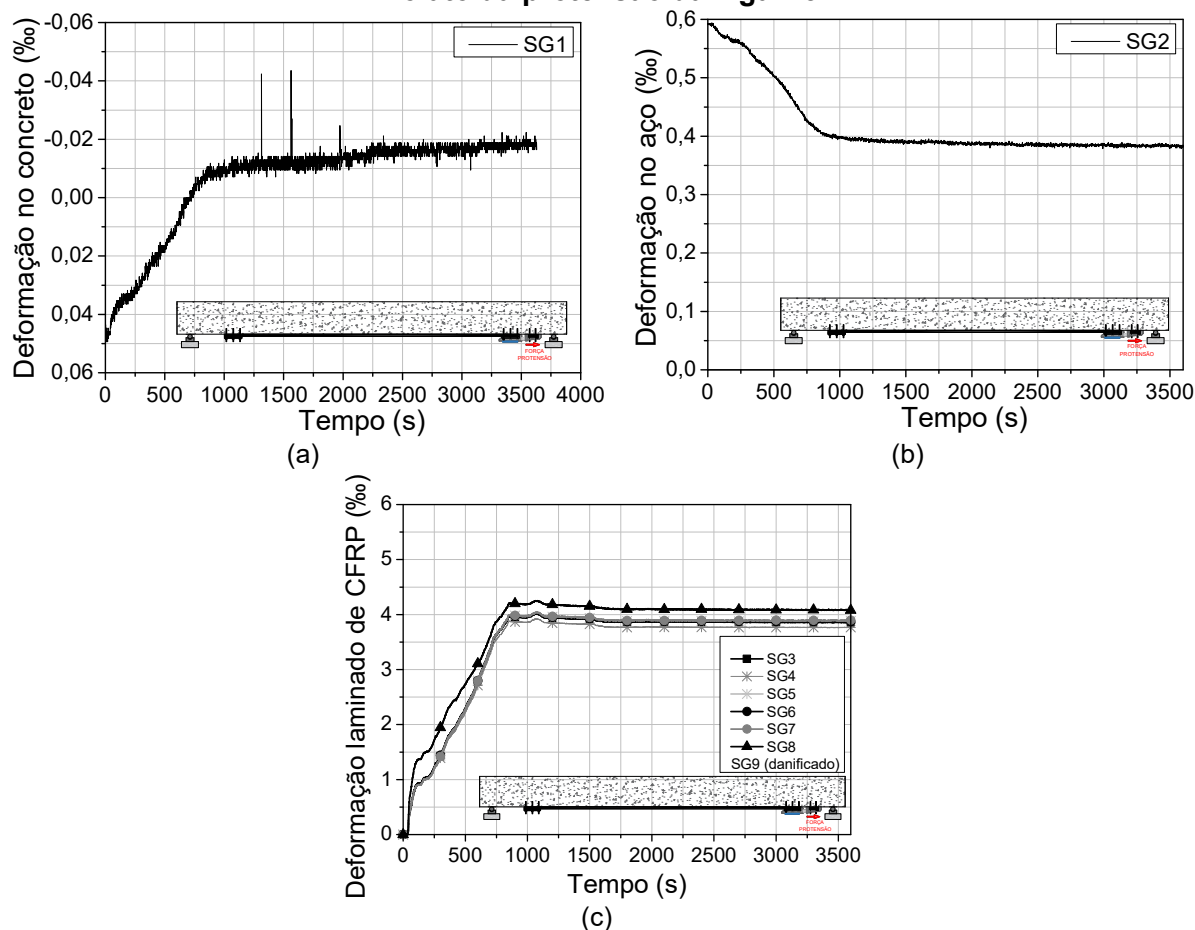
O diagrama Força *versus* Deslocamento vertical da viga reforçada à flexão com laminado de CFRP protendido aplicado segundo à técnica EBR, submetida à fissuração (B5-PC-P), assim como os diagramas Força *versus* Deformações no concreto, aço e laminado de CFRP são apresentados nas Figuras 118 a 120, respectivamente. Destaca-se que no ensaio da presente viga, somente um dos LVDTs verticais ao meio vão apresentou leitura correta, sendo descartada a leitura do segundo transdutor de deslocamento.

Analisando o diagrama da Figura 118 observa-se que a viga B5-PC-P (reforço protendido com pré-fissuração) também apresentou os mesmos três estágios de comportamento da viga de referência. Porém, o primeiro estágio, referente ao concreto não fissurado, e parte do segundo estágio, referente ao concreto fissurado com o aço no regime elástico, ocorreram na pré-fissuração (curvas em vermelho), no qual a referida viga foi submetida a um carregamento de 168,96 kN e deslocamento vertical médio de 22,40 mm, correspondente ao limite normativo de $L/250$.

Destaca-se que após a finalização e remoção da força aplicada na pré-fissuração observou-se um deslocamento vertical residual médio de 6,18 mm na viga e deformações residuais no concreto e aço de -0,03 ‰ e 0,71 ‰, respectivamente.

A continuação do segundo estágio e início do terceiro, referente ao concreto fissurado com escoamento da armadura longitudinal, ocorreram na terceira etapa do ensaio de flexão (curvas em preto), o qual se deu até o colapso do sistema de reforço e continuação do escoamento das armaduras.

Figura 117 – Diagramas Força versus Deformação do concreto, aço e laminado de CFRP no ato da protensão da viga B5-PC-P

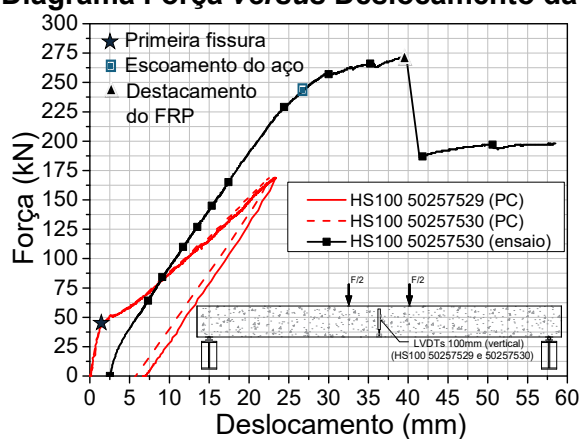


Fonte: Próprio autor

A viga B5-PC-P apresentou abertura da primeira fissura para uma força aplicada de 45,9 kN e deslocamento vertical de 1,51 mm, com deformações no concreto de -0,10 ‰ e no aço de +0,09 ‰. O escoamento da armadura foi verificado para uma força aplicada de 243,02 kN e deslocamento vertical de 26,82 mm, com deformações no concreto de -0,92 ‰, no aço de 3,02 ‰ e CFRP de 6,83 ‰. Para um deslocamento de 39,62 mm, uma força máxima de 272,02 kN foi registrada antes do colapso do sistema de reforço, com deformações no concreto, aço e CFRP de -1,35‰, 3,45 ‰ e 9,18 ‰, respectivamente. Considerando-se que o laminado de CFRP apresentou deformação estimada na ruptura de aproximadamente 14,61‰, um aproveitamento de 62,8% foi obtido do material de reforço.

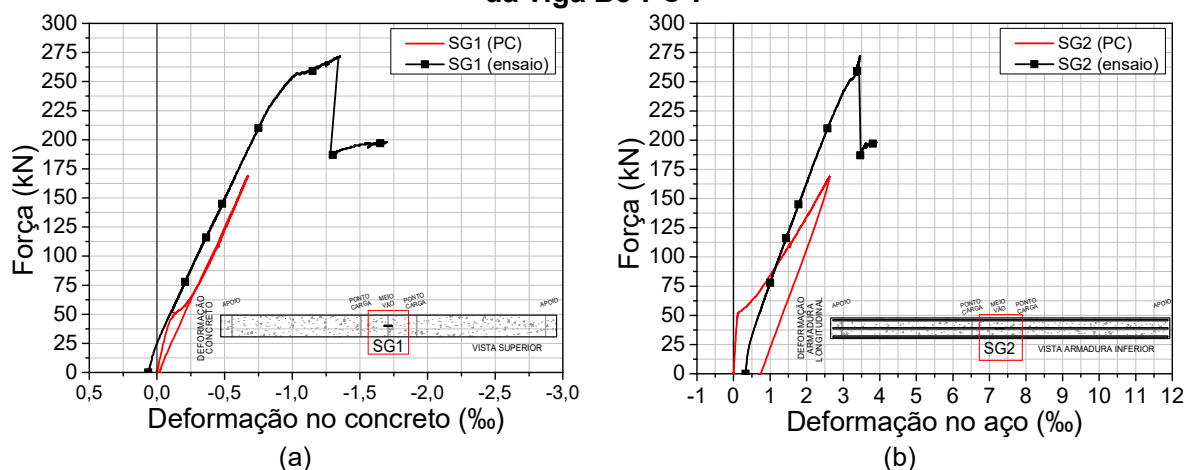
Ainda se observa, pela análise da Figura 118, que o deslocamento vertical residual da viga B4-NPC-P de 6,18 mm, referente ao ensaio de pré-fissuração, foi reduzido para aproximadamente 2,93 mm em função da contra-flecha exercida na viga devido ao ato de protensão do reforço, confirmando a capacidade que o sistema de reforço com laminado de CFRP protendido possui em reduzir deslocamentos pré-existentes nos elementos estruturais.

Figura 118 – Diagrama Força versus Deslocamento da viga B5-PC-P



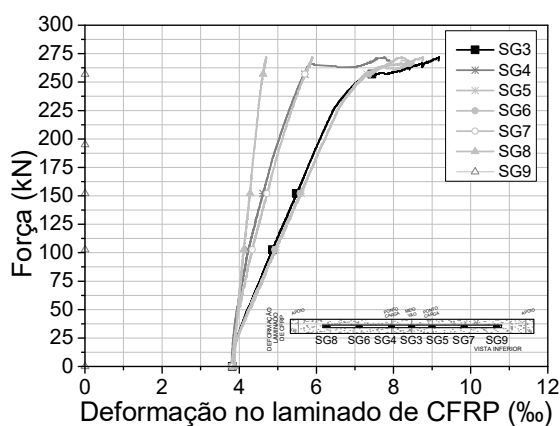
Fonte: Próprio autor

Figura 119 – Diagramas Força versus Deformação do concreto e aço da viga B5-PC-P



Fonte: Próprio autor

Figura 120 – Diagramas Força versus Deformação do laminado de CFRP da viga B5-PC-P



Fonte: Próprio autor

Destaca-se que durante o ensaio de flexão da viga B5-PC-P também foram observados estalos seguidos de destacamentos do material de reforço na região intermediária da viga sob mesmo nível de carregamento de ruptura das vigas com reforço passivo. Isto

indica que, após o referido nível de carregamento, a fixação do laminado de CFRP ao substrato da viga passa a depender principalmente dos sistemas de ancoragem mecânica instalados em suas extremidades, justificando o aumento da força máxima da viga com reforço protendido em relação à viga com reforço passivo.

4.3.6 COMPARAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS DE REFORÇO

Na Figura 121 são apresentadas comparações entre os diagramas Força *versus* Deslocamentos verticais de todas as vigas analisadas no presente programa experimental, sendo possível comparar o comportamento à flexão da viga de referência (B1-0-0) e das externamente reforçadas com laminados de CFRP passivo (B2-NPC-NP e B3-PC-P) e protendido (B4-NPC-P e B5-PC-P). Destaca-se que para todas as vigas o ensaio de flexão foi encerrado sob um deslocamento vertical entre 50 e 60 mm.

Na Tabela 20 são apresentados os principais resultados referentes à forças aplicadas (F), deslocamentos verticais médios (δ), deformações no concreto (ε_c), aço (ε_s) e CFRP (ε_f), e o nível de incremento de força proporcionado pelos sistemas de reforço (η), em relação à viga de referência não reforçada, para os momentos de abertura da primeira fissura (cr), escoamento da armadura (y) e força máxima (u).

Na referida Tabela também são apresentadas as medidas de rigidez à flexão das vigas no primeiro estágio, com o concreto não fissurado (K_I), e no segundo estágio, com o concreto fissurado e armadura em regime elástico (K_{II}), ambos representados pelo coeficiente angular de cada estágio nos diagramas Força *versus* deslocamento das vigas ensaiadas. Por fim, a ductilidade (δ_u / δ_y) das vigas reforçadas também é indicada.

Conforme já exposto, analisando-se as curvas Força *versus* Deslocamento à meio vão (Figura 121), verifica-se que todas as vigas do presente estudo apresentaram três estágios típicos de comportamento: o primeiro representa o concreto não fissurado, o segundo corresponde ao concreto fissurado com o aço no regime elástico, e o terceiro equivale ao concreto fissurado com escoamento da armadura longitudinal de tração. No caso das vigas reforçadas, após o escoamento do aço, verifica-se que o sistema de reforço contribui para o aumento da capacidade de carga das vigas, justificando o comportamento linear da curva por consequência do comportamento elástico-linear do laminado de CFRP.

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 20 verifica-se que a viga com reforço passivo, sem pré-fissuração (B2-NPC-NP), quando comparada à viga B1-REF, não apresentou aumento na força e deslocamento que levou ao surgimento da primeira fissura,

condição que confirma a limitação de sistemas de reforço com FRP colados passivamente em melhorar o comportamento em serviço dos elementos reforçados.

Figura 121 – Comparações dos diagramas Força versus Deslocamento das vigas

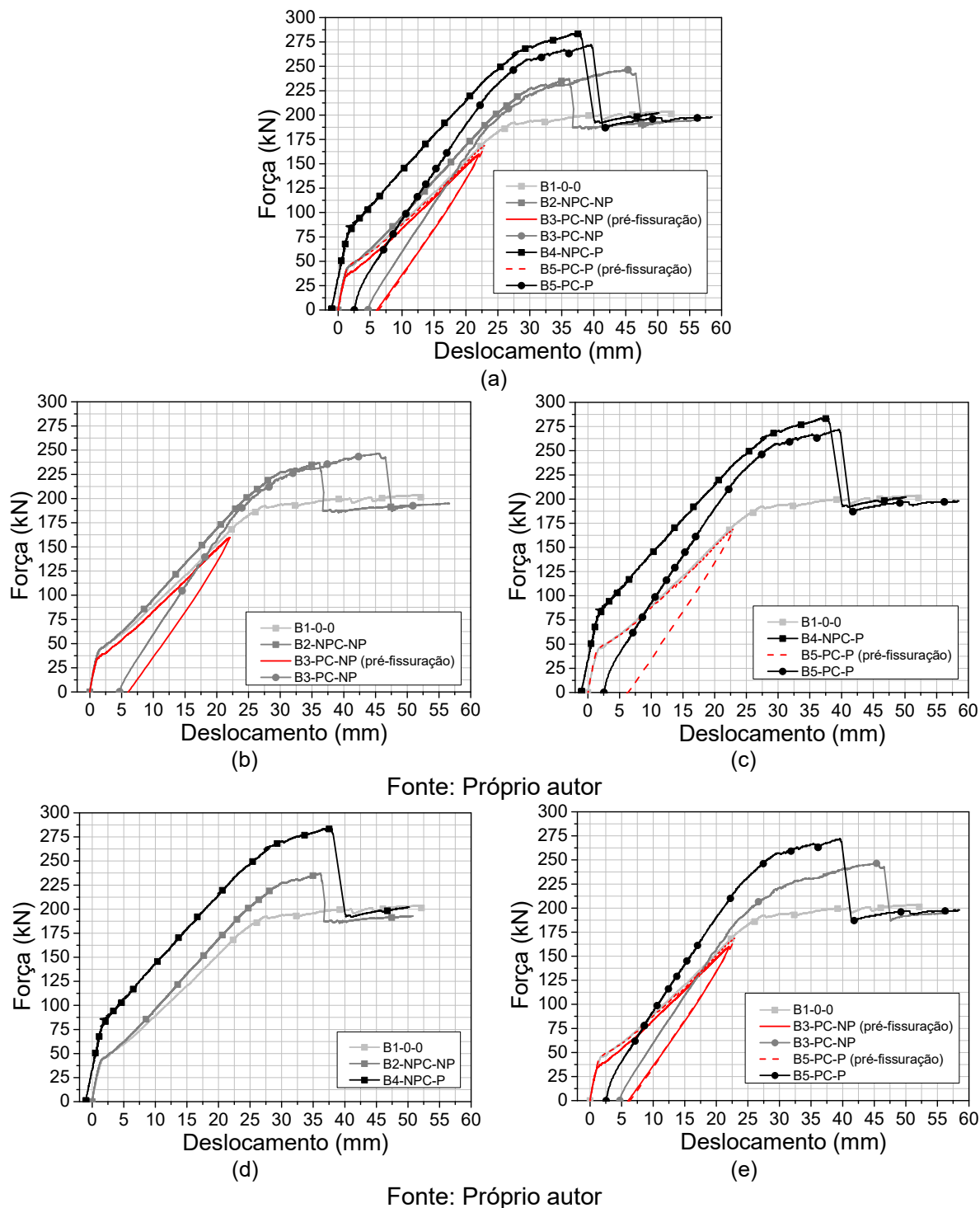


Tabela 20 – Resumo dos resultados dos ensaios de flexão das vigas

| Viga | Rigidez | | Primeira fissura | | | | | Escoamento das armaduras | | | | | Força máxima | | | | | Incrementos | | | Ductilidade | Modo de Ruptura |
|-----------|---------|----------|------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|--------------------------|--------------------|----------------------|------------------------|----------------------|---------------|--------------------|----------------------|------------------------|----------------------|-------------|----------|----------|-----------------------|-----------------|
| | K_I | K_{II} | F_{cr} (kN) | δ_{cr} (mm) | ε_c ‰ | ε_s^* ‰ | ε_f ‰ | F_y (kN) | δ_y (mm) | ε_c ‰ | ε_s^* ‰ | ε_f ‰ | F_u (kN) | δ_u (mm) | ε_c ‰ | ε_s^* ‰ | ε_f ‰ | η_{cr} | η_y | η_u | δ_u / δ_y | |
| B1-0-0 | 26,08 | 9,50 | 46,16 | 1,77 | -0,16 | 0,22 | --- | 185,90 | 26,04 | -1,31 | 4,39 | --- | 199,94 | 40,94 | -2,08 | m.d. | --- | --- | --- | --- | --- | EA |
| B2-NPC-NP | 30,07 | 9,00 | 43,00 | 1,43 | -0,10 | 0,14 | 0,16 | 217,30 | 27,70 | -1,18 | 3,29 | 3,62 | 237,10 | 36,12 | -1,47 | 3,50 | 5,17 | 0,93 | 1,17 | 1,19 | 1,30 | DR |
| B3-PC-NP | 29,32 | 7,67 | 34,60 | 1,18 | -0,03 | 0,13 | --- | 201,23 | 25,65 | -0,53 | 3,49 | 2,69 | 246,50 | 45,42 | -0,86 | m.d. | 6,48 | 0,75 | 1,08 | 1,23 | 1,77 | DR |
| B4-NPC-P | 42,51 | 12,68 | 82,90 | 1,95 | -0,07 | 0,27 | 4,64 | 256,33 | 26,68 | -1,00 | 3,48 | 7,82 | 283,70 | 37,88 | -1,45 | 3,54 | 10,00 | 1,80 | 1,38 | 1,42 | 1,42 | DRPF |
| B5-PC-P | 30,40 | 11,10 | 45,90 | 1,51 | -0,10 | 0,09 | --- | 243,02 | 26,82 | -0,92 | 3,02 | 6,83 | 272,00 | 39,62 | -1,35 | 3,45 | 9,18 | 0,99 | 1,31 | 1,36 | 1,48 | DRPF |

Notas:

m.d. – extensômetro mecanicamente danificado; *como o extensômetro foi posicionado na parte inferior pode ter evidenciado empenamento da barra além de deformação uniaxial; EA (escoamento das armaduras); EAEC (escoamento do aço seguido do esmagamento do concreto); DR (destacamento do material de reforço); DREC (destacamento do material de reforço com seguido do esmagamento do concreto); RF (ruptura do material de reforço); DRPF (destacamento com ruptura parcial do material de reforço); (F) flexão; (C) cisalhamento.

Em relação ao escoamento da armadura, o reforço passivo resultou em incrementos na força e no deslocamento vertical de 16,89 % e 6,37 %, respectivamente. Assim, verifica-se que o sistema de reforço passivo retardou somente o escoamento da armadura. Quanto a força máxima, a viga com reforço passivo resultou em incremento de força de 18,59 %.

A viga com reforço passivo e submetida à pré-fissuração (B3-PC-NP), no que diz respeito ao surgimento da primeira fissura, também não apresentou incremento de força, quando comparada à viga de referência, destaca-se que o ensaio de pré-fissuração ocorreu com a viga na condição não reforçada. Em relação ao escoamento das armaduras, verificou-se aumento de força de 8,25 % e redução do deslocamento vertical de 1,5 %, quando comparado com a viga de referência. Quanto à força máxima da viga B3-PC-NP, observou-se incrementos de força de 23,29 % e deslocamento vertical de 10,94 %, quando comparado com a viga de referência.

A viga com reforço protendido e sem pré-fissuração (B4-NPC-P), quando comparada à viga de referência, apresentou aumento na força que levou ao surgimento da primeira fissura de 79,59 %, acompanhado de aumento do deslocamento vertical em 10,16 %. Em relação ao escoamento da armadura, o reforço protendido resultou em incrementos na força e no deslocamento vertical de 37,89 % e 2,45 %, respectivamente. Assim, verifica-se que o sistema de reforço protendido resultou em incrementos das forças de surgimento da primeira fissura e escoamento da armadura superiores aos observados nas vigas com o reforço passivo, sob níveis de deslocamentos verticais similares, evidenciando a capacidade do referido sistema em melhorar o comportamento em serviço do elemento reforçado, principalmente ao que diz respeito à fissuração do concreto e deslocamento vertical.

Quanto à força máxima, o reforço protendido resultou em incremento de 41,89 %, quando comparada com a viga de referência não reforçada, e de até 19,65 %, quando comparada com as vigas com reforço passivo, condição que se dá principalmente pela instalação dos sistemas de ancoragem mecânicas nas extremidades do laminado de CFRP. Assim, confirma-se a capacidade do sistema de reforço com FRP protendido em aumentar a capacidade última do elemento reforçado, sendo seu desempenho mecânico superior ao reforço passivo. Tal comportamento é similar ao observado em experimentos ou estudos que analisaram elementos de concreto armado reforçados à flexão com FRP passivos e protendidos (KANG; ZHANG; LIU, 2012; WOO; KIM; BYUN, 2012; ZHANG; DENG; LIAO, 2013; CORREIA *et al.*, 2015; MICHELS *et al.*, 2015; GAO; GU; MOSALLAM, 2016; HONG; PARK, 2017; LIU *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2022).

A viga com reforço protendida e submetida à pré-fissuração (B5-PC-P), quando comparada com viga de referência, não apresentou aumento na força que levou ao surgimento da primeira fissura, destaca-se que tal estágio ocorreu no ensaio de pré-fissuração com a referida viga na condição não reforçada. Em relação ao escoamento da armadura, o

reforço passivo resultou em incrementos na força e no deslocamento vertical de 30,37 % e 2,99 %, respectivamente. Assim, verifica-se que o sistema de reforço protendido resultou em maior força de escoamento da armadura sob deslocamento similar ao observado na viga de referência.

Quanto à força máxima, o reforço protendido da viga B5-PC-P resultou em incremento de 36,04 % quando comparado com a viga de referência, e de até 14,71 %, quando comparada com as vigas com reforço passivo. Assim, verifica-se também a capacidade do sistema de reforço com FRP protendido em aumentar a capacidade última do elemento reforçado, sendo o nível de incremento superior ao obtido com o reforço passivo, mesmo com danos pré-instalados no elemento reforçado.

Como esperado, verifica-se pelos diagramas apresentados na Figura 121 que, em todas as comparações, as vigas reforçadas com FRP protendido apresentaram melhor desempenho mecânico à flexão no que diz respeito às condições de serviço, referentes ao surgimento da primeira fissura e ao escoamento das armaduras, destacando-se o aumento de 79,59 % no surgimento da primeira fissura da viga B4-NPC-P quando comparado com a viga de referência (B1-0-0). Em termos de condições últimas, o sistema de reforço protendido também resultou em maiores incrementos das forças máximas quando comparado com o reforço passivo.

Ainda, analisando-se os diagramas das Figuras 121 verifica-se que o deslocamento vertical da viga B3-NPC-P inicia-se com um deslocamento negativo (de aproximadamente 1,0 mm), o qual é proveniente da contra-flecha exercida na viga devido ao ato de protensão do reforço, confirmando a capacidade que o sistema de reforço com laminado de CFRP protendido possui em reduzir deslocamentos pré-existentes nos elementos estruturais. Condição similar foi verificada na viga com reforço protendido, submetida à pré-fissuração (B5-PC-P), em que o reforço protendido, no ato da protensão, reduziu o deslocamento residual médio de 6,18 mm, proveniente da pré-fissuração, para 2,93 mm, ou seja, promoveu uma redução do deslocamento vertical em 52,6 %. Em relação ao reforço passivo, não se verificou diminuição do deslocamento no ato da aplicação do reforço.

No que diz respeito a rigidez à flexão das vigas, no primeiro estágio (concreto não fissurado), por meio da comparação dos parâmetros K_I apresentados na Tabela 20, verifica-se que a o reforço passivo não proporcionou incremento de rigidez à flexão à viga, uma vez que os valores obtidos para a viga B2-NPC-NP foram similares aos observados para as vigas B1-0-0, B3-PC-NP e B5-PC-P, estas que no primeiro estágio não contaram com o sistema de reforço. Já em relação a viga B4-NPC-P, a protensão do laminado de CFRP resultou em incremento da rigidez à flexão de até 63,00 % quando comparado com as demais vigas, condição que se deve ao retardamento do surgimento da primeira fissurado no concreto dado pelo uso do material de reforço com protensão.

Similar comportamento foi observado no segundo estágio (concreto fissurado com o aço no regime elástico) quando, pela análise do parâmetro K_{II} , verifica-se que as vigas com reforço passivo não apresentaram incrementos de rigidez à flexão quando comparado com a viga de referência. Entretanto, as vigas reforçadas com o laminado de CFRP protendido, B4-NPC-P e B5-PC-P, apresentaram incrementos de rigidez de 33,47 % e 16,84 %, respectivamente, quando comparadas à viga B1-0-0. Nota-se que o incremento de rigidez também ocorre na viga submetida à pré-fissuração, B5-PC-P, o que se deve a capacidade do sistema protendido em diminuir ou fechar fissuras pré-existentes.

Em relação à ductilidade das vigas reforçadas, conforme relação δ_u / δ_y , indicada na Tabela 20, observa-se que a viga com reforço passivo submetida à pré-fissuração (B3-PC-NP) apresentou a maior ductilidade registrada nos ensaios. Comparando-se as vigas reforçadas sem pré-fissuração (B2-NPC-NP e B4-NPC-P), a viga com reforço protendido apresentou ductilidade 9,23 % superior devido ao uso de sistemas de ancoragem, retardando o colapso do sistema de reforço. Verificou-se também que as vigas submetidas à pré-fissuração (B3-PC-NP e B5-PC-P) apresentaram maior ductilidade quando comparadas com as vigas sem danos pré-instalados, condição que ocorre em função do deslocamento residual que as referidas vigas apresentam após o ensaio de pré-fissuração.

Realizando-se a comparação com os resultados do programa experimental conduzido por Correia *et al.* (2015), os quais utilizaram do mesmo sistema de protensão desta pesquisa, os referidos autores constataram incrementos da força no escoamento das armaduras de 54,88 % e 103,00 % para os sistemas de reforço passivo e protendido, respectivamente, e incrementos na força última de 37,92 % e 142,95 %, quando comparados ao elementos de referência (sem reforço). No referido estudo foram analisadas faixas de lajes de concreto armado com taxa de armadura longitudinal de 0,347 % e com rigidez à flexão nos estágios I e II consideravelmente inferiores à rigidez das vigas do presente estudo, com parâmetros K_I de até 4,47 e K_{II} de até 0,79 para a faixa de laje de referência (não reforçada). Note-se que os níveis de deformação no material de reforço e deslocamentos verticais observados por Correia *et al.* (2015) foram da mesma ordem dos observados neste estudo.

No estudo realizado por Hong e Park (2017), os referidos autores constataram incrementos da força no escoamento das armaduras de 39,36 % e 87,87 % para os sistemas de reforço passivo e protendido, respectivamente, e incrementos na força última de 52,48 % e 139,01 %, quando comparados ao elementos de referência. No referido estudo foram ensaiadas vigas de concreto armado com taxa de armadura tracionada de 0,393 % e com rigidez à flexão nos estágios I e II consideravelmente inferiores à rigidez das vigas do presente estudo, com parâmetros K_I de até 15,42 e K_{II} de até 4,58 para a faixa de laje de referência.

No experimento conduzido por Wang *et al.* (2022), os quais utilizaram vigas em escala real com dimensões e taxa de armaduras similares as vigas do presente estudo, os referidos autores constataram incrementos da força no escoamento das armaduras de 16,00 % e 39,00 %, para os sistemas de reforço passivo e protendido, respectivamente, e incrementos na força última de 12,00% e 55,00 %, quando comparados aos elementos de referência. Em relação ao nível de solicitação do material de reforço e incremento da força última para o sistema protendido, verifica-se melhor aproveitamento/desempenho mecânico no experimento Wang *et al.* (2022) quando comparado ao presente estudo, condição que se deve ao sistema de ancoragem utilizados pelos referidos autores, o qual possuía um sistema de travamento do laminado de CFRP que evitava seu escorregamento, retardando o colapso do material de reforço.

Comparando-se os incrementos de força observados por Wang *et al.* (2022) com os resultados da presente pesquisa, verifica-se similaridades entre os níveis de incrementos proporcionados pelos sistemas de reforço, condição que se dá principalmente pela similar rigidez à flexão das vigas ensaiadas. Já nos experimentos conduzidos por Correia *et al.* (2015) e Hong e Park (2017), tendo em vista a menor rigidez à flexão dos elementos analisados pelos referidos autores, maiores níveis de incrementos foram observados nos elementos reforçados. Tais comparações permitem confirmar que quanto menor a rigidez à flexão do elemento reforçado, maiores são os níveis de incrementos de forças devido a aplicação dos sistemas de reforço.

De modo geral, o comportamento mecânico dos sistemas de reforço (passivo e protendido) considerados no presente estudo se mostram condizentes com os resultados experimentais indicados em outros estudos disponíveis na literatura que também analisaram elementos de concreto armado reforçados à flexão com FRP passivo e protendido (KANG; ZHANG; LIU, 2012; WOO; KIM; BYUN, 2012; ZHANG; DENG; LIAO, 2013; ALVES, 2015; GAO; GU; MOSALLAM, 2016; HONG; PARK, 2017; LIU *et al.*, 2021).

Em relação ao sistema de reforço com FRP protendido, os diferentes autores também observaram em seus ensaios estalos seguidos de destacamentos do material de reforço na região intermediária da viga sob o mesmo nível de carregamento de ruptura das vigas com reforço passivo. Tal condição indica que após o referido nível de carregamento ou solicitação no material de reforço, a fixação do laminado de CFRP ao substrato da viga passa a depender principalmente dos sistemas de ancoragem mecânica instalados em suas extremidades, justificando o aumento da força máxima da viga com reforço protendido em relação à viga com reforço passivo, o qual usualmente não conta com sistemas de ancoragem.

4.3.7 EFEITO DA PRÉ-FISSURAÇÃO NAS VIGAS

Como já detalhado, duas vigas do presente estudo foram submetidas a ensaio de pré-fissuração antes da aplicação dos sistemas de reforço com o objetivo de avaliar o comportamento mecânico das referidas vigas face um nível de dano inicialmente instalado.

Em relação aos níveis de danos instalados nas vigas pré-fissuradas, a viga B3-PC-NP, após a finalização e remoção da força aplicada no ensaio de pré-fissuração, apresentou deslocamento vertical residual médio de 5,55 mm, deformações residuais no concreto e aço de -0,01 ‰ e 0,63 ‰, respectivamente, e abertura média de fissuras na face tracionada de 0,1 mm. Já na viga B5-PC-P, após a finalização e remoção da força aplicada na pré-fissuração, observou-se um deslocamento vertical residual médio de 6,18 mm na viga, deformações residuais no concreto e aço de -0,03 ‰ e 0,71 ‰, respectivamente, e abertura média de fissuras na face tracionada de 0,1 mm.

Note-se que a abertura média de fissuras de 0,1 mm, observada nas referidas vigas, provenientes do ensaio de pré-fissuração e existentes no ato da aplicação dos sistemas de reforço, atendem aos limites de abertura de fissuras de 0,3 mm e 0,2 mm impostos pelas normas ACI PRC-440.2 (2023, p. 17) e *FIB Bulletin 90* (2019, p. 187), respectivamente, dispensando a necessidade de injeções ou tratamento de tais fissuras antes da aplicação dos sistemas de reforço nas vigas.

Em relação ao efeito da pré-fissuração no comportamento mecânico das vigas na condição reforçada, observou-se que as vigas B3-PC-NP e B5-PC-P, na etapa de ensaio de flexão até a ruptura, apresentaram somente dois estágios de comportamento: (i) concreto fissurado com aço no regime elástico; e (ii) concreto fissurado com escoamento da armadura longitudinal de tração. Note-se no primeiro estágio para a viga B3-PC-NP uma rigidez inferior às observadas nas vigas de referência e reforçadas sem pré-fissuração (B1-0-0, B2-NPC-NP e B4-NPC-P), assim como, redução da rigidez da viga B5-PC-P em relação da viga B4-NPC-P, sem pré-fissuração. Tal redução de rigidez se deve aos danos iniciais instalados nas vigas antes da aplicação do reforço.

No segundo estágio verificou-se que a pré-fissuração não comprometeu de forma significativa o desempenho dos sistemas de reforço, sendo que, assim como nas vigas sem pré-fissuração, o sistema de reforço contribuiu para o aumento da capacidade de força da viga após o escoamento das armaduras, justificando o comportamento linear da curva por consequência do comportamento elástico-linear do laminado de CFRP.

Analisando-se o comportamento mecânico da viga B3-PC-NP, em relação à força no momento do escoamento das armaduras, verificou-se aumento de força de 8,25 % e redução do deslocamento vertical de 1,5 %, quando comparado com a viga de referência, sendo o incremento de força neste estágio 7,4 % menor do que o verificado na viga com reforço sem

pré-fissuração, B2-NPC-NP. Quanto à força máxima da viga B3-PC-NP, observou-se incrementos de força de 23,29 % e deslocamento vertical de 10,94 %, quando comparado com a viga de referência (Figura 126b). Comparando-se com a viga com reforço passivo sem pré-fissuração (B2-NPC-NP), tais incrementos foram de 3,96 % e 25,74 %, respectivamente.

A variação entre os resultados das vigas com reforço passivo, se dá principalmente pelos danos pré-instalados na viga B3-PC-NP, sendo que em termos de capacidade última, os resultados das referidas vigas são similares. Entretanto, em relação ao deslocamento vertical, este foi retardado pela pré-fissuração na viga B3-PC-NP, condição que se mostra coerente face ao deslocamento vertical e deformações residuais nos materiais observados após a pré-fissuração do elemento, resultando na mobilização do laminado de CFRP sob maiores deslocamentos verticais da viga quando comparado com a viga sem pré-fissuração.

Comparando-se o comportamento das vigas com reforço protendido (Figura 126c), verifica-se que a viga sem pré-fissuração (B4-NPC-P) apresentou maiores forças no surgimento da primeira fissura no concreto, escoamento das armaduras e força máxima, quando comparado com a viga B5-PC-P, a qual foi submetida à pré-fissuração. Tal comportamento é similar ao observado por Alves (2015), que analisou experimentalmente lajes pré-fissuradas reforçadas com FRP protendido, sendo indicado pela referida autora que os menores incrementos de forças, quando comparados a elementos de referência sem pré-fissuração, se dão devido aos danos pré-instalados nos elementos.

Destaca-se também a capacidade do reforço protendido em reduzir deslocamentos verticais existentes no elemento reforçado. Na viga B5-PC-P, no ato da protensão, constatou-se uma redução do deslocamento residual médio de 6,18 mm (proveniente do ensaio de pré-fissuração) para 2,93 mm, promovendo redução do deslocamento vertical em 52,6 %, assim como, resultando em ductilidade similar à viga sem pré-fissuração. Em relação ao reforço passivo, para a viga submetida a pré-fissuração (B3-PC-NP), não se verificou diminuição do deslocamento vertical residual de 5,55 mm no ato da aplicação do reforço, condição que contribui para o maior deslocamento vertical final observado na referida viga.

4.3.8 COMPORTAMENTO DAS VIGAS EM SERVIÇO

Para análise do comportamento em serviço das vigas do presente estudo, em especial ao que diz respeito a deslocamentos verticais, realizou-se comparação dos níveis de incrementos de força das vigas em função da aplicação dos sistemas de reforço para dois limites de deslocamentos verticais impostos pela norma NBR 6118 (ABNT, 2023, p. 77), $L/350$ (16,0 mm) e $L/250$ (22,4 mm), onde L se refere ao vão livre da viga de 560,0 cm.

De acordo com a norma NBR 6118 (ABNT, 2023, p. 76), os limites de deslocamentos indicados acima são valores práticos adotados para verificações em serviço do estado-limite

de deformações excessivas no elemento estrutural. Ambos os limites indicados se referem a efeitos na estrutura relacionados à aceitabilidade sensorial, como deslocamentos visíveis em elementos e vibrações sentidas na estrutura.

Na Tabela 21 são apresentadas as forças registradas durante os ensaios sob os deslocamentos verticais equivalentes a $L/350$ (16,0 mm) e $L/250$ (22,4 mm), como também, são indicados os incrementos de força para cada limite de deslocamento, em relação à viga de referência não reforçada (B1-0-0).

Tabela 21 – Comparação das vigas em serviço

| Viga | Força (kN) | | Incremento de força (%) | |
|-----------|----------------------|----------------------|-------------------------|---------|
| | $L/350$ (16,0 mm) | $L/250$ (22,4 mm) | $L/350$ | $L/250$ |
| B1-0-0 | 128,45 | 170,50 | - | - |
| B2-NPC-NP | 139,83 | 185,82 | 8,86 | 8,99 |
| B3-PC-NP | 118,69 | 180,26 | 0,00 | 5,72 |
| B4-NPC-P | 186,55 | 231,39 | 45,23 | 35,71 |
| B5-PC-P | 151,02 | 212,02 | 17,57 | 24,35 |

Fonte: Próprio autor

Analisando-se os resultados da Tabela 21 verifica-se que ambos os sistemas de reforço (passivo e protendido) resultaram em incrementos de força para os limites de deslocamentos analisados. Entretanto, observa-se que as vigas com reforço protendido (B4-NPC-P e B5-PC-P) resultaram em incrementos de forças consideravelmente maiores quando comparado às vigas com reforço passivo (B2-NPC-NP e B3-PC-NP), confirmando a eficiência da protensão do laminado de CFRP em conferir melhor comportamento em serviço, permitindo maiores níveis de carregamento para um mesmo nível de deslocamento vertical. Tais resultados também confirmam a limitação do sistema de reforço passivo em conferir aumento de rigidez ao elemento reforçado.

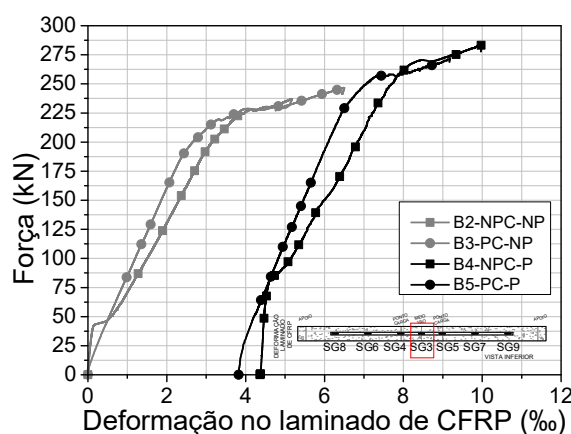
Ainda, observa-se redução dos níveis de incremento de força para as vigas submetidas ao ensaio de pré-fissuração (B3-PC-NP e B5-PC-P) em relação as vigas sem pré-fissuração (B2-NPC-NP e B4-NPC-P), evidenciando-se o efeito negativo de danos pré-existentes nos elementos reforçados em serviço.

4.3.9 DEFORMAÇÕES NOS LAMINADOS DE CFRP

Na Figura 122 é apresentada a comparação dos diagramas Força *versus* Deformação nos laminados de CFRP das vigas ensaiadas, sendo destacado no referido diagrama o extensômetro elétrico posicionado no meio vão de cada viga reforçada (S3), o qual foi

submetido ao maior nível de deformação. Na Tabela 22 são indicadas as deformações no laminado de CFRP referente ao escoamento das armaduras (F_y) e colapso do sistema de reforço (F_u), com os respectivos níveis de solicitação do material de reforço.

Figura 122 – Diagramas força versus deformação do laminado de CFRP das vigas reforçadas



Fonte: Próprio autor

Tabela 22 – Deformações e níveis de solicitação do laminado de CFRP

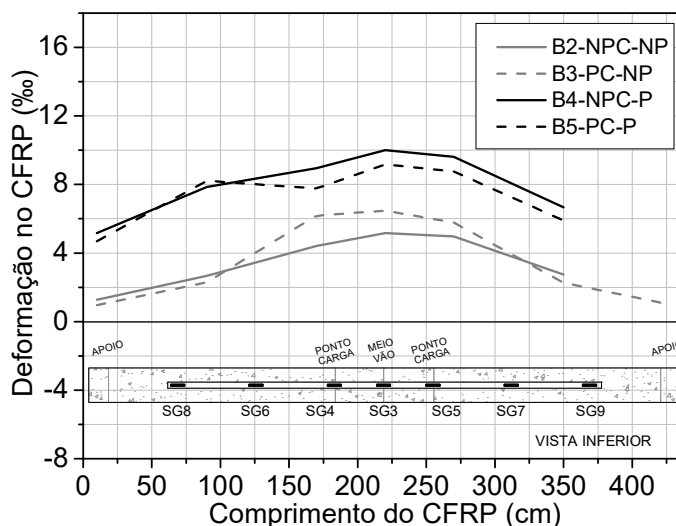
| Viga | Deformação inicial (‰) | Deformação em F_y (‰) | Nível de solicitação em F_y (%) | Deformação em F_u (‰) | Nível de solicitação em F_u (%) |
|-----------|------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| B2-NPC-NP | - | 3,62 | 24,78 | 5,17 | 35,39 |
| B3-PC-NP | - | 2,69 | 18,41 | 6,48 | 44,35 |
| B4-NPC-P | 4,26 | 7,82 | 53,52 | 10,00 | 68,45 |
| B5-PC-P | 3,83 | 6,83 | 46,75 | 9,18 | 62,83 |

Fonte: Próprio autor

Analisando-se o diagrama da Figura 122 e os resultados apresentados na Tabela 22 observa-se que a protensão do laminado de CFRP não apenas resulta em melhor comportamento mecânico do elemento reforçado, mas também em melhor uso/aproveitamento do material de reforço quando comparado ao sistema passivo. Enquanto o colapso do sistema de reforço passivo ocorreu sob deformações de 5,47 ‰ e 6,48 ‰, para as vigas B2-NPC-NP e B3-PC-NP, respectivamente, correspondente aos níveis de solicitação de 35,36 % e 44,35 %, no reforço protendido a força máxima ocorreu sob deformações de 10,0 ‰ e 9,18 ‰ para as vigas B4-NPC-P e B5-PC-P, respectivamente, resultando em níveis de solicitação de 68,45 % e 62,83 %. Assim, é evidenciada a capacidade do sistema de reforço protendido em conferir maiores níveis de solicitação ao material de reforço quando comparado ao reforço passivo.

Na Figura 123 é apresentado diagrama com a distribuição das deformações registradas no momento do colapso do sistema de reforço ao longo do comprimento do laminado. Verifica-se no referido diagrama que a região central do laminado fica sujeita a maiores níveis de deformação, coincidindo com a região de maior momento fletor das vigas. Tal diagrama também permite observar a diminuição dos níveis de deformações nas regiões mais próximas às extremidades do material de reforço.

Figura 123 – Distribuição das deformações no laminado de CFRP das vigas reforçadas



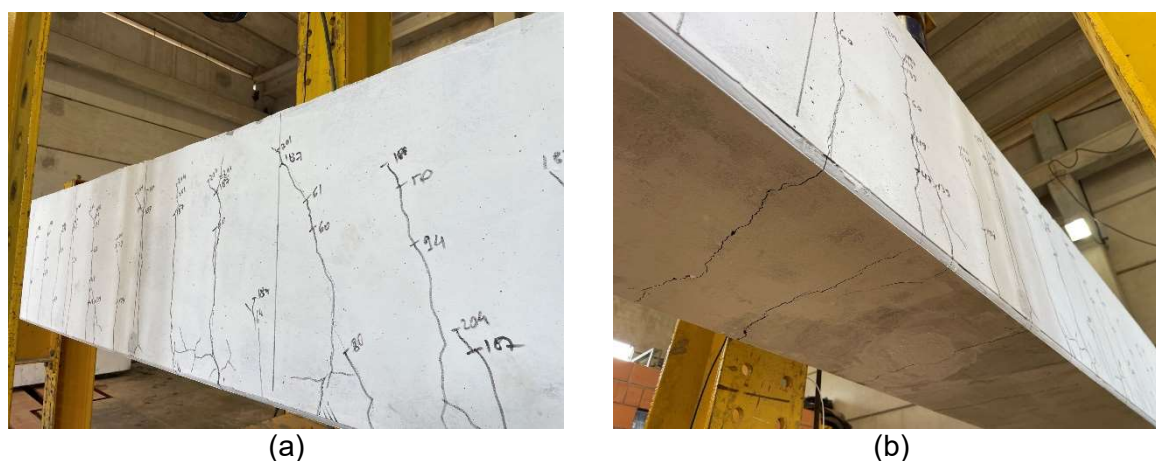
Fonte: Próprio autor

Tais resultados corroboram com os modos de ruptura observados nas vigas reforçadas, onde verificou-se ruptura parcial do laminado com o sistema de reforço protendido e apenas destacamento do material de reforço com o sistema passivo, justificando os maiores níveis de deformações constatadas no reforço protendido. Além disso, os maiores níveis de deformações observadas na região intermediária do material de reforço, conforme apresentado na Figura 123, confirmam o mecanismo de falha do sistema de reforço conhecido na literatura como *intermediate crack debonding*.

4.3.10 MODO DE RUPTURA DAS VIGAS

A Figura 124 apresenta o modo de ruína da viga de referência (B1-0-0), o qual se deu de forma dúctil com deformação acentuada da armadura de tração, sem esmagamento do concreto, confirmando o domínio de deformação 2 estimado inicialmente com o modelo de dimensionamento apresentado pela norma NBR 6118 (ABNT, 2023).

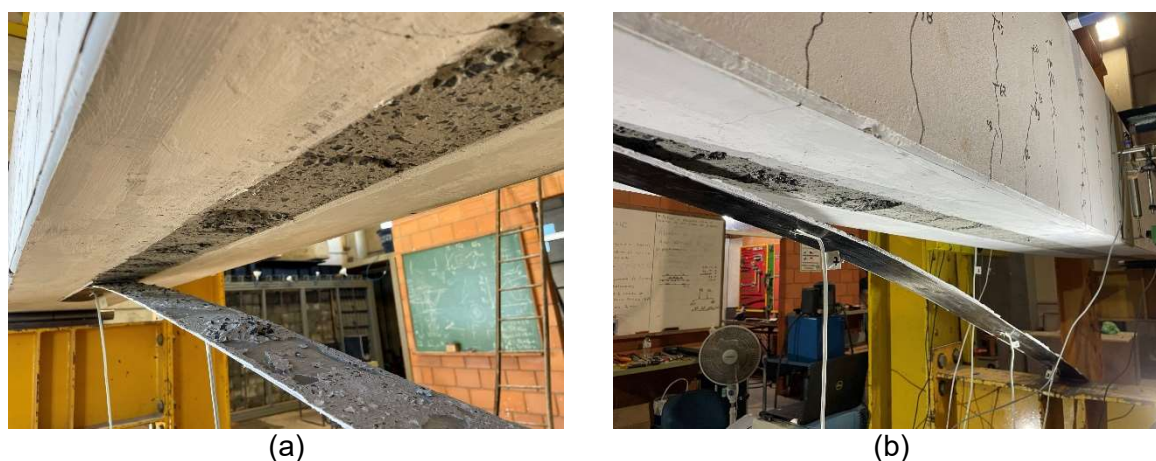
Figura 124 – Modo de ruptura da viga B1-0-0



Fonte: Próprio autor

Nas Figuras 125 e 126 são apresentados os modos de ruptura das vigas com reforço passivo (B2-NPC-NP e B3-PC-NP, respectivamente), com destaque do aspecto da viga B3-PC-NP logo após o ensaio de pré-fissuração (Figura 126a-b).

Figura 125 – Modo de ruptura da viga B2-NPC-NP



Fonte: Próprio autor

Ambas as vigas com reforço passivo apresentaram modo de ruptura caracterizado pelo destacamento brusco do laminado de CFRP, conforme previsto no dimensionamento realizado pelas normas ACI PRC-440.2 (2023) e *FIB Bulletin 90* (2019), o qual foi precedido de estalos do material de reforço sob carregamentos da ordem de 230 kN. Verifica-se, nas referidas Figuras, o destacamento do laminado de CFRP com pontos de resina e substrato de concreto a ele aderido.

Conforme verificado no ensaio de flexão, o colapso dos sistemas de reforço passivo das vigas B2-NPC-NP e B3-PC-NP ocorreram a partir do surgimento de fissuras características de flexão na região intermediária da viga, ocasionando concentrações de tensões do laminado e, conseqüentemente, seu destacamento, o qual se expandiu para uma

de suas extremidades. Tal modo de ruptura é conhecido na literatura como *intermediate crack debonding* (TENG *et al.*, 2003; *FIB BULLETIN 90*, 2019).

Figura 126 – Pré-fissuração e modo de ruptura da viga B3-PC-NP



Fonte: Próprio autor

Nas Figuras 127 e 128 são apresentados os modos de ruptura das vigas com reforço protendido (B4-NPC-P e B5-PC-NP). Na Figura 128 também se apresenta o aspecto da viga B3-PC-NP logo após o ensaio de pré-fissuração.

Na zona da ancoragem mecânica, observou-se um escorregamento do laminado em uma das placas metálicas, indicando uma falha interfacial entre o laminado de CFRP, as camadas de resina epóxi, a chapa metálica e o substrato de concreto (Figuras 127c-d 128e-g). Tal comportamento é similar ao relatada por *Correia et al.* (2015) em seu estudo experimental, o qual utilizou o mesmo sistema de protensão da presente pesquisa.

No que diz respeito ao ensaio de flexão, ambas as vigas apresentaram modo de ruptura caracterizado pelo destacamento e ruptura parcial do laminado de CFRP, o qual foi precedido por estalos do material de reforço sob carregamentos da ordem de 250 kN, o qual é equivalente a capacidade última das vigas com reforço passivo. Isto indica que o laminado deixou de estar totalmente aderido ao substrato de concreto e sua fixação passa a se dar

principalmente pelas ancoragens metálicas em suas extremidades. Tal comportamento também foi observado em estudos experimentais com FRP protendido com ancoragens mecânicas (CORREIA *et al.*, 2015; LIU *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2022).

Figura 127 – Modo de modo de ruptura da viga B4-NPC-P

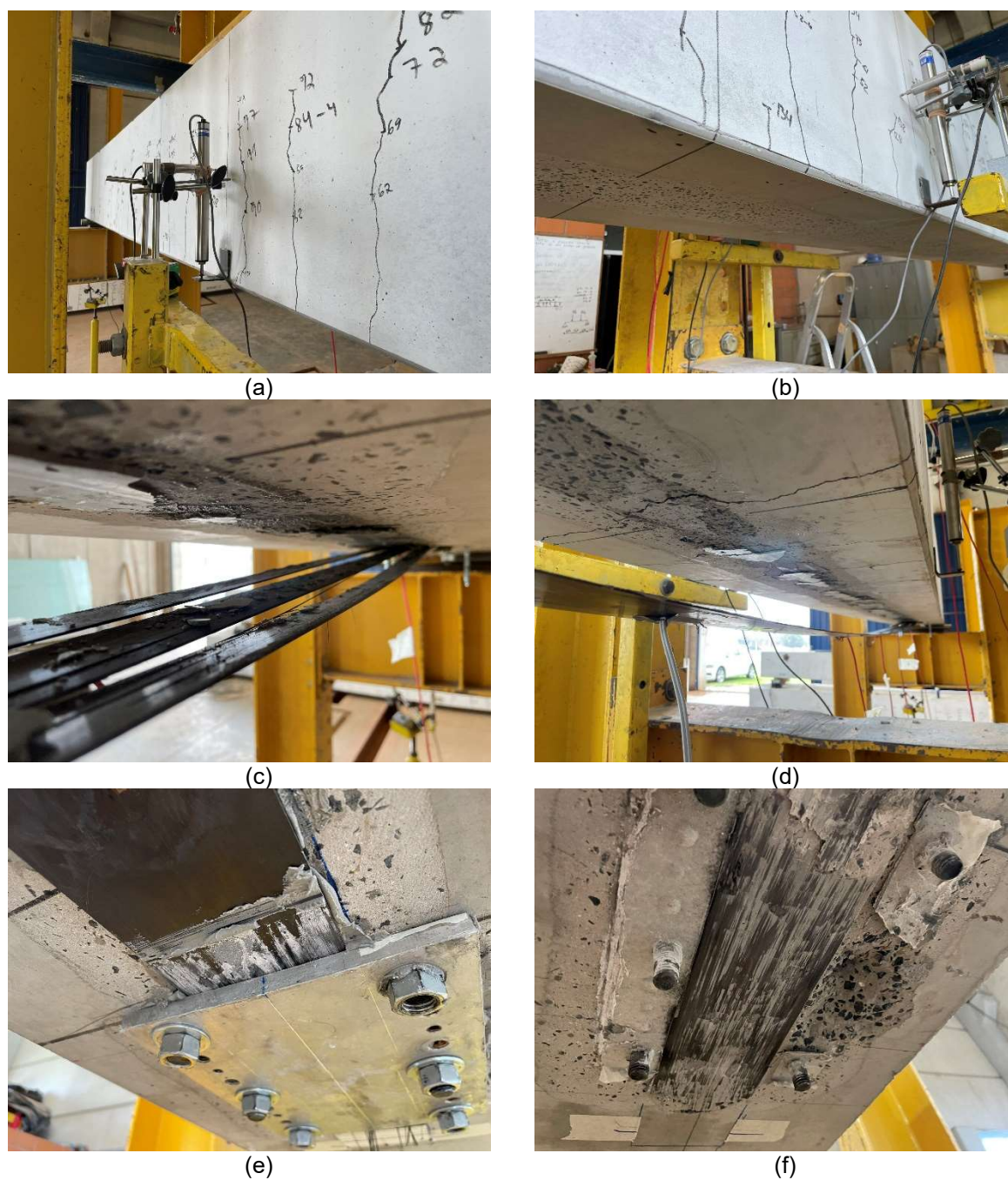


Fonte: Próprio autor

Analisando-se os modos de ruptura das vigas reforçadas, é possível verificar a capacidade do sistema de reforço com laminado de CFRP protendido, com a utilização de ancoragens metálicas, em alterar o modo de ruptura do sistema de reforço quando comparado ao passivo, postergando o colapso do material do reforço.

Ainda, observou-se que as vigas submetidas à pré-fissuração apresentaram os mesmos modos de ruptura das vigas sem pré-fissuração, independentemente do tipo de reforço aplicado. Assim, a pré-fissuração das vigas não influenciou o modo de ruptura das vigas reforçadas.

Figura 128 – Pré-fissuração e modo de ruptura da viga B5-PC-P



Fonte: Próprio autor

4.3.11 PADRÃO DE FISSURAÇÃO E ABERTURA DE FISSURAS

Na Figura 129 é apresentado o padrão de fissuração das vigas após a finalização de cada ensaio. Pela análise da Figura 129 verifica-se que todas as vigas apresentaram padrão fissuratório típico de elementos submetidos à flexão, inicialmente com o surgimento de primeiras fissuras verticais à meio vão, no ponto de máximo momento fletor, seguido da propagação das fissuras e leve inclinação para as regiões próximas aos apoios.

Figura 129 – Padrão fissuratório final das vigas ensaiadas



Fonte: Próprio autor

Em relação às vigas submetidas a pré-fissuração, após o início do ensaio de flexão até a ruptura, as fissuras existentes, provenientes da pré-fissuração, começaram a abrir, sendo que, após a viga atingir carregamento equivalente ao máximo atingido na pré-fissuração, novas fissuras passaram a surgir, seguindo o mesmo padrão de fissuração das demais vigas. Assim, a pré-fissuração não influenciou no padrão fissuratório final das vigas.

Durante o ensaio de flexão fez-se a aferição das aberturas das fissuras nas vigas com o auxílio de um microscópio digital de modo a comparar os valores obtidos com condições de estado limite de serviço impostas pela norma NBR 6118 (ABNT, 2023), sendo tomadas imagens nos deslocamentos equivalentes a $L/350$ e $L/250$ (Figuras 130 a 134).

Na Tabela 23 são resumidos os principais resultados quanto ao padrão fissuratório e abertura de fissuras, destacando a profundidade da linha neutra (x_{LN}), obtida visualmente após a finalização dos ensaios de flexão, o espaçamento médio entre as fissuras (S_{cr}) e a

abertura média das fissuras (w_{cr}) para os deslocamentos verticais equivalentes à $L/350$ e $L/250$, respectivamente.

Analisando-se as imagens da Figura 129 e os resultados apresentados na Tabela 20 observa-se a redução do espaçamento médio entre as fissuras das vigas com a aplicação dos sistemas de reforço quando comparadas com a viga de referência. Verifica-se que o reforço passivo reduziu o espaçamento entre as fissuras em até 6,68 %, enquanto o reforço com laminado protendido reduziu em até 16,34 %.

Com relação às aberturas de fissuras, os resultados apresentados na Tabela 23 e Figuras 130 a 134 indicam que, para um mesmo nível de carregamento e deslocamento, os sistemas de reforço conferem menores aberturas das fissuras, destacando-se o reforço protendido, o qual apresentou as menores aberturas registradas durante dos ensaios.

Figura 130 – Aberturas de fissuras da viga B1-0-0: $L/250$

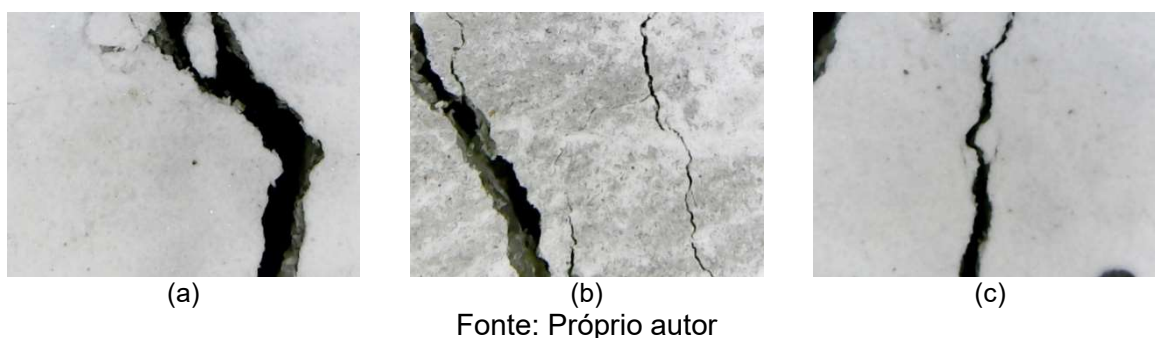


Figura 131 – Aberturas de fissuras da viga B2-NPC-NP: (a-c) $L/350$ e (d-f) $L/250$

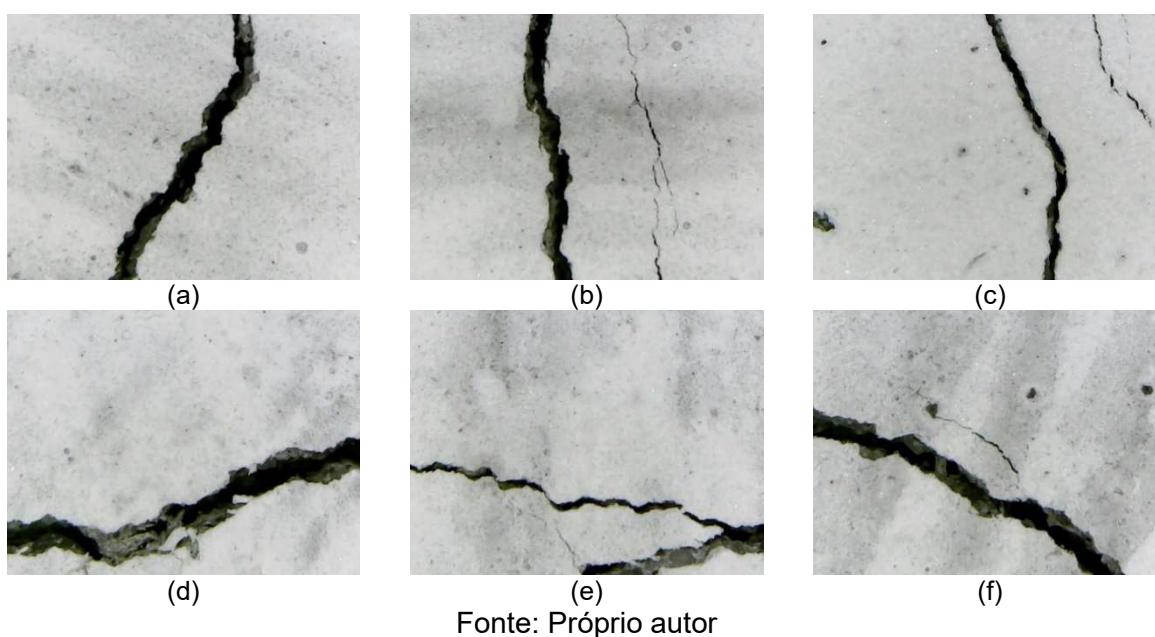
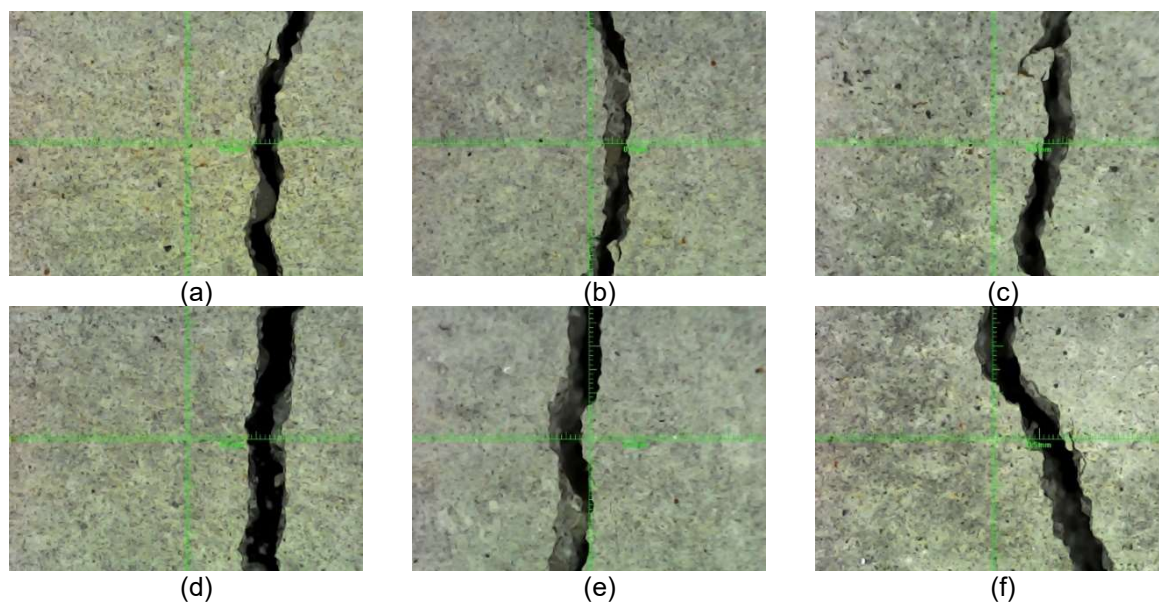
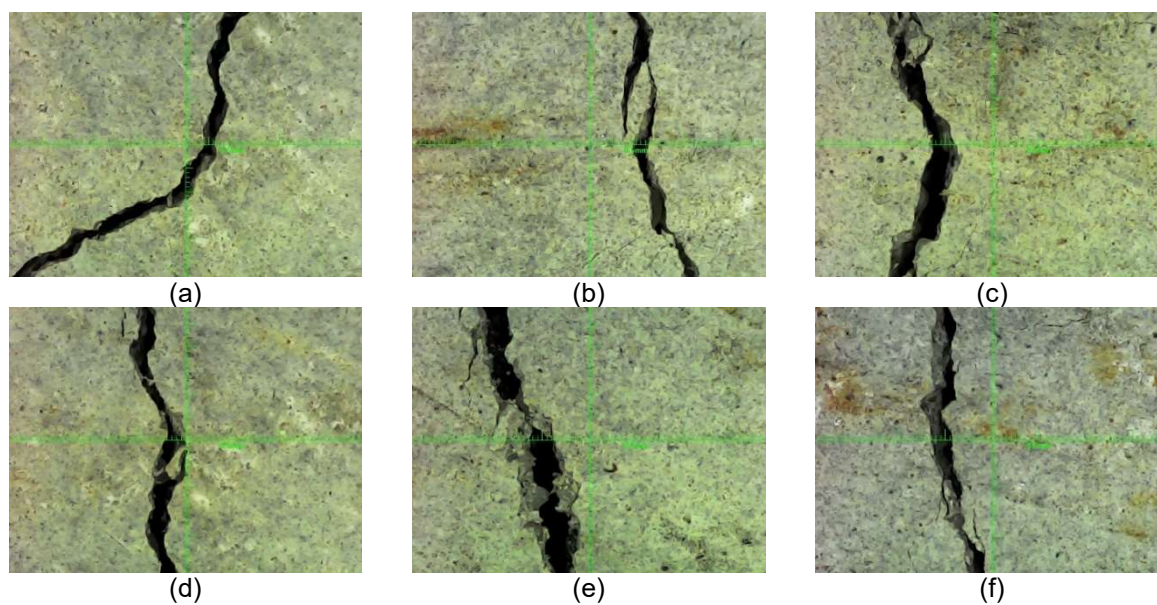


Figura 132 – Aberturas de fissuras da viga B3-PC-NP: (a-c) $L/350$ e (d-f) $L/250$



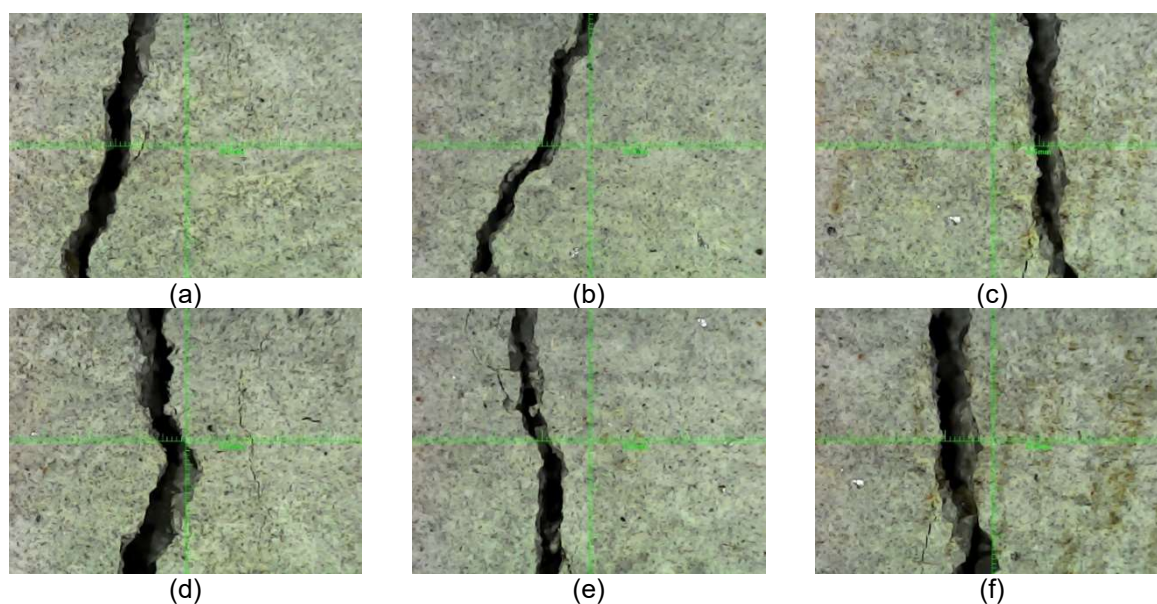
Fonte: Próprio autor

Figura 133 – Aberturas de fissuras da viga B4-NPC-P: (a-c) $L/350$ e (d-f) $L/250$



Fonte: Próprio autor

Figura 134 – Aberturas de fissuras da viga B5-PC-P: (a-c) $L/350$ e (d-f) $L/250$



Fonte: Próprio autor

Tabela 23 – Resumo dos principais resultados

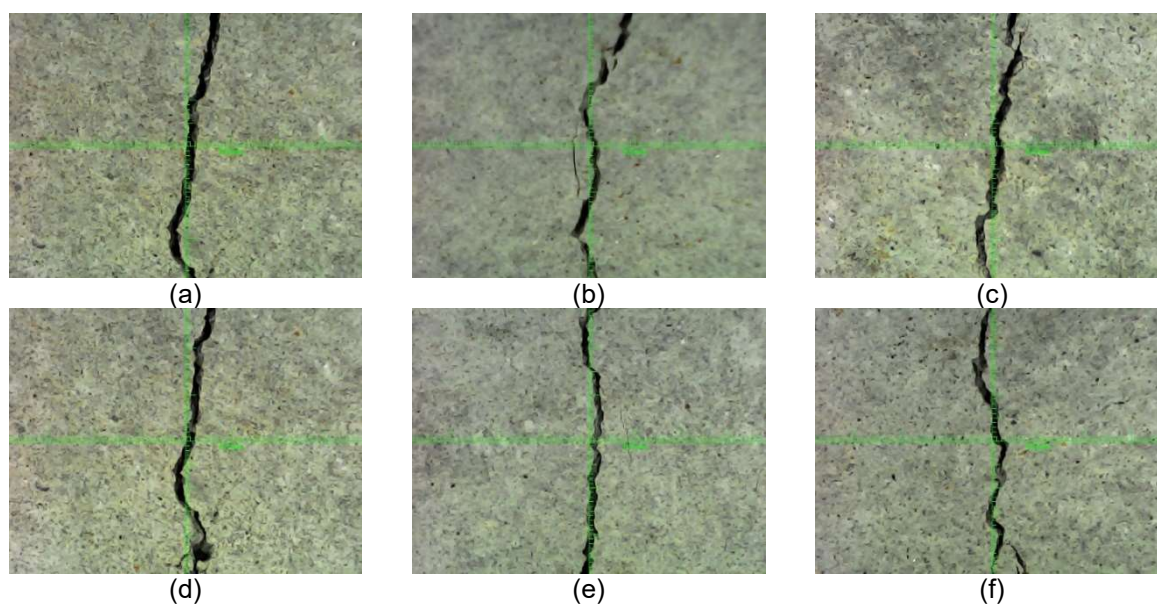
| Viga | x_{LN} (cm) | s_{cr} (cm) | w_{cr} $L/350$ (mm) | w_{cr} $L/250$ (mm) |
|-----------|------------------|------------------|--------------------------|--------------------------|
| B1-0-0 | 5,56 (5,83) | 14,50 (18,48) | --- | 0,40 (6,25) |
| B2-NPC-NP | 6,15 (14,61) | 13,90 (31,50) | 0,25 (8,77) | 0,32 (6,95) |
| B3-PC-NP | 8,2 (6,10) | 13,53 (25,80) | 0,27 (8,84) | 0,35 (11,66) |
| B4-NPC-P | 7,23 (2,76) | 12,13 (46,50) | 0,21 (10,87) | 0,27 (12,85) |
| B5-PC-P | 6,2 (12,10) | 13,79 (32,34) | 0,23 (10,10) | 0,33 (14,14) |

Nota: (valor) – Coeficiente de variação (%) = (Desvio Padrão / Média).100

Verifica-se, também, a diminuição da profundidade da linha neutra (LN) com a aplicação dos sistemas de reforço das vigas, condição que corrobora com os modelos de dimensionamento utilizados.

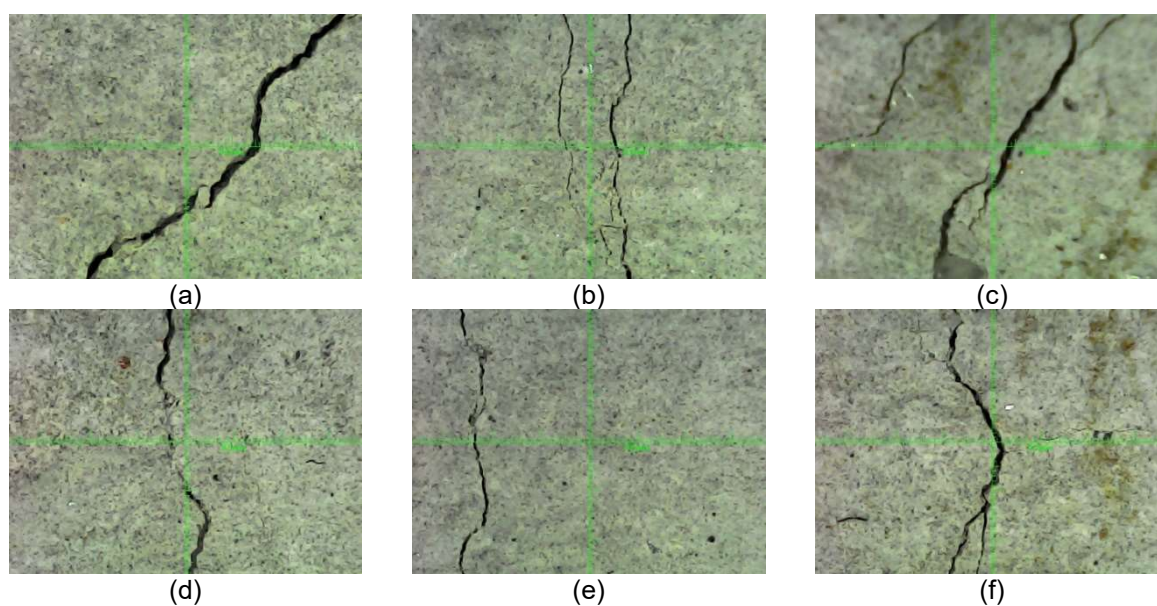
Adicionalmente, são apresentadas imagens das aberturas das fissuras nas vigas B3-PC-NP e B5-PC-P, respectivamente, comparando-se as aberturas após o ensaio de pré-fissuração e antes da aplicação dos sistemas de reforço com as aberturas após a aplicação do sistema de reforço (Figuras 135 e 136). Verifica-se a capacidade do sistema de reforço protendido em reduzir ou até mesmo fechar fissuras existentes (Figura 136), condição não observada no reforço passivo, sendo observadas as mesmas aberturas antes e após a aplicação do referido reforço (Figura 135).

Figura 135 – Aberturas de fissuras da viga B3-PC-NP: (a-c) antes da aplicação do reforço; e (d-f) após a aplicação do reforço passivo



Fonte: Próprio autor

Figura 136 – Aberturas de fissuras da viga B5-PC-P: (a-c) antes da aplicação do reforço; e (d-f) após a aplicação do reforço protendido



Fonte: Próprio autor

Conforme o apresentado na Figura 136, na viga com sistema de reforço com laminado protendido (B5-PC-P), para o nível de protensão considerado no presente estudo, as fissuras pré-existentes de 0,1 (32,7) mm, proveniente da pré-fissuração, foram reduzidas para 0,03 (41,4) mm após a aplicação do reforço protendido, evidenciando a capacidade do referido sistema em diminuir ou até mesmo fechar fissuras pré-existentes em elementos estruturais de concreto armado. Note-se que os resultados em parênteses indicam o coeficiente de variação (COV) obtidos nos ensaios.

Pela avaliação dos resultados verifica-se que as aberturas residuais nas vigas submetidas à pré-fissuração se apresentaram inferiores aos limites de 0,3 mm e 0,2 mm recomendados pelas normas ACI PRC-440.2 (2023) e *Fib Bulletin 90* (2019), respectivamente, condições impostas pelas referidas normas para a dispensa de procedimentos de recuperação de fissuras existentes.

4.4 PERDAS DE PROTENSÃO NO LAMINADO DE CFRP

De modo a verificar as perdas de protensão no sistema de reforço com laminado de CFRP protendido utilizado na presente pesquisa, as deformações no material de reforço foram monitoradas em diferentes estágios do processo de reforço e ensaio de flexão com o uso de extensômetros instalados. As deformações no laminado de CFRP no ato da protensão (maior deformação registrada), após a remoção do cilindro hidráulico (término do processo de protensão), e após 7 dias da aplicação do reforço (data de ensaio), são apresentadas na Tabela 24 e na Figura 137.

Na Tabela 24 também são indicadas as perdas de protensão isoladas, em cada extensômetro elétrico instalado no laminado de CFRP, assim como as perdas médias imediatas no ato da remoção do cilindro hidráulico e após 7 dias para as vigas com reforço protendido B4-NPC-NP e B5-PC-P.

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 24, verifica-se que as vigas B4-NPC-P e B5-PC-P apresentaram perdas médias da força de protensão inicialmente aplicada no ato da remoção do cilindro hidráulico de 3,94 % e 3,84 %, respectivamente, e perdas após 7 dias de 1,11 % e 1,77 %, respectivamente. Logo, para o sistema utilizado no presente experimento e o período de monitoramento realizado, foram observadas perdas médias totais de 5,04 % e 5,61% para as vigas B4-NPC-P e B5-PC-P, respectivamente.

As perdas de protensão acima indicadas encontram-se dentro do intervalo de perdas observadas em estudos experimentais disponíveis na literatura, os quais também avaliaram as perdas de protensão em sistemas de reforço à flexão com FRP protendido (SENA-CRUZ *et al.*, 2017; CORREIA, 2018; LI *et al.*, 2021; PESSI, 2022; WANG *et al.*, 2022).

Destaca-se que as perdas de protensão verificadas nas vigas com reforço protendido do presente estudo são aqui definidas como perdas imediatas (após a remoção do cilindro hidráulico) e perdas aos 7 dias (data de ensaio da viga), podendo estar relacionadas as deformações imediatas do concreto e acomodação do laminado de CFRP nas ancoragens, não sendo considerado no presente trabalho a análise das perdas progressivas, estas relacionadas a relaxação do FRP e retração e fluência do concreto, as quais requerem um monitoramento por um período mais adequado e específico.

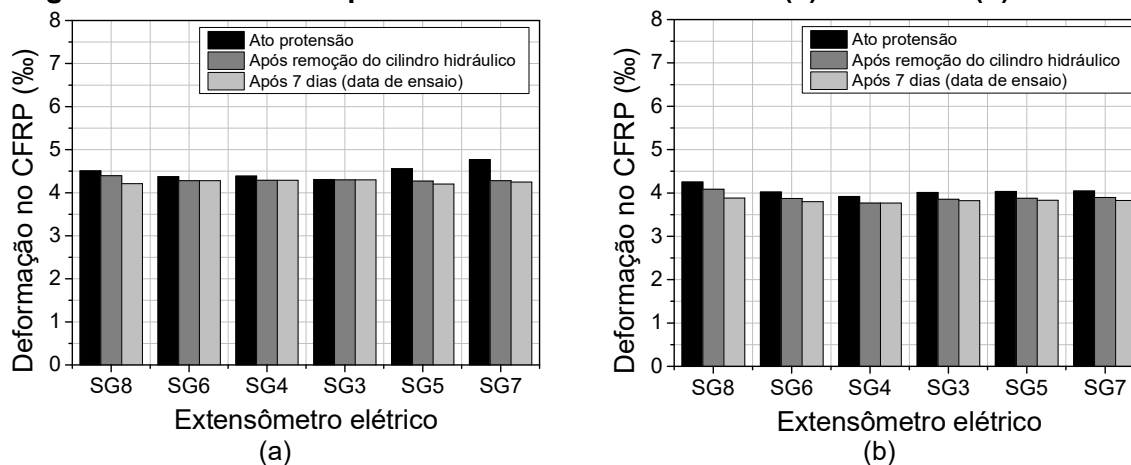
Tabela 24 – Perdas de protensão imediatas

| Viga | SG | Deformações no laminado de CFRP (%) | | | Perdas de protensão (%) | | | | |
|----------|----|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------|--------------------------------------|-----------------|-------------|------------------|--------------------------|
| | | Ato da protensão | Após remoção do cilindro hidráulico | Após 7 dias | Imediatas (Após remoção do cilindro) | Média | Após 7 dias | Média | Média total (aos 7 dias) |
| B4-NPC-P | 3 | 4,309 | 4,299 | 4,299 | 0,23 | 3,94 (85,57) | 0,00 | 1,11 (137,22) | 5,04 (75,64) |
| | 4 | 4,387 | 4,287 | 4,287 | 2,28 | | 0,00 | | |
| | 5 | 4,559 | 4,269 | 4,203 | 6,36 | | 1,55 | | |
| | 6 | 4,371 | 4,281 | 4,281 | 2,06 | | 0,00 | | |
| | 7 | 4,771 | 4,281 | 4,245 | 10,27 | | 0,84 | | |
| | 8 | 4,507 | 4,397 | 4,210 | 2,44 | | 4,25 | | |
| | 9 | m.d. | m.d. | m.d. | --- | | --- | | |
| B5-PC-P | 3 | 4,012 | 3,855 | 3,822 | 3,91 | 3,84 (3,13) | 0,86 | 1,77 (88,18) | 5,61 (27,74) |
| | 4 | 3,921 | 3,766 | 3,766 | 3,95 | | 0,00 | | |
| | 5 | 4,036 | 3,878 | 3,831 | 3,91 | | 1,21 | | |
| | 6 | 4,022 | 3,871 | 3,801 | 3,75 | | 1,81 | | |
| | 7 | 4,042 | 3,896 | 3,827 | 3,61 | | 1,77 | | |
| | 8 | 4,251 | 4,085 | 3,881 | 3,90 | | 4,99 | | |
| | 9 | m.d. | m.d. | m.d. | --- | | --- | | |

Notas: m.d. – extensômetro mecanicamente danificado; *como o extensômetro foi posicionado na parte inferior pode ter evidenciado empenamento da barra além de deformação uniaxial; (valor) – Coeficiente de variação (%) = (Desvio Padrão/Média).100

Fonte: Próprio autor

Figura 137 – Perdas de protensão imediatas e iniciais: (a) B4-NPC-P (b) B5-PC-P



Fonte: Próprio autor

Durante a etapa de protensão do laminado observou-se que as perdas imediatas ocorrem, principalmente, no momento do posicionamento dos parafusos de travamento (Figura 138a-b) e na remoção do cilindro hidráulico, condição que gera uma acomodação na ancoragem ativa após o alívio da pressão no cilindro, resultando em perdas na força de protensão inicialmente aplicada.

Figura 138 – Travamento dos dispositivos da ancoragem ativa para remoção do cilindro hidráulico



Fonte: Próprio autor

Note-se também, pela análise dos resultados apresentados na Tabela 24, que as perdas de protensão aos 7 dias são menores em relação as perdas observadas no ato da remoção do cilindro hidráulico, assim como, analisando-se a Figura 137, observa-se que os maiores níveis de perdas de protensão foram registrados nas regiões de extremidade do material de reforço para ambos os estágios.

4.5 ENSAIO DE *PULL-OFF*

De modo a atender os critérios e requisitos da norma ACI PRC-440.2 (2023), foram realizados ensaios de *pull-off* (arrancamento) com o objetivo de verificar a aderência do material de reforço ao substrato do elemento reforçado. Como já detalhado, o ensaio de *pull-off* foi realizado em conformidade com a norma ASTM D7522/D7522M (2021). Na Tabela 25 são apresentados os resultados obtidos no referido ensaio.

Conforme verifica-se nos resultados apresentados na Tabela 25, nos 5 pontos de ensaio de arrancamento realizados, tensões de aderência superiores aos limites mínimos impostos pelas normas ACI PRC-440.2 (2023) e *Fib Bulletin 90* (2019), de 1,4 MPa e 1,5 MPa, respectivamente, foram obtidas. Ainda, o modo de ruptura obtido nos três primeiros pontos indica bom desempenho do sistema de reforço, demonstrando como elo fraco do conjunto o substrato de concreto (Figuras 139a-b). Em relação ao modo de ruptura dos pontos 4 e 5, este indica má preparação da interface pastilha/FRP. Entretanto, em ambos os pontos avaliados, a tensão de aderência também atendeu ao critério normativo.

Tabela 25 – Resumo dos principais resultados do ensaio *pull-off*

| Ponto de ensaio | Idade do ensaio | Tensão de aderência (MPa) | Modo de ruptura |
|-----------------|-----------------|---------------------------|--|
| 1 | 7 dias | 2,90 | ruptura do substrato de concreto |
| 2 | | 2,96 | ruptura do substrato de concreto |
| 3 | | 1,78 | Ruptura mista (substrato de concreto e interface resina epóxi/substrato) |
| 4 | | 2,17 | ruptura entre a pastilha e adesivo epóxi |
| 5 | | 1,51 | ruptura entre a pastilha e adesivo epóxi |

Fonte: Próprio autor

Figura 139 – Modo de ruptura no ensaio *pull-off*

(a)

(b)

Fonte: Próprio autor

4.6 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E TEÓRICOS

Diferente do pré-dimensionamento onde foram consideradas propriedades mecânicas nominais dos materiais, no presente item os referidos modelos foram aplicados considerando-se os resultados experimentais obtidos nos ensaios de caracterização dos materiais, tais como a resistência à compressão do concreto (f_c), tensão escoamento do aço de tração (f_y) e sua respectiva deformação (ε_y), e tensão última do laminado de CFRP (f_f) e sua respectiva deformação (ε_f), e módulos de elasticidade dos referidos materiais (E_c , E_s e E_f). Os novos parâmetros utilizados são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 – Parâmetros utilizados para determinação da capacidade resistente das vigas

| f_c (MPa) | E_c (GPa) | f_y (MPa) | ε_y (‰) | E_s (GPa) | f_f (MPa) | E_f (GPa) | ε_f (‰) | A_s (cm ²) | A_f (mm ²) |
|-----------------|-----------------|------------------|------------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 46,49 (4,05) | 31,07 (5,51) | 535,32 (2,36) | 2,69 (3,58) | 196,30 (0,46) | 2316,60 (5,05) | 158,80 (2,38) | 14,61 (6,82) | 9,42 | 140,0 |

Nota: (valor) – Coeficiente de variação (%) = (Desvio Padrão / Média).100

Fonte: Próprio autor

Destaca-se que, nesta etapa, para a aplicação do modelo de dimensionamento proposto para o sistema de reforço com FRP protendido, a deformação do material de reforço foi limitada ao valor médio das deformações máximas observadas no laminado de CFRP durante os ensaios de flexão das vigas, sendo adotada a deformação total de 9,59 ‰ (4,27). Note-se que o resultado em parênteses indica o coeficiente de variação (COV) obtidos nos ensaios.

Na Tabela 27 é apresentada comparação entre os resultados teóricos estimados por meio da nova aplicação dos modelos de dimensionamento e os resultados experimentais das vigas ensaiadas. Na referida comparação é destacado o estágio da força última das vigas, não sendo consideradas reduções ou aplicações de fatores de segurança nas propriedades dos materiais para obtenção dos resultados teóricos.

Nota-se variações entre os novos resultados teóricos e as estimativas iniciais (pré-dimensionamento) realizada no item 4.1 deste trabalho, condição que se deve a alteração dos parâmetros de dimensionamento adotados, visto terem sido considerados nesta etapa resultados dos ensaios de caracterização dos materiais utilizados nas vigas.

Comparando-se os resultados teóricos e experimentais apresentados na Tabela 27 observa-se boa aproximação no que diz respeito a força máxima de ensaio, profundidade da linha neutra e modo de ruptura estimado para as vigas analisadas. Também observa boa aproximação dos resultados referente a deformação no laminado de CFRP nas vigas com reforço passivo, confirmando-se a boa eficiência dos modelos de dimensionamento previstos nas normas ACI PRC-440.2 (2023) e *Fib Bulletin 90* (2019) em estimar a deformação efetiva a ser considerada no dimensionamento da capacidade última do elemento reforçado.

Tabela 27 – Comparação entre os resultados teóricos e experimentais

| Vigas | Modelo | Resultados teóricos e experimentais | | | | | | | | | | | |
|---|------------------------|-------------------------------------|---------------|----------------------------|-------------|-------------------------------------|-------------|------------------------------------|--------------|-------------------------|-------------|-----------------|----------|
| | | Força máxima de ensaio (kN) | | Deformação no concreto (‰) | | Deformação na armadura inferior (‰) | | Deformação no laminado de CFRP (‰) | | Prof. Linha neutra (cm) | | Modo de ruptura | |
| | | teo | exp | teo | exp | teo | exp | teo | exp | teo | exp | teo | exp |
| B1-0-0 (Referência) | NBR 6118 | 191,68 | 200,2 | 0,90 | 2,14 | 10,00 | m.d. | --- | --- | 4,19 | 5,56 | EA (F) | EA (F) |
| | ACI318 | 192,05 | | 3,00 | | 28,00 | | --- | | 4,45 | | | |
| B2-NPC-NP / B3-PC-NP (FRP passivo) | ACI PRC-440.2 | 231,89 | 237,1 / 246,5 | 1,25 | 1,47 / 0,86 | 5,55 | 3,50 / m.d. | 5,96 | 5,17 / 6,48 | 8,35 | 6,15 / 8,20 | DR (F) | DR (F) |
| | <i>Fib Bulletin 90</i> | 223,16 | | 0,91 | | 4,159 | | 4,68 | | 8,16 | | | |
| B5-PC-P / B4-NPC-P (FRP protendido) | Modelo proposto | 276,95 | 283,7 / 272,0 | 1,25 | 1,45 / 1,35 | 8,94 | 3,54 / 3,45 | 9,59 ¹ | 10,00 / 9,18 | 5,54 | 7,23 / 6,20 | DRPF (F) | DRPF (F) |

Notas:

teo: resultado teórico. exp: resultado experimental; m.d. – extensômetro mecanicamente danificado; *como o extensômetro foi posicionado na parte inferior pode ter evidenciado empenamento da barra além de deformação uniaxial; EA (escoamento das armaduras); EAEC (escoamento do aço seguido do esmagamento do concreto); DR (destacamento do material de reforço); DREC (destacamento do material de reforço com seguido do esmagamento do concreto); RF (ruptura do material de reforço); DRPF (destacamento com ruptura parcial do material de reforço); (F) flexão; (C) cisalhamento; ¹ deformação última no laminado de CFRP protendido definido conforme deformação máxima média do material observada em ensaio.

Fonte: Próprio autor

Nota-se também que o modelo de dimensionamento proposto para o reforço com o laminado de FRP protendido apresentou melhor aproximação nesta nova aplicação dos modelos quando comparado ao pré-dimensionamento, face ao conhecimento da deformação máxima atingida no laminado de CFRP ($\varepsilon_{pd.tot}$), visto que na estimativa inicial (item 4.1) estimou-se uma deformação total no laminado de CFRP de 13,75 %. Entretanto, os resultados experimentais aqui obtidos indicaram menores deformações máximas no material de reforço, média de 9,59 %, condição que justifica a diferença entre os resultados teóricos e maior aproximação na nova estimativa.

Na Tabela 28 é apresentada comparação entre os momentos fletores últimos obtidos experimentalmente ($M_{u.exp}$) e os momentos fletores últimos estimados com e sem redução das propriedades dos materiais ($M_{u.teo.k}$ e $M_{u.teo.d}$). Verifica-se que para os modelos utilizados, os momentos fletores últimos estimados se mostraram conservadores mesmo sem a aplicação dos coeficientes de segurança, estes que quando aplicados, resultam em valores ainda mais conservadores conforme apresentado na referida Tabela.

Tabela 28 – Comparação entre os momentos fletores últimos e de cálculo

| Vigas | Modelo | $M_{u.exp}$ (kN·m) | $M_{u.teo.k}$ (kN·m) | $M_{u.teo.d}$ (kN·m) | $\frac{M_{u.exp}}{M_{u.teo.k}}$ | $\frac{M_{u.exp}}{M_{u.teo.d}}$ |
|--|---------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| B1-0-0 (Referência) | NBR 6118 | 229,9 | 220,4 | 190,1 | 1,04 | 1,21 |
| | ACI318 | | 220,8 | 198,8 | 1,04 | 1,16 |
| B2-NPC-NP / B3-PC-NP (FRP passivo) | ACI PRC- 440.2 | 278,1 ¹ | 266,7 | 240,0 | 1,04 | 1,16 |
| | <i>FIB Bulletin</i> 90 | | 256,6 | 239,8 | 1,08 | 1,16 |
| B5-PC-P / B4-NPC-P (FRP protendido) | Modelo proposto | 319,5 ¹ | 318,5 | 286,52 | 1,00 | 1,12 |

Notas: ¹ média dos resultados experimentais das vigas com o mesmo tipo de reforço

Fonte: Próprio autor

Destaca-se que para a determinação do momento fletor resistência cálculo ($M_{u.teo.d}$) apresentado na Tabela 28 considerou-se o uso dos coeficientes de redução recomendado por cada uma das normas consideradas, já indicados no item 2.8. Para o sistema de reforço passivo dimensionado conforme a norma ACI PRC-440.2 (2023) considerou-se o fator de redução (C_E) relacionado às condições de exposição do laminado de CFRP igual 0,95 (ambiente interno).

Com relação às deformações nos materiais da viga de referência (B1-0-0), seu dimensionamento foi realizado em domínio de deformação 2 segundo a NBR 6118 (ABNT, 2023), com escoamento das armaduras limitado a 10,0 ‰ e sem esmagamento do concreto. Durante o ensaio de flexão, observou-se deformação no concreto de 1,4 ‰ quando a armadura de tração atingiu o limite de deformação de 10,0 ‰, sendo a deformação no concreto superior a estimada no dimensionamento de 0,9 ‰.

Com a utilização do modelo de dimensionamento da ACI 318 (2019), a deformação no concreto foi fixada em 3,0 ‰ para a determinação da deformação na armadura de tração. Durante o ensaio de flexão, verificou-se que a deformação fixada no dimensionamento para o concreto não foi atingida, sendo verificada deformação máxima de 2,1 ‰ durante o ensaio. Em relação à deformação na armadura tracionada, não foi possível confirmar a sua deformação máxima, visto que o extensômetro foi mecanicamente danificado.

No que se refere às vigas com reforço passivo, pela aplicação do modelo de dimensionamento apresentado na ACI PRC-440.2 (2023), verificou-se que o destacamento do material de reforço governa o dimensionamento, sendo estimadas deformações máximas de no laminado de CFRP, concreto comprimido e armadura tracionada de 5,9 ‰, 1,3 ‰ e 5,6 ‰, respectivamente. Durante o ensaio de flexão, verificou-se uma deformação máxima média no laminado de CFRP de 5,8 ‰ para as vigas B2-NPC-NP e B3-PC-NP, com deformação média no concreto de 0,9 ‰ e deformação na armadura tracionada registrada na viga B3-PC-NP em 3,5 ‰.

Com relação à aplicação do modelo de dimensionamento previsto na *Fib Bulletin 90* (2019), verificou-se que o destacamento do material de reforço governa o dimensionamento, sendo estimadas deformações máximas no laminado de CFRP, concreto comprimido e armadura tracionada de 4,7 ‰, 0,9 ‰ e 4,2 ‰, respectivamente. Durante o ensaio de flexão, para a deformação máxima estimada para o laminado de CFRP verificou-se deformação média no concreto de 1,0 ‰ e deformação na armadura tracionada registrada na viga B3-PC-NP igual a 3,5 ‰.

Em relação ao modelo proposto para o sistema de reforço protendido, considerou-se que o dimensionamento seria realizado em domínio de deformação 2 (com escoamento das armaduras sem esmagamento do concreto) e, adotando-se a deformação máxima no laminado de CFRP de 9,6 ‰ (valor médio registrado no programa experimental), a deformação no concreto comprimido e na armadura tracionada foram estimadas em 1,3 ‰ e 9,0 ‰, respectivamente. Durante o ensaio de flexão, para a viga B5-PC-P, observou-se deformação média no concreto de 1,3 ‰ e na armadura tracionada de 3,5 ‰. Já para a viga B4-NPC-P observou-se deformação máxima no concreto de 1,4 ‰ e na armadura tracionada registrada em 3,5 ‰.

No que diz respeito ao modelo de dimensionamento do sistema de reforço com o FRP protendido, evidencia-se a necessidade de uma estimativa adequada da deformação total do laminado, seja por meio de realização de ensaios apropriados e inerentes ao elemento reforçado e sistema de reforço ou pela estimativa da deformação total por métodos conservadores.

De modo a propor um modelo de dimensionamento para o FRP protendido que resulte em valores mais conservadores, com base na experiência obtidas durante os ensaios de flexão das vigas reforçadas da presente pesquisa, propõe-se de forma simplista, para o sistema utilizado na presente pesquisa, que a deformação total no laminado de CFRP ($\varepsilon_{pd.tot}$) seja estimada por meio da Equação 64, onde $\varepsilon_{ato.prot}$ é a deformação imposta no laminado no ato da protensão e ε_{fe} é a deformação efetiva do sistema de reforço com a colagem passiva, determinado por meio das normas ACI PRC-440.2 (2023) e/ou *Fib Bulletin 90* (2019), conforme rotina de cálculos apresentadas nos itens 2.8.3 e 2.8.4 deste trabalho.

$$\varepsilon_{pd.tot} = \varepsilon_{ato.prot} + \varepsilon_{fe} \quad (64)$$

A Equação proposta se justifica pelo comportamento das vigas reforçadas com laminado de CFRP protendido observado durante os ensaios de flexão, uma vez que, mesmo com uma deformação imposta no material de reforço no ato da protensão, o destacamento do laminado do substrato ocorre sob carregamento similar ao do reforço passivo, indicando que após este estágio, as ancoragens mecânicas passam a ser a principal ligação entre o material de reforço e a viga reforçada.

Ainda, algumas limitações devem ser impostas para a aplicação da Equação acima proposta, sendo elas: (i) cálculo das deformações $\varepsilon_{pd.ult}$, $\varepsilon_{pd.enc}$, e $\varepsilon_{pd.inic}$, as quais estão detalhadas no item 2.8.5, de modo a determinar o domínio de deformação da seção reforçada; (ii) limitação da deformação do material de reforço devido aos carregamentos externos ($\varepsilon_{pd.ult}$) em 10 %, conforme recomendado para a protensão com cordoalhas metálicas; (iii) e limitação do nível de protensão do FRP em até 40 % de sua capacidade/deformação última, conforme recomendado na literatura, visto que maiores níveis e deformações tendem a antecipar o estágio de destacamento do laminado do substrato e colapso do sistema de reforço.

5. CONCLUSÕES

O objetivo geral do presente trabalho foi avaliar a influência do sistema de reforço passivo ou protendido no comportamento mecânico de vigas de concreto armado biapoiadas, em escala real, reforçadas à flexão com laminados de CFRP. Realizou-se um programa experimental com uma viga não reforçada (B1-0-0, a qual serviu de referência para comparação com as vigas reforçadas), duas vigas reforçadas à flexão com colagem externa de laminado de CFRP passivo (B2-NPC-NP e B3-PC-NP, esta última submetida à pré-fissuração) e duas vigas reforçadas à flexão colagem externa de laminado de CFRP protendido (B4-NPC-P e B5-PC-P, esta última submetida à pré-fissuração). Também se fez a comparação de modelos de dimensionamento com os resultados experimentais obtidos nesta pesquisa. Após a realização das análises teóricas e experimentais foi possível chegar as seguintes conclusões:

- Com relação ao estado da arte de sistemas de reforço à flexão com laminados de FRP, aplicados segundo a técnica EBR, em elementos de concreto armado, tanto de forma passiva como protendida, os resultados experimentais presentes na literatura confirmam a eficácia de ambos os sistemas em melhorar o comportamento mecânico do elemento reforçado e proporcionar incrementos de capacidade de carga à flexão. Entretanto, nota-se a necessidade em avançar no conhecimento sobre o tema, principalmente no que diz respeito ao sistema de reforço com laminados de FRP protendidos, visto que grande parte dos estudos analisados não se utilizam de elementos estruturais em escalas reais, observa-se diferentes sistemas e técnicas de ancoragem e protensão propostas na literatura ou comercialmente, assim como, poucos trabalhos avaliam as condições de pré-fissuração das vigas e monitoramento das perdas imediatas da força de protensão. Para além disso, verificou-se que tal tema é pouco pesquisado no Brasil, o que indica a necessidade de novos estudos e análises experimentais e numéricas;
- Com relação aos modelos de dimensionamento, observou-se boa proximidade entre os resultados teóricos obtidos com as aplicações dos modelos de dimensionamento vigentes e disponíveis nas normas NBR 6118 (ABNT, 2023) e ACI 318 (2019) e os resultados experimentais dos estudos analisados, observando-se resultados teóricos similares com o uso das referidas normas, com variação entre os resultados somente para os estudos com resistência à compressão do concreto superior a 40 MPa, condição em que a norma NBR 6118 (ABNT, 2023) passou a implementar recentemente o parâmetro η_c . Observou-se também boa aproximação

entre os resultados experimentais e teóricos obtidos quando se aplicam os modelos de dimensionamento das normas ACI PRC-440.2 (2023) e *Fib Bulletin 90* (2019). É possível observar também que, a depender das características do programa experimental, os resultados obtidos pelos modelos de dimensionamento das referidas normas variam, sendo em alguns casos um mais conservador em relação ao outro;

- Com relação aos tipos de reforço aplicados avaliados nesta pesquisa, o reforço passivo permitiu aumento da força no momento do escoamento da armadura de até 16,89% quando comparada à viga sem reforço. Além disso, um aumento de até 23,29% foi verificado na força máxima obtida e ensaio em comparação à viga de referência. O uso do reforço protendido promoveu aumento de até 79,59 %, 37,89 % e 41,89% nas forças no momento de fissuração do concreto, início de escoamento e colapso do sistema de reforço, respectivamente, quando comparado à viga B1-0-0. Assim, verificou-se a capacidade do sistema de reforço com FRP protendido em conferir melhor comportamento em serviço visto os maiores incrementos de força observados no surgimento da primeira fissura no concreto e no escoamento das armaduras, assim como maior rigidez à flexão, condições que se devem a força de protensão aplicado ao elemento reforçado. Também se observou a capacidade do referido sistema em conferir maior capacidade resistente ao elemento reforçado em função do sistema de ancoragem utilizado, retardando o destacamento do material de reforço;

- Com relação às deformações no laminado de CFRP, considerando-se que o laminado de CFRP apresentou deformação estimada na ruptura de aproximadamente 14,61 ‰, um aproveitamento de até 44,4 % e 68,4% foi obtido para o reforço passivo e protendido, respectivamente. Assim, é evidenciada a capacidade do sistema de reforço protendido em conferir maior nível de sollicitação e aproveitamento do material de reforço quando comparado ao reforço passivo, condição atrelada ao pré-alongamento imposto no laminado de CFRP no ato da protensão somada ao sistema de ancoragem adotado que conferem melhor fixação do material de reforço ao substrato em comparação ao reforço passivo, este que depende somente de sua colagem ao substrato;

- Quanto ao espaçamento médio entre fissuras, verificou-se que o reforço passivo reduziu o espaçamento entre as fissuras em até 6,68 %, enquanto o reforço com laminado protendido reduziu em até 16,34 % quando comparadas com a viga de referência. Com relação às aberturas de fissuras, os resultados indicaram que, para um mesmo nível de carregamento e deslocamento, os sistemas de reforço conferem menores aberturas das fissuras, destacando-se o reforço com protensão do laminado de CFRP, o qual apresentou as menores aberturas registradas durante os ensaios,

confirmando a capacidade da protensão do laminado de CFRP em combater as tensões de tração no elemento reforçado, retardando a fissuração do concreto e resultando em maior rigidez à flexão quando comparado com o sistema passivo;

- Com relação aos modos de ruína que governaram o comportamento das vigas biapoiadas de concreto armado avaliadas nesta pesquisa, a viga não reforçada (referência) apresentou ruína devido à deformação acentuada da armadura de tração, de forma dúctil, sem esmagamento do concreto, confirmando o domínio de deformação 2 estimado inicialmente com o modelo de dimensionamento apresentado na NBR 6118 (ABNT, 2023). Com relação as vigas com reforço passivo, estas apresentaram modo de ruptura caracterizado pelo destacamento frágil do laminado de CFRP, sem esmagamento do concreto, conforme previsto no dimensionamento realizado pelas normas ACI PRC-440.2 (2023) e *Fib Bulletin 90* (2019). Por fim, as vigas reforçadas com laminados protendidos apresentaram modo de ruptura caracterizado pelo destacamento e ruptura parcial do laminado de CFRP, sem esmagamento do concreto. Assim, verifica-se que a utilização de ancoragens metálicas altera o modo de ruptura do sistema de reforço quando comparado ao passivo, postergando o colapso do material do reforço e resultando em maiores níveis de solicitação do laminado de CFRP;

- Com relação aos efeitos produzidos pela pré-fissuração no comportamento de elementos de concreto armado reforçados, verificou-se que as vigas que não foram submetidas à pré-fissuração (NPC) apresentaram maior rigidez à flexão no estágio do concreto fissurado e armadura em regime elástico, condição que se deve aos danos pré-instalados nas vigas submetidas à pré-fissuração (PC). Observou-se, também, que as vigas submetidas à pré-fissuração apresentaram os mesmos modos de ruptura das vigas sem pré-fissuração, independentemente do tipo de reforço (passivo ou protendido) aplicado. Além disso, a pré-fissuração não teve influência no padrão fissuratório final das vigas. Entretanto, verificou-se a capacidade do sistema de reforço com laminado de CFRP protendido em reduzir deslocamentos pré-existentes em elementos estruturais. Para a viga B3-NPC-P observou-se um deslocamento negativo (de aproximadamente 1,0 mm), o qual é proveniente da contraflecha exercida na viga devido ao ato de protensão do reforço. Já na viga B5-PC-P, verificou-se redução do deslocamento residual médio de 6,18 mm, proveniente da pré-fissuração, para 2,93 mm, promovendo uma redução do deslocamento vertical em 52,6 %, assim como, redução das aberturas das fissuras existentes no elemento pré-fissurado. Em relação as vigas com reforço passivo, não se verificou diminuição do deslocamento vertical ou redução de abertura de fissuras no ato da aplicação do reforço;

- Com respeito as perdas de protensão no sistema de reforço com laminado de CFRP protendido, verificaram-se perdas médias nas vigas B4-NPC-NP e B5-PC-P de 5,05 % e 5,61 %, respectivamente. As perdas de protensão observadas encontram-se dentro do intervalo de perdas observadas em estudos experimentais disponíveis na literatura, os quais também avaliaram as perdas de protensão em sistemas de reforço à flexão com FRP protendido. Ainda, o monitoramento realizado permitiu verificar que, para o sistema de protensão utilizado na presente pesquisa, os maiores níveis de perdas ocorreram no ato da remoção do cilindro hidráulico da ancoragem ativa, indicando uma acomodação do laminado de CFRP e consequente perda de força de protensão; e
- Por fim, o modelo analítico simplificado para determinação da capacidade resistente de elementos de concreto armado reforçados à flexão com laminados de CFRP protendido aqui proposto se mostrou eficaz para a estimativa da capacidade resistente das vigas à flexão. Entretanto, é importante destacar a necessidade da correta definição da deformação a ser atribuída ao material de reforço para a determinação do momento resistente último da seção transversal.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A utilização de sistemas de reforço com o uso de laminados protendidos ainda é pouco conhecido no Brasil, existem muitas pesquisas nesta linha e ainda não existe norma que balize a utilização deste tipo de material no país. Desta forma, sugere-se a condução de pesquisas que abordem as seguintes questões para um maior conhecimento das potencialidades deste material:

- Exposição natural de elementos de concreto armado reforçados com laminados de CFRP, passivos e ativos, tendo em vista o melhor entendimento do sistema de reforço, dos materiais e elementos reforçados frente ao intemperismo;
- Aplicação de protocolo de condicionamento tendo em vista o melhor entendimento do sistema de reforço, dos materiais e elementos reforçados frente a degradação acelerada;
- Desenvolvimento de um sistema de protensão mais leve e de fácil aplicação, uma vez que sistema utilizado na presente pesquisa dispõe de dispositivos pesados, possui várias etapas para sua aplicação, aumento os custos e do tempo de execução quando comparado com a técnica de reforço passivo;
- Avaliação de perdas imediatas e de longa duração de elementos de concreto armado reforçados com laminados de CFRP protendidos, quando submetidos a carregamento constante;

- Avaliação numérica e estudo paramétrico de elementos de concreto armado reforçados com laminados de CFRP, passivos e ativos, de modo a avaliar o efeito no comportamento mecânico do sistema de reforço face ao tipo do FRP utilizado, tipo de ancoragem, níveis de protensão, rigidez, taxa de armadura, geometria do elemento reforçado e nível de dano pré-instalado. Tal avaliação se mostra importante para validações e/ou sugestões de alterações nos sistemas de reforço já conhecidos, ou até mesmo, para viabilizar o desenvolvimento de novos sistemas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, A. C. LOPES. Comportamento de lajes de betão armado pré-fendilhadas e reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos pré-tensionados. Braga, 2015, 110p. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade do Minho.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI PRC 440.2 - Design and Construction of Externally Bonded Fiber - Reinforced Polymer (FRP) Systems for Strengthening Concrete Structures - Guide. Detroit, USA, 2023.

_____. ACI COMMITTEE 318. Building Code and Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete. Detroit, USA, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D7522/D7522M - Pull-Off Strength for FRP Laminate Systems Bonded to Concrete or Masonry Substrates¹. West Conshohocken, Pensilvânia, USA, 2021.

_____. ASTM A193-B7 - Standard Specification for Alloy-Steel and Stainless Steel Bolting for High Temperature or High Pressure Service and Other Special Purpose Applications. West Conshohocken, Pensilvânia, USA, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

_____. NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

_____. NBR 15823-2: Concreto autoadensável Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2017.

_____. NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. NBR ISO 6892-1: Materiais metálicos — Ensaio de Tração Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2018.

_____. NBR 8522-1: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro, 2021.

_____. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2023.

AZEVEDO, J. R. R. Reforço à flexão de lajes de betão armado com laminados de CFRP pré-esforçados. Braga, 2015, 140p. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade do Minho.

BARRIS, C.; CORREIA, L.; SENA-CRUZ, J. Experimental study on the bond behaviour of a transversely compressed mechanical anchorage system for externally bonded reinforcement. Composite Structures, v. 200, n. April, p. 217–228, 2018.

BASTOS, P. S. D. S. Fundamentos do Concreto Protendido. Apostila - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Bauru. 2021.

BUCHAIM, R. Concreto Protendido: tração axial, flexão simples e força cortante. Londrina: EDUEL, 2007.

CÁNOVAS, M. F. Patologia e terapia do concreto armado. São Paulo: Pini, 1988.

CHOLFE, L.; BONILHA, L. Concreto Protendido - teoria e prática. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.

CLEVER SOLUTIONS. Manta de Fibra de carbono. Disponível em: <https://www.sp-reinforcement.com.br/mantas>. Acessado em: 03 de jun. 2023.

CLEVER SOLUTIONS. Laminados S&P CFK Protendidos - Roteiro de Instalação. São Paulo, 2021.

CLEVER SOLUTIONS. Catálogo S&P Laminados CFK. São Paulo: 2022a.

CLEVER SOLUTIONS. Catálogo S&P RESIN 220 PL ADESIVOS São Paulo, 2022b.

CORREIA, L. et al. Flexural behaviour of RC slabs strengthened with prestressed CFRP strips using different anchorage systems. Composites Part B: Engineering, v. 81, p. 158–170, 2015.

CORREIA, L. Durability and long-term behaviour of RC slabs strengthened in flexure with prestressed CFRP laminate strips. Braga, 2018, 266p. Doctoral Thesis in Civil Engineering. Universidade do Minho, 2018.

COSTA, I. G. Prestressed Carbon Fibre laminates applied according to Near Surface Mounted technique to increase the flexural resistance of Reinforced Concrete beams. Braga, 2014, 323p. Doctoral Thesis in Civil Engineering. Universidade do Minho.

CT 303 - IBRACON/ABECE. REFORÇO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE CONCRETO COM SISTEMAS DE POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS (FRP) APLICADO EXTERNAMENTE. São Paulo: IBRACON, 2023.

DALFRÉ, G. M. Flexural and shear strengthening of RC elements. Braga, 2013, p. 432. Doctoral Thesis in Civil Engineering. Universidade do Minho.

DALFRÉ, G. M. Polímeros reforçados com Fibras na construção civil: dimensionamento de sistemas de reforço e armaduras não metálicas à flexão e ao cisalhamento segundo normas ACI. São Carlos: EdUFSCar, 2022.

DALFRÉ, G. M.; ALVES, A.; OLIVEIRA, A. C. F. DE. Dimensionamento de sistema de reforço à flexão com materiais compósitos segundo a técnica EBR. CONCRETO & Construções, v. 94, p. 66–75, 2019.

DALFRÉ, G. M.; PARSEKIAN, G. A.; FERREIRA, D. C. Dimensionamento de sistema de reforço à flexão com materiais compósitos segundo a técnica EBR : Parte B. CONCRETO & Construções, v. 95, p. 34–41, 2019.

DENG, J. et al. RC beams strengthened by prestressed CFRP plate subjected to sustained loading and continuous wetting condition: Flexural behaviour. Construction and Building Materials, v. 311, n. October, p. 125290, 2021.

DUSHIMIMANA, A. et al. Analytical Prediction Of Flexural Behaviour Of Rc Slabs Strengthened With Non-Prestressed And Prestressed CFRP Strips. p. 1–11. 11th International Conference on FRP Composites in Civil Engineerin. Rio de Janeiro, 2023.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. Bulletin 14: Externally bonded FRP reinforcement for strengthening RC structures. Genève, Switzerland, 2001.

_____. FIB Bulletin 90: Externally applied FRP reinforcement for concrete structures. Genève, Switzerland, 2019.

FERREIRA, D. DA C. Avaliação da degradação de vigas reforçadas com FRP quando expostas ao intemperismo. São Carlos, 2019, 138p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos.

FRANÇA, R. L. E S.; ISHITANI, H.; GRAZIANO, F. Concreto Protendido - Conceitos Fundamentais. Apostila - Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

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. Porto Alegre, 2007, 267p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

HANAI, J. B. Fundamentos de Concreto Protendido. E-book de apoio para o Curso de Engenharia civil. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

HELENE, P. et al. Manual de Reparo, Proteção e Reforço de Estruturas de Concreto. São Paulo: Pini, 1992.

HONG, S.; PARK, S. K. Concrete beams strengthened with prestressed unbonded carbon-Fiber-reinforced polymer plates: An experimental study. *Polymer Composites*, v. 38, n. 11, p. 2459–2471, 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 527-1. Plastics - Determination of tensile properties - Part 1: General principles. Genève, Switzerland, 2012.

_____. ISO 527-5 - Plastics - Determination of tensile properties Part 5: Test conditions for unidirectional Fibre-reinforced plastic composites. Genève, Switzerland, 2021.

KANG, K.; ZHANG, P.; LIU, F. T. Experiment research of flexural behavior of reinforced RC beams strengthened with the external prestressed CFRP plates. *Applied Mechanics and Materials*, v. 466–467, p. 225–228, 2012.

LI, X. et al. 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, p. 122187, 2021.

LIU, C. et al. Experimental study on the flexural behavior of RC beams strengthened with prestressed BFRP laminates. *Engineering Structures*, v. 233, n. January, p. 111801, 2021.

LIU, Y.; PENG, H.; CAI, C. S. A probabilistic model for the flexural capacity of reinforced

concrete structures strengthened with prestressed CFRP plates. *Advances in Structural Engineering*, v. 18, n. 5, p. 629–642, 2015.

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

MICHELS, J.; BARROS, J. A. O.; SENA-CRUZ, J. Prestressed FRP systems Chapter 7 Prestressed FRP Systems. Book: *Design Procedures for the Use of Composites in Strengthening of Reinforced Concrete Structures - State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 234-DUC- Chapter: 7* - Publisher: Springer, 2015.

PELED, A.; MOBASHER, B.; BENTUR, A. *Textile reinforced concrete*. London: CRC Press, 2017.

PENG, H. et al. Experimental study of flexural fatigue performance of reinforced concrete beams strengthened with prestressed CFRP plates. *Engineering Structures*, v. 127, p. 62–72, 2016.

PESSI, S. L. *Análise teórica-experimental de vigas de de polímeros reforçados com Fibras de carbono (PRFC) com e sem protensão*. Porto Alegre, 2022, 152p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2022.

PINHEIRO, L. H. B. *Reforço de pontes em concreto armado por protensão externa*. Campinas, 2018, 186p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas.

PINHEIRO, L. M. et al. *Fundamentos do Concreto e Projeto de Edifícios*. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

RÜSCH, H. *Concreto armado e protendido: propriedades dos materiais e dimensionamento*. Rio de Janeiro: Rio de Janeiro: Campus, 1980.

SARTI JUNIOR, L. A. *Durabilidade de vigas de concreto armado reforçadas com mantas de CFRP submetidas a degradação acelerada*. São Carlos, 2020, 170p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos.

SENA-CRUZ, J. et al. Short and long-term behaviour of RC slabs strengthened with prestressed CFRP laminate strips. *IABSE Conference, Vancouver 2017: Engineering the Future - Report*, p. 2475–2482, 2017.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. *Patologia, recuperação e reforço de estruturas*. Pini ed. São Paulo: Pini, 1998.

SOLIDUS ENGENHARIA. *O que é Reforço Estrutural? Descubra tudo agora*. Disponível em: <https://solidus.cc/o-que-e-reforco-estrutural/>. Acessado em: 03 de jun. 2023.

SU, M. NI; WANG, Z.; UEDA, T. Optimization and design of carbon fabric-reinforced cementitious matrix composites. *Structural Concrete*, 2022.

TENG, J. G. et al. Behaviour and strength of FRP-strengthened RC structures: A state-of-the-art review. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, v. 156, n. 1, p. 51–62, 2003.

VERÍSSIMO, G. DE S.; CÉSAR JÚNIOR, K. M. L. *Concreto Protendido - Fundamentos*

Básicos. Apostila de apoio a disciplina CIV 457 do Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.

VITÓRIO, J. A. P.; BARROS, R. C. Reforço e Alargamento de Pontes Rodoviárias com a Utilização de Protensão Externa. International Congress of Pathology and Reinforcement of Structures, n. 85, p. 14, 2011.

WANG, H.-T. et al. Experimental Study on the Flexural Behavior of Large-Scale Reinforced Concrete Beams Strengthened with Prestressed CFRP Plates. Journal of Composites for Construction, v. 26, n. 6, p. 1–11, 2022.

WANG, W.-W. et al. Prestress Losses and Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Posttensioned CFRP Sheets. Journal of Composites for Construction, v. 16, n. 2, p. 207–216, 1 abr. 2012.

WOO, S. K.; KIM, J. H. J.; BYUN, K. J. Development of strength prediction method of RC beams strengthened with prestressed CFRP plates by cross-section analysis. KSCE Journal of Civil Engineering, v. 16, n. 6, p. 1011–1022, 2012.

ZHANG, J.; DENG, L.; LIAO, L. Calculation methods for flexural capacity of normal section of concrete beams strengthened with prestressed CFRP plates. Advanced Materials Research, v. 671–674, p. 632–635, 2013.

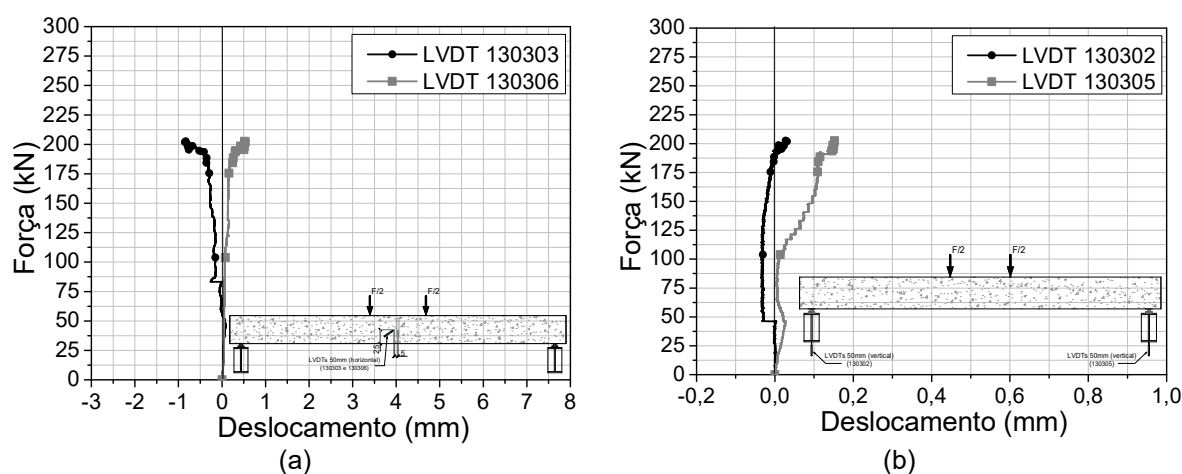
7. APÊNDICE

7.1 DESLOCAMENTO LATERAL DAS VIGAS E DESLOCAMENTO VERTICAL DOS PERFIS METÁLICOS DE APOIO

A seguir são apresentados os diagramas Força *versus* deslocamento dos LVDT's instalados na horizontal e à meio vão da viga para monitoramento de deslocamentos horizontais das vigas durante o ensaio de flexão, e dos LVDT's instalados para monitoramento do deslocamento vertical dos perfis metálicos de apoio.

7.1.1 VIGA B1-0-0

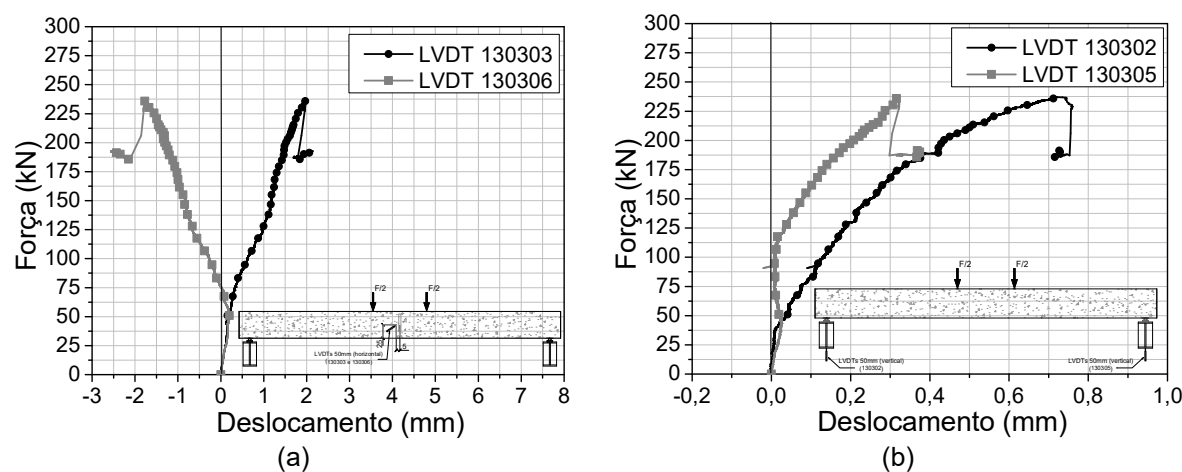
Figura 140 – Diagramas força *versus* deslocamento: (a) deslocamento horizontal e (b) deslocamento vertical dos apoios - B1-0-0



Fonte: Próprio autor

7.1.2 VIGA B2-NPC-NP

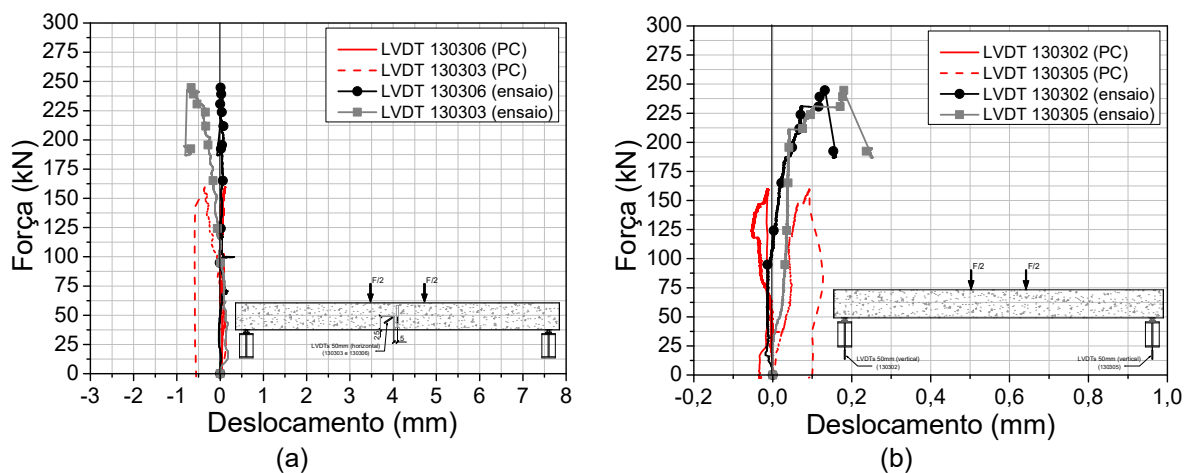
Figura 141 – Diagramas força *versus* deslocamento: (a) deslocamento horizontal e (b) deslocamento vertical dos apoios - B2-NPC-NP



Fonte: Próprio autor

7.1.3 VIGA B3-PC-NP

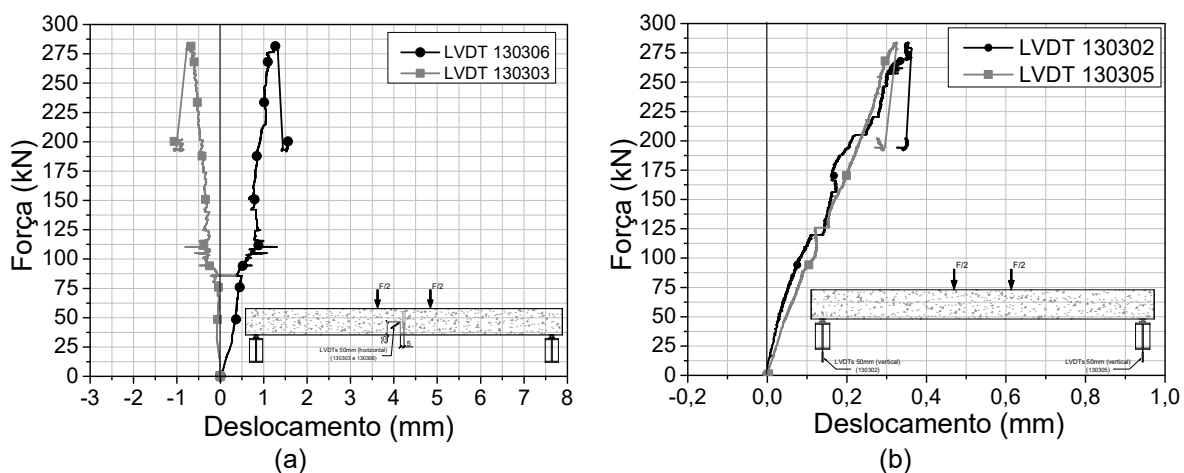
Figura 142 – Diagramas força versus deslocamento: (a) deslocamento horizontal e (b) deslocamento vertical dos apoios - B3-PC-NP



Fonte: Próprio autor

7.1.4 VIGA B4-NPC-P

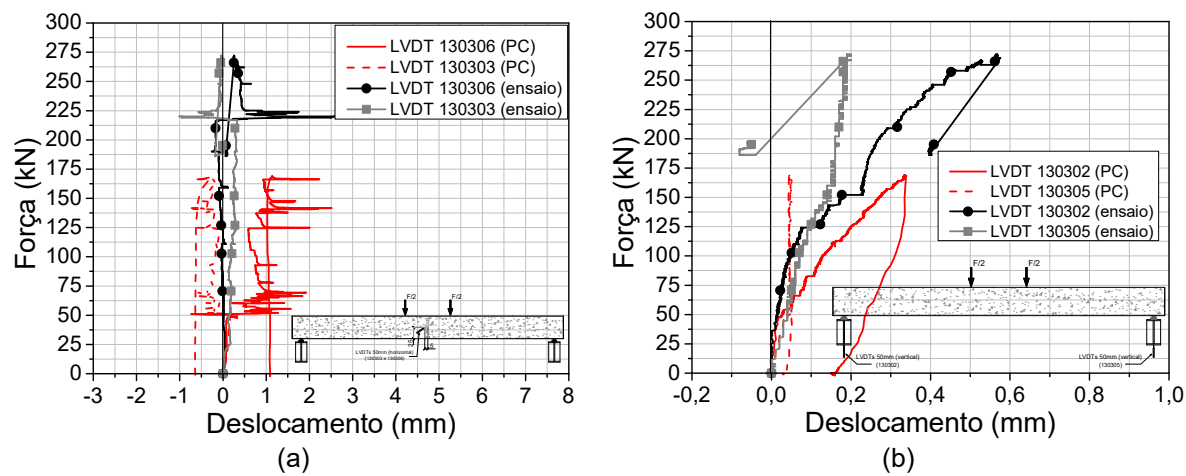
Figura 143 – Diagramas força versus deslocamento: (a) deslocamento horizontal e (b) deslocamento vertical dos apoios - B4-NPC-P



Fonte: Próprio autor

7.1.5 VIGA B5-PC-P

Figura 144 – Diagramas força versus deslocamento: (a) deslocamento horizontal e (b) deslocamento vertical dos apoios - B5-PC-NP



Fonte: Próprio autor