



VIGAS DE CONCRETO ARMADO EM ESCALA REAL REFORÇADAS À FLEXÃO COM LAMINADOS DE CFRP PASSIVOS E PROTENDIDOS

Full-scale reinforced concrete beams flexurally strengthened with passive and prestressed CFRP laminates

Marcelo Fernandes Perera (1); Gláucia Maria Dalfré (2); Marcelo de Araújo Ferreira (2); Bruna Catóia (3); José Roberto de Oliveira (3); Ricardo Luiz Canato (3)

(1) *Doutorando, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGECiv), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)*

(2) *Professor Doutor, Departamento de Engenharia de Civil (DECiv), UFSCar*

(3) *DECiv, UFSCar*

mfpereiraengenharia@gmail.com

Resumo

Para o reforço de estruturas de concreto armado, atualmente, destaca-se o uso de FRP (*Fiber Reinforced Polymers*) face sua rápida e prática aplicação e boas propriedades mecânicas. Apesar do bom desempenho estrutural de sistemas de reforço com colagem passiva com o uso de mantas, tecidos ou laminados de CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymers*) segundo à técnica EBR (*Externally Bonded Reinforcement*), os modos de ruptura são comumente caracterizados pelo destacamento do material de reforço em condições de baixo aproveitamento do material de reforço. Com o objetivo de melhorar tais condições, na última década, diferentes estudos passaram a analisar o comportamento de sistemas de reforço com laminados de CFRP protendidos, obtendo elementos com melhores condições de serviço e capacidades últimas superiores. Neste sentido, o presente trabalho teve como objetivo analisar, por meio de um programa experimental, o comportamento de vigas de concreto armado, em escala real, reforçadas à flexão com laminados de CFRP protendidos e passivos. Os resultados dos ensaios realizados indicaram que o laminado de CFRP protendido se mostra mais eficiente em condições de serviço quando comparado com o reforço passivo, postergando o surgimento de fissuras no concreto e resultando em maior rigidez à flexão. Com relação à capacidade última das vigas, o reforço com laminado de CFRP protendido também se mostrou mais eficaz que o reforço passivo, resultando em incremento da força última de 41% quando comparado à viga de referência não reforçada, enquanto o reforço passivo atingiu incremento de apenas 20%. Ainda, observou-se que o uso do laminado de CFRP protendido atinge maiores deformações do material de reforço, mobilizando mais o FRP, levando a redução de deslocamentos verticais e da abertura de fissuras em elementos de concreto armado.

Palavra-Chave: Laminado; CFRP protendido; CFRP passivo; reforço estrutural; concreto armado; escala real

Abstract

The strengthening of reinforced concrete structures with Fiber Reinforced Polymers (FRP) is growing due to its practical procedure with good mechanical properties. Despite the good structural performance of strengthening systems using sheets, textiles or laminates of Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP) passively bonded according to the Externally Bonded Reinforcement (EBR) technique, failure modes are commonly characterized by detachment of the strengthening materials in conditions of low utilization. Aiming for the optimal utilization of the strengthening materials, in the last decade, different studies analyzed the behavior of strengthening systems with prestressed CFRP laminates, obtaining elements with improved behavior under service limits and higher ultimate loads. In this context, the present work aimed to analyze the behavior of reinforced concrete beams strengthened with prestressed and passive CFRP laminates, carrying out an experimental program with bending tests of full-scale precast concrete beams. The experimental results indicated that the prestressed CFRP laminate is more efficient under in-service conditions when compared with passive strengthening, postponing the appearance of cracks in the concrete and resulting in a much higher stiffness. Regarding the ultimate capacity of the beams, strengthening with prestressed CFRP laminate also proved to be more effective than passive, increasing the ultimate strength by 41% when compared to the reference beam, while passive strengthening achieved an increase of just 20%. Furthermore, it has been observed that the use of prestressed CFRP laminate achieves higher deformation levels of the strengthening material, better mobilizing the FRP, leading to a reduction in vertical displacements and of the crack openings of reinforced concrete elements.

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



1 Introdução

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; WANG *et al.*, 2022; DALFRÉ, 2022).

Com relação às técnicas de reforço, pode-se destacar métodos como aumento de seção transversal (encamisamento), reforço com materiais compósitos, perfis metálicos, colagem de chapas metálicas, incorporação de novos elementos estruturais e protensão externa (HELENE *et al.*, 2003; DALFRÉ, 2022). Dos métodos citados, atualmente, destaca-se o uso de FRP (*Fiber Reinforced Polymers*, da língua inglesa) face a sua rápida e prática aplicação, boas propriedades mecânicas, baixo peso próprio e elevadas resistências à corrosão e fadiga. Tal método tem seus critérios e requisitos de dimensionamento, execução e manutenção preconizados pelas normas ACI 440.2R (2017) e *FIB Bulletin 90* (2019).

Entre as técnicas de reforço com FRP tem-se como a principal e mais utilizada a EBR (*Externally Bonded Reinforcement*, da língua inglesa), na qual o material de reforço é colado, de forma passiva, à superfície devidamente tratada do elemento reforçado, conforme exemplos práticos da Figura 1, podendo o FRP ser aplicado em formato de manta ou tecido (Figura 1a) ou laminado (Figura 1b) (*FIB BULLETIN 90*, 2019).



(a)



(b)

Figura 1 – Aplicações práticas de reforço com CFRP passivo segundo a técnica EBR (*FIB BULLETIN 90*, 2019)

A eficácia e desempenho estrutural da aplicação de laminados e/ou mantas de FRP em sistemas de reforço passivos à flexão de vigas e/ou lajes de concreto armado segundo a técnica EBR é comprovada por diferentes programas experimentais (CORREIA *et al.*, 2015; GAO, GU, MOSALLAM, 2016; HONG, PARK, 2017; FERREIRA, 2019; SARTI JUNIOR, 2020; LIU *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2022). Em tais estudos, incrementos de até 50% na capacidade última dos elementos reforçados foram obtidos quando comparados aos elementos de referência (não reforçados).

Apesar do bom desempenho estrutural dos sistemas de reforço com colagem passiva de FRP, 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, condição de pouco aproveitamento da potencialidade do material de reforço, visto que a transferência de esforços entre o substrato de concreto do elemento reforçado e o FRP se dá por mecanismos de aderência entre os referidos



materiais (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). Adicionalmente, em níveis de deformações, deslocamentos e fissuração relacionados a estados limites de serviço (ELS), a eficácia do reforço passivo não é significativo face ao baixo aumento de rigidez que o sistema proporciona ao elemento estrutural (WANG *et al.*, 2012; ALVES, 2015).

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, Figura 2 (GARCEZ, 2007; 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).

De acordo com os referidos estudos, a protensão do FRP resulta em maiores capacidades resistentes (em serviço e em condições últimas) dos elementos reforçados e maiores níveis de solicitação do material de reforço quando comparados com a técnica de colagem passiva. Tal condição se dá devido ao uso de ancoragens nas extremidades do material de reforço, tal como o apresentado na Figura 2a.

Ainda, face ao estado prévio de deformações impostos pela ato de protensão (Figura 2b), o FRP protendido tem a capacidade de melhorar o comportamento em serviço do elemento reforçado devido ao fechamento de fissuras e redução dos deslocamentos verticais pré-existentis (ZHANG; DENG; LIAO, 2013; CORREIA *et al.*, 2015; MICHELS *et al.*, 2015; SENA-CRUZ *et al.*, 2017; BARRIS, CORREIA, SENA-CRUZ, 2018).

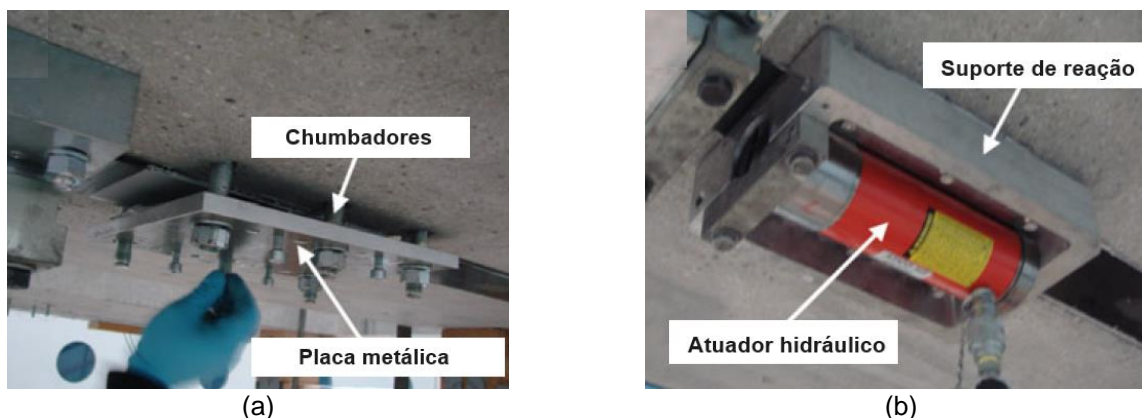


Figura 2 – Aplicações práticas de reforço com FRP protendido segundo a técnica EBR (adaptado de MICHELS *et al.*, 2015)

Neste sentido, no presente trabalho foi estudado e analisado, por meio de programa experimental, o comportamento de vigas de concreto armado, em escala real, reforçadas à flexão com laminados de CFRP passivos e protendidos. Tal pesquisa se justifica devido ao pouco conhecimento do uso de tal técnica de reforço no Brasil, adicionado a falta de programas experimentais relacionados ao tema no País, principalmente no que diz respeito a elementos em escala real.

2 Programa experimental

2.1 Características das vigas de concreto armado em escala real



O presente estudo tem como objetivo analisar o comportamento estrutural de vigas de concreto armado em escala real reforçadas à flexão com laminados de CFRP passivos e protendidos. Para tanto, realizou-se programa experimental com seis vigas de concreto armado submetidas à ensaio de flexão por quatro pontos até o colapso do sistema de reforço. Note-se que neste trabalho serão apresentados os resultados de três vigas analisadas, das quais cita-se (i) a viga não reforçada (B1-REF, a qual serviu de referência para comparação com as vigas reforçadas), (ii) a viga reforçada à flexão com colagem externa passiva de laminado de CFRP segundo a técnica EBR (B2-EBR-NP), e (iii) a viga reforçada à flexão com colagem externa e ancoragem de laminado de CFRP protendido (B3-EBR-P).

Nas Figuras 3a-d são apresentados os detalhamentos das vigas de concreto armado, as quais possuem seção retangular com 40 cm de largura, 50 cm de altura, 600 cm de comprimento e para a qual utilizou-se concreto com resistência à compressão de 40 MPa. As vigas possuem armadura longitudinal inferior compostas 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 a cada 15 cm, sendo todas as armaduras indicadas comercialmente como aço CA-50. O cobrimento adotado para as armaduras foi de 3 cm. 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.

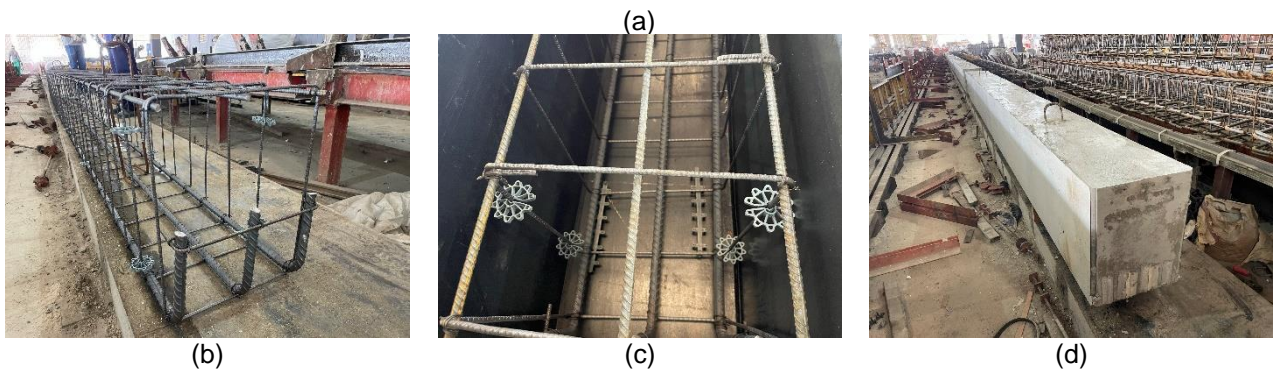
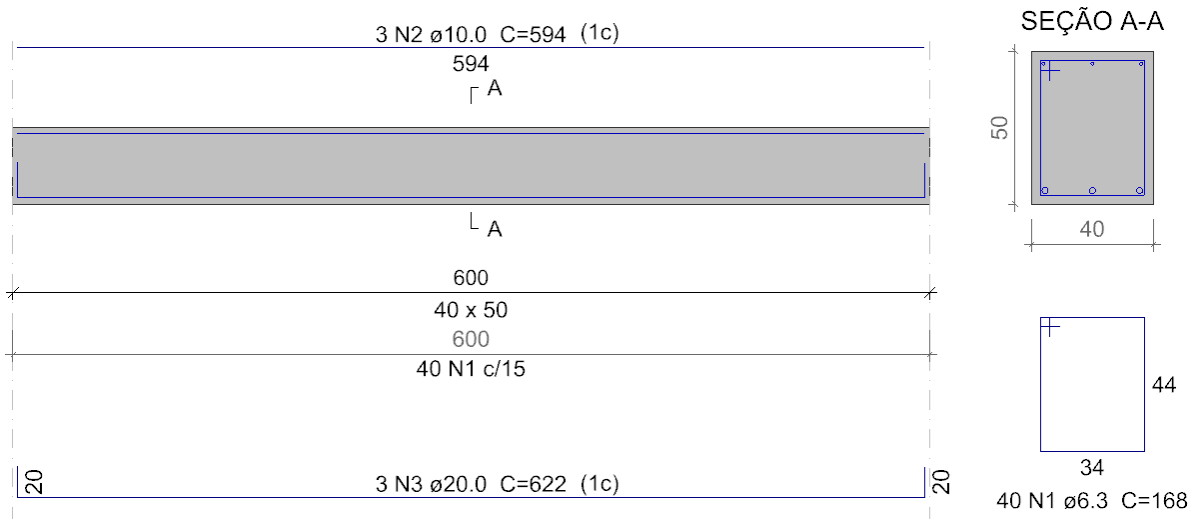


Figura 3 – Detalhamento das vigas de concreto armado do programa experimental - medidas em cm (Autores)

2.2 Aplicação dos sistemas de reforço com laminados de CFRP



O sistema de reforço utilizado no programa experimental é composto por laminados de CFRP e resinas epoxídicas.

O laminado de CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) adotado nos sistemas de reforço das vigas do presente estudo é do tipo pré-fabricado, produzido por meio de processo de pultrusão, composto por resina epóxi e fibras de carbono unidirecionais, fornecido na cor preta. O laminado utilizado possui largura de 100 mm, espessura de 1,4 mm, resistência à tração de 2800 MPa, módulo de elasticidade de 170 GPa e deformação na ruptura de 16 ‰ (CLEVER SOLUTIONS, 2022a).

O adesivo utilizado na colagem dos sistemas de reforço é a base de resinas epoxídicas, com consistência pastosa, tixotrópico, bi-componente, isento de solventes, de alta viscosidade e pega normal, tal como informado por seu fabricante. Este possui tempo de trabalho de 90 minutos, cura inicial de 24 horas, resistência à compressão de 57 MPa e tensão de aderência de 4 MPa após 7 dias (CLEVER SOLUTIONS, 2022b).

2.2.1 Reforço com laminado de CFRP passivo segundo à técnica EBR

Para o reforço à flexão passivo das vigas de concreto armado utilizou-se a técnica EBR, a qual consiste na colagem do laminado CFRP ao substrato tracionado da viga. Os procedimentos adotados para a aplicação do referido reforço tiveram como base as normas ACI 440.2R (2017) e *Fib Bulletin 90* (2019), de estudos disponíveis na literatura nacional tais como Dalfré (2022) e a PRÁTICA RECOMENDADA DO CT-303 (IBRACON/ABECE, 2023), além das recomendações do fabricante do laminado de CFRP e da resina epoxídica.

As principais etapas de aplicação do reforço passivo são:

- (i) Preparação do substrato do elemento a ser reforçado. Com o uso de esmerilhadeira com disco de desbaste adiamantado acoplado (Figura 4a), a superfície do substrato é preparada e, com o uso de jato de ar comprimido (Figura 4b), a área desbastada é limpa. Na sequência, verifica-se a umidade superficial do substrato para comparação com limites normativos (Figura 4c); e
- (ii) Após o preparo do substrato, o laminado CFRP deve ser devidamente limpo com o uso de álcool etílico 99,8% (Figura 4d), faz-se a mistura da resina epoxídica seguindo-se as recomendações do fabricante (Figura 4e) e, por fim, o laminado deve ser colado na face tracionada do elemento estrutural (Figura 4f). Para o reforço passivo, adotou-se um laminado com comprimento total de 440 cm, centralizado na face inferior da viga.

2.2.2 Reforço com laminado de CFRP protendido segundo à técnica EBR

Para a aplicação do sistema de reforço com laminado de CFRP protendido utilizou-se um sistema comercialmente disponível e foram adotadas as etapas de aplicação sugeridas por Correia (2018), combinadas com as recomendações do fabricante (CLEVER SOLUTIONS, 2021). Tendo em vista que o referido sistema de reforço também envolve a colagem externa de FRP segundo a técnica EBR, as recomendações das normas ACI 440.2R (2017) e *Fib Bulletin 90* (2019) também foram seguidas.

Na Figura 5 são apresentadas as principais etapas de aplicação do reforço protendido, dentre as quais destacam-se:

- (i) Preparação do substrato do elemento a ser reforçado, instalação dos chumbadores mecânicos (Figuras 5a-b) e posterior ancoragem passiva de uma extremidade do laminado de CFRP (Figura 5c); e

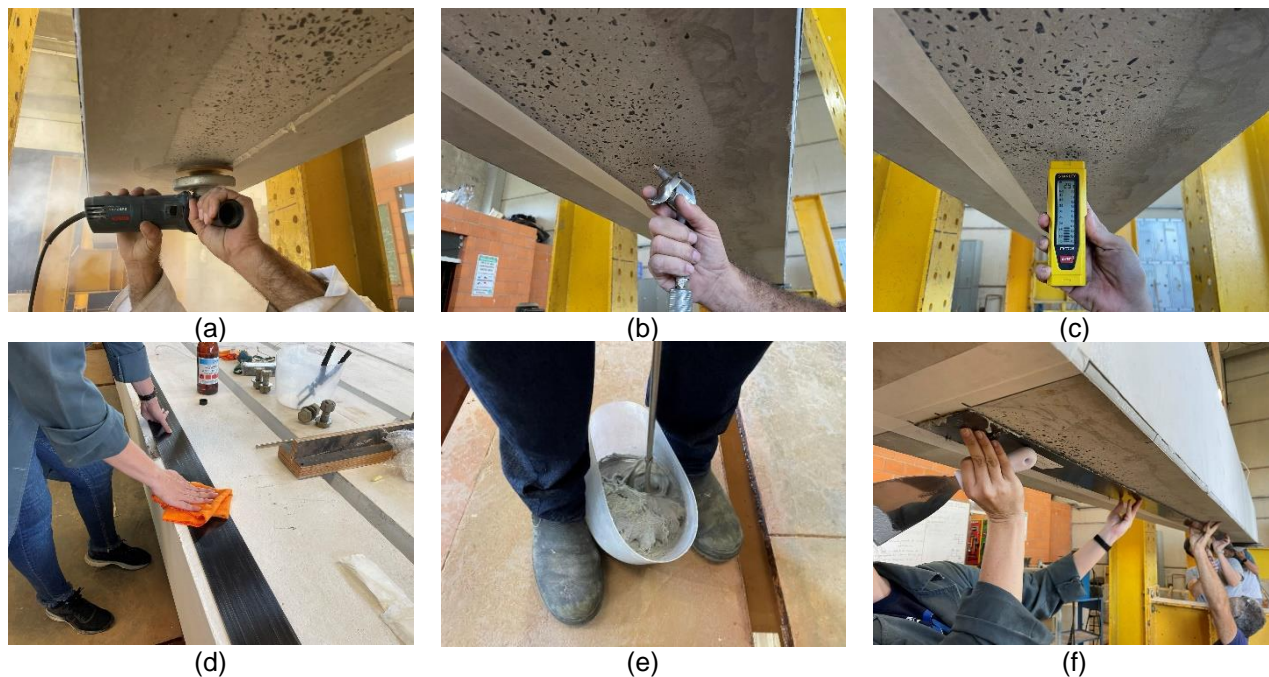


Figura 4 – Aplicação do sistema de reforço com laminado de CFRP passivo segundo a técnica EBR (Autores)

(ii) Após a cura da resina epóxi utilizada na colagem da ancoragem passiva (geralmente 24h – confirmar a previsão de cura com o fabricante), o laminado CFRP deve ser colado ao substrato de concreto (Figura 5d). Ainda com a resina em seu estado fresco (tempo em aberto), os dispositivos móveis e fixos do sistema de protensão devem ser instalados na extremidade da ancoragem ativa do laminado de CFRP, fazendo com que o sistema fique apto à aplicação da força de protensão. (Figura 5e). A Figura 5f apresenta o aspecto final do sistema de reforço com o laminado de CFRP protendido, o qual também possui comprimento total de 440 cm, centralizado na face inferior da viga, incluindo o comprimento das ancoragens mecânicas em suas extremidades.

Nesta pesquisa, no ato da protensão, aplicou-se um nível de deformação no laminado de CFRP de aproximadamente 4,3‰, o qual foi monitorado durante o procedimento de reforço com o uso de extensômetros elétricos instalados no material de reforço.

2.3 Configurações do ensaio de flexão e instrumentação 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 e deformações no concreto, na armadura longitudinal e no material de reforço frente a aplicação de carregamento (Figura 6). 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.

A instrumentação das vigas consistiu na utilização de dois transdutores de deslocamento (LVDTs, Figura 6a), uma célula de carga e extensômetros elétricos (SGs) responsáveis por registrar os deslocamentos verticais e deformações no concreto, na armadura



longitudinal e no laminado de CFRP, os quais estavam conectados a um aquisitor de dados da marca Lynx.

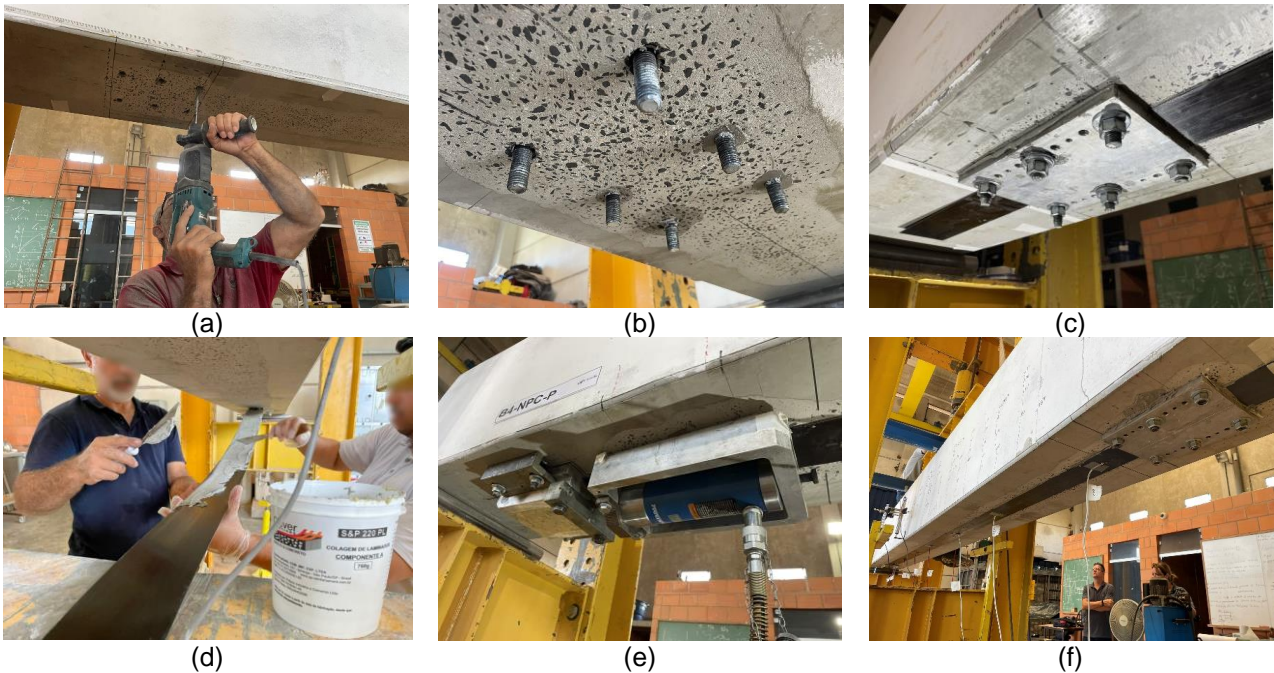


Figura 5 – Aplicação do sistema de reforço com laminado de CFRP protendido (Autores)

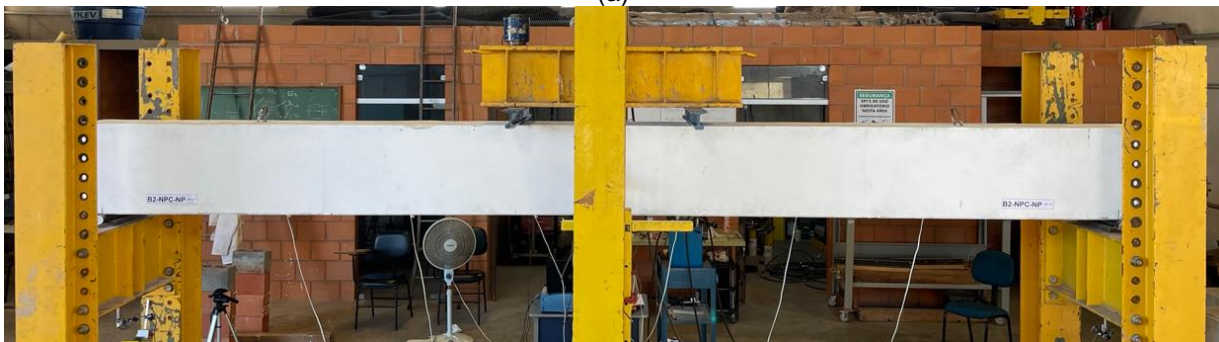
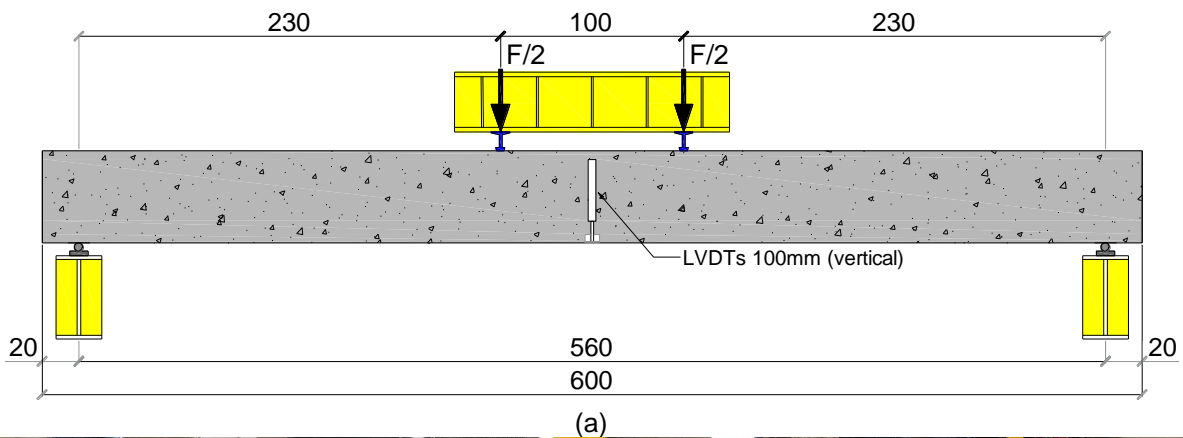


Figura 6 – Configuração do ensaio de flexão das vigas – dimensões em cm (Autores)

A célula de carga (CC 080804) utilizada possui capacidade de 1000 kN, com precisão de 0,246 kN. 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 meio vão, distantes 230 cm dos apoios, e fixados a suportes externos ao pórtico de reação do ensaio.

Um extensômetro elétrico com resistência de 120Ω e comprimento da grade de leitura de 75 mm foi colado na superfície comprimida da viga (SG1, Figura 7a), enquanto um extensômetro elétrico com resistência de 120Ω e comprimento da grade de leitura de 75 mm foi aplicado no centro de uma das barras que compõem a armadura longitudinal positiva para medida das deformações no aço (SG2, Figura 7b). No que diz respeito as deformações no laminado de CFRP, sete extensômetros elétricos (SG3 a SG9) com resistência de 120Ω e comprimento da grade de leitura de 10 mm foram colados ao longo do comprimento do laminado de CFRP, tal como apresentado na Figura 7c.

Por fim, também se fez a aferição da abertura de fissuras das faixas de laje 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.

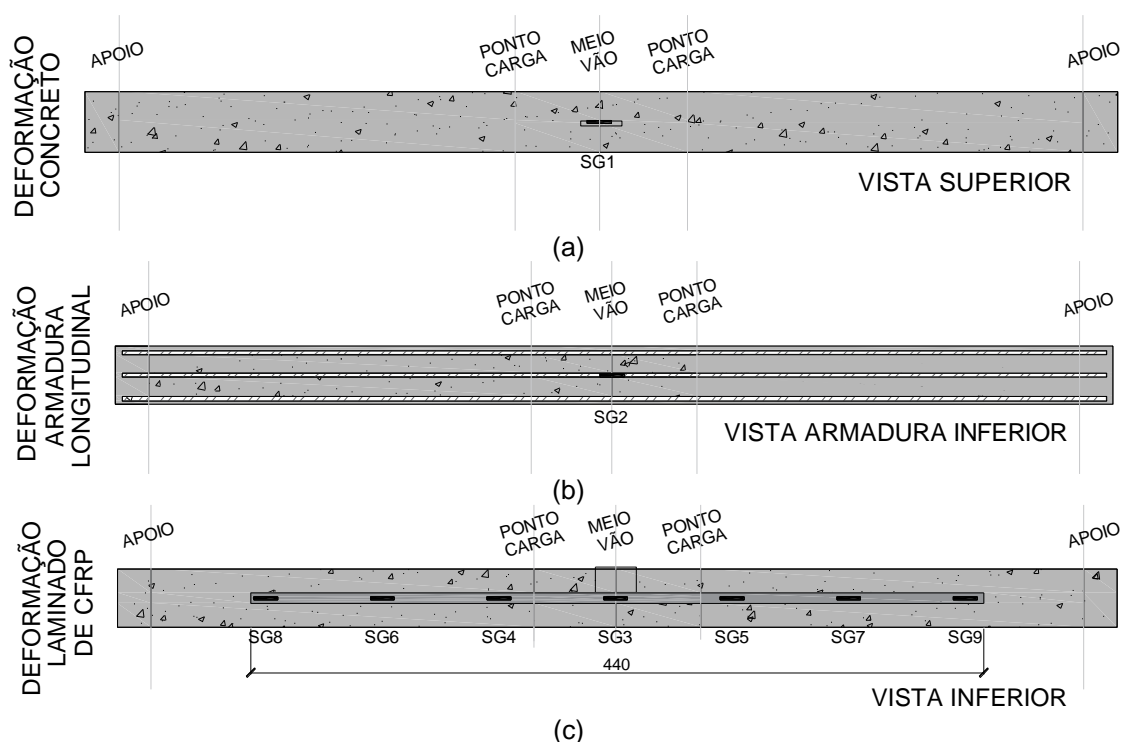


Figura 7 – Instrumentação dos materiais das vigas - medidas em cm (Autores)

2.4 Caracterização dos materiais

A caracterização do concreto foi realizada no Laboratório de Sistemas Estruturais (LSE) e incluiu a análise da resistência a compressão axial e do módulo de elasticidade. Os procedimentos de moldagem e cura foram realizados conforme prescrito pela NBR 5738 (ABNT, 2016), sendo moldados corpos de prova cilíndricos com 200 mm de altura e 100 mm de diâmetro. Nesta pesquisa foram moldados três corpos de prova para a determinação da resistência à compressão e dois para a determinação do módulo de elasticidade aos 28 dias e à data do ensaio das lajes, os quais foram seguindo os procedimentos da NBR 5739 (ABNT, 2018) e NBR 8522-1 (ABNT, 2021).

Com relação à caracterização das propriedades mecânicas do laminado de CFRP, foram realizados ensaios de tração em corpos-de-prova foi realizada no Laboratório de Sistemas



Estruturais (LSE) a uma velocidade de aplicação de carga de 2 mm/min, segundo a recomendação da norma ISO 527-5 (2021).

3 Resultados e discussões

3.1 Materiais utilizados no programa experimental

Os ensaios de caracterização do concreto utilizado neste programa experimental foram experimentalmente realizados à data de 28 dias após a concretagem e, também, no início e após à conclusão dos ensaios das vigas (112 e 158 dias após a concretagem, respectivamente).

Os resultados indicam valores médios de resistência à compressão de 44,53 MPa ($\pm 0,79\%$) e módulo de elasticidade médio de 32,41 GPa (4,53%) aos 28 dias. Ao início e na conclusão dos ensaios, valores médios de resistência à compressão de 48,34 MPa (+ 0,50%) e 46,49 MPa (4,05%) e módulos de elasticidade de 32,50 GPa ($\pm 2,02\%$) e 31,07 GPa ($\pm 5,51\%$), respectivamente, foram obtidos.

As propriedades mecânicas do laminado de CFRP foram experimentalmente obtidas e valores médios de tensão de tração de 2215,73 MPa (0,78%) e módulo de elasticidade de 154,72 GPa (0,10%) foram obtidos. Note-se que os resultados em parênteses indicam o coeficiente de variação (COV) obtidos nos ensaios.

3.2 Comportamento à flexão das vigas

Na Figura 8 são apresentados os diagramas Força *versus* deslocamentos verticais das vigas do presente estudo experimental, sendo possível comparar o comportamento à flexão da viga de referência e das externamente reforçadas com laminados de CFRP passivo e protendido. A Figura 9 apresenta as deformações nos materiais (concreto, aço e laminado de CFRP) ao longo do carregamento. Na Tabela 1 é apresentado um resumo dos principais resultados referentes à Força aplicada (F), deslocamentos verticais médios δ e deformações no concreto, aço e CFRP (ϵ_c , ϵ_s e ϵ_f), respectivamente, no momento de abertura da primeira fissura (cr), escoamento da armadura (y) e força máxima (u). Destaca-se que para todos as vigas o ensaio de flexão foi encerrado sob um deslocamento vertical de aproximadamente 53 mm.

Tabela 1 – Resumo dos resultados dos ensaios de flexão das vigas

Viga	Primeira fissura					Escoamento das armaduras					Força máxima				
	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 ‰
B1-REF	42,58	1,53	-0,14	0,14	---	183,61	25,57	-1,27	3,71	---	200,20	37,50	-1,97	m.d.	---
B2-EBR-NP	44,88	1,79	-0,14	0,31	0,13	224,57	29,50	-1,26	3,55	3,95	237,10	36,12 ²	-1,47	3,50	5,17
B3-EBR-P	82,92	1,95	-0,07	0,27	4,64	270,35	30,23	-1,12	6,75	8,47	283,74	37,88 ²	-1,45	m.d.	10,00

Notas: m.d. – extensômetro mecanicamente danificado; *como o extensômetro foi posicionado na parte inferior pode ter evidenciado empenamento da barra além de deformação uniaxial.

Analisando-se as curvas Força *versus* deslocamento a meio vão (Figura 8) da viga de referência (B1-REF) é possível perceber que esta apresenta os 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.

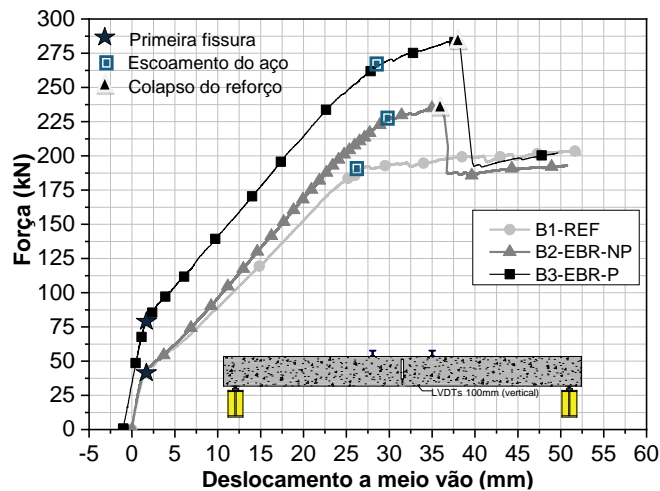


Figura 8 – Diagrama Força versus deslocamento das vigas ensaiadas (Autores).

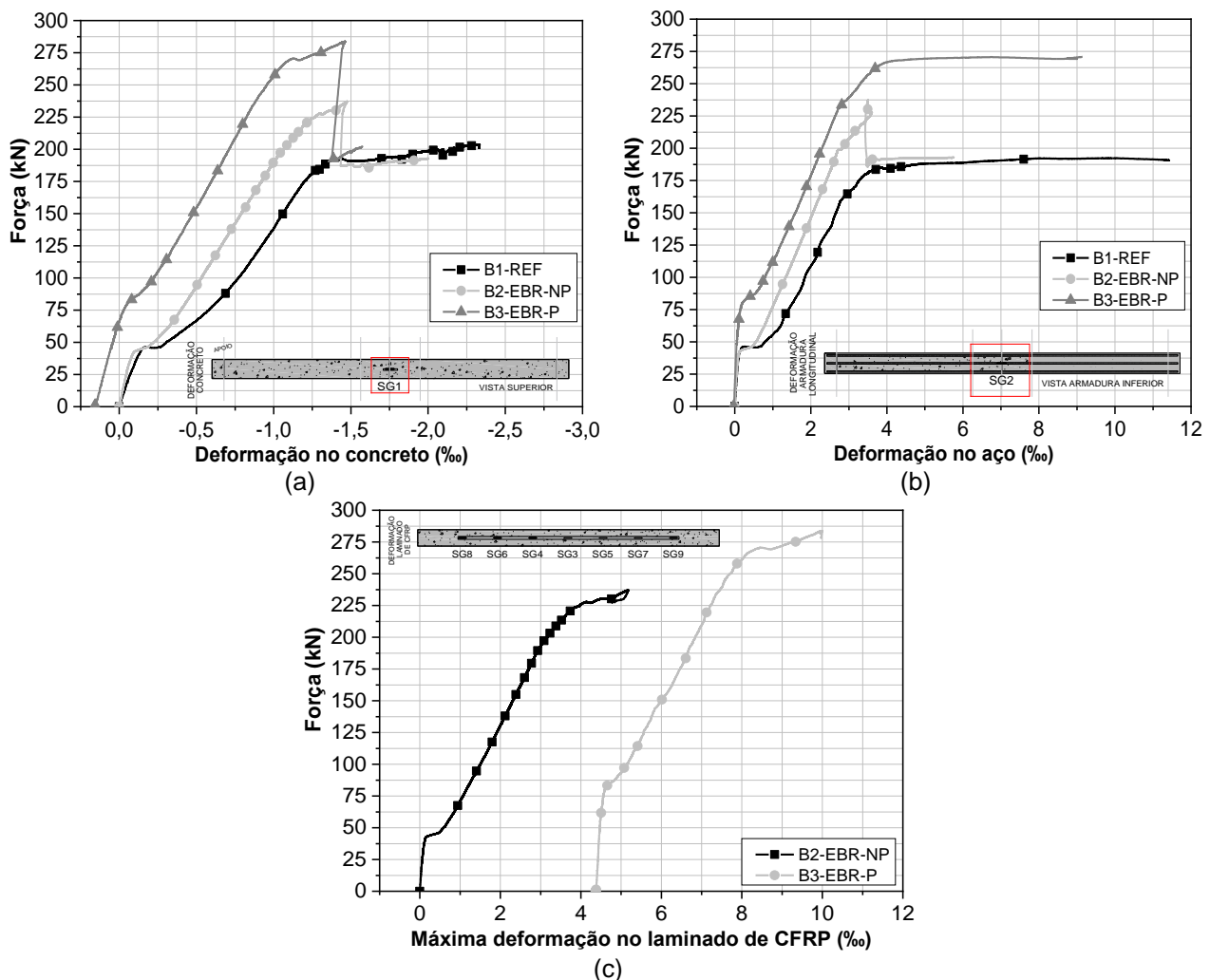


Figura 9 – Diagramas Força versus deformação dos materiais das vigas (Autores).

A viga B1-REF apresentou abertura de fissura para uma força aplicada de 42,6 kN e deslocamento vertical de 1,53 mm, com deformações no concreto de -0,14 ‰ e no aço



de +0,14 ‰. O escoamento da armadura foi verificado para uma força aplicada de 183,6 kN e deslocamento vertical de 25,6 mm, com deformações no concreto de -1,27 ‰ e no aço de 3,71 ‰. Para um deslocamento de 37,5 mm (média do deslocamento aferido na força máxima dos elementos reforçados), uma força de 200,2 kN foi registrada, com deformação no concreto de -1,97 ‰.

As vigas reforçadas também apresentam os mesmos três estádios 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 das vigas, justificando o comportamento linear da curva por consequência do comportamento elástico-linear do laminado de CFRP.

A viga B2-EBR-NP (reforço passivo) apresentou abertura da primeira fissura para uma força aplicada de 44,88 kN e deslocamento vertical de 1,79 mm, com deformações no concreto de -0,14 ‰ e no aço de +0,31 ‰. Quando comparada à viga B1-REF, verifica-se um aumento na força que levou ao surgimento da primeira fissura de 5,4% e do deslocamento vertical de 16,9%. O escoamento da armadura foi verificado para uma força aplicada de 224,57 kN e deslocamento vertical de 29,5 mm, com deformações no concreto de -1,26 ‰ e no aço de 3,55 ‰. Assim, verifica-se que o sistema de reforço retardou o surgimento da primeira fissura e o escoamento da armadura. Para um deslocamento de 36,12 mm, uma força de 237,10 kN foi registrada, com deformação no concreto, aço e CFRP de -1,47‰, 3,50 ‰ e 5,17‰, respectivamente. Assim, verifica-se um aumento de 18,4% com o uso do sistema de reforço passivo.

A viga B3-EBR-P (reforço protendido) 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 ‰ e no aço de +0,27 ‰. Quando comparada à viga B1-REF, verifica-se um aumento na força que gerou a fissura em 94,7% e do deslocamento vertical de 27,5%. O escoamento da armadura foi verificado para uma força aplicada de 270,35 kN e deslocamento vertical de 30,23 mm, com deformações no concreto de -1,12 ‰ e no aço de 6,75 ‰. Assim, verifica-se, mais uma vez, que o sistema de reforço retardou o surgimento da primeira fissura e o escoamento da armadura. Para um deslocamento de 37,88 mm, uma força de 283,74 kN foi registrada, com deformações no concreto, aço e CFRP de -1,45‰, 3,54 ‰ e 10,00‰, respectivamente. Assim, verifica-se um aumento de 41,7% com o uso do sistema de reforço protendido.

Ainda, observa-se pelo diagrama da Figura 8 que o deslocamento vertical da viga B3-EBR-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.

Comparando-se as vigas reforçadas, verifica-se que a protensão permitiu o aumento de 84,7% da força que levou o surgimento da primeira fissura na viga com CFRP passivo, além de também aumentar em 8,9% o deslocamento vertical. Além disso, permitiu a redução das deformações no concreto e no aço com melhor utilização do material de reforço, o qual apresentava deformação de 4,64 ‰. No momento de escoamento das armaduras também se verifica aumento da capacidade resistente (20,4%) para um deslocamento vertical similar, porém, com redução da deformação do concreto, e melhor aproveitamento do aço e material de reforço. Por fim, no momento do colapso, a presença da protensão em comparação ao reforço passivo aumenta a capacidade resistente e deslocamento vertical em 19,6% e 4,8%, respectivamente, com mesmo nível de deformação no concreto, e deformação no laminado de aproximadamente 10,00 ‰.



Como um resumo, verifica-se que reforço passivo promoveu um incremento de capacidade à flexão na primeira fissura da ordem de 8,5%, enquanto o reforço com laminado de CFRP protendido resultou em incremento de aproximadamente 95%, evidenciando a capacidade que o referido sistema possui em melhorar o desempenho do elemento estrutural reforçado em condições de serviço. Ainda, observa-se que o uso da protensão levou ao aumento da rigidez à flexão do elemento reforçado. Tal comportamento é similar aos observados em experimentos 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).

3.4 Modos de colapso dos sistemas de reforço

Na Figura 10 são apresentados os modos de ruptura das vigas ensaiadas e dos sistemas de reforço avaliados no presente estudo. Como já detalhado, a viga B1-REF apresentou modo de ruptura típico de elemento de concreto armado à flexão com dimensionamento no domínio 2 (Figura 10a), com escoamento das armaduras e sem esmagamento do concreto.

A viga com reforço passivo (B2-EBR-NP) apresentou modo de ruptura caracterizado pelo destacamento do laminado de CFRP (Figura 10b), o qual ocorreu de forma brusca após alguns estalos observados durante o ensaio de flexão. Tal comportamento é similar aos observados em estudos experimentais com elementos reforçados com laminados de CFRP (CORREIA *et al.*, 2015; LIU *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2022), sendo o modo de ruptura das vigas caracterizado pelo destacamento do FRP.

Já a viga com reforço protendido (B3-EBR-P) também apresentou modo de ruptura caracterizado pelo destacamento do FRP, porém, com ruptura parcial do laminado de CFRP (Figura 10c), o qual ocorreu de forma brusca após estalos observados durante o ensaio de flexão, sendo também observado o escorregamento do laminado em uma das ancoragens mecânicas.

No que diz respeito a deformação no laminado de CFRP (Figura 11c), é possível observar um maior aproveitamento e solicitação do material de reforço na viga com o reforço protendido (B3-EBR-P), uma vez que este teve início com uma deformação instalada no material de aproximadamente 4,3‰. No momento do colapso, o sistema de reforço protendido atingiu deformações de até 10‰, enquanto a viga com reforço passivo (B2-EBR-NP) apresentou deformação máxima no laminado de CFRP da ordem de 5‰. A deformação máxima observada no laminado de CFRP protendido é similar a observada em outros estudos experimentais que empregaram o mesmo sistema de protensão utilizado no presente estudo (BARRIS, CORREIA, SENA-CRUZ, 2018; CORREIA *et al.*, 2015).

3.5 Abertura de fissuras

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). Na Figura 12 são apresentados exemplos de imagens das fissuras tomadas nas vigas B1-REF, B2-EBR-NP e B3-EBR-P, respectivamente.

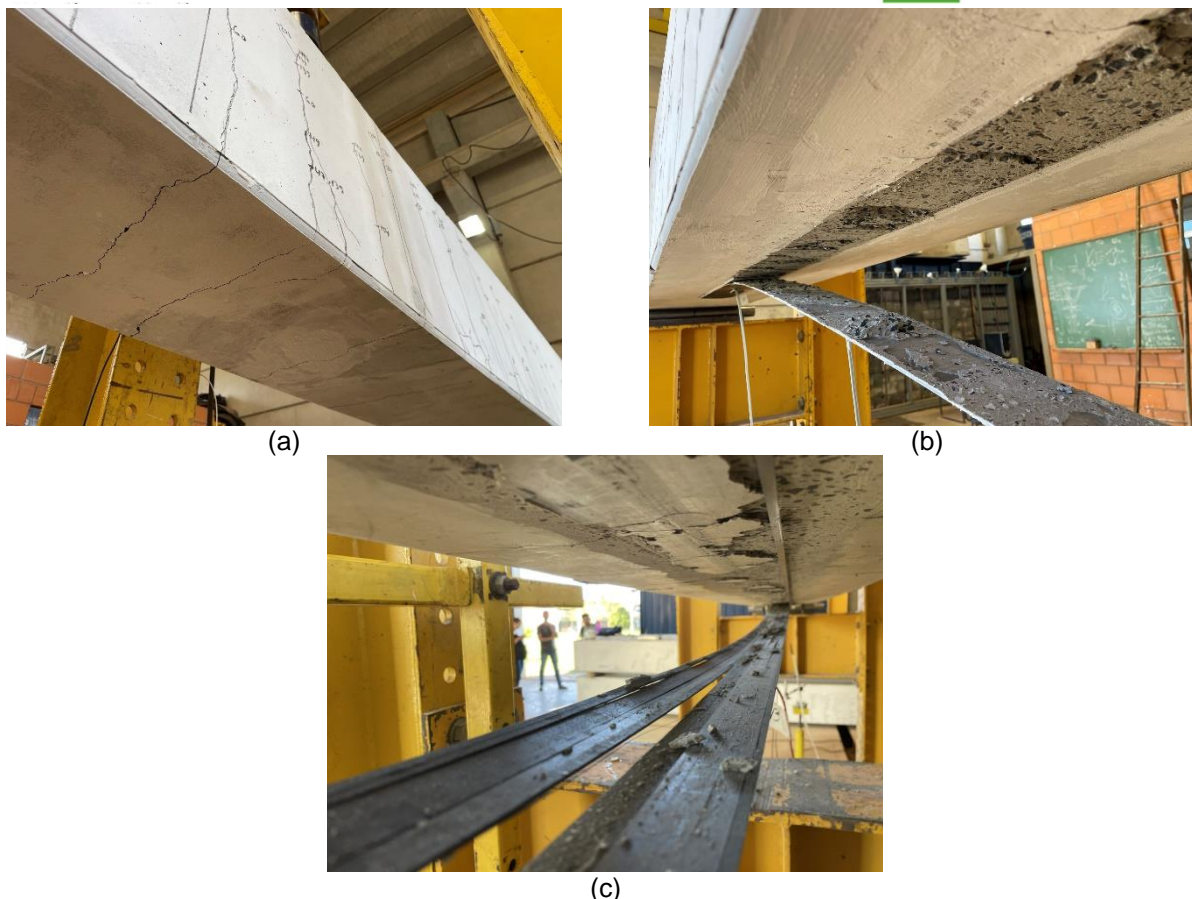


Figura 9 – Modo de ruptura das vigas ensaiadas (Autores).

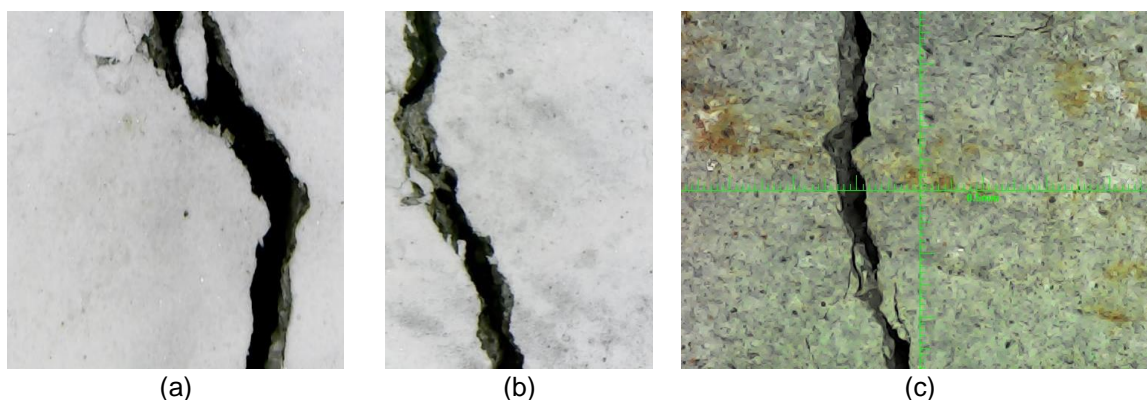


Figura 12 – Abertura das fissuras das vigas observadas durante os ensaios de flexão (Autores).

Analisando-se as imagens da Figura 12 observa-se visualmente, da esquerda para a direita, a diminuição da abertura de fissuras no concreto quando o deslocamento vertical $L/250$ foi atingido, a qual foi proporcionada pela aplicação dos sistemas de reforço. Para a viga de referência (B1-REF), observou-se uma abertura de 0,39 mm, enquanto para a viga com reforço passivo uma abertura de 0,32 mm. Já para a viga com reforço protendido, foram observadas aberturas de fissura da ordem de 0,20 mm, reduzindo-se em quase 50% seu tamanho quando comparado com a viga de referência, para um mesmo nível de deslocamento.



4 Considerações finais

O presente estudo teve como objetivo analisar o comportamento estrutural de vigas de concreto armado em escala real reforçadas à flexão com laminados de CFRP passivos e protendidos. Para tanto, foi realizado programa experimental com seis vigas de concreto, sendo que neste trabalho foram apresentados os resultados oriundos de três vigas, sendo uma viga não reforçada (B1-REF), uma viga reforçada à flexão com colagem externa passiva de laminado de CFRP segundo a técnica EBR (B2-EBR-NP), e uma viga reforçada à flexão colagem externa e ancoragem de laminado de CFRP protendido (B3-EBR-P). Os resultados obtidos no presente estudo permitiram apresentar as seguintes conclusões:

- Em condições de estados limites de serviço, o reforço à flexão com laminado de CFRP protendido se mostrou mais eficiente, visto postergar o surgimento da primeira fissura no concreto, assim como diminuir a abertura das fissuras, quando comparado aos resultados obtidos para as vigas de referência e com reforço passivo. Tal condição resulta em maior rigidez ao elemento reforçado, condição não obtida em sistemas de reforço com colagem passiva de laminados de CFRP;
- Com relação à capacidade última das vigas, o reforço à flexão com laminado de CFRP protendido se mostrou mais eficaz que o reforço passivo, resultando em incremento de capacidade última à flexão 41,7% quando comparado à viga de referência (B1-REF). Com relação à viga com reforço passivo, o sistema protendido apresentou incremento de capacidade de carga na ruptura de 19,7%;
- No que diz ao aproveitamento dos materiais de reforço, observou-se que laminado de CFRP protendido é mais solicitado, chegando a atingir a deformação de 10 ‰, sendo 93% superior ao observado no sistema de reforço com colagem passiva; e
- Por fim, os resultados obtidos permitiram observar o potencial uso do laminado de CFRP protendido na redução dos deslocamentos verticais e na abertura de fissuras em elementos de concreto armado, condição que o reforço com colagem passiva não proporciona.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Núcleo de Estudo e Tecnologia em Pré-Moldados de Concreto (NetPre) e ao Laboratório de Sistemas Estruturais (LSE) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) pela realização dos ensaios desta pesquisa. Agradecemos, também, a Usicon Construções Pré-Fabricadas pela doação das vigas, a S&P Clever Brasil pela doação do material de reforço e a Âncora pela doação dos chumbadores utilizados nesta pesquisa.

6 Referências

- ALVES, A. C. LOPES. **Comportamento de lajes de betão armado pré-fendilhadas e reforçadas à flexão com laminados de CFRP inseridos pré-tensionados**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho, Minho, 2015.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **440.2R-17: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures**. Detroit, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738 - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2016.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2023.

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.

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 ADESIVO**. 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. Doctoral Thesis in Civil Engineering. p. 265, 2018.

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. **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.

DUSHIMIMANA, A. et al. ANALYTICAL PREDICTION OF FLEXURAL BEHAVIOUR OF RC SLABS STRENGTHENED WITH NON-PRESTRESSED AND PRESTRESSED CFRP STRIPS. p. 1–11, 2023.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **Externally applied FRP reinforcement for concrete structures**. Suíça, 2019.

FERREIRA, D. DA C. **Avaliação da degradação de vigas reforçadas com FRP quando expostas ao intemperismo**. Dissertação de Mestrado. UFSCar, São Carlos, 2019.

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**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

HELENE, P. et al. **Manual de Reparo, Proteção e Reforço de Estruturas de Concreto**. R. Reabilitar. São Paulo, 2003.

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 527-5 - Plastics - Determination of tensile properties Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites**. 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**. Pini ed. São Paulo, 2015.

MICHELS, J. et al. **Prestressed FRP Systems**. In: Pellegrino, C., Sena-Cruz, J. (eds) **Design Procedures for the Use of Composites in Strengthening of Reinforced Concrete Structures**. vol 19. ed. Dordrecht: RILEM State-of-the-Art Reports, 2015.

SARTI JUNIOR, L. A. **Durabilidade de vigas de concreto armado reforçadas com mantas de CFRP submetidas a degradação acelerada**. Dissertação de Mestrado. UFSCar, São Carlos, 2020.

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, 1998.

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.