Reforço à flexão de vigas de concreto com laminados de CFRP: **comparação entre sistemas passivo e protendido em situação de serviço**

GLÁUCIA MARIA DALFRÉ – PROF. – https://orcid.org/0000-0003-3623-5103 (glaucia.dalfre@ufscar.br) ;
MARCELO FERNANDES PEREIRA – DOUTORANDO – https://orcid.org/0000-0002-7303-811X ;
MARCELO DE ARAÚJO FERREIRA – PROF. DR. – https://orcid.org/0000-0001-5175-2171 — **UFSCar**

RESUMO

ESTE ESTUDO AVALIOU O DESEMPENHO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO EM ESCALA REAL REFORÇADAS À FLEXÃO COM LAMINADOS DE CFRP, COMPARANDO SISTEMAS PASSIVOS E PROTENDIDOS EM SITUAÇÃO DE SERVIÇO. OS RESULTADOS DEMONSTRARAM QUE AMBOS OS SISTEMAS DE REFORÇO AUMENTARAM A CAPACIDADE RESISTENTE DAS VIGAS, SENDO O SISTEMA PROTENDIDO MAIS EFICIENTE, COM INCREMENTOS DE FORÇA DE ATÉ 45,23% PARA UM MESMO NÍVEL DE DESLOCAMENTO. ALÉM DISSO, A PROTENSÃO REDUZIU AS DEFORMAÇÕES NO CONCRETO E NO AÇO, MELHORANDO O COMPORTAMENTO EM SERVIÇO. O REFORÇO PROTENDIDO TAMBÉM CONTRIBUIU PARA A REDUÇÃO DA ABERTURA DE FISSURAS EM 32,5%, ASSIM COMO NO ESPAÇAMENTO ENTRE FISSURAS. ASSIM, OS RESULTADOS OBTIDOS CONFIRMAM QUE A UTILIZAÇÃO DE LAMINADOS DE CFRP PROTENDIDOS É UMA SOLUÇÃO EFICAZ PARA O REFORÇO ESTRUTURAL, PROPORCIONANDO MAIOR CAPACIDADE RESISTENTE, CONTROLE DE FISSURAÇÃO E DESLOCAMENTO, REDUZINDO A ABERTURA DE FISSURAS E MOBILIZANDO COM MAIOR EFICÁCIA O MATERIAL DE REFORÇO.

PALAVRAS-CHAVE: TÉCNICA EBR, LAMINADO DE CFRP, REFORÇO PROTENDIDO, REFORÇO PASSIVO, FLEXÃO.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) em técnicas de reforço estrutural se destaca pelas suas boas propriedades mecânicas, elevada resistência à corrosão e à fadiga, com 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.

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, nos quais incrementos significativos na capacidade última dos elementos reforçados, da ordem de até 50%, quando comparadas com os elementos não reforçados, foram observados (Hong; Park, 2017; Wang *et al.*, 2022). Entretanto, as técnicas com colagem externa passiva de FRP apresentam algumas desvantagens, como o modo de ruptura associado ao descolamento brusco ou frágil do FRP junto ao substrato de concreto, sendo que nesta condição, apenas 20% a 50% da capacidade última do material de reforço é efetivamente utilizada (Michels *et al.*, 2015; Dushimimana *et al.*, 2023).

De modo a resolver as limitações da colagem externa passiva, diferentes estudos passaram a avaliar o comportamento de sistemas de reforço com laminados de FRP protendidos (Correia *et al.*, 2015; Michels *et al.*, 2015; dentre outros). Além de ser colado ao elemento reforçado com o uso de resina, como ocorre nas técnicas EBR (Externally Bonded Reinforcement) e NSM (Near-Surface Mounted), o laminado ou manta de FRP também é fixado em suas extremidades por meio de ancoragem metálicas e chumbadores (Figura 1a), condição que permite aplicar força de protensão com o uso de atuador hidráulico (Figura 1b).

Os sistemas de reforço com laminados de CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) protendidos são uma combinação das técnicas de

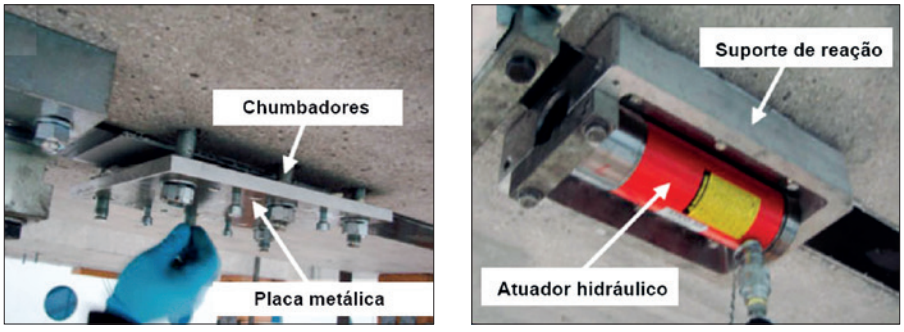

FIGURA 1
SISTEMA DE REFORÇO COM LAMINADOS DE CFRP PROTENDIDOS
FONTE: ADAPTADO DE MICHELS *et al.* (2015)

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 reduzir fissuras e deslocamentos existentes (Correia *et al.*, 2015; Michels *et al.*, 2015; Sena-Cruz *et al.*, 2017). De acordo com resultados obtidos na literatura, 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 maior capacidade resistente 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%.

Neste âmbito, o presente estudo conta com um programa experimental com vigas de concreto armado em escala real reforçadas à flexão com laminados passivos e protendido, tendo como objetivo analisar o comportamento em serviço das vigas para dois limites de deslocamentos verticais impostos pela norma NBR 6118 (ABNT, 2023, p. 77), (16,0 mm) e (22,4 mm), onde 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.

2. DESENVOLVIMENTO

Um programa experimental composto por três vigas de concreto armado em escala real, reforçadas à flexão com laminados de CFRP passivos e protendidos, aplicados segundo à técnica EBR, foi realizado. A resistência média à compressão das vigas é de 47,5 MPa, seção retangular com 40 cm de largura, 50 cm de altura e 600 cm de comprimento, onde 3 barras

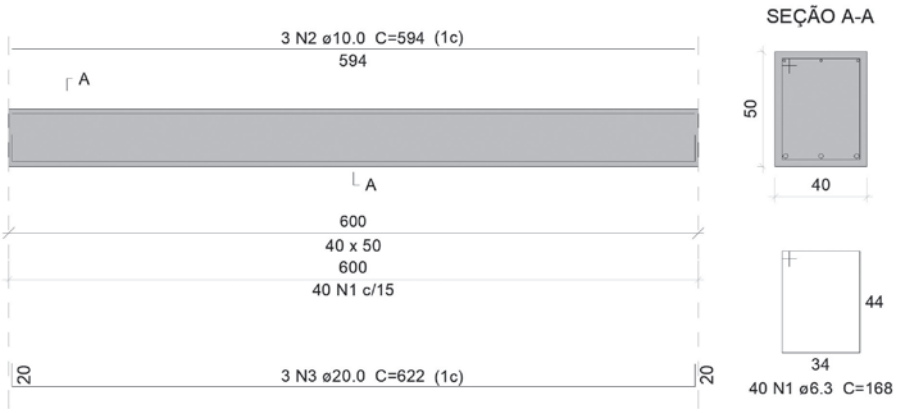

FIGURA 2
Detalhamento das vigas de concreto armado (dimensões em cm)
Fonte: Pereira (2024)

com diâmetro de 20,0 mm foram utilizadas como armadura longitudinal inferior e estribos de 6,3 mm, espaçados a cada 15 cm e com cobrimento de 3 cm, como armadura transversal (Figura 2).

Duas vigas foram reforçadas com laminados de fibras de carbono com seção transversal de 1,4 x 100 mm², com tensão de tração última média de 2800 MPa e módulo de elasticidade médio de 170 GPa, os quais foram aplicados segundo os arranjos apresentados na Figura 3. A caracterização completa dos materiais pode ser encontrada em Pereira (2024).

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). O esquema de ensaio de flexão adotado no presente estudo é apresentado na Figura 4.

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, e célula de carga (CC 080804) com capacidade de 1000 kN e precisão de 0,246 kN.

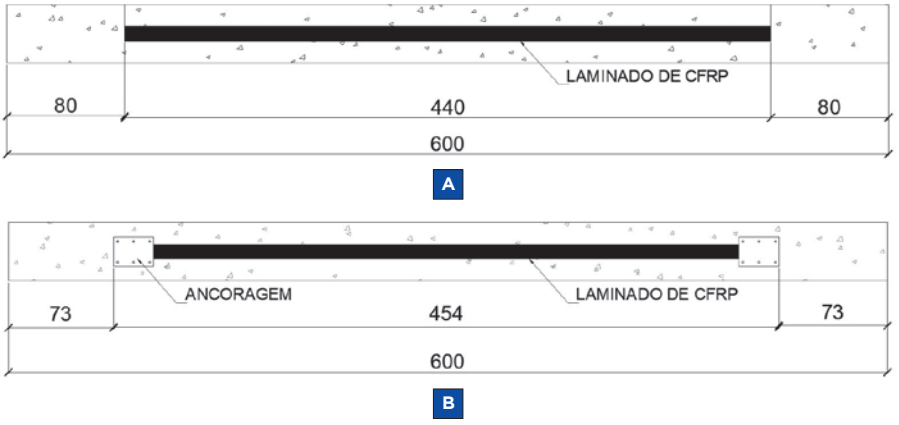

FIGURA 3
Configuração do reforço à flexão com CFRP passivo (a) e protendido (b) – vista inferior (dimensões em cm)
Fonte: Pereira (2024)

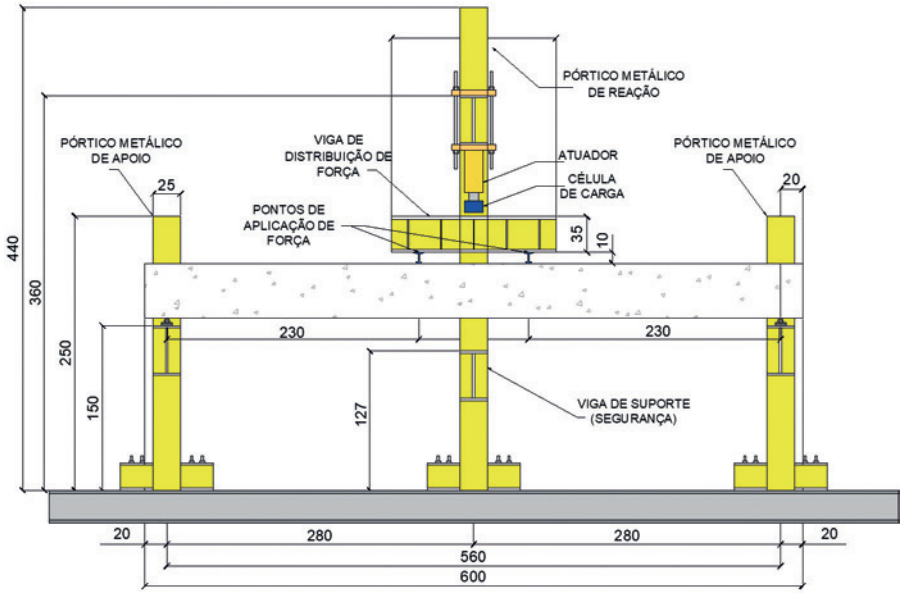

FIGURA 4
Esquema do ensaio de flexão por quatro pontos das vigas (dimensões em cm)
Fonte: Pereira (2024)

Neste estudo, um total de três vigas foram analisadas, das quais uma não foi reforçada (B1-0-0, a qual serviu de referência para comparação com as vigas reforçadas), uma reforçada à flexão com colagem externa de laminado de CFRP passivo (B2-NPC-NP) e uma reforçada à flexão com colagem externa de laminado de CFRP protendido (B4-NPC-P), onde uma deformação média de 4‰ foi aplicada no laminado no ato da protensão. Dois diferentes tipos de ensaios de flexão foram realizados: (i) no primeiro, o ensaio era formado por uma única etapa, onde a viga B1-0-0 foi submetida a carregamento até sua ruína/ruptura; no segundo (ii), o ensaio foi realizado em 2 etapas: a primeira baseada na aplicação do sistema de reforço e espera da cura da resina (7 dias) e a segunda com o carregamento das vigas até sua ruína/ruptura, vigas B2-NPC-NP e B3-NPC-P.

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 (± 0,15 mm), posicionados a meio vão, distantes 230 cm dos apoios. A deformação no concreto foi medida por meio de um extensômetro elétrico tipo PA-06-1500BA-120 posicionado a meio vão e no topo das vigas (SG1). A deformação na armadura longitudinal foi medida com o uso de um extensômetro elétrico tipo PA-06-250BA-120-L, também posicionado a meio vão da armadura longitudinal central (SG2). Por fim, as deformações no laminado de CFRP foram aferidas com o uso sete extensômetros elétricos tipo KFG-10-120-C1-11, os quais foram posicionados ao longo do comprimento do material de reforço. A Figura 5 apresenta o arranjo de extensometria utilizado.

Por fim, para a verificação de Estado Limite de Serviço (ELS), fez-se 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 os deslocamentos verticais equivalentes à e foram atingidos (Figura 6).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 7, são apresentados os diagramas Força versus deslocamentos verticais da viga de referência (B1-0-0) e das externamente reforçadas com laminados de CFRP passivo (B2-NPC-NP) e protendido (B3-NPC-P). 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, sob os deslocamentos verticais equivalentes a L/350 (16,0 mm) e L/250 (22,4 mm).

Analisando-se o diagrama Força versus Deslocamento a meio vão da viga de referência (B1-0-0), Figura 7, verifica-se que essa apresenta os três estágios típicos de comportamento de elementos submetidos à flexão: o primeiro representa o concreto

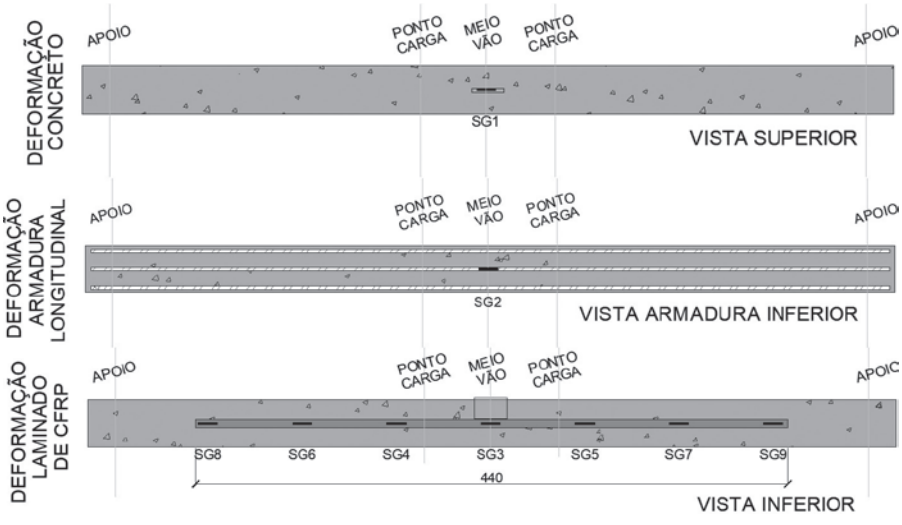

FIGURA 5
Posicionamento dos extensômetros — medidas em cm
Fonte: Pereira (2024)

TABELA 1
Resultados obtidos para L/350 e L/250

Viga	L/350 (16,0 mm)				L/250 (22,4 mm)			
	F (kN)	ε_c (‰)	ε_s (‰)	ε_f (‰)	F (kN)	ε_c (‰)	ε_s (‰)	ε_f (‰)
B1-0-0	128,45	-0,94	2,29	–	170,50	-1,17	3,18	–
B2-NPC-NP	139,83	-0,74	1,91	2,15	185,82	-0,98	2,55	2,87
B3-NPC-P	186,55	-0,65	2,11	6,64	231,39	-0,85	2,76	7,32

Fonte: Pereira (2024)

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. Quando a viga B1-0-0 atingiu o deslocamento vertical de , uma força aplicada de 128,45 kN foi registrada, com deformações no concreto de -0,94 ‰ e no aço de +2,29 ‰. Para , uma força aplicada de 170,50 kN, com deformações no concreto de -1,17 ‰ e no aço de 3,18 ‰ foram verificadas.

Analisando-se o diagrama da Figura 7, observa-se que as vigas reforçadas também apresentaram 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.

Quando a viga B2-NPC-NP atingiu o deslocamento vertical de , uma força aplicada de 139,83 kN foi verificada, com deformações no concreto de -0,74 ‰, no aço de +1,91 ‰ e no laminado (SG3) de +2,15‰. Para , uma força aplicada de 185,82 kN, com deformações no concreto de -0,98 ‰, no aço de 2,55 ‰ e no laminado (SG3) de 2,87 ‰ foram verificadas.

Com relação à viga B3-NPC-P, seu deslocamento vertical inicia-se com valores negativos (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. Quando o deslocamento vertical de foi atingido, uma força aplicada de 186,55 kN foi registrada, com deformações no concreto de -0,65 ‰, no aço de +2,11 ‰ e no laminado (SG3) de +6,64‰. Para , uma força aplicada de 231,39 kN, com deformações no concreto de -0,85 ‰, no aço de 2,76 ‰ e no laminado (SG3) de 7,32 ‰ foram verificadas.

FIGURA 6
Aferição da abertura de fissuras com microscópio digital
Fonte: Pereira (2024)

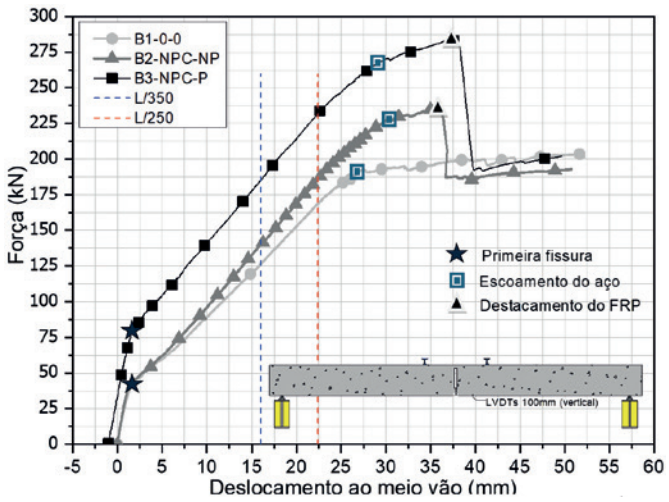

FIGURA 7
Diagrama Força *versus* deslocamento vertical das vigas ensaiadas
Fonte: Pereira (2024)

Analisando-se os resultados das vigas reforçadas apresentados na Tabela 1 e os comparando ao da viga da referência, percebe-se que ambos os sistemas de reforço (passivo e protendido) resultaram em incrementos de força de 8,9% e 45,23% para e 9,0% e 35,71% para , respectivamente. Verifica-se, também, a redução das deformações no concreto e no aço, 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. Com rela-

TABELA 2
Resumo dos principais resultados

Viga	S_{cr} (cm)	w_{cr} L/350 (mm)	w_{cr} L/250 (mm)
B1-0-0	14,50 (18,48)	–	0,40 (6,25)
B2-NPC-NP	13,90 (31,50)	0,25 (8,77)	0,32 (6,95)
B3-NPC-P	12,13 (46,50)	0,21 (10,87)	0,27 (12,85)

Nota: (valor) - Coeficiente de variação (%) = (Desvio Padrão/Média).100
Fonte: Pereira (2024)

ção ao tipo de reforço, fica evidenciada a capacidade do sistema de reforço protendido em conferir maiores níveis de deformação ao material de reforço quando comparado ao reforço passivo.

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

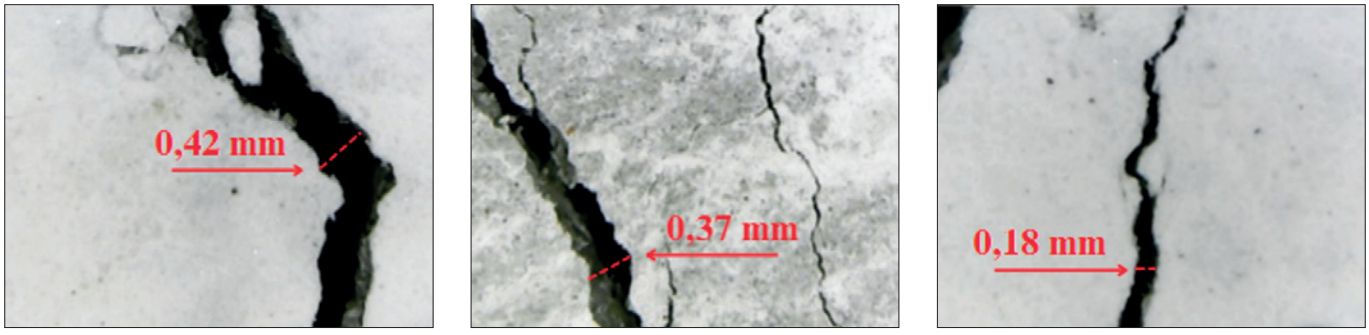

FIGURA 8
Aberturas de fissuras da viga B1-0-0: L/250
Fonte: Pereira (2024)

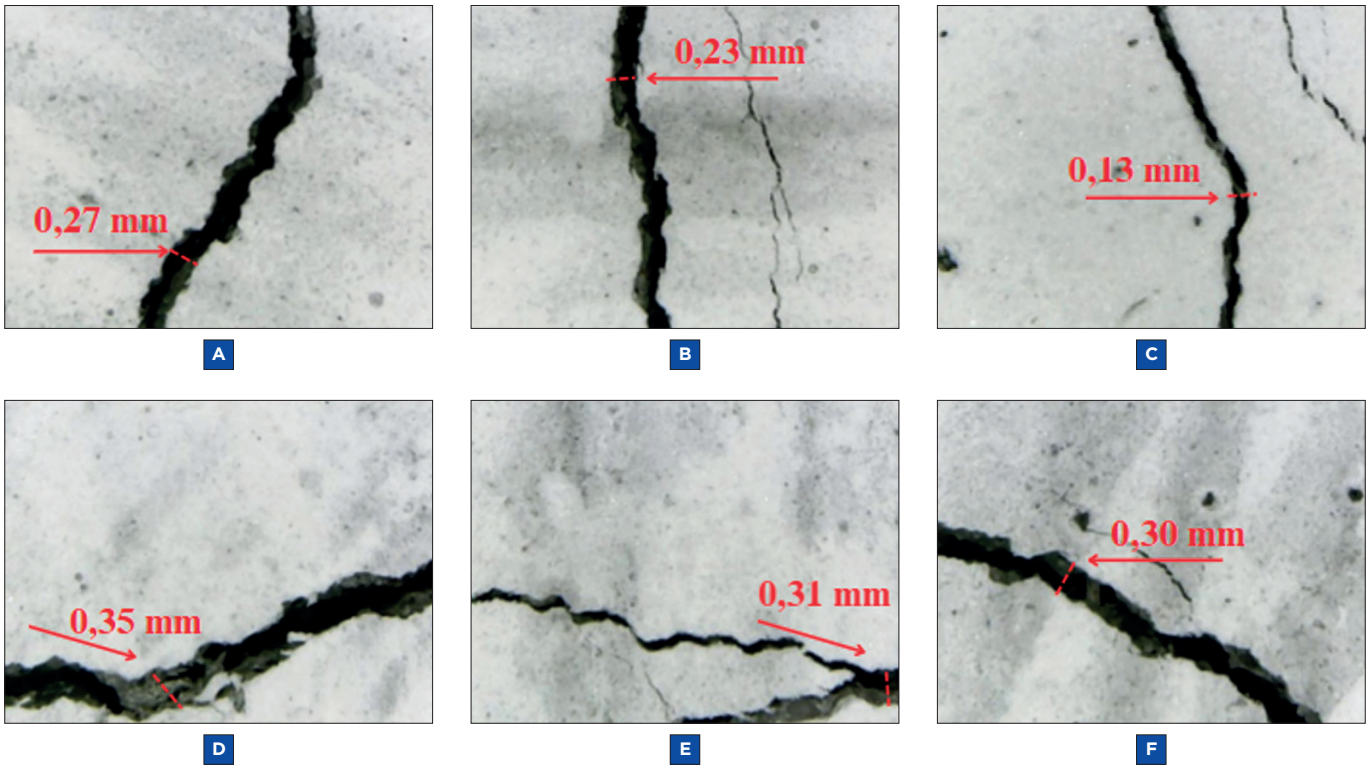

FIGURA 9
Aberturas de fissuras da viga B2-NPC-NP: (a-c) L/350 e (d-f) L/250
Fonte: Pereira (2024)

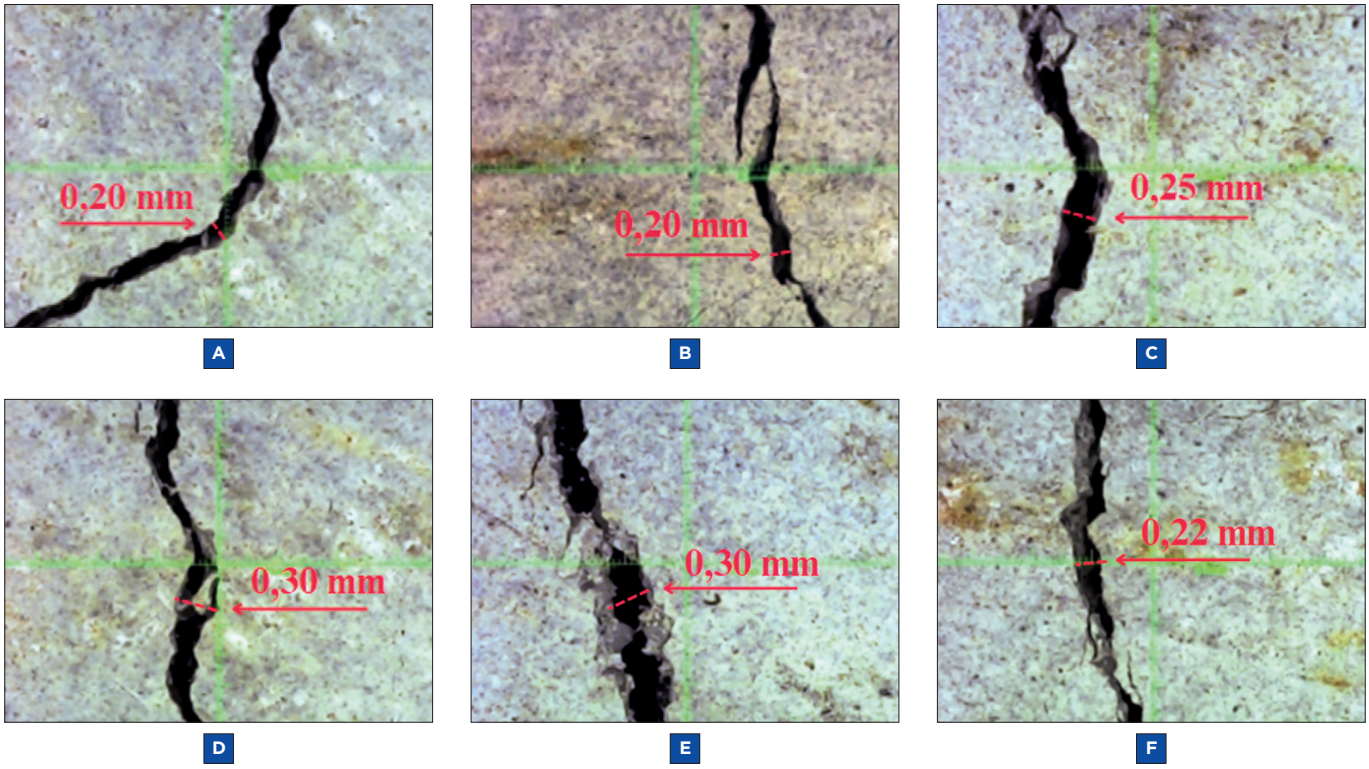

FIGURA 10
Aberturas de fissuras da viga B3-NPC-P: (a-c) L/350 e (d-f) L/250
Fonte: Pereira (2024)

de serviço impostos pela norma NBR 6118 (ABNT, 2023), sendo tomadas imagens nos deslocamentos equivalentes a L/350 e L/250 (Figuras 8 a 10). Na Tabela 2 são resumidos os principais resultados quanto ao padrão fissuratório e abertura média (w_{cr}) de três fissuras monitoradas, na região central, ao longo do ensaio para os deslocamentos verticais equivalentes à L/350 e L/250, respectivamente. Apresenta-se, também, o espaçamento médio entre as fissuras (s_{cr}), aferido com o uso de trena após a finalização dos ensaios de flexão.

Os resultados apresentados na Tabela 2 e Figuras 8 a 10 indicam que, para um mesmo nível de deslocamento, os sistemas de reforço conferem menores aberturas das fissuras. Fissuras com 0,40 mm (6,25), 0,32 mm (6,95) e 0,27 mm (12,85) foram registradas, sob deslocamento vertical de L/250, para B1-0-0, B2-NPC-NP e B3-NPC-P, respectivamente, indicando reduções das aberturas médias com a aplicação de sistemas de reforço quando comparadas à viga de referência.

Verificou-se que o reforço passivo reduziu a abertura das fissuras em 20%, enquanto os laminados de CFRP protendidos alcançaram uma redução de 32,5%. Assim, verifica-se a capacidade do reforço protendido em postergar o surgimento das fissuras, obtendo-se menores aberturas quando comparado ao reforço passivo.

Na Figura 11, apresenta-se o padrão de fissuração das vigas após a finalização de cada ensaio. Verifica-se que todas as vigas apresentaram padrão fissuratório típico de elementos submetidos à flexão, inicialmente com o surgimento de primeiras fissuras verticais a meio vão, no ponto de máximo momento fletor, seguido da propagação das fissuras e leve inclinação para as regiões próximas aos apoios. Com relação às fissuras, 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 4,3 %, enquanto o reforço com laminado protendido levou a uma redução de 19,5 %.

Com relação aos modos de ruína que regem o comportamento das vigas de concreto armado biapoiadas avaliadas nesta pesquisa, a viga não reforçada (referência) apresentou escoamento da armadura longitudinal de tração. A viga com reforço passivo exibiu ruína caracterizada pelo destacamento frágil do laminado de CFRP, enquanto o laminado de CFRP protendido exibiu ruína baseada por ruptura parcial e pelo destacamento do material do reforço. Observou-se que o uso de ancoragem metálicas alterou a ruína do sistema de reforço quando comparado ao laminado passivo de CFRP, postergando o colapso do material de reforço e resultando em maiores níveis de tensão no material compósito.

4. CONCLUSÕES

Este estudo avaliou o desempenho de vigas de concreto armado reforçadas com laminados de CFRP, comparando sistemas passivos e protendidos em situação de

FIGURA 11
Padrão fissuratório das vigas ensaiadas: (a) B1-0-0, (b) B2-NPC-NP e (c) B3-NPC-P
Fonte: Pereira (2024)

serviço. Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- A utilização de laminados de CFRP, tanto na configuração passiva quanto na protendida, contribui significativamente para o aumento da capacidade resistente à flexão das vigas de concreto armado, melhorando seu desempenho estrutural;
- Ambos os sistemas de reforço (passivo e protendido) resultaram em incrementos de força de 8,9% e 45,23% para L/350 e 9,0% e 35,71% para L/250, sendo o sistema protendido mais eficaz;
- Menores deformações foram observadas no concreto e no aço, confirmando que a protensão do laminado de CFRP proporciona um melhor desempenho em serviço, permitindo que a viga suporte maiores cargas para o mesmo nível de deslocamento vertical;
- As aplicações dos sistemas de reforço (passivo e protendido) reduziram as aberturas das fissuras em 20% para o sistema passivo e de 32,5% para o sistema protendido, indicando um efeito positivo na durabilidade da estrutura; e
- No que diz respeito ao padrão de fissuração, verificou-se que as vigas reforçadas apresentaram espaçamento reduzido entre as fissuras quando comparadas à viga de referência; o espaçamento médio das fissuras foi reduzido em 4,3% para o reforço passivo e 19,5% para o reforço protendido, confirmando o efeito benéfico da protensão no controle de fissuração.

Dessa forma, os resultados desta pesquisa evidenciam que a utilização de laminados de CFRP protendidos é uma solução eficiente para o reforço de vigas de concreto armado, promovendo não apenas maior capacidade resistente, mas também melhor controle de deslocamentos e fissuração, aspectos fundamentais para a segurança, funcionalidade e durabilidade das estruturas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Núcleo de Estudo e Tecnologia em Pré-Moldados de Concreto (NetPre), o 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 pela realização do programa experimental apresentado neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2023.
[2] CORREIA, L.; TEIXEIRA, T.; MICHELS, J.; ALMEIDA, J.; SENA-CRUZ, J. Flexural behaviour of RC slabs strengthened with prestressed CFRP strips using different anchorage systems. Composites Part B: Engineering, v. 81, p. 158–170, 2015.
[3] DUSHIMIMANA, A., CORREIA, L.; CRUZ, R.; CABRAL-FONSECA, S.; PEREIRA, J.M.; SENA-CRUZ, J. Analytical Prediction of flexural behaviour of RC slabs strengthened with non-prestressed and prestressed CFRP strips. 11th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (Cice). Rio de Janeiro, 2023.
[4] 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.
[5] 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.
[6] PEREIRA, M. 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.
[7] SENA-CRUZ, J.; CORREIA, L.; FRANÇA, P.; MICHELS, J. 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.
[8] 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.