



Modelo de dimensionamento de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP protendidos

Marcelo Fernandes Pereira (1); Gláucia Maria Dalfré (2); Marcelo de Araújo Ferreira (2)

(1) Mestrando, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGECiv, UFSCar
(2) Professor(a) Dr.(a), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGECiv, UFSCar
mfpereiraengenharia@gmail.com

Resumo

Os sistemas de reforço de estruturas em concreto armado com a colagem externa de FRP (*Fiber Reinforced Polymer*, da língua inglesa), tais como as técnicas EBR (*Externally Bonded Reinforcement*, da língua inglesa) e NSM (*Near-Surface Mounted*, da língua inglesa), já são bastante difundidas e possuem normas técnicas que estabelecem seus critérios e requisitos de dimensionamento e execução. Nos últimos anos, sistemas de reforço com protensão externa, utilizando-se de laminados de FRP protendidos, também passaram a ser estudados e aplicados, observando-se considerável incremento de capacidade dos elementos reforçados e melhor aproveitamento dos materiais aplicados no reforço quando comparado as técnicas de reforço passivas. Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo analisar e discutir o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymers*) protendidos, assim como propor um modelo de dimensionamento da capacidade à flexão das vigas reforçadas e comparar as expectativas de capacidade resistente calculadas com resultados de programas experimentais disponíveis na literatura. Os resultados obtidos no presente trabalho indicaram boa precisão dos modelos de dimensionamento propostos, se mostrando como boas ferramentas para aplicações práticas de sistemas de reforço à flexão com laminados de CFRP protendidos.

Palavra-Chave: protensão externa, CFRP, concreto armado, reforço.

Abstract

Strengthening systems of reinforced concrete structures with the external bonding of Fiber Reinforced Polymer (FRP), such as the Externally Bonded Reinforcement (EBR) and the Near-Surface Mounted (NSM) technique, are already widespread and have technical standards that establish their design criteria and execution requirements. In recent years, strengthening systems with external prestressing, using prestressed FRP laminates, began to be studied and applied, attaining a considerable increase in the capacity of the reinforced elements, as well as the better use of the strengthening materials when compared to passive strengthening techniques. Thus, the objective of the present work is to analyze and discuss the behavior of reinforced concrete beams strengthening with prestressed laminates, as well to propose a model for the design of the bending capacity of strengthened beams and compare the expected flexural capacities calculated with results of experimental programs available in the literature. The results obtained in the present work indicated good accuracy of the proposed design models with the experimental results, proving to be good tools for practical applications of flexural strengthening systems with prestressed CFRP laminates.

Keywords: external prestressing, CFRP, reinforced concrete, strengthening.



1 Introdução

Diferentes sistemas de reforço estrutural podem ser 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 Polymer*, da língua inglesa), protensão externa, entre outras técnicas (DALFRÉ, 2022; WOO, KIM, BYUN, 2012).

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 capacidade à flexão e/ou força cortante de elementos estruturais (LIU; PENG; CAI, 2015; WANG *et al.*, 2022; ZHANG; DENG; LIAO, 2013).

A eficiência do reforço à flexão de vigas de concreto armado por meio da colagem externa passiva de laminados de FRP é comprovada por diversos programas experimentais, sendo observados incrementos de cargas significativos de vigas reforçadas (GAO; GU; MOSALLAM, 2016; HONG; PARK, 2017; LIU *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2022). Ainda, tal sistema se destaca por utilizar um material com boas propriedades mecânicas, baixo peso específico e elevada resistência à corrosão. Os critérios e requisitos de dimensionamento e aplicação de sistemas de reforço estrutural com FRP são estabelecidos por normas técnicas, tais como a do *American Concrete Institute - ACI 440.2R* (2017) e da *Fédération Internationale du Béton - Fib Bulletin 90* (2019).

Embora os sistemas de reforço estrutural com colagem externa passiva de FRP apresentem as vantagens supracitadas, tal técnica apresenta algumas desvantagens tais como o modo de ruptura do elemento reforçado, que quase sempre está associado ao descolamento brusco do FRP do substrato de concreto, e o fato de que apenas 20 a 50% da capacidade do material de reforço é efetivamente utilizada (HONG; PARK, 2017; KANG; ZHANG; LIU, 2012; LI *et al.*, 2021; LIU *et al.*, 2021; LIU; PENG; CAI, 2015; MICHELS; BARROS; SENA-CRUZ, 2015; WANG *et al.*, 2022; WOO; KIM; BYUN, 2012; ZHANG; DENG; LIAO, 2013). Ainda, tais sistemas não melhoram o comportamento em serviço devido à baixa rigidez proporcionada ao elemento reforçado (WANG *et al.*, 2012). De modo a resolver as deficiências dos sistemas de reforço com colagem externa passiva de FRP, diversos estudos passaram a avaliar o comportamento de laminados protendidos, em especial, quando utilizando CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*, da língua inglesa) (HONG; PARK, 2017; KANG; ZHANG; LIU, 2012; LIU *et al.*, 2021; MICHELS; BARROS; SENA-CRUZ, 2015; WANG *et al.*, 2022; WOO; KIM; BYUN, 2012; ZHANG; DENG; LIAO, 2013), sendo observado maiores níveis de solicitação do material de reforço quando comparados com a técnica de colagem passiva, além de apresentar melhor aderência entre o laminado e o concreto uma vez que tais sistemas costumam utilizar ancoragem nas extremidades protendidas. Ainda, o comportamento em serviço do elemento reforçado com relação à fissuração e deslocamento é consideravelmente melhorado com o referido sistema de reforço.

Aplicações práticas de sistemas de reforço com laminados de FRP protendidos são apresentados por Michels, Barros e Sena-Cruz (2015), destacando-se o uso do sistema no reforço de pontes, viadutos e prédios comerciais. Embora já exista um histórico de aplicação 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 também destacado por Zhang, Deng e Liao (2013), assim como avaliar sua durabilidade, desenvolver diferentes técnicas de protensão e novos sistemas de ancoragem dos laminados.

Neste âmbito, o presente trabalho tem como objetivo analisar e validar um modelo de dimensionamento de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP protendidos visando a definição de uma rotina de cálculo que viabilize sua aplicação.

2 Protensão externa com a utilização de FRP

A técnica de reforço estrutural com laminado de FRP protendido é uma combinação das técnicas de reforço com colagem externa passiva (EBR, *Externally Bonded Reinforcement*, da língua inglesa) e dos princípios da protensão, resultando em um melhor aproveitamento do FRP e podendo resolver problemas relacionados a fissuração e deslocamentos excessivos de elementos estruturais (AZEVEDO, 2015; ZHANG; DENG; LIAO, 2013).

Atualmente, há diferentes sistemas de protensão com laminados de FRP disponíveis no mercado, os quais variam o tipo de laminado utilizado, tipo de ancoragem, assim como o processo de instalação. Nas Figuras 1(a-c) são apresentados sistemas de reforço com protensão externa, os quais utilizam de laminados de CFRP. Tal como apresentado nas referidas Figuras, os sistemas dispõem de um laminado de CFRP, o qual é colado com o uso de resina epóxi ao substrato do elemento de concreto armado, e também é ancorado em suas extremidades com dispositivos metálicos fixados na estrutura por meio de chumbadores, obtendo uma extremidade com ancoragem passiva e outra ativa.

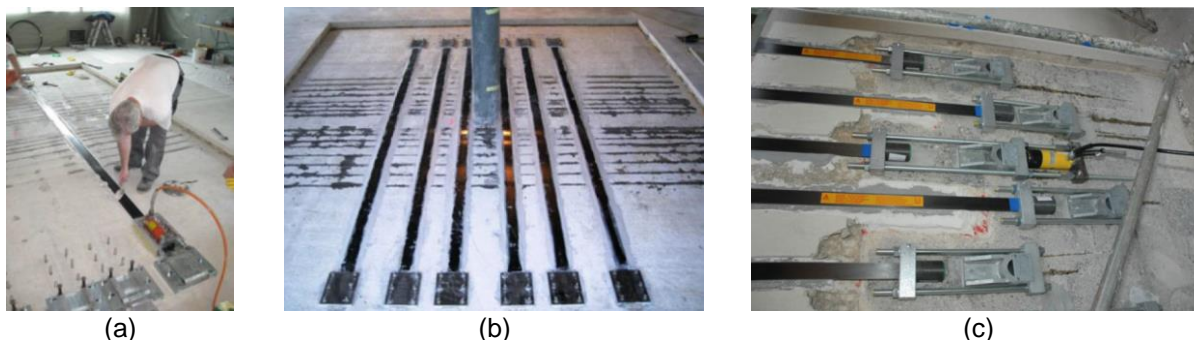


Figura 1 - Sistema de protensão externa com laminado CFRP (Michels, Barros e Sena-Cruz, 2015)

Os sistemas de reforço com laminados de CFRP protendidos apresentam diversas vantagens, entre elas: a maior rigidez do elemento reforçado face ao estado prévio de tensão aplicado na protensão, contribuindo para uma maior momento fletor resistente; redução da fissuração; possibilidade de redução de abertura de fissuras pré-existentes; melhora nas condições de serviço e durabilidade devido à redução de fissuras na estrutura; aumento da força cortante; e utilização de mesma área de um reforço passivo com FRP. Já em relação as desvantagens pode-se destacar o grande número de operações e equipamentos requeridos; o maior tempo de execução e o fato de que esta é uma técnica mais onerosa e complexa quando comparada com as técnicas tradicionais, tais como a EBR e a NSM (*FIB BULLETIN 90*, 2019).

Os sistemas de protensão externa com a utilização de laminados de FRP possuem aplicações práticas em reforço de estruturas existentes tais como pontes, viadutos e outros tipos de edificações. Nas Figuras 2(a-c) apresentam-se laminados de CFRP protendidos aplicados em estruturas de concreto armado situadas na Croácia, Tailândia e Suíça, respectivamente.

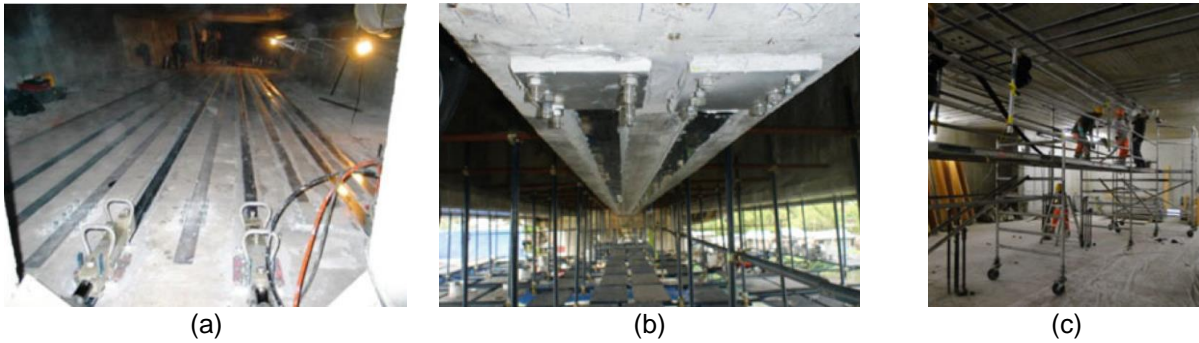


Figura 2 - Aplicações práticas de sistemas de protensão com FRP (Michels, Barros e Sena-Cruz, 2015)

O comportamento estrutural de vigas e lajes de concreto armado reforçadas à flexão com laminados protendidos é objeto de diferentes estudos experimentais (ALVES, 2015; AZEVEDO, 2015; GAO; GU; MOSALLAM, 2016; HONG; PARK, 2017; KANG; ZHANG; LIU, 2012; LIU *et al.*, 2021; PENG *et al.*, 2016; SENA-CRUZ *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2022, 2012; WOO; KIM; BYUN, 2012). De forma resumida, os referidos estudos constataram incrementos significativos nas forças no momento da fissuração, escoamento das armaduras e carga última dos elementos reforçados quando comparado com os elementos de referência. Ainda, observou-se que a aplicação do reforço protendido diminuiu o deslocamento dos elementos, apresentou melhor controle das fissuras e resultou em um melhor aproveitamento e/ou nível de sollicitação do laminado quando comparado com o reforço passivo aplicado com uso da técnica EBR.

É importante destacar que pelo fato do sistema de protensão externa combinar diversos efeitos na sua execução, como acionamento de macacos, liberação de cabos, dispositivos de ancoragens e transferências de esforços, entre outros, ocorre uma diminuição da força de protensão aplicada inicialmente, comumente chamada de perdas de protensão (VITÓRIO; BARROS, 2011).

As perdas de protensão, com a utilização de cordoalhas metálicas, podem ser classificadas em perdas imediatas e perdas progressivas. As perdas imediatas são provenientes do atrito entre o cabo e bainha, acomodação do cabo nas ancoragens (encunhamento) e encurtamento imediato do concreto durante a operação de protensão. Já as perdas progressivas são provocadas pela retração e fluência do concreto e relaxação da armadura de protensão (BUCHAIM, 2007; FRANÇA; ISHITANI; GRAZIANO, 2004).

De acordo com Wang *et al.* (2012), em sistemas de reforço com laminados de CFRP protendidos, as perdas de protensão imediatas referem-se ao escorregamento/acomodação do material de reforço junto ao dispositivo de ancoragem, fissuração da resina na região das ancoragens e relaxação inicial do FRP. Os referidos autores destacam que, embora as perdas imediatas de um sistema de protensão externa sejam análogas às perdas observadas nos sistemas com cordoalhas metálicas, as perdas imediatas não ocorrem instantaneamente em sistemas de reforço com FRP protendidos face a natureza da resina de colagem.

Neste âmbito, diferentes autores (CORREIA, 2018; DENG *et al.*, 2021; SENA-CRUZ *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2012) avaliaram o comportamento a longo prazo de vigas e lajes de concreto armado reforçadas à flexão com laminados protendidos expostos a diferentes tipos de ambientes e/ou submetidos a pré-carregamentos, monitorando-se as deformações nos laminados. Os referidos autores constataram que as perdas imediatas de protensão apresentam valores maiores do que as progressivas, sendo observadas perdas imediatas da ordem de 3% a 12%, a depender do tipo de exposição, e perdas progressivas da ordem de 3%.



Em termos de dimensionamento, para estruturas de concreto armado, no âmbito nacional, tem-se como referência principal a norma NBR 6118 (ABNT, 2014), a qual estabelece os critérios e requisitos para atendimento aos estados-limites últimos (ELU) e os estados-limites de serviço (ELS). Já no âmbito internacional, pode-se destacar a norma norte americana ACI 318 (2019). No que diz respeito aos sistemas de reforço estrutural com a colagem externa de FRP os critérios e requisitos de dimensionamento são preconizados pelas normas norte americana ACI 440.2R (2017) 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 laminados protendidos, objeto do presente trabalho, não são abordados nas referidas normas. Isto posto, no presente trabalho serão considerados e combinados diferentes modelos de dimensionamento, propostos na literatura, para reforço em elementos de concreto armado à flexão com protensão externa seguindo-se os critérios de normas e recomendações técnicas inerentes. Posteriormente, os resultados teóricos obtidos por meio dos modelos de dimensionamento propostos serão comparados com resultados experimentais, disponíveis na literatura, de modo a serem validados.

3 Metodologia adotada

A seguir são apresentadas as rotinas de cálculo adotadas para o dimensionamento de vigas de concreto armado, reforçadas ou não com sistemas de reforço com FRP, seja este passivo ou ativo. Também serão detalhados os programas experimentais considerados para a comparação de resultados teóricos e experimentais.

É importante destacar que as rotinas de dimensionamento aqui apresentadas pretendem determinar exclusivamente a capacidade última à flexão de vigas de concreto armado reforçadas com FRP tendo como base a geometria, taxa de armaduras e materiais existentes, de modo a, numa etapa posterior, comparar os resultados teóricos com trabalhos experimentais do mesmo gênero.

3.1 Dimensionamento das vigas

Para o dimensionamento de elementos lineares de concreto armado sem reforço, considerou-se as normas NBR 6118 (ABNT, 2014) e ACI 318 (2019), a quais estabelecem as hipóteses de cálculo, domínios de deformação e equilíbrio de deformações e esforços em uma seção transversal, necessários para a análise e determinação da capacidade resistente de um elemento em concreto armado.

3.1.1 – Reforço passivo

Em âmbito internacional pode-se destacar a norma técnica norte americana ACI 440.2R (2017), do *American Concrete Institute*, a qual estabelece os requisitos e critérios mínimos de dimensionamento, materiais e detalhamento de estruturas de concreto. Na referida norma, são estabelecidas as condições e hipóteses para dimensionamento de vigas sujeitas a esforços de flexão e forças axiais, dentre outros, sendo análogas as hipóteses estabelecidas pela norma americana ACI 318 (2019).

Como o dimensionamento de vigas de concreto armado reforçadas à flexão já se encontra bastante difundido em publicações do grupo de pesquisa “FRPs na engenharia civil”, tal rotina de cálculo não será detalhada, mas pode ser encontrada em ACI 440.2R (2017), Dalfré (2022), Dalfré, Parsekian e Ferreira (2019) e Sarti Junior (2020).

3.1.2 – Reforço ativo

Como já exposto, as normas ACI 440.2R (2017) e *Fib Bulletin* 90 (2019) tratam somente dos conceitos de sistemas de reforço passivos com a colagem externa de FRP. Assim, os critérios e requisitos de dimensionamento de sistemas com laminados de FRP protendidos, objeto da presente pesquisa, não são abordados nas referidas normas.

Alguns modelos de dimensionamento de sistemas de reforço à flexão com laminados de FRP protendidos são propostos na literatura (LIU; PENG; CAI, 2015; WOO; KIM; BYUN, 2012; ZHANG; DENG; LIAO, 2013), apresentando hipóteses de cálculo similares as adotadas pelas normas brasileira e norte americana. Ainda, tais modelos propostos também utilizam de compatibilidade de deformações e tensões e equilíbrio de forças resultantes na seção transversal do elemento de concreto armado reforçado.

No dimensionamento de sistema de reforço à flexão com laminados protendidos, para a determinação da capacidade última do elemento reforçado, torna-se necessário conhecer ou estimar o seu modo de ruptura (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 laminados protendidos podem ser classificados em: modo I - escoamento das armaduras seguido do destacamento ou ruptura do laminado antes do esmagamento do concreto; modo II - escoamento das armaduras seguido do esmagamento do concreto, antes da ruptura do laminado; modo III - esmagamento do concreto antes do escoamento das armaduras e ruptura do laminado.

Tendo em vista o acima exposto, no presente trabalho, será proposta uma rotina de dimensionamento de sistemas de reforço à flexão com a utilização de laminados protendidos considerando-se os conceitos de concreto protendido previstos na norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014) e baseando-se na rotina de cálculo apresentada por Bastos (2021) para determinação do momento resistente de uma viga com armadura de protensão, adaptando-se, quando necessário, os critérios para o sistema de protensão externa com laminados de FRP.

De acordo com Bastos (2021), em elementos fletidos protendidos, os possíveis domínios de deformações são os 2, 3 e 4 (Figura 3), com os possíveis modo de ruína: deformação plástica da armadura sob tração (domínio 2) ou esmagamento do concreto (domínios 3 e 4).

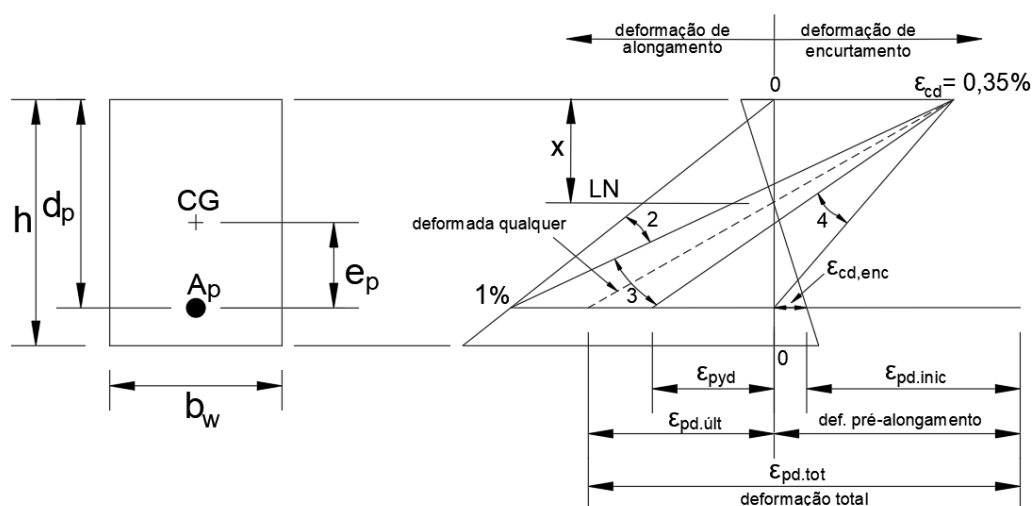


Figura 3 - Domínios de deformação possíveis para elementos protendidos à flexão (adaptado de BASTOS, 2021)

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 recomendado para cordoalhas metálicas de 1% tal como o apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Domínios de deformação de um elemento protendido à flexão (BASTOS, 2021)

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

Para a determinação do momento fletor último de elementos com armadura de protensão também são admitidas as hipóteses básicas adotadas no dimensionamento de estruturas 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 4 são apresentadas as tensões e deformações no ELU de uma viga com seção retangular reforçada, adaptando-se para o reforço à flexão o uso de laminados de FRP e considerando-se aderência perfeita entre o concreto e material de reforço.

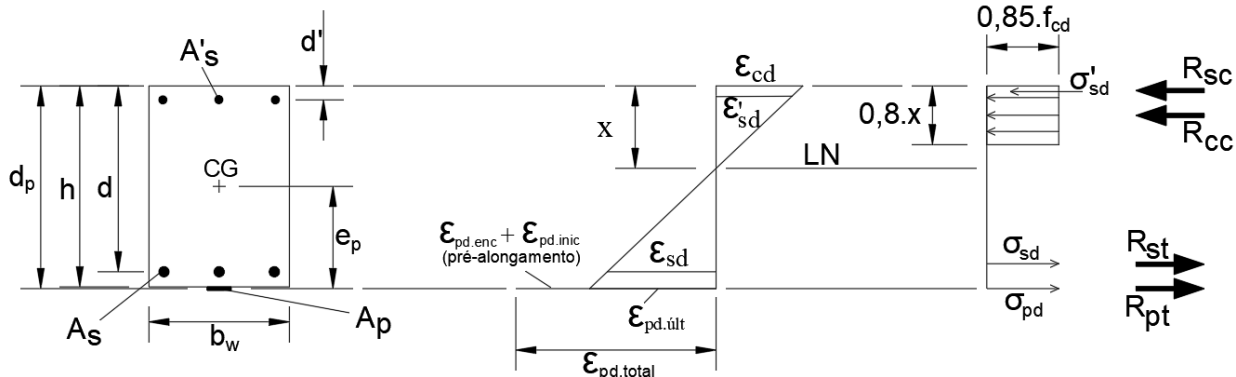


Figura 4 – Domínios de deformação possíveis para elementos protendidos à flexão (adaptado de Bastos, 2021)

As deformações de pré-alongamento provenientes do ato de protensão, indicadas na Figura 4, referem-se às deformações devido ao encurtamento elástico imediato do concreto ($\epsilon_{pd.enc}$) e a deformação devido a aplicação da força de protensão no regime elástico ($\epsilon_{pd.inic}$) as quais podem ser calculadas com o uso das Equações 1 e 2, respectivamente, onde P_d é a força de protensão final de cálculo, considerando-se as devidas perdas; E_c o módulo de elasticidade do concreto; A_c 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 o momento de inércia da seção transversal; E_p o módulo de elasticidade da armadura de protensão ou material de reforço; e A_p a área da armadura protensão ou material de reforço.



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

$$\varepsilon_{pd.inic} = \frac{P_d}{E_p \cdot A_p} \quad (\text{Equação 2})$$

Destaca-se que, por simplificação, a homogeneização da seção transversal não é considerada. Para seguir com o dimensionamento, deve-se adotar ou estimar um valor para a tensão máxima no material de reforço (σ_{pd}), a qual corresponde ao momento fletor resistente último. Isto posto, segue-se para o cálculo da posição da linha neutra (Equação 3) e admitindo-se que as armaduras passivas escoam. Nesta Equação, f_{yd} é a tensão de escoamento de cálculo do aço passivo inferior; A_s a área de armadura passiva inferior; f_{yd}' é a tensão de escoamento de cálculo do aço passivo superior; A_s' a área de armadura passiva superior; f_{cd} a resistência à compressão de cálculo do concreto; e b_w a largura da seção transversal.

$$x = \frac{\sigma_{pd} \cdot A_p + f_{yd} \cdot A_s - f_{yd}' \cdot A_s'}{0,85 \cdot f_{cd} \cdot 0,8 \cdot b_w} \quad (\text{Equação 3})$$

Supondo-se dimensionamento em domínio 3 ou 4, a deformação no laminado ($\varepsilon_{pd.últ}$) pode ser determinada com o uso da Equação 4, onde ε_{cd} é a deformação última no concreto (definida com o valor de 0,35%).

$$\varepsilon_{pd.últ} = \varepsilon_{cd} \cdot \left(\frac{d_p - x}{x} \right) \quad (\text{Equação 4})$$

Com o valor de $\varepsilon_{pd.últ}$ se define o domínio de deformação da seção transversal analisada, conforme classificação da Tabela 1, assim como se determina a deformação total do material de reforço protendido ($\varepsilon_{pd.tot}$) com o uso da Equação 5. É importante destacar que a referida deformação, no caso de laminados, será limitada ao alongamento à ruptura do material, o qual deverá ser fornecido pelo fabricante ou obtido em ensaio de caracterização.

$$\varepsilon_{pd.tot} = \varepsilon_{pd.enc} + \varepsilon_{pd.inic} + \varepsilon_{pd.últ} \quad (\text{Equação 5})$$

Posteriormente, torna-se necessário confirmar as deformações nos materiais para validação do domínio adotado por meio de compatibilidade de deformações, tal como apresentado nas Equações 6 a 8, corrigindo-se suas tensões, se necessário. Nestas Equações ε_{sd} é deformação na armadura passiva inferior; ε_{sd}' é deformação na armadura passiva superior; d_s é altura útil da armadura passiva inferior; d' é altura útil da armadura passiva superior; e d_p é altura útil da armadura ativa ou material de reforço.

$$\frac{\varepsilon_{cd}}{\varepsilon_{sd}} = \frac{x}{d_s - x} \quad (\text{Equação 6})$$

$$\frac{\varepsilon_{cd}}{\varepsilon_{sd}} = \frac{x}{x - d'}$$

$$\frac{\varepsilon_{cd}}{\varepsilon_{pd.últ}} = \frac{x}{d_p - x} \quad (\text{Equação 8})$$

Realizadas todas as verificações, o momento fletor resistente (M_{Rd}) pode ser calculado por meio da Equação 9.

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

Tendo em vista o presente estudo ter como objetivo a determinação da capacidade última das vigas reforçadas à flexão com laminado de FRP protendido, não foram consideradas no dimensionamento do momento fletor resistente as perdas de protensão visto que estas possuem impacto significante no comportamento de serviço do elemento reforçado.

3.4 Experimentos analisados

Para a validação da metodologia de dimensionamento de elementos de concreto armado reforçados à flexão com laminados de FRP proposta no presente trabalho foram utilizados os resultados experimentais obtidos por Wang *et al.* (2022). Os referidos autores analisaram experimentalmente vigas de concreto armado reforçadas com laminados de CFRP protendidos e analisaram o nível de protensão, a quantidade de material de reforço, o tipo de reforço e a posição de colagem do laminado no comportamento à flexão das vigas. Foram ensaiadas à flexão por quatro pontos oito vigas com seção “T” com largura de 35 cm, altura de 50 cm, espessura da mesa de 10 cm e comprimento de 600 cm, sendo uma viga não reforçada (referência), uma viga reforçada com colagem simples do laminado e seis vigas reforçadas com laminados de CFRP protendidos, sendo cinco com a aplicação do sistema de reforço na face inferior das vigas e apenas uma com a aplicação do sistema em suas faces laterais. Os autores utilizaram laminados de CFRP com espessuras de 1,4 e 2 mm, sendo também variada a sua largura, em 5 e 10 cm. Na Figura 5 são apresentadas as dimensões e detalhamento das vigas ensaiadas por Wang *et al.* (2022). Na Tabela 2 são apresentadas as propriedades dos materiais aplicados nas vigas do referido experimento, as quais foram consideradas na aplicação dos modelos de dimensionamento.

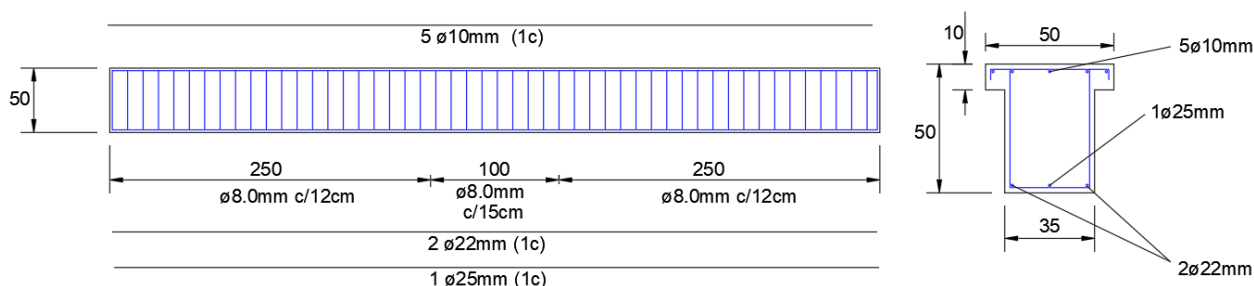


Figura 5 – Características das vigas ensaiadas. Dimensões em cm (adaptado de WANG *et al.*, 2022)

Tabela 2 - Propriedades dos materiais utilizados no programa experimental (WANG *et al.*, 2022)

Propriedades dos materiais		
Concreto	f_{ck}	26,8 MPa
Aço	f_{yk}	400 MPa
Laminado de CFRP	Tensão última	2625 MPa
	Módulo de elasticidade	164 GPa
	Deformação última	0,017

Na presente análise, das vigas ensaiadas por Wang *et al.* (2022), foram apenas consideradas três vigas, sendo elas: (i) a viga de referência (não reforçada), denominada “BU”, (ii) a viga reforçada à flexão, em sua face inferior, com colagem passiva de laminado de CFRP pela técnica EBR, denominada “B0-140”, e (iii) a viga reforçada à flexão com laminado de CFRP protendido, colado em sua face inferior, denominada “B30-140”. Em ambas as vigas reforçadas foram aplicados laminado de CFRP com seção de $1,4 \times 100 \text{ mm}^2$, com comprimento de 400 cm, sendo que na viga com protensão foi aplicada uma tensão no laminado de CFRP equivalente a 30% de sua tensão última. Na Figura 6 são apresentadas as condições de ensaio e reforço das vigas. Nota-se que para o caso em questão, a excentricidade entre o centro de gravidade da viga e do material de reforço, e_p , é de 25 cm, por se tratar de reforço externo ao elemento.

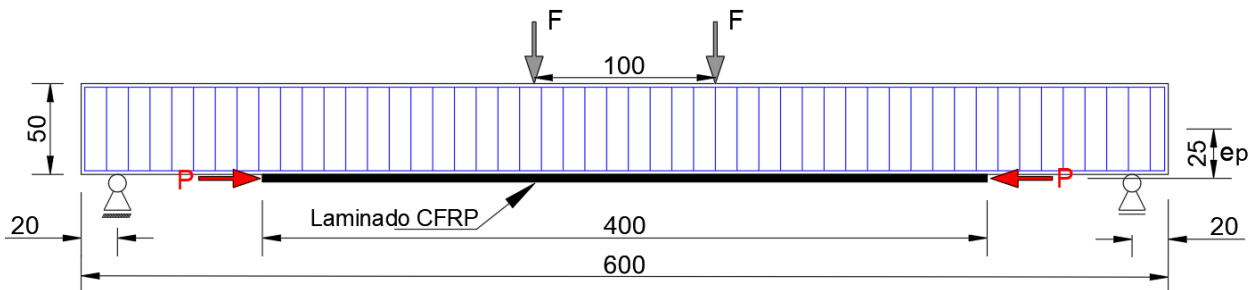


Figura 6 – Configuração de ensaio e reforço das vigas. Dimensões em cm.

Adicionalmente, os modelos de dimensionamento também foram aplicados considerando resultados de mais três programas experimentais disponíveis na literatura (GAO; GU; MOSALLAM, 2016; HONG; PARK, 2017; LIU *et al.*, 2021). Na Tabela 3 é apresentado resumo das propriedades dos materiais e parâmetros dos experimentos considerados na análise adicional.

Tabela 3 – Resumo das propriedades dos materiais e parâmetros adotados na análise adicional

Características e parâmetros adotados	Experimento		
	Liu (2021)	Hong e Park (2017)	Gao, Gu e Mosallam (2016)
geometria das vigas (cm ³)	35x35x520	20x30x270	15x30x260
f_{ck} (MPa)	23,3	16,4	19,8
área de aço inferior (cm ²)	9,425	2,126cm ²	3,079
f_{yk} (MPa)	433	470	365
cobrimento (cm)	2,0	3,0	3,0
material do laminado	BFRP	CFRP	CFRP



continuação...

número de camadas do material de reforço	1	1	1
resistência última do laminado (MPa)	1367	2350	4286
módulo de elasticidade do laminado (GPa)	56	173	256
alongamento de ruptura do laminado	0,0242	0,0140	0,0164
espessura do laminado (mm)	5,0	1,3	0,111
largura do laminado (mm)	50,0	50,0	150,0
força de protensão aplicada (kN)	119,61	61,10	5,63
configuração de ensaio de flexão	4 pontos	3 pontos	4 pontos
vão livre entre os apoios (cm)	500,0	240,0	240,0
distância entre o ponto de aplicação de força e apoio (cm)	230,0	120,0	80,0

4 Resultados e discussões

Na Figura 7 são apresentados os diagramas Força *versus* deslocamento à meio vão das três vigas ensaiadas por Wang *et al.* (2022). De acordo com os autores, a viga de referência não reforçada, “BU”, apresentou modo de ruptura dado pelo escoamento da armadura com posterior esmagamento do concreto, enquanto a viga reforçada com laminado CFRP passivo, “B0-140”, pelo escoamento da armadura e destacamento do laminado nas extremidades, antes do esmagamento do concreto. Já a viga com reforço protendido, “B30-140”, apresentou modo de ruptura caracterizada pelo escoamento da armadura com posterior ruptura do laminado de CFRP, também antes do esmagamento do concreto. Analisando-se o comportamento estrutural das vigas obtidas no referido experimento é possível observar a eficiência dos sistemas de reforço com laminados de CFRP, o qual é evidenciado quando o material de reforço é protendido.

Com relação as capacidades resistentes das vigas ensaiadas por Wang *et al.* (2022), a Tabela 4 apresenta um resumo das forças obtidas em três estágios do ensaio à flexão, sendo elas: fissuração do concreto; escoamento das armaduras e força máxima atingida pelo elemento estrutural.

Tabela 4 – Resumo das forças obtidas nos ensaios experimentais

Viga	Força (kN)		
	Fissuração	Escoamento	Máxima
BU	16	193	221
B0-140	26	223	247
B30-140	42	268	343

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 3 pode-se observar que a viga reforçada com simples colagem do laminado de CFRP apresentou capacidade na fissuração do concreto 63% maior quando comparada com a viga de referência não reforçada, enquanto a viga reforçada com o laminado de CFRP protendido apresentou incremento de 163%. Em relação à capacidade no escoamento das armaduras, os

incrementos dos referidos sistemas, em relação à viga de referência, foram de 16% e 39%, respectivamente. Já em relação à capacidade máxima das vigas, o sistema de reforço passivo e ativo com laminado de CFRP resultaram em incrementos de carga de 12% e 55%, respectivamente, quando comparados com a viga de referência não reforçada. Os resultados obtidos experimentalmente por Wang *et al.* (2022), além de confirmar o potencial dos sistemas de reforço em aumentar a capacidade resistente das vigas, também confirmam um melhor aproveitamento estrutural com o sistema de protensão externa com laminado de CFRP, assim como de sua capacidade em melhorar o comportamento em serviço do elemento reforçado tendo em vista o aumento de rigidez à flexão observado, em razão das reduções nas aberturas de fissuras quando se utilizam técnicas de reforço.

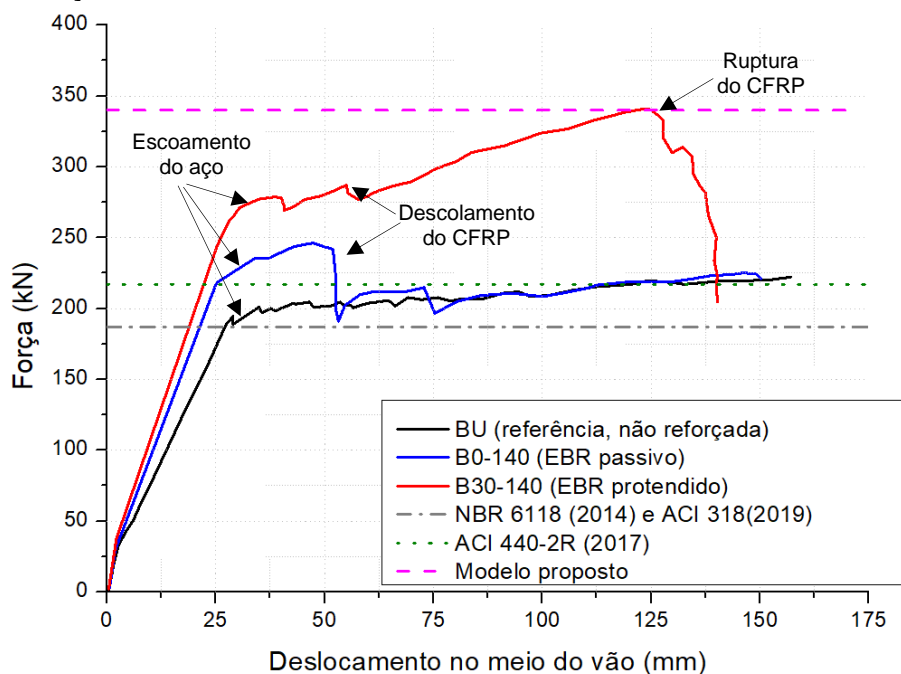


Figura 7 – Diagramas de força *versus* deslocamento vertical à meio vão

Na Figura 7 também é apresentada comparação entre os resultados obtidos experimentalmente por Wang *et al.* (2022) e as previsões da capacidade resistente das vigas analisadas, as quais foram calculadas considerando-se as normas NBR 6118 (2014) e ACI 318 (2019) para o dimensionamento da viga de referência (não reforçada), a norma ACI 440.2R (2017) para o dimensionamento da viga reforçada passivamente à flexão com colagem de laminado de CFRP, e o modelo proposto, adaptado de Bastos (2021), para o dimensionamento da viga reforçada à flexão com laminado de CFRP protendido. Destaca-se que, pelo fato do objetivo da presente análise se tratar de comparações entre as capacidades últimas das vigas obtidas experimentalmente e analiticamente, na aplicação dos modelos de dimensionamento não foram considerados os coeficientes de ponderações das ações e resistências, sendo considerados somente valores médios das resistências dos materiais, obtidos experimentalmente e indicados nos trabalhos considerados.

Analisando-se a Figura 7 é possível observar que os modelos de dimensionamento aplicados resultam em capacidades últimas coerentes com os resultados experimentais. Os resultados obtidos com os modelos de dimensionamento previstos nas normas NBR 6118 (ACI, 2014) e ACI 318 (2019) apresentaram resultados idênticos, face não terem



sido considerados os coeficientes de ponderação e, assim como, o modelo da ACI 440.2R (2017), os resultados apresentaram-se mais conservadores em relação às capacidades máximas reais das vigas ensaiadas, enquanto o modelo proposto para o dimensionamento da viga reforçada à flexão com laminado de CFRP protendido, para o experimento em questão, se apresentou mais preciso, com resultado muito próximo do obtido experimentalmente.

É importante destacar que para a aplicação do modelo proposto para o dimensionamento da viga reforçada à flexão com laminado de CFRP protendido torna-se necessário, numa etapa inicial, estimar a tensão no laminado de FRP no momento da ruptura da viga reforçada (Equação 3). Logo, tendo em vista ser possível conhecer o modo de ruptura da viga analisada com base nos resultados experimentais (ruptura do laminado), a estimativa da tensão no laminado de FRP resultou em uma melhor precisão do modelo.

Adicionalmente, os modelos de dimensionamento propostos no presente trabalho também foram aplicados e comparados com outros resultados experimentais disponíveis na literatura (GAO; GU; MOSALLAM, 2016; HONG; PARK, 2017; LIU *et al.*, 2021). Na Tabela 5 é apresentado um resumo dos resultados obtidos em tal análise.

Tabela 5 – Comparação adicional entre resultados experimentais e analíticos

Programa experimental analisado	Viga	Capacidade última (kN)		Incremento de capacidade (%)	
		Experimental	Dimensionamento	Experimental	Dimensionamento
LIU <i>et al.</i> (2021)	Referência (NBR 6118 /ACI 318)	121	100,3 / 100,3	0	0
	EBR passivo	122	110,8	1	11
	EBR protendido	185	223	53	123
Hong e Park (2017)	Referência (NBR 6118/ ACI 318)	50	39,6 / 39,6	0	0
	EBR passivo	77	53,5	54	35
	EBR protendido	120	103,8	140	162
Gao, Gu e Mosallam (2016)	Referência (NBR 6118 /ACI 318)	87	65,4 / 65,4	0	0
	EBR passivo	118	84,7	36	30
	EBR protendido	133	109	53	67

Analisando-se os resultados e comparações apresentadas na Tabela 5, com exceção do programa experimental realizado por Liu *et al.* (2021), os resultados obtidos por meio da aplicação dos modelos de dimensionamento propostos também se mostraram efetivos, apresentando valores de capacidade última seguros em relação às capacidades reais obtidas experimentalmente. Ainda, o incremento de capacidade também se mostrou coerente, com ordem de grandeza bastante similar entre os resultados experimentais e analíticos. Em relação à discordância entre os resultados obtidos na análise do programa experimental de Liu *et al.* (2021) deve-se destacar que foi o único experimento, entre os analisados, que utilizou laminado de fibras de basalto (BFRP), o que pode ter impactado na estimativa da capacidade última.



5 Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo analisar e discutir o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*, da língua inglesa) protendidos e sugerir um modelo analítico para determinação da capacidade à flexão das vigas reforçadas de modo a contribuir com as normas e/ou recomendações técnicas inerentes ao tema. Neste sentido, os modelos de dimensionamento propostos foram comparados com resultados experimentais inerentes ao tema e disponíveis na literatura, sendo possível obter as seguintes conclusões:

- O reforço à flexão de vigas de concreto armado com laminados de CFRP protendidos se mostra eficaz para incrementos significantes da capacidade de vigas reforçadas, melhor aproveitamento do material de reforço e capacidade de melhorar o comportamento em serviço face o aumento de rigidez à flexão e diminuição do número e abertura das fissuras;
- As aplicações de modelos de dimensionamento para determinar as expectativas das capacidades última das vigas analisadas calculadas considerando-se as rotinas de cálculo já consagradas nas normas NBR 6118 (2014), ACI 318 (2019) e ACI 440.2R (2017) se mostraram eficazes, resultando em valores seguros em relação às capacidades reais das vigas experimentalmente obtidas;
- O modelo proposto, adaptado de Bastos (2021), para o dimensionamento da viga reforçada à flexão com laminado de CFRP protendido, se mostrou eficaz para determinar a expectativa da capacidade última das vigas reforçadas, sendo importante o conhecimento ou estimativa precisa do tipo de ruptura do elemento reforçado, para obtenção de resultados mais aderentes; e
- Mostra-se necessário avançar no conhecimento sobre a temática do presente trabalho, de modo a conhecer o comportamento dos laminados de FRP protendidos a curto e longo prazo, assim como, obter dados confiáveis quantos as possíveis perdas de protensão do sistema para avaliações em serviço mais precisas.

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 (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal, 2015.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **440.2R-17: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures**. Detroit, USA, 2017.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Building Code (ACI 318-19) and Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-19)**. Detroit, USA, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.



AZEVEDO, J. R. R. **Reforço à flexão de lajes de betão armado com laminados de CFRP pré-esforçados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal, 2015.

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.

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.

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.; 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.

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

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.

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.

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, ANAIS DO 64º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2023 – 64CBC2023



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.

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.

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.

SARTI JUNIOR, L. A. **Durabilidade de vigas de concreto armado reforçadas com mantas de CFRP submetidas a degradação acelerada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, 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.

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.