

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id5690>

ARTIGO ORIGINAL

SUBMETIDO 31/03/2021

APROVADO 26/04/2021

PUBLICADO ON-LINE 29/09/2021

PUBLICADO 30/12/2022

EDITORA ASSOCIADA

Nelma Mirian Chagas Araújo Meira

Análise de incrementos de resistência à flexão simples em elementos de concreto armado reforçados pelas técnicas de encamisamento, chapas de aço e EBR com polímeros reforçados com fibras de carbono

 Iuri Fazolin Fraga^[1]*

 Igor Pacchioni Cândido da Silva^[2]

 Matheus Oliveira Fernandes^[3]

 Camila Pessoa Pinto^[4]

 André Luis Christoforo^[5]

[1] iurifraga@outlook.com

[3] matheustkful@gmail.com

[4] camilapessoapinto@outlook.com

[5] alchristoforo@ufscar.br

Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Brasil

[2] igor.pacchioni@unasp.edu.br

Departamento de Engenharia Civil, Centro Universitário Adventista de São Paulo (UNASP), Brasil

RESUMO: A utilização de sistemas de reforço tem se tornado uma solução comum para as inúmeras formas de degradação e deterioração dos elementos estruturais. Entre os diferentes tipos existentes, neste trabalho, certa ênfase foi dada às técnicas de encamisamento, chapas de aço e EBR (*Externally Bonded Reinforcement*) com polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP – *Carbon Fiber Reinforced Polymer*). Objetivando a avaliação dos incrementos de resistência resultantes, um *software* foi desenvolvido, com base nas normas técnicas vigentes. Para tal, incrementos graduais de 10% foram dados a uma força concentrada F de uma viga de concreto armado simplesmente apoiada. Os resultados evidenciaram que em até 40% de aumento de F , a técnica EBR com CFRP apresentou incrementos de resistência superiores. Já com 50% de acréscimo de F , a técnica de encamisamento se sobressaiu. Entretanto, em todas as porcentagens de aumento de F , o rendimento da técnica EBR com CFRP se mostrou bastante superior ao das demais, haja vista que possui incrementos de resistência significativos, associados a um reduzido volume de material. Diante dos apontamentos expostos, evidencia-se que a aplicação de CFRPs pela técnica EBR configura-se como uma excelente solução de reforço estrutural, apresentando rendimentos significativos e interferências arquitetônicas quase nulas, devido ao seu reduzido volume de material.

Palavras-chave: CFRP; reforço; técnica de chapas de aço; técnica de encamisamento; técnica EBR.

Analysis of simple flexural strength increments in reinforced concrete elements

*Autor para correspondência.

strengthened by casing techniques, steel sheets and EBR with carbon fiber reinforced polymers

ABSTRACT: *The use of strengthening systems has become a common answer for the many ways of degradation and deterioration of structural elements. Among the different kinds, this work was emphasized on the techniques of jacketing, steel sheets and EBR (Externally Bonded Reinforcement) with carbon fiber reinforced polymers (CFRP). To evaluate the resulting increases in strength, a software was developed and designed according to the current technical standards. For this, gradual increments of 10% were given to a concentrated force F of a simply supported reinforced concrete beam. The results showed that up to a 40% increase in F, the EBR technique with CFRP showed higher strength increments. On the other hand, with a 50% increase in F, the jacketing technique stood out. However, in all percentages of increase in F, the efficiency of the EBR technique with CFRP proved to be much higher than the others, considering that it has significant strength increases, associated with a reduced volume of material. In view of the above notes, it is evident that the application of CFRPs by the EBR technique is an excellent solution for structural reinforcement, presenting significant yields and almost zero architectural interference, due to its reduced volume of material.*

Keywords: *CFRP; EBR technique; jacketing technique; steel sheets technique; strengthening.*

1 Introdução

No campo da Engenharia de Estruturas, o conceito de reforço faz referência ao ato de elevar a capacidade de resistência de um elemento estrutural em relação àquela para a qual ele foi inicialmente projetado. Vários podem ser os motivos que levam à necessidade de reforçar uma estrutura, alguns deles são: condições ambientais em que está a edificação; erros de concepção e de interpretação de projetos; falhas construtivas; mudanças quanto aos usos da edificação, fazendo com que ela se diferencie dos propósitos para os quais foi inicialmente projetada; falta de manutenção; entre outros motivos (FERRARI; HANAI, 2012).

No decorrer da última década, a utilização de sistemas de reforço em elementos estruturais tem se mostrado cada vez mais corriqueira, tornando-se uma temática frequentemente estudada tanto na literatura técnica quanto na científica. É diante desse cenário que inúmeras pesquisas surgem com o intuito de avaliar os diferentes tipos de reforço para os elementos estruturais que apresentam perda de capacidade portante e possível colapso (ALI; ASSIH; LI, 2021; BARRIS *et al.*, 2020; BOUZIADI *et al.*, 2020; GIESE *et al.*, 2021; HUANG *et al.*, 2020; KAMGAR; BAGHERINEJAD; HEIDARZADEH, 2019; ZHOU *et al.*, 2020).

Atualmente, há várias técnicas de reforço consagradas entre projetistas e construtores. Entre elas, destaca-se a técnica de encamisamento (aumento da seção transversal do elemento e inserção de novas barras de aço) e uma outra técnica, em que chapas de aço são aderidas, externamente, ao concreto, ambas consideradas convencionais no meio técnicocientífico.

Entretanto, apesar da ampla utilização dessas técnicas de reforço tradicionais, certa notoriedade tem sido dada ao reforço de estruturas realizado por intermédio de polímeros reforçados com fibras, também conhecido como FRP, sigla do termo em inglês *Fiber Reinforced Polymer*. Dalfré, Parsekian e Ferreira (2021) apontam que os FRPs se destacam por apresentarem propriedades mecânicas superiores às propriedades dos materiais convencionais utilizados nos sistemas para elevar a resistência dos elementos estruturais. Além disso, esses polímeros possuem alta resistência e rigidez, baixo peso próprio e interferências quase nulas na arquitetura existente, favorecendo sua utilização em trabalhos de reforço estrutural (OBAIDAT *et al.*, 2011).

Os polímeros reforçados com fibras podem ser aplicados nas estruturas de diferentes formas. Neste trabalho, destaca-se a técnica EBR (*Externally Bonded Reinforcement*), originária da Europa e amplamente utilizada atualmente, devido a sua facilidade de aplicação e ao bom desempenho mecânico diante das solicitações (CZADERSKI; MEIER, 2018; DALFRÉ; PARSEKIAN; FERREIRA, 2021; JUVANDES, 2011; SILVA, 2014).

Ademais, a técnica EBR é versátil em sua aplicação. Ela permite que seja incrementada a resistência à flexão, por meio da colagem das mantas de FRP na face de tração das vigas; e também permite a incrementação da resistência ao cisalhamento, através da colagem das mantas nas faces laterais dos elementos.

Segundo Dalfré, Parsekian e Ferreira (2021), os FFRPs são subdivididos em três tipos, segundo seu material constituinte: compósitos de fibras de vidro (*Glass Fiber Reinforced Polymers* ou GFRP, em língua inglesa); compósitos de fibras de aramida (*Aramid Fiber Reinforced Polymers* ou AFRP, em língua inglesa); e compósitos de fibras de carbono (*Carbon Fiber Reinforced Polymers* ou CFRP, em língua inglesa). Entre os três citados, os CFRPs são os mais utilizados em intervenções de reforço, uma vez que apresentam melhores propriedades mecânicas em relação aos outros dois. Como principais vantagens, pontua-se sua resistência à ação de agentes químicos e imunidade à corrosão (DALFRÉ; PARSEKIAN; FERREIRA, 2021).

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo principal analisar os incrementos de resistência em elementos de concreto armado submetidos à flexão simples, através das técnicas de reforço convencionais (encamisamento e chapas de aço aderidas externamente) e da técnica EBR, com a utilização de polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP).

Alguns objetivos específicos podem ser pontuados. São eles: desenvolver uma ferramenta computacional que permita ao usuário estimar previamente a capacidade portante inicial do elemento estrutural; codificar as rotinas de dimensionamento; verificar os elementos de reforço, segundo as prescrições das normas técnicas vigentes nas NBR 6118 (ABNT, 2014) e ACI 440.2R (ACI, 2017); dimensionar os três tipos de reforço em uma viga de concreto armado com aumento gradual das solicitações; e avaliar as divergências entre os sistemas.

Adiante, o texto segue apresentando os principais aspectos das três técnicas que serão avaliadas neste estudo, a metodologia empregada na análise dos incrementos de resistência, os resultados quantificados, finalizando com a conclusão do estudo.

2 Referencial teórico

Conforme outrora exposto, entre os inúmeros tipos de sistemas de reforço, serão contemplados, neste trabalho, apenas o encamisamento (sistema com aumento de seção transversal), o reforço com chapas de aço aderidas externamente ao concreto

e a técnica EBR (*Externally Bonded Reinforcement*), com a utilização de polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP).

Entretanto, para serem aplicadas quaisquer técnicas de reforço na estrutura, faz-se necessária a determinação da sua capacidade portante inicial, isto é, qual a intensidade das solicitações que o elemento não reforçado consegue resistir. Para tal, alguns dados prévios devem ser colhidos, a saber: as dimensões do elemento; a área de aço efetiva (A_s); a resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}); e a resistência característica ao escoamento do aço de armadura passiva (f_{yk}).

No Quadro 1, estão expostos os roteiros de determinação da capacidade portante em elementos de concreto armado submetidos à flexão simples, ora pela normativa brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014), ora pela normativa americana ACI 318 (ACI, 2019).

Quadro 1 ▼
Determinação da capacidade portante pelas normativas NBR 6118 e ACI 318.
Fonte: adaptado de ABNT (2014) e ACI (2019)

Variável	Equações NBR 6118	Equações ACI 318
Tensões e deformações, segundo o diagrama retangular de compressão equivalente		
Posição da linha neutra (x; c) – Equilíbrio de forças normais	$R_{cc} = R_{st}$ $\alpha_c \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot \lambda \cdot x = f_{yd} \cdot A_s$ $x = \frac{f_{yd} \cdot A_s}{\alpha_c \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot \lambda}$	$C_c = T$ $0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot \beta_1 \cdot c = f_y \cdot A_s$ $c = \frac{f_y \cdot A_s}{0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot \beta_1}$
Momento fletor resistente de cálculo (ou reduzido) (M_{Rd} ; $\phi \cdot M_n$) – Equilíbrio de momentos fletores	$M_{Rd} \geq M_{Sd} \Rightarrow M_{Rd} = M_{Rd,cc} = M_{Rd,st}$ $M_{Rd,cc} = R_{cc} \cdot z = \alpha_c \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot \lambda \cdot x \cdot \left(d - \frac{\lambda \cdot x}{2} \right)$ <p style="text-align: center;">ou</p> $M_{Rd,st} = R_{st} \cdot z = f_{yd} \cdot A_s \cdot \left(d - \frac{\lambda \cdot x}{2} \right)$	$\phi \cdot M_n \geq M_u \Rightarrow M_n = M_{n,c} = M_{n,t}$ $M_{n,c} = C_c \cdot z = 0,85 \cdot f'_c \cdot b \cdot \beta_1 \cdot c \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right)$ <p style="text-align: center;">ou</p> $M_{n,t} = T \cdot z = f_y \cdot A_s \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right)$
Deformações no concreto (ϵ_{cd} ; ϵ_c) e no aço da armadura passiva existente (ϵ_{sd} ; ϵ_s)	<p>Domínio 2:</p> $\epsilon_{sd} = \epsilon_{su} = 10\%$ $\epsilon_{cd} = \frac{\epsilon_{sd} \cdot x}{(d - x)}$ <p>Domínio 3:</p> $\epsilon_{cd} = \epsilon_{cu}$ $\epsilon_{sd} = \frac{\epsilon_{cd} \cdot (d - x)}{x}$	$\epsilon_c = \epsilon_{cu} = 3\%$ $\epsilon_s = \left(\frac{d - c}{c} \right) \cdot \epsilon_c$

α_c : Parâmetro de redução da resistência do concreto na compressão, definido pelo item 17.2.2(e) da NBR 6118 (ABNT, 2014); f_{cd} : Resistência de cálculo à compressão do concreto; b_w : Largura da alma de uma viga; λ : Relação entre a profundidade y do diagrama retangular de compressão equivalente e a profundidade efetiva x da linha neutra, definido pelo item 17.2.2(e) da NBR 6118 (ABNT, 2014); f_{yd} : Resistência de cálculo ao escoamento do aço da armadura passiva existente; M_{Sd} : Momento fletor solicitante de cálculo; d : Altura útil; ϵ_{su} : Deformação específica do aço da armadura passiva existente que corresponde ao máximo alongamento permitido; ϵ_{cu} : Deformação específica de encurtamento do concreto na ruptura, definido pelo item 8.2.10.1 da NBR 6118 (ABNT, 2014). f'_c : Resistência característica à compressão do concreto; b : Largura da face comprimida do elemento; β_1 : Fator que relaciona a profundidade do bloco retangular de compressão equivalente à profundidade da linha neutra, obtido pela Tabela 22.2.2.4.3 do ACI 318 (ACI, 2019); f_y : Resistência característica ao escoamento do aço da armadura passiva existente; ϕ : Fator de redução de esforço, definido pelo item 21.2 do ACI 318 (ACI, 2019); M_u : Momento fletor solicitante na seção.

2.1 Reforço com aumento de seção (encamisamento)

O reforço de uma estrutura de concreto armado por meio da técnica de encamisamento é uma das mais utilizadas no Brasil.

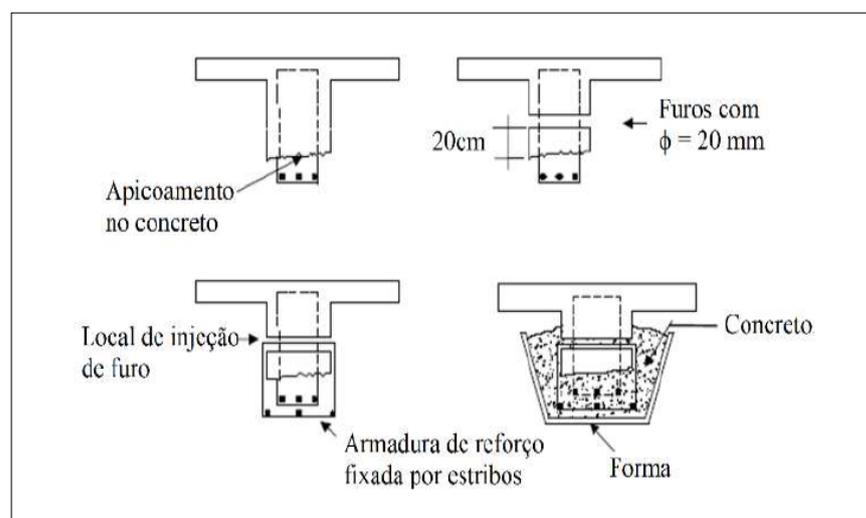
Cardoso, Appleton e Santos (2004) apontam que, quanto aos efeitos gerados nos elementos estruturais, os sistemas de reforço podem ser separados em dois tipos básicos: os que aumentam significativamente o momento resistente e os que elevam de forma notória a ductilidade. Segundo os mesmos autores, a técnica com aumento de seção (encamisamento) se enquadra no último efeito, privilegiando o aumento da ductibilidade, embora não se descarte a possibilidade de um pequeno acréscimo de resistência. Dessa forma, a técnica de encamisamento pode ser enquadrada no grupo das técnicas de intervenções pontuais que garantem a elevação da resistência e da ductibilidade do elemento.

Quanto a sua empregabilidade, Gomes e Appleton (1997) comentam que a técnica de encamisamento é adequada em casos em que há a necessidade de aumento da resistência em zonas comprimidas (pilares) ou tracionadas (vigas); incremento de dimensões; elevação da rigidez ou adição de armaduras no interior da seção transversal do elemento, já que os elementos de concreto armado encamisados oferecem melhor proteção ao fogo e à corrosão de armaduras suplementares.

Embora haja muitos pontos positivos quanto a sua utilização, um ponto negativo pode ser pontado. O concreto armado encamisado implica falhas no conceito estético e arquitetônico da estrutura, devido aos incrementos de armadura adicionados ao interior da seção transversal (GOMES; APPLETON, 1997).

Na Figura 1, é apresentado um exemplo da técnica de reforço por encamisamento e o consequente aumento da seção transversal.

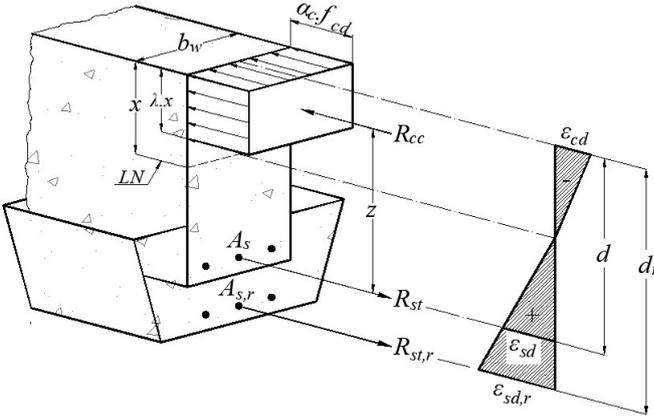
Figura 1 ►
Viga de concreto armado reforçada pela técnica de aumento de seção (encamisamento).
Fonte: adaptado de Cánovas (1988)



O Quadro 2 (página seguinte) apresenta a rotina de determinação da área de aço ($A_{s,r}$) necessária para reforçar um elemento de concreto armado submetido à flexão simples. Para tal, foram utilizadas as hipóteses de equilíbrio de forças normais e de momentos fletores, ambas propostas pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

Quadro 2 ▼

Cálculo da área de aço da armadura de reforço e deformações nos materiais pela técnica de encamisamento.
 Fonte: adaptado de ABNT (2014)

Variável	Equações NBR 6118
<p>Tensões e deformações segundo o diagrama retangular de compressão equivalente</p>	
<p>Posição da linha neutra (x) – Equilíbrio de forças normais</p>	$R_{cc} = R_{st} + R_{st,r}$ $\alpha_c \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot \lambda \cdot x = f_{yd} \cdot A_s + f_{yd,r} \cdot A_{s,r}$ $x = \frac{1}{\alpha_c \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot \lambda} \cdot (f_{yd} \cdot A_s + f_{yd,r} \cdot A_{s,r})$
<p>Momento fletorresistente de cálculo (M_{Rd}) – Equilíbrio de momentos fletores</p>	$M_{Rd} \geq M_{Sd, novo} \Rightarrow M_{Rd} = M_{Rd, cc} = M_{Rd, st}$ $M_{Rd, st} = R_{st} \cdot z + R_{st,r} \cdot z_r = f_{yd} \cdot A_s \cdot \left(d - \frac{\lambda \cdot x}{2} \right) + f_{yd,r} \cdot A_{s,r} \cdot \left(d_r - \frac{\lambda \cdot x}{2} \right)$
<p>Área de aço da armadura de reforço ($A_{s,r}$) – Substituição do valor de x na equação de $M_{Rd, st}$, isolando-se $A_{s,r}$</p>	$\left(-\frac{f_{yd,r}^2}{2 \cdot \alpha_c \cdot f_{cd} \cdot b_w} \right) \cdot A_{s,r}^2 + \left(\frac{f_{yd,r} \cdot f_{yd} \cdot A_s}{2 \cdot \alpha_c \cdot f_{cd} \cdot b_w} + f_{yd,r} \cdot d_r - \frac{f_{yd} \cdot A_s \cdot f_{yd,r}}{2 \cdot \alpha_c \cdot f_{cd} \cdot b_w} \right) \cdot A_{s,r} + \left(\frac{f_{yd} \cdot A_s \cdot d - M_{Rd, st}}{2 \cdot \alpha_c \cdot f_{cd} \cdot b_w} \right) = 0$ $a \cdot A_{s,r}^2 + b \cdot A_{s,r} + c = 0$ $A_{s,r} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}$
<p>Deformações no concreto (ϵ_{cd}), no aço da armadura passiva existente (ϵ_{sd}) e no aço da armadura passiva de reforço ($\epsilon_{sd,r}$)</p>	<p>Domínio 2:</p> $\epsilon_{sd,r} = \epsilon_{su}$ $\epsilon_{cd} = \frac{\epsilon_{sd,r} \cdot x}{(d_r - x)}$ $\epsilon_{sd} = \frac{\epsilon_{cd} \cdot (d - x)}{x}$ <p>Domínio 3:</p> $\epsilon_{cd} = \epsilon_{cu}$ $\epsilon_{sd} = \frac{\epsilon_{cd} \cdot (d - x)}{x}$ $\epsilon_{sd,r} = \frac{\epsilon_{cd} \cdot (d_r - x)}{x}$

$f_{yd,r}$: Resistência de cálculo ao escoamento do aço da armadura passiva de reforço; d_r : Altura útil medida da borda mais comprimida ao centro de gravidade da armadura de reforço.

2.2 Reforço com chapas de aço aderidas externamente ao concreto

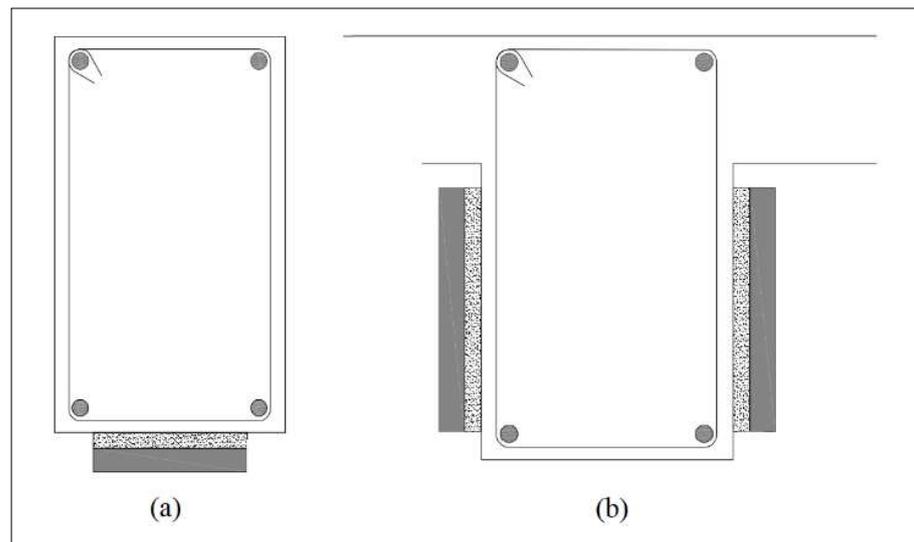
Conforme Higashi (2016), a técnica de reforço com chapas de aço consiste na adesão de chapas metálicas finas à porção exterior do elemento estrutural. Essas chapas podem ser fixadas ao concreto por colagem, resinas epóxi ou buchas expansivas. Dessa forma, cria-se uma armadura secundária que é solidária à peça estrutural.

Ainda sobre a fixação das chapas, vale salientar que, nesse tipo de reforço, é de vital importância para a eficácia da técnica garantir a perfeita adesão entre a chapa e o concreto. Isso é realizado através da aplicação de uma superfície resistente que possibilita a transmissão dos esforços de cisalhamento atuantes na ligação (REIS, 1998).

Um dos benefícios da técnica de chapas de aço para o reforço de vigas de concreto armado é que ela gera custos inferiores em relação aos demais sistemas convencionais e, além disso, causa apenas pequenas alterações na geometria da peça, quase não havendo nenhuma interferência estética ou arquitetônica.

Na Figura 2a, ilustra-se a utilização da chapa de aço em vigas para promover o aumento da capacidade portante para esforços de flexão, e, na Figura 2b, é representada a mesma utilização da chapa de aço, com diferença apenas quanto à finalidade, que é para esforços de cisalhamento.

Figura 2 ▶
Viga de concreto armado reforçada para flexão simples (a) e para o cisalhamento (b), com chapas de aço aderidas externamente ao concreto.
Fonte: adaptado de Sousa (2008)



Quanto ao roteiro para a determinação da área de aço necessária para reforçar uma viga de concreto armado com chapas de aço, ele é igual ao da técnica de encamisamento.

2.3 Reforço com a utilização de polímeros reforçados com fibras (FRPs) através da técnica EBR

Quando se trata do desenvolvimento de novos materiais de reforço estrutural, Ferreira (2019) aponta que um notório destaque foi dado à utilização de polímeros reforçados com fibras (*Fiber Reinforced Polymer*, FRP) como uma alternativa

viável econômica e tecnicamente, se comparada às técnicas convencionais de reforço (DALFRÉ, 2013).

Segundo Obaidat *et al.* (2011), os polímeros reforçados com fibras possuem elevada resistência à corrosão, alto módulo de elasticidade, baixo peso próprio e alta resistência mecânica. Com essas propriedades, esses materiais têm sido cada vez mais utilizados para o reforço de estruturas, sejam elas de aço, de madeira, de alvenaria ou de concreto armado (FERNANDES, 2016).

Machado e Machado (2015) explicam a composição química dos compósitos de FRP, formada por dois componentes básicos: fibras e matriz polimérica. Segundo Dalfré, Alves e Oliveira (2019), as fibras são os principais componentes dos compósitos, resistindo primariamente aos esforços de tração. Quanto a sua orientação, as fibras podem ser dispostas unidirecionalmente ou multidirecionalmente, originando compósitos unidirecionais ou multidirecionais.

De acordo com Al-Jelawy (2013), as fibras mais comuns utilizadas nos FRPs são as de vidro, aramida e carbono, denominadas, respectivamente, de GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymers*), AFRP (*Aramid Fiber Reinforced Polymers*) e CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymers*). Todavia, entre todos os tipos de fibras, a de carbono (CFRP) é a mais utilizada, uma vez que configura melhores propriedades mecânicas, bem como resistência à ação de agentes químicos e imunidade à corrosão (LONG *et al.*, 2012).

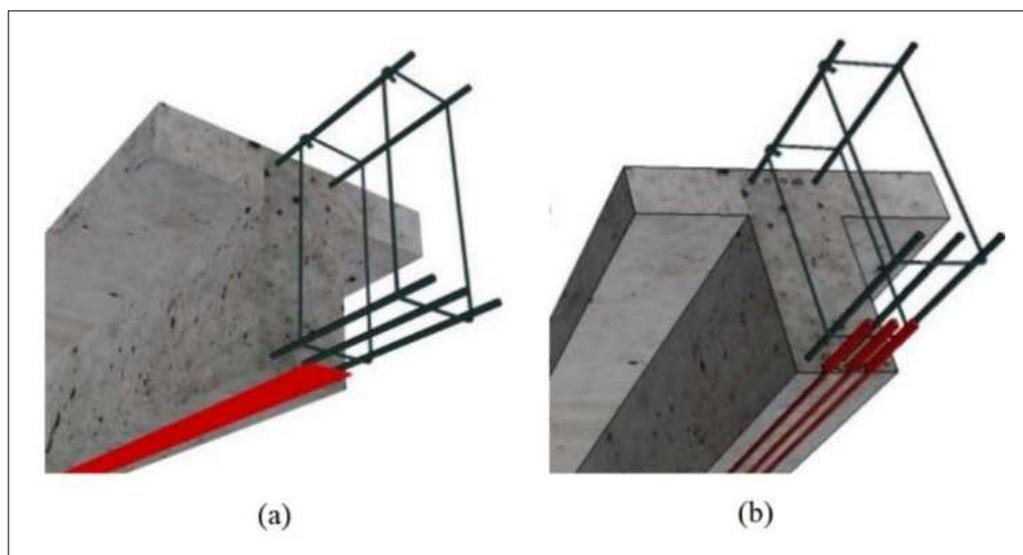
No que diz respeito às matrizes poliméricas, Dalfré, Alves e Oliveira (2019) ainda comentam que elas podem ser classificadas como termoendurecíveis ou como termoplásticas, sendo as primeiras as mais utilizadas nos materiais compósitos para reforço estrutural, como, por exemplo, o poliéster, o éster vinílico, o uretano metacrilato, o fenol e o epóxi. Portanto, as fibras, quando banhadas nas matrizes poliméricas, formam os compósitos de FRP.

Entre as técnicas de aplicação dos compósitos, têm-se a EBR (*Externally Bonded Reinforcement*) e a NSM (*Near Surface Mounted*). A técnica EBR consiste na colagem dos materiais compósitos externamente ao elemento através de uma resina, geralmente à base de epóxi (CRUZ *et al.*, 2010). Já na técnica NSM, os compósitos são inseridos em finos entalhes abertos no concreto de recobrimento (CRUZ *et al.*, 2010). Na Figura 3a, é ilustrada a técnica EBR, e, na Figura 3b, a técnica NSM.

Figura 3 ▼

Viga de concreto armado reforçada com FRPs através da técnica EBR (a) e NSM (b).

Fonte: adaptado de Chastre, Biscaia e Franco (2017)



Quadro 3 ▼

Verificação do reforço com FRP (técnica EBR) em elementos submetidos à flexão simples.

Fonte: adaptado da ACI 440.2R (ACI, 2017)

O Quadro 3 apresenta a rotina de verificação do reforço de estruturas com FRP, aplicado através da técnica EBR em um elemento de concreto armado submetido à flexão simples. Para tal, foram utilizadas as rotinas e recomendações do ACI 440.2R (ACI, 2017).

Variável	Equações ACI 440.2R
Tensão máxima (f_{fu}) e deformação máxima (ε_{fu}) da manta de FRP	$f_{fu} = C_E \cdot f_{fu}^*$ $\varepsilon_{fu} = C_E \cdot \varepsilon_{fu}^*$
Deformação inicial da seção de concreto no momento da instalação do FRP (ε_{bi})	$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL} \cdot (d_f - k \cdot d)}{I_{cr} \cdot E_c}$
Deformação máxima permitida no FRP (ε_{fd})	$\varepsilon_{fd} = 0,41 \cdot \sqrt{\frac{f'_c}{n \cdot E_f \cdot t_f}} \leq 0,9 \cdot \varepsilon_{fu}$
Deformação efetiva que pode ser atingida pelo reforço de FRP (ε_{fe})	$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \cdot \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd}$
Deformações no concreto (ε_c) e no aço da armadura passiva existente (ε_s)	$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{c}{d_f - c} \right) ; \quad \varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{d - c}{d_f - c} \right) \Rightarrow \{ \text{Valor de } c \text{ arbitrado inicialmente em } 0,20 \cdot d$
Verificação da profundidade da linha neutra (c)	$c = \frac{A_s \cdot f_s + A_f \cdot f_{fe}}{\alpha_1 \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot b} \Rightarrow \begin{cases} \text{Se } c \text{ for igual ao valor arbitrado anteriormente, diz-se que } c \text{ convergiu.} \\ \text{Caso contrário, arbitra-se outro valor para } c \text{ até que haja convergência.} \end{cases}$
Contribuição na resistência à flexão do aço da armadura passiva existente (M_{ns}) e do FRP (M_{nf})	$\phi \cdot M_n \geq M_u \Rightarrow M_n = \left[f_s \cdot A_s \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) \right] + \psi_f \cdot \left[f_{fe} \cdot A_f \cdot \left(h - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) \right]$
Verificação das tensões em serviço no aço da armadura passiva existente ($f_{s,s}$) e no FRP ($f_{f,s}$)	$f_{s,s} = \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} \cdot A_f \cdot E_f \cdot \left(d_f - \frac{k \cdot d}{3} \right) \right] \cdot (d - k \cdot d) \cdot E_s}{A_s \cdot E_s \cdot \left(d - \frac{k \cdot d}{3} \right) \cdot (d - k \cdot d) + A_f \cdot E_f \cdot \left(d_f - \frac{k \cdot d}{3} \right) \cdot (d_f - k \cdot d)} \leq 0,80 \cdot f_y$ $f_{f,s} = f_{s,s} \cdot \left(\frac{E_f}{E_s} \right) \cdot \frac{d_f - k \cdot d}{d - k \cdot d} - \varepsilon_{bi} \cdot E_f \leq 0,55 \cdot f_{fu}$

C_E : Fator de redução que leva em conta a exposição ambiental e o tipo de fibra, obtido pela Tabela 9.4 do ACI 440.2R (ACI, 2017); f_{fu}^* : Tensão de tração máxima do compósito de FRP (fornecida por ensaio ou fabricante); ε_{fu}^* : Deformação máxima do compósito de FRP (fornecida por ensaio

ou fabricante); M_{DL} : Momento fletor solicitante característico devido às ações permanentes; d_f : Altura útil medida da borda mais comprimida ao centro de gravidade do conjunto de reforço; k : Razão entre a profundidade da linha neutra e a profundidade de reforço medida a partir da borda mais comprimida; I_{cr} : Momento de inércia da seção fissurada de concreto; E_c : Módulo de elasticidade do concreto; n : Número de tiras de reforço de FRP; E_f : Módulo de elasticidade do FRP; t_f : Espessura nominal de uma camada de reforço de FRP; f_s : Tensão no aço de armadura passiva; A_f : Área total do conjunto de reforço de FRP; f_{fe} : Tensão efetiva no FRP/Tensão atingida no momento da ruptura da seção; α_c : Parâmetro de redução da resistência do concreto na compressão, definido pelo item 16.3 (passo 9) do ACI 440.2R (ACI, 2017); ψ_f : Fator de redução de esforço no FRP, igual a 0,85 na flexão; M_s : Momento fletor solicitante de serviço (combinações raras); E_s : Módulo de elasticidade do aço de armadura passiva.

3 Materiais e métodos

Uma vez que a pesquisa se caracteriza como um estudo numérico-analítico, a solução adotada para a obtenção dos resultados foi o desenvolvimento de uma ferramenta computacional. Para tal, optou-se por dividir a metodologia em três seções, a saber: a elaboração da ferramenta computacional para otimização dos cálculos e verificações; a metodologia de validação do *software*; e, por fim, a comparação entre os sistemas de reforço e os incrementos de solicitação.

3.1 Elaboração da ferramenta computacional

O *software*, intitulado RVigas, foi desenvolvido utilizando a linguagem VB.NET na plataforma do Visual Studio Community 2019 (livre acesso). Nos tópicos subsequentes, serão apresentadas as etapas de inserção de dados necessários para se obter os valores de capacidade resistente, tanto da viga de referência quanto da viga reforçada.

3.1.1 Parâmetros iniciais

A primeira etapa consiste na definição da técnica de reforço a ser empregada. A ferramenta computacional contempla três sistemas: encamisamento, chapas de aço e técnica EBR com materiais compósitos de FRP.

Nota-se, na Figura 4, apresentada posteriormente, que, além do tipo de reforço, é permitido ao usuário da ferramenta visualizar o tipo de análise e o documento normativo usado no procedimento.

Figura 4 ►
Parâmetros iniciais da ferramenta computacional.
Fonte: arquivo dos autores



As técnicas de encamisamento e chapas de aço referem-se a um problema de dimensionamento, enquanto a técnica EBR refere-se a um problema de verificação. Para esta última, as normas brasileiras não contemplam rotinas de cálculo, sendo necessário o uso de normas internacionais. Por isso, foram programadas recomendações do ACI 318 (ACI, 2019) para a determinação da capacidade portante inicial do elemento, e do ACI 440.2R (ACI, 2017) para a verificação dos compósitos de FRP.

3.1.2 Determinação da capacidade portante inicial

Conforme outrora exposto, antes do dimensionamento do conjunto de reforço, faz-se necessária a avaliação de sua capacidade portante inicial, a fim de concluir se o elemento é capaz de resistir tanto às solicitações atuais quanto àquelas que lhe serão impostas. Na Figura 5, observa-se quais valores são essenciais para a extração desse parâmetro, sendo o valor final impresso pela ferramenta o momento fletor resistente (ou reduzido) de cálculo, cabendo ao usuário a extração das cargas existentes, de acordo com a tipologia configuração da viga.

Figura 5 ►
Dados da viga de referência.
Fonte: arquivo dos autores

Dados da viga de referência

Concreto: f_{ck} = [] MPa b_w = [] cm h = [] cm c_{nom} = [] cm

Aço: f_{yk} = [] MPa A_s = [] cm²

[Calcular d]

d = [] cm

[Visualizar capacidade portante]

Altura útil da viga de referência

Nº de barras = [2]

Barra	ϕ (mm)	y (cm)
1		
2		

[Calcular]

3.1.3 Técnicas de reforço

Ao selecionar o tipo de reforço empregado, o *software* exibe telas distintas, cada qual com dados referentes ao seu respectivo procedimento. Na técnica de encamisamento, por exemplo, é exibido, para o preenchimento, o campo referente à nova solicitação (M_{Sd}), bem como o diâmetro máximo do agregado graúdo ($d_{máx,agr}$). Este último é utilizado na determinação do espaçamento mínimo entre barras na horizontal, prescrito pela NBR 6118 (ABNT, 2014). Nesse sentido, a ferramenta determina quais arranjos de barras são compatíveis com o espaçamento mínimo, facilitando o cálculo da área efetiva de aço, como ilustrado à direita da Figura 6.

Figura 6 ►
Dados da viga reforçada (encamisamento).
Fonte: arquivo dos autores

Dados da viga reforçada

M_{Sd} = [] kN.m f_{yk} = [] MPa

d = [] cm $d_{máx,agr}$ = [] mm

[Dimensionar reforço]

Arranjos de barras

$A_{s,calc}$ = [0,44] cm²

Selecione um arranjo de barras:

- 2 ϕ 6,3 mm ($A_{s,ef}$ = 0,62 cm²)
- 2 ϕ 8 mm ($A_{s,ef}$ = 1,01 cm²)
- 2 ϕ 10 mm ($A_{s,ef}$ = 1,57 cm²)
- 2 ϕ 12,5 mm ($A_{s,ef}$ = 2,45 cm²)
- 2 ϕ 16 mm ($A_{s,ef}$ = 4,02 cm²)
- 2 ϕ 20 mm ($A_{s,ef}$ = 6,28 cm²)
- 2 ϕ 25 mm ($A_{s,ef}$ = 9,82 cm²)

[Ok]

A inserção de dados para a técnica de chapas de aço é bem semelhante à do encamisamento. Todavia, no caso da primeira, é desnecessário informar o diâmetro máximo do agregado graúdo, haja vista que não há locação de barras no concreto para essa técnica.

Dito isso, como pode ser observado na Figura 7, no quadro referente aos dados da viga reforçada, deve ser informado o módulo de elasticidade da chapa (E_f). Já no quadro referente ao arranjo de chapas, à direita da figura, nota-se que é permitido ao usuário informar as dimensões da chapa para a determinação da quantidade mínima, bem como da área efetiva de reforço.

Figura 7 ▶
Dados da viga reforçada com a técnica de chapas de aço.
Fonte: arquivo dos autores

Para a técnica EBR, como pode ser observado na Figura 8, o quadro da ferramenta computacional referente aos dados da viga reforçada contempla três tipos de FRPs, conforme mencionado na subseção 2.3, são eles: carbono (CFRP), vidro (GFRP) e aramida (AFRP). Ainda nesse quadro, há um campo destinado à definição da condição de exposição para a extração do coeficiente redutor (C_E), cujas opções de parâmetros de inserção podem ser visualizados na Figura 8.

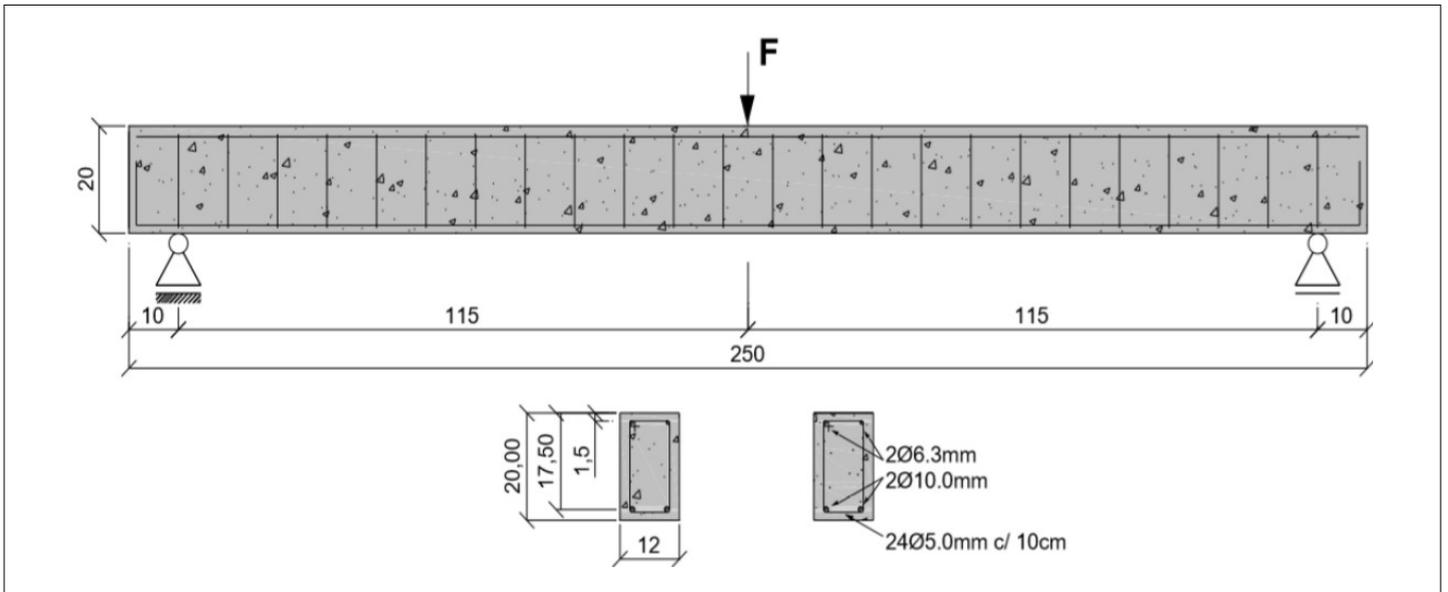
Figura 8 ▶
Dados da viga reforçada com a técnica EBR.
Fonte: arquivo dos autores

3.2 Metodologia de validação da ferramenta computacional

Figura 9 ▼

Seção longitudinal e transversal da viga de referência (dimensões em centímetros).
Fonte: Ferreira (2019)

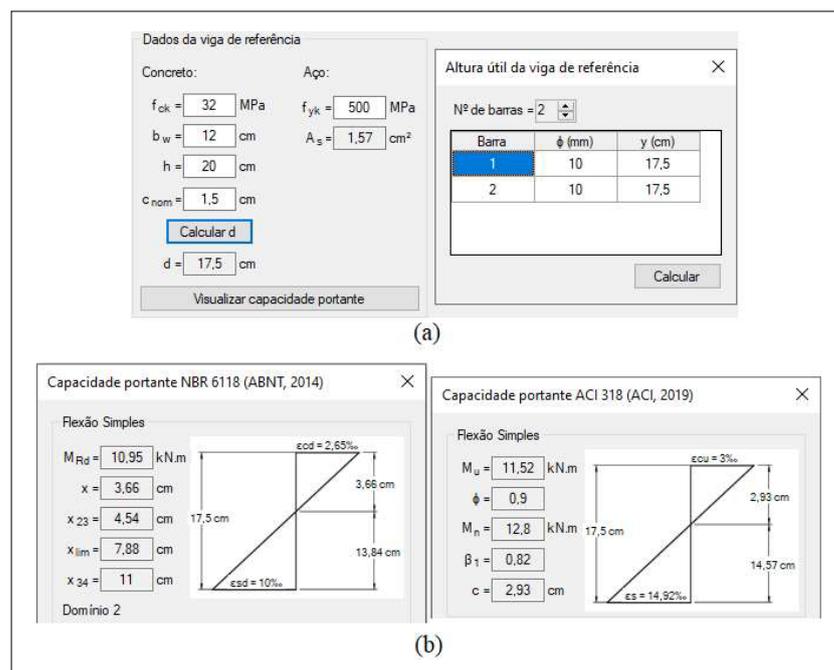
O método utilizado na validação da ferramenta computacional foi o cálculo manual. Para tal, selecionou-se a tipologia de viga de concreto armado, que é, corriqueiramente, vista na literatura como empregada em programas experimentais. A Figura 9 contempla a seção longitudinal e transversal dessa viga de referência, utilizada tanto na calibração do *software* RVigas quanto no dimensionamento e nas verificações dos sistemas de reforço citados anteriormente.



As demais informações úteis, como a resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) e a resistência característica ao escoamento do aço de armadura passiva (f_{yk}), estão contidas nos quadros da Figura 10a. Já na Figura 10b, estão os resultados da capacidade portante da viga de referência, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) e a ACI 318 (ACI, 2019).

Figura 10 ►

Dados da viga de referência (a) e capacidade portante da viga de referência (b).
Fonte: arquivo dos autores



3.3 Comparação entre os incrementos de força e os sistemas de reforço

A fim de analisar os incrementos de resistência dos três tipos de reforço, dados de entrada foram fixados nos três casos, conforme ilustrado na Figura 11. É importante ressaltar que, na técnica EBR, as verificações dos FRPs seguem recomendações do ACI 440.2R (ACI, 2017). Portanto, seu valor de momento fletor solicitante deve ser igual ao M_u , estimado na capacidade portante inicial através do ACI 318 (ACI, 2019).

Figura 11 ▶
Dados da viga reforçada por encamisamento (a), chapas de aço (b) e técnica EBR com CFRP (c).
Fonte: arquivo dos autores

Os dados geométricos da viga e dos sistemas de reforço também foram fixados, variando apenas os momentos fletores solicitantes oriundos da força F , já ilustrada anteriormente na Figura 9. Esse procedimento visa analisar as resistências geradas por cada sistema diante do incremento gradual de solicitações.

Tabela 1 ▼
Aumento gradual dos valores de momento fletor solicitante.
Fonte: elaboração própria

A Tabela 1, a seguir, apresenta a porcentagem de aumento da força F , resultando no incremento de momentos fletores solicitantes, ora pela norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014), ora pela norma americana ACI 318 (ACI, 2019). Vale salientar que o momento fletor gerado pelo peso próprio da viga ($M_{pp,k} = M_{DL} = 0,397 \text{ kN}\cdot\text{m}$) já está incluso em todos os valores da Tabela 1 a seguir.

% de aumento da força F	M_{Sd} (kN·m) NBR 6118 (ABNT, 2014)	M_u (kN·m) ACI 318 (ACI, 2019)
0%	10,95	11,52
10%	11,99	12,63
20%	13,03	13,74
30%	14,07	14,84
40%	15,11	15,95
50%	16,15	17,06

4 Resultados e discussões

A apresentação dos resultados será feita em duas etapas: a primeira, relativa à validação da ferramenta computacional; e a segunda, referente ao comparativo de incrementos de resistência entre os diferentes tipos de reforço.

4.1 Validação da ferramenta computacional

Na Tabela 2, são apresentados os valores obtidos de capacidade portante inicial e as deformações nos materiais da viga de referência, tanto para o cálculo manual quanto para o *software* RVigas.

Tabela 2 ►

Aferição da capacidade portante e das deformações pelo cálculo manual e pela ferramenta computacional.

Fonte: elaboração própria

Dados	Cálculo manual	Software RVigas
M_{sd} (kN·m) NBR 6118 (ABNT, 2014)	10,95	10,95
M_u (kN·m) ACI 318 (ACI, 2019)	11,51	11,52
ε_{cd} (‰) NBR 6118 (ABNT, 2014)	2,64	2,65
ε_c (‰) ACI 318 (ACI, 2019)	3,00	3,00
ε_{sd} (‰) NBR 6118 (ABNT, 2014)	10,00	10,00
ε_s (‰) ACI 318 (ACI, 2019)	14,92	14,92

Pela Tabela 2, observa-se que os resultados do cálculo manual e do *software* RVigas revelaram-se satisfatórios, uma vez que houve variações ínfimas nos valores obtidos. Vale salientar que, para validar os resultados do dimensionamento e das verificações de cada sistema de reforço, foram utilizados os momentos fletores solicitantes produzidos pelo acréscimo de 30% na força F (Tabela 1). Tendo isso em vista, na Tabela 3, estão impressos os valores da área de aço obtida pelas técnicas de encamisamento e de chapas de aço, bem como o momento nominal resistente reduzido ($\phi \cdot M_n$) produzido pela técnica EBR.

Tabela 3 ►

Aferição dos sistemas de reforço pelo cálculo manual e pela ferramenta computacional.

Fonte: elaboração própria

Dados	Cálculo manual	Software RVigas
	Encamisamento	
$A_{s,calc}$ (cm ²)	0,44	0,44
	Chapas de aço	
$A_{s,calc}$ (cm ²)	0,90	0,90
	EBR com CFPR	
$\phi \cdot M_n$ (kN·m)	16,72	16,73

Nota-se que, novamente, não houve variações significativas nos resultados expressos por ambos os procedimentos, para as três técnicas de reforço. Portanto, percebe-se que os valores obtidos pelo *software* RVigas demonstram-se satisfatórios para o exemplo de aplicação, podendo ele ser utilizado como ferramenta de otimização, como será discutido no tópico subsequente.

4.2 Análise dos incrementos de resistência entre os sistemas de reforço

Tabela 4 ▼

Comparação entre o momento fletor solicitante (M_{Sd}), o momento fletor resistente (M_{Rd}) e o reforço efetivo.

Fonte: elaboração própria

O dimensionamento e as verificações foram processados para os diferentes aumentos de momento fletor solicitante. Os resultados das novas capacidades resistentes, associadas aos respectivos sistemas de reforço, estão impressos na Tabela 4.

A partir dos dados apresentados na Tabela 4, observa-se que as dimensões efetivas do reforço, adotadas para o aumento da força em 10%, são capazes de suportar até 40% do incremento de F nos três sistemas. Esse fato justifica-se pelas dimensões dos elementos de reforço serem restritas a catálogos de fabricantes, gerando capacidades resistentes acima do necessário.

Na Figura 12 são apresentados os incrementos percentuais de resistência e os de aumento de força gerados por cada sistema de reforço.

% F	Encamisamento			Chapas de aço			EBR com CFRP		
	M_{Sd} (kN·m)	M_{Rd} (kN·m)	Reforço (mm)	M_{Sd} (kN·m)	M_{Rd} (kN·m)	Reforço (mm)	M_u (kN·m)	$\phi \cdot M_n$ (kN·m)	Reforço (GPa·g/m ²)
0	10,95	10,95	-	10,95	10,95	-	11,52	11,52	-
10	11,99	15,37	2 ϕ 6,3	11,99	15,40	1×38,10x3,18	12,63	16,73	1×C-Sheet 240-200
20	13,03	15,37	2 ϕ 6,3	13,03	15,40	1×38,10x3,18	13,74	16,73	1×C-Sheet 240-200
30	14,07	15,37	2 ϕ 6,3	14,07	15,40	1×38,10x3,18	14,84	16,73	1×C-Sheet 240-200
40	15,11	15,37	2 ϕ 6,3	15,11	15,40	1×38,10x3,18	15,95	16,73	1×C-Sheet 240-200
50	16,15	17,46	3 ϕ 6,3	16,15	16,77	1×50,80x3,18	17,06	18,30	1×C-Sheet 240-300

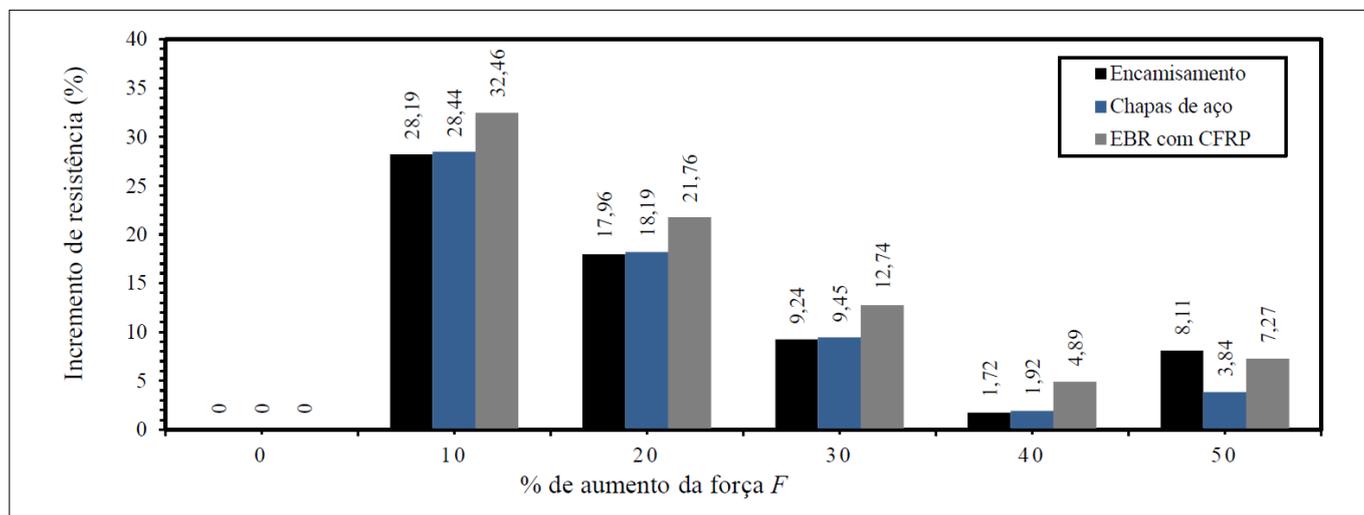


Figura 12 ▲

Comparação entre os sistemas quanto ao incremento de resistência e o aumento de força F .

Fonte: elaboração própria

Pela Figura 12, observa-se que, até a marca de 40% de aumento da força F , as técnicas de encamisamento e de chapas de aço apresentam incrementos de resistência bem semelhantes entre si. Entretanto, para essa mesma faixa de aumento de F , fica evidente o expressivo desempenho da técnica EBR com CFRP.

Diante desse resultado, em primeira instância, permite-se pensar que a técnica EBR gera elevações de resistência desnecessárias. Todavia, não se deve descartar o parâmetro de rendimento relativo ao volume de material consumido em cada técnica, pois, como o

vão da viga foi fixado, essa variação de volume pode ser representada pela área da seção transversal de cada elemento de reforço. Nesse sentido, como forma de quantificar esse parâmetro, optou-se por gerar a razão entre os incrementos de resistência e a área da seção transversal de reforço em cm^2 . Na Figura 13, é possível visualizar esses valores.

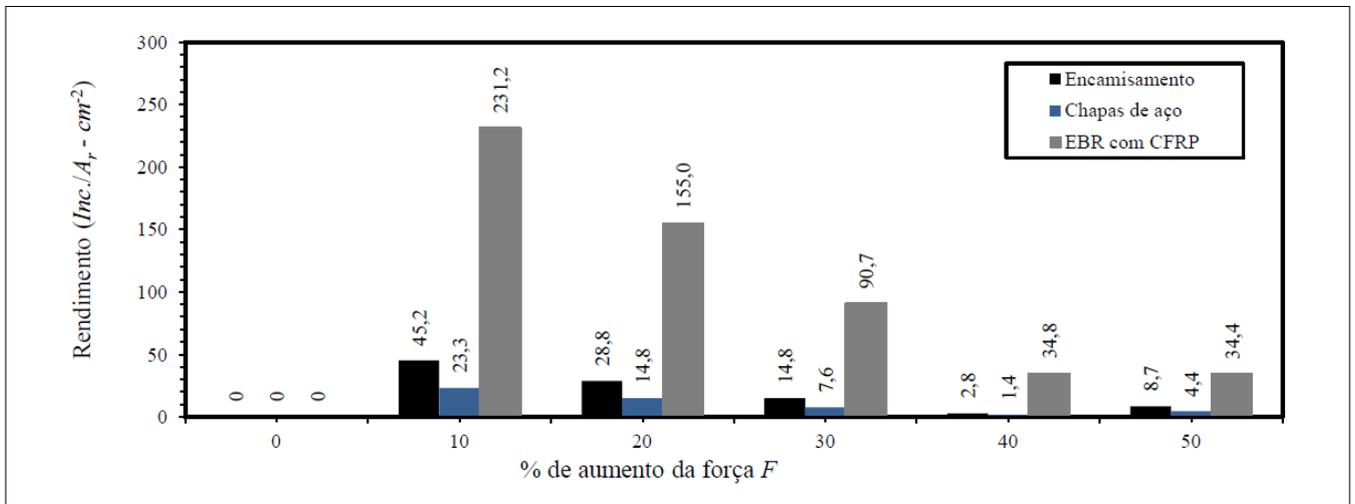


Figura 13 ▲
Comparação entre os sistemas quanto ao rendimento do reforço e o aumento de força F .
Fonte: elaboração própria

Nota-se que, em todas as porcentagens de aumento da força F , o rendimento da técnica EBR com CFRP se mostrou superior. Mesmo apresentando incremento de resistência inferior ao encamisamento na classe de 50% de aumento de F (Figura 12), para essa porcentagem, o rendimento da técnica EBR mostrou-se bastante superior ao das outras duas técnicas convencionais.

5 Considerações finais

Este trabalho teve como objetivo principal analisar os incrementos de resistência em elementos de concreto armado submetidos à flexão simples através das técnicas de reforço convencionais, quais sejam, encamisamento e chapas de aço aderidas externamente, e da técnica EBR com a utilização de polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP). Para tanto, foi desenvolvido um *software*, denominado RVigas, programado com base nas prescrições da norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014) e das normas americanas ACI 318 (ACI, 2019) e ACI 440.2R (ACI, 2017).

Após a simulação de uma tipologia de viga com incrementos graduais de força concentrada no meio do vão, para os três tipos de reforço, foi possível apontar as seguintes considerações:

- Quando aferida com o cálculo manual, a ferramenta computacional mostrou-se confiável para a tipologia selecionada. Os resultados de capacidade portante inicial, áreas de aço e momento fletor resistente reduzido foram praticamente iguais em ambos os procedimentos.
- Até um incremento de 40% da força F , a área efetiva adotada para cada sistema de reforço foi capaz de resistir às solicitações, com destaque para a técnica EBR com CFRP, cujos incrementos de resistência foram superiores às técnicas convencionais.
- Com 50% de aumento da força F , a técnica de encamisamento apresentou incrementos de resistência superiores aos demais. Todavia, não se deve descartar

o rendimento do elemento de reforço, diretamente relacionado ao volume consumido. Para esse parâmetro, a técnica EBR com CFRP apresentou valores bem superiores às demais técnicas, devido aos seus expressivos incrementos de resistência, somados ao seu reduzido volume de material.

Diante dos apontamentos expostos, evidencia-se que a aplicação de CFRPs pela técnica EBR configura-se como uma excelente solução de reforço estrutural, apresentando rendimentos significativos e interferências arquitetônicas quase nulas, devido ao seu reduzido volume de material.

Tendo concluído o objetivo a que se propôs este trabalho e voltando-se ao esforço de pensar em pesquisas posteriores, como sugestão de trabalhos futuros, podem ser apontados como possíveis temas:

- Análise de incrementos de resistência entre os três tipos de polímeros reforçados com fibras (CFRP, GFRP, AFRP) pela técnica EBR, utilizando o *software* RVigas;
- Comparação entre as técnicas EBR e NSM;
- Codificação das rotinas de verificação de barras não metálicas, com posterior comparação entre essa técnica e as convencionais de armação de vigas de concreto armado.

Mediante tais considerações, evidencia-se a necessidade de estudos utilizando os FRPs, uma vez que sua aplicação como reforço de estruturas mostrase bastante benéfica do ponto de vista da resistência do elemento bem como do rendimento, isto é, a relação entre o incremento de resistência e o volume de material consumido.

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto armado – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318:** Building code requirements for structural concrete. Detroit: ACI, 2019.

ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440.2R:** Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. Philadelphia: ACI, 2017.

ALI, H.; ASSIH, J.; LI, A. Flexural capacity of continuous reinforced concrete beams strengthened or repaired by CFRP/GFRP sheets. **International Journal of**

Adhesion and Adhesives, v. 104, 102759, 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2020.102759>.

AL-JELAWY, H. **Experimental and numerical investigations on bond durability of CFRP strengthened concrete members subjected to environmental exposure**. 2013. 98 f. Dissertation (Master on Civil Engineering) – University of Central Florida, Orlando, 2013. Disponível em: <https://stars.library.ucf.edu/etd/2730/>. Acesso em: 3 ago. 2022.

BARRIS, C.; SALA, P.; GÓMEZ, J.; TORRES, L. Flexural behavior of FRP reinforced concrete beams strengthened with NSM CFRP strips. **Composite Structures**, v. 241, 112059, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112059>.

BOUZIADI, F.; BOULEKBACHE, B.; HADDI, A.; HAMRAT, M.; DJELAL, C. Finite element modeling of creep behavior of FRP-externally strengthened reinforced concrete beams. **Engineering Structures**, v. 204, 109908, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109908>.

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e terapia do concreto armado**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1988.

CARDOSO, A.; APPLETON, J.; SANTOS, S. P. Análise da eficiência da técnica de encamisamento localizado na reparação ou reforço de pilares de betão armado com recurso a chapas de aço ou manta de fibras de carbono. In: ENCONTRO NACIONAL BETÃO ESTRUTURAL, 2004, Porto. **Anais [...]**. Porto: Grupo Português de Betão Estrutural (GPBE), 2004. Disponível em: <http://www.civil.ist.utl.pt/~cristina/GDBAPE/Artigos/be2004-3-13.pdf>. Acesso em: 28 out. 2022.

CHASTRE, C.; BISCAIA, H.; FRANCO, N. Reforço de vigas de betão armado com armaduras pósinstaladas de aço inox ou de compósitos de FRP. **Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões**, v. 28, p. 39-46, 2017. Disponível em: http://www-ext.lnec.pt/APAET/pdf/Rev_28_A6.pdf. Acesso em: 3 ago. 2022.

CRUZ, J. S.; BARROS, J.; SILVA, L.; COELHO, M. Eficiência de diferentes técnicas de reforço à flexão de vigas de betão armado. In: ENCONTRO NACIONAL BETÃO ESTRUTURAL, 2010, Lisboa. **Anais [...]**. Lisboa: Grupo Português de Betão Estrutural (GPBE), 2010. Disponível em: http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/12962/1/NC_114.pdf. Acesso em: 28 out. 2022.

CZADERSKI, C.; MEIER, U. EBR strengthening technique for concrete long-term behavior and historical survey. **Polymers**, v. 10, n. 77, p. 1-17, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym10010077>.

DALFRÉ, G. M. **Flexural and shear strengthening of RC elements**. 2013. 400 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade do Minho, Guimarães, 2013. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/24424>. Acesso em: 3 ago. 2022.

DALFRÉ, G. M.; ALVES, A.; OLIVEIRA, A. C. F. Dimensionamento de sistema de reforço à flexão com materiais compósitos segundo a técnica EBR. **Revista Concreto & Construções**. v. 94, p. 53-62, 2019. Disponível em: http://ibracon.org.br/Site_revista/Concreto_Construcoes/ebook/edicao94/files/assets/basichtml/page53.html. Acesso em: 3 ago. 2022.

DALFRÉ, G. M.; PARSEKIAN, G. A.; FERREIRA, D. C. Degradation of the EBR-CFRP strengthening system applied to reinforced concrete beams exposed to weathering. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 14, n. 2, e14208, 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952021000200008>.

FERNANDES, P. M. G. **Bond behavior of NSM CFRP-concrete systems: durability and quality control**. 2016. 280 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Guimarães, 2016. Disponível em: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/42576>. Acesso em: 3 ago. 2022.

FERRARI, V. J.; HANAI, J. B. Flexural strengthening of reinforced concrete beams with carbon fibers reinforced polymer (CFRP) sheet bonded to a transition layer of high performance cement-based composite. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 5, n. 5, p. 596-626, 2012. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952012000500003>.

FERREIRA, D. C. **Avaliação da degradação de vigas reforçadas com FRP quando expostas ao intemperismo**. 2019. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/12121>. Acesso em: 3 ago. 2022.

GIESE, A. C. H.; GIESE, D. N.; DUTRA, V. F. P.; SILVA FILHO, L. C. P. Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with textile reinforced mortar. **Journal of Building Engineering**, v. 33, 101873, 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101873>.

GOMES, A.; APPLETON, J. Reforço de estruturas de betão armado por encamisamento das secções. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**, v. 42, p. 7-14, 1997. Disponível em: <http://www.civil.ist.utl.pt/~cristina/GDBAPE/Artigos/RN11.pdf>. Acesso em: 28 out. 2022.

HIGASHI, M. M. Y. **Reforço em estruturas de betão armado com chapas de aço**. 2016. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2016. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/83044025.pdf>. Acesso em: 28 out. 2022.

HUANG, X.; ZHOU, Y.; XING, F.; WU, Y.; SUI, L.; HAN, N. Reliability-based design of FRP flexural strengthened reinforced concrete beams: Guidelines assessment and calibration. **Engineering Structures**, v. 209, 109953, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109953>.

JUVANDES, L. F. P. Aplicações de compósitos FRP no reforço de estruturas. *In*: JORNADAS DE MATERIAIS NA CONSTRUÇÃO, 1., 2011, Porto. **Anais** [...]. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011. Disponível em: https://paginas.fe.up.pt/~jmc2011/wp-content/uploads/2011/03/Luis_Juvandes.pdf. Acesso em: 27 set. 2021.

KAMGAR, R.; BAGHERINEJAD, M. H.; HEIDARZADEH, H. A new formulation for prediction of the shear capacity of FRP in strengthened reinforced concrete beams. **Soft Computing**, v. 24, n. 9, p. 6871-6887, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00500-019-04325-4>.

LONG, M.; DJELAL, C.; KESTELOOT, S.; BIGOURDAN, B.; LE GAC, P. Y.; SZULC, J. Durability of CFRP-concrete bonding in a marine environment. *In: EUROPEAN CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS*, 15., 2012, Venice. **Proceedings** [...]. Padova: University of Padova, 2012. Disponível em: <http://www.escm.eu/eccm15/data/assets/960.pdf>. Acesso em: 3 ago. 2022.

MACHADO, A. P.; MACHADO, B. A. **Reforço de estruturas de concreto armado com sistemas compostos FRP: teoria e prática**. 1. ed. São Paulo: Pini, 2015.

OBAIDAT, Y. T.; HEYDEN, S.; DAHLBLOM, O.; ABU-FARSAKH, G.; ABDEL-JAWAD, Y. Retrofitting of reinforced concrete beams using composite laminates. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 2, p. 591-597, 2011. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.082>.

REIS, A. P. A. **Reforço de vigas de concreto armado por meio de barras de aço adicionais ou chapas de aço e argamassa de alto desempenho**. 1998. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998. DOI: <https://dx.doi.org/10.11606/D.18.2018.tde-22022018-151319>.

SILVA, J. R. **Reforço híbrido à flexão de vigas “T” de concreto armado com compósitos de fibras de carbono e fibras de vidro**. 2014. 245 f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2014. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/17077>. Acesso em: 3 ago. 2022.

SOUSA, A. F. V. S. **Reparação, reabilitação e reforço de estruturas de betão armado**. 2008. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2008. Disponível em: <https://repositorioaberto.up.pt/handle/10216/58292>. Acesso em: 3 ago. 2022.

ZHOU, Y.; ZHANG, J.; LI, W.; HU, B.; HUANG, X. Reliability-based design analysis of FRP shear strengthened reinforced concrete beams considering different FRP configurations. **Composite Structures**, v. 237, 111957, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.111957>.