

Vigas de concreto armado reforçadas à flexão com barras de aço e FRP no cobrimento do concreto

Este trabalho tem por objetivo apresentar um método teórico de previsão do momento fletor e da flecha de ruptura de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com o uso da técnica da inserção de barras no cobrimento do concreto. Esta técnica é conhecida como a técnica NSM (Near Surface Mounted). No presente trabalho foram utilizadas barras de polímero reforçado com fibras (FRP). Os resultados teóricos foram comparados com os resultados experimentais disponíveis na literatura. Todas as vigas de concreto armado foram submetidas à flexão em quatro pontos. Os parâmetros considerados no método proposto foram as dimensões e taxas de armaduras internas das vigas, a resistência do concreto à compressão, a taxa e o tipo da armadura de reforço, o tipo de cola e o comprimento colado da barra de FRP. Foram analisadas vigas armadas com barras de CFRP, GFRP e aço. Os resultados teóricos obtidos apresentam uma boa aproximação com os resultados experimentais, indicando que a teoria da flexão simples pode ser utilizada para obtenção de valores razoáveis e a favor da segurança de momento fletor e flecha de ruptura de vigas retangulares reforçadas à flexão pela técnica NSM.

Palavras-chave: Reforço; Viga de Concreto Armado; Polímero Reforçado com Fibras; Inserção no Cobrimento do Concreto.

Reinforced concrete beams reinforced with steel bars and FRP in concrete covering

This paper aims to present a theoretical method of prediction the maximum bending moment carrying capacity and the maximum mid-span deflections of reinforced concrete beams strengthened with fiber reinforced plastic (FRP) bars in the near-surface-mounted (NSM) technique. The theoretical results were compared with experimental results available in the literature. The reinforced concrete beams were submitted to four-point bending test. The theoretical parameters considered were the dimensions and internal reinforcement rate of the beams, the concrete compression strength, the type and rate of the external reinforcement, the glue type and the bond length of the FRP bar. CFRP, GFRP and steel reinforced concrete beams were analyzed. The theoretical results presented good agreement with the experimental results, showing that the simple bending theory can be used to obtain bending moment carrying capacity and the mid-span deflections of reinforced rectangular concrete beams strengthened by the NSM technique.

Keywords: Strengthening; Reinforced Concrete Beam; Fiber Reinforced Polymer; Near Surface Mounted.

Topic: **Sustentabilidade nos Transportes**

Received: **10/02/2018**

Approved: **24/03/2018**

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Renan Henrique de Melo

Instituto Militar de Engenharia, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/2049710504200235>
renanime@hotmail.com

Ana Maria Abreu Jorge Teixeira

Instituto Militar de Engenharia, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/1454254574734029>
anam@ime.eb.br

Luiz Antonio Vieira Carneiro

Instituto Militar de Engenharia, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/2431901858566512>
carneiro@ime.eb.br



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2018.003.0019

Referencing this:

MELO, R. H.; TEIXEIRA, A. M. A. J.; CARNEIRO, L. A. V.. Vigas de concreto armado reforçadas à flexão com barras de aço e FRP no cobrimento do concreto. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.9, n.3, p.234-250, 2018. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2018.003.0019>

INTRODUÇÃO

As estruturas de concreto armado são amplamente adotadas em edificações pelo mundo, devido à simplicidade para execução das mesmas. No Brasil existem 6.612 viadutos e pontes, aproximadamente, de concreto armado, um patrimônio avaliado em cerca de 13 bilhões de reais. Essas estruturas costumam estar submetidas a condições ambientais adversas, como altas temperaturas e umidade, cloretos oriundos do mar, sulfatos e chuvas ácidas, dentre outras. Estes fatores podem acarretar danos às estruturas, como a corrosão do aço, que devem ser reparados. Erros de construção ou de projeto e possíveis mudanças de aplicação da obra de arte também podem demandar reforço das estruturas de concreto.

Há vários materiais e técnicas voltados para o reparo ou reforço de estruturas de concreto armado, sendo a sua escolha decorrente, principalmente, das causas e extensões dos problemas, da disponibilidade dos materiais de reforço, da presença de pessoal especializado e de equipamentos adequados, da viabilidade técnico-econômica e da agressividade do meio ambiente.

As técnicas de reparo ou reforço mais usuais são a injeção de cimento ou resina epóxi nas fissuras, a realcalinização do concreto com aplicação superficial de argamassas ricas em cimento ou de concreto projetado, a adição de cabos de protensão externos e a colagem de chapas de aço (BEBER et al., 2000). A engenharia de materiais avançou muito nas últimas décadas em relação ao tipo de material utilizado nos serviços de reparo e reforço de estruturas, objetivando a redução do peso do material aplicado e o aumento de sua resistência e durabilidade.

Na década de 90, os materiais compósitos de resinas e fibras ou FRP (*fiber reinforced polymers*) começaram a ser mais pesquisados, com aplicações nas engenharias aeroespacial, aeronáutica, marítima, militar, automobilística, esportiva e de construção. Esses materiais apresentam elevada resistência mecânica, baixo peso específico e são aplicados em lâminas de pequena espessura, por isso, pouco modificam as dimensões dos elementos estruturais a serem reparados ou reforçados.

As técnicas de reparo e reforço de estruturas com o FRP utilizadas são a técnica colagem externa ou EB (*Externally Bonded*) e a técnica de embutimento no cobrimento do concreto ou NSM (*Near Surface Mounted*). No último caso, como o material fica embutido em sulcos no concreto, o mesmo fica protegido e a dimensão da estrutura praticamente não se altera. Essas são duas vantagens da técnica NSM sobre a EB, ocorrendo menor exposição a vandalismos e menor suscetibilidade à temperatura e danos.

Diversas pesquisas têm investigado o reforço à flexão de vigas de concreto por meio da técnica NSM, tendo esta técnica apresentado melhor desempenho do que a técnica EB. Não existe uma normatização brasileira para a técnica NSM, sendo necessária a utilização de normas estrangeiras quando da sua utilização. Existem empresas brasileiras que trabalham com a produção de FRP, porém em seus catálogos não apresentam dados de utilização do material para este fim. A técnica NSM é pouco utilizada no mercado brasileiro, não tendo sido encontradas publicações nacionais, que tratem de reparo ou reforço à flexão com o uso desta técnica.

Este trabalho tem como finalidade apresentar um método teórico de previsão do momento fletor e da flecha de ruptura de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com barras de FRP com a técnica NSM. Os resultados teóricos foram comparados com os resultados experimentais apresentados em pesquisas publicadas a partir do ano de 2000.

REVISÃO TEÓRICA

Polímeros reforçados com fibras (FRP)

Materiais compósitos ou polímeros reforçados com fibras são materiais cuja estrutura é constituída por uma combinação de dois ou mais elementos não solúveis entre si. Um dos seus elementos é chamado de reforço e outro de matriz polimérica, que envolve o primeiro. O reforço é constituído por fibras, que podem ser encontradas em diversas formas como: tecidos, barras, fitas e laminados. As principais fibras adotadas em FRP são de vidro, carbono, aramida e basalto. As matrizes poliméricas mais adotadas são de poliéster, epóxi, fenólica e éster vinílica.

As fibras têm o papel de conferir rigidez e resistência ao material compósito. A matriz protege as fibras da umidade e de ambientes alcalinos (fibra de vidro) e ácidos (fibras de aramida), evita a flambagem das fibras e possibilita a transferência de carga entre as mesmas, tendo em sua composição adições tais como aditivos e materiais de enchimento (*fillers*), que modificam e melhoram suas propriedades. A Figura 1 mostra barras e laminados de FRP comumente empregados no reforço de lajes e vigas de concreto. Essas barras e laminados são fabricados pelo processo de pultrusão, que consiste em 'puxar' as fibras embebidas na resina matriz através de um molde. O aquecimento do molde, que tem a forma da seção transversal do perfil desejado, provoca a polimerização da resina durante a passagem no seu interior. A Figura 2 ilustra o processo de pultrusão.

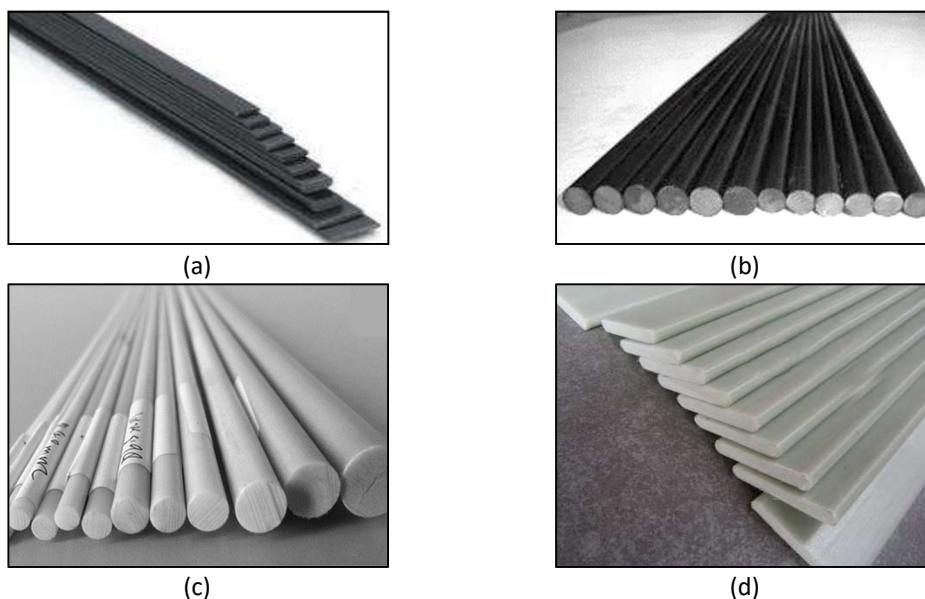


Figura 1: FRP comumente utilizados no reforço de lajes e vigas de concreto armado: (a) lâmina de CFRP (carbonfiber-products), (b) barra de CFRP (FRP Products), (c) barra de GFRP (Alibaba.com), (d) barra chata de GFRP (Aliexpress.com).

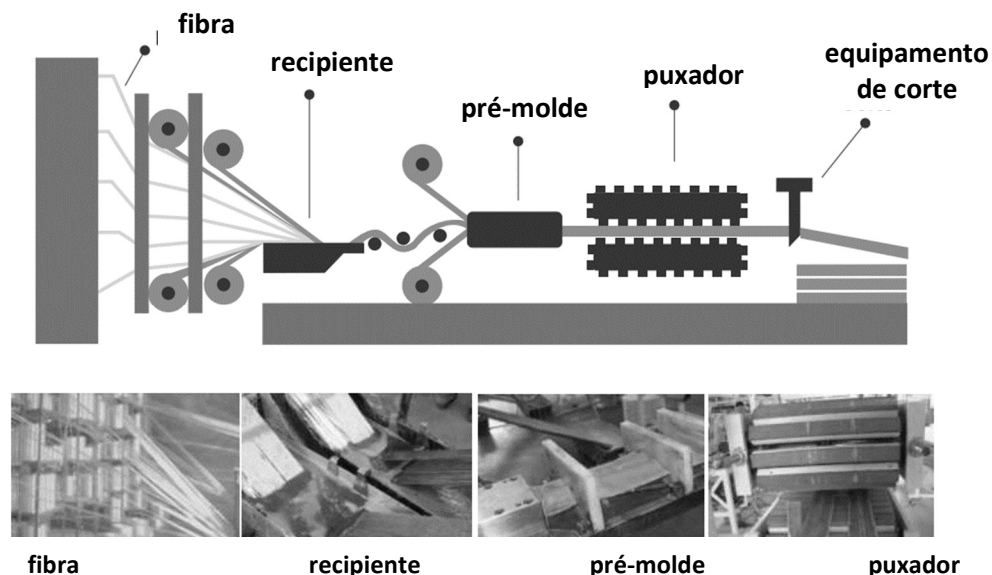


Figura 2: Processo da pultrusão utilizado na fabricação das barras de GFRP (STRATUS).

Dados experimentais

Do levantamento feito na literatura sobre as pesquisas englobando o reforço à flexão de vigas de concreto armado pela técnica NSM, foram encontrados 24 trabalhos correspondendo ao ensaio de flexão em quatro pontos de 57 vigas de seção transversal retangular, com armadura interna formada por barras de aço. Os estudos abordaram o uso de barras e fitas rígidas de CFRP, barras de GFRP e barras de aço como materiais de reforço.

Na Tabela 1 são apresentados, de forma resumida e por ordem cronológica, os estudos encontrados na literatura sobre o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas à flexão pelo método NSM e os resultados obtidos pelos autores. As vigas desses estudos possuem largura (b) variando de 100 mm a 250 mm, altura (h) de 150 mm a 350 mm, vão livre (L) de 900 mm a 3600 mm, taxa de armadura longitudinal interna de tração (ρ_s) de 0,23% a 1,26%, taxa de armadura transversal (ρ_w) de 0,24% a 1,31% e taxa de reforço (ρ_f) de 0,06% a 0,75%.

Os valores de resistência média do concreto à compressão (f_c) das vigas situa-se entre 20 MPa e 65 MPa e as deformações específicas do reforço obtidas durante os ensaios variaram de 0,6% a 1,75%. Os modos de ruptura das vigas indicadas na Tabela 1 estão ilustrados na Figura 3. Verifica-se que os modos de ruptura são influenciados por vários aspectos, como o comprimento colado, as dimensões da seção do sulco, diâmetro, quantidade e tipo do material do reforço e tipo de cola. Os tipos de ruptura mais comuns apresentados nas pesquisas foram: falha na interface concreto/epóxi (CE), destacamento do concreto (DC), divisão do concreto em torno do compósito (DCTC) e ruptura do compósito (RC).

Da análise dos resultados dos trabalhos, foram feitas as seguintes constatações: - O tipo de material de reforço influencia significativamente o comportamento da viga reforçada, em termos de sua carga de ruptura, rigidez e ductilidade.

Tabela 1: Quadro resumo dos dados das vigas ensaiadas por diferentes autores.

Autor	Características geométricas e propriedades mecânicas das vigas										Características geométricas e propriedades mecânicas dos reforços NSM				Modo de Ruptura	Mu,exp (kN.m)	ε _{r,exp} (%)	Δu,exp (mm)								
	h	b	L	a	d	c _t	f _y	f _c	ρ _s	ρ _{sw}	Tipo de Mat.	Φ _t	ρ _t	f _{tu}					E _t							
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	MPa	MPa	%	%		mm	%	MPa	Gpa											
BARROS e FORTES [8]	170	100	1500	500	141	20	730	45	0,40%	0,57%	Fita CFRP	9,59 x 1,45	0,08%	2739,5	158,8	NR	12,58	15,50	4,62							
	177				148		0,57%		0,16%				23,73				10,60	4,22								
	175				145,6		0,39%		0,16%				19,63				12,80	4,72								
	180				150		1,01%		0,24%				20,48				12,80	4,34								
BARROS et al. [9]	170	120	900	300	141,5	788	0,23%	0,59%	Fita CFRP	9,6 X 1,4	0,07%	2740	158,8	ELA - DC	11,99	NI	10,50									
					140,75	627	0,39%				0,14%				14,00		6,00									
							0,59%				0,20%				14,49		3,70									
NORDIN e TÄLUSTEN [10]	300	200	3600	1300	253	30	496	65	0,61%	1,05%	Barra CFRP	10x10	0,17%	2800	160	RC	79,95	NI	50,00							
TENG et al. [11]	300	150	3000	1200	256	30	503	44	0,59%	0,67%	Fita CFRP	16x4	0,15%	2068	151	DC	59,88	NI	NI							
WANG et al. [12]	300	150	3000	1200	256	30	576,3	37,5	0,59%	0,67%	Barra GFRP	9,5	0,16%	831	42,6	RFEC - CE - RC	48,90	17,50	58,00							
AL-MAHMOUD et al. [13]	280	150	2800	800	243	25	600	30	0,62%	0,25%	Barra CFRP	6	0,14%	1875	146	DCTC	53,30	NI	NI							
																	30			0,28%	65,40					
AL-MAHMOUD et al. [14]	280	150	1800	800	248	20	600	30	0,61%	0,25%	Barra CFRP	6	0,14%	1875	146	DCTC	53,30	NI	NI							
CHOI et al. [15]	300	150	3300	1500	245,65	40	N/A	50	1,09%	0,56%	Barra CFRP	7,9	0,19%	2800	155	RC	97,07	12,41	86,35							
SENA-CRUZ et al. [16]	300	200	2000	900	269	20	N/A	50	0,44%	0,28%	Fita CFRP	15 x 1,41	0,14%	2435	158	DC	66,29	9,45	14,60							
SUN et al. [17]	300	150	1800	600	258	25	340	45	1,19%	1,31%	Barra AÇO	14	0,71%	472	200	EC - ELA	0,00	NI	28,64							
											Barra CFRP	8	0,23%	2629	147	ELA - DC	78,27	NI	14,87							
WAHAB et al. [18]	250	150	2000	600	185	c _t	510	60	0,57%	1,05%	Barra CFRP	9,5	0,20%	2166	130	CE	44,34	NI	NI							
																	Barra CFRP			2350	165	CE	43,64	10,03	31,70	
																	Barra GFRP			1350	60	RC - DCTC - DE	39,68	16,28	59,70	
SHARAKY et al. [19]	280	160	2400	800	236	30	545	30	0,60%	0,63%	Barra CFRP	8	0,23%	2350	165	DC	46,84	6,02	20,30							
											Barra CFRP						1350			60	DCTC	44,88	16,33	42,40		
											Barra GFRP						12			0,26%	1350	60	CE	42,32	11,87	35,30
											Barra GFRP						6			0,09%	650		26,00	41,68		
HOSEN et al. [20]	250	125	2000	650	211	27	550	40	0,86%	0,90%	Barra AÇO	8	0,16%	536	200	EC - ELA	32,83	NI	40,23							
																	10			0,26%	570		36,99	39,13		
																	1,2x25			0,08%		CE	78,00	9,50		
IBRAHIM et al. [21]	400	200	1800	600	333	50	560	25	0,24%	1,13%	Fita CFRP	1,2x37,5	0,12%	N/A	165	CE	93,00	NI	12,00							
																	1,2x50			0,16%		CE	87,00	14,00		
																	16x2			0,13%	2068	131	CE	75,72	NI	45,79
PENG et al. [22]	350	150	2900	1200	309	25	N/A	30	0,87%	0,67%	Fita CFRP	20x1,4	0,06%	1922	164	EC - RC	48,81	NI	24,46							
REZAZADEH et al. [23]	300	150	2200	1050	264	25	585	32,2	0,40%	0,47%	Fita CFRP	8	0,23%	2350	170	DC	46,88	6,00	20,30							
											Barra CFRP	20x1,4	0,13%	2500	165	CE	44,68	8,00	24,70							
											Barra GFRP	12	0,23%	1350	64	DCTC	44,88	13,00	42,40							
SHARAKY et al. [24]	280	160	2400	800	236	30	540	30	0,60%	0,63%	Barra CFRP	8	0,12%	2629	170	ELA - EC	77,01	NI	25,60							
											Barra CFRP						0,23%			2629	170	CE	78,27	14,90		
											Barra GFRP						12			0,26%	1350	64	DCTC	44,88	13,00	42,40
WU et al. [25]	300	150	1800	600	253	30	340	34,4	1,22%	1,31%	Barra CFRP	8	0,12%	2629	170	CE	78,27	NI	14,90							
											Barra CFRP						0,23%			2629	170	CE	78,27	14,90		
											Barra GFRP						12			0,26%	1350	64	DCTC	44,88	13,00	42,40
BILOTTA et al. [26]	160	120	2100	925	104	45	540	21	1,26%	0,24%	Fita CFRP	10x1,4	0,23%	2052	171	DC - RCI	15,40	NI	42,00							
																	Barra CFRP			0,14%	1588	119,4	ELA - DE	72,54	26,00	
																	Barra GFRP			10	0,14%	1185	52,34	ELA - EC	48,36	61,00
EL-GAMAL et al. [27]	300	200	2360	930	261	25	480	45	0,43%	0,50%	Barra CFRP	10	0,14%	1588	119,4	ELA - DE	72,54	NI	28,00							
											Barra GFRP						0,27%			1588	119,4	ELA - RC - DE	63,24	54,00		
											Barra CFRP						0,14%			1588	119,4	ELA - DE	72,54	28,00		
											Barra CFRP						0,27%			1588	119,4	ELA - DE	86,03	25,00		

Legenda: CE = Falha na interface concreto-epoxy; DC = Destacamento do concreto; DCTC = Divisão do concreto em torno do compósito; DE= Divisão do epoxy em torno do compósito; EC = Esmagamento do concreto; ELA = Escoamento longitudinal do aço; ELC = Escoamento longitudinal do compósito; NI = Não informado ; RC = Ruptura por cisalhamento seguido pelo esmagamento do concreto; RCI = Ruptura por cisalhamento; RFEC = Ruptura devido à flexão e esmagamento do concreto na zona superior de compressão; RLA = Ruptura longitudinal do aço; h = altura da seção; b = largura da seção; L = vão livre entre apoios; a = vão de cisalhamento; d = distância do bordo mais comprimido da viga ao centróide do aço tracionado; c_t = cobrimento do concreto; f_y = resistência ao escoamento do aço; f_c = resistência à compressão do concreto; ρ_s = taxa da armadura longitudinal interna de tração do aço; ρ_{sw} = taxa da armadura interna de cisalhamento do aço; Φ_t = dimensão transversal do reforço NSM; ρ_t = taxa de armadura longitudinal do reforço NSM; f_{tu} = resistência última à tração do reforço NSM; E_t = módulo de elasticidade do reforço NSM; M_{u,exp} = momento de ruptura experimental; ε_{r,exp} = deformação do reforço na ruptura; Δu_{exp} = flecha experimental última no meio do vão.

As vigas reforçadas com CFRP apresentaram os maiores acréscimos de momento de ruptura ($M_{u,exp}$) em relação às vigas sem reforço, enquanto as vigas reforçadas com GFRP apresentaram os maiores incrementos de ductilidade, conforme as flechas registradas nos ensaios; - O comprimento do reforço colado interfere no modo e na carga de ruptura da viga reforçada. Vigas reforçadas com barra ou fita de CFRP romperam por destacamento do cobrimento do concreto para razão menor que 90% entre o comprimento do reforço colado e o vão livre da viga; - A resistência do concreto à compressão influencia o modo de ruptura. Vigas com resistência do concreto à compressão mais elevada tenderam a ter o descolamento do reforço sob cargas de ruptura um pouco maiores; - A taxa e a configuração do reforço têm grande influência no comportamento das vigas. Vigas com maior taxa de reforço apresentam maior carga de ruptura, menor ductilidade e ruptura sem aviso prévio.

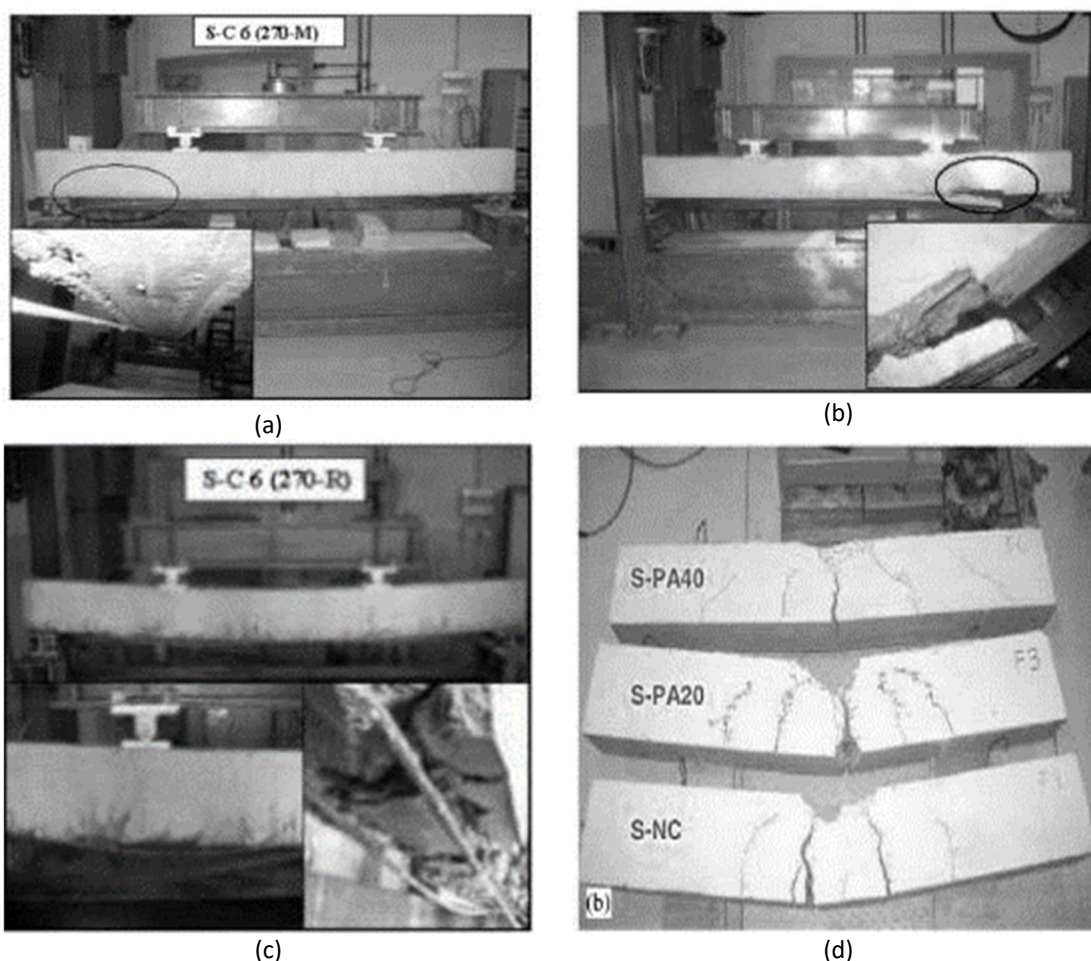


Figura 3: Modos de ruptura: (a) tipo CE, (b) tipo DC, (c) tipo DCTC e (d) tipo RC. Fonte: Al-Mahmoud et al. (2009).

METODOLOGIA

Método de dimensionamento de reforço à flexão

Conforme a ABNT NBR 6118:2014 (TANG et al., 2005), o dimensionamento de uma viga de concreto armado deve garantir segurança à estrutura em relação ao Estado Limite Último, devendo sua resistência final ser igual ou superior às suas solicitações. Sendo assim, para fins de projeto, ocorre a majoração das

ações e a minoração da capacidade resistente dos materiais envolvidos, de acordo com o ambiente e a destinação da estrutura.

Segundo Carneiro (2004), o dimensionamento à flexão de vigas de concreto armado reforçadas com FRP deve ser feito de modo a se obter uma ruptura dúctil por flexão. Devem ser impedidas rupturas frágeis, por exemplo, as acarretadas por: ancoragem deficiente da armadura longitudinal interna de tração; por tração ou compressão do concreto da mesa, em decorrência da escassez de armadura transversal interna; por esmagamento da biela de concreto, ou por descolamento e/ou destacamento do reforço.

Na Tabela 2 são apresentadas as normas disponíveis na literatura para o dimensionamento à flexão de vigas de concreto armado reforçadas com materiais compósitos de resina e fibras. Tais normas não tratam, especificamente, do reforço do tipo NSM, sendo assim necessárias adaptações. Os estudos tomam por base hipóteses fundamentais da teoria da flexão simples, que levam em consideração a manutenção das seções planas até a ruptura; a perfeita aderência e a compatibilidade de deformações entre o concreto e o material compósito e as curvas tensão – deformação dos materiais.

Tabela 2: Normas sobre dimensionamento de reforço à flexão de vigas.

Norma	Descrição
ACI 440.2R-08 (2008)	Guia para o projeto e construção de sistemas de PRF ligados externamente para o fortalecimento de estruturas de concreto.
FIB BULLETIN 14 (2001)	FRP como reforço ligado externamente de estruturas R C: base do design e conceito de segurança
ISIS CANADA. MANUAL NO. 4 (2001)	Reforço de estruturas de concreto armado com polímeros reforçados por fibras (FRPs) ligados externamente.
JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (1997)	Recomendação para projeto e construção de estruturas de concreto utilizando materiais contínuos de reforço de fibras.
CNR DT 200/2004 (2004)	Diretrizes para projeto, execução e controle de intervenções de fortalecimento por meio de materiais compósitos reforçados com fibras, concreto armado e estruturas de concreto protendido, estruturas de alvenaria. Conselho Nacional de Pesquisa, Comitê Consultivo em Regulamentações Técnicas para Construções

Para o caso do reforço tipo NSM, as seguintes equações de equilíbrio foram deduzidas, considerando ruptura dúctil e a distribuição de deformações e tensões da Figura 4, conforme previsto na NBR 6118:2014 (2014):

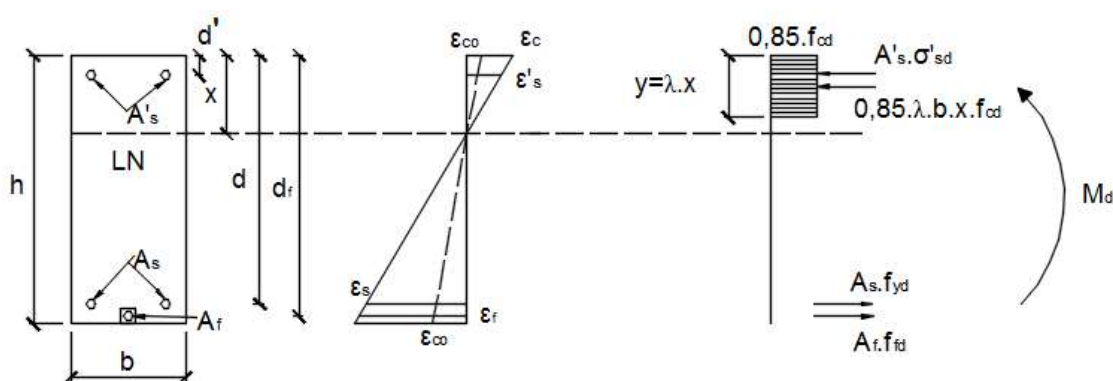


Figura 4: Distribuição de deformações e tensões na seção transversal da viga reforçada, no Estado Limite Último.

$$\sum F = 0 \Rightarrow \alpha \cdot b \cdot y \cdot f_{cd} + A'_s \cdot \sigma'_{sd} = A_s \cdot f_{yd} + A_f \cdot f_{fd} \quad (1)$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}, \text{ com } \gamma_c = 1,4;$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}, \text{ com } \gamma_s = 1,15;$$

$$f_{fd} = \frac{E_f \cdot \varepsilon_f}{\gamma_f};$$

$$\sum M_d = 0 \text{ em } A_s$$

$$M_d = \alpha \cdot b \cdot y \cdot f_{cd} \cdot (d - 0,5 \cdot y) + A'_s \cdot \sigma'_{sd} \cdot (d - d') + A_f \cdot f_{fd} \cdot (d_f - d) \quad (2)$$

$$y = \frac{(A_s \cdot f_{yd} + A_f \cdot f_f)}{0,85 \cdot b \cdot f_{ck}} \quad (3)$$

$$y = .x \quad (4)$$

para f_{ck}

$$\leq 50 \text{ MPa} \quad (5)$$

$$= 0,8 - (f_{ck} - 50)/400, \text{ para } f_{ck} > 50 \text{ MPa (} f_{ck} \text{ em MPa)} \quad (6)$$

$$\alpha = 0,85 \text{ para concretos com } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (7)$$

$$\alpha = 0,85 \cdot \left(1,0 - \frac{f_{ck} - 50}{200}\right) \text{ para } 50 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa (} f_{ck} \text{ em MPa)} \quad (8)$$

$$\sigma'_{sd} = \varepsilon'_s \cdot E_s \leq f'_{yd} \quad (9)$$

$$f'_{yd} = \frac{f'_{yk}}{\gamma_s}, \text{ com } \gamma_s = 1,15;$$

$$\varepsilon'_{su} = \frac{x_u - d'}{x_u} \cdot \varepsilon_{cu} \quad (10)$$

Onde:

M_d é o momento de cálculo resistente;

b , d , x e h são a largura, a altura útil, a altura da linha neutra na ruptura e a altura total da viga, respectivamente;

ε_c e f_{cd} são a deformação específica e a resistência à compressão de projeto do concreto, respectivamente;

ε_o é a deformação do bordo mais tracionado da viga antes da execução do reforço;

A_s e f_{yd} são a área da seção transversal e a resistência ao escoamento de projeto da armadura longitudinal interna de tração, respectivamente;

A'_s , σ'_{sd} , f'_{yd} , ε'_s e E_s são a área da seção transversal, a tensão de projeto, a resistência ao escoamento de projeto, a deformação específica e o módulo de elasticidade da armadura longitudinal interna de compressão, respectivamente;

A_f , f_{fd} , E_f e ε_f são a área da seção transversal, a resistência à tração de projeto, o módulo de elasticidade e a deformação específica de projeto do material de reforço, respectivamente.

Para a análise da influência da taxa (ρ_f) e do tipo de reforço na deformação específica do reforço, elaboraram-se os gráficos da Figura 5 a partir dos resultados das pesquisas apresentadas na Tabela 1 para barras de CFRP e GFRP. Verifica-se que a deformação do reforço na viga (ε_f) diminui em relação à deformação última do mesmo (ε_{fu}), com o aumento da taxa de reforço. A deformação última do reforço foi obtida por meio de ensaios de tração axial do material. Além disso, para uma mesma taxa de reforço, a relação $\varepsilon_f/\varepsilon_{fu}$ é superior nos reforços de GFRP em relação ao de CFRP, acarretando maiores deformações do material.

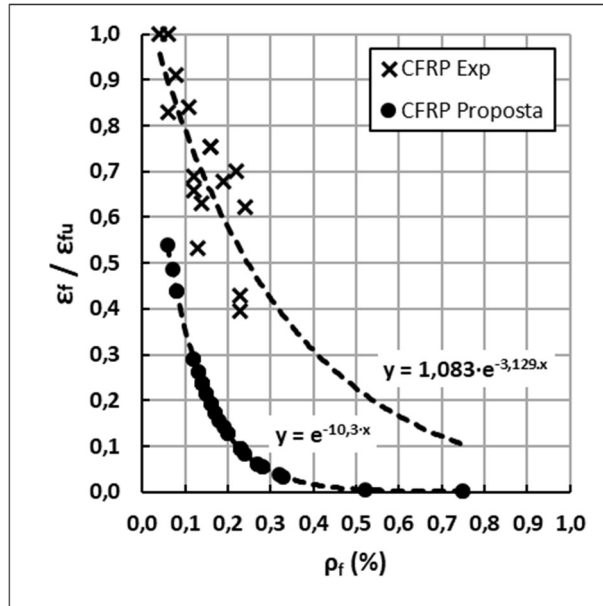


Figura 5: Gráfico de ϵ_f/ϵ_{fu} experimental e versus taxa de reforço de CFRP e GFRP.

Carneiro (2004) propõe que a deformação última do reforço (ϵ_f) seja limitada a 0,005 para evitar rupturas prematuras das vigas por destacamento do concreto no bordo reforçado. Nos trabalhos experimentais, as deformações do reforço na ruptura das vigas ultrapassaram o limite de 5%, sendo assim, foram propostas novas curvas, limitando-se os valores de deformação do reforço com a finalidade de evitar as rupturas prematuras das vigas por destacamento do concreto. As curvas propostas são representadas na Figura 6 e na Figura 7. Nas curvas correspondentes a CFRP Exp e GFRP Exp considerou-se os valores de ϵ_f obtidos experimentalmente e nas curvas CFRP Proposta e GFRP Proposta limitou-se os valores de ϵ_f em função de ρ_f , sendo sempre menor do que 5%.

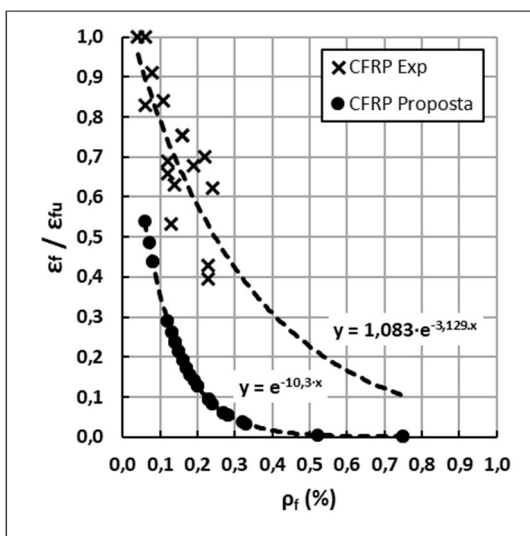


Figura 6: Gráfico de ϵ_f/ϵ_{fu} , experimental e limite, versus taxa de reforço de CFRP.

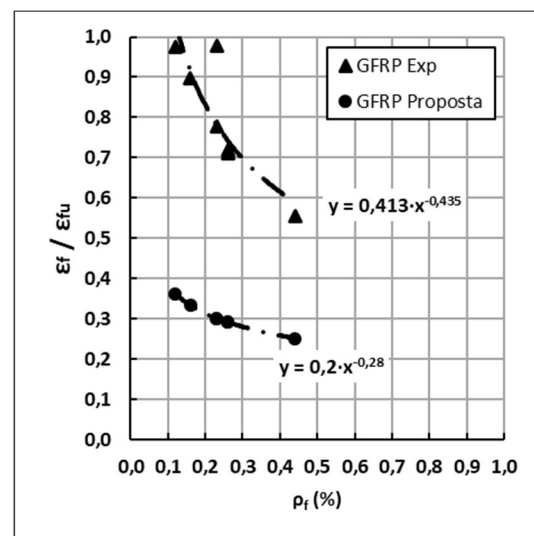


Figura 7: Gráfico de ϵ_f/ϵ_{fu} experimental e limite versus taxa de reforço de GFRP.

Os pesquisadores não apresentaram as deformações do reforço de aço na ruptura das vigas, porém comparando-se o $M_{u,exp}$ com $M_{u,calc}$ da viga, onde $M_{u,exp}$ é o momento último resistente da viga obtida experimentalmente e $M_{u,calc}$ é calculado considerando f_f igual à tensão de escoamento do aço, nota-se que

os resultados ficaram muito próximos. A Figura 8 mostra de forma gráfica a boa aproximação entre os resultados $M_{u,exp}$ e $M_{u,calc}$.

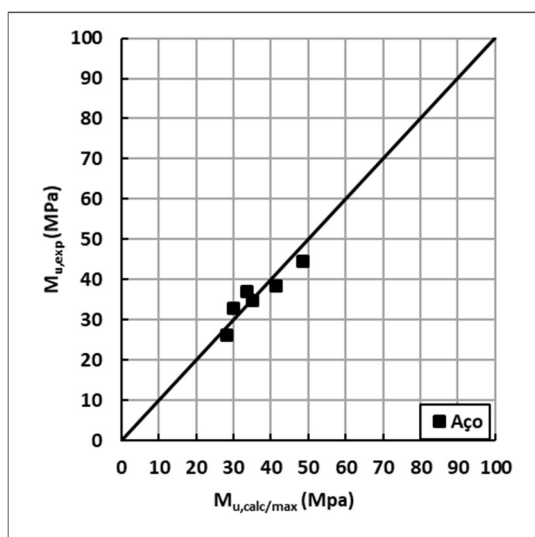


Figura 8: Gráfico de $M_{u,exp}$ versus $M_{u,calc}$ da viga com reforço em aço.

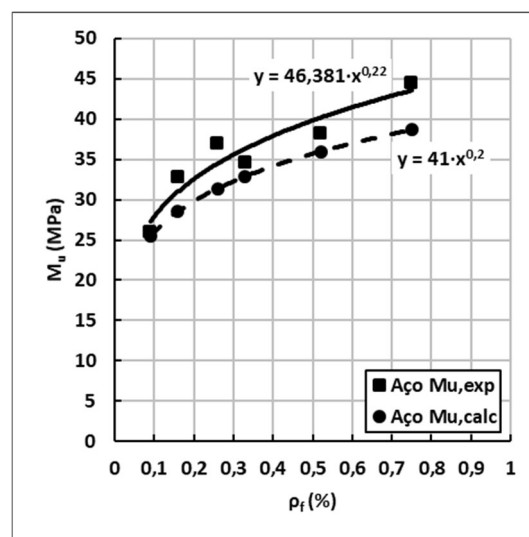


Figura 9: Gráfico de M_u versus taxa de reforço em aço.

Com a finalidade de propor uma expressão para o momento calculado em função da taxa de reforço em barras de aço da viga, foi traçado o gráfico dos $M_{u,exp}$ e $M_{u,calc}$ em função do taxa de reforço conforme Figura 9. O $M_{u,calc}$ foi obtido limitando a tensão de ruptura do reforço à tensão de escoamento do aço. A diferença percentual entre $M_{u,exp}$ e $M_{u,calc}$ aumentou com o aumento da taxa de reforço. Essa diferença foi de 8,03%, para $\rho_f = 0,1$ e 12,47%, para $\rho_f = 0,75$.

Avaliação de flecha imediata

O item 3.2.4 da NBR 6118:2014 (2014) trata sobre o estado limite das deformações excessivas, calculadas conforme o item 17.3.2. Os limites estipulados para a utilização normal da estrutura são dados no item 13.3. As principais propriedades dos materiais que influenciam na deformação da estrutura carregada são o módulo de elasticidade e a resistência à tração dos materiais empregados. Dependendo da intensidade do carregamento, as seções transversais podem se encontrar no estágio I ou no estágio II. No primeiro estágio, o diagrama de tensões no concreto é linear em relação à distância da linha neutra. No segundo estágio, o concreto tracionado já está fissurado e as relações entre ações e deslocamentos não são lineares.

No estágio II, para vigas não reforçadas, considera-se que os esforços de tração são resistidos apenas pela armadura posicionada na região tracionada, sendo o concreto fissurado desprezado. Para o cálculo do momento de inércia, é necessário conhecer a posição da LN, (x_{II}), obtida igualando-se o momento estático da seção homogênea a zero. Nas vigas com seção retangular reforçadas à flexão pelo método NSM, propõe-se a verificação prévia da flecha incorporando o material de reforço nas equações propostas pela ABNT NBR 6118:2014 (2014). Sendo assim, as tensões e deformações na seção retangular da viga no estágio II são mostradas na Figura 10.

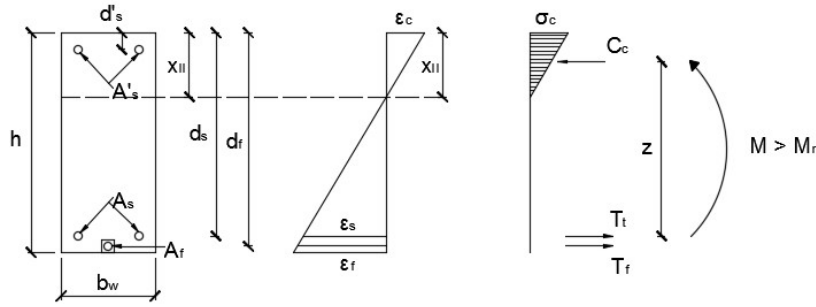


Figura 10: Distribuição de deformações e tensões na seção transversal da viga reforçada, no Estádio II.

$$b_w/2 \cdot x_{II}^2 + ((\alpha_e - 1) \cdot A'_s + \alpha_e \cdot A_s + \alpha_{e,f} \cdot A_f) \cdot x_{II} - (d'_s \cdot (\alpha_e - 1) \cdot A'_s + d_s \cdot \alpha_e \cdot A_s + d_f \cdot \alpha_{e,f} \cdot A_f) = 0 \quad (11)$$

$$x_{II} = \frac{-((\alpha_e - 1) \cdot A'_s + \alpha_e \cdot A_s + \alpha_{e,f} \cdot A_f)}{b_w} + \frac{\sqrt{((\alpha_e - 1) \cdot A'_s + \alpha_e \cdot A_s + \alpha_{e,f} \cdot A_f)^2 + 2 \cdot b_w \cdot (d'_s \cdot (\alpha_e - 1) \cdot A'_s + d_s \cdot \alpha_e \cdot A_s + d_f \cdot \alpha_{e,f} \cdot A_f)}}{b_w} \quad (12)$$

$$I_{II} = b_w \cdot x_{II}^3 / 3 + \alpha_e \cdot A_s \cdot (d_s - x_{II})^2 + (\alpha_e - 1) \cdot A'_s \cdot (x_{II} - d'_s)^2 + \alpha_{e,f} \cdot A_f \cdot (d_f - x_{II})^2 \quad (13)$$

O momento de inércia da seção reforçada no estágio II é apresentado na equação [13]. A nova posição da LN, (x_{II}) da viga reforçada de seção retangular é obtida da equação [11], sendo x_{II} apresentado na equação [12]. Conforme Said (2004), o momento de inércia equivalente no estágio III, da viga totalmente fissurada, é mostrado na equação [14].

$$I_e = \frac{I_{II}}{[1 - (I_{II}/I_{e,y})]} \quad (14)$$

onde:

$$I_{e,y} = \frac{I_{II}}{[1 - (1 - I_{II}/I_c) \cdot (M_{cr}/M_y)^2]}$$

$$\begin{cases} \left(\frac{M_y}{M_{III}}\right)^2, & \text{para carregamento a três pontos ou quatro pontos;} \\ \left(\frac{M_y}{M_{III}}\right) \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{M_y}{M_{III}}}\right), & \text{para carregamento uniforme;} \end{cases}$$

$\alpha_e = E_s/E_c$ e $\alpha_{e,f} = E_f/E_c$;

I_c é o momento de inércia da seção bruta de concreto;

I_{II} é o momento de inércia da seção fissurada de concreto no estágio II;

M_{cr} é momento fletor máximo de fissuração do elemento estrutural;

M_y é o momento fletor máximo no escoamento da armadura interna do aço, estimado em $0,6 \cdot M_d$;

M_{III} é o momento fletor no estágio III;

E_{cs} é o módulo de elasticidade secante do concreto.

Assim, a flecha imediata ou instantânea (sem efeito da fluência) no meio do vão, para vigas com duas cargas concentradas equidistantes entre os apoios, conforme Said (2004), pode ser calculada a partir da seguinte equação [15].

$$\Delta = \frac{(P/2) \cdot a}{24 \cdot E_c \cdot I_e} \cdot (3 \cdot L^2 - 4 \cdot a^2) \quad (15)$$

onde:

P é a carga total aplicada, definida para certa combinação de ações;

a é o vão de cisalhamento da viga;

L é o vão livre da viga.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Valores teóricos de momento fletor último, momento fletor de fissuração e flecha última das vigas pesquisadas

O momento fletor último e o momento de fissuração no meio do vão das vigas reforçadas foram calculados conforme a metodologia prevista nos itens 3.1 e 3.2 e adotando os coeficientes de majoração igual a 1. A flecha última foi calculada com a Eq [15] a partir da carga P obtida a partir do momento fletor último e do momento de inércia da viga no estágio III. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos. Verifica-se que o momento e a flecha experimental apresentaram-se em média 159% e 260% superiores ao momento e à flecha teóricos, respectivamente, demonstrando que as equações propostas são favoráveis à segurança das peças.

Tabela 3: Resultados teórico das vigas das pesquisas (Continua).

Autor	Viga	$M_{u,exp}$ (kN.m)	$M_{u,teo}$ (kN.m)	$M_{u,exp} /$ $M_{u,teo}$	$\Delta_{u,exp}$ (mm)	$\Delta_{u,teo}$ (mm)	$\Delta_{u,exp} /$ $\Delta_{u,teo}$
BARROS e FORTES [8]	V1	12,58	8,00	1,57	4,62	14,01	0,33
	V2	23,73	12,51	1,90	4,22	13,39	0,32
	V3	19,63	10,85	1,81	4,72	12,50	0,38
	V4	20,48	12,61	1,62	4,34	10,24	0,42
BARROS et al. [9]	V1	11,99	7,13	1,68	10,50	5,81	1,81
	V2	14,00	8,47	1,65	6,00	4,19	1,43
	V3	14,49	10,42	1,39	3,70	3,41	1,09
NORDIN e TÄLISTEN [10]	V1	79,95	50,89	1,57	50,00	26,43	1,89
TENG et al. [11]	V1	59,88	35,67	1,68		NI	
WANG et al. [12]	V1	48,90	35,58	1,37	58,00	18,00	3,22
AL-MAHMOUD et al. [13]	V1	53,30	36,62	1,46			
		0,84					
		0,52					
		0,51				NI	
		0,69					
	V2	65,40	33,27	1,97			
AL-MAHMOUD et al. [14]	V1	53,30	37,29	1,43		NI	
CHOI et al. [15]	V1	93,07	52,93	1,76	86,35	25,35	3,41
SENA-CRUZ et al. [16]	V1	66,29	43,69	1,52	14,60	7,02	2,08
SUN et al. [17]	V1	86,64	56,98	1,52	28,64	6,01	4,77
	V2	78,27	44,73	1,75	14,87	4,75	3,13
WAHAB et al. [18]	V1	48,40	13,94	3,47			
	V2	44,34	13,90	3,19		NI	

Tabela 3: Resultados teórico das vigas das pesquisas (Continuação).

Autor	Viga	$M_{u,exp}$ (kN.m)	$M_{u,teo}$ (kN.m)	$M_{u,exp} /$ $M_{u,teo}$	$\Delta_{u,exp}$ (mm)	$\Delta_{u,teo}$ (mm)	$\Delta_{u,exp} /$ $\Delta_{u,teo}$
SHARAKY et al. [19]	V1	43,64	35,48	1,23	31,70	12,31	2,58
	V2	39,68	32,01	1,24	59,70	11,37	5,25
	V3	46,84	32,46	1,44	20,30	12,40	1,64
	V4	44,88	36,85	1,22	42,40	13,25	3,20
	V5	42,32	37,84	1,12	35,30	12,27	2,88
HOSEN et al. [20]	V1	26,00	26,41	0,98	41,68	6,85	6,08
	V2	32,83	27,30	1,20	40,23	8,04	5,01
	V3	36,99	29,14	1,27	39,13	8,26	4,74
IBRAHIM et al. [21]	V1	78,00	50,02	1,56	9,50	6,86	1,39
	V2	93,00	49,35	1,88	12,00	7,43	1,62
	V3	87,00	46,95	1,85	14,00	6,26	2,24
PENG et al. [22]	V1	75,72	67,12	1,13	45,79	10,96	4,18
REZAZADEH et al. [23]	V1	48,81	30,66	1,59	24,46	10,50	2,33
SHARAKY et al. [24]	V1	46,88	32,24	1,45	20,30	11,57	1,75
	V2	44,68	35,48	1,26	24,70	24,68	1,00
	V3	44,88	36,63	1,23	42,40	13,51	3,14
	V4	42,32	37,62	1,12	35,30	12,56	2,81
WU et al. [25]	V1	77,01	46,95	1,64	25,60	6,60	3,88
	V2	78,27	43,06	1,82	14,90	6,19	2,41
BILOTTA et al. [26]	V1	14,94	10,57	1,41	30,00	24,86	1,21
	V2	15,40	10,06	1,53	42,00	22,98	1,83
EL-GAMAL et al. [27]	V1	53,94	36,03	1,50	22,00	9,67	2,27
	V2	72,54	31,78	2,28	26,00	11,37	2,29
	V3	48,36	33,26	1,45	61,00	8,29	7,36
	V4	63,24	38,81	1,63	54,00	9,08	5,95
	V5	72,54	61,62	1,18	28,00	9,50	2,95
	V6	86,03	57,59	1,49	25,00	11,77	2,12
HOSEN et al. [28]	V1	34,53	29,29	1,18	11,06	7,29	1,52
	V2	38,27	32,57	1,17	9,65	6,97	1,38
	V3	35,61	34,86	1,02	7,84	5,99	1,31
	V4	44,44	36,45	1,22	7,14	7,03	1,01
	V5	46,48	23,23	2,00	12,76	9,11	1,40
KHALIFA [29]	V1	43,50	26,41	1,65	24,50	11,62	2,11
	V2	50,14	21,62	2,32	17,35	11,24	1,54
REDA et al. [30]	V1	30,08	22,14	1,36	37,50	9,55	3,93
SHAHVERDI et al. [31]	V1	9,16	8,62	1,06	55,90	10,84	5,16
SHUKRI et al. [32]	V1	46,16	24,54	1,88	22,27	11,35	1,96
	V2	57,45	23,49	2,45	24,03	12,67	1,90
	V3	56,23	23,23	2,42	16,89	11,05	1,53
JUNG et al. [33]	V1	41,53	32,90	1,26	58,68	14,86	3,95
	V2	41,16	35,11	1,17	58,94	14,66	4,02
	V3	45,24	37,58	1,20	53,98	15,59	3,46
	V4	57,57	38,38	1,50	46,92	18,18	2,58
	V5	48,63	35,56	1,37	43,88	16,28	2,70
	V6	59,04	31,99	1,85	39,50	17,59	2,25
SHARAKY et al. [34]	V1	30,08	21,45	1,40	37,50	9,46	3,97

Comparação entre os resultados experimentais e teóricos

Os gráficos de M_u experimental em função do $M_{u,teórico}$ apresentados nas Figura 11, Figura 12 e Figura 13, para material do reforço de CFRP, GFRP ou aço, respectivamente. Observou-se que ocorreu uma tendência dos pontos posicionarem-se no centro ou superior à curva média. Isso demonstra que o cálculo teórico é válido e apresenta resultados a favor da segurança. A média da razão de $M_{u,exp}/M_{u,teo}$ para os materiais analisados foram: 1,37; 1,30 e 1,20 para CFRP, GFRP e aço, respectivamente.

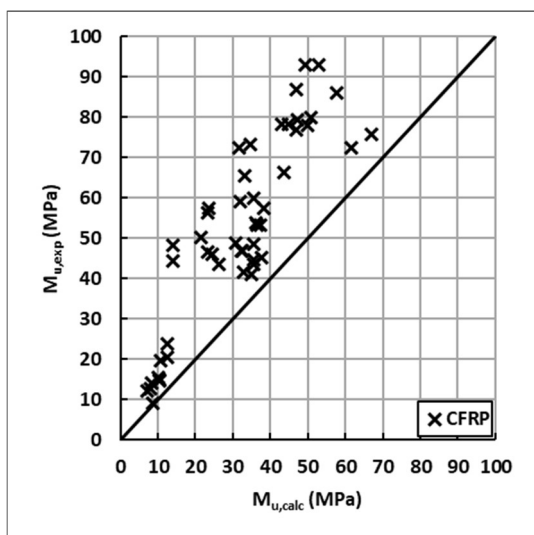


Figura 11: Gráfico $M_{u,exp}$ versus $M_{u,teo}$, para reforço de CFRP.

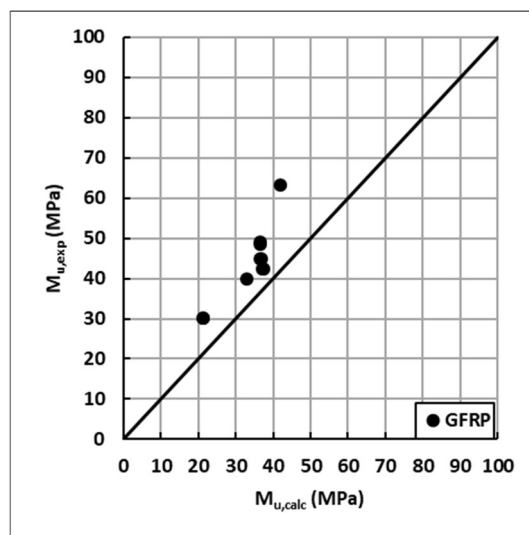


Figura 12: Gráfico $M_{u,exp}$ versus $M_{u,teo}$, para reforço de GFRP.

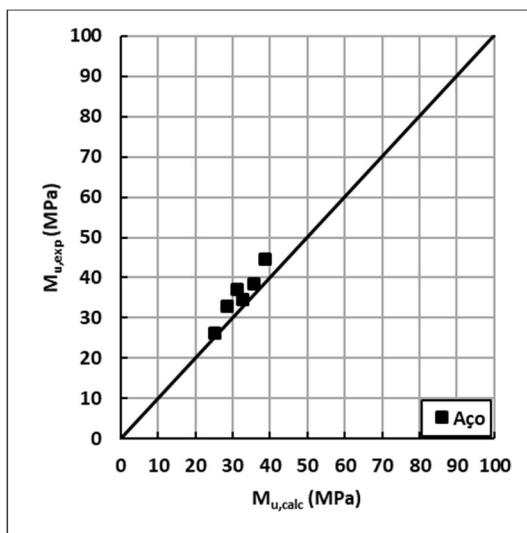


Figura 13: Gráfico $M_{u,exp}$ versus $M_{u,teo}$, para reforço de aço.

Para comparação das flechas no meio do vão, foram traçados dos gráficos de Δ_u experimental versus Δ_u teórica, os quais são apresentados na Figura 14, Figura 15 e Figura 16, respectivamente para CFRP, GFRP e aço. Também se observou uma tendência dos resultados se posicionarem superior à curva média, sendo que os reforços CFRP obtiveram diferenças menores que os materiais GFRP e aço. Os resultados médios verificados foram 1,10; 2,00 e 1,88 para os reforços CFRP, GFRP e aço, respectivamente. Em vista disso, o

modelo teórico proposto demonstra validade e uma tendência também a favor segurança, pois o três materiais analisados obtiveram uma razão de flecha $\Delta_{u,exp}/\Delta_{u,teo}$ acima de 1.

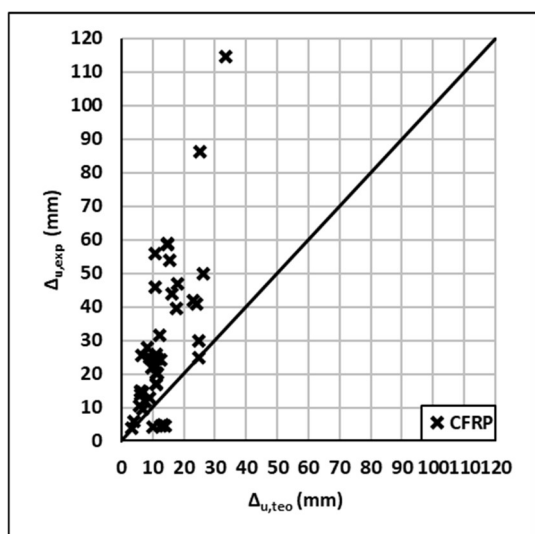


Figura 14: Gráfico $\Delta_{u,exp}$ versus $\Delta_{u,teo}$, para reforço de CFRP.

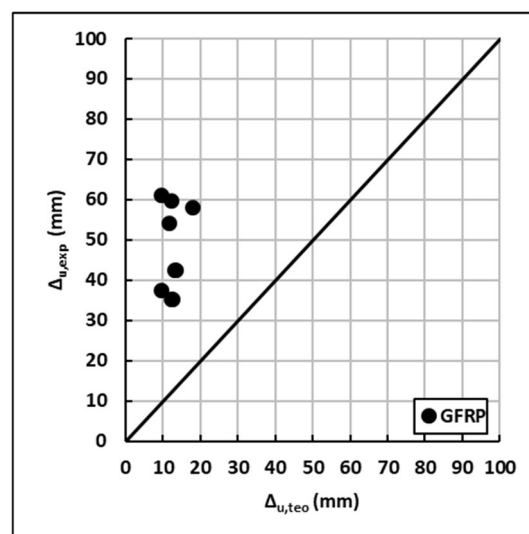


Figura 15: Gráfico $\Delta_{u,exp}$ versus $\Delta_{u,teo}$, para reforço de GFRP.

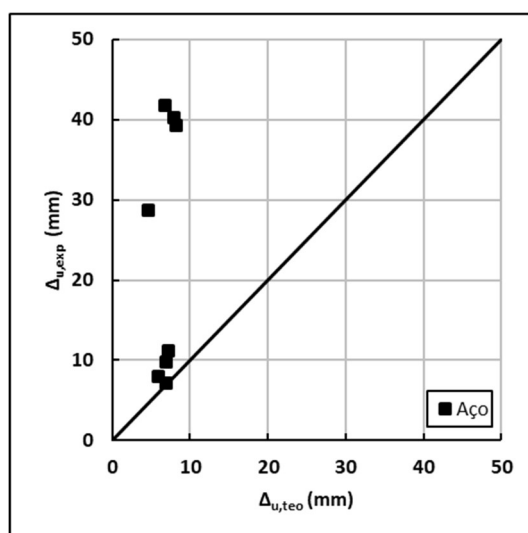


Figura 16: Gráfico $\Delta_{u,exp}$ versus $\Delta_{u,teo}$, para reforço de aço.

CONCLUSÕES

Os modelos teóricos utilizados para prever os momentos fletores últimos e flechas máximas à flexão em vigas com seção retangular, reforçadas com FRP ou aço pelo método NSM foram baseados em teorias da flexão simples, considerando as seções planas e a perfeita aderência entre os materiais. O modelo teórico para a previsão dos momentos últimos na ruptura, apresentaram resultados a favor a segurança com os três tipos de materiais analisados: CFRP, GFRP e aço, pois as razões $M_{u,exp} / M_{u,teo}$ obtidas mantiveram seus valores acima de 1. A deformação máxima adotada para o reforço, $\epsilon_f = 0,005$, demonstrou eficácia, podendo assim ser utilizada como fator usual para o limite de deformação em vigas reforçadas à flexão por meio da técnica NSM.

Em relação ao modelo teórico para o cálculo da flecha limite no meio do vão, os resultados também foram satisfatórios, pois os resultados das razões $\Delta_{u,exp} / \Delta_{u,teo}$ apontaram valores médios acima de 1 para os três tipos de material de reforço utilizados. Observa-se a necessidade de mais análises para os momentos fletores e flechas obtidas para a primeira fissura. Sendo assim, pode-se utilizar a teoria da flexão simples para previsão dos momentos fletores e flechas no meio do vão na ruptura em vigas retangulares reforçadas à flexão pela técnica NSM.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ACI 440.2R-08. **Guide For The Design And Construction of Externally Bonded FRP Systems For Strengthening Concrete Structures**. ACI Committee 440, Farmington Hills, 2008.
- AL-MAHMOUD, F.; CASTEL, A.; FRANÇOIS, R.; TOURNEUR, C.. RC beams strengthened with NSM CFRP rods and modeling of peeling-off failure. **Composite Structures, Villers-lès-Nancy Cedex**, v.92, p.1920–1930, 2010.
- AL-MAHMOUD, F.; CASTEL, A.; FRANÇOIS, R.; TOURNEUR, C.. Strengthening of RC members with near-surface mounted CFRP rods. **Composite Structures, Villers-lès-Nancy Cedex**, v.91, p.138–147, 2009.
- BARROS, J. A. O.; DIAS, S. J. E.; LIMA, J. L. T.. Efficacy of CFRP-based techniques for the flexural and shear strengthening of concrete beams. **Cement & Concrete Composites, Guimarães**, v.29, p.203–217, 2006.
- BARROS, J. A. O.; FORTES, A. S.. Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits. **Cement & Concrete Composites, Guimarães**, v.27, p.471–480, 2004.
- BEBER, A. J.; CAMPOS FILHO, A.; CAMPAGNOLO, J. L.. Reforço de estruturas de concreto armado com tecidos pré-impregnados de fibras de carbono. **Revista Técnica, São Paulo**, v.45, p.52-55, 2000.
- BILOTTA, A.; CERONI, F.; NIGRO, E.; PECCE, M.. Efficiency of CFRP NSM strips and EBR plates for flexural strengthening of RC beams and loading pattern influence. **Composite Structures, Napoli**, v.124, p.163–175, 2015.
- CARNEIRO, L. A. V.. **Reforço de Vigas e Pilares de Concreto**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- CHOI, H. T.; WEST, J.; KHALED, S.. Partially bonded near-surface-mounted CFRP bars for strengthened concrete T-beams. **Construction and Building Materials, Ontario**, v.25, p.2441–2449, 2010.
- CNR DT 200/2004. **Guidelines for design, execution and control of strengthening interventions by means of fibre-reinforced composites**: materials, reinforced concrete and prestressed concrete structures, masonry structures. Rome: National Research Council, Advisory Committee on Technical Regulations for Constructions, 2004.
- EL-GAMAL, S. E.; AL-NUAIMI, A.; AL-SAYDI, A.; AL-LAWATI, A.. Efficiency of near surface mounted technique using fiber reinforced polymers for the flexural strengthening of RC beams. **Construction and Building Materials, Oman**, v.118, p.52–62, 2016.
- FIB BULLETIN 14. **FRP as externally bonded reinforcement of R.C. structures**: basis of design and safety concept. TG9.3, 2001.
- HOSEN, M. D. A.; JUMAAT, M. Z.; DARAIN, K. H. M. U. D.; OBAYDULLAH, M.; ISLAM, A. B. M. S.. Flexural Strengthening of RC Beams with NSM Steel Bars. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FOOD, AGRICULTURE AND BIOLOGY. **Anais**. Kuala Lumpur: 2014. p.8-13.
- HOSEN, M. D. A.; JUMAAT, M. Z.; ALENGARAM, U. J.; ISLAM, A. B. M. S.; HASHIM, H. B.. Near Surface Mounted Composites for Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams. **Polymers, Kuala Lumpur**, v.67, p.1-18, 2016.
- IBRAHIM, W.; FATTAH, W. A.; KOTB, A.; MJEED, M. A.. Flexural behavior of rc beams strengthened with cfrp strips. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FRP COMPOSITES IN CIVIL ENGINEERING. **Anais**. Vancouver, 2014. p.6.
- ISIS CANADA. **Manual n.4**: Strengthening Reinforced Concrete Structures with Externally-Bonded Fibre Reinforced Polymers (FRPs). Winnipeg, 2001.
- JSCE. Japan Society of Civil Engineers. **Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials**. Engineering Series 3. 1997.
- JUNG, W. T.; PARK, J. S.; KANG, J. Y.; KEUM, M. S.. Flexural Behavior of Concrete Beam Strengthened by Near-Surface Mounted CFRP Reinforcement Using Equivalent Section Model. **Advances in Materials Science and Engineering, Seul**, v.2017, p.16, 2017.
- KHALIFA, A. M.. Flexural performance of RC beams strengthened with near surface mounted CFRP strips. **Alexandria Engineering Journal, Alexandria**, v.55, p.1497–1505, 2016.
- NORDIN, H.; TÄLJSTEN, B.. Concrete Beams Strengthened with Prestressed Near Surface Mounted CFRP. **Journal of Composites for Construction, Lyngby**, v.10, n1, p.60-68, 2006.

PENG, H.; ZHANG, J.; CAI, C. S.; LIU, Y.. An experimental study on reinforced concrete beams strengthened with prestressed near surface mounted CFRP strips. **Engineering Structures**, Changsha, v.79, p.222–233, 2014.

REDA, R. M.; SHARAKY, I.A. ; GHANEM, M.; SELEEM, M. H.; SALLAM, H. E. M.. Flexural behavior of RC beams strengthened by NSM GFRP Bars having different end conditions. **Composite Structures**, Ramadan City, v.147, p.131–142, 2016.

REZAZADEH, M.; COSTA, I.; BARROS, J.. Influence of prestress level on NSM CFRP laminates for the flexural strengthening of RC beams. **Composite Structures**, Guimarães, v.116, p.489–500, 2014.

SAID, H.. Deflection Prediction for FRP-Strengthened Concrete Beams. **Journal of Composites for Construction**, v.14, p.244-248, 2010.

SENA-CRUZ, J. M.; BARROS, J. A. O.; COELHO, M. R. F.; SILVA, L. F. F. T.. Efficiency of different techniques in flexural strengthening of RC beams under monotonic and fatigue loading. **Construction and Building Materials**, Guimarães, v.29, p. 75–182, 2011.

SHAHVERDI, M.; CZADERSKI, C.; MOTAVALLI, M.. Iron-based shape memory alloys for prestressed near-surface mounted strengthening of reinforced concrete beams. **Construction and Building Materials**, Dübendorf, v.112, p.28–38, 2016.

SHARAKY, I. A.; TORRES, L.; SALLAM, A.. Experimental and analytical investigation into the flexural performance of RC beams with partially and fully bonded NSM FRP bars/strips. **Composite Structures**, Girona, v.122, p.113–126, 2014.

SHARAKY, I. A.; TORRES, L.; COMAS, J.; BARRIS, C.. Flexural response of reinforced concrete (RC) beams strengthened with near surface mounted (NSM) fibre reinforced polymer (FRP) bars. **Composite Structures**, Girona, v.109, p.8–22, 2013.

SHARAKY, I. A.; REDA, R. M.; GHANEM, M.; SELEEM, M. H.; SALLAM, H. E. M.. Experimental and numerical study of RC beams strengthened with bottom and side NSM GFRP bars having different end conditions. **Construction and Building Materials**, Zagazig, v.149, p.882–903, 2017.

SHUKRI, A. A.; HOSEN, M. A.; MUHAMAD, R.; JUMAAT, M. Z.. Behaviour of precracked RC beams strengthened using the side-NSM technique. **Construction and Building Materials**, Kuala Lumpur, v.123, p.617–626, 2016.

SUN, Z. Y.; WU, G.; WU, Z. S.; LUO, Y. B.. Flexural strengthening of concrete beams with near-surface mounted steel–fiber-reinforced polymer composite bars. **Journal of Reinforced Plastics**, Nanjing, v.18, p.1529–1537, 2011.

TANG, W. C.; BALENDRAN, R. V.; NADEEM, A.; LEUNG, H. Y.. Flexural strengthening of reinforced lightweight polystyrene aggregate concrete beams with near-surface mounted GFRP bars. **Building and Environment**, Hong Kong, v.41, p.1381–1393, 2005.

TENG, J. G.; LORENZIS, L.; WANG, B.; LI, R.; WONG, T. N.; LAM, L.. Debonding Failures of RC Beams Strengthened with Near Surface Mounted CFRP Strips. **Composites for Construction**, Hong Kong, v.10, p.92-105, 2006.

WAHAB, N.; SOUDKI, K. A.; TOPPER, T.. Mechanism of Bond Behavior of Concrete Beams Strengthened with Near-Surface-Mounted CFRP Rods. **Journal of Composites for Construction**, Waterloo, v.15, n.1, p.85-92, 2011.

WANG, B.; TENG, J. G.; LORENZIS, L.; ZHOU, L. M.; JINPING O.; JIN, W.; LAU, K. T.. Strain monitoring of RC members strengthened with smart NSM FRP bars. **Construction and Building Materials**, Hong Kong, v.23, p.1698–1711, 2008.

WU, G.; DONG, Z. Q.; WU, Z. S.; ZHANG, L. W.. Performance and Parametric Analysis of Flexural Strengthening for RC Beams with NSM-CFRP Bars. **Journal of Composites for Construction**, Nanjing, v.18, n.4, p.1-10, 2014.

A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detém os direitos materiais desta publicação. Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas sob coordenação da Sustenere Publishing, da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.