

Reforço de pilares de concreto pelo confinamento parcial com polímeros

VLADIMIR JOSÉ FERRARI - PROF. - (vladimirjf@hotmail.com) - <https://orcid.org/0000-0002-9230-927X> – UEM

RESUMO

OS POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS (PRF) SÃO MATERIAIS ATRATIVOS PARA EMPREGO COMO REFORÇO DE PILARES DE CONCRETO, VISTA A FACILIDADE DE EXECUÇÃO E NÃO ALTERAÇÃO DA SEÇÃO ORIGINAL. A CONFIGURAÇÃO DO REFORÇO PELO CONFINAMENTO COMPLETO DE TODA EXTENSÃO DO PILAR É UMA SOLUÇÃO CONSOLIDADA PELA EFICIÊNCIA NO AUMENTO DA CAPACIDADE E DUCTILIDADE. POR OUTRO LADO, A CONFIGURAÇÃO PARCIAL COM FAIXAS DE REFORÇO APRESENTA-SE COMO SOLUÇÃO VIÁVEL PARA CASOS DE INCREMENTOS MODERADOS NA CAPACIDADE RESISTENTE. NESTE ARTIGO APRESENTA-SE O MODELO TEÓRICO DO CÓDIGO ITALIANO, CNR-DT 200 R2 (2025), PARA O CÁLCULO DO REFORÇO DE PILARES PELO CONFINAMENTO PARCIAL POLIMÉRICO. A PRECISÃO DO MODELO É ANALISADA COMPARANDO-SE RESULTADOS TEÓRICOS COM EXPERIMENTAIS DE BANCO DE DADOS FORMADO POR 29 PILARES DE SEÇÃO QUADRADA PARCIALMENTE CONFINADOS. O MODELO É TAMBÉM EMPREGADO PARA A ANÁLISE DA CAPACIDADE RESISTENTE DE PILAR DE SEÇÃO QUADRADA. A COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS APONTA PARA EXCELENTE PRECISÃO DO MODELO TEÓRICO. NO EMPREGO DO MODELO DO EXEMPLO ANALISADO, VERIFICOU-SE AUMENTO DE 27% NA CAPACIDADE RESISTENTE DO PILAR REFORÇADO PELO CONFINAMENTO PARCIAL COM 5 CAMADAS. PARA TANTO, FOI NECESSÁRIO DIMINUIR O ESPAÇAMENTO MÁXIMO ENTRE AS FAIXAS DE REFORÇO EM ATÉ 50%.

PALAVRAS-CHAVE: REFORÇO, PRF, CONFINAMENTO PARCIAL, PILAR, CÓDIGO ITALIANO.

1. INTRODUÇÃO

Os Polímeros Reforçados com Fibras (PRF) são materiais compósitos empregados na engenharia estrutural por propriedades como elevada resistência à tração, baixo peso próprio e durabilidade

(Shan *et al.*, 2019). Uma das aplicações é no campo do reforço estrutural pela maior facilidade, menor tempo para execução e não alteração da seção original do elemento, comparativamente aos materiais tradicionais como aço e concreto (Ferrari, 2026; Aules & Raoof, 2021).

No reforço de pilares, o envolvimento da seção com PRF produz o efeito do confinamento do concreto, limitando sua expansão lateral e melhorando o desempenho mecânico em termos de resistência à compressão, aumento da ductilidade e dissipação da energia (Aules & Raoof, 2021; Shan *et al.*, 2019; Zeng *et al.*, 2017). A aplicação consiste no envolvimento do pilar com as fibras poliméricas orientadas transversalmente ao eixo longitudinal na direção dos estribos.

A eficiência do confinamento do concreto depende de parâmetros como a rigidez do reforço (Shayanfar *et al.*, 2026), resistência do concreto (Shayanfar *et al.*, 2026), forma da seção transversal (Aules & Raoof, 2021), tamanho do pilar (Shayanfar *et al.*, 2026) e a configuração do confinamento (Zeng *et al.*, 2017; Shayanfar *et al.*, 2026).

As configurações para o confinamento de pilares com polímeros são ilustradas na Figura 1. O tipo completo é caracterizado pelo envolvimento total do elemento e o tipo parcial tem disposição descontínua de faixas de reforço ao longo do pilar.

O confinamento completo proporciona maiores incrementos na resistência do pilar comparativamente ao confinamento parcial (Wang *et al.*, 2022; Aules & Raoof, 2021). Devido à existência de regiões de concreto não envolvidas entre as faixas de reforço, a ruína e o comportamento tensão-deformação são distintos entre pilares confinados completamente e parcialmente (Zeng *et al.*, 2018).

No confinamento parcial (Figura 1), as tensões distribuem-se de maneira não uniforme na seção transversal e também ao longo do comprimento do pilar (Wang *et al.*, 2022). As observações experimentais (Wang *et al.*, 2022; Guo *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2020) mostram que o concreto da região envolvida permanece suportando tensão, enquanto que o concreto não envolvido entra em ruína antes da ruptura do reforço por tração. Quando o concreto atinge sua resistência máxima à compressão, ocorre ruptura localizada entre as faixas do reforço, diferentemente do que ocorre para o confinamento completo, em que a ruína é controlada pela ruptura do reforço à tração ao invés do concreto (Aules & Raoof, 2021; Zeng *et al.*, 2017).

Pesquisadores (Guo *et al.*, 2019; Mai *et al.*, 2018) observaram que a deformação axial das regiões encamisadas e não encamisadas são semelhantes e com mesma

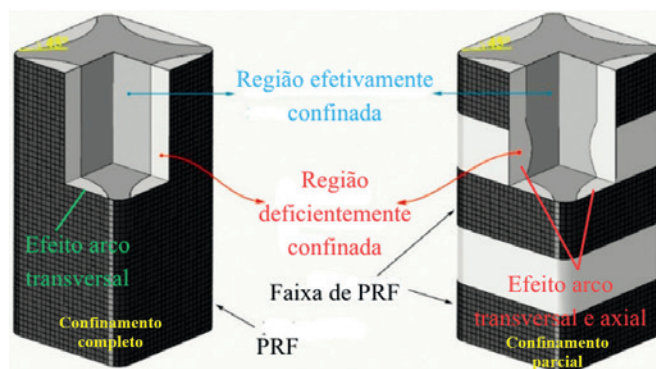


FIGURA 1

DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES NAS DIREÇÕES VERTICAL E HORIZONTAL

FONTE: ADAPTADO DE YANG *et al.*, (2020)

rigidez somente para o trecho inicial, linear e ascendente, até atingir a resistência do concreto não confinado. Após, a distribuição das deformações torna-se não uniforme e com maior intensidade na região não confinada entre as faixas. Com o aumento do carregamento, a diferença de deformação torna-se ainda mais significativa entre as duas regiões, caracterizando-se o efeito da localização da deformação. Uma seção posicionada no meio da região não encamisada é a que tem a menor área de concreto efetivamente confinado.

Apesar do melhor desempenho mecânico proporcionado pelo confinamento completo, existem características inerentes ao confinamento parcial que podem ser interessantes e convenientes para alguns casos da prática da engenharia.

O confinamento parcial tem demonstrado proporcionar aumento na resistência e na ductilidade de pilares (Zeng *et al.*, 2017). Segundo Yang *et al.* (2020), o emprego do confinamento parcial, com pequeno espaçamento livre entre as faixas, é mais adequado e razoável para pilares com necessidade moderada de incremento na resistência. O confinamento parcial pode ser uma escolha eficiente e econômica para pilares de concreto com necessidade moderada de aumento na resistência e ductilidade (Mai *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2022). A redução de material (PRF e adesivo) e de custo é destacada por Wang *et al.* (2022).

O Brasil ainda não conta com norma técnica para o projeto e execução de reforço de estruturas com PRF. Os profissionais recorrem às recomendações dos códigos internacionais, como o ACI PRC-440.2 (2023), FIB-90 (2019) e o CNR-DT 200 R2 (2025). Entre esses códigos, somente o FIB e o CNR tratam do dimensionamento do reforço de pilares pelo confinamento parcial.

Este artigo apresenta a metodologia analítica do CNR-DT 200 R2 (2025) para o cálculo do reforço de PRF de pilar de concreto pelo confinamento parcial. A precisão do método de cálculo é avaliada comparativamente com resultados experimentais de pilares de seção quadrada. A metodologia é empregada para a análise da capacidade resistente do reforço de pilar de seção quadrada.

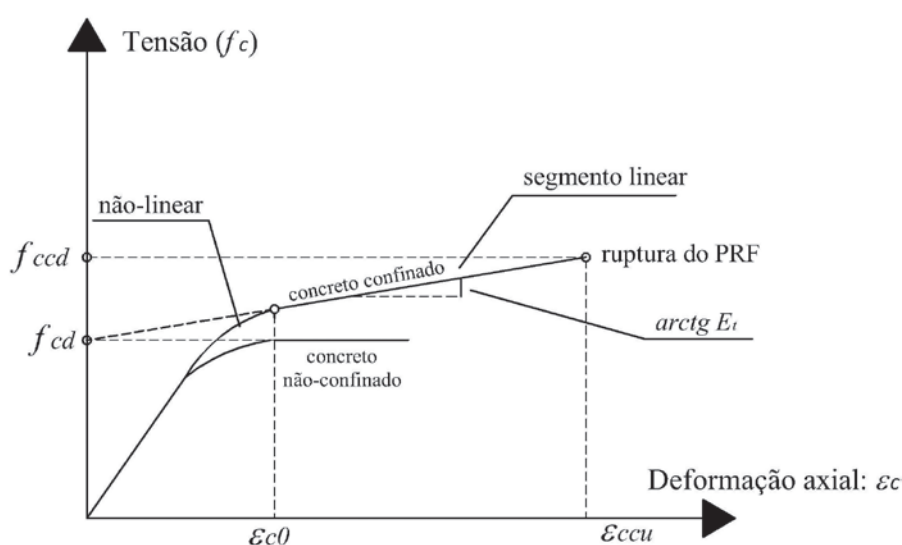


FIGURA 2

COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO DO CONCRETO CONFINADO

FONTE: (CNR-DT 200 R2, 2025)

2. CONFINAMENTO DE SEÇÕES DE PILARES CONFORME CNR-DT 200 R2

Conforme as diretrizes do CNR-DT 200 R2 (2025), para casos de pilares solicitados axialmente por carga centrada ou de pequena excentricidade, o confinamento proporciona melhora no desempenho estrutural por aumento da resistência e deformação específica correspondente.

O modelo tensão-deformação do concreto confinado com PRF é exemplificado na Figura 2, em que, (f_{cd}) e (ϵ_{c0}) representam, respectivamente, a resistência de cálculo do concreto não confinado à compressão e deformação específica correspondente (tipicamente com valor igual a 0,002). A resistência última de cálculo do concreto confinado e a deformação específica correspondente são representados por (f_{ccd}) e (ϵ_{ccu}), respectivamente.

Até valores de deformações específicas axiais ($\epsilon_c=2\%$), a tensão no concreto confinado é levemente superior àquela do concreto não confinado, o confinamento é considerado como passivo, ficando tensionado somente com a expansão lateral pela fissuração do concreto e escoamento da armadura. Para deformações acima de ($\epsilon_c>2\%$), a relação tensão-deformação é representada pelo segmento linear caracterizado por perda progressiva da in-

tegridade do concreto pela fissuração até a ruptura do reforço (limitada em 4% por questões de segurança).

A segurança do pilar confinado é assegurada desde que o valor de cálculo da força axial (N_{sd}) não ultrapasse o valor de cálculo da capacidade resistente da seção confinada ($N_{Rcc,d}$), Equação 1.

$$[1] \quad N_{sd} \leq N_{Rcc,d}$$

A capacidade resistente de projeto ($N_{Rcc,d}$) para o caso de pilares não esbeltos é determinada pela Equação 2, em que (A_c), (A_s) e (f_{yd}) representam, respectivamente, a área da seção transversal, área da armadura e o valor de cálculo da resistência ao escoamento do aço. O termo (γ_{Rd}) é o fator parcial de segurança ($\gamma_{Rd} = 1,10$) para casos de confinamento.

$$[2] \quad N_{Rcc,d} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \{A_c \cdot f_{ccd} + A_s \cdot f_{yd}\}$$

Para o confinamento as fibras do polímero devem ser orientadas transversalmente ao eixo do pilar e a resistência de cálculo do concreto confinado (f_{ccd}) pode ser obtida pela Equação 3.

$$[3] \quad \frac{f_{ccd}}{f_{cd}} = 1 + \frac{2,6}{\gamma_{Rd}} \cdot \left(\frac{f_{l,eff}}{f_{cd}} \right)^{2/3}$$

A resistência de cálculo à compressão do concreto não confinado (f_{cd}) é obtida

conforme Equação 4, pela relação entre a resistência média à compressão (f_{cm}) e os fatores de redução ($FC=1,2$) e ($\gamma_c = 1,0$) associados, respectivamente, ao nível de confiança do elemento analisado e do material. Da mesma maneira, tem-se a resistência de cálculo ao escoamento da armadura (f_{yd}), Equação (5), para fator parcial do material ($\gamma_s = 1,0$).

$$[4] \quad f_{cd} = \frac{f_{cm}}{FC \cdot \gamma_c}$$

$$[5] \quad f_{yd} = \frac{f_{ym}}{FC \cdot \gamma_s}$$

Para que o efeito do confinamento seja eficiente, deve-se assegurar pressão efetiva de confinamento ($f_{l,eff}$) superior a 5% da resistência de cálculo do concreto (f_{cd}), como indicado pela Equação 6.

$$[6] \quad \frac{f_{l,eff}}{f_{cd}} > 0,05$$

Somente uma parcela da pressão de confinamento do reforço (f_l) contribui para a resistência do concreto confinado. É a denominada pressão de confinamento efetiva ($f_{l,eff}$), estimada pela Equação 7.

$$[7] \quad f_{l,eff} = k_{eff} \cdot f_l$$

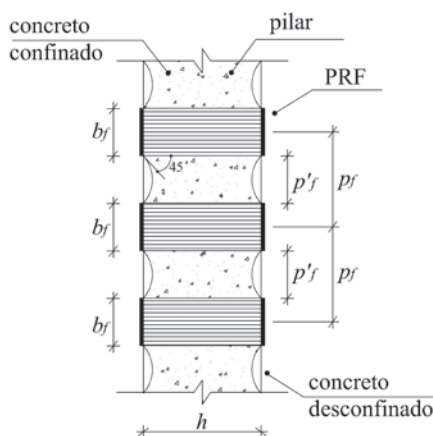
O coeficiente de eficiência do confinamento ($k_{eff} \leq 1$) representa a relação entre o volume de concreto efetivamente confinado e o volume total de concreto do elemento, excluindo-se a armadura longitudinal. Seu valor é determinado pelo produto dos coeficientes de eficiência horizontal do confinamento (k_H), eficiência vertical do confinamento (k_V) e pelo coeficiente relacionado com a inclinação das fibras (k_α), conforme Equação 8.

$$[8] \quad k_{eff} = k_H \cdot k_V \cdot k_\alpha$$

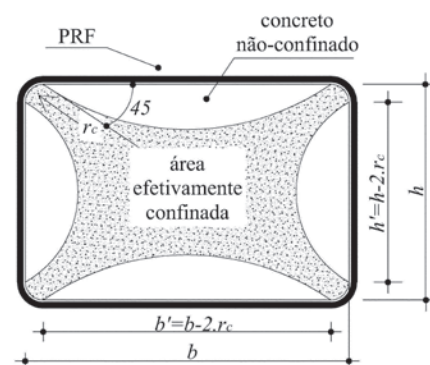
O coeficiente de eficiência horizontal (k_H) depende da forma da seção transversal do pilar, sendo ($k_H=1$) para seções circulares ou, conforme Equação 9, para seções quadradas ou retangulares, com (A_g) a área bruta da seção transversal.

$$[9] \quad k_H = 1 - \frac{b'^2 + h'^2}{3 \cdot A_g}$$

O coeficiente de eficiência vertical do confinamento (k_V) considera a configuração do reforço ao longo do eixo do pilar, sendo ($k_V=1$) para envolvimento completo ou, conforme Equação 10, para envolvimento



A Distribuição de tensões na direção vertical do pilar



B Distribuição de tensões na seção confinada

FIGURA 3

VISTA LATERAL E SEÇÃO DE PILAR NÃO CIRCULAR PARCIALMENTE CONFINADO

FONTE: ADAPTADO DO CNR-DT 200 R2 (2025)

mento parcial como ilustrado pela Figura 3.

$$[10] \quad k_V = \left(1 - \frac{p'_f}{2 \cdot d_{min}}\right)^2$$

p_f : espaçamento entre as faixas do reforço;
 p'_f : espaçamento livre entre faixas do reforço;
 b_f : largura da faixa;
 d_{min} : menor dimensão da seção transversal.

Entre as faixas do reforço existem regiões de concreto não envolvidas com PRF (Figura 3a), onde ocorre um arranjo difuso das tensões na direção vertical com distribuição aproximadamente parabólica com inclinação de 45°. O espaçamento livre entre as faixas (p'_f) não deve ser superior à metade da menor dimensão da seção (d_{min}), Equação 11.

$$[11] \quad p'_f \leq \frac{d_{min}}{2}$$

O coeficiente (k_α) representa o efeito da inclinação da fibra e tem valor ($k_\alpha = 1$) para faixas dispostas a 90° com o eixo do pilar ou, conforme Equação 12, para disposição helicoidal com ângulo (α_f).

$$[12] \quad k_\alpha = \frac{1}{1 + (tg \alpha_f)^2}$$

A pressão de confinamento (f_l) é determinada conforme Equação 13, sendo:

$$[13] \quad f_l = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{f,rid}$$

E_f : módulo de elasticidade do PRF na direção das fibras;

$\varepsilon_{f,rid}$: valor da deformação reduzida de projeto do reforço, determinada pela Equação 14, não se tomando valor superior a 4‰.

$$[14] \quad \varepsilon_{f,rid} = \eta_a \cdot \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_{f1}} \leq 0,004$$

ε_{fk} : valor característico da deformação de ruptura à tração do PRF;

η_a : fator de conversão ambiental em função do tipo de fibra e condição de exposição ($\eta_a=0,95$ para fibra de carbono em ambiente interno);

γ_{f1} : fator parcial de segurança associado ao reforço conforme o tipo de ruína ($\gamma_f=1,30$ para ruptura por tração ou desprendimento de sistemas colados externamente).

O termo (ρ_f) é taxa geométrica do reforço e depende da forma da seção e da configuração do confinamento. Para casos de seções quadradas e retangulares com dimensões (b) e (h), a taxa (ρ_f) é obtida pela Equação 15 para caso de envolvimento completo e, para o caso de envolvimento parcial, deve ser empregada a Equação 16.

$$[15] \quad \rho_f = \frac{2 \cdot t_f \cdot (b + h)}{b \cdot h}$$

$$[16] \quad \rho_f = \frac{2 \cdot t_f \cdot (b + h) \cdot b_f}{b \cdot h \cdot p_f}$$

3. COMPARAÇÕES COM RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O modelo de confinamento do CNR-DT 200 R2 (2025) é aqui empregado para fins da estimativa da resistência (f_{cc}) dos pilares analisados experimentalmente nas pesquisas de Zeng et al. (2017), Guo et al. (2019) e Yang et al. (2020). Na Tabela 1, são apresentadas as características dos 29 pilares que formam o banco de dados composto por seções quadradas com lados entre 150 e 200 mm, solicitação axial e reforço por confinamento parcial com manta de fibras de carbono.

Na Tabela 2, são apresentados os valores experimentais das resistências de pico (f_p) e última (f_{cc}) dos pilares e os valores teóricos das resistências (f_{cc-teo}) conforme modelo do

CNR-DT 200 R2 (2025). Para os pilares com confinamento eficiente, a resposta é do tipo *hardening*, caracterizada por trecho ascendente pós-fissuração do concreto com ($f_p = f_{cc}$). Para casos de confinamento insuficiente, a resposta é do tipo *softening*, com valor da resistência última inferior à de pico. Para esses casos, a resistência última do pilar reforçado foi tomada como a resistência de pico, seguindo-se mesmo procedimento adotado nas pesquisas.

O incremento de resistência do pilar proporcionado pelo reforço é representado pela relação normalizada entre as resistências de pico e do concreto não confinado (f_p/f_{co}). A exatidão entre os valores das resistências, teórica e experimental, é estabelecida pela relação normalizada

(f_{cc-teo}/f_p) e os indicadores estatísticos de relação média (rm) e erro médio absoluto (eam), calculados conforme Equações 17 e 18, em que o número de resultados (pilares) é representado por “n”.

$$[17] \quad rm = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{f_{cc-teo}}{f_p}}{n}$$

$$[18] \quad eam = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{f_{cc-teo}}{f_p} - 1 \right|}{n}$$

Do banco de dados, verifica-se incrementos na resistência dos pilares de 4% até 39%, com valor de relação média igual a 19% (rm = 1,19). Os valores da relação média de incremento da resistência para os pilares das pesquisas [A], [B] e [C] são iguais,

TABELA 1

CARACTERÍSTICAS DOS PILARES REFORÇADOS POR CONFINAMENTO PARCIAL

Pesquisas	Pilares	Seção transversal			Concreto		Configuração do confinamento				Traço
		b	h	r _c	f _{co}	ε _{co}	n _f	b _f	p _f	p _f /p _r	
Zeng et al. (2017) [A]	1 S-30-1	168	168	25	24,3	0,0024	1	90	30	1/4	t _f = 0,167 mm E _f = 259,7 GPa ε _{fu} = 0,0175
	2 S-30-2	168	168	25	24,3	0,0024	2	90	30	1/4	
	3 S-45-1	168	168	25	24,3	0,0024	1	90	45	1/3	
	4 S-45-2	168	168	25	24,3	0,0024	2	90	45	1/3	
	5 S-90-1	168	168	25	24,3	0,0024	1	90	90	1/2	
	6 S-90-2	168	168	25	24,3	0,0024	2	90	90	1/2	
Guo et al. (2019) [B]	7 P-1-80-40	200	200	30	34,74	0,0027	1	80	40	0,33	t _f = 0,167 mm E _f = 227,3 GPa ε _{fu} = 0,0191
	8 P-2-80-40	200	200	30	34,74	0,0027	2	80	40	0,33	
	9 P-3-80-40	200	200	30	34,74	0,0027	3	80	40	0,33	
	10 P-1-100-40	200	200	30	34,74	0,0027	1	100	40	0,29	
	11 P-2-100-40	200	200	30	34,74	0,0027	2	100	40	0,29	
	12 P-3-100-40	200	200	30	34,74	0,0027	3	100	40	0,29	
	13 P-1-120-40	200	200	30	34,74	0,0027	1	120	40	0,25	
	14 P-2-120-40	200	200	30	34,74	0,0027	2	120	40	0,25	
	15 P-3-120-40	200	200	30	34,74	0,0027	3	120	40	0,25	
	16 P-3-40-20	200	200	30	34,74	0,0027	3	40	20	0,33	
	17 P-3-120-60	200	200	30	34,74	0,0027	3	120	60	0,33	
	18 P-3-30-20	200	200	30	34,74	0,0027	3	29,8	20	0,40	
	19 P-3-178-60	200	200	30	34,74	0,0027	3	77,5	60	0,44	
Yang et al. (2020) [C]	20 N-W3A2-1	150	150	20	35,82	0,00205	2	30	105	0,78	t _f = 0,167 mm E _f = 235 GPa ε _{fu} = 0,0161
	21 N-W3A2-2	150	150	20	35,82	0,00205	2	30	105	0,78	
	22 N-W4A2-1	150	150	20	35,82	0,00205	2	40	90	0,69	
	23 N-W4A2-2	150	150	20	35,82	0,00205	2	40	90	0,69	
	24 N-W5A2-1	150	150	20	35,82	0,00205	2	50	75	0,60	
	25 N-W5A2-2	150	150	20	35,82	0,00205	2	50	75	0,60	
	26 N-W6A2-1	150	150	20	35,82	0,00205	2	60	60	0,50	
	27 N-W6A2-2	150	150	20	35,82	0,00205	2	60	60	0,50	
	28 N-W3B2-1	150	150	20	35,82	0,00205	2	30	30	0,50	
	29 N-W3B2-2	150	150	20	35,82	0,00205	2	30	30	0,50	

DIMENSÕES INDICADAS EM “MM” | FONTE: AUTOR

TABELA 2

VALORES DAS RESISTÊNCIAS DOS PILARES

Pesquisas	Pilares	Experimental			Teórico	Incremento	Relação
		f_n	f_{cc}	Resposta	f_{cc-teo}	f_p / f_{co}	f_{cc-teo} / f_p
Zeng et al. (2017) [A]	1 S-30-1	29,3	28,4	Soft	31,0	1,21	1,06
	2 S-30-2	33,7	33,7	Hard	34,9	1,39	1,04
	3 S-45-1	28,6	28,6	Hard	30,1	1,18	1,05
	4 S-45-2	30,0	29,4	Soft	33,5	1,23	1,12
	5 S-90-1	27,9	21,8	Soft	28,1	1,15	1,01
	6 S-90-2	28,1	24,6	Soft	30,4	1,16	1,08
Guo et al. (2018) [B]	7 P-1-80-40	34,79	27,59	Soft	40,35	1,00	1,16
	8 P-2-80-40	41,49	38,26	Soft	43,64	1,19	1,05
	9 P-3-80-40	45,92	45,92	Hard	46,41	1,32	1,01
	10 P-1-100-40	36,25	30,51	Soft	40,61	1,04	1,12
	11 P-2-100-40	40,28	38,47	Soft	44,06	1,16	1,09
	12 P-3-100-40	46,02	46,02	Hard	46,96	1,32	1,02
	13 P-1-120-40	37,06	32,42	Soft	40,81	1,07	1,10
	14 P-2-120-40	38,87	38,37	Hard	44,37	1,12	1,14
	15 P-3-120-40	47,53	47,53	Hard	47,36	1,37	1,00
	16 P-3-40-20	47,63	47,63	Hard	47,28	1,37	0,99
	17 P-3-120-60	46,92	44,10	Soft	45,55	1,35	0,97
	18 P-3-30-20	44,91	44,91	Hard	46,41	1,29	1,03
	19 P-3-178-60	46,52	44,41	Soft	44,41	1,34	0,95
Yang et al. (2020) [C]	20 N-W3A2-1	35,67	28,75	Soft	39,18	1,00	1,10
	21 N-W3A2-2	36,27	27,30	Soft	39,18	1,01	1,08
	22 N-W4A2-1	37,32	30,71	Soft	40,43	1,04	1,08
	23 N-W4A2-2	36,33	27,74	Soft	40,43	1,01	1,11
	24 N-W5A2-1	39,80	30,88	Soft	41,84	1,11	1,05
	25 N-W5A2-2	41,66	33,15	Soft	41,84	1,16	1,00
	26 N-W6A2-1	41,80	35,25	Soft	43,44	1,17	1,04
	27 N-W6A2-2	43,01	38,30	Soft	43,44	1,20	1,01
	28 N-W3B2-1	45,32	40,41	Soft	44,74	1,27	0,99
	29 N-W3B2-2	45,81	39,36	Soft	44,74	1,28	0,98

FONTE: AUTOR

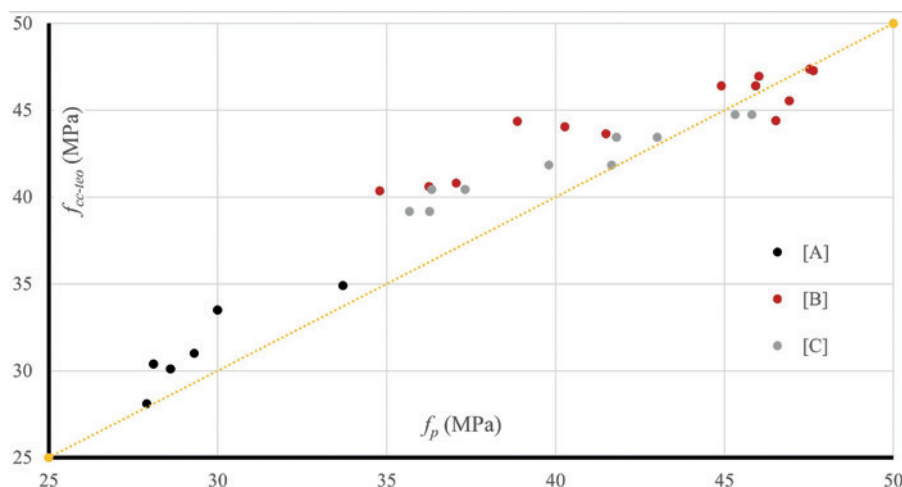


FIGURA 4

COMPARAÇÕES ENTRE RESULTADOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS

FONTE: AUTOR

respectivamente, a 1,22, 1,23 e 1,13. Os incrementos para os pilares das pesquisas [A] e [B] têm, praticamente, o mesmo valor, diferindo-se dos pilares da pesquisa [C], possivelmente devido ao comportamento do tipo *softening* observado em todos os pilares dessa pesquisa, visto que o modelo teórico idealiza resposta do tipo *hardening*.

A relação entre valores, teórico e experimental, (f_{cc-teo}/f_{cc}) pode ser visualizada graficamente pela Figura 4, em que a maioria dos pontos estão localizados acima da reta de igualdade ($X = Y$), denotando-se superestimativa do resultado teórico em relação ao experimental. A relação média obtida ($rm = 1,05 > 1,00$) quantifica a superestimativa do modelo teórico, em relação aos valores experimentais, de apenas 5%. O valor de ($eam = 5,82\%$) denota pequeno erro médio dos resultados previstos em relação aos experimentais. A exatidão da formulação proposta pelo CNR fica constatada para a combinação dos valores de relação média e erro médio próximos a 1 e zero, respectivamente.

4. CAPACIDADE DE PILAR REFORÇADO POR CONFINAMENTO

Considere o pilar solicitado por compressão axial centrada de seção transversal quadrada, lado igual a 300 mm, com armadura longitudinal composta por 12 barras de 12,5 mm de diâmetro, com resistência média ao escoamento ($f_{ym} = 520$ MPa), concreto com resistência média à compressão ($f_{cm} = 28$ MPa) e cobrimento da armadura de 25 mm (Figura 5).

Deseja-se analisar a capacidade resistente da seção transversal pelo emprego do reforço

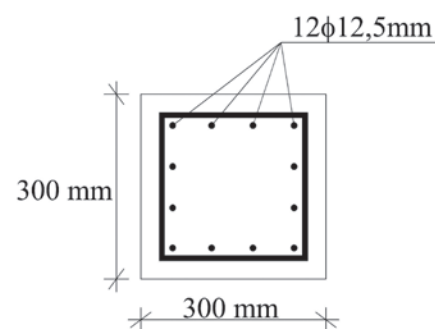


FIGURA 5

SEÇÃO TRANSVERSAL DO PILAR

FONTE: AUTOR

de PRF com manta de fibras de carbono coladas externamente em todo o perímetro da seção, com disposição do tipo contínua e descontínua. Para tanto, como metodologia de cálculo, emprega-se o modelo de análise de confinamento conforme as diretrizes do código italiano do CNR-DT 200 R2 (2025).

4.1 Encamisamento completo

PROPRIEDADES E PROPRIEDADES DE REFORÇO:	GEOMÉTRICAS MECÂNICAS	DA DO	SEÇÃO SISTEMA
---	--------------------------	----------	------------------

Para o pilar com seção transversal 300 mm por 300 mm e raio de arredondamento dos cantos da seção ($r_c = 25$ mm), tem-se as seguintes propriedades geométricas:

- ▶ Área de concreto da seção transversal: $A_c = 87.188,9844$ mm²;
- ▶ Área da seção da armadura longitudinal: $A_s = 1.472,5781$ mm²;
- ▶ Área bruta de concreto da seção transversal: $A_g = 88.661,5625$ mm².

Para o sistema de reforço por confinamento com manta de fibras de carbono, considere as seguintes propriedades mecânicas:

- ▶ Espessura: $t_f = 0,167$ mm;
- ▶ Módulo de elasticidade: $E_f = 220$ GPa;
- ▶ Resistência à tração: $f_{tu} = 4.000$ MPa;
- ▶ Deformação específica de ruptura: $\varepsilon_{fk} = 0,0135$.

DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA DE PROJETO DO REFORÇO:

Para as condições do reforço empregando-se fibras de carbono em pilar interno de uma edificação ($\eta_s = 0,95$) e, considerando-se possibilidade de ruína por ruptura das fibras por tração ou o desprendimento ($\gamma_{fi} = 1,30$), é possível determinar o valor da deformação de projeto do reforço ($\varepsilon_{fd,rid}$) como segue:

$$\varepsilon_{fd,rid} = \eta_s \cdot \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_{fi}} \leq 0,004$$

$$\varepsilon_{fd,rid} = (0,95) \cdot \frac{(0,0135)}{(1,30)} \leq 0,004$$

$$\varepsilon_{fd,rid} = 0,004$$

PRESSÃO EFETIVA DE CONFINAMENTO E PRESSÃO DE CONFINAMENTO:

Para que a pressão de confinamento da seção transversal reforçada possa ser considerada efetiva, o valor da pressão efetiva pode ser tomado igual a ($f_{l,eff} = 1,20$ MPa) como demonstrado:

$$f_{l,eff} > 0,05 \cdot f_{cd}$$

$$f_{l,eff} > 0,05 \cdot \left[\frac{28}{(1,2) \cdot (1,0)} \right] = 1,1667 \text{ MPa}$$

$$f_{l,eff} = 1,20 \text{ MPa}$$

A pressão efetiva de confinamento depende da forma da seção transversal e do reforço (disposição, taxa e tipo de fibra), como segue representado:

$$f_{l,eff} = k_{eff} \cdot f_l$$

$$k_{eff} = k_H \cdot k_V \cdot k_\alpha$$

O coeficiente de eficiência do confinamento horizontal (k_H) é obtido em função das dimensões dos lados da seção transversal, da área bruta da seção transversal e do raio de arredondamento:

$$k_H = 1 - \frac{b'^2 + h'^2}{3 \cdot A_g}$$

$$k_H = 1 - \frac{[300 - (2) \cdot (25)]^2 + [300 - (2) \cdot (25)]^2}{(3) \cdot (88.661,5625)}$$

$$k_H = 0,53$$

O coeficiente de eficiência do confinamento vertical para o envolvimento completo é tomado como ($k_V = 1$) e o coeficiente de eficiência da inclinação das fibras é ($k_\alpha = 1$), considerando-se o reforço com as fibras posicionadas a 90° com o eixo do pilar. Assim, o coeficiente de eficiência do confinamento (k_{eff}) é o indicado a seguir, tendo-se pouco mais de 50% de toda a área da seção eficientemente confinada.

$$k_{eff} = (0,53) \cdot (1) \cdot (1)$$

$$k_{eff} = 0,53$$

Com o valor da pressão mínima efetiva de confinamento ($f_{l,eff} = 1,20$ MPa) e do coeficiente de eficiência ($k_{eff} = 0,53$), calcula-se a pressão de confinamento da seção transversal exercida pelo polímero:

$$f_l = \frac{f_{l,eff}}{k_{eff}}$$

$$f_l = \frac{1,20}{0,53}$$

$$f_l = 2,2642 \text{ MPa}$$

Com a pressão de confinamento ($f_l = 2,2642$ MPa), é possível calcular qual deve ser a taxa geométrica de reforço necessário para o atendimento da pressão mínima efetiva:

$$f_l = \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{fd,rid}$$

Isolando-se a taxa geométrica de reforço, temos:

$$\rho_f = \frac{2 \cdot f_l}{E_f \cdot \varepsilon_{fd,rid}}$$

$$\rho_f = \frac{(2) \cdot (2,2642)}{(220.000) \cdot (0,004)}$$

$$\rho_f = 0,005146$$

Pela Equação que segue, com o valor da taxa geométrica do reforço (ρ_f), é possível obter o valor da espessura necessária para que o encamisamento mantenha uma pressão mínima efetiva para o confinamento do pilar:

$$\rho_f = \frac{2 \cdot t_f \cdot (b + h)}{b \cdot h}$$

$$t_f = \frac{\rho_f \cdot (b \cdot h)}{2 \cdot (b + h)}$$

$$t_f = \frac{0,005146 \cdot (300) \cdot (300)}{2 \cdot (300 + 300)}$$

$$t_f = 0,3860 \text{ mm}$$

Como a manta de fibras de carbono tem espessura ($t_f = 0,167$ mm), são necessárias 2,31 camadas, ou seja, ($n_f = 3$) camadas de reforço. Assim, recalculando-se a pressão de confinamento para reforço com 3 camadas, tem-se:

$$\rho_f = \frac{2 \cdot (3) \cdot (0,167) \cdot (300 + 300)}{(300) \cdot (300)}$$

$$\rho_f = 0,00668$$

$$f_l = \frac{1}{2} \cdot (0,00668) \cdot (220.000) \cdot (0,004)$$

$$f_l = 2,9392 \text{ MPa}$$

E a pressão efetiva de confinamento fica com valor acima do mínimo necessário, como segue:

$$f_{l,eff} = (0,53) \cdot (2,9392)$$

$$f_{l,eff} = 1,5578 \text{ MPa} > 1,20 \text{ MPa}$$

RESISTÊNCIA DA SEÇÃO TRANSVERSAL CONFINADA:

A resistência de cálculo da seção transversal confinada é determinada conforme segue:

$$\frac{f_{ccd}}{f_{cd}} = 1 + \frac{2,6}{\gamma_{Rd}} \cdot \left(\frac{f_{l,eff}}{f_{cd}} \right)^{2/3}$$

$$\frac{f_{ccd}}{f_{cd}} = 1 + \frac{2,6}{1,10} \cdot \left(\frac{1,5578}{23,3333} \right)^{2/3}$$

$$\frac{f_{ccd}}{f_{cd}} = 1,3889$$

$$f_{ccd} = 1,3889 \cdot (23,3333) = 32,4076 \text{ MPa}$$

CAPACIDADE RESISTENTE DA SEÇÃO TRANSVERSAL:

A capacidade resistente para o pilar

não esbelto, solicitado à compressão centrada e reforçado com 3 camadas de manta de fibras de carbono é igual a ($N_{Rcc,d} = 3.149 \text{ kN}$), como segue:

$$N_{Rcc,d} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} [A_c \cdot f_{ccd} + A_s \cdot f_{yd}]$$

$$N_{Rcc,d} = \frac{1}{1,10} \cdot \left[\frac{(87.188,9844) \cdot (32,4076)}{(1.472,5781) \cdot (433,3333)} \right] \cdot (0,001)$$

$$N_{Rcc,d} = 3.149 \text{ kN}$$

Pelo reforço com encamisamento completo do pilar, para valor mínimo da pressão efetiva de confinamento, a capacidade resistente axial da seção é ($N_{Rcc,d} = 3.149 \text{ kN}$), que representa, em relação a capacidade da seção sem reforço (2.430 kN), um incremento igual a 30% ($\Delta = 1,30$). Esse incremento não ultrapassa o limite de 60%, recomendado pelo CNR-DT 200 (2025), de aumento no esforço resistente em relação à seção sem reforço.

4.2 Encamisamento parcial

O objetivo é analisar qual seria o incremento obtido para a capacidade resistente da seção com o reforço do pilar em disposição parcial, adotando-se, inicialmente, espaçamento livre entre as faixas de reforço (p'_f) com o valor máximo como segue:

$$p'_f \leq 0,5 \cdot h = (0,5) \cdot (300)$$

$$p'_f = 150 \text{ mm}$$

Para o envolvimento do tipo parcial, o coeficiente de eficiência vertical do confinamento (k_v) é diferente do valor unitário e obtido, como indicado:

$$k_v = \left(1 - \frac{p'_f}{2 \cdot h} \right)^2$$

$$k_v = \left(1 - \frac{150}{(2) \cdot (300)} \right)^2$$

$$k_v = 0,5625$$

O coeficiente de eficiência do confinamento horizontal (k_h) para a seção envolvida pelo reforço permanece como sendo o mesmo valor já calculado anteriormente para o confinamento completo ($k_h = 0,53$). As fibras poliméricas são perpendiculares ao eixo do pilar e o coeficiente de eficiência da inclinação das fibras é ($k_a = 1$). Dessa forma, o coeficiente de eficiência do confinamento parcial tem valor ($k_{eff} = 0,2981$ - parcial), como esperado, bem inferior

ao obtido para o confinamento completo ($k_{eff} = 0,53$ - completo)

$$k_{eff} = (0,53) \cdot (0,5625) \cdot (1)$$

$$k_{eff} = 0,2981$$

Em função da pressão efetiva mínima de confinamento ($f_{l,eff} = 1,20 \text{ MPa}$) e do coeficiente de eficiência do confinamento ($k_{eff} = 0,2981$), tem-se o valor da pressão de confinamento (f_l):

$$f_l = \frac{1,20}{0,2981}$$

$$f_l = 4,0255 \text{ MPa}$$

A taxa geométrica de reforço necessário para o estabelecimento da pressão de confinamento ($f_l = 4,0255 \text{ MPa}$) é:

$$\rho_f = \frac{2 \cdot (4,0255)}{(220.000) \cdot (0,004)}$$

$$\rho_f = 0,009149$$

A espessura do reforço (t_f) necessária para que a pressão de confinamento mínima seja considerada eficiente é calculada como segue, para a distribuição geométrica ilustrada na Figura 6, ou seja,

TABELA 3

RESULTADOS DO CONFINAMENTO PARCIAL EM FUNÇÃO DO ESPAÇAMENTO (p'_f)

p'_f	n_f	$f_{l,eff}$ (MPa)	f_{ccd} (MPa)	$N_{Rcc,d}$ (kN)
150 mm (limite)	9	1,31	31,44	3.072
112,5 mm (75%)	7	1,37	31,67	3.090
75 mm (50%)	5	1,33	31,48	3.075

FONTE: AUTOR

valor limite para o espaçamento livre entre faixas consecutivas ($p'_f = 150 \text{ mm}$), faixas com largura de ($b_f = 150 \text{ cm}$) e distanciamento entre os centros das faixas ($p_f = p'_f + b_f = 150 + 150 = 300 \text{ mm}$).

$$\rho_f = \frac{2 \cdot t_f \cdot (b + h) \cdot b_f}{b \cdot h \cdot p_f}$$

$$t_f = \frac{b \cdot h \cdot p_f \cdot \rho_f}{2 \cdot (b + h) \cdot b_f}$$

$$t_f = \frac{(300) \cdot (300) \cdot (300) \cdot (0,009149)}{2 \cdot (300 + 300) \cdot (150)}$$

$$t_f = 1,3724 \text{ mm}$$

A espessura total ($t_f = 1,3724 \text{ mm}$) do reforço resulta em elevado número de camadas para cada uma das faixas ($n = 8,22 = 9$). Pelo Código Italiano, o uso de mais de 5 camadas não é aconselhado. Portanto, na Tabela 3, são apresentados novos resultados obtidos reduzindo-se o espaçamento entre as faixas de reforço em 75% e 50% do valor limite ($p'_f = 150 \text{ mm}$) e mantendo-se constante a largura da faixa ($b_f = 150 \text{ mm}$) e a pressão mínima efetiva do confinamento acima do valor mínimo ($f_{l,eff} = 1,20 \text{ MPa}$).

Para os valores de espaçamento livre entre faixas de reforço (p'_f), limite e 112,5 mm, o número de camadas de reforço é elevado e excede o limite recomendado pelo Código de projeto. Já, para um espaçamento de 75 mm, equivalente

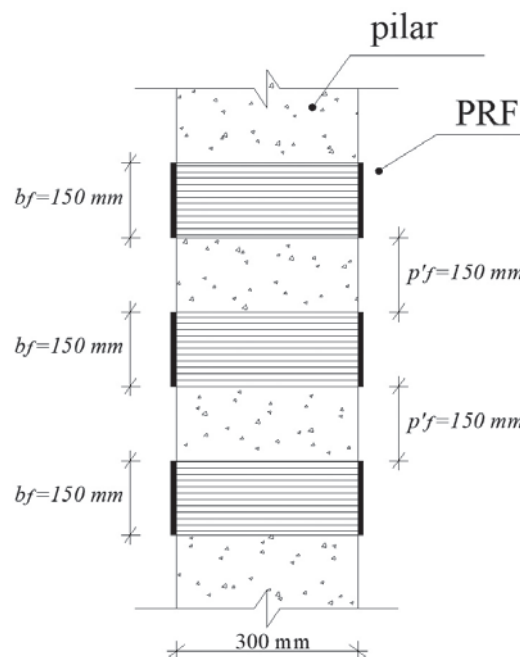


FIGURA 6

DISPOSIÇÃO DO REFORÇO POR CONFINAMENTO PARCIAL

FONTE: AUTOR

a 50% do valor limite, são necessárias 5 camadas de reforço e a capacidade resistente da seção transversal reforçada pelo confinamento parcial é ($N_{Rcc,d}=3.075$ kN), valor que representa incremento de 27% ($\Delta = 1,27$) em relação a seção sem reforço, mesma ordem de magnitude para o reforço pelo confinamento completo com 3 camadas ($N_{Rcc,d} = 3.149$ kN).

Importante mencionar que a solução obtida pelo reforço do tipo parcial aponta para uma viabilidade econômica em relação ao reforço contínuo. Mesmo com pequeno distanciamento livre entre faixas (75 mm), para cada metro de comprimento do pilar, tem-se uma economia de manta de PRF de $1,80 \text{ m}^2$.

5. CONCLUSÕES

O artigo apresentou e discutiu o tema do reforço de pilares de concreto pelo confinamento com polímeros reforçados com fibras do tipo parcial. A metodologia de cálculo do Código Italiano de projeto CNR-DT 200 R2 (2025) foi analisada para comparações com resultados experimentais de pilares reforçados e empregada para análise da capacidade resistente de pilar de concreto armado de seção quadrada. Seguem as conclusões obtidas:

- O modelo teórico tem boa precisão e uma desvantagem pela superestimativa da capacidade resistente dos pilares reforçados parcialmente;
- A exatidão do modelo é mais acentuada para casos em que o

confinamento é eficiente e resulta em resposta ascendente pós-fissuração do concreto;

- Para a seção quadrada analisada e considerando-se atendimento à pressão mínima de confinamento, foi necessária maior quantidade de camadas de reforço para o confinamento parcial em relação ao completo;
- Os incrementos na capacidade resistente da seção reforçada, em relação a seção original, foram estimados em 30% para envolvimento completo e, em 27% para envolvimento parcial com 5 camadas de reforço de PRF;
- Para o reforço parcial com 5 camadas, foi necessário reduzir o espaçamento livre entre as faixas em 50% do valor limite. ☹

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ACI PRC-440.2-17. Design and Construction of Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer FRP Systems for Strengthening Concrete Structures - Guide. November, 2023.
- [2] AULES, W. A.; RAOOF, S. M. Effect of shape modification on the confinement effectiveness of CFRP strengthened square concrete compression members: experimental study. *Case Studies in Construction Materials*, 15, 2021.
- [3] CNR-DT 200 R2, 2025. Guidelines for the Design, Execution, and Inspection of Structural Strengthening Interventions Using Fiber-Reinforced Composites. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Italy, 2025.
- [4] FERRARI, V. J. Capacidade de pilar em flexo-compressão reforçado por confinamento polimérico. *Concreto & Construções*, ed. 121, jan-mar, 2026.
- [5] FIB-90. Externally applied FRP reinforcement for concrete structures. The International Federation for Structural Concrete. Lausanne, Switzerland, 2019.
- [6] GUO, Y. C.; GAO, W. Y.; ZENG, J. J.; DUAN, Z. J.; NI, X. -Y.; PENG, K. -D. Compressive behavior of FRP ring-confined concrete in circular columns: Effects of specimen size and a new design-oriented stress-strain model. *Construction and Building Materials*, v. 201, 2019.
- [7] MAI, A. D. et al. Influence of the location of CFRP strips on the behaviour of partially wrapped square reinforced concrete columns under axial compression. *Structures*, n. 15, 2018.
- [8] SHAN, B.; GUI, F. C.; MONTI, G. XIAO, Y. Effectiveness of CFRP confinement and compressive strength of square concrete columns. *Journal of Composites for Construction*, v. 23, n. 6, 2019.
- [10] SHAYANFAR et al. Strength model for FRP-confined concrete: comprehensive database and reliability-based partial factor calibration, *Journal of Composites for Construction*, v. 30, n. 2, 2026.
- [11] TENG, J. G.; HU, Y. M.; YU, T. Stress-strain model for concrete in FRP-confined steel tubular columns. *Engineering Structures*, v. 49, p. 156-167, 2013.
- [12] YANG, J. et al. Behavior of CFRP partially wrapped square seawater sea-sand concrete columns under axial compression, *Engineering Structures*, v. 222, 2020.
- [13] ZENG, J. -J. et al. Behavior of partially and fully FRP-confined circularized square columns under axial compression. *Construction and Building Materials*, 152, 2017.
- [14] ZENG, J. -J. et al. Stress-strain behavior of concrete in circular concrete columns partially wrapped with FRP strips. *Composite Structures*, v. 200, 2018.
- [15] WANG, W. et al. Ultimate strain prediction of partially FRP confined concrete considering strain localization. *Construction and Building Materials*, 346, 2022.