

## MÉTODOS DE PROJETO PARA PILARES MISTOS CURTOS CIRCULARES PREENCHIDOS COM CONCRETO RECICLADO SUJEITOS A CARGA AXIAL CENTRADA

### *DESIGN METHODS FOR RECYCLED AGGREGATE CONCRETE-FILLED STEEL TUBE (RACFST) STUB COLUMNS UNDER CONCENTRIC COMPRESSION*

Maicon de Freitas Arcine <sup>1</sup>

Ricardo Carrazedo <sup>2</sup>

Silvana De Nardin <sup>3</sup>

**Resumo:** O confinamento do concreto reciclado ou *Recycled Aggregate Concrete* (RAC) tornou-se uma alternativa interessante para uso em estruturas devido à sua maior deformabilidade e menor resistência. Os pilares mistos preenchidos com concreto reciclado ou *Recycled Aggregate Concrete-Filled Steel Tube* (RACFST) são uma opção econômica em comparação ao *Concrete-Filled Steel Tube* (CFST), além de diminuir o impacto ambiental e o consumo de recursos naturais. No entanto, as recomendações existentes são para pilares CFST, e atualmente há apenas uma norma de projeto específica para pilares RACFST. O objetivo deste trabalho é identificar a aplicabilidade de normas e métodos da literatura em projetos de pilares RACFST. Sete normas para CFST, uma para RACFST e quatro métodos da literatura para RACFST foram testados em 97 resultados experimentais de pilares curtos RACFST. Todas as normas se mostraram eficientes no cálculo da capacidade resistente dos pilares RACFST, sendo a resistência à compressão do RAC o parâmetro principal que difere os métodos. O efeito de confinamento é considerado de maneiras distintas, o que também afeta a capacidade resistente dos pilares RACFST.

**Palavras-chaves:** Pilar misto, Concreto reciclado, Capacidade resistente, Projeto, Confinamento.

**Abstract:** *The confinement of Recycled Aggregate Concrete (RAC) has become an interesting alternative for its application in structures due to its greater deformability and lower resistance. Recycled Aggregate Concrete-Filled Steel Tube (RACFST) is an economical alternative to Concrete-Filled Steel Tube (CFST), in addition to reducing environmental impact and consumption of natural resources. However, the existing recommendations refer to CFST columns, while there is currently only one design standard for RACFST columns. The aim of this study is to determine the applicability of standards and methods from the literature in RACFST column design. For this, seven standards for CFST, one for RACFST and four methods from the literature for RACFST were tested on 97 experimental results of short RACFST columns. All standards were found to be efficient in calculating the load-bearing of RACFST columns, with the RAC compressive strength being the main parameter differentiating the methods. The confinement effect is taken into account in the methods in different ways, which also affects the load-bearing capacity of the RACFST columns.*

**Keywords:** *Composite column, Recycled concrete, Axial capacity, Design, Confinement.*

<sup>1,3</sup> Universidade Federal de São Carlos, Campus São Carlos – Brasil, e-mail [maiconarcine2321@gmail.com](mailto:maiconarcine2321@gmail.com), [snardin@ufscar.br](mailto:snardin@ufscar.br)

<sup>2</sup> Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos – Brasil, e-mail [carrazedo@usp.br](mailto:carrazedo@usp.br)

## 1 Introdução

Pilar misto preenchido com concreto ou *Concrete Filled Steel Tubular* (CFST) possui grandes vantagens, incluindo boa ductilidade, construção rápida e alta resistência. Devido a isso, pilares CFST tem sido amplamente utilizado em projetos estruturais como edifícios altos, estacas, pontes, tabuleiros de ferrovias e para resistência a terremotos. A partir da década de 1960 foram intensivamente estudados (Shanmugam; Lakshmi, 2001) e, conseqüentemente, diversas normas de projeto foram elaboradas (ABNT NBR 8800, 2008; ACI 318-19, 2019; ANSI/AISC 360, 2016; CAN/CSA S16-09, 2009; EUROCODE 4, 2004; GB50936, 2014).

O núcleo de concreto natural no pilar CFST pode ser substituído por *Recycled Aggregate Concrete* (RAC) ou simplesmente concreto reciclado. O RAC é a substituição (total ou parcialmente) de agregados naturais por reciclados na mistura do concreto. Este material vem ganhando popularidade devido ao seu aspecto ambiental e sustentável. Em comparação com o concreto natural, o RAC possui maior deformabilidade, teor de vazios e absorção de água, mas com menor resistência e módulo de elasticidade. O confinamento do RAC com aço, aqui nomeado de *Recycled Aggregate Concrete Filled Steel Tubular* (RACFST), foi proposto inicialmente por Konno *et al.* (1997) (*apud.* Yang; Han; Man 2006, p. 258) como uma alternativa para compensar o baixo desempenho do RAC. Logo, como resultado, o RACFST também foi extensivamente estudado (Azevedo *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2014; Han; Xu; Hou, 2022; Wang; Chen; Geng, 2015; Yang; Han; Man, 2006; Zhang *et al.*, 2022). Atrelado a isso, diversos documentos surgiram na tentativa de desenvolver métodos de projetos para RACFST (Chen *et al.*, 2023a, 2023b; Xiao *et al.*, 2012). Entretanto, até o momento, a norma chinesa T/CECS 625 (2019) é a única que aborda pilares mistos curtos preenchidos com RAC (RACFST). Isto justifica a necessidade de avaliar metodologias alternativas para prever a capacidade resistente deste tipo de pilar misto. Desse modo, neste trabalho foi avaliada a utilização de sete normas técnicas (seis de CFST e uma de RACFST) e quatro modelos analíticos da literatura (todos para RACFST). Os resultados teóricos de força última foram então comparados aos valores experimentais de 97 exemplares RACFST.

## 2 Modelos para previsão da força normal resistente e base de dados

Atualmente, três principais modelos são usados para prever a capacidade resistente de pilares mistos preenchidos de seção circular (CFST). O primeiro deles foi apresentado por Zhong (1994) (*apud.* Chen *et al.* 2014, p. 37) e é mostrado na Equação (01). O segundo modelo inclui o confinamento, inicialmente proposto por Cai (2003) (*apud.* Chen *et al.* 2014, p. 37) e mostrado na Equação (02). Por fim, o modelo baseado no princípio da superposição, que é adotado por diversas normas estrangeiras. Neste caso, a capacidade resistente do CFST é dada pela soma das parcelas relativas ao tubo de aço e ao núcleo de concreto, como mostra a Equação (03).

$$N_{u,unificada} = (A_c + A_s) \cdot (1,212 + B \cdot \lambda + C \cdot \lambda^2) \cdot f_c \quad (1)$$

$$N_{u,confinamento} = \begin{cases} A_c \cdot f_c \cdot (1 + 2 \cdot \lambda) & \text{para } \lambda \leq 1,235 \\ A_c \cdot f_c \cdot (1 + \sqrt{\lambda} + 1,1 \cdot \lambda) & \text{para } \lambda > 1,235 \end{cases} \quad (2)$$

$$N_{u,superposição} = \frac{1}{\gamma_s} \cdot f_y \cdot A_s + \frac{1}{\gamma_c} \cdot f_c \cdot A_c \quad (3)$$

Onde,  $B = 0,176 \cdot (f_y/235) + 0,974$ ,  $C = -0,104 \cdot (f_c/20) + 0,031$ ,  $\lambda$  é o fator de confinamento dado por  $\lambda = (A_s \cdot f_y)/(A_c \cdot f_{ck})$ ,  $f_c$  é a resistência à compressão do concreto,  $f_y$  é a resistência ao escoamento do aço,  $\gamma_s$  e  $\gamma_c$  são coeficientes de minoração do aço ( $\gamma_s = 1,15$ ) e do concreto ( $\gamma_c = 1,4$ ), respectivamente,  $A_c$  e  $A_s$  são área da seção transversal do núcleo de concreto e do tubo de aço, respectivamente.

A Tabela 1 apresenta alguns detalhes e limitações de aplicação das normas analisadas no presente estudo, enquanto a Tabela 2 apresenta as expressões utilizadas das respectivas normas. Contudo, apenas a norma chinesa T/CECS 625 (2019) foi desenvolvida especificamente para pilares curtos RACFST e limita o teor de substituição a 70%. A norma chinesa GB50936 (2014) apresenta dois métodos diferentes para determinar a capacidade resistente de pilares mistos (CFST). O primeiro (GB-1) leva em consideração o fator de confinamento ( $\lambda$ ), enquanto o segundo (GB-2) considera o impacto do índice de esbeltez. De acordo com Yang, Liu e Wang (2023), pilares CFST e RACFST apresentam modos de falha semelhantes. Por isso, é razoável assumir que as expressões desenvolvidas para pilares preenchidos com concreto convencional (CFST) se aplicam a pilares preenchidos com concreto reciclado (RACFST). Quanto aos modelos da literatura, foram avaliados quatro de previsão da capacidade resistente específicos para pilares RACFST, os quais as expressões estão na Tabela 2. Os modelos de Chen *et al.* (2013) (*apud.* Wang *et al.*, 2022, p. 15) e Xiao *et al.* (2012) levam em conta o confinamento do concreto. Já as técnicas de algoritmos de aprendizagem integrados (*Extreme gradient boosting* – XGB) e regressão linear múltipla (*Multiple linear regression* - MLS) foram empregadas por Chen *et al.* (2023a) e Chen *et al.* (2023b) na elaboração do modelo analítico, respectivamente.

**Tabela 1** – Detalhes e limitações das normas avaliadas

Norma	Pais	D/t	$f_{cu}$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	Teoria
T/CECS 625 (2019)	China	$\leq 135(235/f_y)$	30 – 50	235 – 460	Unificada
GB50936 (2014)	China	$\leq 135(235/f_y)$	$\geq 30$	–	GB1 (Unif.) GB2 (Conf.)
NBR 8800 (2008)	Brasil	$\leq 0,15(E_s/f_y)$	25 – 62,5	250 – 450	Superposição
Eurocode 4 (2004)	Europa	$\leq 90(235/f_y)$	25 – 75	235 – 460	Superposição
ANSI/AISC 360 (2016)	EUA	$\leq 0,31(E_s/f_y)$	26,3 – 87,5	$\leq 525$	Superposição
ACI 318 (2019)	EUA	$\leq \sqrt{8(E_s/f_y)}$	–	–	Superposição
CAN/CSA S16 (2009)	Canadá	$\leq 28000/f_y$	20 – 80	–	Superposição

Fonte: Autoria própria (2024)

**Tabela 2** – Expressões utilizadas

Ref.	$N_u$	Equações complementares
T/CECS 625 (2019)	$f_{ck}(1,14 + 1,02\theta)(A_c + A_s)$	$\theta = \frac{A_s f_y}{A_c f_{ck}}$
GB50936 (2014)	GB1	$(A_s + A_c)(1,212 + B\theta + C\theta^2)f_{ck}$
	GB2	$\begin{cases} 0,9A_c f_{ck}(1 + \rho\theta), \theta \leq 1/(\rho - 1)^2 \\ 0,9A_c f_{ck}(1 + \sqrt{\theta} + \theta), \theta > 1/(\rho - 1)^2 \end{cases}$
NBR 8800 (2008)	$\chi(f_y A_s + \alpha f_{ck} A_c)$	$\alpha = 0,95$ (Pilares mistos circulares: efeito de confinamento)

		$\chi = \begin{cases} 0,658\lambda_{0,m}^2, & \lambda_{0,m} \leq 1,5 \\ \frac{0,877}{\lambda_{0,m}^2}, & \lambda_{0,m} > 1,5 \end{cases}$ $\lambda_{0,m} = \sqrt{\frac{N_{pL,R}}{N_e}}$ $N_{pL,R} = f_y A_s + f_{ck} A_c$ $N_e = \frac{\pi^2 \cdot (EI)_e}{(KL)^2}$ $(EI)_e = E_s I_s + 0,6 \cdot E_{c,red} I_c$
<b>Eurocode 4 (2004)</b>	$\chi \left[ \eta_{ao} f_y A_s + \left( 1 + \eta_{co} \frac{t}{D} \frac{f_y}{f_{ck}} \right) f_{ck} A_c \right]$	$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_{0,m}^2}} \leq 1,0$ $\phi = 0,5 [1 + \alpha^* (\lambda_{0,m} - 0,2) + \lambda_{0,m}^2]$ $\eta_{ao} = 0,25(3 + 2\lambda_{0,m}), \eta_{ao} \leq 1,0$ $\eta_{co} = 4,9 - 18,5\lambda_{0,m} + 17(\lambda_{0,m})^2, \eta_{co} \geq 0,0$
<b>ANSI/AISC 360 (2016)</b>	Seções compactas ( $\lambda \leq \lambda_p$ ) $f_y A_s + C_2 A_c f_{cm}$	$\lambda = 0,11 \frac{E_s}{f_y}; \lambda_p = 0,15 \frac{E_s}{f_y}$ $\lambda_r = 0,19 \frac{E_s}{f_y}$ $C_2 = 0,95$
<b>ACI 318 (2019)</b>	$0,85 f_{cm} A_c + f_y A_s$	
<b>CAN/CSA S16 (2009)</b>	$(0,90 \tau A_s f_y + 0,65 \tau' \alpha_1 A_c f_{ck}) (1 + \lambda_{0,m}^{3,6})^{-0,56}$	$\tau = \frac{1}{\sqrt{1 + \beta + \beta^2}}$ $\tau' = 1 + \left( \frac{25 \rho^2 \tau}{D/t} \right) \left( \frac{f_y}{\alpha_1 \cdot f_{ck}} \right)$ $\alpha_1 = 0,85 - 0,0015 f_{ck}, \alpha_1 > 0,67$ $\beta = 0,02(25 - L/D)$
<b>Xiao et al. (2012)</b>	$\phi A_c f_{ck} (1 + 1,93\theta)$	$\phi = \frac{0,88}{-0,3r^2 + 0,45r + 1}$
<b>Chen et al. (2013)</b>	$\eta f_{ck} A_c (1 + 0,99\sqrt{\theta} + 1,11\theta)$	$\eta = 0,901 + 0,084r - 0,154r^2$
<b>Chen et al. (2023a)</b>	$(0,824 + 0,037r - 0,191r^2) f_{cm} A_t (1,859 + 0,262\theta + 0,311\theta^2) (1 - 0,0177(L/D - 3))$	
<b>Chen et al. (2023b)</b>	$-2780,32 + 8,33183D + 166,5683t + 2,244647L - 0,3473r + 9,3191f_{ck} + 3,37625f_y$	

Onde:

$\chi$  é o fator de redução associado à resistência à compressão;  $N_{pL,Rd}$  é a força axial de compressão resistente de cálculo da seção transversal à plastificação total;  $N_e$  é a força axial de flambagem elástica;  $A_s$  e  $A_c$  são a área da seção transversal do tubo de aço e do concreto, respectivamente;  $f_y$ ,  $f_{ck}$  e  $f_{cm}$  são resistência ao escoamento do aço, resistência característica à compressão e média do concreto, respectivamente;  $KL$  é o comprimento de flambagem do pilar;  $(EI)_e$  é a rigidez efetiva à flexão da seção transversal mista;  $E_s$ ,  $I_s$  e  $E_c$ ,  $I_c$  são o módulo de elasticidade e inércia da seção transversal do aço estrutural e do núcleo de concreto, respectivamente;  $E_{c,red}$  é o módulo de elasticidade reduzido do concreto devido aos efeitos de fluência e retração (Ver P.3.3 da NBR8800, 2008);  $\lambda$ ,  $\lambda_{0,m}$ ,  $\lambda_p$  e  $\lambda_r$  são índice de esbelteza, índice de esbelteza reduzido, esbelteza correspondente a plastificação total e ao início de escoamento, respectivamente;  $\phi_c$  é igual a 0,75 e se refere ao LFRD – Load and Resistance Factor Design;  $\theta$  é índice de confinamento;  $\alpha^*$  é fator de imperfeição tabelado;  $r$  é o teor de substituição;  $L$ ,  $D$  e  $t$  são comprimento, diâmetro e espessura do tubo, respectivamente.

Fonte: Autoria própria (2024)

A Tabela 3 apresenta as expressões de conversão adotadas neste estudo. Ainda na Tabela 3,  $f_{cu}$  é resistência cúbica à compressão do concreto e  $r$  é o teor de substituição por

RCA. Quanto ao módulo de elasticidade do aço ( $E_s$ ), caso este não tenha sido fornecido no documento, foi adotado 200 GPa, conforme recomendado pela NBR 8800 (2008).

**Tabela 3** – Expressões básicas usadas

Parâmetro	Equação	Fonte
Resistência à compressão cúbica do RAC ( $f_{cu,r}$ )	$f_{cu} \cdot (-0,127 \cdot r^2 + 0,012 \cdot r + 1)$	Wang, Chen e Geng (2015)
Resistência à compressão prismática ( $f_{cp}$ )	$0,76 \cdot f_{cu}$	
Resistência à compressão característica ( $f_{ck}$ )	$0,67 \cdot f_{cu}$	Chen <i>et al.</i> (2023b)
Resistência à compressão cilíndrica ( $f'_c$ )	$0,80 \cdot f_{cu}$	Yang, Liu e Wang (2023)
Resistência média à compressão cilíndrica ( $f_{cm}$ )	$f_{ck} + 8 \text{ MPa}$	Eurocode 2 (2004)
Módulo de elasticidade ( $E_c$ )	$4733 \cdot \sqrt{f_{ck}}$	ANSI/AISC 360 (2016)
Módulo de elasticidade do RAC ( $E_{c,r}$ )	$(1 - 0,2 \cdot r) \cdot E_c$	Wang, Chen e Geng (2015)

Fonte: Autoria própria (2024)

Devido à grande heterogeneidade do RCA, Yang, Liu e Wang (2023) recomendam usar o valor experimental da resistência à compressão do RAC ( $f_{cu,r}$ ) no cálculo da capacidade resistente de pilares RACFST. Entretanto, caso o valor experimental não esteja disponível, é possível estimar  $f_{cu,r}$  usando a primeira equação da Tabela 2, que depende do teor de substituição ( $r$ ) do RCA

A Tabela 3 apresenta os dados experimentais utilizados neste estudo. Foram utilizados 97 resultados experimentais extraídos de 10 documentos. Trata-se de uma relevante base de dados uma vez que os parâmetros investigados tem boa amplitude de valores, ou seja,  $r$  (0 – 100%),  $D$  (88,1–219,0 mm),  $t$  (1,65–6,57 mm),  $D/t$  (20,4–76,6),  $f_{cu}$  (28,2–67,1 MPa),  $f_y$  (269,3–721,4 MPa) e taxa de aço ( $\alpha = A_s/A_c$ ) (6%–24%). Além disso, todos os exemplares possuíam  $L/D = 3,0$  (pilares curtos).

**Tabela 3** – Informações detalhadas da base de dados

Referência	$r$ (%)	<sup>(a)</sup> $f_{cu}$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	$t$ (mm)	$D$ (mm)	$L$ (mm)	<sup>(b)</sup> $N^\circ$
Yang, Han e Man (2006)	0–50	36,6–42,7	335,7–350,4	2,19–2,86	114–219	342–657	9
Chen <i>et al.</i> (2014)	0–100	28,2–38,4	342,7–357,2	1,65–2,67	88–113	283–364	22
Tam, Wang e Tao (2014)	0–100	46,1–50,8	339,6–388,5	2,79–2,86	138,0–170,6	420–510	8
Wang, Chen e Geng (2015)	0–100	45,3–67,1	302,0–335,3	2,71–4,61	133–140	400–420	12
Dong, Wang e Guan (2016)	0–100	34,7–41,8	300,3	1,8–1,9	114	400	5
Lyu, Han e Hou (2021)	0–100	51,6–57,2	434,1	2,84–2,97	140–200	300–600	8
Azevedo <i>et al.</i> (2021)	0–50	36,2–52,4	379,5–402,9	6,55–6,57	153–178	450–560	8
Han, Xu e Hou (2022)	0–100	56,3–62,5	293,1–305,2	2,78–4,98	100,6–201,8	302–605	9
Zhang <i>et al.</i> (2022)	0–100	41,4–65,8	269,3–346,1	3,9–4,2	114–219	350–620	9
<sup>(c)</sup> Zhao <i>et al.</i> (2023)	0–100	45,0–62,4	512,9–721,4	3,91–4,06	203	609	7

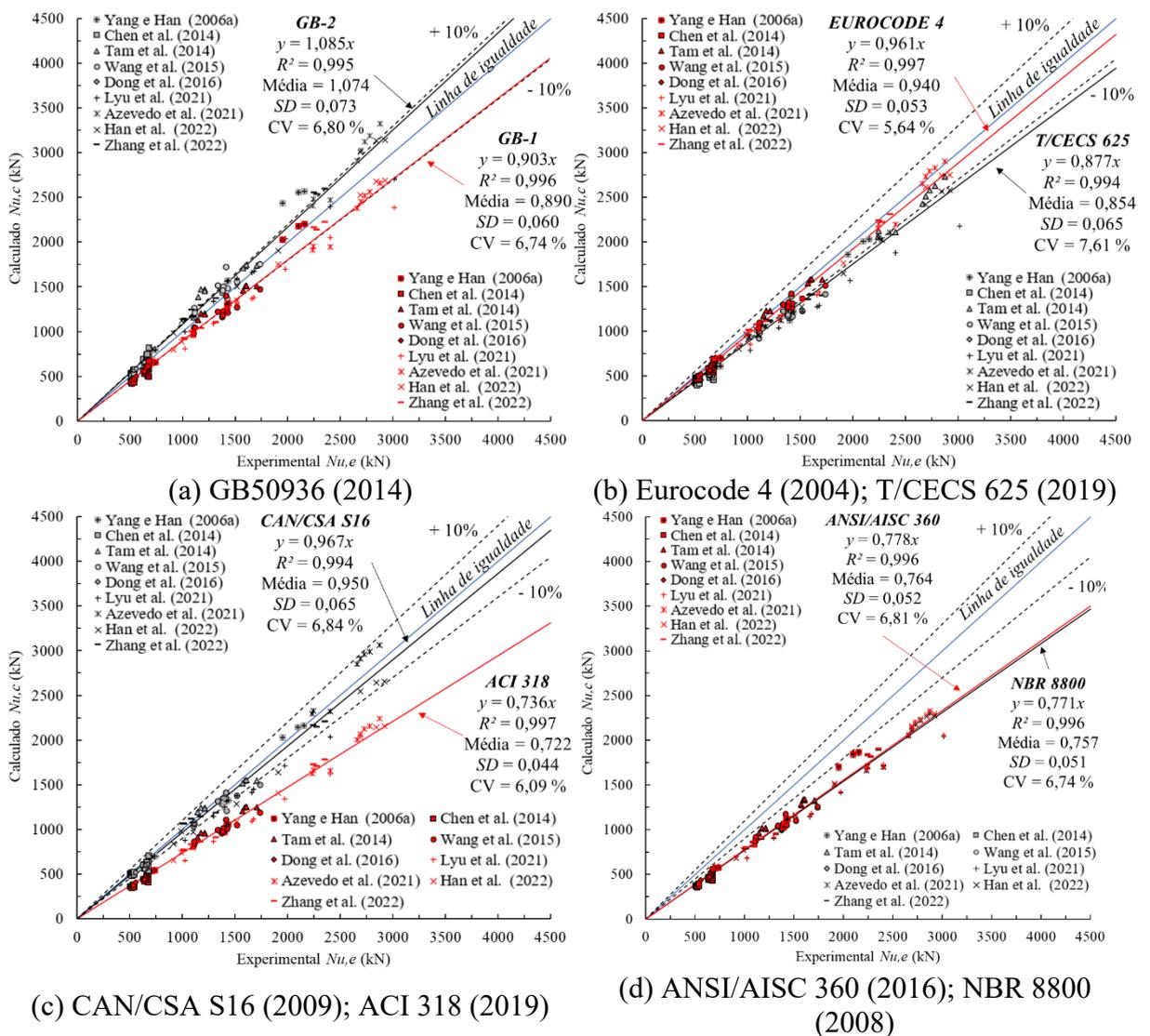
<sup>(a)</sup> Boa parte da variação de  $f_{cu}$  é devido ao teor de substituição ( $r$ ); <sup>(b)</sup> Número de experimentos, em que valores médios foram considerados para as réplicas; <sup>(c)</sup> Estes dados foram somente aplicados aos métodos disponíveis na literatura, devido às limitações das normas em relação a  $f_y$ .

Fonte: Autoria própria (2024)

Como visto anteriormente, as normas T/CECS 625 (2019) e NBR 8800 (2008) limitam  $f_{cu}$  a 50 MPa e 62,5 MPa, respectivamente, o que de acordo com a Tabela 3, os métodos não seriam aplicáveis em alguns resultados experimentais. Entretanto, por se tratar de uma pesquisa teórica, os dados informados não serão desconsiderados, assim como estudos semelhantes (Lyu; Han; Hou, 2021; Wang *et al.*, 2022).

### 3 Resultados e Discussão

A Figura 1 apresenta a força normal resistente teórica ( $N_{u,c}$ ) comparada aos valores experimentais ( $N_{u,e}$ ); CV é coeficiente de variação e SD é o desvio padrão (*standard deviation*). Uma linha de regressão linear, uma de igualdade ( $N_{u,c}/N_{u,e} = 1,0$ ) e de erros com  $\pm 10\%$  foram inseridas para destacar a precisão dos valores previstos. Para comparação direta entre os resultados experimentais previstos, os fatores de minoração foram tomados iguais a 1,0.



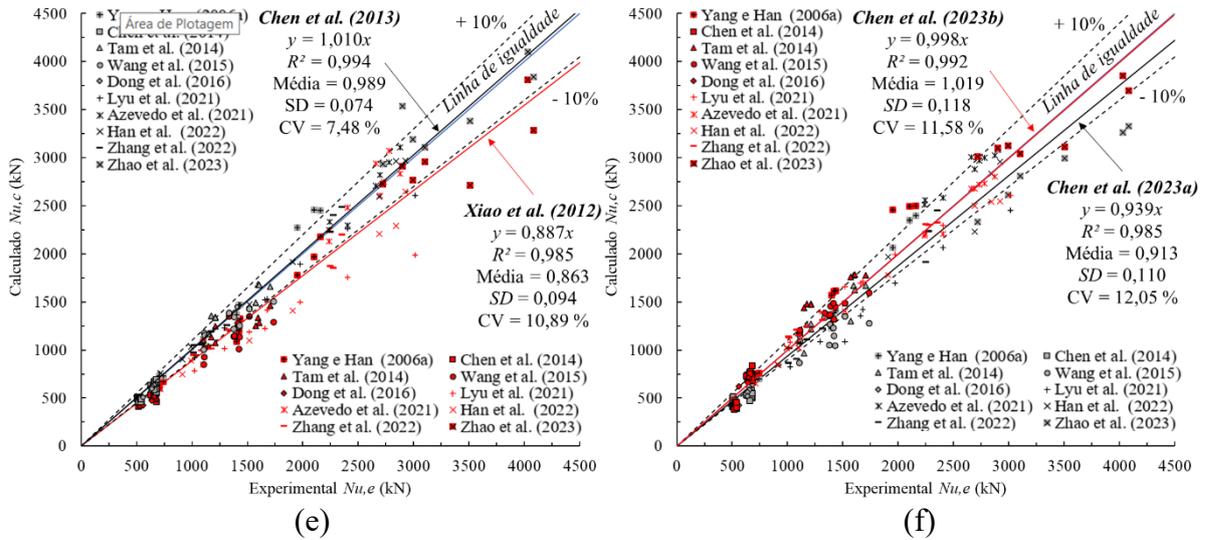


Figura 1. Comparação de  $N_{u,c}/N_{u,e}$  usando normas (a, b, c, d) e métodos da literatura (e, f)

Com exceção de GB-2 (GB50936, 2014), que superestima em média cerca de 7,4 % da capacidade resistente, os demais modelos avaliados se mostraram conservadores, com destaque para o ACI 318 (2019), a NBR 8800 (2008) e ANSI/AISC 360 (2016), que subestimaram em média 27,8 %, 24,3 % e 23,6 %, respectivamente. A diferença entre os valores previstos e experimentais se deve, em grande parte, ao modelo de confinamento (Wang; Chen; Geng, 2015). Em particular, a norma brasileira e as duas americanas estimam, de forma conservadora, os efeitos do confinamento, o que subestima a capacidade resistente de pilares RACFST. Portanto, embora seja possível utilizar as normas desenvolvidas para CFST para prever a força última de pilares RACFST, como o efeito de confinamento é subestimado. Como consequência, os valores de força última também são subestimados.

Ainda que seja específica para pilares curtos RACFST, a norma T/CECS 625 (2019) também apresentou resultados conservadores (14,6 %, em média) – Figura 2a. De acordo com a Figura 1b, os valores com erros acima de -10 % correspondem a modelos com concretos mais resistentes e que ultrapassam o limite normativos. Portanto, é provável que esta diferença seja resultado da aplicação da referida norma a pilares com concretos de resistência superior ao limite (Tabela 1). Dentre as que apresentaram melhores previsões destacam-se GB-1 (GB50936, 2014), CAN/CSA S16 (2009) e Eurocode 4 (2004); esta última apresentou os menores valores de desvio padrão ( $SD = 0,053$ ) e coeficiente de variação ( $CV = 5,64$  %). A menor dispersão da norma europeia também pode ser observada na Figura 2b.

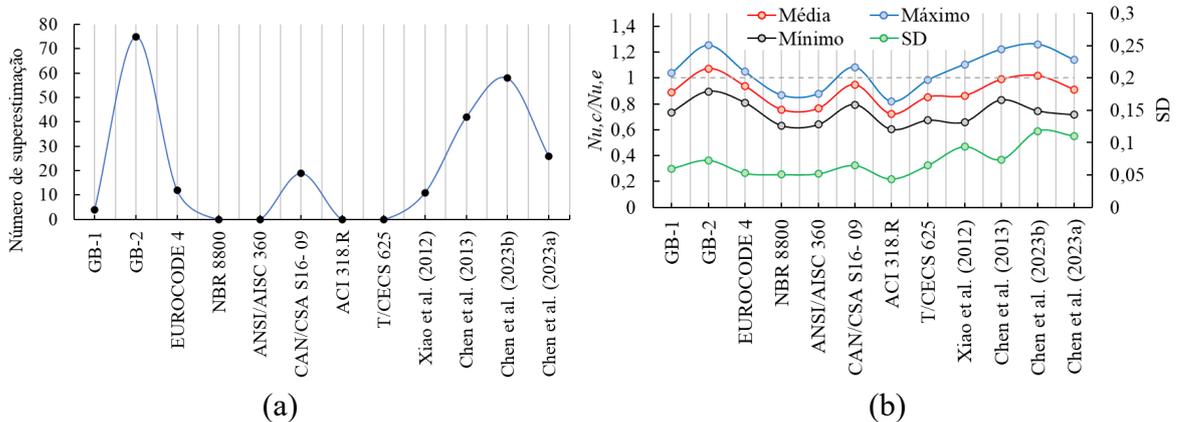


Figura 2. Análise dos resultados

Nota-se que a principal diferença entre os métodos é a resistência à compressão do concreto, reciclado ou convencional. Portanto, propriedades do RAC como deformabilidade, módulo de elasticidade e resistente à compressão são essenciais para o dimensionamento. Assim sendo, embora normas menos conservadoras como GB-2 (GB50936, 2014) não sejam recomendadas, é plausível considerar que todas as normas de projeto específicas para projetos de pilares curtos CFST podem ser aplicáveis a pilares curtos RACFST. Estes resultados estão em consonância com estudos anteriores (Lyu; Han; Hou, 2021; Wang; Chen; Geng, 2015).

De acordo com Figuras 1e e 1f todos os resultados decorrentes de métodos analíticos da literatura apresentaram melhor desempenho médio que os normativos. Tal fato pode ser observado pelas linhas médias estarem dentro da faixa de erro ( $\pm 10\%$ ), com exceção de Xiao *et al.* (2012). É provável que a melhor correlação teórico-experimental seja fruto da adequada consideração dos efeitos de confinamento do concreto reciclado. Em razão disso e da heterogeneidade do RAC, os modelos analíticos apresentaram maior variação dos resultados, com CV variando de 7,48 % a 12,05 %. Com exceção do método de Xiao *et al.* (2012) com 11 resultados acima do previsto, os demais apresentam mais de 20 resultados superestimados (Figura 2a). Apesar disso, destacam-se os métodos de Chen *et al.* (2013) e Chen *et al.* (2023b) com uma relação média de  $N_{u,c}/N_{u,e}$  de 0,989 e 1,019, respectivamente.

#### 4 Conclusões

Este estudo apresenta a aplicação de métodos de projeto para capacidade resistente de pilares mistos circulares curtos, preenchidos com concreto reciclado (RACFST). Foram avaliadas sete normas de projeto e quatro modelos analíticos da literatura. Por meio dessa investigação, as seguintes conclusões podem ser tomadas:

- Todas as normas e métodos teóricos são aplicáveis a pilares RACFST;
- Embora apresentem alguns resultados acima dos experimentais, as normas GB-1 (GB50936, 2014), CAN/CSA S16 (2009) e Eurocode 4 (2004) apresentaram boa concordância e são as mais recomendadas para projeto de pilares curtos RACFST;
- Embora seja a única para pilares RACFST, o teor de substituição da T/CECS 625 (2019) ainda é limitado a 70 %. Logo, sugere-se uma adaptação da mesma para aumentar o escopo de aplicação;
- Os métodos de Xiao *et al.* (2012) e Chen *et al.* (2023a) foram considerados os mais adequados. Entretanto, é necessário estabelecer algumas limitações em suas aplicações.

#### Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

#### Referências

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318-19: Building Code Requirements for Structural Concrete**. Farmington Hills, 2019.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **ANSI/AISC 360: Specification for Structural Steel Buildings**. Chicago, 2016.

---

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008.

AZEVEDO, V. S. *et al.* Experimental investigation on recycled aggregate concrete filled steel tubular stub columns under axial compression. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 187, p. 106930, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106930>

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CAN/CSA S16-09: Design of steel structures**. Ontario, 2009.

CHEN, K. *et al.* Intelligent design of limit states for recycled aggregate concrete filled steel tubular columns. **Structures**, v. 58, n. October, p. 105338, 2023a. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105338>

CHEN, L. *et al.* Axial compressive strength predictive models for recycled aggregate concrete filled circular steel tube columns using ANN, GEP, and MLR. **Journal of Building Engineering**, v. 77, p. 107439, 2023b. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107439>

CHEN, Z. *et al.* Performance and calculations of recycled aggregate concrete-filled steel tubular (RACFST) short columns under axial compression. **International Journal of Steel Structures**, v. 14, n. 1, p. 31–42, 2014. <https://doi.org/10.1007/s13296-014-1005-5>

DONG, J. F.; WANG, Q. Y.; GUAN, Z. W. Material and structural response of steel tube confined recycled earthquake waste concrete subjected to axial compression. **Magazine of Concrete Research**, v. 68, n. 6, p. 271–282, 2016. <https://doi.org/10.1680/jmacr.14.00357>

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EUROCODE 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings**. Brussels, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EUROCODE 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings**. Brussels, 2004.

GB50936. **GB 50936-2014: Technical code for concrete filled steel tubular structures**. Beijing, 2014 (em chines).

HAN, L. H.; XU, C. Y.; HOU, C. Axial compression and bond behaviour of recycled aggregate concrete-filled stainless steel tubular stub columns. **Engineering Structures**, v. 262, n. May, p. 114306, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114306>

LYU, W. Q.; HAN, L. H.; HOU, C. Axial compressive behaviour and design calculations on recycled aggregate concrete-filled steel tubular (RAC-FST) stub columns. **Engineering Structures**, v. 241, n. May, p. 112452, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112452>

SHANMUGAM, N. E.; LAKSHMI, B. State of the art report on steel-concrete composite columns. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 57, n. 10, p. 1041–1080,

---

2001. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(01\)00021-9](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(01)00021-9)

T/CECS 625. **TCECS 625-2019: Technical specification for recycled aggregate concrete-filled steel tubular structures**. Beijing, 2019 (em chines).

TAM, V. W. Y.; WANG, Z. BIN; TAO, Z. Behaviour of recycled aggregate concrete filled stainless steel stub columns. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 47, n. 1–2, p. 293–310, 2014. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0061-1>

WANG, E. et al. Confinement Effect and Efficiency of Concentrically Loaded RACFCST Stub Columns. **Materials**, v. 15, n. 1, p. 18, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15010154>

WANG, Y.; CHEN, J.; GENG, Y. Testing and analysis of axially loaded normal-strength recycled aggregate concrete filled steel tubular stub columns. **Engineering Structures**, v. 86, p. 192–212, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.01.007>

XIAO, J. et al. Mechanical properties of confined recycled aggregate concrete under axial compression. **Construction and Building Materials**, v. 26, n. 1, p. 591–603, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.062>

YANG, D.; LIU, F.; WANG, Y. Axial compression behaviour of rectangular recycled aggregate concrete-filled steel tubular stub columns. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 201, p. 107687, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107687>

YANG, Y. F.; HAN, L.-H.; MAN, L. H. Compressive and flexural behaviour of recycled aggregate concrete filled steel tubes (RACFST) under short-term loadings. **Steel and Composite Structures**, v. 6, n. 3, p. 257–284, 2006.

ZHANG, W. H. et al. Axial-load response of CFST stub columns with external stainless steel and recycled aggregate concrete: Testing, mechanism analysis and design. **Engineering Structures**, v. 256, p. 113968, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.113968>

ZHAO, H. et al. Performance of recycled aggregate concrete-filled high-strength steel tubes under axial compression, tension and torsion. **Thin-Walled Structures**, v. 184, p. 110478, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110478>