Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v33i1.72635

ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE PILARES MISTOS PREENCHIDOS DE CONCRETO

Lucas Mognon Santiago Prates [1]
Carlos Humberto Martins [2]
Felipe Piana Vendramell Ferreira [3]
Haron Cesar Almeida Tavares [4]
Igor Eduardo da Silva Ribeiro [5]
Jonas Yoshihiro Namba [6]
Vinicius Moura de Oliveira [7]

NUMERICAL ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF CONCRETE-FILLED STEEL TUBES

Resumo: A utilização de tubos de aço preenchidos com concreto na construção civil oferece vantagens significativas, como maior resistência, ductilidade e absorção de energia, em comparação com pilares de aço ou de concreto armado. O presente estudo tem como objetivo investigar o comportamento à compressão de pilares retangulares mistos preenchidos de concreto. Um modelo de elementos finitos foi desenvolvido e validado via software ABAQUS. Foi possível observar que parâmetros como comprimento e espessura do tubo, seção transversal e resistência do concreto influenciam na capacidade resistente do elemento. Os resultados dos modelos numéricos foram comparados com modelos analíticos para verificação da carga última, verificou-se que os modelos normativos se apresentaram conservadores na previsão da capacidade resistente de pilares mistos preenchidos de concreto.

Palavras-chaves: Pilares mistos preenchidos de concreto; Modelagem numérica; Compressão axial.

Abstract: *The use of concrete-filled steel tubes in civil construction offers significant advantages, such as increased strength, ductility, and energy absorption, compared to steel or reinforced concrete columns. This study aims to investigate the compressive behavior of concrete-filled rectangular composite columns. A finite element model was developed and validated using ABAQUS software. It was observed that parameters such as length and thickness of the tube, cross-sectional area, and concrete strength influence the resistance capacity. The results of the numerical models were compared with analytical models to verify the ultimate load. It was found that the normative models were conservative in predicting the resistance capacity of concrete-filled rectangular composite columns.*

Keywords: *Concrete filled steel tube; Numerical model; Axial compression.*

[1] *Universidade Federal de São Carlos – Brasil, email: lucasmsprates@gmail.com*
[2] *Universidade Estadual de Maringá, Campus Sede – Brasil, email: chmartins@uem.br*
[3] *Universidade Federal de Uberlândia – Brasil, email: fpiana@live.com*
[4] *Universidade Estadual de Maringá, Campus Sede – Brasil, email: pg404635@uem.br*
[5] *Universidade Estadual de Maringá, Campus Sede – Brasil, email: pg404636@uem.br*
[6] *Universidade Estadual de Maringá, Campus Sede – Brasil, email: pg404638@uem.br*
[7] *Universidade Federal de São Carlos – Brasil, email: engenheiro.viniciusmoura@gmail.com*

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v33i1.72635

1 Introdução

A escolha de materiais para projetos de construção civil é uma decisão que leva em conta aspectos estruturais e financeiros. O intuito é criar estruturas econômicas e eficazes, que ofereçam longevidade, segurança, sustentabilidade e cumpram as exigências funcionais, maximizando a utilização dos recursos. Dentro do escopo dos materiais frequentemente empregados na construção civil, destacam-se o concreto e o aço. O concreto é escolhido por sua rigidez, custo-benefício, resistência à compressão e capacidade de resistir ao fogo, enquanto o aço é utilizado por sua alta resistência à tração, ductilidade e leveza. A utilização conjunta desses materiais leva a sistemas construtivos mais eficientes do que o uso isolado de cada um. Nas estruturas compostas, onde concreto e aço são combinados na mesma seção transversal para suportar cargas, criam-se as chamadas estruturas mistas. Essas estruturas podem ser aplicadas em diversos componentes, como pilares, vigas e lajes de prédios, além de pontes e outras infraestruturas. Pilares mistas oferecem benefícios notáveis: o aço proporciona melhor desempenho na tração e resistência a momentos de flexão, enquanto o concreto preenchido aumenta a rigidez da coluna. Isso ocorre porque o aço, ao estar posicionado mais afastado do centroide da seção, aumenta o momento de inércia, melhorando assim as propriedades mecânicas em relação ao uso isolado de concreto armado ou aço (Han; Li; Bjorhovde, 2014).

Em pilares com tubos de aço preenchidos de concreto, o concreto localizado no interior do pilar impede a ocorrência de instabilidade local prematura do tubo de aço, enquanto o aço posicionado na extremidade do pilar confere um efeito de confinamento ao concreto de núcleo. Este confinamento contribui para um aumento na resistência do concreto. Estudos indicam que tais estruturas, com tubos de aço preenchidos, superam em resistência, ductilidade e capacidade de absorção de energia quando comparadas a pilares feitos exclusivamente de aço. Além disso, a aplicação deste tipo de elemento pode levar à redução dos custos construtivos, uma vez que o tubo de aço atua tanto suporte estrutural para o concreto no estado fresco, otimizando o processo construtivo, de acordo com construção (Lee *et al*., 2011).

O objetivo deste estudo é investigar o comportamento de pilares misto preenchidos de concreto. Para isso, serão realizadas análises numéricas, incluindo um estudo paramétrico para avaliar o impacto de diferentes variáveis, como a variação da geometria da seção transversal e a resistência do concreto. Além disso, comparou-se os resultados obtidos nas simulações numéricas com as previsões de modelos normativos existentes, a fim de verificar a precisão desses modelos na estimativa da capacidade resistente das estruturas analisadas. Essa comparação visa contribuir para a validação dos modelos numéricos e, possivelmente, para a atualização ou aprimoramento das normas de projeto aplicáveis pilares mistos preenchidos de concreto.

2 Materiais e Métodos

Para desenvolver um modelo numérico capaz de simular o comportamento de pilares mistos preenchidos com concreto, foi feita uma revisão da literatura sobre métodos de modelagem numérica empregadas por diversos pesquisadores. O modelo proposto neste estudo é baseado nos modelos de Li *et al*. (2018) e Han, Yao e Tao (2007), e esse modelo foi validado comparando os resultados com os apresentados pelo modelo experimental desenvolvido por Yang, Fu e Bie (2021), na **Tabela 1** estão descritos as propriedades geométricas e físicas do modelo.

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v33i1.72635

Tabela 1: Propriedades geométricas e físicas do modelo de Yang, Fu e Bie (2021)

Modelo	f_y (MPa)	f_u (MPa)	E_s (GPa)	f_{cm} (MPa)	L (mm)	B (mm)	H (mm)	t (mm)
Yang, Fu e Bie (2021)	274,2	424,4	200,2	68	1560	120	180	2,7

Para avaliar resultados obtidos por meio das simulações numéricas, estes foram confrontados com os valores analíticos derivados dos métodos recomendados pelas normativas ABNT NBR 8800:2008e EN1994-1-1:2004, os métodos utilizados estão descritos na **Tabela 2**.

Tabela 2: Resumo do cálculo da resistência última para as normativas abordadas

	Materiais		Instabilidade local	Resistência última
	Aço	Concreto		
NBR 8800:2008	$250 \leq f_y \leq 450$	$20 \leq f_{ck} \leq 50$	$b_i / t \leq 2{,}26\sqrt{(E/f_y)}$	$N_{NBR}=\chi_{NBR}\cdot N_{pl,Rd}$ $N_{pl,Rd}=A_s\cdot f_{yd}+0{,}85\cdot A_c f_{cd}$
EN1994-1-1:2004	$235 \leq f_y \leq 460$	$20 \leq f_{ck} \leq 50$	$(h/t) = 52\sqrt{(235/f_y)}$	$N_{EC4}=\chi_{EC4}\cdot N_p$ $N_{pl,Rd}=A_a f_{yd} + A_c f_{cd}$

2.1 Modelo numérico

A avaliação do comportamento inelástico dos modelos começou com uma análise de perturbação linear, seguida por uma análise não linear usando o método "*Dynamic Implicit*" do ABAQUS. Na fase linear, a carga de estabilidade elástica é determinada multiplicando-se o primeiro autovalor positivo pela carga externa inicial, sem considerar imperfeições iniciais. A análise não linear incorporou estas imperfeições e empregou o método "*Dynamic Implicit*" para verificar a relação entre carga e deslocamento, tratando a não linearidade geométrica do problema.

2.1.1 Modelos constitutivos

Para o aço foi utilizado um modelo elastoplástico com encruamento linear. Para simular o comportamento do concreto, optou-se pelo uso do modelo de CDP (*Concrete Damage Plasticity*). Para a definição da plasticidade no modelo numérico, foram especificados diversos parâmetros de entrada, incluindo o ângulo de dilatação (ψ), a excentricidade (ξ), a relação entre a resistência à compressão uniaxial e biaxial (σ_{b0}/σ_{c0}), a relação entre os meridianos de compressão e tração (Kc), e o parâmetro de viscosidade (μ), que descreve a taxa de relaxamento do material. Os valores adotados para estes parâmetros, fundamentais para o desenvolvimento do modelo, estão sumarizados na **Tabela 3**. Para representar o comportamento do concreto à compressão considerando o efeito do confinamento foi adotado a relação tensão-deformação proposta por Han *et al*. (2007).

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v33i1.72635

Tabela 3: Parâmetros de entrada do CDP

Parâmetro	Valor
ψ (º)	40 (Li *et al.*, 2018; Tao; Wang; Yu, 2013)
ξ	0,1 (*Default*)
σ_{b0}/σ_{c0}	1,16 (*Default*)
Kc	2/3 (*Default*)
μ (s^{-1})	0,001(*Default*)

2.1.2 Condições de contorno e contato entre os elementos

No ensaio experimental simulado, foram aplicadas condições de contorno específicas para restringir movimentos nos modelos. Na parte superior dos modelos, o deslocamento lateral foi restringido, enquanto na extremidade inferior, tanto os deslocamentos laterais quanto os verticais foram restringidos. Para simular as cargas, foram impostos deslocamentos na parte superior. A conexão entre o tubo de aço e o núcleo de concreto foi modelada através da interação de superfície, com as condições de contato normal sendo definidas como "*Hard contact*" e o comportamento tangencial regulado pelo método "*Penalty*", com um coeficiente de atrito de 0,6. A carga foi aplicada utilizando um ponto de referência localizado na extremidade, onde a função "*coupling*" foi empregada para permitir a aplicação de deslocamento e sua distribuição uniforme pela área de contato da seção.

2.1.3 Imperfeições iniciais

Para as imperfeições geométricas iniciais nos tubos de aço, causados pela falta de retilineidade do perfil (imperfeição geométrica), afeta significativamente sua capacidade de carga. Por isso, na condução de análises de pós-flambagem, é crucial incorporar essas imperfeições iniciais. A inserção da imperfeição geométrica no modelo foi efetuada através do comando "*IMPERFECTION" no software de análise, que aplica uma curvatura inicial baseada no primeiro autovetor positivo derivado da análise de flambagem. É importante destacar que, os efeitos das tensões residuais no tubo de aço não foram levados em consideração.

2.1.4 Validação do modelo numérico

As deformações verificadas no modelo numérico são comparadas com os ensaios experimentais de Yang, Fu e Bie (2021). Verifica-se os modelos apresentaram deformações similares, indicando que o modo de falha se caracterizou pela instabilidade global da estrutura. A carga última verificada no modelo numérico foi de 1092kN. Os resultados do modelo numérico em comparação com o experimental são apresentados na **Tabela 4**.

Tabela 4: Resultados dos modelos numéricos comparados aos resultados experimentais

Modelo	$P_{u,exp}$(kN)	$P_{u,num}$(kN)	$\frac{P_{u,exp}}{P_{u,num}}$
Yang, Fu e Bie (2021)	1091	1092	0,999

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v33i1.72635

2.1.5 Estudo paramétrico

O estudo numérico foi realizado no software de análise em elementos finitos ABAQUS, adotando uma seção transversal com dimensões de 100x120 mm, 120x140 mm e 140 x 160 mm. Os comprimentos das colunas variam entre 3,0, 5,0 e 7,0, com base na razão comprimento/altura. As espessuras variam em 25, 30 e 40, segundo a razão largura/espessura. Por fim, a resistência do concreto varia entre 30, 50 e 70 MPa, em termos de *fck* (resistência característica à compressão). No total foram realizadas 81 análises paramétricas para verificar o comportamento de pilares mistos preenchidos de concreto.

Nas **Fig. 1**, **Fig. 2** e **Fig. 3** verifica-se as cargas de pico de cada modelo do estudo paramétrico em comparação com os métodos normativos.

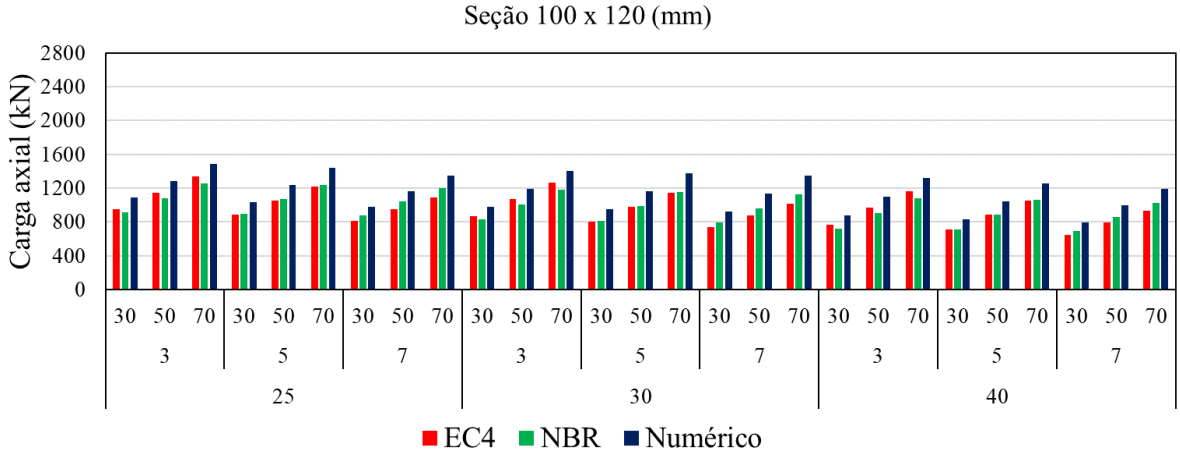

Figura 1. Comparação cargas normais últimas dos modelos numéricos e analíticos para seção 100x120 (mm)

Fonte: Autores (2024)

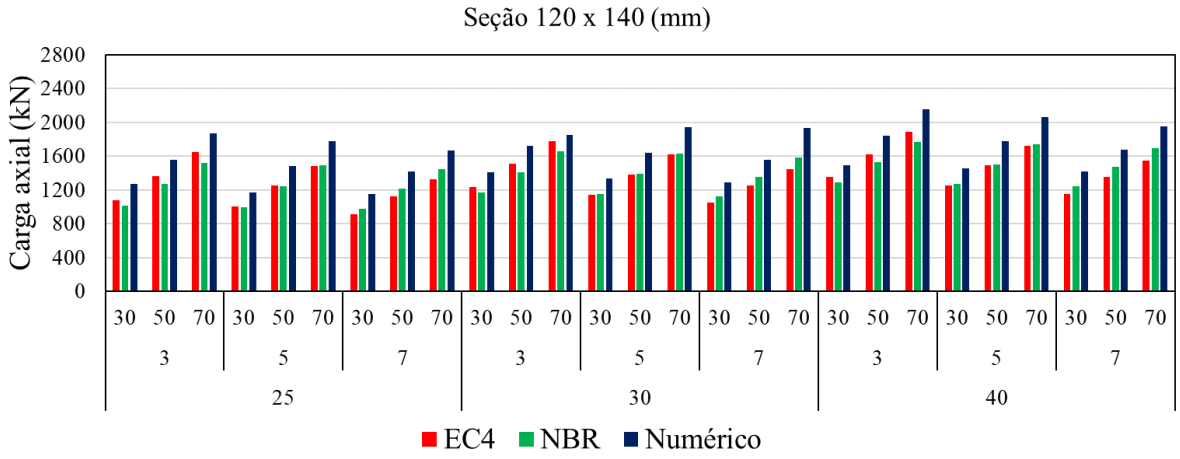

Figura 2. Comparação cargas normais últimas dos modelos numéricos e analíticos para seção 120x140 (mm)

Fonte: Autores (2024)

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v33i1.72635

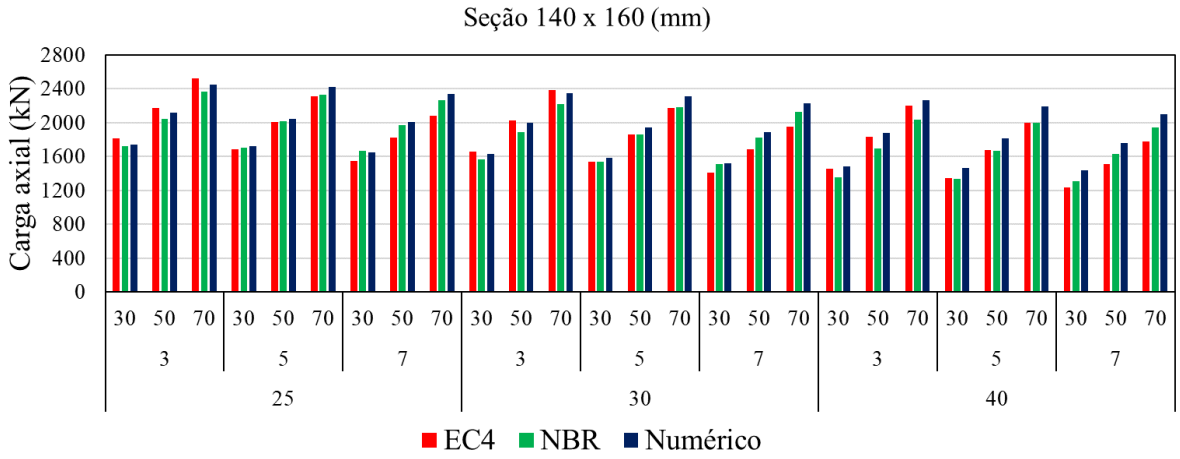

Figura 3. Comparação cargas normais últimas dos modelos numéricos e analíticos para seção 140x160 (mm)

Fonte: Autores (2024)

4 Conclusões

Com base nos resultados obtidos, podemos concluir que o reforço do concreto e o aumento da seção transversal contribuem significativamente para elevar a capacidade de resistência dos pilares; a espessura dos tubos de aço, ao ser aumentada, eleva notavelmente a resistência dos elementos estruturais, o comprimento dos pilares influência de maneira considerável tanto a carga máxima suportada quanto os deslocamentos observados. As análises feitas com base nas normas ABNT NBR 8800:2008 e EN1994-1-1:2004 (**Fig. 4**) mostraram-se conservadoras para a maioria dos modelos analisados, especificamente, a norma EN1994-1-1:2004 tende a ser mais conservadora à medida que a relação comprimento/espessura do pilar aumenta, enquanto, para a ABNT NBR 8800:2008, observou-se que os resultados numéricos estiveram mais alinhados e, em alguns casos, até inferiores aos valores previstos pela norma.

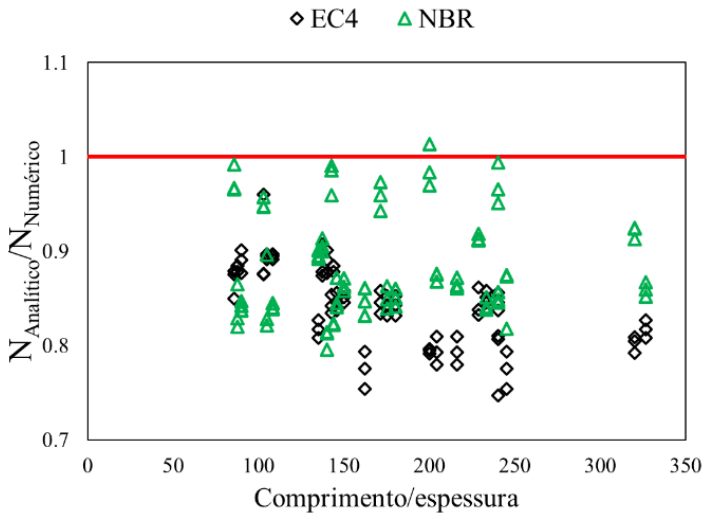

Figura 4. Carga normal última dos modelos numéricos em comparação com os métodos analíticos

Fonte: Autores (2024)

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v33i1.72635

Agradecimentos

Os autores agradecem à Capes pela concessão da bolsa de estudos e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio na execução do projeto de pesquisa e pela disponibilização de acesso aos recursos computacionais da Amazon Web Services Elastic Compute Cloud Platform – Amazon AWS-EC2. Número de concessão #408498/2022-6 e 421785/2022-5.

Referências

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.

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

HAN, Lin Hai; LI, Wei; BJORHOVDE, Reidar. Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: Members. **Journal of Constructional Steel Research**, [*s. l.*], v. 100, p. 211–228, 2014. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.04.016.

HAN, Lin Hai; YAO, Guo Huang; TAO, Zhong. Performance of concrete-filled thin-walled steel tubes under pure torsion. **Thin-Walled Structures**, [*s. l.*], v. 45, n. 1, p. 24–36, 2007.

LEE, Seong Hui *et al.* Behavior of high-strength circular concrete-filled steel tubular (CFST) column under eccentric loading. **Journal of Constructional Steel Research**, [*s. l.*], v. 67, n. 1, p. 1–13, 2011. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.07.003.

LI, Guochang *et al.* Experimental and numerical behaviour of eccentrically loaded high strength concrete filled high strength square steel tube stub columns. **Thin-Walled Structures**, [*s. l.*], v. 127, n. March, p. 483–499, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.02.024.

TAO, Zhong; WANG, Zhi Bin; YU, Qing. Finite element modelling of concrete-filled steel stub columns under axial compression. **Journal of Constructional Steel Research**, [*s. l.*], v. 89, p. 121–131, 2013. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.07.001.

YANG, You Fu; FU, Feng; BIE, Xue Meng. Behaviour of rectangular RACFST slender columns under eccentric compression. **Journal of Building Engineering**, [*s. l.*], v. 38, n. January, p. 102236, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102236.