

Tema: Estruturas de aço e mistas de aço e concreto

**AFERIÇÃO DE MODELOS ANALÍTICOS PARA PILARES MISTOS TUBULARES DE AÇO  
PREENCHIDOS DE CONCRETO POR MEIO DE ANÁLISE EM ELEMENTOS FINITOS**

Leonardo André Rossato<sup>1</sup>

Carlos Humberto Martins<sup>2</sup>

Alexandre Rossi<sup>3</sup>

Adriano Silva de Carvalho<sup>4</sup>

Hermano Sousa Cardoso<sup>5</sup>

**Resumo**

Este trabalho tem como objetivo aferir a precisão de modelos analíticos para prever o comportamento de pilares mistos tubulares de aço preenchidos de concreto (PMPC), utilizando análise em elementos finitos. A metodologia envolveu a modelagem de pilares com diferentes configurações, e a comparação dos resultados obtidos com os dados experimentais disponíveis na literatura. Foram avaliados vários parâmetros, como a capacidade de carga, fator de confinamento e o índice de esbeltez relativa. Os resultados obtidos via modelagem numérica foram concordantes com os resultados experimentais. As conclusões apontam para a validade e eficácia da metodologia utilizada, bem como para a importância de aferir modelos analíticos para prever o comportamento de estruturas complexas, como pilares mistos tubulares de aço preenchidas com concreto.

**Palavras-chave:** PMPC; Elementos Finitos; Modelo Analítico; Modelo Numérico.

**Evaluation of Analytical Models for Concrete-Filled Steel Tubular Columns through Finite  
Element Analysis**

**Abstract**

This work aimed to evaluate the accuracy of analytical models to predict the behavior of concrete-filled steel tubular (CFST) columns using finite element analysis. The methodology involved the modeling of columns with different configurations, and the comparison of the results obtained with experimental data available in the literature. Several characteristics were evaluated, such as the load capacity, confinement factor and relative slenderness. The results obtained via numerical modeling were consistent with the experimental results. The conclusions point to the validity and effectiveness of the methodology used, as well as the importance to evaluate analytical models to predict the behavior of complex structures such as CFST columns.

**Keywords:** CFST; Finite elements; Analytical Model; Numerical Model.

<sup>1</sup> Engenharia Civil, mestrado, discente, PCV, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil.

<sup>2</sup> Engenharia Civil, doutorado, docente, PCV, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil.

<sup>3</sup> Engenharia Civil, doutorado, docente, PPGEC, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

<sup>4</sup> Engenharia Civil, mestrado, discente, PCV, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil.

<sup>5</sup> Engenharia Civil, doutorado, pesquisador, Global R&D, ArcelorMittal, Polo Industrial Tubarão, Serra, Brasil

#### LISTA DE SÍMBOLOS

$B$	Largura da seção	$\mu$	Parâmetro de viscosidade
$d_{máx}$	Diâmetro máximo do agregado	$\xi$	Fator de confinamento
$f_c$	Resistência à compressão do concreto	$\sigma_b$	Tensão de escoamento compressiva biaxial do concreto
$f_{ck}$	Resistência característica do concreto	$\sigma_c$	Tensão de escoamento compressiva uniaxial do concreto
$f_y$	Resistência ao escoamento do aço	$\chi$	Fator de redução da resistência axial
$f_u$	Resistência última do aço	$\psi$	Ângulo de dilatação do concreto
$t$	Espessura do tubo		
$A_s$	Área da seção de aço		
$A_c$	Área da seção de concreto		
$A_g$	Área da seção bruta		
$C_3$	Coeficiente para rigidez efetiva do PMPC		
$D$	Diâmetro da seção		
$E_s$	Módulo de elasticidade do aço		
$E_c$	Módulo de elasticidade do concreto		
$E_{cm}$	Módulo de elasticidade médio do concreto		
$(EI)_e$	Rigidez equivalente da seção composta		
$G_F$	Energia de fratura		
$I_s$	Momento de inércia da seção de aço		
$I_c$	Momento de inércia da seção de concreto		
$K_c$	Fator de forma para o CDP		
$L_e$	Comprimento efetivo		
$N$	Força axial resistente		
$N_P$	Capacidade resistente da seção		
$N_y$	Resistência axial ao escoamento da seção		
$N_{cr}$	Força crítica de flambagem		
$\alpha$	Fator de forma do pilar preenchido		
$\epsilon$	Excentricidade		
$\epsilon$	Deformação		
$\epsilon_{c0}$	Deformação do concreto não confinado		
$\epsilon_{cc}$	Deformação do concreto confinado		
$\epsilon_p$	Deformação plástica do aço		
$\epsilon_u$	Deformação última do aço		
$\eta_s$	Fator de contribuição do aço		
$\eta_c$	Fator de confinamento do concreto		
$\lambda_0$	Índice de esbeltez reduzido		
$\lambda$	Índice de esbeltez relativa		
$\lambda_p$	Limite de esbeltez para seção compacta		



$\lambda_r$  Limite de esbeltez para seção não compacta

## 1 INTRODUÇÃO

Um dos avanços recentes em estruturas diz respeito ao uso de sistemas mistos de aço e concreto. Esta abordagem tem apresentado desafios devido à interação complexa entre os materiais. Aferir a eficácia de modelos analíticos é essencial para garantir a segurança e o desempenho adequado de estruturas de engenharia complexas, como Pilares Mistos Preenchidos de Concreto (PMPC).

Diversos estudos que abordam aspectos como o comportamento mecânico, a estabilidade, a resistência ao fogo e aos sismos de estruturas mistas de aço e concreto são encontradas na literatura [1]. Além disso, as pesquisas também têm se concentrado na otimização de projetos, visando a redução de custos, aumento da eficiência estrutural e a sustentabilidade [2].

Outro aspecto relevante é o desenvolvimento de técnicas avançadas de análise estrutural, como a análise não-linear e otimização estrutural, que permitem uma avaliação mais precisa do comportamento das estruturas mistas [1].

Segundo Elyoussef *et al.* [3], pilares mistos são amplamente empregados em diversas aplicações, especialmente em grandes edifícios e obras de arte (Figura 2). Eles também podem ser utilizados em estruturas resistentes a sismos, estruturas de pontes sujeitas a impactos do tráfego, e como estacas [1].

Nesse sentido, os pilares de perfil tubular preenchidos de concreto (Figura 1), conhecidos também como *concrete-filled steel tubular* (CFST), são estruturas que apresentam alta resistência mecânica em comparação a estruturas de aço ou simplesmente de concreto isolado, boa ductilidade e durabilidade, alta resistência ao fogo [2].

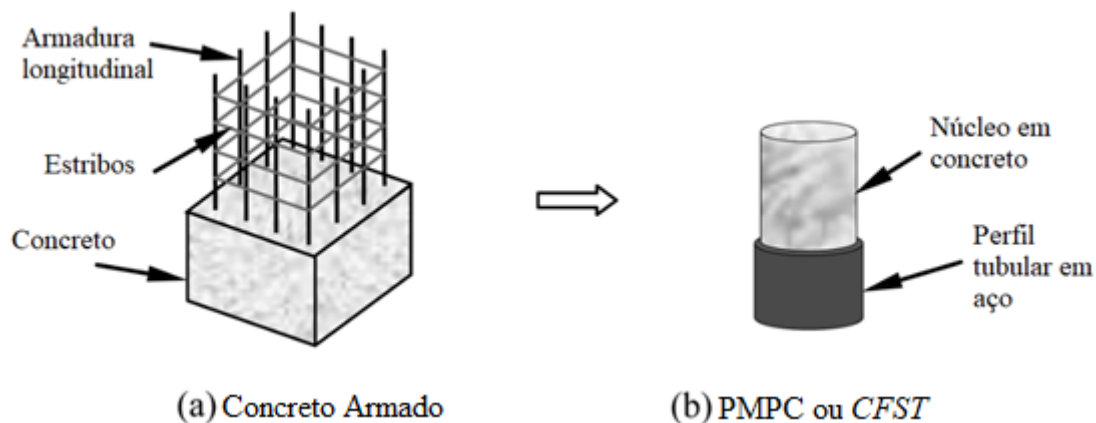


Figura 1 – Aspecto de um pilar de perfil tubular [2]

Do ponto de vista prático, os pilares PMPC dispensam o uso de fôrmas e cimbramento, resultando em economia de material e mão-de-obra, agilidade e sustentabilidade para a construção. Conforme explicam Han *et al.* [4], os pilares PMPC apresentam uma cura mais rápida para o concreto.

Além da cura, os fenômenos da retração e a fluência do concreto também são reduzidas nesse sistema estrutural em comparação ao concreto armado porque o perfil de aço dificulta a perda de água no concreto. A espessura do tubo de aço também pode ser reduzida, conferindo economia e praticidade. Adicionalmente, a área da seção transversal de pilares PMPC é menor

comparada a pilares de concreto armado, possibilitando maior área útil para a edificação e estética mais agradável.

Ainda em comparação ao concreto armado, pilares PMPC possuem menores dimensões, conseqüentemente são mais leves, e dessa maneira, o custo da fundação é reduzido. Com a redução do consumo dos materiais, esse sistema se mostra uma opção mais sustentável.

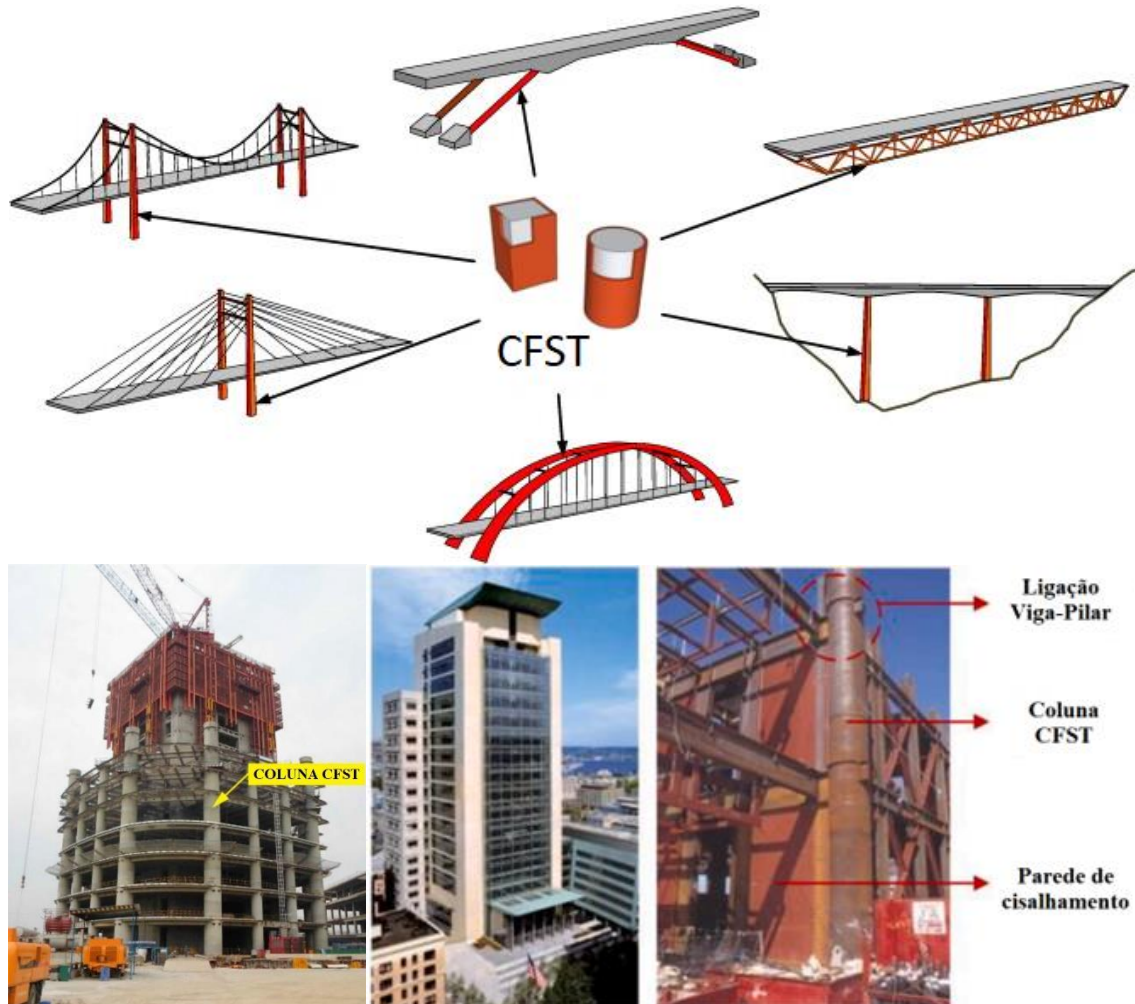


Figura 2 – Utilização de PMPC (CFST) em obras de arte e edifícios [4–6]

O PMPC também corresponde muito bem às altas cargas de compressão axial conforme apresentado na Figura 3, se apresentando como uma solução bastante adequada para pilares muito solicitadas a esses esforços. O tubo de aço nesse sistema fornece confinamento ao núcleo de concreto, enquanto o preenchimento de concreto reduz a flambagem local desses tubos. No regime elástico inicial, a deformação do concreto é relativamente pequena, provocando uma baixa pressão de confinamento [7].

A contribuição do concreto no enrijecimento à flexão próximo ao eixo neutro é insignificante, bem como à torção. Dessa maneira, é consenso que para maximizar a relação força-peso, o núcleo de concreto pode ser substituído por um tubo de aço interno [8].

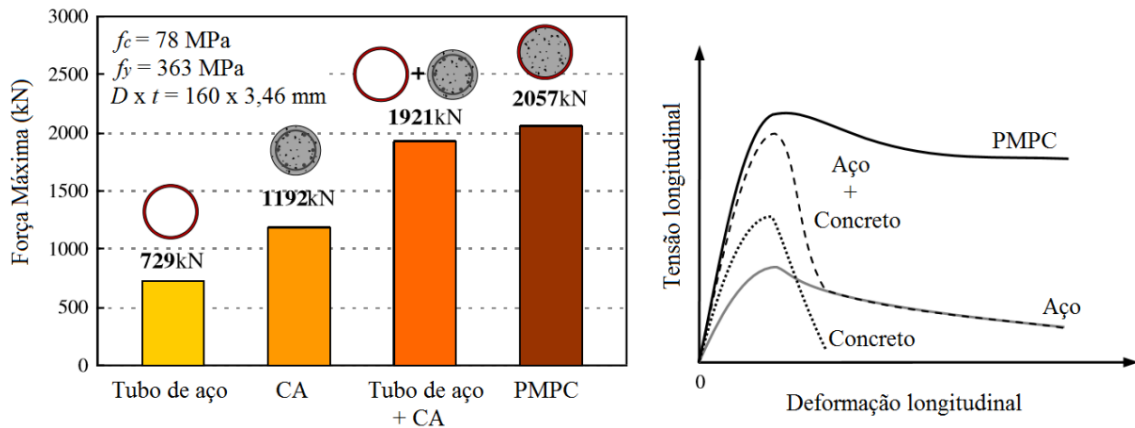


Figura 3 – Comparação em termos de carga e deformação axial [4]

Segundo Rodrigues *et al.* [9], este sistema estrutural é amplamente utilizado em países asiáticos, com sua utilização, a coluna ganha vantagens adicionais referentes à estética, resistência à corrosão e a durabilidade. No entanto, ainda existem desafios a serem superados, como a necessidade de uma maior integração entre os diferentes materiais utilizados.

A problemática observada para o estudo é o comportamento estrutural de pilares mistos preenchidos de concreto convencional e de alto desempenho (CAD), confinado por tubos de aço carbono, submetidos a carga concêntrica.

Para tanto, ensaios realizados com colunas curtas de seção circular submetidas a compressão simples são experimentos usualmente empregados por pesquisadores da área. A fim de validar resultados de análise numérica não linear por meio do programa de elementos finitos torna-se interessante a experimentação do modelo. Outros autores também abordam o problema de modelagem de PMPC (Figura 4), como [3,10,11], entre outros.

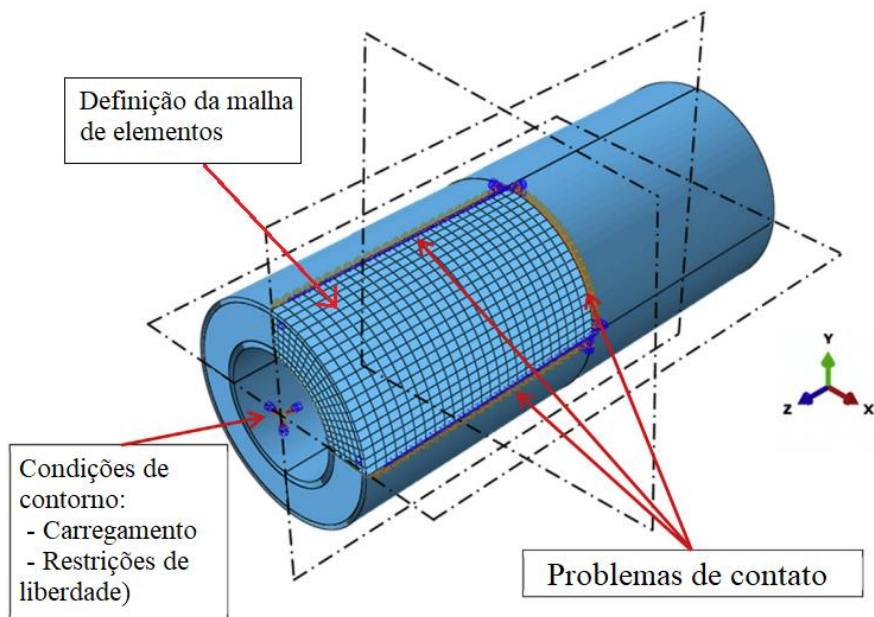


Figura 4 – Modelagem numérica de PMPC [10]

Silva Vellasco *et al.* [12] explicam que em uma modelagem numérica de estruturas de aço ou mista, um dos principais objetivos consiste em, após a devida calibração do modelo, expandir o banco de dados referente a um determinado comportamento estrutural. Por meio de uma análise paramétrica, reduz-se substancialmente o tempo e o custo de solução quando comparados com ensaios de laboratório convencionais.

Nesse sentido, esta pesquisa irá gerar novos dados sobre o comportamento mecânico de elementos mistos em análises numéricas, fornecendo assim, informações valiosas para pesquisas futuras e à indústria relacionada às estruturas mistas.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Segundo Santini e Ramires [13], um problema geral na validação e verificação de diversos estudos analíticos e numéricos acerca de pilares mistos tubulares é de que a gama de experimentos disponíveis na literatura não é padronizada e unificada devido a cada estudo amplificar informações em relação ao parâmetro de interesse do estudo particular. Este estudo busca delimitar os modelos submetidos exclusivamente a compressão axial.

A metodologia envolve o uso de *software* de análise de elementos finitos para modelar e analisar o comportamento de um pilar preenchido submetido a carga concêntrica. O procedimento metodológico é descrito no fluxograma da Figura 5.

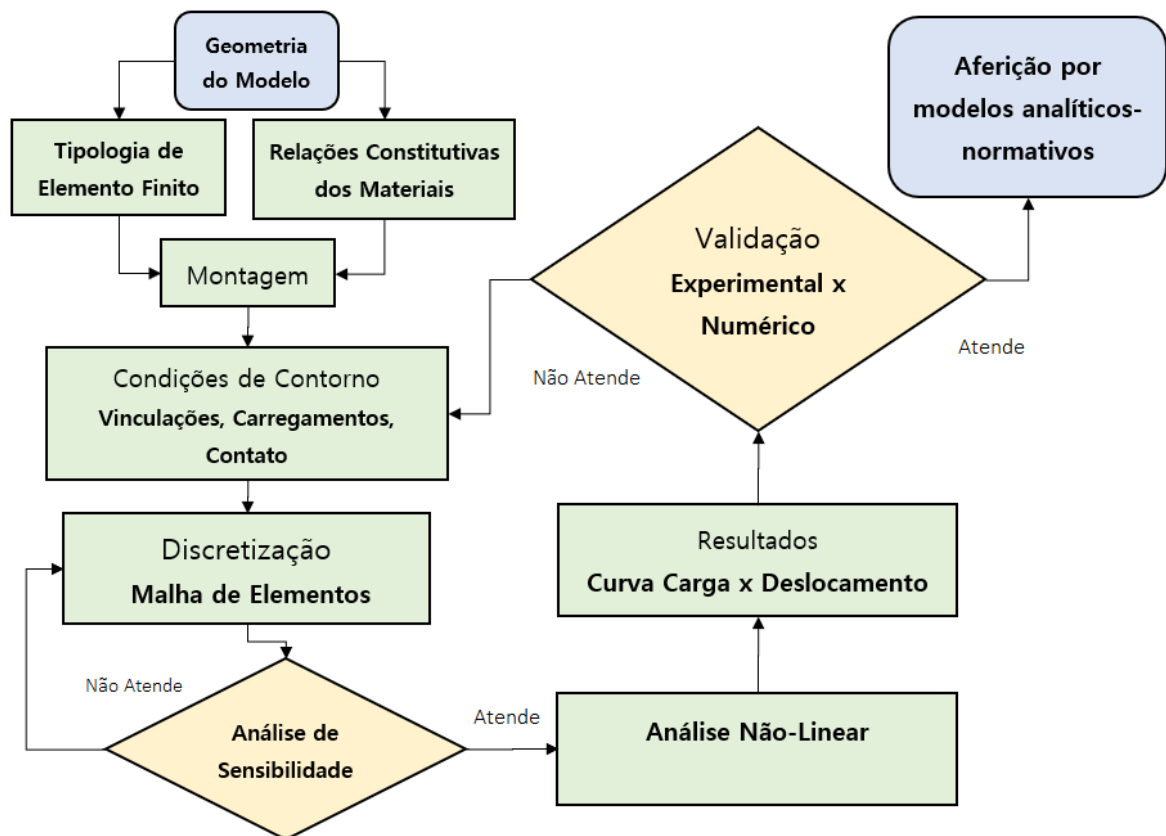


Figura 5 – Fluxograma para modelagem numérica

A pesquisa foi realizada em um computador com processador Intel Core I7 2,5 GHz e 16 GB de memória RAM, proveniente do laboratório P02 da Universidade Estadual de Maringá. Para a análise de elementos finitos, foi adotado o *software* Abaqus, um programa comercial de simulação numérica que utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF) para resolver problemas complexos de engenharia, como a análise estrutural.

## 2.1 Procedimentos normativos

A aplicação das estruturas mistas é apoiada por várias instituições bem conhecidas, como *American Institute Steel Construction* (AISC) [14], *British Standards Institution* (BS/EN) [15], *China National Standards* (GB) [16], e a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR) [17]. Na sequência, são apresentadas as principais instruções normativas e recomendações de cálculo para estruturas mistas tubulares preenchidas de concreto sob cargas axiais na Tabela 1.

Tabela 1 – Procedimentos normativos para pilares mistos preenchidos sob cargas axiais

	$N_{AISC} = \begin{cases} N \cdot \left(0,658^{\frac{N}{N_{cr}}}\right); & \frac{N}{N_{cr}} \leq 2,25 \\ 0,877 \cdot N_{cr}; & \frac{N}{N_{cr}} > 2,25 \end{cases}$ $N = \begin{cases} N_p; & \lambda < \lambda_p \\ N_p - \left(\frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p}\right)^2 \cdot (N_p - N_y); & \lambda_p \leq \lambda < \lambda_r \\ N_y; & \lambda \geq \lambda_r \end{cases}$ $N_p = A_s \cdot f_y + \alpha \cdot A_c \cdot f_{ck}$
<b>AISC 360 (2016)</b> [14]	$N_y = A_s \cdot f_{cr} + 0,7 \cdot A_c \cdot f_c; f_{cr} = \begin{cases} \frac{9 \cdot E_s}{(\lambda)^2} \rightarrow \text{seção retangular} \\ 0,72 \cdot f_y \rightarrow \text{seção circular} \\ \left[\frac{D}{t} \cdot \frac{f_y}{E_s}\right]^{0,2} \end{cases}$ $\begin{cases} \lambda = \frac{b}{t}; \lambda_p \leq 2,26 \cdot \sqrt{\frac{E_s}{f_y}}; \lambda_r \geq 3,0 \cdot \sqrt{\frac{E_s}{f_y}} \rightarrow \text{seção retangular} \\ \lambda = \frac{D}{t}; \lambda_p \leq 0,15 \cdot \frac{E_s}{f_y}; \lambda_r \geq 0,19 \cdot \frac{E_s}{f_y} \rightarrow \text{seção circular} \end{cases}$ $(EI)_e = E_s \cdot I_s + C_3 \cdot E_c \cdot I_c$ $C_3 = 0,45 + 3 \cdot \left(\frac{A_s}{A_g}\right) \leq 0,9$
<b>EUROCODE 4 (2004)</b> [15]	$N_{EC4} = \eta_s \cdot A_s \cdot f_y + A_c \cdot f_{ck} \cdot \left(1 + \eta_c \frac{t}{D} \cdot \frac{f_y}{f_{ck}}\right)$ $\eta_s = 0,25 \cdot (3 + 2 \cdot \lambda_0) \leq 1$ $\eta_c = 4,9 - 18,5 \cdot \lambda_0 + 17 \cdot \lambda_0^2 \geq 0$ $\lambda_0 = \sqrt{\frac{N_p}{N_{cr}}}$ $N_p = A_s \cdot f_y + A_c \cdot f_{ck}$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot (EI)_e}{(L_e)^2}$$

$$(EI)_e = E_s \cdot I_s + 0,6 \cdot E_{cm} \cdot I_c$$

$$N_{GB} = (1,212 + B \cdot \xi + C \cdot \xi^2) \cdot (A_s + A_c) \cdot f_{ck}$$

$$\text{retangular} \rightarrow B = \frac{0,1381 \cdot f_y}{235} + 0,7646$$

$$C = \frac{-0,0727 \cdot f_{ck}}{20} + 0,0216$$

$$\text{circular} \rightarrow B = \frac{0,176 \cdot f_y}{213} + 0,974$$

$$C = \frac{-0,104 \cdot f_{ck}}{14,4} + 0,031$$

GB 50936 (2014) [16]

$$N_{NBR} = \chi \cdot N_p$$

$$\lambda_0 \leq 1,5 \rightarrow \chi = 0,658^{\lambda_0^2}$$

$$\lambda_0 > 1,5 \rightarrow \chi = \frac{0,877}{\lambda_0^2}$$

NBR 8800 (2008) [17]

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{N_p}{N_{cr}}} \leq 2,0$$

$$N_p = A_s \cdot f_y + \alpha \cdot A_c \cdot f_{ck}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot (EI)_e}{(L_e)^2}$$

## 2.2 O modelo numérico

### 2.2.1 Relações Constitutivas

O modelo de Dano-Plástico do Concreto (CDP), que é baseado no critério de Drucker-Prager, é adotado. Elementos sólidos C3D8R (oito nós e três graus de liberdade por nó com integração reduzida) foram utilizados para o aço e o concreto. A literatura existente fornece parâmetros apropriados para modelar o concreto estrutural usando o *software* Abaqus.

Os parâmetros do modelo CDP usados neste estudo incluem o ângulo de dilatação do material ( $\psi$ ), a excentricidade ( $\epsilon$ ), a relação das tensões de escoamento compressivas biaxial para uniaxial ( $\sigma_b/\sigma_c$ ), a relação da segunda tensão invariante no meridiano de tração para aquela no meridiano de compressão ( $K_c$ ) e o parâmetro de viscosidade ( $\mu$ ).

Também é necessário assumir comportamentos de compressão e tração uniaxiais, existem discrepâncias significativas entre os valores encontrados para essas quantidades na literatura, no entanto valores padrão para os parâmetros são apresentados na Tabela 2 [18].

Tabela 2 – Valores padrão dos parâmetros do CDP [18]

$\psi$	$\epsilon$	$\sigma_b/\sigma_c$	$K_c$	$\mu$
10° - 56°	0,1	1,16	0,667	0,0001

A relação tensão-deformação para o concreto preenchido é dada por Tao *et al.* [19] por meio das Equações 1 a 6:

$$\frac{\sigma}{f_c} = \frac{A \cdot X + B \cdot X^2}{1 + (A-2) \cdot X + (B+1) \cdot X^2}; \quad (0 < \varepsilon \leq \varepsilon_{c0}) \quad (1)$$

$$X = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}}; A = \frac{E_c \cdot \varepsilon_{c0}}{f_c}; B = \frac{(A-1)^2}{0,55}; \varepsilon_{c0} = 0,00076 + \sqrt{(0,626 \cdot f_c - 4,33) \cdot 10^{-7}} \quad (2)$$

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{c0}} = \varepsilon^k; k = (2,9224 - 0,00367 \cdot f_c) \cdot \left(\frac{f_B}{f_c}\right)^{0,3124 + 0,002 \cdot f_c} \quad (3)$$

$$\begin{cases} f_B = \frac{0,25 \cdot (1 + 0,027 \cdot f_y) \cdot e^{-\frac{0,02 \cdot \sqrt{B^2 + D^2}}{t}}}{1 + 1,6 \cdot e^{-10 \cdot f_c^{4,8}}} \rightarrow \text{seção retangular} \\ f_B = \frac{(1 + 0,027 \cdot f_y) \cdot e^{-\frac{0,02 \cdot D}{t}}}{1 + 1,6 \cdot e^{-10 \cdot f_c^{4,8}}} \rightarrow \text{seção circular} \end{cases} \quad (4)$$

$$\sigma = f_r + (f_c - f_r) \cdot \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{cc}}{\alpha}\right)^\beta\right]; \quad (\varepsilon \geq \varepsilon_{cc}) \quad (5)$$

$$\begin{cases} f_r = 0,1 \cdot f_c; \alpha = 0,005 + 0,075 \cdot \xi \rightarrow \text{seção retangular} \\ f_r = 0,1 \cdot (1 - e^{-1,38 \cdot \xi}) \cdot f_c \leq 0,25 \cdot f_c; \alpha = 0,04 - \frac{0,036}{1 + e^{6,08 \cdot \xi - 3,49}} \rightarrow \text{seção circular} \end{cases} \quad (6)$$

A curva descrita por meio das equações apresentadas é representada na Figura 6.

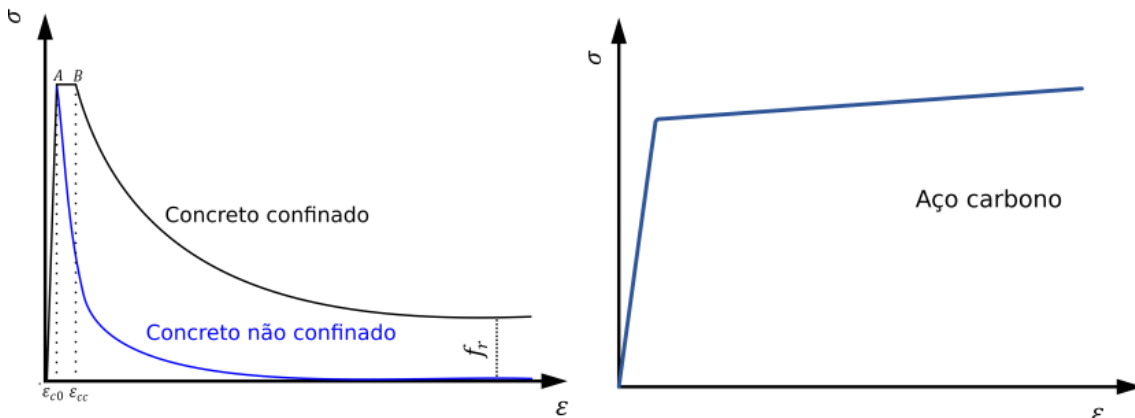


Figura 6 – Curva tensão-deformação para o concreto confinado e para o aço carbono [19]

Para o comportamento na tração do concreto, o conceito de energia de fratura ( $G_F$ ) é empregado, sendo a formulação apresentada pela Equação 7.

$$G_F = (0,0469 \cdot d_{máx}^2 - 0,5 \cdot d_{máx} + 26) \cdot \left(\frac{f_c}{10}\right)^{0,7} \quad (7)$$

Para o tubo de aço, diferentes relações tensão-deformação têm sido usadas por diferentes pesquisadores, incluindo modelo elástico-plástico perfeito e modelo elástico-plástico com endurecimento linear ou endurecimento multilinear. Em tensões de interesse estrutural geral (normalmente menos que 5%), o aço não apresenta encruamento significativo. Curvas muito próximas de carga axial ( $N$ ) por deformação axial ( $\varepsilon$ ) são obtidas usando diferentes modelos tensão-deformação para aço [19]. Portanto, o modelo elastoplástico com encruamento linear (Figura 6) é adotado, o modelo é descrito por meio das Equações 8, 9 e 10:

$$\sigma = E_s \cdot \varepsilon; \quad (0 < \varepsilon \leq \varepsilon_p) \quad (8)$$

$$\sigma = f_y; \quad (\varepsilon = \varepsilon_p) \quad (9)$$

$$\sigma = f_u; \quad (\varepsilon = \varepsilon_u) \quad (10)$$

## 2.2.2 Discretização do elemento

Com base nos estudos de convergência de malha de Tao *et al.* [19], o tamanho do elemento na seção transversal foi escolhido como  $D/15$  para uma coluna circular ou  $B/15$  para uma coluna retangular, onde  $D$  e  $B$  são o diâmetro total do tubo circular e a largura total do tubo retangular, respectivamente. Dessa maneira, a malha selecionada para os exemplares contém um total de mais de 4000 elementos. A Figura 7 apresenta a malha de elementos.

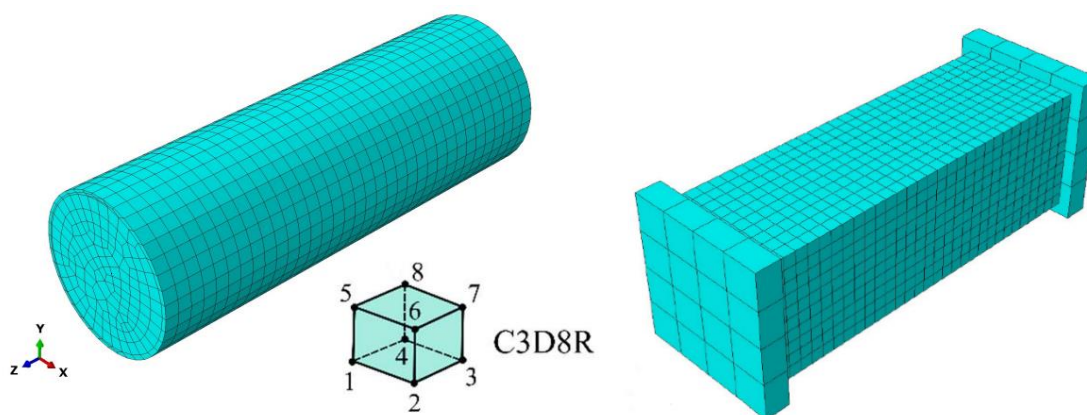


Figura 7 – Malha de elementos

## 2.2.3 Condições de contorno

As condições de contorno incluem condições de apoio, como fixas ou simplesmente apoiadas, e outras restrições relevantes, como atrito entre o tubo de aço e o concreto.

As imperfeições iniciais e as tensões residuais têm influência no comportamento de tubos de aço vazados, no entanto, para PMPC, os efeitos de imperfeições locais e tensões residuais são minimizadas pelo preenchimento de concreto. Dessa maneira, foram ignorados na simulação.

Utilizando as opções de interação (*interaction*) e restrição (*constraint*) disponível no *software* Abaqus, para a interação entre o tubo de aço e as condições de vinculação aplicadas, foi utilizado a ferramenta *coupling* que solidariza a superfície da seção a um ponto de aplicação. No geral, o contato superfície a superfície é utilizado para a simulação da interação do tubo de aço e do concreto. Pode ser definido um par de superfície de contato composto pela superfície interna do tubo de aço e a superfície externa do núcleo de concreto.

Para a interface pode ser especificado contato rígido na direção normal, e o contato tangente pode ser simulado pelo modelo de atrito de Coulomb. O comportamento do pilar não é sensível ao coeficiente de atrito entre o aço e o concreto, uma vez que são carregados simultaneamente, há pouco ou nenhum deslizamento entre o tubo de aço e o concreto. Entretanto, os valores usuais recomendados na literatura variam entre 0,2 e 0,6 para o coeficiente de atrito.

## 2.3 Validação do modelo

Com base nos resultados dos experimentos de Oliveira *et al.* [20] e Han [21], foram validados os modelos numéricos. Os parâmetros analisados são apresentados na tabela 3. Foram consideradas as curvas de carga por deslocamento e capacidade resistente para validar o modelo numérico. Com os modelos numéricos validados por meio dos ensaios citados, foi possível analisar os resultados sob a ótica de procedimentos normativos e compará-los

Tabela 3 – Parâmetros analisados

Geometria	$f_c$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	D/B (mm)	H (mm)	t (mm)	$\xi$	$\lambda$	$N_{exp}$ (kN)
Circular – C1	58,7	287,3	114,3	342,9	3,35	0,63	34,1	952,0
Circular – C2	58,7	287,3	114,3	342,9	6,00	1,22	19,1	1329,1
Circular – C3	88,8	287,3	114,3	342,9	6,00	0,80	19,1	1496,0
Circular – C4	105,5	287,3	114,3	342,9	6,00	0,68	19,1	1683,4
Retangular R1	–	50,7	100x100	300	2,86	0,70	35,0	780,0
Retangular R2	–	50,7	90x70	270	2,86	0,93	24,5	565,0

\*Não foram selecionados perfis que não atendem ao limite de  $0,5 \leq \xi \leq 2,0$ .

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados mostram boa aproximação dos resultados experimentais, e comportamento pós-pico também semelhante. A Figura 8 apresenta os resultados das validações do modelo. As cargas mais altas alcançadas para as curvas experimentais R1 e R2 são indícios de que maiores resistências para o concreto foram obtidas nos ensaios de Han [21], uma vez que a resistência considerada para o modelo numérico foi a média de todos os protótipos ensaiados pelo autor.

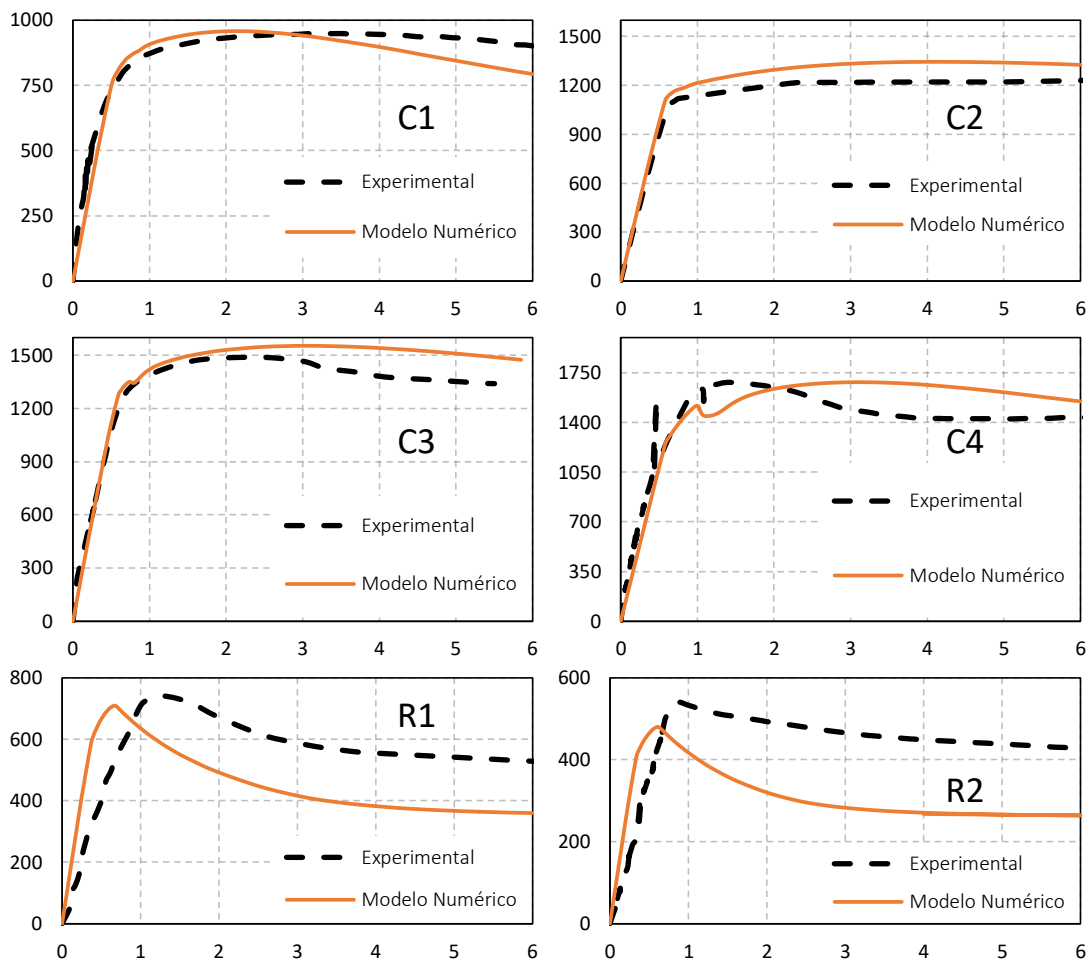


Figura 8 – Curvas carga axial (kN) por deslocamento (mm)

Os valores para os resultados numéricos e respectivos erros observados em relação aos procedimentos normativos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados das simulações numéricas e erros observados

Geometria	$N_{modelo}$ (kN)	Experimental	EC4	AISC 360	GB 50936	NBR 8800
C1	957,6	0,99	1,10	1,14	0,87	1,28
C2	1344,4	1,01	1,26	1,24	1,06	1,44
C3	1547,5	1,03	1,18	1,21	0,95	1,36
C4	1686,4	1,00	1,17	1,21	0,93	1,37
R1	713,19	0,91	1,01	1,12	0,97	1,26
R2	512,00	0,92	1,05	1,18	1,10	1,41

### 3.1 Fator de Confinamento

A discrepância do modelo numérico em relação a predição normativa foi ligeiramente maior para maiores fatores de confinamento, conforme é possível observar o gráfico da Figura 8. Em relação às seções circulares, que apresentam confinamento mais efetivo, os modelos normativos se mostram conservadores, estimando cargas últimas menores do que as observadas em ensaios experimentais, com exceção da norma chinesa que superestimou alguns resultados. Apesar das seções retangulares apresentarem confinamento menos efetivo, a tendência foi a mesma observada em seções circulares.

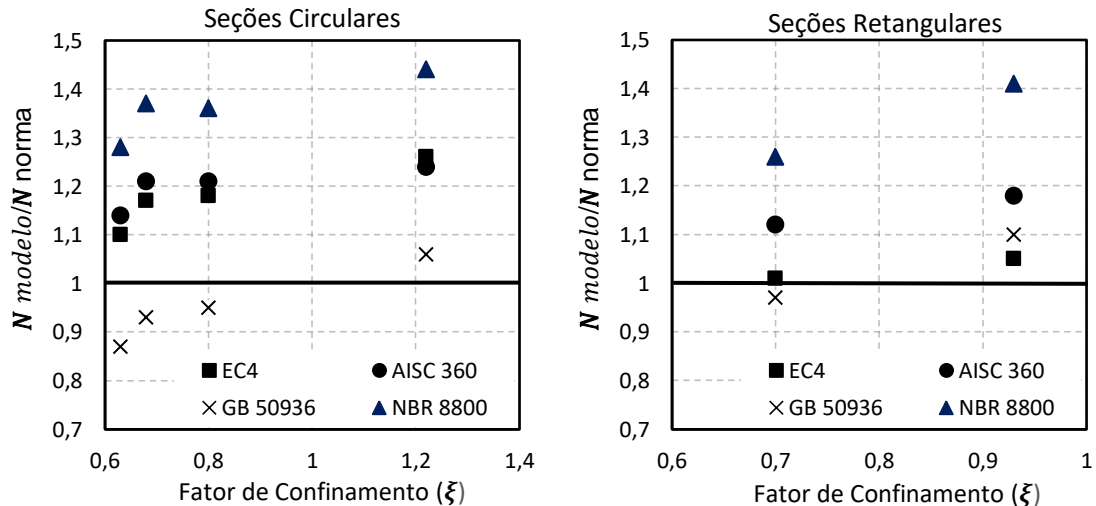


Figura 8 – Comparação dos desvios normativos em função do fator de confinamento

### 3.2 Esbeltez Relativa

Com relação ao índice de esbeltez relativa do pilar PMPC, as estimativas normativas concordaram melhor com o modelo numérico para maiores valores do índice conforme apresentado no gráfico da Figura 9. Valendo ressaltar que os modelos com menores índices de esbeltez são os que apresentaram maiores fatores de confinamento, corroborando o resultado do item anterior. Os resultados para ambas seções também concordaram.

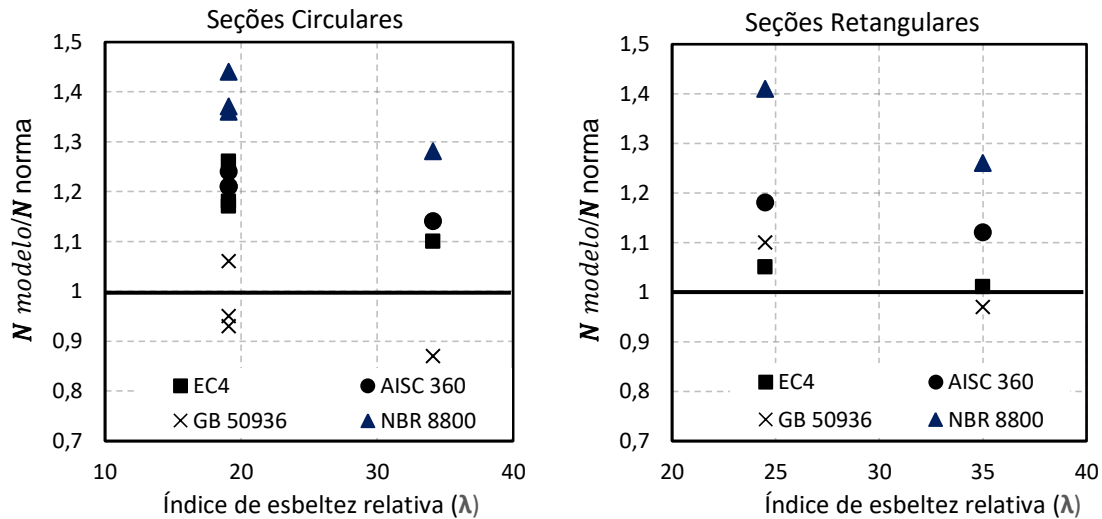


Figura 9 – Comparação dos desvios normativos em função do índice de esbelteza relativa

#### 4 CONCLUSÃO

Um modelo de elementos finitos foi desenvolvido neste trabalho com o objetivo de avaliar o comportamento de pilares mistos preenchidos com concreto de alta resistência submetidos à carga axial. Um modelo que considera o efeito do confinamento para o concreto foi adotado. Os resultados obtidos no estudo numérico apresentaram uma boa aproximação tanto para a capacidade resistente dos pilares quanto para o aspecto das curvas carga axial por deslocamento em relação a estudos experimentais encontrados na literatura. A metodologia empregada no desenvolvimento do modelo numérico, portanto, foi considerada adequada. O estudo não avaliou a esbelteza global dos pilares, isto é a relação do comprimento por diâmetro.

A aferição por meio de procedimentos normativos permitiu observar que os modelos analíticos são conservadores o suficiente por não capturar com precisão os ganhos de resistência do núcleo do concreto decorrentes do efeito do confinamento, exceto a norma chinesa que considera altos ganhos de resistência.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo incentivo na execução do projeto de pesquisa.

#### REFERÊNCIAS

1. Shanmugam NE, Lakshmi B. State of the art report on steel-concrete composite columns. J Constr Steel Res. 2001;57(10).
2. Han LH, Lam D, Nethercot DA. Design Guide for Concrete-Filled Double Skin Steel Tubular Structures. Design Guide for Concrete-Filled Double Skin Steel Tubular Structures. 2018.

3. Elyoussef M, Elgriw M, Abed F. FE parametric study of the compressive behavior of CFSTs. Em: 2019 8th International Conference on Modeling Simulation and Applied Optimization, ICMSAO 2019. 2019.
4. Han LH, Li W, Bjorhovde R. Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: Members. J Constr Steel Res. 2014;100.
5. Zhao L, Cao W, Guo H, Zhao Y, Song Y, Yang Z. Experimental and numerical analysis of large-scale circular concrete-filled steel tubular columns with various constructural measures under high axial load ratios. Applied Sciences (Switzerland). 2018;8(10).
6. Li GC, Chen BW, Yang ZJ, Liu YP, Feng YH. Experimental and numerical behavior of eccentrically loaded square concrete-filled steel tubular long columns made of high-strength steel and concrete. Thin-Walled Structures. 2021;159.
7. Dabaon MA, El-Boghdadi MH, Hassanein MF. Experimental investigation on concrete-filled stainless steel stiffened tubular stub columns. Eng Struct. 2009;31(2).
8. Elchalakani M, Ayough P, Yang B. Single Skin and Double Skin Concrete Filled Tubular Structures: Analysis and Design: A volume in Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Single Skin and Double Skin Concrete Filled Tubular Members: Analysis and Design. 2021.
9. Rodrigues PF, da Vellasco PCGS, de Lima LRO, da Silva AT, Rodrigues MC, Sarmanho AMC. Experimental evaluation of composite tubular columns CFDST (Stainless steel-concrete-carbon steel). Em: Proceedings of the 9th International Conference on Advances in Steel Structures, ICASS 2018. 2020.
10. Wang F, Young B, Gardner L. Compressive testing and numerical modelling of concrete-filled double skin CHS with austenitic stainless steel outer tubes. Thin-Walled Structures. 2019;141.
11. İpek S, Güneysi EM. Nonlinear finite element analysis of double skin composite columns subjected to axial loading. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2020;20(1).
12. da Silva Vellasco PCG, de Lima LRO, de Andrade SAL, Vellasco MMBR, da Silva LAPS. Modelagem Numérica com o Método dos Elementos Finitos. Em: Modelagem de Estrutura de Aço e Mistos. 2014.
13. Santini ÂT, Ramires FB. Comportamento experimental de pilares mistos tubulares circulares submetidos a força axial excêntrica. Brazilian Journal of Development. 2021.
14. ACI committee: ACI 318-19. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute. ACI 318-19 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. 2019.

15. CEN. Eurocode 4: design of composite steel and concrete structures - Part 1.1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization. 2004.
16. CABP. GB 50936-2014: technical code for concrete filled steel tubular structures. China, Architecture & Building Press (CABP), 2014 (Chinês).
17. ABNT NBR 8800. NBR 8800:2008 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Associação Brasileira De Normas Técnicas. 2008.
18. Silva LME, Christoforo AL, Carvalho RC. Calibration of concrete damaged plasticity model parameters for shear walls. Revista Materia. 2021;26(1).
19. Tao Z, Wang Z Bin, Yu Q. Finite element modelling of concrete-filled steel stub columns under axial compression. J Constr Steel Res. 2013;89.
20. Oliveira, WLAD. Análise teórico-experimental de pilares mistos preenchidos de seção circular (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo). 2008.
21. Han, LH. Tests on stub columns of concrete-filled RHS sections. Journal of constructional steel research, 58(3), 353-372. 2002.