

INVESTIGAÇÃO DE COLUNAS TIPO DOUBLE-SKIN PREENCHIDAS COM CONCRETO

INVESTIGATION OF CONCRETE-FILLED DOUBLE-SKIN COLUMNS

Ivanna Trugilho Gonçalves¹

Fernanda Lins Gonçalves Pereira¹

Monique Cordeiro Rodrigues¹

Danielle Malvaris Ribeiro¹

Luciano Rodrigues Ornelas de Lima¹

Resumo: Este trabalho investiga o desempenho das colunas CFDST sob a ótica da formulação proposta por Castanheira (2021). Essas colunas, compostas por dois tubos de aço (inoxidável e carbono) concêntricos preenchidos com concreto, representam uma solução eficiente, combinando a resistência do aço com as propriedades do concreto. O estudo se concentra na metodologia desenvolvida por Castanheira (2021), aplicando-a aos estudos de Rodrigues (2018) e Ribeiro (2023). Para dimensionar as colunas, é necessário considerar parâmetros como espessura dos tubos, diâmetros externo e interno, resistência do concreto e dos tubos de aço. Após uma avaliação crítica da formulação proposta por Castanheira (2021) em relação aos resultados experimentais e numéricos, destaca-se que os resultados dos autores estão muito próximos dos valores da equação proposta, entretanto 1 em cada 5 respostas mostraram-se não seguras. Indica-se a necessidade da definição de regiões que precisam de mais estudos, como a realização de ensaios experimentais e em elementos finitos para uma discussão mais profunda do comportamento das colunas CFDST e das formulações existentes na literatura.

Palavras-chaves: Colunas Mistas, Colunas de Parede Dupla, Aço Inoxidável, CFDST, Comportamento Estrutural.

Abstract: This work investigates the performance of CFDST columns from the perspective of the formulation proposed by Castanheira (2021). These columns, composed of two concentric steel tubes (stainless and carbon) filled with concrete, represent an efficient solution, combining the strength of steel with the properties of concrete. The study focuses on the methodology developed by Castanheira (2021), applying it to studies by Rodrigues (2018) and Ribeiro (2023). In column design, it is necessary to consider parameters such as tube thickness, external and internal diameters, strength of the concrete and steel tubes. After a critical evaluation of the Castanheira (2021) proposed formulation in relation to the experimental and numerical results, it is highlighted that the authors' results are very close to the values of the proposed equation, however 1 in 5 answers proved to be unsafe. Indicating the need to define regions that require further studies, such as carrying out experimental and finite element tests for a deeper discussion of the behavior of CFDST columns and existing formulations in literature.

Keywords: Composite Columns, Double-Skin Columns, Stainless Steel, CFDST, Structural Behaviour.

¹Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Campus Maracanã – Brasil, email: ivannatg.IT@gmail.com, fernanda.pereira@eng.uerj.br, monique.rodrigues@eng.uerj.br, daniellemalvaris@hotmail.com, lucianolimauernj@gmail.com

1 Introdução

As colunas CFDST (*Concrete Filled Double Skin Tubular* – Tubo de Parede Dupla Preenchida de Concreto) são estruturas mistas compostas por dois tubos de aço concêntricos e preenchidos com concreto entre eles. Elas proporcionam maior proteção térmica devido ao concreto, logo são mais resistentes ao fogo; fornecem maior proteção à corrosão causada por agentes ambientais graças ao aço; e são mais leves quando comparadas às colunas CFST (*Concrete Filled Steel Tubular* – Tubo de Aço Preenchido de Concreto). Até o momento não existe uma norma brasileira ou internacional de dimensionamento de colunas CFDST, – o Código Europeu fornece o dimensionamento de colunas CFST apenas – impulsionando as recentes pesquisas sobre o assunto, com destaque para colunas em aços inoxidável e carbono nos tubos externo e interno, respectivamente.

Este trabalho tem como objetivo principal investigar a formulação proposta por Castanheira (2021) para determinação da carga crítica de colunas CFDST submetidas a carregamentos excêntricos e não-excêntricos. Para tal finalidade, além dos resultados dos ensaios e das análises numéricas em elementos finitos (EF) de Castanheira (2021), também são utilizados para comparação os resultados dos ensaios e de EF de Rodrigues (2018) e os resultados dos ensaios de Ribeiro (2023). Ao longo deste trabalho é pontuado que a formulação de Castanheira é adequada, porém é possível identificar resultados não seguros e a necessidade que mais estudos são fundamentais para contribuir com o avanço do conhecimento nesta área.

2 Desenvolvimento

Como já mencionado neste trabalho, o dimensionamento de colunas CFDST ainda não foi inserido nas normas internacionais de projeto. No entanto, o interesse por esse elemento estrutural nos últimos anos tem aumentado, o que tem feito surgir diferentes estudos sobre o tema, como Uenaka, Kitoh e Sonoda (2010), Hassanein, Kharoob e Liang (2013) e Han, Ren e Li (2011).

2.1 Método de projeto proposto por Castanheira (2021)

Este trabalho investiga o método de projeto proposto por Castanheira (2021), que foi baseado em uma análise que assume uma distribuição retangular de tensão. As tensões do aço foram limitadas, seja em compressão ou tração, à tensão de escoamento de 0,2% para o tubo externo de aço inoxidável (f_{yso}) ou à tensão de escoamento para o tubo interno de aço carbono (f_{ysi}). A resistência à compressão do concreto (f_c) foi utilizada como resistência do concreto à compressão, enquanto a resistência do concreto sob tração foi considerada igual a zero.

Para a determinação da carga crítica $N_{u,pred}$, inicialmente, uma posição arbitrária do eixo neutro da seção (h) é assumida. Em seguida, a distribuição das tensões dos três materiais (aço inoxidável, concreto e aço carbono) é definida e as respectivas forças equivalentes atuantes são calculadas, conforme Equações (1) a (5), sendo F_{syo_comp} , F_{c_comp} e F_{ysi_comp} as forças de compressão no tubo externo, no concreto e no tubo interno, F_{syo_ten} e F_{ysi_ten} as forças de tração nos tubos externo e interno.

$$F_{syo_comp} = f_{syo} \left[\frac{R^2}{2} (\theta_o - \sin\theta_o) - \frac{R_c^2}{2} (\theta_c - \sin\theta_c) \right] \quad (1)$$

$$F_{c_comp} = f_c \left[\frac{R_c^2}{2} (\theta_c - \sin\theta_c) - \frac{r^2}{2} (\theta_i - \sin\theta_i) \right] \quad (2)$$

$$F_{syo_comp} = f_{syo} \left[\frac{r^2}{2} (\theta_i - \sin\theta_i) - \frac{r_{si}^2}{2} (\theta_{si} - \sin\theta_{si}) \right] \quad (3)$$

$$F_{syo_ten} = f_{syo} \left\{ \pi(R^2 - R_c^2) - \left[\frac{R^2}{2} (\theta_o - \sin\theta_o) - \frac{R_c^2}{2} (\theta_c - \sin\theta_c) \right] \right\} \quad (4)$$

$$F_{syo_ten} = f_{syo} \left\{ \pi[r^2 - r_{si}^2] - \left[\frac{r^2}{2} (\theta_i - \sin\theta_i) - \frac{r_{si}^2}{2} (\theta_{si} - \sin\theta_{si}) \right] \right\} \quad (5)$$

Em que R é o raio externo do tubo externo, R_c é o raio externo do concreto, r é o raio externo do tubo interno, r_{si} é o raio interno do tubo interno, θ_o é o ângulo da região comprimida do raio externo do tubo externo, θ_c é o ângulo da região comprimida do raio externo do concreto, θ_i é o ângulo da região comprimida do raio externo do tubo interno e θ_{si} é o ângulo da região comprimida do raio interno do tubo interno (Figura 1).

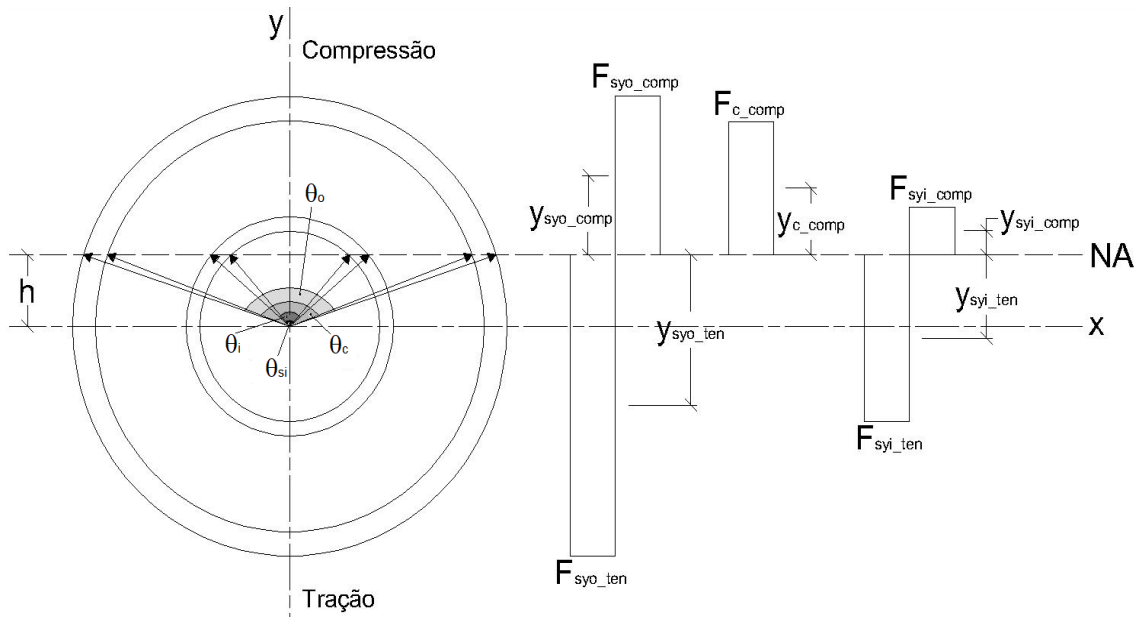


Figura 1. Distribuição de tensões na coluna CFST sob carga axial e momento fletor

Fonte: Autoria própria (2024)

Uma vez calculada as forças atuantes em cada material, determina-se a carga axial atuante ($N_{u,pred}$) e o momento fletor ($M_{u,pred}$), conforme Equações 6 e 7.

$$N_{u,pred} = F_{syo_comp} + F_{c_comp} + F_{syo_comp} - F_{syo_ten} - F_{syo_ten} \quad (6)$$

$$M_{u,pred} = F_{syo_comp} y_{syo_comp} + F_{c_comp} y_{c_comp} + F_{syo_comp} y_{syo_comp} + F_{syo_ten} y_{syo_ten} + F_{syo_ten} y_{syo_ten} \quad (7)$$

Em que cada y é a respectiva distância do ponto de aplicação da força resultante que atua em cada material até a linha neutra, exemplificada pelas Equações 8 até 10 e Figura 1.

$$y_{c_comp} = \frac{4}{3} \left[\frac{R_c^3 \sin^3 \left(\frac{\theta_c}{2} \right) - r^3 \sin^3 \left(\frac{\theta_i}{2} \right)}{R_c^2 (\theta_c - \sin \theta_c) - r^2 (\theta_i - \sin \theta_i)} \right] \quad (8)$$

$$y_{syo_ten} = \frac{4}{3} \left[\frac{R^3 \sin^3 \left(\frac{\theta_{o_ten}}{2} \right) - R_c^3 \sin^3 \left(\frac{\theta_{c_ten}}{2} \right)}{R^2 (\theta_{o_ten} - \sin \theta_{o_ten}) - R_c^2 (\theta_{c_ten} - \sin \theta_{c_ten})} \right] \quad (9)$$

$$y_{syi_comp} = \frac{4}{3} \left[\frac{r^3 \sin^3 \left(\frac{\theta_{i_ten}}{2} \right) - r_{si}^3 \sin^3 \left(\frac{\theta_{si_ten}}{2} \right)}{r^2 (\theta_{i_ten} - \sin \theta_{i_ten}) - r_{si}^2 (\theta_{si_ten} - \sin \theta_{si_ten})} \right] \quad (10)$$

Em que cada $\theta_{x''_ten} = 2\pi - \theta_{x''}$ é o respectivo ângulo da região tracionada (Figura 1).

Por fim, a posição da linha neutra (h) deve ser alterada até o momento calculado seja coerente com a carga calculada e a excentricidade definida.

2.1.1 Comparação com os resultados de Castanheira (2021)

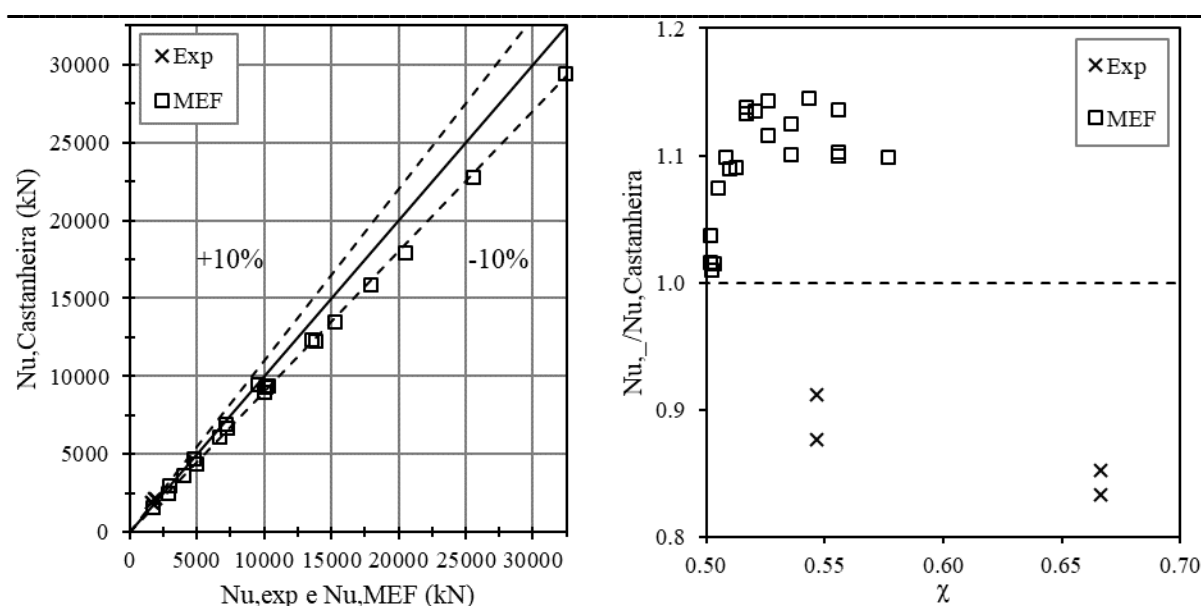
Castanheira (2021) realizou em seu trabalho 4 ensaios (Tabela 1) e 20 modelos em EF sem excentricidade. Nas tabelas que se seguem, D e d são os diâmetros externo dos tubos externo e interno, respectivamente, t_{so} e t_{si} são as espessuras dos tubos externo e interno, respectivamente, χ é a razão de vazios. As análises em EF consistiram em variar D entre 200 e 600mm, d entre 100 e 300mm, t_{so} entre 1 e 30mm e t_{si} de 5mm, o que resultaram em valores de χ entre 0,50 e 0,58. E o valor de f_c de 32,79MPa. A Figura 2a mostra uma comparação das cargas últimas experimentais (Nu_{exp}) e em EF (Nu_{MEF}), e suas correspondentes previsões pela Equação 6. Essa comparação permite avaliar a precisão da expressão proposta.

Tabela 1. Propriedades geométricas (em mm) e dos matérias (em MPa) dos modelos ensaiados

Modelo	D	d	t_{so}	t_{si}	χ	f_c	f_{syi}	f_{syo}
NAC1 e NAC2	168,3	88,9	2,8	5,5	0,55	67,5	375	419
NAC3 e NAC4	168,3	108,4	2,8	4,5	0,67	67,5	375	419

Fonte: Autoria própria (2024)

Ressalta-se que os pontos abaixo da linha diagonal são considerados uma previsão segura e as linhas tracejadas representam limites +10% e -10%. A figura mostra que os resultados experimentais e em EF estão muito próximos dos valores da equação proposta por Castanheira (2021) (ou seja, próximos da linha diagonal). A Figura 2b mostra que os modelos em EF ficaram com o χ perto dos ensaios NAC1 e NAC2. Entretanto, enquanto que os modelos em EF retornaram valores seguros (acima da linha tracejada 1,0), o mesmo não aconteceu para os ensaios.



(a) Proposta Castanheira versus Exp e MEF

(b) Relação da carga axial versus razão de vazios

Figura 2. Avaliação da acurácia da fórmula de Castanheira pelos modelos de Castanheira (2021)

Fonte: Autoria própria (2024)

2.1.2 Comparação com os resultados de Rodrigues (2018)

Rodrigues (2018) realizou em seu trabalho 4 experimentos (Tabela 2) e 35 modelos em EF, todos de colunas curtas e sem excentricidade. O primeiro grupo (CX) de análises em EF consistiu em 15 modelos variando χ entre 0,42 e 0,87. O grupo CE consistiu em 10 modelos variando t_{so} entre 1,60 e 7,11mm. O grupo CI foi formado por 10 modelos variando t_{si} entre 2,11 e 8,56mm. Todas as dimensões dos tubos foram escolhidas de acordo com o mercado brasileiro.

Tabela 2. Propriedades geométricas (em mm) e dos materiais (em MPa) dos modelos ensaiados

Modelo	D	d	t_{so}	t_{si}	χ	f_c	f_{syi}	f_{syo}
C3	168,28	88,9	2,77	5,5	0,55	30,1	375,00	404,5
C4	168,28	108,4	2,77	4,5	0,67	30,1	444,43	428,0
C5	168,28	88,9	2,77	5,5	0,55	30,1	375,00	401,0
C6	168,28	108,4	2,77	4,5	0,67	30,1	444,43	442,5

Fonte: Autoria própria (2024)

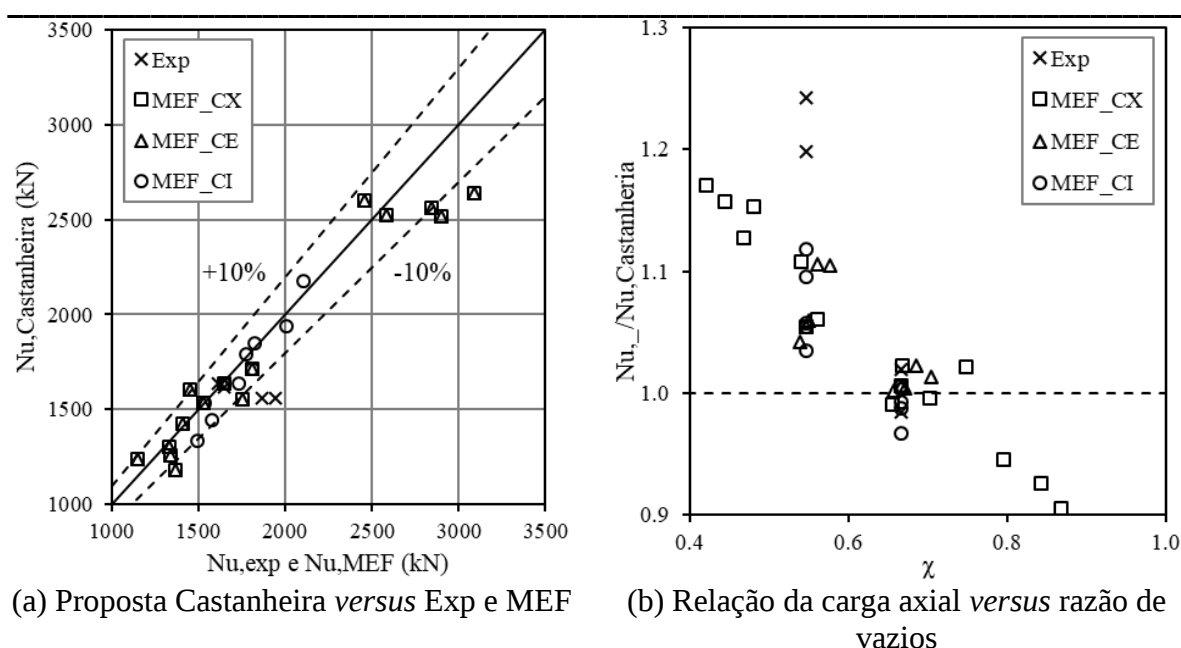


Figura 3. Avaliação da acurácia da fórmula de Castanheira pelos modelos de Rodrigues (2018)

Fonte: Autoria própria (2024)

A Figura 3a mostra que os resultados experimentais e em EF estão muito próximos dos valores da equação proposta por Castanheira (2021), exceto por 10 resultados (26%) que ficaram abaixo da linha tracejada de -10%. Diferente do que aconteceu nos modelos analisados por Castanheira (2021), um número maior de valores não se mostrou seguro (abaixo da linha tracejada da Figura 3b): 9 resultados (23%), o que evidencia a necessidade de uma investigação mais profunda da formulação proposta por Castanheira (2021).

2.1.3 Comparação com os resultados de Ribeiro (2023)

Ribeiro (2023) realizou em seu trabalho 6 experimentos com os parâmetros da Tabela 3, sendo 4 deles com excentricidade de 10, 20 e 30mm: C1, C2, C1E10, C2E20, C3E30a e C3E30b. A Figura 4a mostra que os resultados estão muito próximos dos valores da equação proposta por Castanheira (2021), exceto dos ensaios sem excentricidade, que ficaram abaixo da linha tracejada de -10%. Apenas um ensaio (C3E30a) não se mostrou seguro (abaixo da linha tracejada da Figura 4b): indicando que a formulação proposta por Castanheira (2021) está adequada para um conjunto de parâmetros.

Tabela 3. Propriedades geométricas (em mm) e dos matérias (em MPa) dos modelos ensaiados

Modelo	D	d	t_{so}	t_{si}	χ	f_c	f_{syi}	f_{syo}
Todos	127	76,2	2	3,75	0,62	30,1	375,00	404,5

Fonte: Autoria própria (2024)

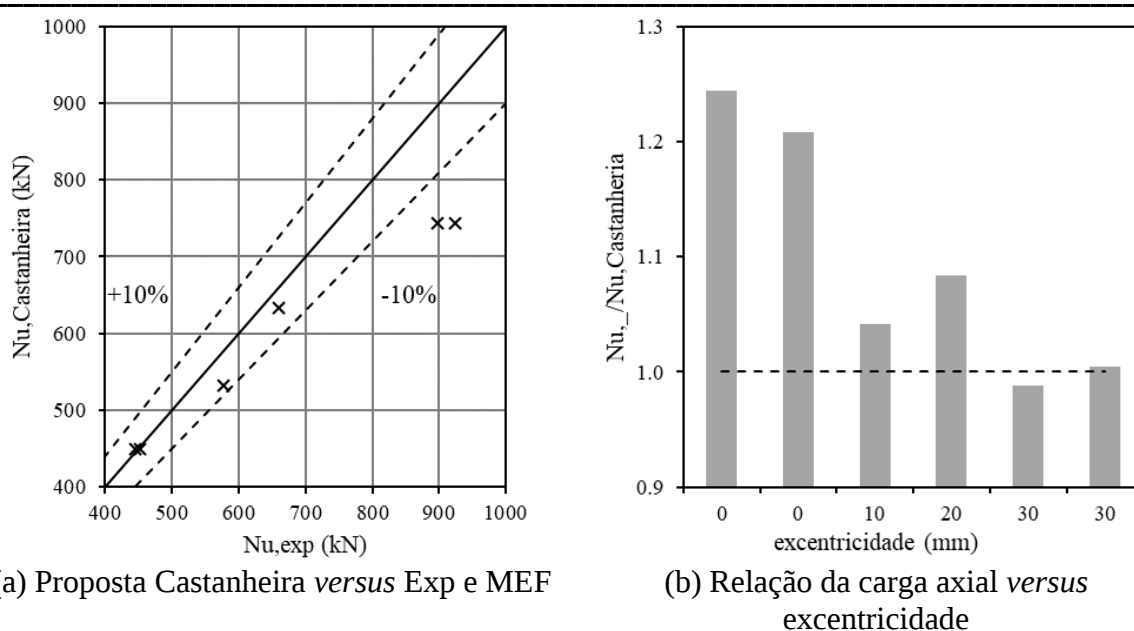


Figura 4. Avaliação da acurácia da fórmula de Castanheira pelos modelos de Ribeiro (2023)

Fonte: Autoria própria (2024)

3. Conclusões

Castanheira (2021) concluiu em seu trabalho que os métodos Eurocode 4 (2004), Uenaka, Kitoh e Sonoda (2010), Hassanein, Kharoob e Liang (2013) e Han, Ren e Li (2011) de dimensionamento de colunas CFDST mostram-se não seguros para colunas com capacidade de carga alta. Um método de projeto é então proposto, levando a um Coeficiente de Variação de 6,4% quando comparado a seus ensaios e modelos em EF. Este trabalho investiga os resultados de Castanheira (2021) e destaca que a formulação proposta retornou valores não seguros para os 4 experimentos. Adicionalmente, foram comparados os resultados de Rodrigues (2018) e Ribeiro (2023) com a formulação. Onde, no primeiro, identificou-se 9 das 39 cargas críticas com respostas não seguras (23%) e no segundo 1 dos 4 ensaios com excentricidade com resultado abaixo da segurança. Essa investigação faz parte do início de um trabalho de mestrado, em que se pretende definir as regiões que precisam de mais estudos, para em seguida a realização de ensaios experimentais e em EF para uma discussão mais profunda do comportamento das colunas CFDST e das formulações existentes.

Referências

CASTANHEIRA, D. S. **Compressive behavior of double skin sections with stainless steel outer tubes and recycled aggregate concrete subjected to concentric and eccentric load**. 2021. Tese de Doutorado. UERJ.

EN 1994-1-1: 2004. **Eurocode 4, Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings**. CEN, European Committee for Standardization, Brussels.

HAN, L-H., REN, Q-X., LI, W. Tests on stub stainless steel-concrete-carbon steel double-skin tubular (DST) columns. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 67, p. 437-452, 2011.

HASSANEIN, M. F., KHAROOB, O. F., LIANG, Q. Q. Circular concrete-filled double-skin tubular short columns with external stainless steel tubes under axial compression. **Thin-Walled Structures**, v. 73, p. 252-263, 2013.

RIBEIRO, D. M. **Estudo teórico-experimental de colunas double-skin em aço inoxidável e carbono submetidas à flexo-compressão**. 2023. Qualificação de Doutorado. UERJ.

RODRIGUES, P. F. **Avaliação experimental e numérica de colunas tubulares mistas CFDST (aço inoxidável-concreto-aço carbono)**. 2018. Dissertação de Mestrado. UERJ.

UENAKA, K., KITO, H., SONODA, K. Concrete filled double skin circular stub columns under compression. **Thin-Walled Structures**, v. 48, p. 19-24, 2010.