



ANÁLISE PARÁMETRICA DE SEÇÕES CIRCULARES DE AÇO INOXIDÁVEL SUBMETIDOS A COMPRESSÃO, FLEXÃO E FLEXO-COMPRESSÃO

Parametric analysis of stainless steel circular sections subjected to combined axial load and bending

Edison Ramalho de Souza Junior (1)(P); Luciano Rodrigues Ornelas de Lima (2);
Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco (2); Monique Cordeiro Rodrigues (3);
André Tenchini da Silva (2).

(1) Aluno Mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, Brasil.

(2) Prof. Dr., Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, Brasil.

(3) Profa. Dra., Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, Brasil.

Email para Correspondência: moniquecordeirorodrigues@gmail.com; (P) Apresentador

Resumo: Apesar de ainda apresentar um custo direto maior em relação às estruturas usuais de concreto armado ou em aço carbono e mistas, nota-se um crescimento na utilização do aço inoxidável em elementos estruturais ao redor do mundo nos últimos anos. Este crescimento é justificado pela sua durabilidade, proporcionada pela alta resistência à corrosão, e consequente redução nos custos de manutenção, alto impacto estético conferido às construções além de elevada resistência ao fogo. Buscando melhorar a relação custo-benefício, para tornar sua utilização mais atrativa, e entender melhor o seu comportamento em elementos estruturais, estudos vêm sendo realizados para aperfeiçoar as metodologias de dimensionamento existentes. Os códigos normativos atuais ainda tratam o comportamento de estruturas em aço inoxidável de forma similar aos elementos em aço carbono, subestimando os valores de resistência desses elementos. Este trabalho tem como objetivo, o estudo do comportamento de colunas, vigas-coluna e vigas em seções tubulares circulares de paredes finas em aço inoxidável austenítico SAE-AISI A554 304, através de um estudo paramétrico com a utilização do Método dos Elementos Finitos. Os modelos numéricos foram gerados com a utilização do software ABAQUS 6.14 e calibrados por meio dos resultados obtidos pelo programa experimental realizado no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Os ensaios experimentais foram executados com seções CHS 101,6x1,5 e CHS 127,0x2,0. Os valores do módulo de elasticidade, tensão de escoamento, tensão de ruptura e as curvas tensão *versus* deformação foram obtidos por meio de ensaios de caracterização à tração, além de ensaios de caracterização à compressão. As curvas de caracterização empregadas nos modelos de coluna e viga-coluna foram obtidas aplicando o método proposto por Rasmussen e Hancock, para deformações até 0,5%, e adaptadas ao método proposto por Ramberg e Osgood para o trecho



entre 0,5% - ϵ_u . Para os modelos de viga, foram utilizadas curvas de caracterização a tração verdadeira, considerando a estrição da seção do material até atingir a ruptura. Os resultados de carga última obtidos por meio da parametrização foram comparados com o Eurocode 3 – parte 1-4 e o Método da Resistência Contínua, buscando verificar qual terá melhor adequação aos casos estudados.

Palavras chaves: estruturas tubulares; aço inoxidável; análise numérica.

Abstract: Although there is still a higher direct cost in relation to the ordinary reinforced concrete or composite (carbon steel and concrete) structures, there has been a growth, in recent years, around the world of the use of stainless steel in constructive elements. This growth is justified by its durability, provided by their high corrosion resistance, and consequent reduction in maintenance costs, and to their high aesthetic impact and enhanced high fire resistance. To improve its cost-effectiveness and make its use more attractive a better understanding of its structural elements behaviour is still needed to improve the existing design methodologies. The current codes still assume the behaviour of stainless steel structures similarly to carbon steel elements, underestimating these elements load carrying capacities. This work aims to investigate the response of columns, beam-column and beams in SAE-AISI A554 304 austenitic stainless steel made of thin-walled circular tubular sections. This was made through a parametric study using the Element Method Finite. The numerical models were generated using the software ABAQUS 6.14 and were calibrated against experiments carried out at the Civil Engineering Laboratory (LEC) of the State University of Rio de Janeiro (UERJ). The experiments were performed with CHS 101.6 x 1.5 and CHS 127.0 x 2.0 cross-sections while the Young's modulus, yield stress, rupture stress and stress *versus* strain curves were obtained by tensile and compression characterisation tests. These curves were then used in the column and beam-column models with the aid of the method proposed by Rasmussen and Hancock. This method was utilised for deformations up to 0.5%, and was adapted with a modification proposed by Ramberg & Osgood for the deformations between 0.5%- ϵ_u . The beam models used true stress vs. true strain material curves. The parametric model ultimate load results obtained was also compared with Eurocode 3 section 1-4 and with the Continuous Strength Method, seeking to verify their scope and validity.

Keywords: tubular structures; stainless steel; numerical analysis.



1 INTRODUÇÃO

Buscando melhorar a relação custo-benefício, para tornar sua utilização mais atrativa, e entender melhor o seu comportamento em elementos estruturais, estudos vêm sendo realizados para aperfeiçoar as metodologias de dimensionamento de perfis constituídos em aços inoxidáveis. Alguns códigos normativos atuais ainda tratam o comportamento de estruturas em aço inoxidável de forma similar aos elementos em aço carbono, levando no geral a dimensionamentos que subestimam sua real capacidade de resistência.

Além de mecanicamente resistentes e de grande apelo estético, estruturas compostas com elementos em aço inoxidável possuem maior durabilidade pela sua alta resistência à corrosão, tendendo a reduzir os custos com manutenção ao longo de sua vida útil e compensar o alto investimento inicial a longo prazo. Sua alta ductilidade também é um dos fatores responsáveis pela crescente aplicação em construções (Zhao, Gardner e Young, 2016a). O estudo de seções tubulares circulares em aço inoxidável também vem sendo ampliados nos últimos anos, motivando diversos trabalhos experimentais, numéricos e analíticos, o que tende a melhorar seu custo benefício.

Rasmussen e Hancock (1993) desenvolveram um programa experimental para avaliação de perfis tubulares formados a frio com seções circulares e quadradas em aço inoxidável austenítico tipo 304L, com foco no comportamento do material, cujas seções CHS 101,6x2,85 e SHS 80x3 foram submetidas a cargas axiais de compressão com e sem excentricidade. Para tal variou-se o comprimento das colunas entre 300 mm a 4000 mm para avaliar a influência da esbeltez na resistência destes elementos. Os autores concluíram que a melhor forma para caracterização do material a compressão para colunas tubulares quadradas e circulares se dá por meio de medição da deformação a meia-altura do corpo de prova, que após dividido pela área da seção, permite a obtenção das tensões nele atuantes. Os trabalhos de Rasmussen e Rondal (1997) dão continuidade ao estudo, apresentando aprimoramentos dos métodos de dimensionamento utilizando o método dos elementos finitos.

Zhao, Gardner e Young (2016a e 2016b) desenvolveram estudos baseados em análises experimentais, numéricas e paramétricas de colunas e vigas-coluna curtas, birrotuladas, com seções CHS 60,5 x 2,8; CHS 76,3 x 3,0; CHS 114,3 x 3 e CHS 139,4 x 3, fabricadas em aço inoxidável austenítico conformadas a frio. A partir de análises paramétricas, foram geradas curvas de combinação momento *versus* carga axial sendo após comparados com o código europeu, a norma norte-americana, australiana e o Método da Resistência Contínua. Os autores concluíram que o último leva a um dimensionamento mais econômico em relação aos demais métodos normativos.

O trabalho de Zhao, Gardner e Young (2016c) apresenta um estudo sobre o comportamento de elementos em seção tubulares circulares, birrotuladas, com comprimento de 1450 mm em aço inoxidável austenítico, aplicando variações de excentricidades nos ensaios experimentais, com o intuito de analisar o comportamento dos esforços de compressão e flexão combinados, em seções CHS 60,5 x 2,8 e CHS 76,3 x 3,0. Com o desenvolvimento e calibração de modelos numéricos, foram parametrizados 285 modelos, os quais variaram entre classes 1, 2 e 3. Os resultados obtidos foram comparados com o código europeu, as normas australiana, americana. Constatou-se que todos os métodos de



dimensionamento levam à resultados conservadores insuficientemente respresentativos em relação ao comportamento real.

O objetivo deste artigo é estudar o comportamento de colunas curtas em aço inoxidável austenítico, submetidas aos esforços combinados de compressão e flexão. Inicialmente, foram gerados modelos numéricos calibrados a partir dos resultados obtidos por Soares (2017), em seções CHS 101,6 x 1,5, e posteriormente foram desenvolvidos modelos paramétricos variando diâmetros e espessuras. Posteriormente, os resultados foram comparados ao método de dimensionamento do Eurocode 3, Parte 1-4 (2006).

2 DIRETRIZES EUROCODE 3, PARTE 1-4 (2006)

O código europeu trata do dimensionamento de elementos estruturais constituídos em aço inoxidável, qualificando as seções submetidas à compressão e flexão em classes de 1 a 4. Para as seções tubulares circulares, o fator que determina sua classe é a relação entre o diâmetro externo da seção e a espessura de sua parede (d/t). Para o dimensionamento de elementos classe 4 e com diâmetros superiores a 240 mm, o dimensionamento deve seguir o prescrito para seções de paredes esbeltas.

Para o dimensionamento de seções até Classe 3 à compressão, utiliza-se a Eq. (1). Já para o cálculo à flexão para Classe 1 e 2 emprega-se a Eq. (2) e a Eq. (3) para Classe 4. Para efeitos combinados deve-se usar a Eq. (4), onde A_g é a área bruta da seção transversal, W_{pl} o módulo plástico de resistência à flexão, $W_{el,min}$ o módulo elástico mínimo de resistência à flexão, N_{Ed} a carga de compressão atuante no elemento, $N_{b,Rd,min}$ o menor valor de $N_{b,Rd}$, considerando os possíveis modos de flambagem, e_N a excentricidade de aplicação da carga de compressão, M_{Ed} o momento atuante no elemento, β_w o fator que varia em relação à classe do perfil, k o fator de interação entre flexão e compressão, $\bar{\lambda}$ a esbelteza normalizada, que depende da classe do perfil, γ_{M0} e γ_{M1} os fatores de segurança, iguais a 1,1.

$$N_{c,Rd} = A_g f_y / \gamma_{M0} \quad (1)$$

$$M_{c,Rd} = W_{pl} f_y / \gamma_{M0} \quad (2)$$

$$M_{c,Rd} = W_{el,min} f_y / \gamma_{M0} \quad (3)$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,min}} + k \left(\frac{M_{Ed} + N_{Ed} e_N}{\beta_w W_{pl} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1 \quad (4)$$

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL DE BASE

O programa experimental estudado para calibração dos modelos numéricos foi desenvolvido por Soares (2017), no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade do Estado do Rio do Janeiro (UERJ). Foi utilizada seção tubular circular CHS 101,6 x 1,5, em aço inoxidável austenítico SAE-AISI A554 304, sendo desenvolvidas duas colunas, seis vigas-coluna e duas vigas. As colunas foram biengastadas e as vigas-colunas, birrotuladas.

Para a simulação da interação entre carga de compressão e momento, foram aplicados carregamentos excêntricos normais à seção transversal da coluna. As excentricidades utilizadas foram 15 mm, 30 mm e 45 mm, em colunas curtas com comprimento de 300 mm, com duas peças para cada configuração. Para a caracterização do material à compressão foram utilizadas duas colunas biengastadas, com comprimentos de 300 mm e 370 mm. A configuração dos ensaios é apresentada na Figura 1.

As vigas possuíam comprimento total de 1500 mm, com aplicação de carga em dois pontos equidistantes em relação ao vão central, com auxílio de uma viga de distribuição, a fim de se obter um trecho submetido à flexão pura. Com o intuito de se evitar deformações nos pontos de aplicação dos carregamentos e apoios, foram inseridos dois cilindros de concreto nas extremidades das vigas, cada um com comprimento de 550 mm, de forma a enrijecedor esses trechos. A Figura 2 apresenta a configuração para os ensaios de vigas e a Tabela 1 os resultados experimentais obtidos para os modelos ensaiados, onde V corresponde aos ensaios de vigas, VC viga-coluna, C coluna, e os números correspondem a sequência de ensaios realizados.

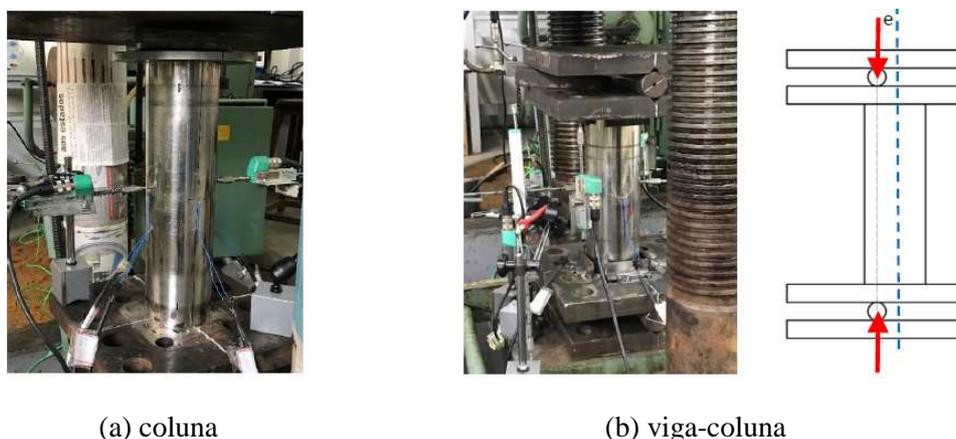


Figura 1. Configuração dos ensaios de coluna (esquerda) e viga-coluna (centro e direita).

Fonte: (Adaptado de Soares, 2017)

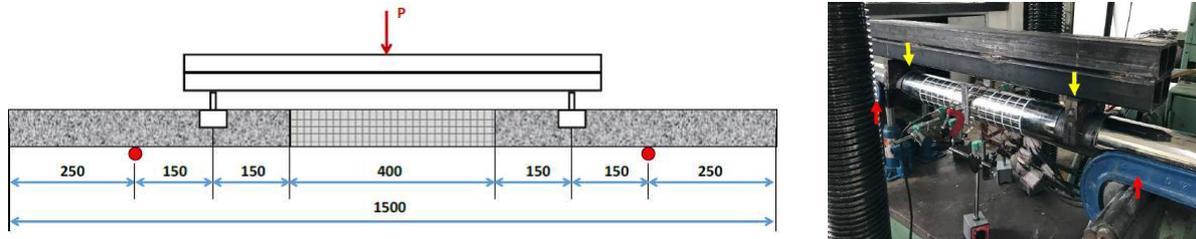


Figura 2. Configuração dos ensaios de viga.

Fonte: (Adaptado de Soares, 2017)

Tabela 1. Resultados dos ensaios experimentais (Soares, 2017).

Ensaio	e (mm)	L (mm)	N_u (kN)	M_u (kN.m)
1_C	0	370	144,9	0
2_C	0	300	154,9	0
3_VC	15	300	137,9	2,2
4_VC	15	300	138,1	2,3
5_VC	30	300	93,8	3,0
6_VC	30	300	91,6	3,0
7_VC	45	300	68,2	3,3
8_VC	45	300	65,2	3,1
9_V	-	1500	-	5,7
10_V	-	1500	-	5,8

4 MODELAGEM NUMÉRICA

Os modelos numéricos desenvolvidos utilizaram como base de calibração os resultados do programa experimental de Soares (2017), empregando o programa de modelagem em elementos finitos Abaqus 6.14 (2015). Foram aplicados elementos do tipo *shell* (casca) com integração reduzida, os quais possuem quatro pontos com seis graus de liberdade em cada nó. Testes prévios realizados antes da calibração dos modelos mostraram que a utilização de elementos finitos sólidos e casca resultaram em valores de carga máxima e deslocamentos muito próximos e, por conta de menor tempo computacional exigido pelo segundo, o mesmo

foi adotado para a calibração e futura parametrização das seções. Para o modelo em casca, é utilizado o diâmetro médio da seção, sendo obtido pela soma dos diâmetros internos e externos, e divididos por dois.

Para o desenvolvimento dos modelos de coluna e viga-coluna foram criados dois pontos de referência (RPs) em cada extremidade dos tubos e neles aplicadas restrições do tipo MPC constraint, de forma a vincular os nós da borda e distribuir para estes nós ligados a condição de contorno e os esforços, conforme Figura 3. As condições de contorno estão também descritas na Figura 3, sendo a sigla U representando deslocamento e UR, rotação, com a distinção dos eixos definida pelos números 1, 2 e 3, representando os eixos cartesianos x, y e z, respectivamente.

Modelo	U1	U2	U3	UR1	UR2	UR3
Coluna (RP2)	X	-	X	X	X	X
Coluna (RP1)	X	X	X	X	X	X
Viga-coluna (RP2)	X	-	X	X	X	-
Viga-coluna (RP1)	X	X	X	X	X	-

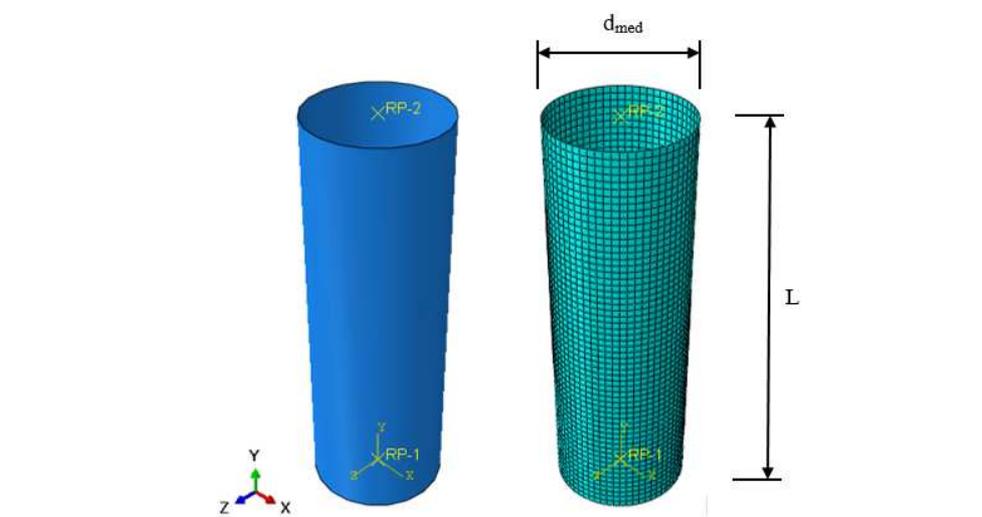


Figura 3. Modelos numéricos para coluna e vigas-coluna.

O estudo de malha foi desenvolvido de forma a apresentar o melhor resultado com o menor custo operacional, sendo escolhida a malha de 5 mm de lado por elemento. Em todos os modelos de coluna e viga-coluna foram utilizadas curvas de caracterização à compressão, com a média das deformações lidas a partir de quatro extensômetros na direção axial e posicionados a meia altura no ensaio de compressão, sendo consideradas as leituras até 0,5% de deformação (Figura 4) e prolongando-a até o valor de ruptura, conforme o método de Ramberg-Osgood, apresentado no Eurocode 3, Parte 1-4 (2006).

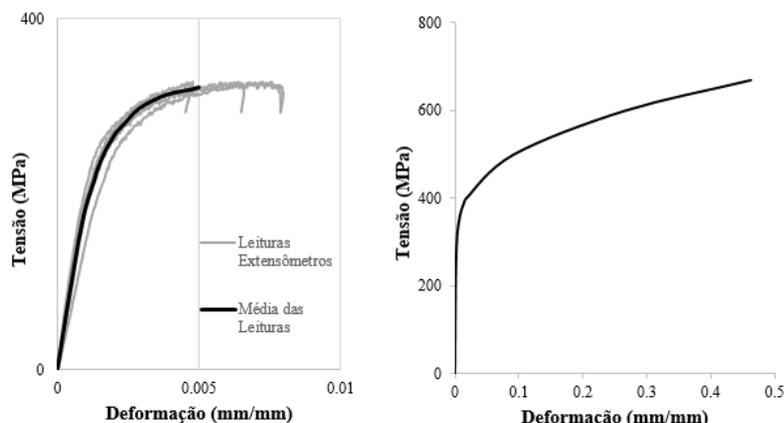


Figura 4. Curva de caracterização à compressão.

Realizaram-se análises do tipo *Buckle*, para obtenção dos modos de flambagem, e com os dados de deslocamento nó a nó gerados, análises do tipo *Riks* foram executadas, aplicando-se deslocamentos axiais prescritos de 10 mm no topo dos tubos. A escolha dos modos de flambagem não apresentou grande diferença nos resultados obtidos, sendo em todos os modelos aplicado o primeiro modo em todos os modelos. Os níveis de imperfeição que mais se aproximaram dos resultados experimentais foram de $L/500 + t/10$ e $t/20$, para os modelos de coluna e viga-coluna, respectivamente.

A Figura 5 mostra os pontos de aplicação de apoio e carregamento, e seus respectivos graus de liberdade, para os modelos de viga. O estudo de malha levou a escolha de malha com dimensão de 5 mm.

Ponto	U1	U2	U3	UR1	UR2	UR3
A	X	X	X	-	X	X
B	X	X	-	-	X	X

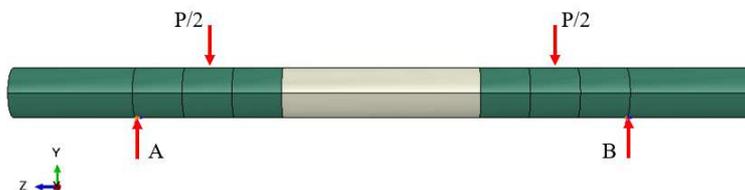


Figura 5. Pontos de aplicação de apoios e cargas, nos modelos de viga.

Os pares de tensão e deformação utilizados nos materiais do modelo numérico de viga foram obtidos por meio dos ensaios de caracterização à tração realizados por Soares (2017), transformando a curva real em verdadeira, conforme Figura 6. Para simulação do trecho enrijecido pelo cilindro de concreto, representado pela cor verde na Figura 5, foi atribuída

uma espessura de 8 mm, obtida por meio do cálculo de rigidez equivalente entre o aço inoxidável e concreto aplicado.

Para o caso de vigas, ao se aplicar a análise *Buckle* observou-se que o modo de flambagem 3 foi o que mais se assemelhou com as deformadas obtidas nos ensaios experimentais, e por isso foi utilizada para a inclusão da imperfeição inicial, com $t/350$ para a imperfeição local. Durante a análise *Riks*, aplicou-se deslocamentos prescritos simultâneos de 20 mm no sentido negativo do eixo y, simulando a atuação da viga de distribuição, nos pontos de carga indicados na Figura 5.

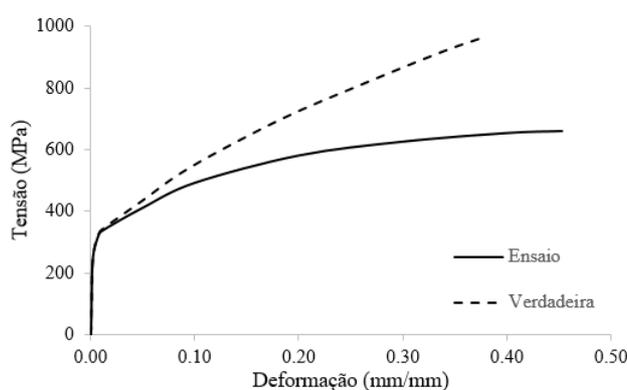
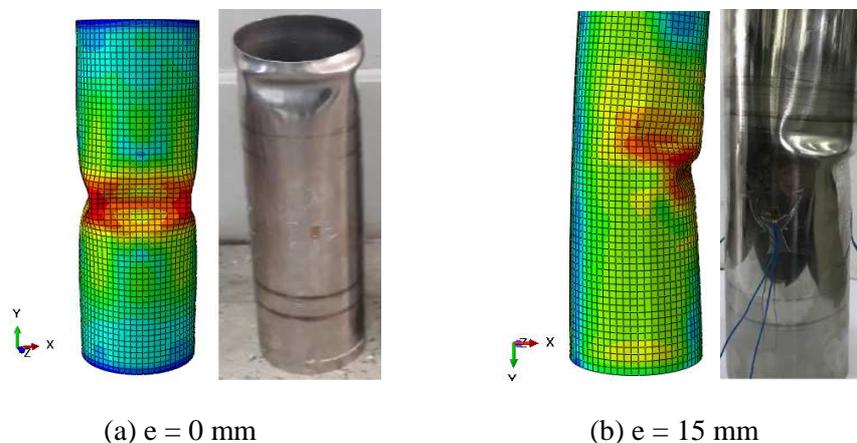


Figura 6. Curvas de caracterização à tração.

A Tabela 2 e a Figura 8 apresentam os resultados obtidos para a análise numérica e sua comparação com os resultados experimentais, referente a carga axial e deslocamento axial. Observou-se uma boa aproximação entre os resultados numéricos e experimentais, cabendo ressaltar que para as curvas experimentais com excentricidades de 15 mm foram corrigidas as leituras de deslocamento, de modo a desconsiderar o trecho de mal funcionamento do apoio rotulado. A Figura 7 mostra a comparação entre as deformadas experimentais e numéricas, pode-se observar a boa concordância entre os resultados obtidos.



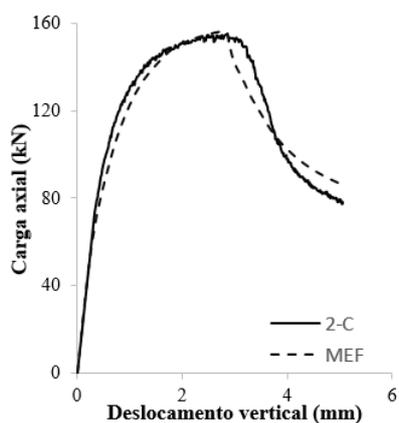
(a) $e = 0$ mm

(b) $e = 15$ mm

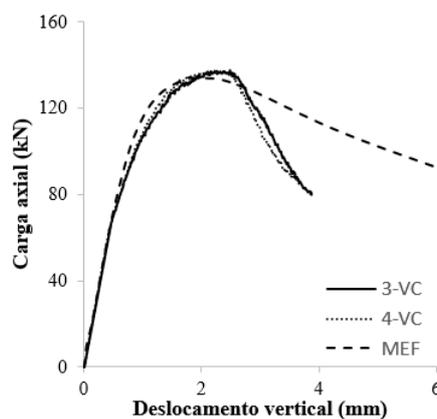
Figura 7. Colunas e Vigas-colunas. Comparação entre deformadas numéricas e experimentais.

Tabela 2. Colunas e Vigas-colunas. Resultados da calibração dos modelos numéricos.

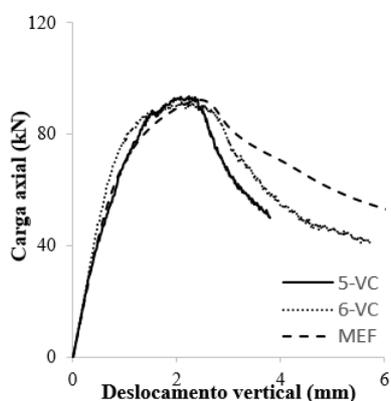
Ensaio	e (mm)	N_u (kN)	M_u (kN.m)	N_{num} (kN)	M_{num} (kN.m)	$\frac{N_u}{N_{num}}$	$\frac{M_u}{M_{num}}$
1_C / 2_C	0	154,9	0	156,4	0	0,99	-
3_VC / 4_VC	15	138,0	2,2	134,0	2,0	1,03	1,12
5_VC / 6_VC	30	92,7	3,0	92,1	3,0	1,01	1,00
7_VC / 8_VC	45	67,7	3,2	68,2	3,2	0,98	0,99



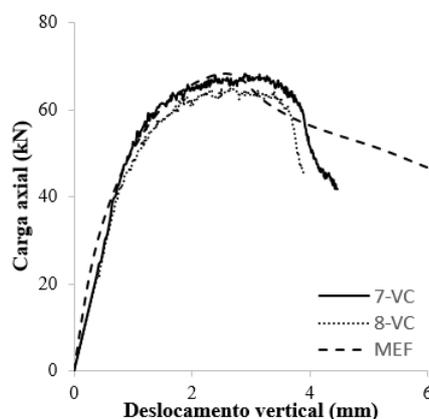
(a) $e = 0$ mm



(b) $e = 15$ mm



(c) $e = 30$ mm



(d) $e = 45$ mm

Figura 8. Colunas e Vigas-Colunas. Curvas de carga axial versus deslocamento vertical.

A Figuras 9 e a Tabela 3 mostram os resultados obtidos com a calibração do modelo, os quais foram obtidos medindo-se a carga de reação nos pontos de aplicação dos deslocamentos e o deslocamento vertical da parte inferior da seção central da viga, percebendo-se uma boa aproximação do comportamento real medido nos ensaios. A Figura 10 apresenta a deformada da estrutura, onde pode-se observar mais uma vez a boa concordância do modelo numérico desenvolvido.

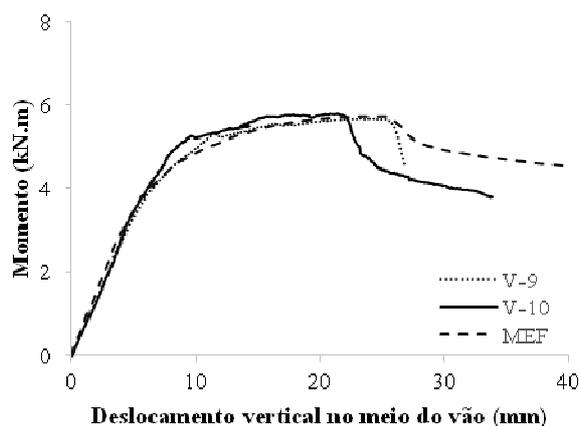


Figura 9. Vigas. Curvas de carga axial *versus* deslocamento vertical.

Tabela 3. Vigas. Resultados da calibração dos modelos numéricos.

Ensaio	M_u (kN.m)	M_{num} (kN.m)	$\frac{M_u}{M_{num}}$
1_V / 2_V	5,8	5,7	0,99

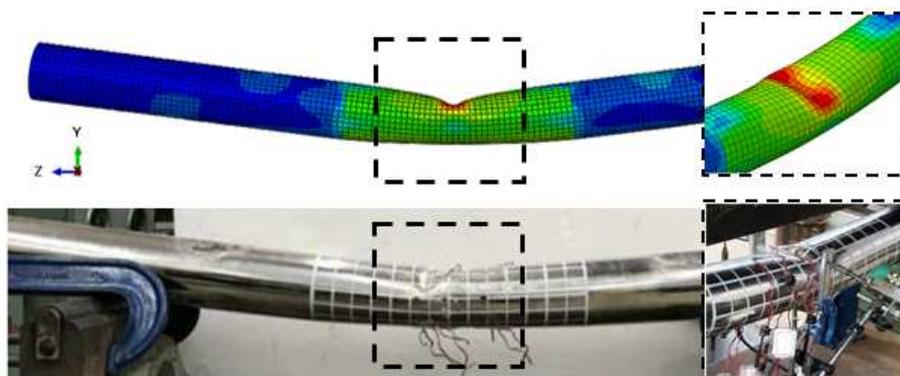


Figura 10. Vigas. Comparação entre deformadas numérica e experimental.

5 ESTUDO PARAMÉTRICO

Buscando uma avaliação mais abrangente sobre o estudo de tubos circulares em aço inoxidável austenítico, foi realizada uma série de análises de modelos paramétricos, com seções comerciais, classificados entre as classes 1 e 3, variando os diâmetros externos entre 50,8 mm e 203,2 mm e as espessuras entre 1,5 mm e 3 mm. A nomenclatura adotada para a identificação de cada modelo seguiu a notação a seguir: as primeiras letras referem-se ao tipo de ensaio, sendo “C” para compressão, “FC” para flexo-compressão e “F” para flexão. Na sequência vem o diâmetro externo, a letra “T” seguida da medida da espessura da seção, a letra “L” seguida do comprimento total do modelo e a letra E, seguida do valor da excentricidade aplicada, nos modelos de vigas-coluna (todas as dimensões em milímetros). Buscou-se manter a razão do comprimento sobre diâmetro externo (L / d_{ext}) próxima de 3.

O valor de excentricidade utilizado para o cálculo dos momentos últimos é resultante da soma das excentricidades nominais dos ensaios (e_n) e a excentricidade gerada pela deflexão dos tubos (e_u), calculada por meio das rotações nos apoios rotulados no instante em que se atinge a carga de ruptura, conforme Eq. (5). Os resultados das análises são mostrados na Tabela 4 e Tabela 5.

A Figura 11 apresenta a comparação dos resultados numéricos obtidos pelos modelos parametrizados com dimensionamento seguindo o Eurocode 3, Parte 1-4 (2006), por meio da curva de interação M_u / M_{pl} versus $N_u / A_{\sigma 0,2}$. Para tanto, foi utilizado o valor da tensão de escoamento à tração obtido por Soares (2017) à 0,2% de deformação, conforme recomendado pelo código europeu. Observa-se que os valores obtidos pelo código europeu foram sempre inferiores, com grande diferença, quando comparados aos alcançados pelo modelo numérico, independente da classe do perfil, com tendência a se aproximar da curva, quando aumentada a seção transversal do perfil.

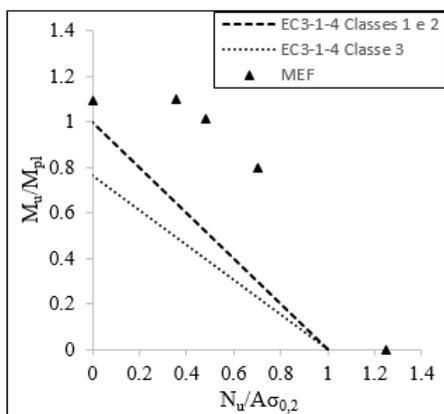
$$e_u = e_n + e' \quad (5)$$

Tabela 4. Resultados dos modelos paramétricos.

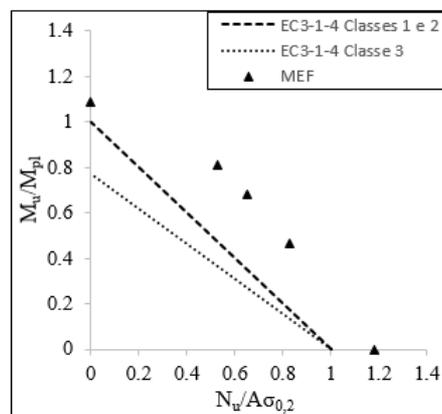
Modelo	e_u (mm)	e_n (mm)	e' (mm)	N_u (kN)	M_u (kN.m)	φ (°)
C50.8-T1.5-L150	0,0	0	0,0	83,4	0,0	0,00
FC50.8-T1.5-L150-E15	17,8	15	2,8	46,8	0,8	2,2
FC50.8-T1.5-L150-E30	33,2	30	3,2	32,0	1,1	2,5
FC50.8-T1.5-L150-E45	48,5	45	3,5	23,8	1,2	2,6
F50.8-T1.5-L1500	-	-	-	-	1,2	-

Tabela 5. Resultados dos modelos paramétricos - Continuação.

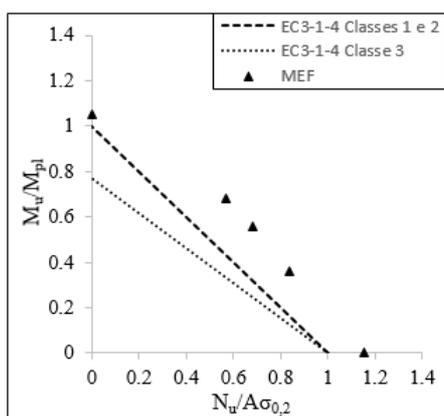
Modelo	e_u (mm)	e_n (mm)	e' (mm)	N_u (kN)	M_u (kN.m)	φ (°)
C101.6-T2-L300	0,00	0	0,0	212,2	0,0	0,0
FC101.6-T2-L300-E15	17,8	15	2,8	148,9	2,7	1,1
FC101.6-T2-L300-E30	33,1	30	3,1	117,1	3,9	1,2
FC101.6-T2-L300-E45	48,4	45	3,4	95,3	4,6	1,3
F101.6-T2-L1500	-	-	-	-	6,2	-
C127-T2-L345	0,0	0	0,0	260,9	0,0	0,0
FC127-T2-L345-E15	17,2	15	2,2	188,7	3,2	0,7
FC127-T2-L345-E30	32,5	30	2,5	153,6	5,0	0,8
FC127-T2-L345-E45	47,7	45	2,7	127,9	6,1	0,9
F127-T2-L1500	-	-	-	-	9,4	-
C152.4-T2.5-L450	0,0	0	0,0	394,3	0,00	0,0
FC152.4-T2.5-L450-E15	18,0	15	3,0	298,7	5,4	0,8
FC152.4-T2.5-L450-E30	33,3	30	3,3	248,2	8,3	0,8
FC152.4-T2.5-L450-E45	48,8	45	3,8	213,9	10,4	1,0
F152.4-T2.5-L1500	-	-	-	-	17,3	-
C203.2-T3-L600	0,0	0	0,00	622,9	0,0	0,0
FC203.2-T3-L600-E15	18,6	15	3,6	500,6	9,3	0,7
FC203.2-T3-L600-E30	34,2	30	4,2	433,7	14,8	0,8
FC203.2-T3-L600-E45	49,3	45	4,3	381,4	18,8	0,8
F203.2-T3-L1500	-	-	-	-	37,3	-



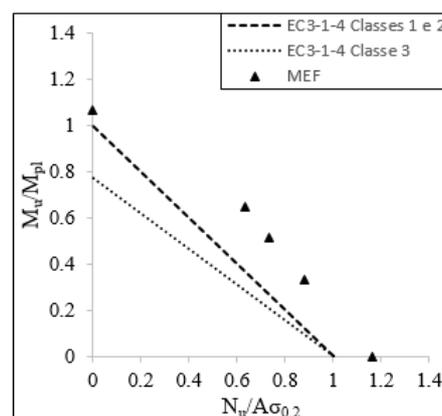
(a) CHS 50,8x1,5



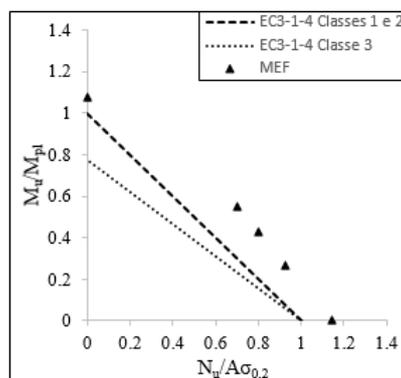
(b) CHS 101,6x2,0



(c) CHS 127x2,0



(d) CHS 152,4x2,5



(e) CHS 203,2x3,0

Figura 11. Comparação entre os resultados numérico e do código europeu.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho estudou perfis circulares sobre esforços axiais centrados, excêntricos e de flexão pura. Para tanto foram desenvolvidos modelos numéricos de colunas, vigas-colunas e viga, que utilizaram para calibração os resultados experimentais de Soares (2017). Os resultados paramétricos foram comparados aos obtidos pelo Eurocode 3, Parte 1-4 (2006).

Observa-se que o modelo apresentou bons resultados quando comparado aos ensaios. Verificou-se que a curva que se adequa para caracterização do material depende do tipo de esforço que está sendo aplicada a peça estudada. Assim, a curva de compressão foi aplicada para os ensaios de coluna e viga-coluna, e a de tração, para os de viga.

Para os modelos paramétricos verifica-se que os resultados do código europeu são inferiores aos numéricos, independente da classe do perfil. Desta forma, é possível se observar que são necessários estudos de mais modelos, de forma a comprovar tal divergência e se propor alterações normativas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES, ao CNPq e a FAPERJ pelo suporte financeiro a este programa de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Abaqus/CAE 6.14-5, 2015. *Theory Reference*. SIMULIA - Inc.
- European Standard, 2006. *Eurocode 3 - Design of steel structures – Part 1.4: General rules – Supplementary rules for stainless steels*. European Committee for Standardization, ENV1993-1-4. CEN, Brussels.
- Rasmussen, K. J. R., Hancock, J. G., 1993. *Design of cold-formed stainless steel tubular members*. I: Columns. *Journal of Structural Engineering*, vol. 119, n. 8, pp. 2349-2367.
- Rasmussen, K. J. R., Rondal, J., 1997. *Strength curves for metal columns*. *Journal of Structural Engineering*, vol. 123, n. 6, pp. 721-728.
- Soares, M., V., C., 2017. *Comportamento Estrutural de Tubos Circulares de Aço Inoxidável submetidos a Compressão, Flexão e Flexo-Compressão*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil – Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
- Zhao, O., Gardner, L., Young, B., 2016a. *Structural performance of stainless steel circular hollow sections under combined axial load and bending – Part 1: Experiments and numerical modelling*. *Thin-Walled Structures*, vol. 101, pp. 231-239.
- Zhao, O., Gardner, L., Young, B., 2016b. *Structural performance of stainless steel circular hollow sections under combined axial load and bending – Part 2: Parametric studies and design*. *Thin-Walled Structures*, vol. 101, pp. 240-248.
- Zhao, O., Gardner, L., Young, B., 2016c. *Testing and numerical modelling of austenitic stainless steel CHS beam-columns*. *Engineering Structures*, vol. 111, pp. 263-274.