



XIII SIMMEC

Simpósio de Mecânica Computacional

29 de Outubro a 1º de Novembro de 2018
UFES - Campus Goiabeiras - Vitória, ES



ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE CANTONEIRAS DE AÇO INOXIDÁVEL SUBMETIDAS A COMPRESSÃO AXIAL CENTRADA

Numerical and Experimental Analysis of Stainless Steel Angles Subjected to Axial Compression

Igor Sandez Botelho (1)(P); Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco (2); Luciano Rodrigues Ornelas de Lima (2); Monique Cordeiro Rodrigues (3); André Tenchini da Silva (2).

(1) Engenheiro civil, 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: O aço inoxidável vem sendo utilizado em vários tipos de construções por sua alta versatilidade, possuindo como características principais, a resistência à corrosão (propriedade que mais o distingue do aço carbono) e a temperaturas elevadas. Além disso, estes aços requerem menores custos com manutenção, além de boa resistência mecânica, a tenacidade e a fadiga. Embora muitas das propriedades mecânicas sejam semelhantes às propriedades do aço carbono, as características não lineares implicam em regras de dimensionamento diferentes. Essa não linearidade afeta principalmente a resposta à flambagem local e global com alguns limites mais rigorosos para a classificação da seção, além de curvas diferentes tensão *versus* deformação, dependendo do sentido de emprego da peça. Com a crescente utilização do aço inoxidável nas estruturas, foi publicada a primeira norma para o dimensionamento de elementos em aço inoxidável utilizada na maior parte dos países europeus, o Eurocódigo 3: Parte 1-4 (2006), sendo a única norma a nível mundial que engloba produtos laminados a quente, soldados e conformados a frio. Em algumas zonas, as disposições desse código são bastantes conservadoras, com limitação de aplicação devido à falta de dados experimentais. Assim, uma das áreas que requer atenção e estudo diz respeito ao comportamento de colunas de aço inoxidável compostas por cantoneiras sujeitas à compressão centrada. Este trabalho tem por objetivo estudar o comportamento desse tipo de coluna. Para calibração do modelo numérico, serão utilizados ensaios realizados em laboratório em cantoneiras de aço inoxidável austenítico A304L de seção nominal L63,5x63,5x4,76 com comprimento longitudinal de 700 mm composto por duas cantoneiras dispostas em cruz, conhecidas como “starred angle”, interligadas por solda em dois pontos espaçados igualmente, que apresentaram modo de falha por flambagem torsional. Para obtenção dos valores do módulo de elasticidade, tensão de escoamento, tensão de ruptura e as curvas tensão *versus* deformação foram realizados ensaios de caracterização à tração, além de ensaios de caracterização à compressão. As análises numéricas foram realizadas por meio do método dos elementos finitos (MEF), no programa computacional ABAQUS 6.14. Por fim, estes resultados foram comparados com métodos de cálculo preconizados no Eurocódigo 3: Parte 1-4 (2006) e o Método da Resistência Contínua (CSM).



Palavras chaves: Cantoneiras; Cantoneiras em Cruz; Aço Inoxidável; Comportamento Estrutural; Compressão.

Abstract: Stainless steel has been used in several types of constructions due to its high versatility, having as main characteristics the corrosion resistance (property that distinguishes it most from carbon steel) and to high temperatures. In addition, these steels require lower maintenance costs, as well as enhanced mechanical strength, toughness and fatigue. Although many of their mechanical properties are similar to the properties of carbon steel, their nonlinear characteristics imply in different design rules. This non-linearity mainly affects the response to local and global buckling with some stricter limits for section classification, as well as different stress versus strain curves, depending on its use. With the increasing use of stainless steel in structures, the first design standard for stainless steel elements used in most European countries was published, Eurocode 3: Part 1-4 (2006). This specification can be applied to hot rolled, welded and cold formed products. In some areas, the provisions of this code are rather conservative, with a limited application due to the lack of experimental data. Thus, one of those areas that require attention and study concerns the behaviour of stainless steel columns composed of angles subject to compression. This study aims to study the behaviour of this type of column. For model calibration, an experimental test will be used on A304L austenitic stainless steel angles of nominal section L63.5x63.5x4.76 with a longitudinal length of 700 mm composed of two cross-shaped angles, known as starred angle, interconnected by welding in two equally spaced points, which presented failure mode by torsional buckling. To obtain the values of the elasticity modulus, yield stress, rupture stress and stress versus strain curves, tensile characterisation tests were carried out in addition to compression characterisation tests. The numerical analyses was performed using the finite element method (MEF), in ABAQUS 6.14 program. Finally, the results were compared with the design procedures recommended in Eurocode 3: Part 1-4 (2006) and with the Continuous Resistance Method.

Keywords: *Angles; Starred Angles; Stainless steel; Structural Behavior; Compression.*



1 INTRODUÇÃO

O aço inoxidável pertence a família de aços resistentes à corrosão e que contém, no mínimo 10,5% de cromo em sua composição química. Estes aços são obtidos pela adição de elementos-liga que modificam as propriedades mecânicas para diferentes ambientes corrosivos e dentre os grupos existentes, os que possuem maior emprego na construção civil são os austeníticos, os ferríticos e os duplex (austeníticos-ferríticos). Os aços inoxidáveis austeníticos são os mais utilizados em elementos estruturais uma vez que suas propriedades mecânicas, em especial o endurecimento na fase plástica e a elevada ductilidade, os tornam adequados para estruturas solicitadas a carregamentos acidentais (Santiago, Baddoo & da Silva, 2017). Diferentemente do aço carbono, que exhibe um comportamento elástico-linear até atingir o patamar de escoamento, o aço inoxidável apresenta um comportamento não linear com a tensão de escoamento sem patamar bem definido. Assim, essa tensão é geralmente associada a uma tensão limite de elasticidade para uma determinada deformação, usualmente 0,2%, adotando-se o módulo de elasticidade inicial como o módulo característico, conforme descrito por Steel Construction Institute (2017).

As cantoneiras são frequentemente utilizadas em estruturas metálicas em várias aplicações, tais como treliças, estruturas de torre de transmissão, contraventamentos, dentre outros. Elas se tornaram bastante populares principalmente pela facilidade de ligação a outros membros e pela versatilidade e possibilidade de criação de vários tipos de seções transversais, obtidas pela junção de duas ou mais cantoneiras, aumentando assim sua capacidade de resistência. Atualmente, pesquisas sobre a utilização desses elementos como colunas em compressão, em especial de seções laminadas, compostas por cantoneiras duplas é extremamente pequena e serviu de motivação para este trabalho. Assim, o principal objetivo desse artigo é realizar uma análise numérica sobre colunas em cantoneiras duplas dispostas em cruz submetidas à compressão centrada. Os modelos serão desenvolvidos no programa Abaqus 6.14 (2014), que utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF). Os resultados obtidos serão comparados com os ensaios realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM) da UERJ, além de analisados os valores encontrados pelas recomendações de projeto estabelecidas por normas internacionais que tratam de estruturas em aço inoxidável, sendo o Eurocode 3 Parte:1-4 (2006) e pelo Método da Resistência Contínua - CSM (Afshan & Gardner, 2013).

2 CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA

2.1 Cantoneiras múltiplas axialmente comprimidas

Inúmeros tipos de configurações de seções constituídas por múltiplas cantoneiras são possíveis e são apresentadas na Figura 1. Embora seu uso venha se tornando cada vez mais popular em diversas aplicações na construção metálica, os estudos direcionados a esses tipos de elementos, especialmente com cantoneiras laminadas à quente, são escassos.

Temple & Mok (1990) realizaram alguns ensaios em elementos formados por duas cantoneiras dispostas em cruz posicionados verticalmente na alma de treliças primárias de grandes edifícios industriais. Geralmente, esse tipo de coluna é projetada como membro carregado axialmente, porém, devido a natureza aberta da seção transversal e por treliças secundárias geralmente serem projetadas utilizando-se apenas uma cantoneira, algumas dúvidas a respeito das condições no carregamento surgiram. Para sanar essas dúvidas, um programa de pesquisas experimentais foi realizado para investigar o comportamento e a resistência dessas colunas formadas por cantoneira dupla apoiando treliças secundárias. Os autores concluíram, por exemplo, que as normas e especificações não cobriam o dimensionamento de tais membros e que, neste tipo de configuração onde cantoneiras dispostas em cruz apoiam treliças secundárias, uma cantoneira acabava sendo mais carregada que a outra. Eles propuseram um método de projeto simplificado para esta situação, utilizando fatores de comprimento efetivo (k) modificados.

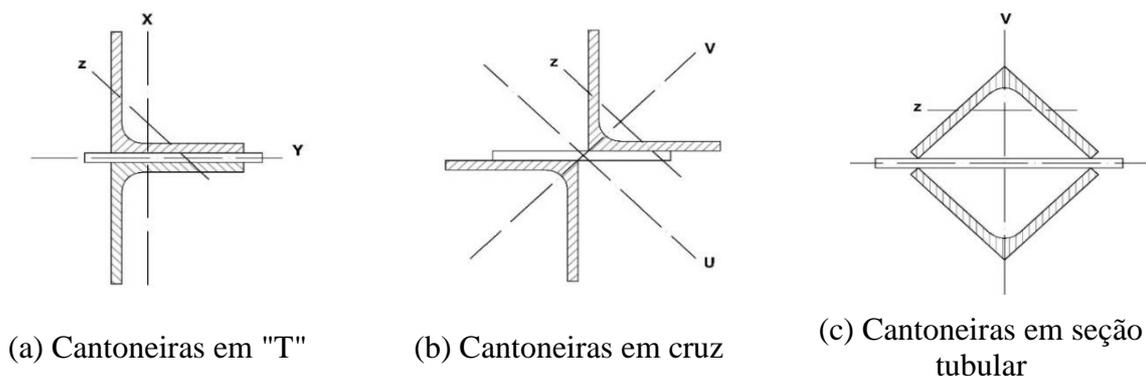


Figura 1. Configuração de cantoneiras duplas.

Fonte: (Galambos, 1998)

2.2 Caracterização do aço inoxidável

Ramberg & Osgood (1943) propuseram uma expressão analítica com a finalidade de traçar a curva tensão *versus* deformação de alguns materiais tais como ligas de alumínio, aço inoxidável e chapas de aço carbono, baseada em três parâmetros, ao invés de apenas dois parâmetros que era o usual na época (módulo de elasticidade e tensão de escoamento). De acordo com Real, Mirambell & Estrada (2001) a maioria das normas de projeto, inclusive o Eurocode 3 permite representar a curva tensão *versus* deformação utilizando a equação ou parâmetros propostos por Ramberg-Osgood (1943).

Huang & Young (2014) realizaram um estudo onde 48 ensaios de caracterização à tração em materiais metálicos foram executados, entre eles, em aço inoxidável dos tipos duplex e ferrítico, com o propósito de eliminar possíveis divergências de interpretação das propriedades mecânicas dos materiais e fornecer orientações concisas para os testes de caracterização à tração. O módulo de elasticidade inicial, por exemplo, é considerado uma das propriedades mais importantes do material e afeta diretamente a precisão na determinação da tensão de escoamento a 0,2% ($\sigma_{0,2}$), ou seja, se esse módulo for imprecisamente determinado,



consequentemente, a tensão de escoamento a 0,2% também será imprecisa. As especificações atuais recomendam três métodos diferentes para se obter o módulo de elasticidade: por meio da inclinação da parte linear da curva; da inclinação média da curva de descarga-recarga e da inclinação por meio de dois pontos especificados da curva. Esse último método é apresentado na Eq. (1), onde σ_1 corresponde a tensão medida para a deformação ε_1 , que corresponde a 0,0005; e σ_2 é a tensão para a deformação ε_2 , que vale 0,0025.

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (1)$$

Huang & Young (2014) constataram em suas investigações que o método que considera a inclinação da parte linear da curva juntamente com intervalos de tensões sugeridos para diferentes materiais metálicos é o mais recomendado para a obtenção do módulo de elasticidade inicial.

2.3 Método da Resistência Contínua (Afshan & Gardner, 2013)

O Método de Resistência Contínua (CSM - *Continuous Strength Method*) é uma abordagem de projeto desenvolvida, dentre outros estudos em Gardner (2002), Ashraf, Gardner & Nethercot (2006) e Gardner & Theofanous (2008), aperfeiçoada e simplificada por Afshan & Gardner (2013), fornecendo uma resposta consistente para a tensão-deformação do aço inoxidável considerando também o encruamento do material. O CSM substitui o conceito de classificação de seção transversal, que é a base para o tratamento de flambagem local nas normas de projeto atuais para materiais metálicos, por uma medida adimensional da capacidade de deformação da seção transversal. O CSM relaciona a resistência da seção transversal à sua capacidade de deformação, controlada pela esbeltez e sua suscetibilidade aos efeitos de flambagem local. Uma curva base de projeto, que fornece uma relação contínua entre a capacidade de deformação da seção transversal normalizada e a esbeltez da seção transversal, foi estabelecida com base nos dados de ensaios. A esbeltez da seção transversal de seções compostas por placas, como as cantoneiras, é definida na Eq. (2), onde f_y é a tensão de escoamento do material, e $\sigma_{cr,p}$ é a tensão crítica de flambagem local de placas.

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,p}}} \quad (2)$$

A capacidade de deformação proposta pelo método (ε_{csm}) é obtida na Eq. (3), onde ε_{LB} é dado pela Eq. (4), sendo δ_u o deslocamento axial da coluna.

$$\varepsilon_{csm} = \varepsilon_{LB} - 0,002 \quad (3)$$

$$\varepsilon_{LB} = \frac{\delta_u}{L} \quad (4)$$

O material é considerado por uma função bilinear simples, onde a curva tensão *versus* deformação alcança a tensão de 0,2% com determinado módulo de elasticidade (E). A inclinação que considera o encruamento do material (E_{sh}) é determinada como a inclinação da linha que passa pelo ponto de tensão a 0,2% e um ponto máximo especificado, ε_{max} , tomado como $0,16 \varepsilon_u$, onde ε_u é a deformação última, dada pela Eq. (5). A Eq. (6) apresenta esta relação, onde f_u é a tensão última do material.

$$\varepsilon_u = 1 - \frac{f_y}{f_u} \quad (5)$$

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{0,16\varepsilon_u - (\varepsilon_y + 0,002)} \quad (6)$$

Para o cálculo da resistência da seção transversal à compressão ($N_{c,Rd}$) de seções com $\bar{\lambda}_p \leq 0,68$ é necessário adotar a Eq. (7) e a Eq. (8), onde A é a área bruta da seção transversal, f_{csm} é a tensão resistente do material utilizada no método da resistência contínua, e γ_{M0} é o fator de segurança do material definido pelo Eurocode 3, Parte 1-4 (2006). Para o caso de seções com $\bar{\lambda}_p > 0,68$, a resistência é dada pela Eq. (9).

$$N_{c,Rd} = N_{csm,Rd} = \frac{A f_{csm}}{\gamma_{M0}} \quad (7)$$

$$f_{csm} = f_y + E_{sh} \varepsilon_y \left(\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} - 1 \right) \quad (8)$$

$$N_{c,Rd} = N_{csm,Rd} = \frac{\varepsilon_{csm} A f_y}{\varepsilon_y \gamma_{M0}} \quad (9)$$

2.4 Eurocode 3, Parte 1-4 (2006)

A resistência à flambagem torsional segundo o código europeu é calculada de acordo com a Eq. (10), sendo A_{eff} a área efetiva para seções Classe 4, f_y a tensão de escoamento do aço, γ_{M1} é o coeficiente parcial de segurança, χ é o fator de redução para o modo de flambagem global, dado pela Eq. (11), onde $\bar{\lambda}$ é o índice de esbeltez, dado pela Eq. (13) e ϕ é obtido pela Eq. (12). Nessa equação α corresponde ao fator de imperfeição e vale 0,34, $\bar{\lambda}_0$ é o índice de esbeltez limite, igual a 0,20, ambos para a cantoneira. A carga crítica de flambagem torsional ($N_{cr,T}$), aplicada para peças com empenamento restringido nos apoios, segue o descrito por Timoshenko & Gere (1963) e é dada pela Eq. (14), sendo I_0 o momento de inércia polar, G o módulo de elasticidade transversal do aço, I_T o momento polar de inércia em relação ao centro



de cisalhamento da seção, I_w a constante de empenamento da seção, e L o comprimento da coluna.

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \quad (10)$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + [\phi^2 - \bar{\lambda}^2]^{0,5}} \leq 1,0 \quad (11)$$

$$\phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2] \quad (12)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr,T}}} \quad (13)$$

$$N_{cr,T} = \frac{A}{I_0} \left(G I_T + \frac{4\pi^2 E I_w}{L^2} \right) \quad (14)$$

3 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Os resultados experimentais de dois ensaios foram utilizados como base para o modelo numérico. A configuração do ensaio, bem como as suas características são apresentadas na Figura 2, sendo composto por duas cantoneiras em cruz ligadas por soldas igualmente espaçadas, em aço inoxidável austenítico 304, de seção nominal L63,5x63,5x4,76, e comprimento longitudinal de 700 mm.

A cantoneira escolhida para os ensaios possui esbeltez da seção transversal (b/t) igual à 13,34 sendo, então, classificada como seção de classe 4, de acordo com o Eurocode 3, Parte 1-4 (2006). Pelos parâmetros do Método da Resistência Contínua (Afshan & Gardner, 2013), sua esbeltez ($\bar{\lambda}_p$) tem valor de 1,16. A esbeltez mínima, dada pela expressão $k_u L/r_u$ é de 14,06, onde k_u é igual a 0,5 por corresponder a uma condição de coluna bi engastada. OS ensaios receberam a nomenclatura de WDL 63.5x4.76-A/B, onde W corresponde a conexão entre cantoneiras soldadas, DL cantoneira dupla, 63.5x4.76 das dimensões da cantoneira utilizada, A/B a repetição dos ensaios.

Para a caracterização do aço inoxidável, foram realizados ensaios à tração em quatro corpos de prova, extraídos das abas das cantoneiras, de acordo com a ABNT NBR 6892-1

(2013). Para caracterização à compressão, realizou-se o ensaio de dois perfis tubulares compostos por duas cantoneiras soldadas nas abas com 200 mm de comprimento. As tensões foram calculadas a partir da relação entre a carga aplicada pela prensa hidráulica e a área do perfil tubular. A Tabela 1 mostra os valores médios dos ensaios à tração e à compressão. Pode-se notar que o módulo de elasticidade (E) da caracterização à tração é maior do que da compressão e que a tensão de escoamento a 0,2% ($f_{y,0,2\%}$) da caracterização à compressão foi superior à de tração.

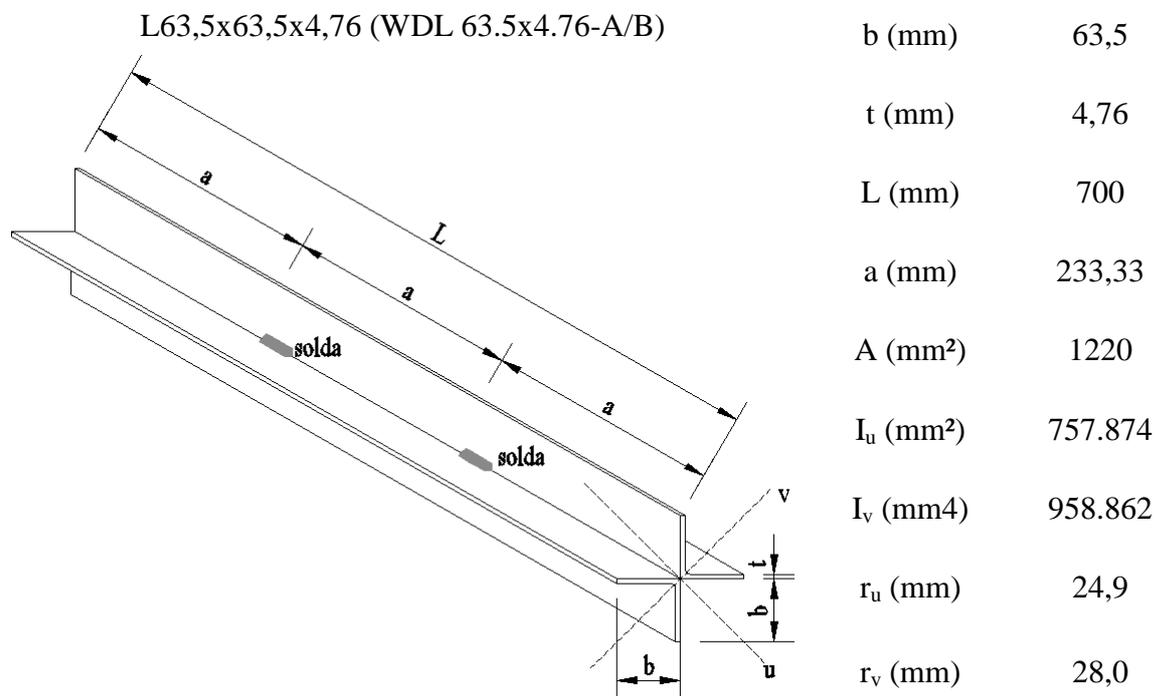


Figura 2. Configuração dos ensaios e propriedades geométricas para os ensaios WDL63.5x4.76-A/B.

Tabela 1. Resultados de caracterização à tração e compressão do aço inoxidável.

| Propriedades físicas | CP _{m,t} | CP _{m,c} | Média | CP _{m,t} /CP _{m,c} |
|----------------------|-------------------|-------------------|--------|--------------------------------------|
| E (GPa) | 209,66 | 184,00 | 196,83 | 1,14 |
| $f_{y,0,2\%}$ (MPa) | 608,00 | 650,75 | 629,50 | 0,935 |

Onde CP_{m,t} e CP_{m,c} são os valores médios da caracterização à tração e à compressão, respectivamente.

Nos ensaios, a coluna foi dividida em três partes iguais e as peças foram interconectadas por soldas de 5 cm. Nove transdutores de deslocamentos (LVDTs) foram posicionados horizontalmente nos ensaios, e dois LVDTs na base para o monitoramento dos deslocamentos axiais. Priorizou-se a leitura dos deslocamentos no meio da coluna e, para isso, LVDTs foram posicionados em cada aba das cantoneiras, nesta posição. Os outros cinco transdutores remanescentes foram distribuídos a 1/4 acima e abaixo do meio da coluna. Todos os transdutores encontravam-se afastados transversalmente a 1,5 centímetro do final de cada aba da cantoneira. Para a leitura das deformações, extensômetros foram fixados em cada aba das cantoneiras, alinhados ao centroide, sempre à meia altura de cada teste. Estes posicionamentos são apresentados na Figura 3.

A Figura 4 apresenta o gráfico de carga *versus* deslocamento axial das colunas ensaiadas. As cargas máximas dos ensaios A e B foram 640,40 kN e 652,44 kN, respectivamente, e os ensaios apresentaram flambagem torsional como modo de falha. A Figura 5 (a) mostra a curva carga *versus* deformação vertical de abas opostas das colunas ensaiadas e a Figura 5 (b) os deslocamentos horizontais registrados, medidos à meia altura da coluna.

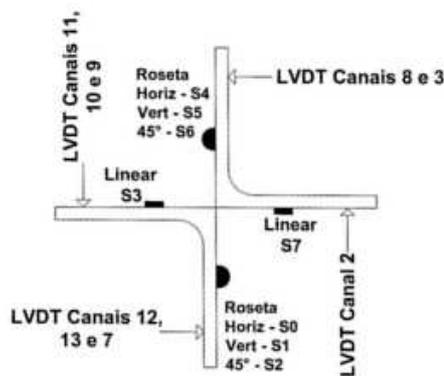


Figura 3. Instrumentação dos ensaios realizados.

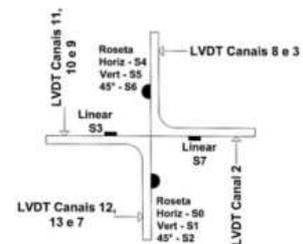
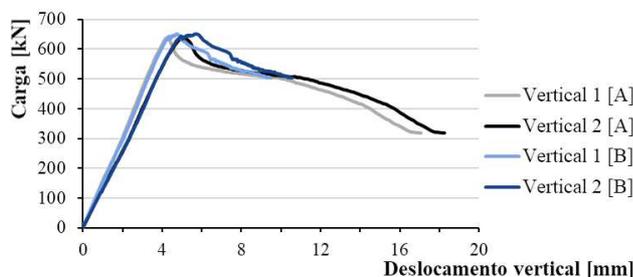
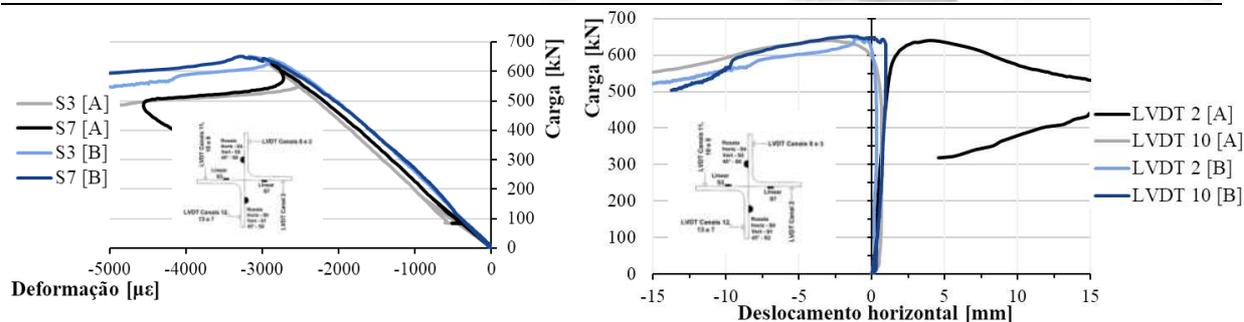


Figura 4. Gráfico carga *versus* deslocamento axial das colunas em compressão centrada.



(a) Carga *versus* deformação vertical

(b) Carga *versus* deslocamento horizontal no meio da coluna

Figura 5. Gráficos dos ensaios realizados.

4 ANÁLISE NUMÉRICA

O estudo numérico foi realizado utilizando o programa ABAQUS 6.14 (2014), seguindo a configuração dos ensaios, com colunas formadas por duas cantoneiras dispostas em cruz e interconectadas por solda, e comparando os resultados obtidos. Estudos numéricos preliminares aos ensaios realizados verificaram que a alteração da quantidade de interconexões das cantoneiras não impactavam significativamente nos resultados de carga máxima e modo de flambagem. Por este fato, o espaçamento e número de soldas foram mantidas aos realizadas experimentalmente.

As análises foram realizadas com modelos tridimensionais utilizando elementos sólidos do tipo C3D8R. A solda foi modelada com espessura (t_w) igual à metade da espessura da aba da cantoneira e perna (d_w) igual à espessura da aba. Para representar a condição de engaste nos apoios dos ensaios, as rotações foram restringidas nas três direções nas extremidades da coluna. Os deslocamentos nas três direções também foram restringidos na extremidade superior e apenas o deslocamento axial foi liberado na parte inferior. Com o intuito de facilitar a obtenção de resultados, foram criados dois pontos (RP1 e RP2). Em seguida, as seções transversais das placas de extremidade utilizadas nos ensaios foram restringidas cineticamente para se deslocarem juntas por meio da *constrain MPC (beam)*, atribuindo-se a área da seção transversal das placas a esses pontos, de acordo com a Figura 6. Os modelos desenvolvidos consideraram os efeitos de não-linearidade geométrica e física, adotando a formulação Lagrangeana total e o processo iterativo para a solução do sistema de equações de equilíbrio de Newton-Raphson.

Para que o modelo da coluna pudesse reproduzir com fidelidade o comportamento dos ensaios realizados, as propriedades físicas coletadas por meio dos ensaios de caracterização do aço inoxidável foram inseridas no programa, utilizando-se uma curva elasto-plástica de tensão *versus* deformação, conforme representado na Figura 7.

A malha de elementos finitos adotada para as cantoneiras considerou elementos quadrados com dimensões iguais a 8 mm. Para as soldas e placas de extremidade, também se

considerou elementos quadrados, porém com dimensões de 5 mm e 20 mm, respectivamente. Esta configuração do modelo foi adotada, pois mostrou-se bastante eficiente, produzindo resultados precisos em um tempo de processamento satisfatório. Inicialmente, uma análise linear de estabilidade foi realizada com o intuito de se obter os modos de flambagem e suas respectivas cargas críticas. Após a obtenção dos modos, imperfeições iniciais geométricas foram introduzidas no modelo, para o caso de modos de flambagem torsionais, mensuradas em $t/10$ (sendo t a espessura da aba da cantoneira), para a realização de uma análise do tipo *Static Ricks*, que leva em conta as não-linearidades físicas e geométricas da coluna. O carregamento foi introduzido por meio de deslocamento, igual a 30 mm, na direção axial da coluna.

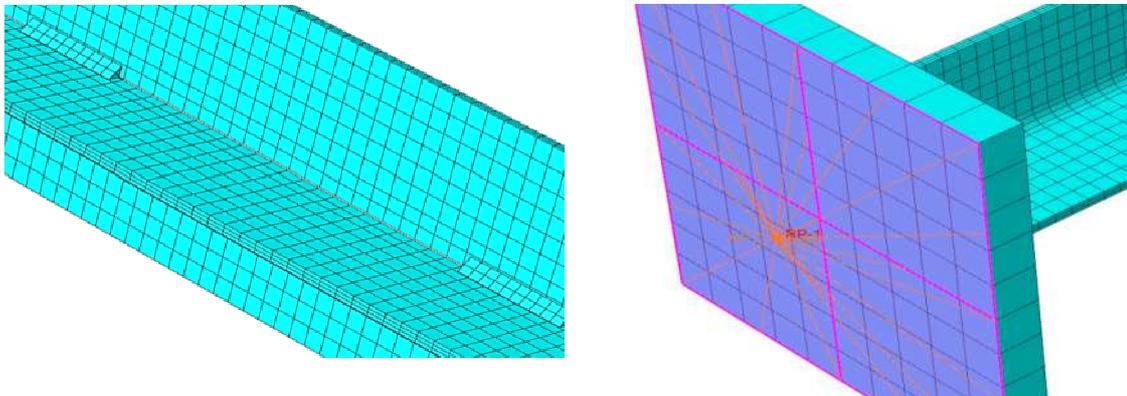


Figura 6. Detalhe da ligação e da restrição cinética dos nós.

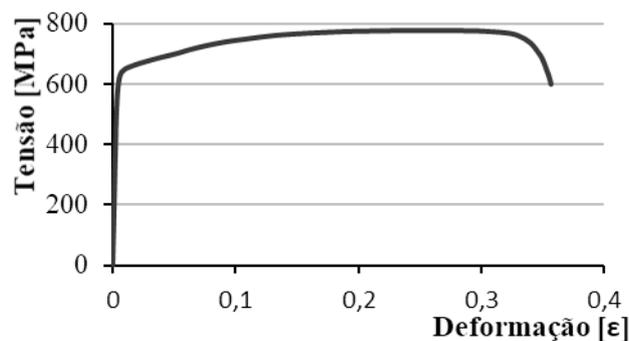
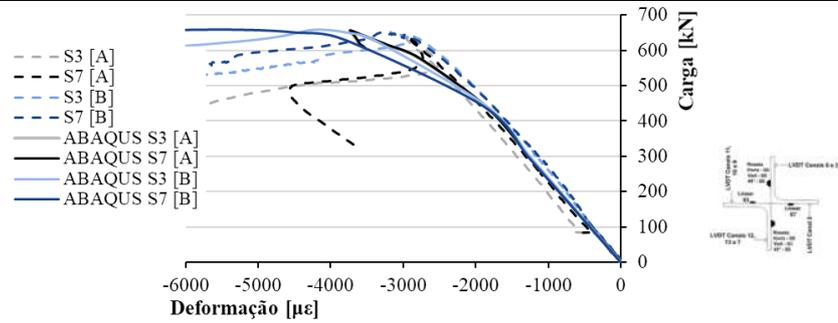


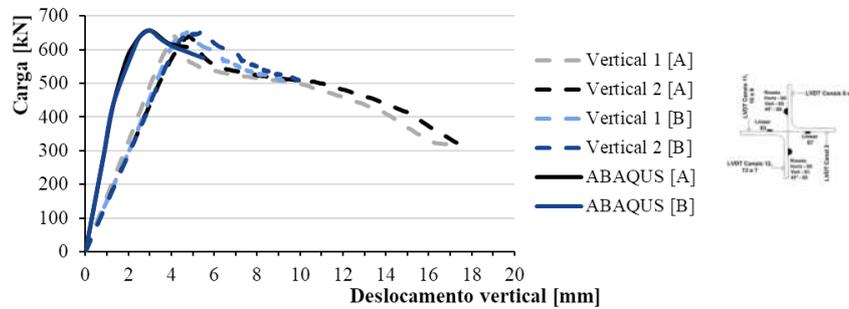
Figura 7. Curva de caracterização do aço inoxidável empregada.

4.1 Resultados numéricos

A Figura 8 (a) mostra o gráfico carga *versus* deformação vertical e a Figura 8 (b) ilustra o gráfico carga *versus* deslocamento vertical das colunas, comparando os resultados numéricos e experimentais. A Figura 9 apresenta as deformadas experimentais e numéricas dos dois modelos estudados. Pode-se observar boa concordância entre os resultados, de forma a considerar que o modelo numérico está ajustada.

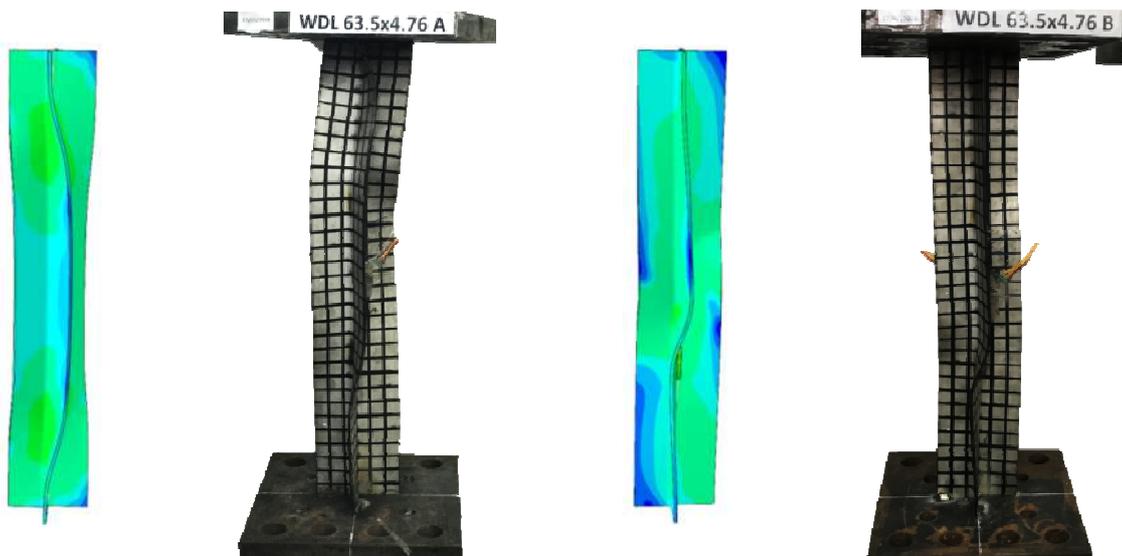


(a) Carga versus deformação vertical



(b) Carga versus deslocamento axial

Figura 8. Comparação dos resultados numéricos e experimentais.



(a) WDL63.5x4.76-A

(b) WDL63.5x4.76-B

Figura 9. Comparação de deformadas numérica e experimental.



XIII SIMMEC

Simpósio de Mecânica Computacional

29 de Outubro a 1º de Novembro de 2018

UFES - Campus Goiabeiras - Vitória, ES



5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

A Tabela 2 resume as cargas máximas atingidas nos ensaios (N_{exp}), bem como as cargas obtidas pela análise numérica (N_{abqs}), as resistências calculadas por meio do Eurocode 3, Parte 1-4 (2006) (N_{EC3}) e do Método da Resistência Contínua (Afshan & Gardner, 2013) (N_{csm}).

Com os resultados encontrados, observa-se que os valores numéricos foram bem próximos aos obtidos experimentalmente. Considerando o dimensionamento, o código europeu apresenta diferenças elevadas aos resultados experimentais, na ordem de 80%. A comparação com os valores do Método da Resistência Contínua (Afshan & Gardner, 2013) apresentou aproximadamente 20% de variação, também comparando com os resultados alcançados nos ensaios.

Tabela 2. Comparação das resistências obtidas.

| Ensaio | N_{exp} (kN) | N_{abqs} (kN) | N_{EC3} (kN) | N_{csm} (kN) | $\frac{N_{exp}}{N_{abqs}}$ | $\frac{N_{exp}}{N_{EC3}}$ | $\frac{N_{exp}}{N_{csm}}$ |
|----------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| WDL63.5x4.76-A | 640,40 | 656,43 | 354,73 | 549,52 | 0,98 | 1,80 | 1,16 |
| WDL63.5x4.76-B | 652,44 | 657,27 | 354,73 | 549,52 | 0,99 | 1,84 | 1,19 |

6 CONCLUSÕES

Este artigo realizou um estudo do comportamento estrutural de colunas de aço inoxidável austenítico compostas por duas cantoneiras em cruz ligadas por soldas igualmente espaçadas. Para isto, foi desenvolvido um modelo numérico, considerando como base a comparação com resultados experimentais e teóricos. A análise numérica foi realizada com geometria e condições de contorno semelhantes aos ensaios, onde foram consideradas não linearidades físicas e geométricas de primeira e segunda ordem nos modelos. Após a calibração, os modelos numéricos apresentaram resultados semelhantes aos dos ensaios experimentais, com curvas carga *versus* deslocamento axial e carga *versus* deformação vertical à meia altura similares às curvas experimentais e com uma variação de carga menor que 2%. Observa-se que as analogias realizadas ao aço carbono apresentadas no Eurocode 3, Parte 1-4 (2006) geram dimensionamento conservadores, quando comparados os resultados experimentais e numéricos, com variação em torno de 80%. Também é possível verificar que os valores obtidos por meio do Método da Resistência Contínua (Afshan & Gardner, 2013) apresentam uma variação máxima de 19% em relação aos valores experimentais, sendo mais próximos que os valores obtidos pelo código europeu, mas ainda conservadores quando comparados aos ensaios realizados.



AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o apoio da CAPES, CNPq e FAPERJ a este programa de pesquisa.

REFERÊNCIAS

Afshan, S., & Gardner, L., 2013. *The continuous strength method for structural stainless steel design*. Thin-Walled Structures, [s.I.], v. 68, p. 42-49, jul. 2013. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.02.011>

Ashraf, M., Gardner, L., & Nethercot, D., 2006. *Compression strength of stainless steel cross-sections*. Journal of Constructional Steel Research, [s. I.], v. 62, p. 105-115, fev. 2006. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2005.04.010>.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT., 2013. *NBR 6892-1 - Materiais metálicos - Ensaio de tração Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente*. ABNT.

Dassalt Systèmes Simulia Corp., 2014. *ABAQUS/CAE 6.14-1*. Providence, RI, USA.

Eurocode 3, Parte 1-4, 2006, *Eurocode 3: Design of steel structures- Part 1-4: General rules- Supplementary rules for stainless steels*. European Committee for Standardization, Brussels.

Galambos, T. V., 1998. *Guide of stability design criteria for metal structures* (5ª ed.). (T. V. Galambos, Ed.) New York: John Wiley & Sons, INC.

Gardner, L., 2002. *A new approach to structural stainless steel design*. Ph.D. thesis. Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London.

Gardner, L.; Theofanous, M., 2008. *Discrete and continuous treatment of local buckling in stainless steel elements*. Journal of Constructional Steel Research, [s.I.], v. 64, p. 1207-1216. nov. 2008. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.07.003>.

Huang, Y., & Young, B., 2014. *The art of coupon tests*. Journal of Constructional Steel Research, [s.I.], v. 96, p. 159-175, mai. 2014. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.01.010>

Ramberg, W., & Osgood, W. R., 1943. *Description of stress-strain curves by three parameters*. National Advisory Committee for Aeronautics, Washington, DC; note nº 902, July 1943.

Real, E., Mirambell, E., & Estrada, I., 2001. *Experimental investigation on flexural behaviour of stainless steel beams*. Computational Methods and Experimental Measurements, [S.I.], v. 30.

Santiago, A., Baddoo, N., & da Silva, L. S., 2017. *Aço inoxidável em aplicações estruturais*. Disponível em: < http://www.steel-stainless.org/media/1476/metálica_48_lq-12-16.pdf >. Acesso em: 04 ago. 2018.

Steel Construction Institute (SCI), 2017. *Design Manual for Structural Stainless Steel - 4th Edition*. Ascot: SCI.



XIII SIMMEC

Simpósio de Mecânica Computacional

29 de Outubro a 1º de Novembro de 2018

UFES - Campus Goiabeiras - Vitória, ES



Temple, M. C., & Mok, K. H.-W., 1990. *Starred Angles Supporting Secondary Trusses*. Journal of Constructional Steel Research, [s.l.], v. 17, p. 317-327, 1990. Elsevier BV. [https://doi.org/10.1016/0143-974X\(90\)90079-V](https://doi.org/10.1016/0143-974X(90)90079-V).

Timoshenko, S. P., & Gere, J. M., 1963. *Theory of elastic stability*. McGraw-Hill International Book Company.