

<http://dx.doi.org/10.15202/19811896.2016v21n41p62>

COMPORTAMENTO DE COLUNAS DE AÇO INOXIDÁVEL SUJEITAS A FLAMBAGEM FLEXO-TORSIONAL

Arthur Araujo de Menezes¹

Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco²

Luciano Rodrigues Ornelas de Lima³

RESUMO

O aço inoxidável vem sendo utilizado em vários tipos de construções devido as suas características de alta resistência à corrosão, durabilidade, resistência ao fogo, facilidade de manutenção, aparência e estética, sendo o seu uso em membros estruturais de uma construção limitada, no passado, pelo seu alto custo. Todavia, mudanças de atitudes dentro da construção civil e uma transição global para um desenvolvimento sustentável e redução em impactos ambientais tem seguramente provocado um aumento no uso do aço inoxidável. As normas de projeto de aço inoxidável atuais são em grande parte baseadas em analogias assumidas com o comportamento de estruturas de aço carbono. Entretanto, o aço inoxidável apresenta quatro curvas tensão versus deformação não-lineares sem patamar de escoamento e região de encruamento claramente definidos (tração e compressão, paralela e perpendicular a direção da laminação), modificando assim, o seu comportamento global. Um dos aspectos que ainda não foi completamente entendido diz respeito ao comportamento de colunas de aço inoxidável sujeitas a um estado limite último de flambagem flexo-torsional. Desta forma o presente trabalho objetiva realizar modelagens computacionais deste tipo particular de colunas de aços inoxidáveis através do método dos elementos finitos por meio do uso do programa ANSYS. O presente trabalho envolve uma análise de capacidade de suporte da coluna com alguns tipos de aços inoxidáveis, considerando imperfeições iniciais diversas para aferir suas semelhanças e diferenças, com colunas equivalentes em aço carbono, principalmente nas regiões de esbeltez intermediária.

Palavras-chave: Aço inoxidável. Flambagem flexo-torsional. Cantoneiras.

BEHAVIOR OF STAINLESS STEEL COLUMNS SUBJECTED BY FLEXURAL-TORSIONAL BUCKLING

Abstract

Stainless steel has been used in various types of constructions due to its characteristics, such as high corrosion resistance, durability, fireproof, ease maintenance, and aesthetic appearance. In the past, one of the major constraints of the usage of stainless steel was its high cost. However, this scenario has changed over the past few years mainly due to new global trends, such as

¹ Graduado em Engenharia Civil pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil
arthurdemenezes@hotmail.com

² Pós-doutor em Engenharia Civil pela Imperial College Of Science Technology and Medicine University Of London, Londres, Reino Unido
vellasco@eng.uerj.br

³ Pós-doutor em Engenharia Civil pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (U.COIMBRA), Coimbra, Portugal
lucianolimaerj@gmail.com

sustainable development, environment impact reductions and changes in behavior within civil engineering. Current stainless steel design code are mostly based on equivalent carbon steel analogies present in design codes. However, stainless steel is not completely similar to carbon steel, it has four nonlinear stress-strain curves without a defined yield stress and strain hardening regions (tension and compression parallel and perpendicular to the rolling direction), which modifies its overall behavior. One aspect of stainless steel columns that has not been fully understood is related to its behavior associated to the flexural-torsional buckling ultimate limit state. Therefore, the present investigation was centered on a computational modeling of particular types of stainless steel columns by applying the finite elements method using the ANSYS software. This case study includes an analysis of the load-bearing capacity capability of a variety of stainless steel columns considering various initial imperfections in an attempt to assess their similarities and differences with the carbon steel equivalent structure, especially in regions with intermediate slenderness.

Keywords: Stainless steel. Torsional buckling. Angle shapes.

1 INTRODUÇÃO

Elementos estruturais metálicos axialmente comprimidos têm suas capacidades de carga limitadas devido às cargas de flambagem. Como estes elementos são correntemente utilizados na formação de treliças, elementos de contraventamentos e colunas e com o crescimento da utilização de aço inoxidável em projetos estruturais, a flambagem flexo-torsional tornou-se objeto de estudo do presente trabalho. Esta flambagem é um estado limite último potencial no cálculo da carga crítica de projeto de algumas destas estruturas e, portanto, motivou sua avaliação segundo a normatização vigente.

Escolheu-se fazer dimensionamento de cantoneiras de aço carbono, adaptando-o para as propriedades mecânicas do aço inoxidável, prática comumente utilizada. A escolha deste tipo de seção dá-se devido a sua baixa rigidez a torção, razão esta que agravará o problema da flambagem flexo-torsional para seu estado limite último.

Apesar de o aço carbono ser altamente utilizado na indústria da construção civil mundial, ter devasta aceitação pela arquitetura e pela engenharia e ser economicamente viável para as construções atuais, sua aplicabilidade limita-se a fabricação das peças para montagem da construção, qualidade de mão-de-obra disponível no mercado e agressividade do meio onde os elementos estruturais serão expostos. De modo a mitigar os problemas estruturais causados pelo meio de exposição da estrutura, pode-se revestir as barras desprotegidas com produtos químicos resistentes ou construí-la com o aço inoxidável.

Porém, o comportamento mecânico do aço inoxidável ainda é algo estudado por universidades, fabricantes e entidades de normatização. Sendo este não compreendido plenamente pela engenharia estrutural e, por consequência, sua resistência minorada de forma conservadora, as estruturas feitas com este tipo de aço tornam-se infrequentes.

As propriedades mecânicas do aço carbono são bem conceituadas e compreendidas, ou seja: módulo de elasticidade longitudinal, módulo de elasticidade transversal, coeficiente de Poisson, alongamento máximo, limite de escoamento e limite de ruptura, sendo que estas duas últimas apenas limitam a resistência do aço as solicitações presentes na peça analisada. Vale também ressaltar que o aço carbono é um material isotrópico, isto é, seu comportamento

mecânico é assumido como igual em todas as direções. De modo a simplificar as grandes diferenças entre estes dois materiais em questão, pode-se dizer que a anisotropia, as quatro curvas de tensão versus deformação não-lineares são os principais fatores de adaptação para a formulação mecânica do aço inoxidável.

1.1 Colunas

Colunas, por não apresentarem nenhuma flexão, não são normalmente encontradas. Entretanto, para o conhecimento do comportamento estrutural de uma peça comprimida, o desenvolvimento das formulações mecânicas destas é extremamente importante. Para colunas de pequeno comprimento, a solicitação máxima alcança a tensão de escoamento do material utilizado. Contudo, a partir de certo valor de esbeltez, a carga crítica de ruptura passa a ser controlada pela flambagem global ou local da peça em questão, ocasionando um problema de instabilidade da estrutura.

Para não fugir de escopo, o presente estudo não abordará os problemas de instabilidade causados pela flambagem local. Isto é, todas as peças em estudo sofrerão instabilidades globais para que a flambagem torsional seja analisada.

Devido à facilidade de ligação com diversos elementos estruturais, cantoneiras são frequentemente utilizadas na construção civil em treliças, vigas de alma vazada, torres de telecomunicações, elementos de contraventamento e colunas compostas, o seu comportamento estrutural será, prioritariamente, abordado.

Em grande maioria das vezes, a ligação feita nestas é dada em uma de suas abas, introduzindo uma excentricidade da força de aplicação com relação ao centroide da seção. Entretanto, o momento fletor produzido pela excentricidade é normalmente desprezado em termos de projeto, fato respaldado pela grande rigidez a flexão das ligações usualmente adotadas. Em uma filosofia de projeto conservadora, este momento fletor deve ser computado para o dimensionamento, porém, devido à assimetria da seção, a determinação da carga crítica de compressão por causa do carregamento excêntrico é complexa (GALAMBOS, 1998).

Estudos desenvolvidos mostram que o dimensionamento proposto por normas internacionalmente pode subestimar significativamente a capacidade de carga das cantoneiras, devido ao método de cálculo e simplificação das condições de apoio. Ishida (1969 apud GALAMBOS, 1998), Usami e Fukumoto (1972 apud GALAMBOS, 1998) e Elgaaly (1992 apud GALAMBOS, 1998) também apresentam estudos que os efeitos exercidos pelas tensões residuais nestas peças são desprezíveis a nível de projeto (GALAMBOS, 1998).

1.2 Flambagem flexo-torsional

O cálculo da carga crítica de flambagem proposto por Euler é usado até hoje por engenheiros do mundo inteiro. Nele, apenas a rigidez à flexão é considerada. Entretanto, algumas seções de espessuras finas como cantoneiras e perfis com seção T, Z e U, por possuírem baixas rizezas à torção, são sujeitas à flambagem torsional. O presente trabalho é baseado na solução desenvolvida por Timoshenko e Gere (1961 apud SALMON; JOHNSON, 2009) e por Bleich (apud SALMON; JOHNSON, 2009). Para o cálculo do estado limite último em seções duplamente simétricas, o menor valor extraído das três fórmulas abaixo define a carga crítica de flambagem:

$$F_{ex} = \frac{\pi^2 E}{\left(K_x L / r_x\right)^2} \quad (1)$$

$$F_{ey} = \frac{\pi^2 E}{\left(K_y L / r_y\right)^2} \quad (2)$$

$$F_{ez} = \frac{\pi^2 E C_w}{I_p (K_z L)^2} + \frac{GJ}{I_p} \quad (3)$$

Onde:

F_x, F_y, F_z = tensões últimas de flambagem por flexão, eixos x e y, e torsional;

E = módulo de elasticidade à tração e à compressão do aço;

G = módulo de elasticidade transversal do aço;

C_w = constante de empenamento;

J = momento polar de inércia em relação ao centroide da seção;

I_p = momento polar de inércia em relação ao centro de cisalhamento;

K_x, K_y, K_z = coeficientes de flambagem por flexão, eixos x, y e torsional;

r_x = raio de giração da seção no eixo x; e

r_y = raio de giração da seção no eixo y.

Para seções com uma ou nenhuma simetria, o cálculo da carga crítica deve ser feito levando a influência da flexão gerada devido à excentricidade entre o centroide e o centro de cisalhamento da seção. Desta forma, a menor das raízes da seguinte fórmula indica qual deverá ser a carga crítica:

$$(P_x - P)(P_y - P)(P_z - P) - \frac{P^2}{r_o^2} [(P_x - P)u_o^2 + (P_y - P)v_o^2] = 0 \quad (4)$$

Onde:

P_x, P_y, P_z = cargas críticas de flambagem por flexão, eixos x,y e torsional;

r_o = raio de giração polar em relação ao centro de cisalhamento;

u_o = distância entre o centroide e o centro de cisalhamento no eixo principal de inércia u ; e

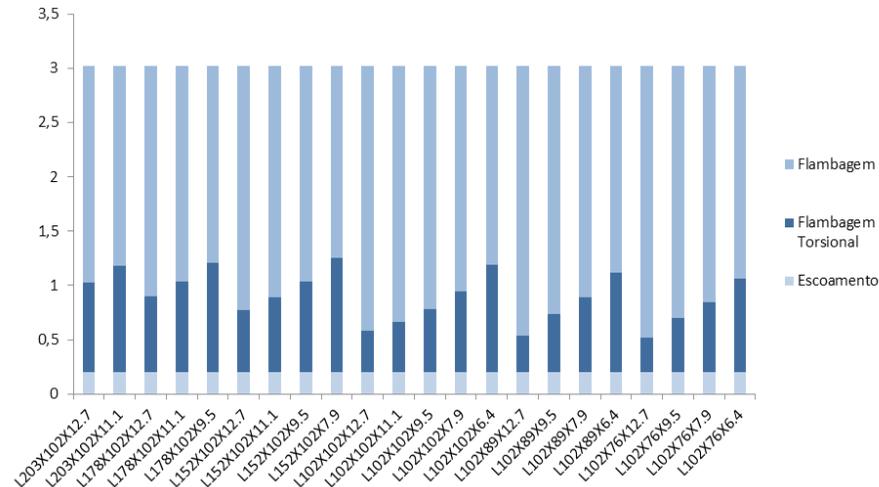
v_o = distância entre o centroide e o centro de cisalhamento no eixo principal de inércia v .

Para cantoneiras, por apresentarem baixa rigidez ao empenamento, a constante de empenamento, C_w , pode ser considerada nula, fazendo com que a primeira parcela da fórmula (3) seja desprezada. Esta consideração é correntemente utilizada em estudos sobre cantoneiras feitos mundo afora. A propriedade mecânica que define a classificação de uma coluna como curta, de esbeltez intermediária ou esbelta; é o índice de esbeltez normalizado, dado por:

$$\bar{\lambda} = \frac{K L}{\pi r_{\min}} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (5)$$

A figura 1 mostra os comprimentos em que a plastificação, escoamento, a flambagem flexo-torsional e a flambagem no menor eixo de inércia controlam o dimensionamento de uma cantoneira de abas iguais e desiguais com diferentes espessuras respectivamente. A partir desta figura, pode-se concluir que quanto maior for a espessura da cantoneira e por consequência maior sua rigidez a torção, menor será a possibilidade da flambagem flexo-torsional ocorrer.

Figura 1: Faixas de trabalho de carga crítica de projeto de cantoneiras



Fonte: Os autores.

Tensão de escoamento e Módulo de Elasticidade iguais a 450 MPa e 200 GPa, respectivamente.

Na tabela apresentada na figura acima, o comportamento de cada coluna é definido pelo seguinte critério: a partir da esbelteza normalizada igual a 0,20, ocorre flambagem torsional ou por flexão (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION, 2006). Caso o valor da resistência a flambagem torsional pura, obtido pela fórmula (3), seja menor que o da flambagem por flexão, assumiu-se que a coluna apresenta a flambagem torsional. Caso contrário, a coluna apresenta a flambagem por flexão no eixo de menor inércia.

2 MODELO NUMÉRICO PARA A ANÁLISE DA FLAMBAGEM FLEXO-TORSIONAL

Para este estudo foi feita uma análise através do método dos elementos finitos por meio do programa ANSYS (2003). Para isto, as seguintes considerações iniciais foram tomadas:

- para possibilitar uma experimentação em laboratório, foi adotado o engaste como condição de apoio em ambas as extremidades da coluna;
- de acordo com o que a norma brasileira NBR 8800:2007 preconiza, os módulos de elasticidade longitudinal e transversal do aço foram tomados com valor de 200 GPa e 77GPa, respectivamente, para a análise do aço A572 Grau 65 e para a análise de autovalores e autovetores no modelo numérico do aço inox;
- para os cálculos de classificação de esbelteza e resistência teórica das colunas de aço inox, foram adotados valores para o módulo de elasticidade e a tensão de escoamento de 191,2 GPa e 544 MPa, respectivamente (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION, 2006);

- d) o carregamento imposto nas colunas analisadas foi introduzido no centroide da seção de extremidade do topo da coluna.
- e) foram levadas em consideração a não-linearidade física e geométrica, de modo a representar as curvas características tensão x deformação do aço analisado e as imperfeições geométricas de uma coluna real; e
- f) mesmo o aço inoxidável sendo um material anisotrópico, para este presente estudo, este aço foi considerado como um material isotrópico.

2.1 Colunas em estudo

Foram utilizadas cantoneiras com seção de compactidade tal que não apresentassem instabilidades locais em suas abas. Tanto a norma brasileira, como o AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION (2005) e o Eurocode 3 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION, 2003), estabelecem a seguinte relação de esbeltez limite para as abas de cantoneiras compactas feitas de aço carbono:

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 0,45 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (6)$$

Entretanto, a norma europeia estabelece outra relação para as cantoneiras de aço inoxidável dada pela fórmula a seguir:

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 11,9 \sqrt{\frac{235E}{210000f_y}} \quad (7)$$

A escolha do aço carbono utilizado para a análise foi estabelecida com base na tensão de escoamento do aço inoxidável. Como não existe no mercado um aço carbono laminado com tensão de escoamento próxima de 544 MPa, foi escolhido o aço A572 Grau 65, com tensão de escoamento de 450 MPa. As tabelas 2 e 3 mostram as propriedades geométricas e físicas das cantoneiras utilizadas neste estudo.

Tabela 2: Tabela de propriedade das cantoneiras com Aço A572 Grau 65

Perfil	b (mm)	d (mm)	t (mm)	f_y (MPa)	E (GPa)	$(b/t)_{m\acute{a}x}$	$(b/t)_{lim}$
L152x152x19	152	152	19,1	450	200	7,958	9,487
L152x102x19	152	102	19,1	450	200	7,958	9,487
L102x102x12.7	102	102	12,7	450	200	8,031	9,487
L102x76x12.7	102	76,2	12,7	450	200	8,031	9,487
L76x76x9.5	76,2	76,2	9,5	450	200	7,996	9,487
L76x64x9.5	76,2	63,5	9,5	450	200	7,996	9,487

Fonte: Os autores.

Tabela 3: Tabela de propriedade das cantoneiras com Aço Inox Duplex

Perfil	b (mm)	d (mm)	t (mm)	f_y (MPa)	E (GPa)	$(b/t)_{\text{máx}}$	$(b/t)_{\text{lim}}$
L152x152x19	152	152	19,1	544	191,2	7,958	8,287
L152x102x19	152	102	19,1	544	191,2	7,958	8,287
L102x102x12.7	102	102	12,7	544	191,2	8,031	8,287
L102x76x12.7	102	76,2	12,7	544	191,2	8,031	8,287
L76x76x9.5	76,2	76,2	9,5	544	191,2	7,996	8,287
L76x64x9.5	76,2	63,5	9,5	544	191,2	7,996	8,287

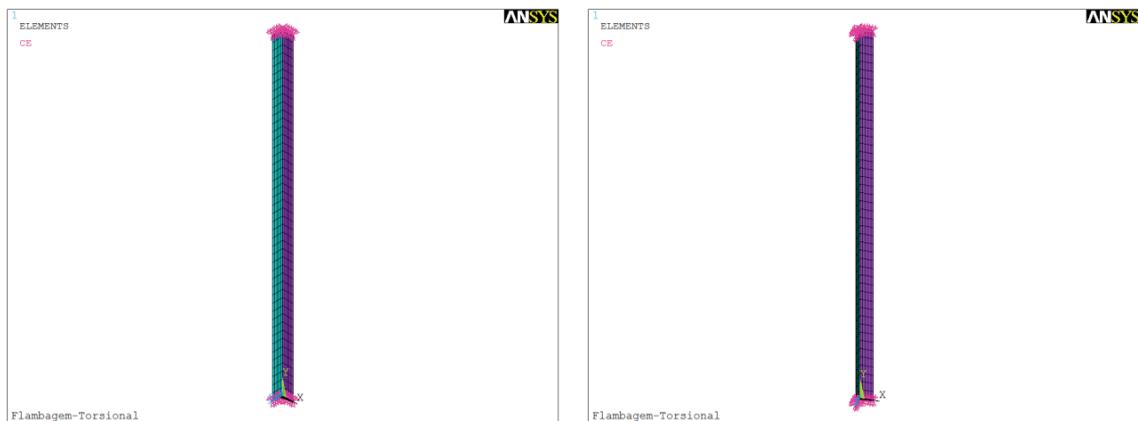
Fonte: Os autores.

Cada cantoneira foi representada por um número de colunas com comprimento variando de 750 mm ao valor de comprimento máximo permitido pela norma brasileira, dado em função da esbeltez limite de 200, com intervalo de 250 mm.

2.2 Elemento finito e malha utilizada no modelo computacional

O modelo foi constituído de elementos de casca com quatro nós tendo seis graus de liberdade por nó, sendo, translação e rotação nos eixos X, Y e Z. A construção de malha que representou melhor a análise é mostrada na figura 2. Nela, cada aba da cantoneira é dividida em cinco partes iguais e longitudinalmente a malha é dividida em trechos de comprimento aproximado de 50 mm. O número de nós dos modelos numéricos variam de 178 a 2653 e de elementos de 1522 a 1402.

Figura 2: Configuração da malha adotada (Coluna de 2250 mm de comprimento L76.2x76.2x6.4)



Fonte: Os autores.

2.3 Análise do problema

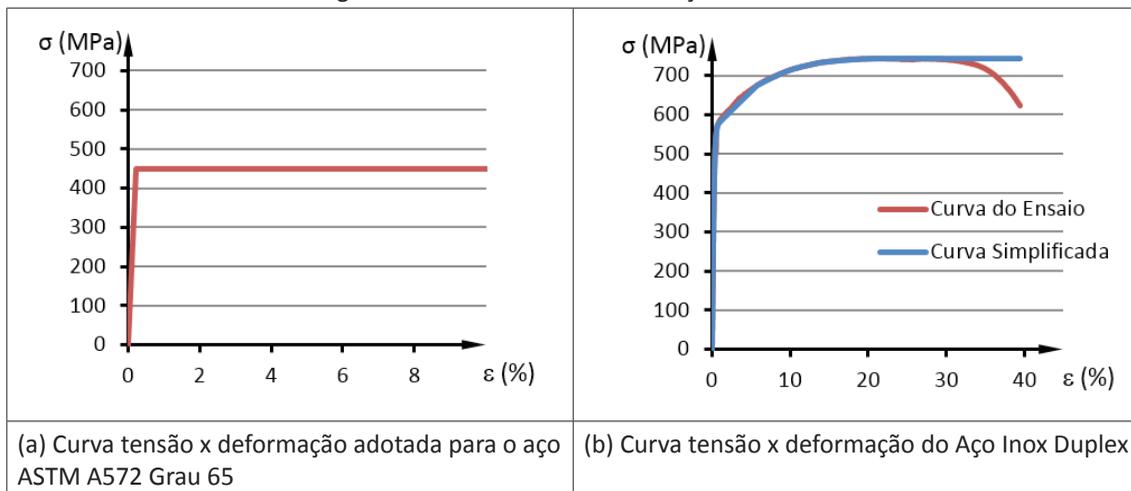
De início, o problema foi resolvido com a solução de autovalores e autovetores onde, a carga de flambagem extraída do programa ANSYS foi comparada à carga de flambagem de Euler. Como a diferença entre estas foi menor do que 10%, admitiu-se a confiabilidade no

resultado e partiu-se para a próxima etapa que consiste em uma análise não-linear, tanto física quanto geométrica.

Para a análise não-linear, tomou-se o resultado gerado da análise linear como a configuração imperfeita inicial da coluna, com valores de deslocamentos máximos limitados pela relação $L/1000$ preconizada pela NBR8800:2007. Neste ponto aplicou-se um deslocamento na extremidade de topo dividido a cada de $1/25$ mm.

A não linearidade física foi representada pela curva tensão x deformação elasto-plástica perfeita para o aço carbono ASTM A572 Grau 65 e uma curva simplificada extraída de ensaio feito para o aço inoxidável Duplex, figura 8.

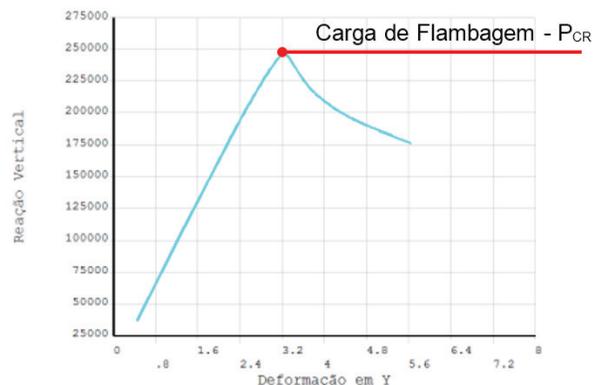
Figura 3: Curvas tensão x deformação adotadas



Fonte: (AFSHAN; ROSSI; GARDNER, 2013).

A carga de flambagem considerada no estudo foi a maior reação vertical da base da coluna gerada pelo deslocamento exercido na extremidade de topo, como pode ser visto no exemplo mostrado na figura 4.

Figura 4: Gráfico da carga de flambagem de uma cantoneira L76,2x76,2x6,4

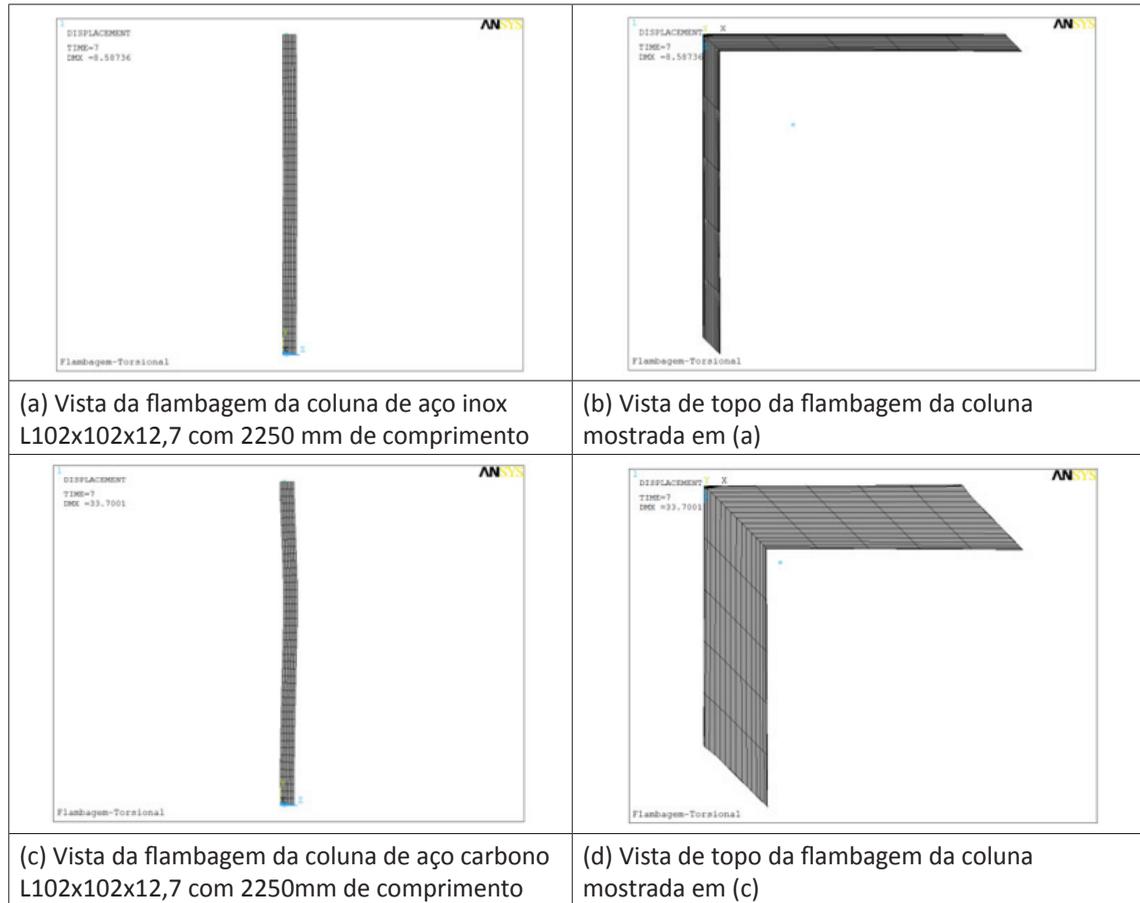


Fonte: Os autores.

3 RESULTADOS OBTIDOS

Para a análise do tipo de modo de flambagem, foi feita uma análise não-linear com intuito de observar o tipo de deformação exercido na seção do meio do vão. Caso a seção não apresentasse nenhuma rotação em seu plano, a coluna foi considerada como deformada no menor eixo de inércia, como pode ser visto na Figura 5.

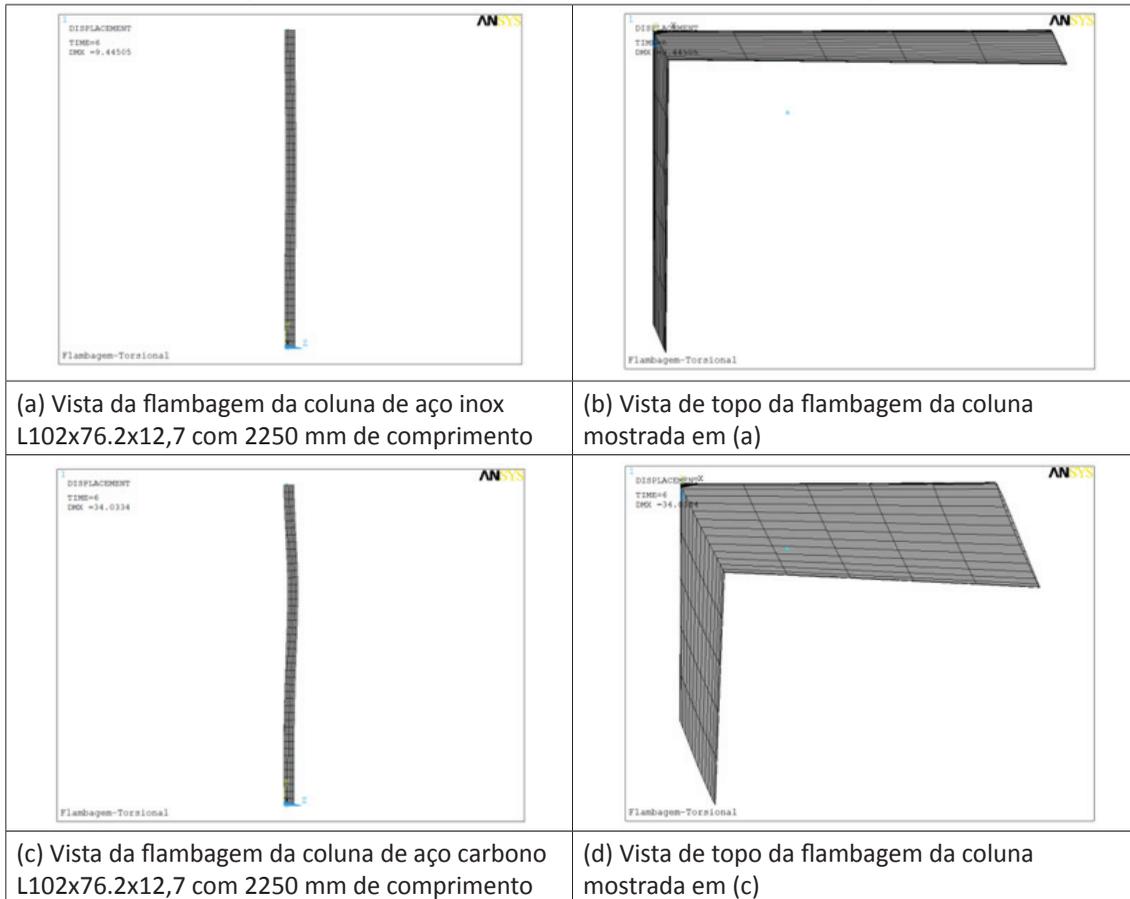
Figura 5: Modos de flambagem de cantoneiras de abas iguais



Fonte: Os autores.

Este comportamento é claro em cantoneiras de abas iguais, onde foi possível observar que nenhuma cantoneira deste tipo apresentou o fenômeno da flambagem flexo-torsional, o que contraria o resultado apresentado na figura 1. Entretanto, em cantoneiras de abas desiguais, este comportamento não é claro, pois os modos de flambagem acontecem concomitantemente, como mostrado na figura 6.

Figura 6: Modos de flambagem de cantoneiras de abas desiguais



Fonte: Os autores.

No presente estudo, a resistência das colunas de aço inox foi comparada à do aço carbono através dos resultados obtidos em modelos numéricos do método dos elementos finitos. Para o desenvolvimento desta comparação, foram construídos gráficos relacionando as cargas resistentes das colunas de aço ASTM A572 Grau 65 estudadas com sua respectiva esbeltez normalizada. Também foram mostradas as curvas de resistência teórica, avaliadas a partir das fórmulas 1 a 4, figura 7 e tabela 4. Nesta figura as curvas em azul referem-se a colunas feitas com cantoneiras nela descritas e as em vermelho referem-se as suas respectivas cargas críticas teóricas.

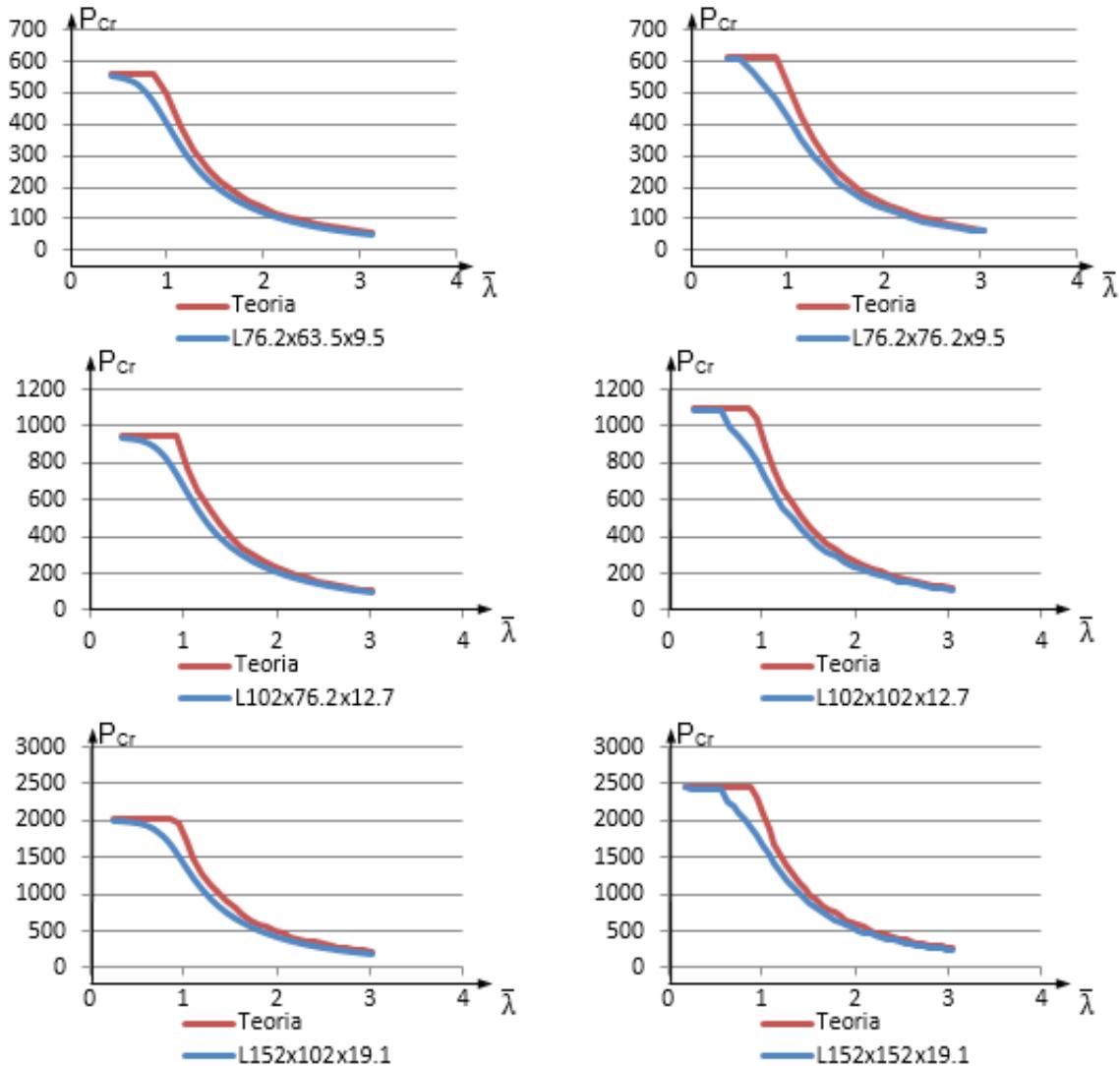
Tabela 4: Tabela com resumo de tendências da figura 7

		Aço ASTM A572 Grau 65				
		Δ_{\min}	Δ_{\max}	$\Delta_{\text{méd}}$	$\lambda_{\Delta\min}$	$\lambda_{\Delta\max}$
L76.2x63.5x9.5	[kN]	-5,6	-92,8	-26,1	0,426	0,993
	$[\Delta\sigma/\sigma_y]$	-0,01	-0,17	-0,05		
L76.2x76.2x9.5	[kN]	-4,1	-132,5	-32,8	0,380	0,887
	$[\Delta\sigma/\sigma_y]$	-0,01	-0,22	-0,05		
L102x76.2x12.7	[kN]	-7,2	-204,1	-48,3	0,350	0,932
	$[\Delta\sigma/\sigma_y]$	-0,01	-0,22	-0,05		
L102x102x12.7	[kN]	-5,4	-235,1	-56,9	0,285	0,948
	$[\Delta\sigma/\sigma_y]$	0,00	-0,22	-0,05		
L152x102x19.1	[kN]	-9,6	-440,2	-105,8	0,259	0,948
	$[\Delta\sigma/\sigma_y]$	0,00	-0,22	-0,05		
L152x152x19.1	[kN]	-4,9	-537,2	-126,0	0,191	0,890
	$[\Delta\sigma/\sigma_y]$	0,00	-0,22	-0,05		

Fonte: Os autores.

Nesta tabela de tendências, assumiu-se que o valor de variação mínima, Δ_{\min} , é igual a menor diferença entre a carga resistente da coluna no modelo e a sua respectiva resistência teórica ou o maior ganho de resistência em relação à Plastificação da seção; a variação máxima, Δ_{\max} , é igual a maior diferença entre a carga resistente da coluna no modelo e sua respectiva resistência teórica; a variação média, $\Delta_{\text{méd}}$, é igual à média aritmética de todas as diferenças entre as resistências obtidas no modelo e as suas respectivas resistências teóricas.

Figura 7: Resistência das colunas de aço carbono ASTM A572 Grau 65



Fonte: Os autores.

De modo a se obter a comparação com as diferentes tensões de escoamento dos aços em estudo, foi feita uma análise linear, majorando-se as cargas críticas obtidas nos resultados da figura 7 com a respectiva tensão de escoamento do aço inox para cada tipo de coluna. A tabela 5 e a figura 8 mostram as cargas críticas de flambagem para o Aço Inox Duplex, feito com os mesmos critérios da figura 7.

Tabela 5: Tabela com resumo de tendências da figura 8

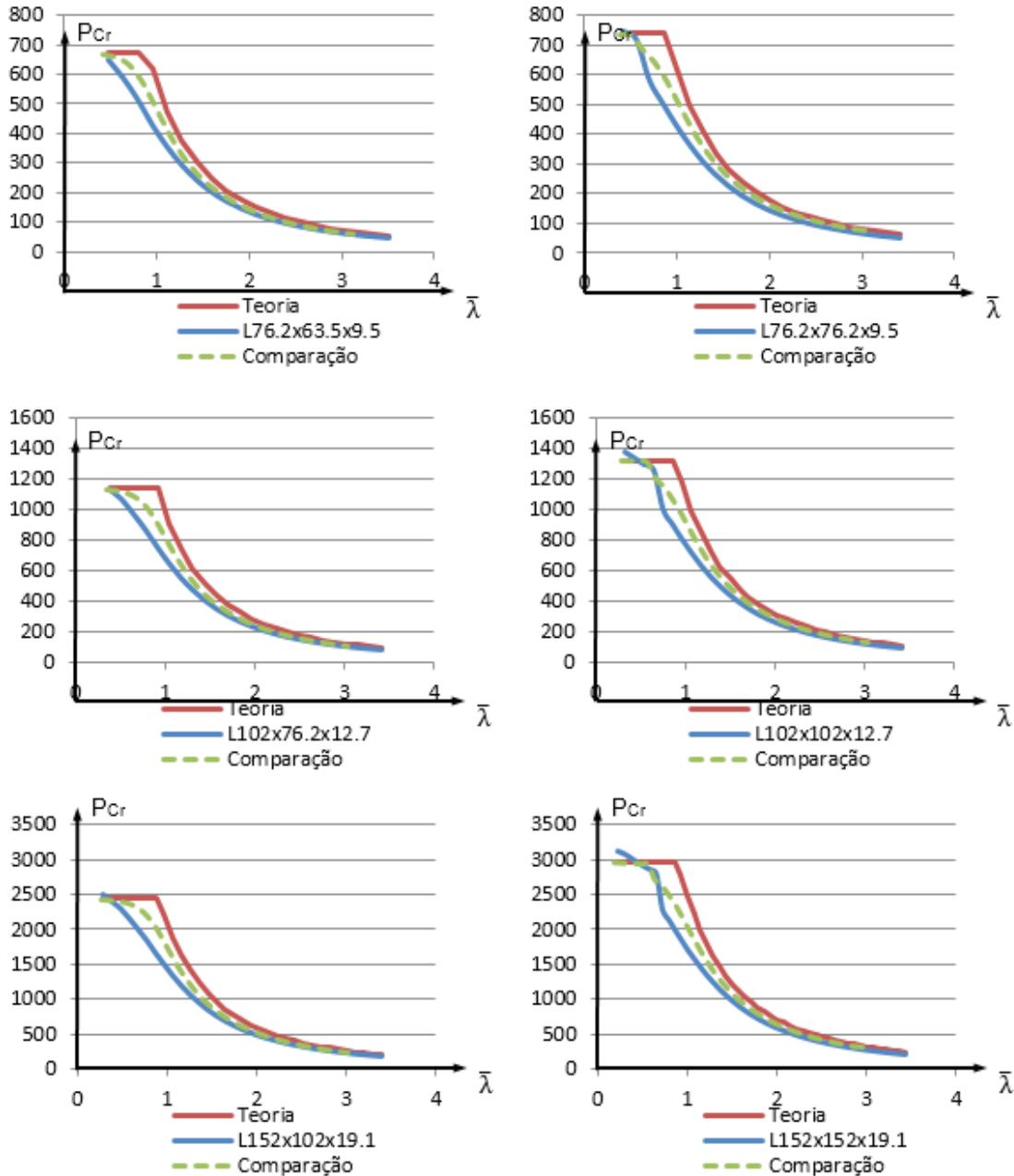
		Aço Inox Duplex				
		Δ_{\min}	Δ_{\max}	$\Delta_{\text{méd}}$	$\lambda_{\Delta\min}$	$\lambda_{\Delta\max}$
L76.2x63.5x9.5	[kN]	-7,6	-186,8	-48,3	3,511	0,957
	$[\Delta\sigma/\sigma_y]$	-0,01	-0,28	-0,07		
L76.2x76.2x9.5	[kN]	9,1	-232,9	-54,3	0,427	0,855
	$[\Delta\sigma/\sigma_y]$	0,01	-0,32	-0,07		
L102x76.2x12.7	[kN]	-7,4	-378,6	-88,9	0,393	0,917
	$[\Delta\sigma/\sigma_y]$	-0,01	-0,33	-0,08		
L102x102x12.7	[kN]	51,8	-421,8	-93,0	0,320	0,853
	$[\Delta\sigma/\sigma_y]$	0,04	-0,32	-0,07		
L152x102x19.1	[kN]	48,9	-781,1	-197,4	0,291	0,872
	$[\Delta\sigma/\sigma_y]$	0,02	-0,32	-0,08		
L152x152x19.1	[kN]	152,9	-976,9	-208,9	0,214	0,858
	$[\Delta\sigma/\sigma_y]$	0,05	-0,33	-0,07		

Fonte: Os autores.

As mesmas considerações feitas para a tabela 4 são válidas para esta tabela.

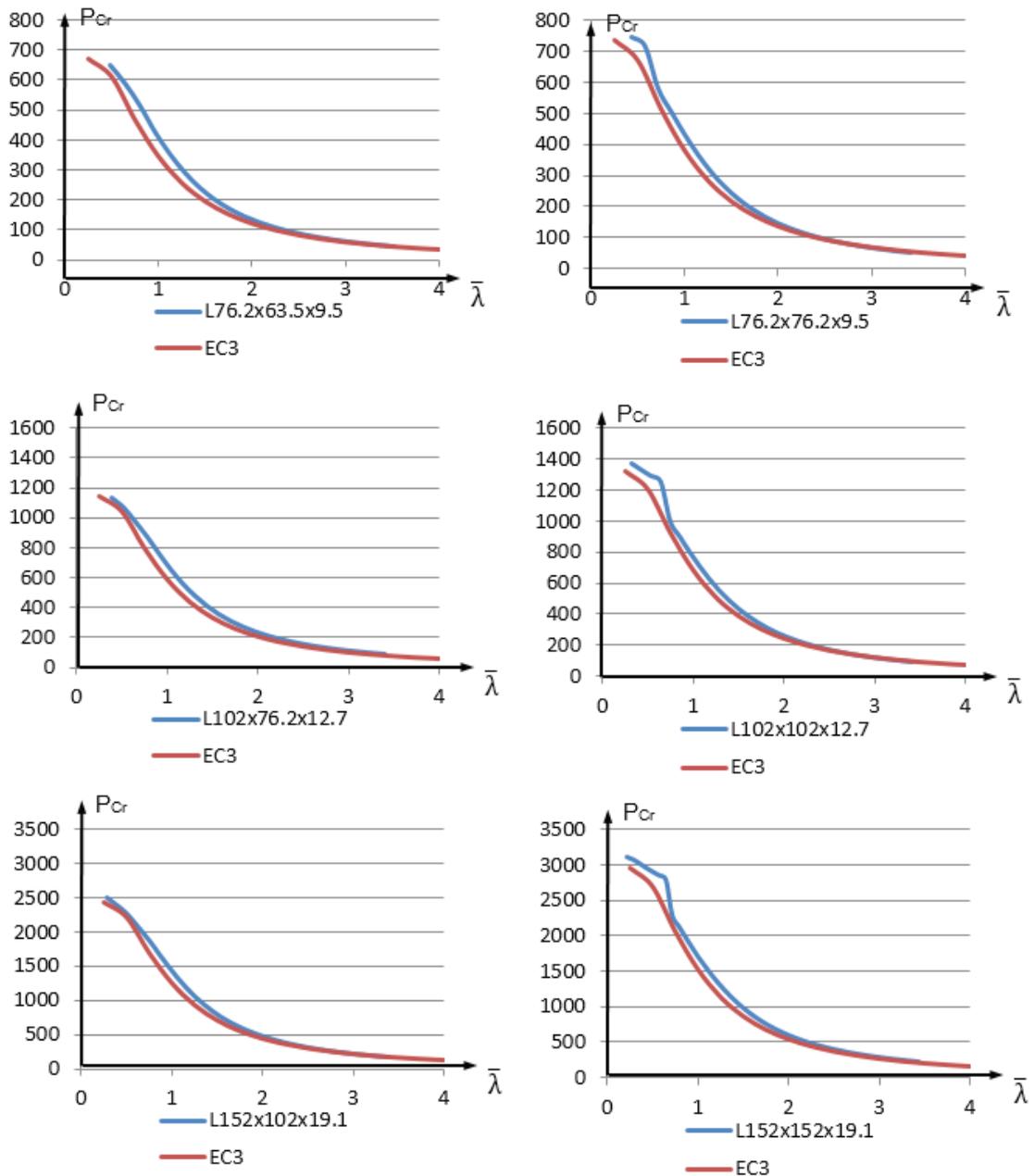
A partir da comparação feita, deduziu-se que as colunas de aço inox duplex são menos resistentes à flambagem do que as de aço carbono. Esta redução de resistência demonstra maior vulnerabilidade de colunas de aço inox, com baixa rigidez à torção, às imperfeições iniciais. Também se notou que colunas com pequena esbeltez apresentaram resistência maior do que a produzida pela tensão de escoamento adotada para o aço inox em estudo. O Eurocode 3 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION, 2006) preconiza uma curva de carga crítica de flambagem para dimensionamento de colunas de aço inoxidável. No presente estudo foi verificado se o resultado obtido na análise não linear era contra ou à favor da segurança deste dimensionamento, a figura 9 mostra a comparação entre as curvas.

Figura 8: Resistência das colunas de Aço Inox Duplex



Fonte: Os autores.

Figura 9: Comparação entre o dimensionamento preconizado no EC3 e o obtido



Fonte: Os autores.

De acordo com a figura 9, o dimensionamento preconizado pelo Eurocode 3 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION, 2006) é ligeiramente conservador em colunas de esbelteza intermediária e preciso no dimensionamento de colunas esbeltas. Este resultado pode ter sido gerado pela consideração de outras imperfeições, como por exemplo: excentricidade na aplicação do carregamento, imperfeição da seção transversal da coluna, tensões residuais, entre outros.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização do aço inoxidável vem sendo cada vez mais requerida e necessária na construção civil. Entretanto, as normas de projeto de aço inoxidável atuais são, em grande parte, baseadas em analogias assumidas com o comportamento de estruturas de aço carbono.

Devido à necessidade de pesquisas voltadas ao dimensionamento de elementos comprimidos, com pequena rigidez à torção, feitos de aço inoxidável, este presente estudo analisou a resistência destes, a partir de um modelo numérico utilizando o método dos elementos finitos.

Neste estudo o fenômeno da flambagem flexo-torsional foi analisado com colunas imperfeitas, feitas de cantoneiras, com aço ASTM A572 Grau 65 e aço inox Duplex. No modelo, o aço inoxidável foi considerado como um material isotrópico com curva tensão x deformação fornecida em ensaio (AFSHAN; ROSSI; GARDNER, 2013). A única imperfeição contemplada no estudo foi a imperfeição geométrica inicial da coluna, adotada, à favor da segurança, como a gerada no resultado de autovalores e autovetores do modelo numérico. De modo a possibilitar uma experimentação em laboratório, o engaste foi adotado como condição de contorno em ambas as extremidades das colunas analisadas.

No presente trabalho, pode-se aferir que os elementos estruturais de aço inoxidável tendem a funcionar a uma tensão de trabalho reduzida menor do que a sua correspondente para o aço carbono. Entretanto, a norma europeia específica para o projeto de estruturas em aço inox, Eurocode 3 (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION, 2006), é mais conservadora e determina um processo de dimensionamento seguro e, ao mesmo tempo, econômico.

REFERÊNCIAS

AFSHAN, S.; ROSSI, B.; GARDNER, L. Strength enhancements in cold-formed structural sections: part I: material testing. **Journal of Constructional Steel Research**, London, v. 83, p. 177-188, 2013.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **Steel construction manual**. 13. ed. Chicago, 2005.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **Steel construction manual shapes database**. Chicago, 2013. Disponível em: <<http://www.aisc.org/content.aspx?id=2868>>. Acesso em: 5 mar. 2014.

ANSYS. **User manual reference**. Pittsburgh, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

BRITISH STAINLESS STEEL ASSOCIATION. **Typical stress-strain curves for stainless steel and carbon steel**. Sheffield, 2014. Disponível em: <<http://www.bssa.org.uk/cms/Image/Comparison%20of%20structural%20design%20in%20stainless%20steel%20and%20carbon%20steel.gif>>. Acesso em 5 mar 2014.

CHEN, W. F.; LIEW, J. Y. R. **Civil engineering handbook**. 2. ed. London: CRC Press, 2002.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION. **Eurocode 3**: design of steel structures: part 1.1: general rules and rules for buildings. Brussels, 2003.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION. **Eurocode 3**: design of steel structures: part 1.4: supplementary rules for stainless steels. Brussels, 2006.

EUROPEAN CONVENTION FOR CONSTRUCTION STEELWORK. **European recommendations for steel structures**. Brussels, 1978.

GALAMBOS, T. V. (Ed.). **Guide to stability design criteria for metal structures**. 5. ed. New York: John Wiley and Sons, 1998.

SALMON, C. G.; JOHNSON, J. E. **Steel structures**: design and behavior. 5. ed. New Jersey: Pearson Education, 2009.

Recebido em: 10 dez. 2015.

Aprovado em: 27 dez. 2015.