

ANÁLISE DE PÓS-FLAMBAGEM EM PERFIS ALVEOLARES COM FLANGES TUBULARES CARREGADOS AXIALMENTE

POST-BUCKLING ANALYSIS ON CELLULAR STEEL PROFILE WITH TUBULAR FLANGES AXIALLY LOADED

Leonardo André Rossato ¹
Carlos Humberto Martins ²
Alexandre Rossi ³

Resumo: Este estudo investiga o comportamento estrutural de perfis metálicos alveolares com flanges tubulares sujeitos a carga axial. A análise visa avaliar a capacidade de carga e possíveis instabilidades desses perfis. Utilizando métodos numéricos no *software* ABAQUS, foram examinados 18 perfis com diversas configurações geométricas, considerando também diferentes classes de resistência do aço. Os resultados mostram que o aumento na espessura do perfil resulta em um ganho de capacidade resistente, em média, de 76,6%. Perfis mais esbeltos exibiram instabilidade global, enquanto aqueles com menor esbeltez e em torno do eixo de maior inércia demonstram instabilidades locais. Além disso, o aumento na resistência mecânica do aço contribui para um ganho, em média, de 21% na resistência última do perfil.

Palavras-chaves: Perfis alveolares; Flanges tubulares; Elementos finitos; Não linearidade física; Não linearidade geométrica.

Abstract: This work investigates the structural behavior of cellular metal profiles with tubular flanges axially loaded. The structural analysis aims to assess the load-carrying capacity of these profiles, as well as possible instabilities. Using numerical methods through ABAQUS software, 18 profiles with different geometric configurations were studied. Different strength classes for steel were also considered. The findings show that a thicker profile enhances resistance, on average, by 76,6%. Profiles with higher slenderness exhibit overall instability, whereas those with lower slenderness around the axis of greatest inertia show local instabilities. Furthermore, increasing the mechanical steel strength contributes to 21% gain, on average, in the profile's ultimate strength.

Keywords: Cellular profiles; Tubular flanges; Finite elements; Physical nonlinearity; Geometric nonlinearity.

¹Universidade Estadual de Maringá, Campus Maringá – Brasil, e-mail : leo.fentao27@gmail.com

²Universidade Estadual de Maringá, Campus Maringá, e-mail : chmartins@uem.br

³Universidade Federal de Uberlândia, Campus Uberlândia, e-mail : alexandre-rossi@hotmail.com

1 Introdução

O presente estudo realiza uma análise estrutural de perfis de aço alveolares e flanges tubulares por meio de elementos finitos. Sob uma perspectiva de sustentabilidade, perfis alveolares reduzem a quantidade de material devido a melhor razão resistência-peso e possibilitam ambientes arquitetonicamente distintos (**Figura 1**). Do ponto de vista mecânico, as aberturas proporcionam uma expansão do perfil e consequentemente um ganho maior de inércia.



Figura 1. Aspecto arquitetônico de um perfil alveolar com flanges tubulares

A pesquisa possui natureza exploratória, com a finalidade de compreender o comportamento desses perfis submetidos a cargas de compressão axial. Foram realizadas análises em 18 perfis com geometrias distintas variando-se a espessura dos tubos e da alma, diâmetro dos tubos e comprimento do perfil. Foram consideradas ainda diferentes classes de resistência para os materiais (aço S355 e S460). Para a realização das análises foi utilizado o pacote comercial ABAQUS, versão 6.14 (ABAQUS, 2014).

Os resultados mostraram que um aumento na espessura do perfil resulta em um ganho de capacidade de carga, em média, de 76,6%, também foi possível observar os modos de falha nos perfis. Um aumento na resistência mecânica do aço promoveu um aumento de 21%, em média, na capacidade última do perfil.

2 Desenvolvimento

Para a realização da análise de flambagem, foi utilizada a análise de perturbação linear *buckle* presente na biblioteca do *software*. Por meio deste tipo de análise é realizada a determinação de autovalores e autovetores que correspondem à carga crítica de flambagem e à configuração deformada da estrutura, respectivamente. Esse tipo de análise é usualmente empregada para a estimativa de cargas críticas de flambagem (ponto de bifurcação do equilíbrio) de estruturas rígidas e, portanto, é perfeitamente adequada aos objetivos do presente trabalho. Já para a análise de pós-flambagem foi utilizada a análise estática, por meio do procedimento iterativo do método de Riks. Nessa etapa foram incluídas as imperfeições iniciais no modelo, bem como foram consideradas as não linearidades: física (comportamento de plasticidade) e geométrica (efeitos de segunda ordem). Todas as simulações foram realizadas com o uso de computador com as especificações descritas a seguir:

- 1 computador Intel Core i7 2.5 GHz e memória RAM de 16 GB, com 12 processadores lógicos;
- Processamento em nuvem, por meio de *Amazon Web Services* (AWS), instância com processadores AMD EPYC de 2ª geração de até 3,3 GHz, memória RAM de 128 GiB e 64 processadores lógicos.

2.1 Modelo Numérico

A etapa inicial envolve a modelagem geométrica do elemento para representar com precisão o problema físico em análise. Neste estudo, optou-se por elementos sólidos hexaédricos lineares de oito nós com integração reduzida (C3D8R), pois poderiam reduzir o tempo de processamento e suportar grandes deformações, conforme mencionado por Ferreira et al. (2020). A **Figura 2** apresenta a malha de elementos para modelo desenvolvido, a seção do perfil foi criada sem considerar o filete de solda.

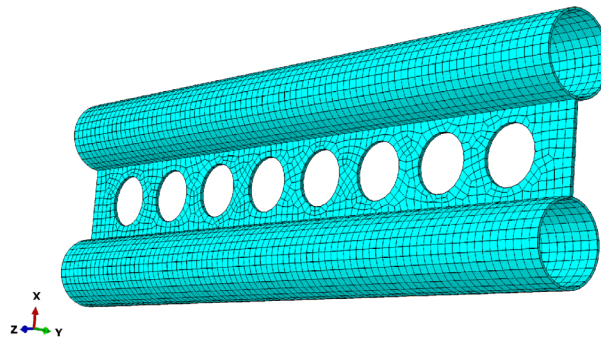


Figura 2. Malha de elementos

Para as condições de contorno, todos os graus de liberdade foram restringidos, exceto o deslocamento vertical e a rotação em torno do eixo considerado. Este tipo de restrição é comum em ensaios de compressão axial, particularmente quando se estuda o comportamento de pilares suscetíveis à instabilidade global (JI et al., 2018; LI et al., 2022; PANEDPOJAMAN et al., 2021). Utilizando as opções de interação e restrição disponíveis no programa para modelar a interação entre o perfil de aço e as condições de contorno aplicadas, a ferramenta de acoplamento foi empregada. Esta ferramenta une a superfície da seção a um ponto de aplicação. A introdução das imperfeições geométricas foi realizada utilizando-se o comando *imperfeição*, com amplitude igual a $L/500$, esta técnica de amplificação de valores de imperfeição geométrica para considerar indiretamente tensões residuais também foi utilizada por Nseir et al. (2012), Panedpojaman et al. (2016) e Panedpojaman et al. (2021). As aberturas são definidas de maneira a proporcionar uma expansão de 230% dos perfis. As seções transversais menores foram consideradas visando um potencial estudo experimental. As dimensões são projetadas de acordo com os catálogos de fabricantes. No total, 144 simulações numéricas foram realizadas em modelos (**Figura 3**) com as características mencionadas na **Tabela 1**.

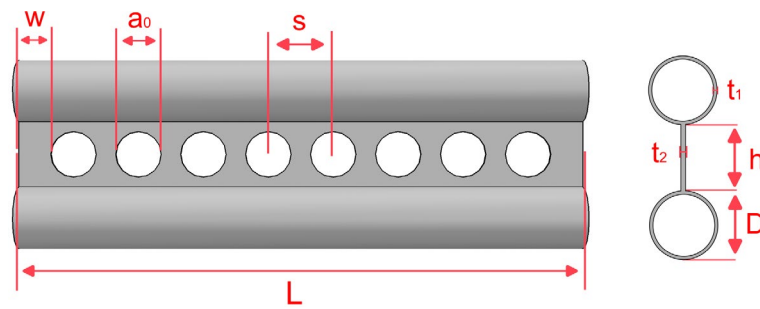


Figura 3. Dimensões do modelo

Tabela 1 - Dimensões dos modelos

ID	$D, h, t_1 \text{ e } t_2$ (mm)	$w, a_0 \text{ e } s$ (mm)	L (mm)
D1-T1-L1	76,2 x 76 x 1,5 x 3,2	45,6 x 53,2 x 76	676,4
D2-T1-L1	152,4 x 150 x 1,5 x 4,8	120,7 x 105 x 165	676,4
D3-T1-L1	203,2 x 200 x 1,5 x 6,4	168,2 x 140 x 200	676,4
D1-T2-L1	76,2 x 76 x 4,75 x 3,2	45,6 x 53,2 x 76	676,4
D2-T2-L1	152,4 x 150 x 4,75 x 4,8	120,7 x 105 x 165	676,4
D3-T2-L1	203,2 x 200 x 4,75 x 6,4	168,2 x 140 x 200	676,4
D1-T1-L2	76,2 x 76 x 1,5 x 3,2	74,9 x 53,2 x 76	1335,0
D2-T1-L2	152,4 x 150 x 1,5 x 4,8	113,2 x 105 x 165	1335,0
D3-T1-L2	203,2 x 200 x 1,5 x 6,4	167,4 x 140 x 200	1335,0
D1-T2-L2	76,2 x 76 x 4,75 x 3,2	74,9 x 53,2 x 76	1335,0
D2-T2-L2	152,4 x 150 x 4,75 x 4,8	113,2 x 105 x 165	1335,0
D3-T2-L2	203,2 x 200 x 4,75 x 6,4	167,4 x 140 x 200	1335,0
D1-T1-L3	76,2 x 76 x 1,5 x 3,2	65,9 x 53,2 x 76	1780,0
D2-T1-L3	152,4 x 150 x 1,5 x 4,8	95 x 105 x 165	1780,0
D3-T1-L3	203,2 x 200 x 1,5 x 6,4	120 x 140 x 200	1780,0
D1-T2-L3	76,2 x 76 x 4,75 x 3,2	65,9 x 53,2 x 76	1780,0
D2-T2-L3	152,4 x 150 x 4,75 x 4,8	95 x 105 x 165	1780,0
D3-T2-L3	203,2 x 200 x 4,75 x 6,4	120 x 140 x 200	1780,0

2.2 Modelo Constitutivo

A relação constitutiva adotada é proposta por Tao et al. (2013), válida para o intervalo $300 \text{ MPa} < f_y \leq 800 \text{ MPa}$. As **Equações (01-04)** descrevem a relação.

$$\sigma = \begin{cases} E_s \cdot \varepsilon & (0 \leq \varepsilon < \varepsilon_y) \\ f_y & (\varepsilon_y \leq \varepsilon < \varepsilon_p) \\ f_u - (f_u - f_y) \cdot \left(\frac{\varepsilon_u - \varepsilon}{\varepsilon_u - \varepsilon_p} \right)^p & (\varepsilon_p \leq \varepsilon < \varepsilon_u) \\ f_u & (\varepsilon \geq \varepsilon_u) \end{cases} \quad (1)$$

$$p = E_p \cdot \left(\frac{\varepsilon_u - \varepsilon_p}{f_u - f_y} \right) \quad (2)$$

$$\varepsilon_p = [15 - 0,018 \cdot (f_y - 300)] \cdot \varepsilon_y \quad (3)$$

$$\varepsilon_u = [15 - 0,15 \cdot (f_y - 300)] \cdot \varepsilon_y \quad (4)$$

Em que f_y é a resistência ao escoamento do aço, f_u a resistência última, ε_y é a deformação de escoamento, ε_p a deformação no início do encruamento, ε_u a deformação última, p o expoente *strain-hardening*. E_s é o módulo de elasticidade do aço, e E_p o módulo de elasticidade no início do encruamento, e pode ser tomado como $0,02 \cdot E_s$.

Os materiais utilizados na análise foram o aço convencional ($f_y = 355 \text{ MPa}$, $f_u = 490 \text{ MPa}$, $e_y = 0,00172 \text{ mm/mm}$) e aço de alta resistência S460 ($f_y = 460 \text{ MPa}$, $f_u = 540 \text{ MPa}$, $e_y = 0,0223 \text{ mm/mm}$), módulo de elasticidade $E = 206,000 \text{ MPa}$ para ambas as classes de resistência.

Durante a fase inicial, caracterizada por uma análise linear elástica, o comportamento do material foi atribuído apenas às suas propriedades elásticas, especificamente o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson ($\nu = 0,3$). Posteriormente, na segunda fase que envolve uma análise não linear elastoplástico, ambos os comportamentos elástico e plástico foram considerados. O ABAQUS opera com tensões e deformações reais, exigindo a conversão de valores nominais para valores reais antes da incorporação nas propriedades que definem o comportamento plástico do modelo. As propriedades reais obtidas por meio da relação constitutiva adotada inseridas no programa estão mostradas na **Tabela 2**.

Tabela 2 - Propriedades para os perfis de aço inseridas no programa

Classe	$\sigma_{nominal}$ (MPa)	$\varepsilon_{nominal}$ ($\frac{mm}{mm}$)	σ_{real} (MPa)	ε_{real} ($\frac{mm}{mm}$)	$\varepsilon_{real \text{ elástica}}$ ($\frac{mm}{mm}$)	$\varepsilon_{real \text{ plástica}}$ ($\frac{mm}{mm}$)
S355	355,00	0,01723	355,61	0,01720	0,01730	0,0
	374,44	0,02914	385,36	0,02873	0,00187	0,02686
	391,69	0,03414	405,07	0,03357	0,00197	0,03161
	406,92	0,03914	422,85	0,03840	0,00205	0,03634
	420,30	0,04414	438,85	0,04320	0,00213	0,04107
	431,98	0,04914	453,21	0,04797	0,00220	0,04577
	442,12	0,05414	466,05	0,05273	0,00226	0,05047
	450,86	0,05914	477,52	0,05746	0,00232	0,05514
	490,00	0,15811	567,48	0,14679	0,00275	0,14404
S460	460,00	0,00233	461,03	0,00223	0,00224	0,0
	478,45	0,03206	493,79	0,03156	0,00240	0,02916
	493,10	0,03706	511,37	0,03639	0,00248	0,03391
	504,63	0,04206	525,86	0,04120	0,00255	0,03865
	513,63	0,04706	537,80	0,04599	0,00261	0,04338
	520,58	0,05206	547,68	0,05075	0,00266	0,04810
	525,88	0,05706	555,89	0,05550	0,00270	0,05280
	529,89	0,06206	562,77	0,06021	0,00273	0,05748
	540,00	0,16971	631,64	0,15675	0,00307	0,15369

2.3 Calibração do modelo

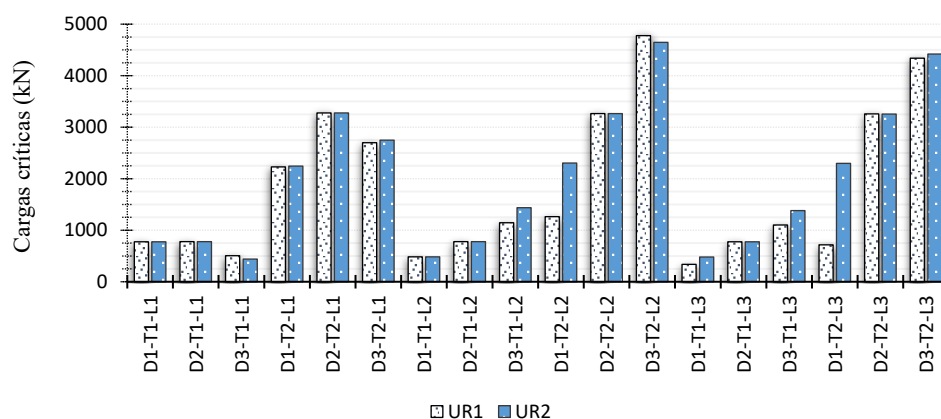
A calibração do modelo foi realizada comparando os resultados experimentais obtidos por Meng e Gardner (2020) e Panedpojaman et al. (2021). A **Tabela 3** apresenta os resultados para o estudo de validação. Os resultados mostraram que o modelo numérico se mostrava calibrado para as análises de pós-flambagem em situação de compressão axial dos perfis de aço alveolares com flanges tubulares.

Tabela 3 - Resultados para o estudo de validação

Referência	ID	N_{EXP} (kN)	N_{FE} (kN)	N_{FE}/N_{EXP}
Meng e Gardner (2020)	CHS 168.3×4	1634,6	1435,9	0,88
	CHS 139.7×4	1419,1	1253,2	0,88
	CHS 139.7×5	1798,5	1572,0	0,89
	CHS 139.7×6	2261,5	2143,5	0,95
	CHS 139.7×8	2919,6	2670,0	0,91
	CHS 139.7×10	3760,0	3365,0	0,89
	Média			0,90
Panedpojaman et al. (2021)			Desvio padrão	0,03
	RC80-60	103,0	117	1,14
	CC80-20	131,0	128	0,98
	CC80-40	105,0	96	0,91
	CC80-60	78,0	73	0,94
	RC100-60	138,0	146	1,06
	CC100-20	188,0	179	0,95
	CC100-40	140,0	140	1,00
	CC100-60	102,0	116	1,14
	Média			1,01
	Desvio padrão			0,09

3 Resultados

Os resultados para carga crítica obtidas por meio de análise de perturbação linear *buckle*, para os eixos de menor inércia (UR1) e de maior inércia (UR2) são apresentados na **Figura 4**. Os modelos D1-T2-L2 e D1-T2-L3, de maior esbelteza global, apresentaram as maiores diferenças entre as cargas críticas para o menor (UR1) e maior (UR2) eixo de inércia, com diferenças percentuais de 58,4% e 104,9%, respectivamente. Os modelos D3-T1-L1 e D3-T2-L2 foram os únicos que apresentaram cargas críticas superiores para UR1 em relação a UR2, enquanto os demais perfis não apresentaram diferenças significativas entre os eixos de inércia analisados.

**Figura 4.** Cargas críticas para ambos os eixos de inércia analisados

Os resultados para análise de pós-flambagem são apresentados na **Figura 5**. O aumento na capacidade de carga é mais pronunciado nos perfis com maior espessura (T2). Em média, a melhoria na capacidade de carga devido ao aumento da espessura para os perfis de aço S355 é de 71,7%, enquanto para o aço S460 é de 81,5%.

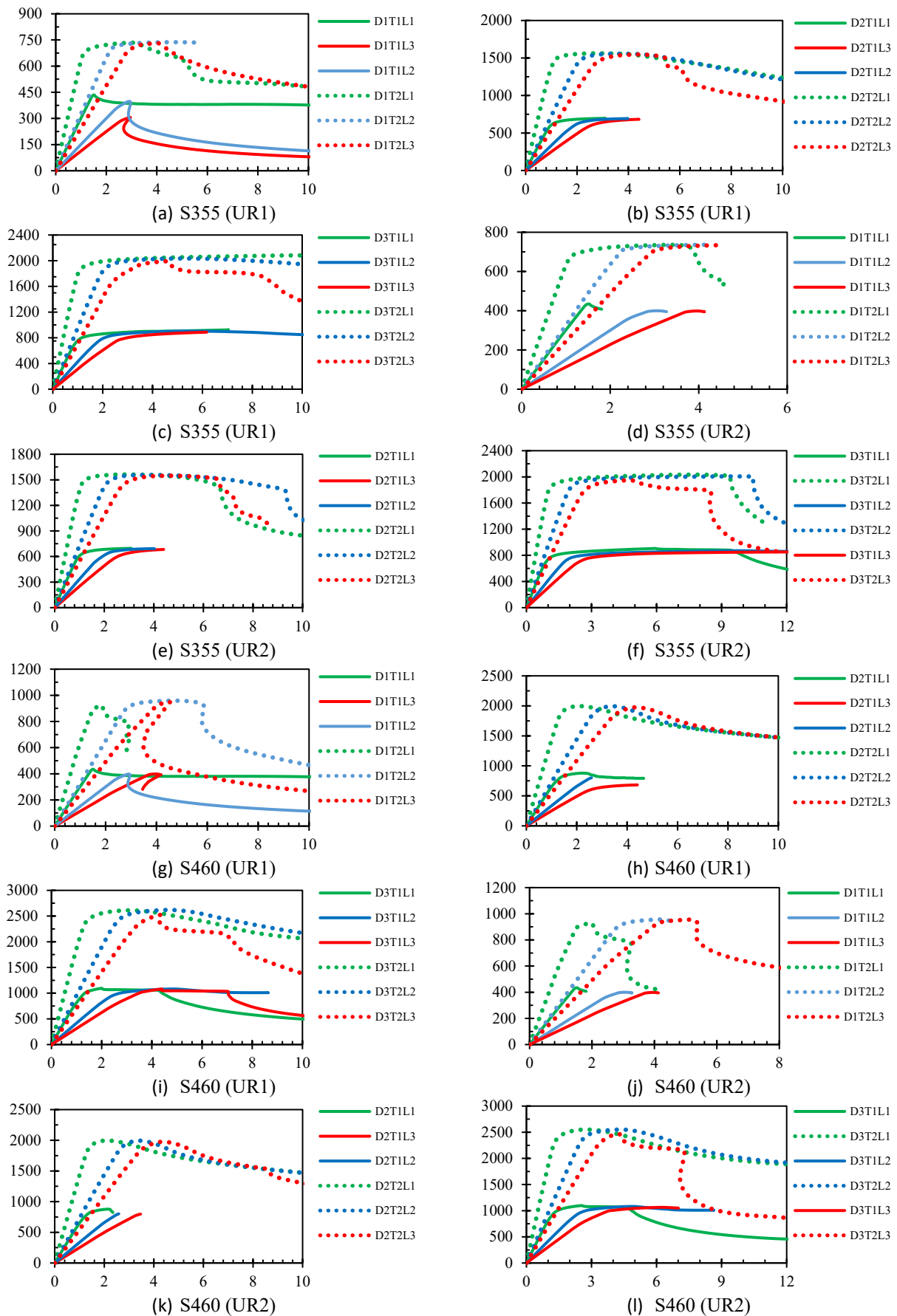


Figura 5. Curvas carga (kN) por deslocamento (mm)

Os gráficos da **Figura 6** apresentam as capacidades últimas obtidas para os perfis de diferentes classes de resistência, mostrando que os perfis com classe de resistência maior alcançaram cargas últimas superiores em até 30,2% (D1-T2-L3), e em média, superiores a 21%.

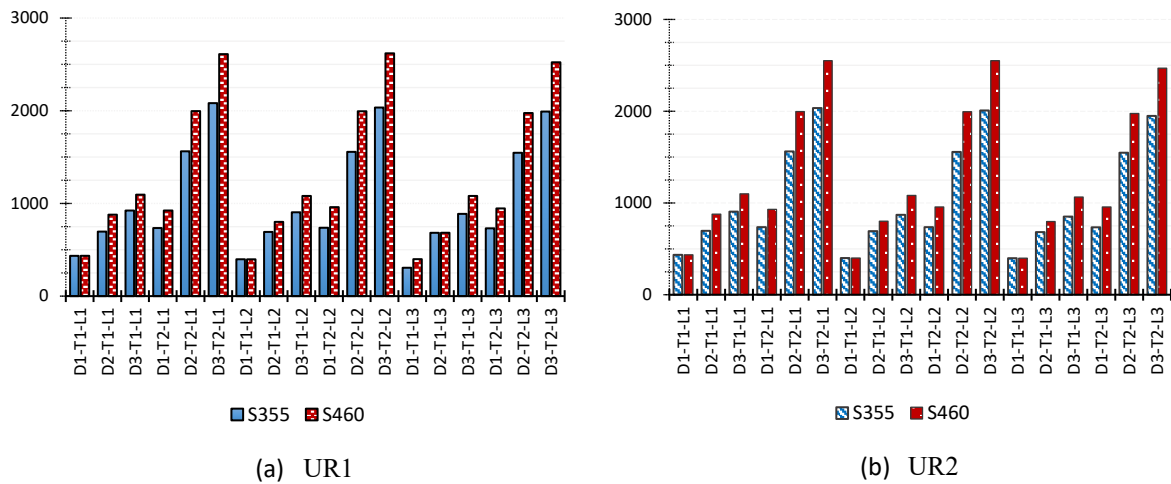
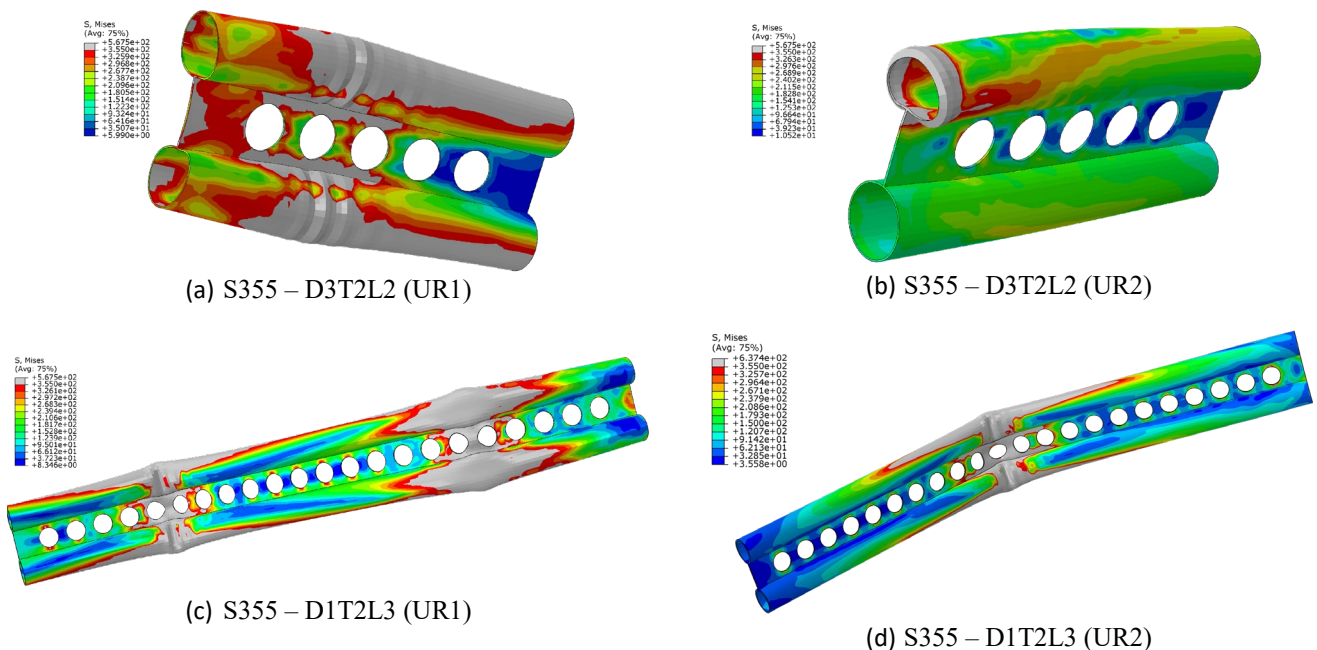


Figura 6. Capacidades últimas (kN)

As configurações deformadas e tensão de Von Mises para os perfis alveolares podem ser observadas na **Figura 7**. Os modos de falha observados indicaram uma tendência para ocorrência de instabilidades locais em relação ao maior eixo de inércia, e instabilidade global para as análises em torno do menor eixo, principalmente para os perfis de maior esbelteza global. A classe de resistência do material também não influenciou significativamente o modo de falha.



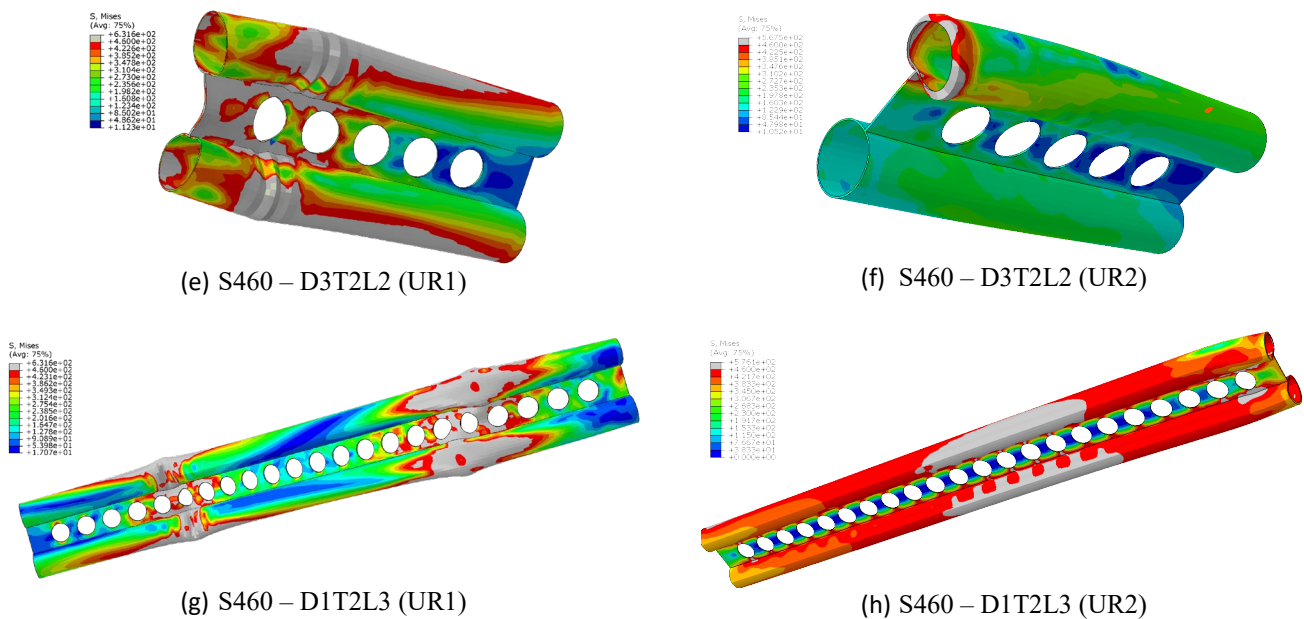


Figura 7. Configurações deformadas obtidas

5 Conclusões

O modo de falha típico em perfis tubulares foi observado no estudo desenvolvido, indicando que elementos esbeltos tendem a sofrer com instabilidades. Também foi possível mensurar o aumento de até 30,2% na capacidade última dos perfis estudados devido ao emprego do aço S460, de maior resistência que o aço S355. E o aumento, em média, de 76,6% na capacidade última devido ao aumento de espessura dos tubos. Tais resultados são importantes para um estudo futuro que será conduzido considerando os flanges tubulares preenchidos com concreto. A hipótese é que o concreto preenchido tende a minimizar e/ou retardar as instabilidades no tubo de aço.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Capes pela concessão da bolsa de estudos e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio na execução do projeto de pesquisa e pela disponibilização de acesso aos recursos computacionais da Amazon Web Services Elastic Compute Cloud Platform – Amazon AWS-EC2. Número de concessão #408498/2022-6 e 421785/2022-5

Referências

ABAQUS. Abaqus Analysis User Manual, Version 6.14. **Dassault Systems Simulia Corp; ABAQUS Inc.**, 2014.

FERREIRA, F. P. V.; MARTINS, C. H.; DE NARDIN, S. A parametric study of steel-concrete composite beams with hollow core slabs and concrete topping. **Structures**, v. 28, 2020.

Jl, J. et al. Nonlinear Buckling Analysis of H-Type Honeycombed Composite Column with Rectangular Concrete-Filled Steel Tube Flanges. **International Journal of Steel Structures**, v. 18, n. 4, 2018.

LI, G. C. et al. Axially loaded square concrete-filled steel tubular long columns made of high-strength materials: Experimental investigation, analytical behavior and design. **Journal of Building Engineering**, v. 58, 2022.

MENG, X.; GARDNER, L. Cross-sectional behaviour of cold-formed high strength steel circular hollow sections. **Thin-Walled Structures**, v. 156, 2020.

NSEIR, J. et al. **Lateral torsional buckling of cellular steel beams**. Structural Stability Research Council Annual Stability Conference 2012. **Anais...**2012.

PANEDPOJAMAN, P.; SAE-LONG, W.; CHUB-UPPAKARN, T. Cellular beam design for resistance to inelastic lateral-torsional buckling. **Thin-Walled Structures**, v. 99, 2016.

PANEDPOJAMAN, P.; SAE-LONG, W.; THEPCHATRI, T. Design of cellular beam-columns about the major axis. **Engineering Structures**, v. 236, 2021.

TAO, Z.; WANG, X.-Q.; UY, B. Stress-Strain Curves of Structural and Reinforcing Steels after Exposure to Elevated Temperatures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 9, 2013.