

# Avaliação numérica da Flambagem Lateral com Torção em vigas de aço em perfil I com aberturas sequenciais na alma em padrão senoidal

Adriano Silva de Carvalho <sup>1</sup>, Carlos Humberto Martins <sup>2</sup> Alexandre Rossi <sup>3</sup>,

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Brasil. Email: adriano.ce7@gmail.com

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Brasil. Email: chmartins@uem.br

<sup>3</sup> Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil. Email: alexandre-rossi@ufu.br

## Resumo

As vigas de aço em perfil I com aberturas sequenciais em padrão senoidal são novas vigas de aço da família dos perfis alveolares. Diversas vantagens são advindas da existência das aberturas ao longo de sua alma. No entanto, devido ao processo industrial necessário à fabricação do perfil alveolar, vigas desta natureza apresentam uma altura de seção transversal muito mais expressiva em relação aos perfis convencionais de alma cheia, levando a uma maior esbelteza da seção. Dessa forma, o elemento apresenta maior susceptibilidade à falha por Flambagem Lateral com Torção. Nota-se, no entanto, grande escassez de estudos sobre a temática na literatura científica e ausência de estudos acerca da adequação dos procedimentos de cálculo destinados à FLT para vigas alveolares com aberturas em padrão senoidal. Desse modo, o presente estudo teve por objetivo analisar o comportamento de falha global destes elementos, considerando a aplicação de carga concentrada na mesa superior, visando simular ensaios de flexão de três pontos por meio de simulações numéricas no software ABAQUS. Os valores de momento resistente à FLT obtidos por meio do software foram comparados com 3 procedimentos normativos (AISC 360, EUROCODE 3 e AS4100). Além disso, foi analisado o comportamento de estabilidade elástica dos elementos, visando comparar os valores obtidos para o momento crítico elástico e para o momento último. Considerando o momento último, foi observado que o melhor procedimento normativo dentre os analisados foi a norma AS4100. Além disso, vale destacar que a norma AISC 360 resultou em valores majoritariamente contra a segurança.

**Palavras-chave:** Vigas alveolares, FLT, ABAQUS

## Abstract

The steel I-beams with sequential openings in sinusoidal shape are new steel beams from the alveolar profile family. Several advantages come from the existence of openings along their web. However, due to the industrial process required to manufacture the perforated profile, beams of this nature have a much more expressive cross-section height compared to conventional full-web profiles, leading to a greater slenderness of the section. Thus, the element has greater susceptibility to failure by lateral-torsional buckling. However, there is a great scarcity of studies on the subject in the scientific literature and a lack of studies on the adequacy of calculation procedures for LTB behavior in alveolar beams with sinusoidal openings. Thus, the present study aimed to analyze the global failure behavior of these elements, considering the application of concentrated load on the upper flange, aiming to simulate three-point bending tests through numerical simulations in the ABAQUS software. The LTB resistant moment values obtained through the software were compared with 3 standard procedures (AISC 360, EUROCODE 3 and AS4100). Furthermore, the elastic stability behavior of the elements was analyzed, aiming to compare the values obtained for the elastic critical moment and the ultimate moment. Considering the ultimate moment, the best standard procedure among those analyzed was the AS4100. In addition, it is worth noting that the AISC 360 standard resulted in values that were mostly against safety in all cases.

**Keywords:** Perforated beams; LTB; ABAQUS

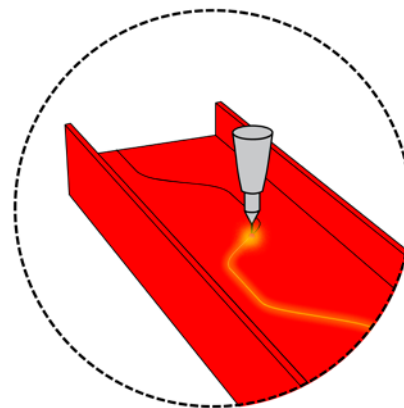
## 1. Introdução

Vigas alveolares são elementos fabricados a partir de perfis laminados de aço e são geralmente utilizadas quando há a necessidade de se vencer grandes vãos livres [1]. Diversos benefícios podem ser destacados com a sua utilização, sendo os principais: expressiva melhora na razão peso próprio/resistência mecânica; possibilidade de passagem de tubos e similares por dentro das aberturas e aparência leve, que confere apelo estético favorável ao perfil [2]. No entanto, o aumento da seção transversal faz com que o perfil apresente maior susceptibilidade à falha por Flambagem Lateral com Torção [3]. Essa susceptibilidade torna-se ainda mais evidente, ao se considerar que a presença dos alvéolos diminui a rigidez à torção do elemento, levando-o à instabilidade global [1].

As vigas alveolares costumam ser utilizadas em aplicações onde são carregadas de modo a estarem submetidas à flexão em torno do eixo de maior inércia [4]. Dessa forma, estão sujeitas às falhas que ocorrem em perfis de alma cheia, bem como às falhas mais complexas, que ocorrem exclusivamente pela existência das aberturas. Os modos de falha nessas estruturas também são influenciados pela nova distribuição de tensões residuais gerada pelo procedimento de produção característico de corte pelo qual passam essas vigas [5]. As vigas com aberturas na alma em padrão senoidal são fabricadas através de um corte único, através do qual o perfil é seccionado e as partes resultantes são unidas, de modo a dar origem a um novo perfil, mais alto e, portanto, com maior rigidez à flexão. A Figura 1 apresenta o padrão de corte utilizado na fabricação destes elementos.

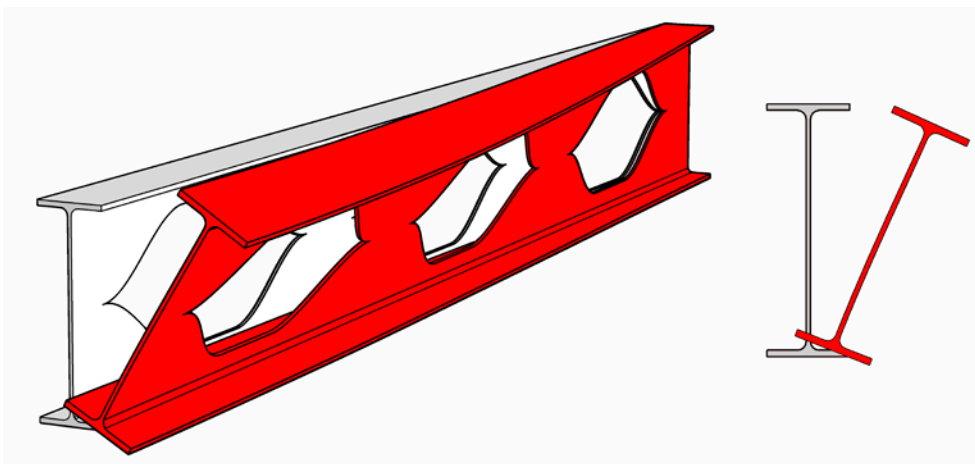
Durante o processo de produção dessas vigas, as partes que compõem o perfil são expostas a grandes quantidades de calor, tanto no processo de corte, quanto no posterior processo de soldagem. Dessa forma, a tensão residual já existente devida ao processo de laminação do perfil original, é alterada. Na região de corte nota-se tensões residuais de tração, as quais são balanceadas por tensões de compressão presentes

em regiões mais distantes [5]. Desse modo, nota-se a importância de se considerar as tensões residuais no comportamento de falha de vigas alveolares, em especial das vigas com aberturas em padrão senoidal.



**Figura 1.** Padrão de corte senoidal. Fonte: Elaboração própria.

Poucas pesquisas foram realizadas acerca de vigas com aberturas em padrão senoidal. Vale destacar ainda, que dentre os escassos estudos, grande parte se concentra em estudar falhas locais [6–8]. O estudo de falhas locais é importante nesses elementos devido aos modos de falha que estão diretamente relacionados à presença das aberturas senoidais, como é o caso da falha por mecanismo Vierendeel. Em especial, argumenta-se que usualmente as vigas de aço estão travadas lateralmente durante sua fase de utilização, tornando o elemento suscetível principalmente a esses modos de falha locais. Apesar disso, como apresentado, ao se considerar que o perfil não apresenta restrições ao deslocamento lateral, este apresentará maior susceptibilidade à falha global. Este é um caso muito comum nas fases de montagem da estrutura, quando ainda não há elementos que proporcionem o travamento lateral necessário para impedir a ocorrência da FLT mostrada na figura 2. Dessa forma, é fundamental a consideração dessa situação em projeto e mais além, o estudo desse comportamento nesses novos tipos de perfis de aço.



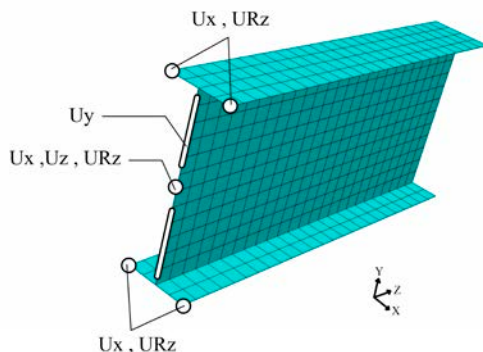
**Figura 2.** Flambagem Lateral com Torção em viga alveolar senoidal. Fonte: Elaboração própria.

Tendo em vista essa importância, o presente estudo dedicou-se a analisar o comportamento de vigas alveolares com aberturas em padrão senoidal, submetidas à flexão no eixo de maior inércia e sem restrições laterais. Dessa forma, os perfis estudados são submetidos à falha por Flambagem Lateral com Torção. O estudo foi realizado por meio de simulações numéricas no software ABAQUS. Por meio do programa foram realizadas análises de estabilidade elástica e análises de pós-flambagem. Com isto, foi possível analisar o momento crítico elástico dessas estruturas, bem como o momento último apresentado pelos perfis. Para a determinação do momento último foram realizadas análises não lineares físico-geométricas, considerando imperfeições iniciais de natureza geométrica, bem como a presença de tensões residuais oriundas do processo de fabricação dessas estruturas. Os resultados obtidos foram comparados com procedimentos de cálculo analíticos, sendo que os resultados para o momento último foram comparados com os procedimentos principais procedimentos normativos a nível internacional (AISC-360, EUROCODE 3 e AS4100).

## 2. Métodos

### 2.1. Modelo numérico

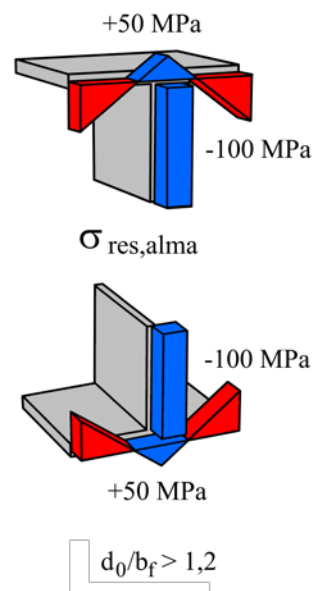
Para a realização das análises numéricas foi adotada a utilização de elementos do tipo Shell. Os elementos utilizados foram o S3 e o S4R, os quais são elementos triangulares e quadrilaterais, respectivamente. O tamanho médio de malha utilizado foi de 10 mm, o qual apresentou boa convergência em análises realizadas em trabalhos anteriores [9–11]. Quanto às condições de suporte, buscou-se simular o vínculo de garfo. Desse modo, foram restringidos os deslocamentos laterais nas extremidades das mesas, a rotação longitudinal dos apoios e o deslocamento vertical nesses pontos. Foi restringido ainda, o deslocamento longitudinal em um dos apoios. A Figura 3 apresenta as restrições adotadas.



**Figura 3.** Condições de suporte adotadas. Fonte: Elaboração própria.

A aplicação de carga foi realizada de modo a simular ensaios de flexão de três pontos. Desse modo foi

aplicada uma carga concentrada no centro do vão, de forma a proporcionar a ocorrência da FLT. A carga foi aplicada na mesa superior da estrutura. Para a simulação do material na fase elástica, foi considerado módulo de elasticidade de 200 GPa e coeficiente de Poisson de 0.3. Para a simulação do comportamento plástico na análise de pós-flambagem foi utilizado o modelo constitutivo de Earls. Neste modelo, o encruamento do aço é representado por meio de uma região tri-linear. A tensão de escoamento considerada foi de 355 MPa e a tensão última foi de 470 MPa. Para simular a imperfeição geométrica inicial no modelo, a deformada obtida na análise linear elástica foi normalizada em  $L/1000$  e aplicada como modelo inicial para a análise de pós flambagem. Para a representação das tensões residuais, foi utilizado o modelo de Sonck [12]. O modelo é apresentado na Figura 4. Percebe-se a existência de tensões de compressão nas extremidades das mesas superior e inferior e tensões de tração na alma, onde ocorreu o processo de corte.



**Figura 4.** Tensões residuais de acordo com [12]. Fonte: Elaboração própria.

### 2.2. Estudo paramétrico

O estudo paramétrico foi idealizado de modo a cobrir um amplo espectro de valores para os diversos parâmetros associados aos perfis alveolares com aberturas na alma em padrão senoidal. Foram considerados 18 perfis de abas paralelas do tipo europeu. Esses perfis são separados em 6 categorias, de acordo com a altura do perfil base. Para cada categoria são considerados 3 valores de esbeltez da seção transversal, considerando a altura da seção constante. Dessa forma foi possível avaliar o efeito da esbeltez da alma e mesa no comportamento de estabilidade desses perfis. A altura das aberturas ( $a_0$ ) foi variada em 3 diferentes valores para cada viga analisada, de forma a

considerar uma abertura pequena, média e grande. Por fim, para cada perfil e abertura foram considerados 10 comprimentos. Dessa forma, uma ampla faixa de esbeltez global foi analisada. Considerando que para cada modelo foram realizadas duas análises (estabilidade elástica e pós-flambagem), foram analisados  $18 \times 3 \times 10 \times 2 = 1080$  modelos. As propriedades dos perfis considerados são apresentadas na Tabela 1.

### 3. Resultados e discussão

Todos os modelos simulados apresentaram falha por Flambagem Lateral com Torção. Isto ocorreu pois os comprimentos iniciais de cada perfil foram planejados para propiciar a ocorrência de instabilidade global. Os resultados obtidos são apresentados a seguir para o momento crítico elástico, obtido na análise de estabilidade elástica e o momento último à FLT, obtido por meio da análise não linear físico-geométrica.

#### 3.1. Momento crítico elástico

Os valores obtidos para o momento crítico elástico são apresentados na Figura 5. Pode-se observar que a esbeltez global é o principal fator de influência no momento crítico, bem como a esbeltez da seção transversal. No estudo, foram considerados 3 perfis para cada altura de seção transversal, sendo estes, diferenciados pela esbeltez de sua seção. Ao se comparar, dentro de uma mesma altura de seção, o perfil mais esbelto e o perfil menos esbelto, percebe-se um aumento no momento crítico elástico de em média 87,45%. Ao se comparar, considerando um perfil com mesma altura de seção, o perfil de seção mais esbelta com o perfil de esbeltez de seção intermediária, ocorre uma diminuição do momento crítico de em média 24,16%. Por outro lado, ao se comparar o perfil de seção menos esbelta e o perfil de esbeltez

intermediária, o momento crítico sofreu acréscimo de 41,94%, em média.

Notou-se por meio dos resultados coletados que a alteração na altura da abertura senoidal acarreta em mudança proporcional no momento crítico elástico. Essa alteração ocorre de forma linear, porém, não apresenta impacto significativo na capacidade elástica, se comparada com as alterações causadas pela mudança de esbeltez da seção ou alteração do comprimento do perfil. O valor médio de mudança em função da alteração da altura das aberturas foi de 1,28%, ao se considerar a diferença entre o momento crítico do perfil com maior abertura senoidal e menor abertura senoidal. Vale destacar que apenas a altura do alvéolo foi avaliada no estudo paramétrico.

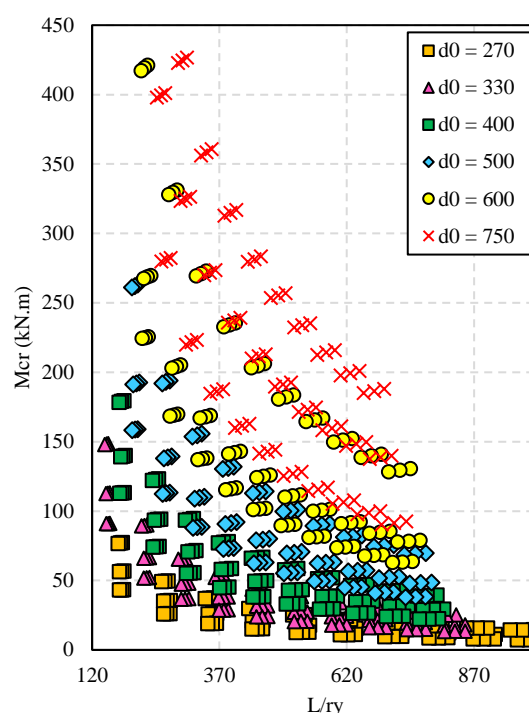


Figura 5. Resultados Mcr. Fonte: Elaboração própria.

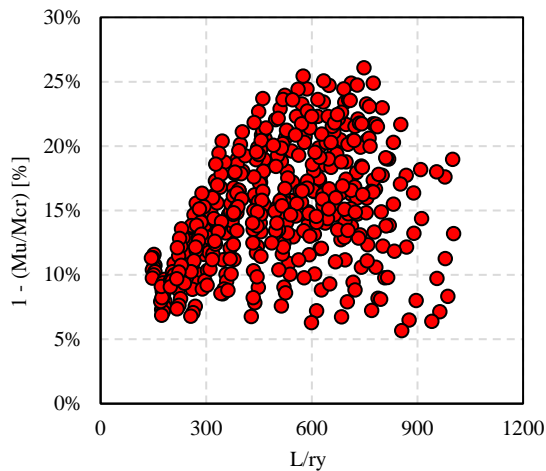
Tabela 1. Propriedades dos perfis analisados no estudo paramétrico.

Perfil	d	d <sub>0</sub>	b <sub>f</sub>	t <sub>w</sub>	t <sub>r</sub>	b <sub>f</sub> /2t <sub>r</sub>	h/t <sub>w</sub>
IPE A 270	400.5	267	135	5.5	8.7	7.76	69.65
IPE 270	405	270	135	6.6	10.2	6.62	58.27
IPE O 270	411	274	136	7.5	12.2	5.57	51.55
IPE A 330	490.5	327	160	6.5	10	8.00	72.38
IPE 330	495	330	160	7.5	11.5	6.96	62.93
IPE O 330	501	334	162	8.5	13.5	6.00	55.76
IPE A 400	595.5	397	180	7	12	7.50	81.64
IPE 400	600	400	180	8.6	13.5	6.67	66.63
IPE O 400	606	404	182	9.7	15.5	5.87	59.28
IPE A 500	745.5	497	200	8.4	14.5	7.25	94.64
IPE 500	750	500	200	10.2	16	6.25	70.39
IPE O 500	759	506	202	12	19	5.32	60.08
IPE A 600	895.5	597	220	9.8	17.5	6.29	87.81
IPE 600	900	600	220	12	19	5.79	71.83
IPE O 600	915	610	224	15	24	4.67	57.80
IPE 750 x 147	1129.5	753	265	13.2	17	7.79	82.99
IPE 750 x 173	1143	762	267	14.4	21.6	6.18	76.38
IPE 750 x 196	1155	770	268	15.6	25.4	5.28	70.78

Fonte: Elaboração própria.

### 3.2. Momento último

A Figura 6 apresenta uma comparação entre o momento resistente obtido considerando a análise não linear e o momento crítico obtido na análise linear elástica. Os dados são expressos por meio da porcentagem de diminuição da capacidade resistente na análise não linear, em relação à análise linear elástica. O valor médio da diminuição da capacidade resistente observada foi de 14,97%, sendo que o mínimo valor observado foi de 5,69% e o máximo de 26,08%.

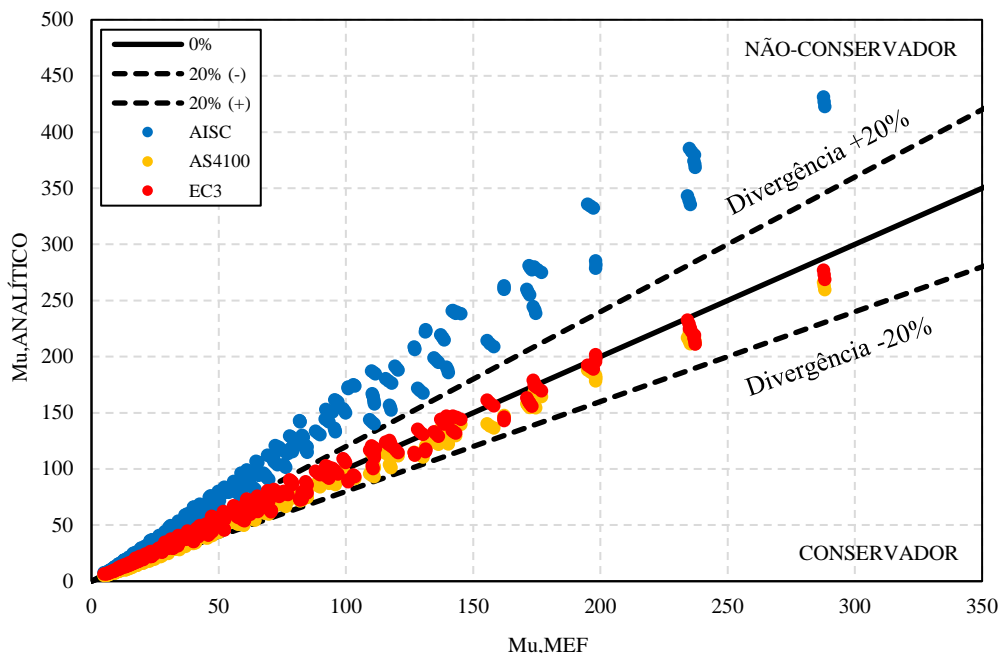


**Figura 6.** Comparação entre os resultados para o Mcr e Mu.  
Fonte: Elaboração própria.

Os valores obtidos para o momento último à FLT foram comparados com os principais procedimentos normativos existentes no cenário internacional (AISC-360, EUROCODE 3 e AS4100). Os procedimentos foram aplicados considerando, em um primeiro momento, o cálculo das propriedades geométricas no

centro das aberturas. Essa abordagem para a determinação da capacidade resistente de vigas alveolares foi proposta em [13], no qual afirma-se que os procedimentos analíticos podem ser aplicados à vigas alveolares, desde que essa consideração de cálculo seja realizada. Alternativas à essa proposta foram analisadas na seção 3.2.1. A Figura 7 apresenta a comparação para os 3 procedimentos normativos. Pode-se observar que a norma americana AISC-360 apresentou resultados predominantemente contra a segurança, com desvio superior a 20% em relação aos resultados numéricos. Isto ocorreu pois o procedimento não é capaz de considerar a posição do carregamento em relação à sua altura de aplicação. A norma adota o cálculo considerando a aplicação de carga no centro de cisalhamento da estrutura, conforme as hipóteses de [14]. No entanto, nota-se que em situações que visam simular a posição usual em projetos de engenharia (mesa superior) a norma fornece resultados que são desfavoráveis à segurança. Situação oposta foi verificada para as outras duas normas, onde os procedimentos de cálculo consideram a posição do carregamento na seção transversal e, portanto, apresentaram resultados mais precisos em relação às simulações numéricas.

Pode-se observar que a norma AS4100 apresenta resultados mais conservadores em relação ao EUROCODE 3. Os resultados da norma europeia representaram em média 102,56% da capacidade resistente apresentada pelos modelos numéricos, enquanto que o valor médio da norma AS4100 foi de 91,32%. Ao se ajustar uma curva aos resultados da comparação entre as normas e o modelo numérico e calcular o coeficiente de determinação  $R^2$ , o valor obtido para a norma AISC-360 foi de 0.383, ao passo que para o EUROCODE 3 e AS4100 foi de 0.989 e 0.983, respectivamente. Portanto, a norma de estruturas de aço AISC-360 não se caracteriza como uma opção segura para o dimensionamento de vigas



**Figura 7.** Comparação entre os resultados numéricos e analíticos.

alveolares em padrão senoidal à FLT, considerando ações aplicadas na mesa superior.

### 3.2.1. Cálculo das propriedades geométricas

Os dados apresentados anteriormente referem-se à comparação entre os procedimentos normativos, considerando o cálculo das propriedades geométricas no centro dos alvéolos, metodologia esta, apresentada em [13]. No entanto, pesquisas recentes apontam que para grandes valores de esbelteza global, esse procedimento tende a subestimar a capacidade do elemento [2,4]. Isso ocorre devido a uma subestimação da constante de torção  $J$ . Tendo em vista este fato, no trabalho de [2] é proposto um procedimento de adequação que considera uma média ponderada da constante de torção. Essa ponderação é feita considerando a constante de torção  $J$  no centro das aberturas e no montante da alma, onde a seção é completamente sólida. Para realizar a ponderação, considera-se um comprimento de abertura equivalente. A proposta apresentada em [2] refere-se à vigas casteladas. No entanto, como a geometria de vigas casteladas e vigas com aberturas senoidais se assemelham, exceptuando-se o fato de que as vigas com aberturas senoidais apresentam arredondamento nos cantos das aberturas, a proposta foi utilizada como um dos métodos possíveis de uso para vigas desta natureza. A constante de torção média pode ser calculada pela Equação 01, onde o comprimento equivalente é dado pela Equação 02.

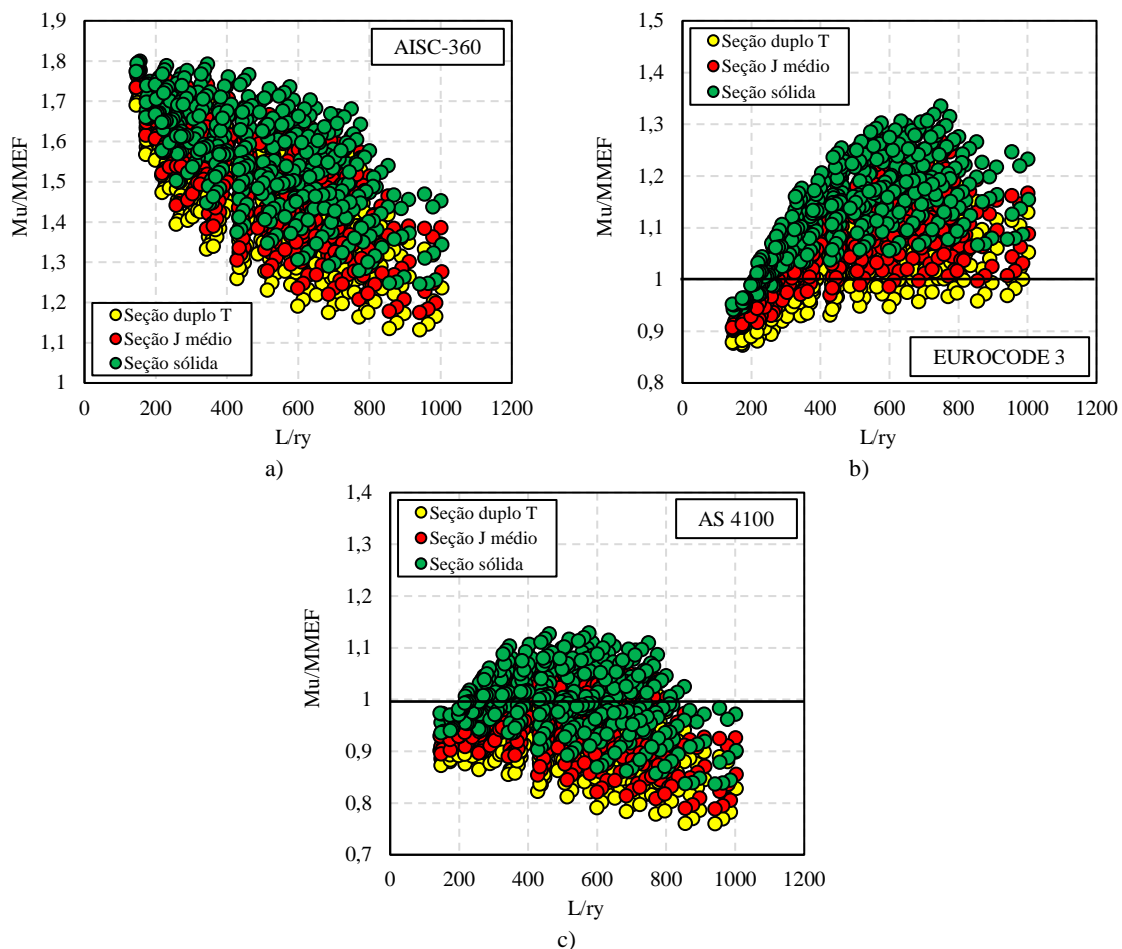
$$J_{méd} = \frac{nl_{0,méd}}{L} J_{2T} + \left(1 - \frac{n \cdot l_{0,méd}}{L}\right) J_{sól} \quad 01$$

$$l_{0,méd} = w + 1,5c \quad 02$$

Onde:

- $J_{méd}$  – Constante de torção ponderada.
- $n$  – Número de aberturas no perfil.
- $l_{0,méd}$  – Comprimento equivalente da abertura
- $L$  – Comprimento do perfil.
- $J_{2T}$  – Constante de torção calculada no centro da abertura.
- $J_{sól}$  – Constante de torção calculada sem considerar aberturas.
- $w$  – Comprimento da parte horizontal da abertura.
- $c$  – Comprimento da parte diagonal da abertura (ou parte senoidal, em aberturas em padrão de senoide).

A alternativa de ponderação foi comparada com o cálculo das propriedades geométricas no centro da abertura (seção duplo T) e no montante da alma (seção sólida). Os resultados são apresentados na Figura 8. Percebe-se de modo geral que, o cálculo com a seção duplo T é mais conservador do que os demais. No entanto, vale destacar que o nível geral de conservadorismo depende das características de cada procedimento normativo.



**Figura 8.** Comparação entre as formas de se calcular as propriedades geométricas da seção transversal.

A seção calculada com a constante de torção média apresentou resultado menos conservador do que a seção considerando o duplo T, ao passo que se apresentou mais conservador do que a seção sólida. Pode ser uma alternativa interessante, especialmente no caso da utilização da norma AS4100, cujos valores são em média demasiadamente conservadores. Isto é afirmado, pois a utilização da constante de torção média representou uma melhor aproximação dos resultados obtidos numericamente e com um nível menor de conservadorismo (a média da relação  $\mu/M_{MEF}$  foi de 0.95, contra 0.91 da seção duplo T). Já a utilização da seção sólida não é recomendada em nenhum dos casos, visto que amplifica ainda mais a falta de segurança da norma AISC-360 e diminui consideravelmente o conservadorismo dos demais procedimentos analisados.

#### 4. Conclusão

O presente trabalho tratou da avaliação numérica do comportamento de estabilidade de vigas alveolares em padrão I com aberturas ao longo da alma em padrão senoidal. O estudo foi feito utilizando o software ABAQUS, no qual foi desenvolvido um extenso estudo paramétrico com 1080 modelos em elementos finitos. Foram realizadas análises de estabilidade elástica com a finalidade de se obter o momento crítico elástico dos perfis, bem como análises não lineares físico-geométricas, com o objetivo de obter o momento último das estruturas analisadas. Na etapa de análise não linear foram consideradas imperfeições na geometria do modelo e a existência de tensões residuais oriundas do processo de fabricação característico desses elementos. Por meio das análises foi verificado que o principal parâmetro que afeta o momento crítico elástico dessas estruturas é a esbeltez global do elemento, seguido da esbeltez da seção transversal. Foi observado que perfis com seções mais esbeltas apresentam considerável redução no momento crítico, ao passo que perfis que apresentam a mesma altura de seção e menor esbeltez de alma e mesa apresentam um momento crítico consideravelmente maior. A altura das aberturas senoidais apresenta uma influência menor no momento crítico, sendo que a amplitude observada de variação foi insignificante se comparada às amplitudes de variação observadas ao se analisar a influência dos valores de esbeltez. Os resultados da análise não linear permitiram a comparação do momento último dos perfis com os valores calculados pelos procedimentos normativos AISC-360, EUROCODE 3 e AS4100. Foi observado que a norma AISC-360 apresenta valores demasiadamente contra a segurança, pois o procedimento não considera a aplicação de carga na mesa superior. Por outro lado, os procedimentos EUROCODE 3 e AS4100 apresentam um fator de correção para a posição da carga e os resultados se mostraram de acordo com os resultados numéricos. Ainda assim, o procedimento AS4100 se

mostrou mais seguro do que o procedimento apresentado no EUROCODE 3. Por fim, foram analisadas alternativas para o cálculo das propriedades geométricas da seção transversal dos perfis. O modelo considerando o cálculo no montante da alma aumenta consideravelmente o não conservadorismo dos procedimentos e não é recomendado. Por outro lado, a utilização de uma constante de torção média, aliada ao cálculo das demais propriedades no centro da abertura, apresentou bons resultados e pode ser usada como uma alternativa à seção duplo T para diminuir o conservadorismo de procedimentos analíticos, como o descrito na norma AS4100.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código financeiro 001 e à Fundação Araucária - FA pelo incentivo à execução do projeto de pesquisa.

#### Referências

- [1] Durif S, Bouchaïr A, Vassart O. Experimental and numerical investigation on web-post specimen from cellular beams with sinusoidal openings. *Eng Struct* 2014;59:587–98. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.11.021>.
- [2] Sonck D, Belis J. Lateral-Torsional Buckling Resistance of Castellated Beams. *J Struct Eng* 2017;143:04016197. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0001690](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0001690).
- [3] Nseir J, Lo M, Sonck D, Somja H, Vassart O, Boissonnade N. Lateral torsional buckling of cellular steel beams. *Struct Stab Res Council Annu Stab Conf 2012* 2012:484–98.
- [4] Sonck D, Belis J. Lateral-torsional buckling resistance of cellular beams. *J Constr Steel Res* 2015;105:119–28. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.11.003>.
- [5] Sonck D, Van Impe R, Belis J. Experimental investigation of residual stresses in steel cellular and castellated members. *Constr Build Mater* 2014;54:512–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.045>.
- [6] Durif S, Bouchaïr A. Behavior of cellular beams with sinusoidal openings. *Procedia Eng* 2012;40:108–13. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.064>.

- [7] Durif S, Bouchair A. Analytical model to predict the resistance of cellular beams with sinusoidal openings. *J Constr Steel Res* 2016;121:80–96.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.01.015>.
- [8] Durif S, Bouchair A, Vassart O. Experimental tests and numerical modeling of cellular beams with sinusoidal openings. *J Constr Steel Res* 2013;82:72–87.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.12.010>.
- [9] Rossi A, Martins CH, Nicoletti RS, de Souza ASC. Reassessment of lateral torsional buckling in hot-holled I-beams. *Structures* 2020;26:524–36.  
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.04.041>.
- [10] Ferreira FPV, Rossi A, Martins CH. Lateral-torsional buckling of cellular beams according to the possible updating of EC3. *J Constr Steel Res* 2019;153:222–42.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.10.011>.
- [11] Rossi A, Ferreira FPV, Martins CH, Mesacasa Júnior EC. Assessment of lateral distortional buckling resistance in welded I-beams. *J Constr Steel Res* 2020;166.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105924>.
- [12] Sonck D. Global buckling of castelled and cellular steel beams and columns. Ghent University, 2014.
- [13] Kerdal D, Nethercot DA. Failure modes for castellated beams. *J Constr Steel Res* 1984;4:295–315.  
[https://doi.org/10.1016/0143-974X\(84\)90004-X](https://doi.org/10.1016/0143-974X(84)90004-X).
- [14] Timoshenko S, Gere J. *Theory of elastic stability*. 2. ed. New York: McGraw-Hill; 1963.