



AVALIAÇÃO DE MOMENTO CRÍTICO EM VIGAS DE AÇO CELULARES E CASTELADAS

*Igor Eduardo da Silva Ribeiro¹, Adriano Silva de Carvalho², Gustavo Henrique Beffa³,
Carlos Humberto Martins⁴, Alexandre Rossi⁵*

¹Mestrando em Engenharia Civil, Campus Maringá-PR, Universidade Estadual de Maringá - UEM. igoreduardosilva@gmail.com

²Doutorando em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR. adriano.ce7@gmail.com

³Acadêmico de Engenharia Civil, Campus Maringá-PR, Universidade Estadual de Maringá - UEM. Bolsista PIBIC/Fundação Araucária – UEM. ra125218@uem.br.

⁴Orientador, Prof. Dr., Universidade Estadual de Maringá-UEM, DEC, chmartins@uem.br

⁵Colaborador, Profa. Dra., Universidade Federal de Uberlândia, DEC, alexandre-rossi@ufu.br

RESUMO

As vigas alveolares são perfis fabricados a partir do corte e solda sequenciais na alma de perfis, de modo que se formem aberturas, que são chamados de alvéolos. O perfil final tem altura maior sem que seja necessário adicionar mais material e aumentando significativamente o momento de inércia transversal e, consequentemente, sua rigidez à flexão, aprimorando a relação resistência-peso de maneira significativa sem maiores custos. É de suma importância o entendimento do comportamento desse tipo de estrutura, sendo assim, o presente trabalho buscou realizar análises em vigas alveolares, celulares e casteladas, submetidas a cargas uniformemente distribuídas, por meio de análises numéricas utilizando o método dos elementos finitos através do software Abaqus a fim de se obter o momento crítico elástico e comparar os resultados obtidos com procedimentos normativos e propor alterações no modelo de cálculo da constante de torção. Foi observado que os procedimentos normativos têm caráter otimista, oferecendo erros maiores conforme se diminui a esbeltez global do perfil. Outra constatação foi a alteração proposta reduziu significativamente o caráter otimista desses procedimentos.

PALAVRAS-CHAVE: Momento crítico elástico; Método dos elementos finitos; Vigas alveolares.

1 INTRODUÇÃO

Perfis alveolares são fabricados a partir de um corte sequencial da alma de um perfil comum, seguindo um padrão para formar os diferentes tipos de aberturas, com posterior deslocamento e soldagem de forma a aumentar sua altura (SONCK; BELIS, 2015). Dentre os possíveis padrões de abertura encontram-se as aberturas celulares (Figura 1a) e casteladas (Figura 1b).

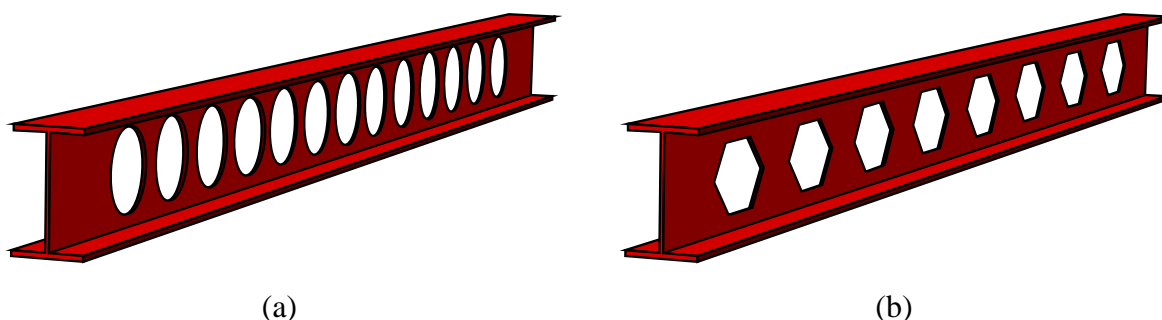


Figura 1: Perfil celular (a) e castelado (b)

Fonte: Autores, 2023

Devido a este corte, a altura final desses perfis aumenta consideravelmente, o que por sua vez aumenta também a rigidez à flexão e sem que seja empregado mais material.



Além promovem uma boa estética arquitetônica e podem ser utilizados para passagem de tubulações (NSEIR et al., 2012).

Contudo, a presença das aberturas reduz a área efetiva para resistência a esforços cortantes e facilitam a ocorrência de instabilidades locais na alma.

Vigas submetidas à momentos fletores podem sofrer instabilidade na forma de flambagem lateral com torção (FLT), flambagem local na mesa (FLM), flambagem local na alma (FLA) e, no caso de vigas alveolares, flambagem no montante da alma (FMA), que ocorre devido a instabilidades na região entre alvéolos através do mecanismo de Vierendeel (PANEDPOJAMAN; THEPCHATRI; LIMKATANYU, 2014).

Dessa forma, o presente trabalho buscou investigar o momento crítico em vigas alveolares, submetidas a falha por FLT através de aplicação de carga uniformemente distribuída, além de avaliar a efetividade de procedimentos normativos para esse tipo de estrutura e propor uma alteração no modelo de cálculo a fim de melhor compatibilizar os modelos analíticos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

As análises foram desenvolvidas utilizando o software de elementos finitos Abaqus, versão 6.14, utilizando o método de perturbação linear *Buckle*, presente em sua biblioteca, do qual são obtidos autovalores e autovetores que correspondem à carga crítica e a configuração deformada da estrutura, respectivamente (SURYOATMONO; HO, 2002). Nas análises foram consideradas as seguintes características:

- I – Elementos e malha tipo *Shell* (casca), composta por elementos S3 e S4R, com tamanho médio de 10 mm.
- II – Aplicação de carregamento uniformemente distribuído no eixo da mesa superior e vinculações do tipo garfo.
- III – Aço com módulo de elasticidade de 200 GPa e coeficiente de Poisson de 0,3.

2.1 ANÁLISE PARAMÉTRICA

Para possibilitar a verificação de diferentes rigidezes e esbeltezes, foi realizado um estudo paramétrico onde buscou-se variar as dimensões da seção transversal através da análise de diversos perfis, além de variar o comprimento dos elementos. O tamanho da abertura foi definido como sendo igual à altura do perfil original, que gerou o perfil alveolar. A Tabela 1 apresenta as seções transversais e seus respectivos comprimentos analisados.

Sendo assim, foram realizadas um total de 128 análises, sendo 64 perfis de aberturas celulares e 64 perfis de aberturas casteladas.

2.2 ANÁLISES ANALÍTICAS

Para o cálculo analítico foram utilizados os procedimentos de cálculo de momento crítico elástico constantes no Anexo G da norma NBR 8800:2008 e no item 2 da norma SN003a-EN-EU. Para o cálculo das propriedades geométricas foram adotados dois métodos, um em que se calcula as propriedades na seção de montante da alma, onde não há corte por alvéolos e outra através da proposta desenvolvida por Carvalho, Rossi e Martins (2022), onde se é realizado uma média ponderada entre a propriedade geométrica na seção cheia e a propriedade geométrica da seção cortada pelo alvéolo (seção duplo T), utilizando como ponderação a área da alma sólida e a área vazada, como mostra a Figura 2.



Tabela 1: Características geométricas dos perfis analisados

Perfil	d ₀ (mm)	b _f (mm)	t _f (mm)	t _w (mm)	Comprimentos analisados (m)
IPE160	160	82	7.4	5	4, 6, 8, 10 e 12
IPE180	180	91	8	5.3	4, 6, 8, 10 e 12
IPE200	200	100	8.5	5.6	4, 6, 8, 10 e 12
IPE220	220	110	9.2	5.9	4, 6, 8, 10 e 12
IPE240	240	120	9.8	6.2	4, 6, 8, 10 e 12
IPE270	270	135	10.2	6.6	4, 6, 8, 10 e 12
IPE300	300	150	10.7	7.1	4, 6, 8, 10 e 12
IPE330	330	160	11.5	7.5	4, 6, 8, 10 e 12
IPE360	360	170	12.7	8	6, 8, 10 e 12
IPE400	400	180	13.5	8.6	6, 8, 10 e 12
IPE450	450	190	14.6	9.4	6, 8, 10 e 12
IPE500	500	200	16	10.2	6, 8, 10 e 12
IPE550	550	210	17.2	11.1	6, 8, 10 e 12
IPE600	600	220	19	12	6, 8, 10 e 12

Fonte: Autores, 2023

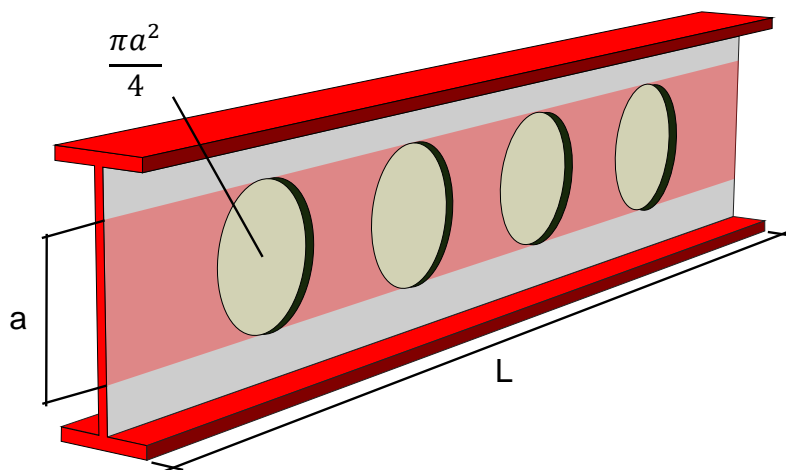


Figura 2: Proposta de cálculo para constante de torção

Fonte: Autores, 2023

$$J_{med} = \frac{n \left(3 \frac{\pi a^2}{4} \right)}{La} J_{2T} + \left(1 - \frac{n \left(3 \frac{\pi a^2}{4} \right)}{La} \right) J_{sólido} \quad (1)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 3 mostra os relação entre a carga crítica analítica e a carga crítica obtida através das análises numéricas para perfis celulares, sendo que as Figuras 3a e 3c utilizam o método de cálculo das propriedades geométricas no montante da alma e a Figuras 3b e 3d utilizam a proposta de cálculo apresentada na seção 2.2.



É possível observar que ambos os procedimentos normativos apresentaram caráter otimista em relação ao obtido pelo modelo numérico, sendo tal situação desfavorável à segurança, sendo que em todos os casos a norma brasileira apresenta erros maiores em relação à norma europeia.

O método de cálculo de propriedades geométricas na seção cheia não se demonstra tão efetivo pois apresenta erros maiores que 10% mesmo no caso da norma europeia. Já o procedimento de cálculo utilizando a média ponderada da constante de torção se demonstrou muito efetivo em reduzir o erro analítico em ambas as normas. Vale ressaltar ainda que ambos os métodos de cálculo obtiveram variações maiores conforme a esbeltez global dos perfis diminui.

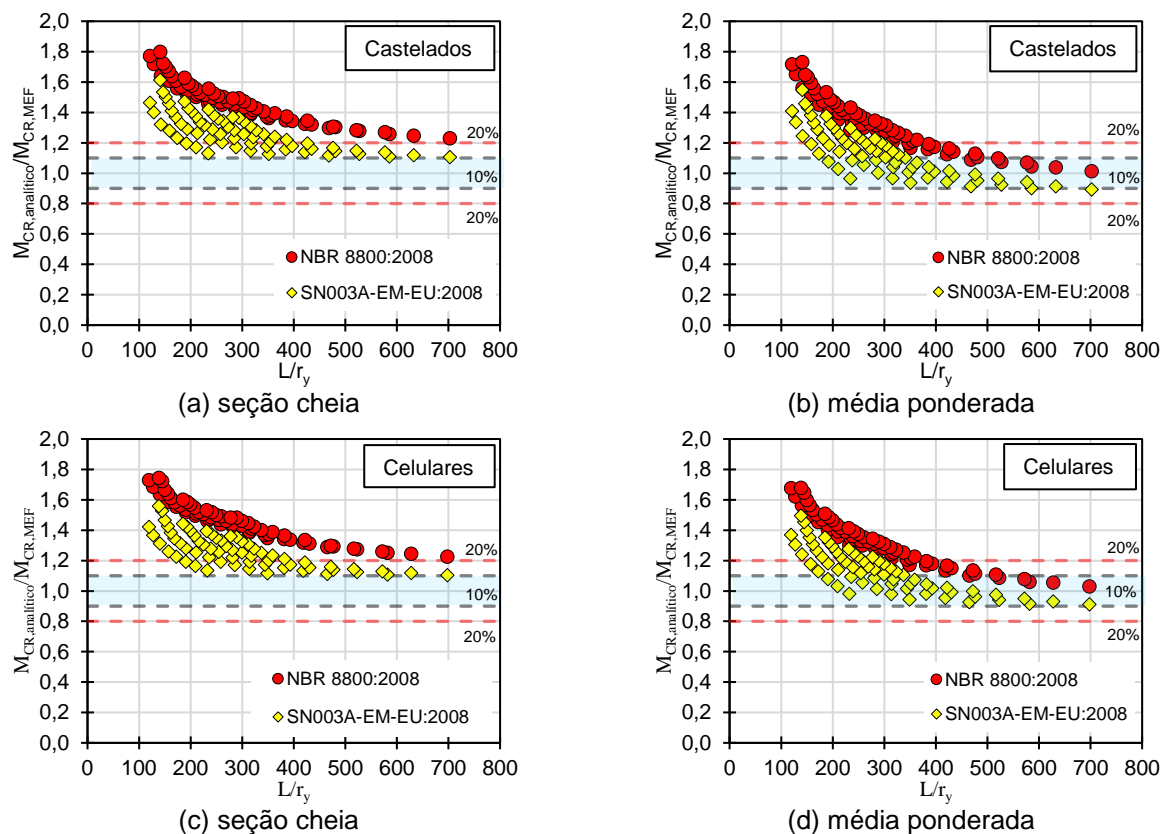


Figura 3: Relações entre momento crítico analítico e obtidos por análise numérica
Fonte: Dados da pesquisa

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo analisar o momento crítico elástico em vigas de aço alveolares com aberturas celulares e casteladas, comparar os resultados obtidos pelo modelo numérico com procedimentos analíticos e propor um método de correção dos cálculos para aproximar de forma melhor os resultados.

Foi concluído que os procedimentos analíticos da norma NBR 8800:2008 e da norma SN003a-EN-EU se demonstram otimistas em relação ao momento crítico elástico de perfis alveolares submetidos a cargas uniformemente distribuídas, quando o cálculo das propriedades geométricas é feito na seção cheia, o que é desfavorável à segurança no cálculo dessas estruturas. Além disso a variação entre o momento analítico e numérico tendem a aumentar com a diminuição da esbeltez.

Por fim, inferiu-se também que a correção na constante de torção por meio da média ponderada entre a área sólida e a área dos alvéolos se demonstrou positiva em diminuir o



caráter otimista dos procedimentos normativos e diminuem consideravelmente o a variação entre o analítico e o modelo numérico.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8800. Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios, standard.

CARVALHO, A. S.; ROSSI, A.; MARTINS, C. H. Assessment of lateral–torsional buckling in steel I-beams with sinusoidal web openings. **Thin-Walled Structures**, v. 175, p. 109242, 1 jun. 2022.

NSEIR, Joanna et al. Lateral torsional buckling of cellular steel beams. In: **Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council**. 2012. p. 18-21.

PANEDPOJAMAN, P.; THEPCHATRI, T.; LIMKATANYU, S. Novel design equations for shear strength of local web-post buckling in cellular beams. **Thin-Walled Structures**, v. 76, p. 92–104, 2014.

SN003A-EN-EU. NCCI : Elastic critical moment for lateral torsional buckling. Ncci, p. 1–13, 2008. SONCK, D.; BELIS, J. Lateral-torsional buckling resistance of cellular beams. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 105, p. 119–128, 2015.

SONCK, D.; BELIS, J. Lateral-Torsional Buckling Resistance of Castellated Beams. **Journal of Structural Engineering**, v. 143, n. 3, p. 04016197, 2017.

SURYOATMONO, B.; HO, D. The moment-gradient factor in lateral-torsional buckling on wide flange steel sections. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 58, n. 9, p. 1247–1264, 2002.