

ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE VIGAS CASTELADAS DE AÇO EM PADRÃO LITZKA COM ABERTURAS HEXAGONAIS E OCTOGONAIS

Manuella M. de Lima¹, Washington B. Vieira¹, André L. R. Brandão¹

¹*Instituto de Engenharias Integradas, Universidade Federal de Itajubá
Rua Irmã Ivone Drummond, 200, Distrito Industrial, 35903-087, Itabira/MG, Brasil
manuellamarinsdelima@gmail.com, vieira@unifei.edu.br, andreriqueira@unifei.edu.br*

Abstract. Castellated steel beams (CSB) are manufactured from the zigzag cut of the web of the I-sections, whose halves are displaced and welded, making the beam expand in height, without changing the profile mass. Changing dimensional cutting parameters makes it possible to create several geometric patterns of castellated beams. The study in question addresses the addition of expansion plates to the Litzka CSB, further increasing the height of the profile, and consequently the moment of inertia and the stiffness of the section, thus enabling the execution of larger spans. The CSB has an architectural and functional appeal, due to their light appearance and the possibility of passing ducts through the alveoli. In order to compare the results obtained, the cross section was varied, ranging between supports, types of loading and the size of the expansion plate for performing numerical analysis using the finite element method. The numerical model considers the initial geometric imperfections, residual stress and physical nonlinearities derived from the manufacturing process. The results show the comparison of the structural behavior and the resistant capacity of CSB with different characteristics.

Keywords: castellated beams, numerical modeling, finite element method.

1 Introdução

O uso de estruturas metálicas na construção civil foi impulsionado no século XVIII na Inglaterra, com a Revolução Industrial, visto que o aço possibilita soluções construtivas inovadoras, eficientes e de alta qualidade. Este tipo de construção vem ganhando cada vez mais espaço no mercado, por diversos motivos como, redução do tempo de construção, racionalização no uso de materiais e aumento da produtividade.

Vigas casteladas de aço são elementos estruturais fabricados a partir da expansão de perfis I, que são submetidos a um corte longitudinal ao longo da alma, possibilitando o destaque das duas metades, que são separadas, deslocadas longitudinalmente e soldadas entre si, com o objetivo de formar um perfil mais alto, com aberturas hexagonais ou octogonais – caso quando utilizado chapas expansoras – ordenadamente espaçadas ao longo da alma, chamadas de alvéolos (Fig. 1). Como a altura da seção da viga castelada é aumentada, há o incremento do momento de inércia em relação ao eixo principal de flexão, resultando no aumento da rigidez. Com o acréscimo da rigidez, a seção resiste a uma solicitação maior, sem que haja aumento no peso do perfil utilizado, o que permite um melhor aproveitamento do material.

Dentre as vantagens das vigas casteladas de aço, vale ressaltar que proporcionam passagem de dutos e tubulações de serviço, evitando aberturas não projetadas, além de transmitir uma certa leveza visual do ponto de vista arquitetônico. Entretanto, segundo Vieira *et al.* [1] a presença de alvéolos modifica o comportamento estrutural da viga, fator indispensável a ser considerado em projeto, visto que as vigas casteladas podem apresentar modos de colapso diferentes das vigas de alma cheia.

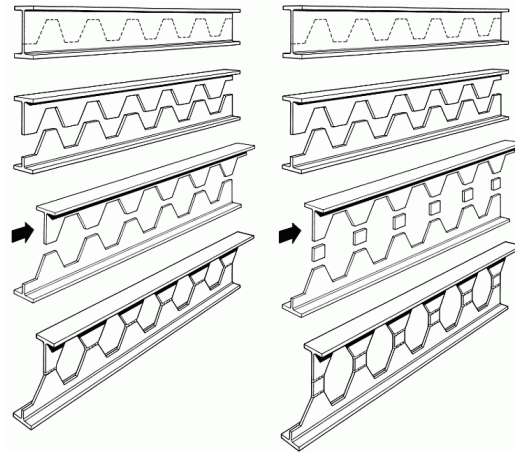


Figura 1. Processo de fabricação de vigas casteladas.

2 Referencial Teórico

2.1 Aspectos gerais

Os elementos das vigas casteladas e a simbologia adotada neste trabalho são ilustrados na Fig. 2.

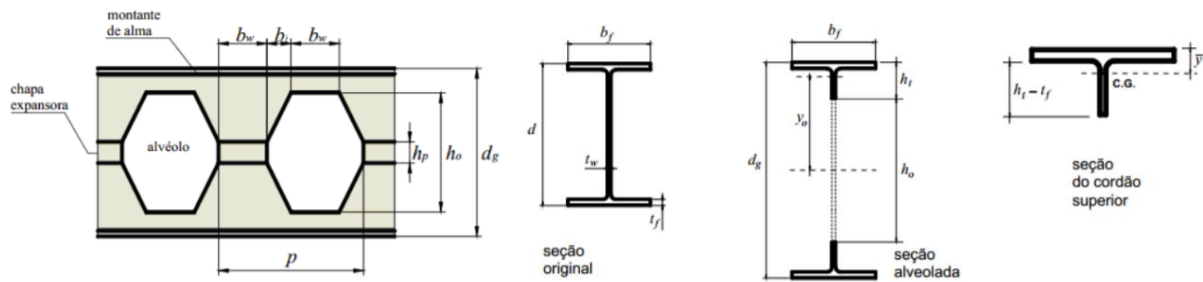


Figura 2. Elementos constituintes das vigas casteladas e simbologia adotada.

Existem diferentes tipologias para fabricação de vigas casteladas de aço, devido a variação da inclinação do corte longitudinal, altura das aberturas e razão de expansão da viga. O padrão Litzka (Fig. 3) é caracterizado pela regularidade dimensional ao longo do corte. O alvéolo é um hexágono regular, com ângulo de inclinação com a horizontal de 60° , e a distância entre duas aberturas adjacentes é o triplo da largura mínima do montante. Denomina-se padrão Litzka com chapa expansora aquela viga com a inserção de uma chapa de aço adicional nos montantes, mantidas as demais características da castelação.

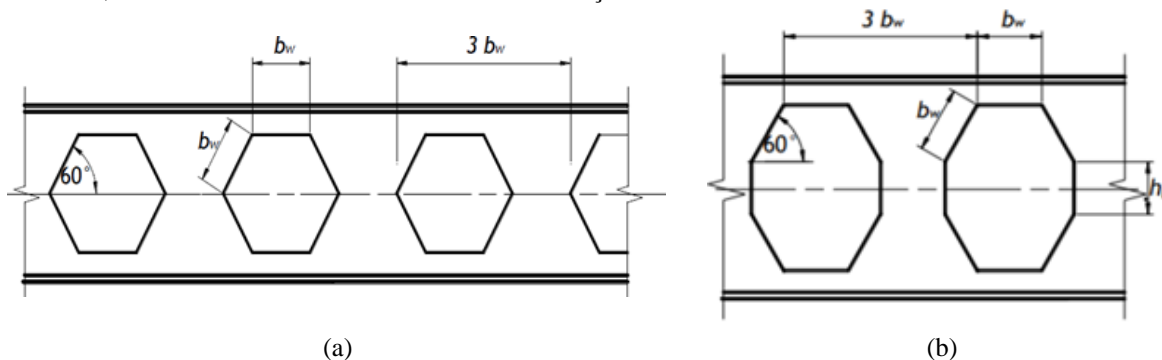


Figura 3. Geometria de viga castelada em padrão Litzka: (a) sem chapa e (b) com chapa expansora.

2.2 Modos de colapso

Estudos experimentais presentes na literatura caracterizam os seguintes modos de colapso em vigas casteladas de aço [2, 3, 4, 5]:

- a. mecanismo Vierendeel (MV) identificado pela formação de quatro rótulas plásticas, nos cantos dos alvéolos e ocorre devido aos altos valores de esforço cortante, com a deformação das aberturas e formação de um paralelogramo na região crítica da viga;
- b. flambagem do montante de alma por cisalhamento (FMA) é caracterizado pelo deslocamento lateral acompanhado de rotação em torno do eixo da linha diagonal e ocorre devido ao esforço cortante;
- c. flambagem do montante de alma por compressão (FMAC) definido pelo deslocamento para fora do plano da viga, não acompanhado de torção; ocorre em montantes sujeitos a força concentrada;
- d. flambagem lateral com torção, em função do comprimento destravado, similar às vigas de alma cheia;
- e. mecanismo de flexão, plastificação dos “tês” sob momento fletor, similar às vigas de alma cheia;
- f. flambagem local da mesa, instabilidade local similar às vigas de alma cheia.

3 Metodologia

Este trabalho constituiu de simulações numéricas com o uso do método dos elementos finitos de vigas casteladas de aço em padrão Litzka com chapa expansora.

As análises foram realizadas com o uso do ABAQUS/CAE, replicando-se o modelo numérico desenvolvido, calibrado e validado por Vieira [6], com o uso de diversos resultados experimentais do próprio autor e de outros autores, e com um aperfeiçoamento validado por Pereira [7]. As principais características desse modelo são: geometria tridimensional, com elementos do tipo SHELL; aço com modelo constitutivo elastoplástico perfeito, com resistência ao escoamento de 345 MPa (ASTM A572 Grau 50) e propriedades mecânicas conforme a ABNT NBR 8800 [8]. As condições de contorno empregadas buscam representar a situação real na prática de vigas biapoiadas, com as seguintes vinculações: a) impedimento ao deslocamento vertical nas extremidades; b) impedimento ao deslocamento longitudinal em uma das extremidades; c) impedimento ao deslocamento lateral nos pontos de apoio e de aplicação de carga concentrada (na mesa superior) ou travamento lateral contínuo na mesa superior no caso de carga distribuída. Adotou-se o comportamento do aço como elastoplástico perfeito, baseado no modelo constitutivo bilinear. Utilizou-se uma malha com elementos quadrilaterais, com seis graus de liberdade por nó, do tipo S4R da biblioteca do ABAQUS, com dimensão de $15 \times 15 \text{ mm}^2$ para as vigas com relação $L_v/d_g = 8$ e dimensão $10 \times 10 \text{ mm}^2$ para as demais vigas (Fig. 4). A análise numérica não linear é iniciada com a deformada obtida de uma análise prévia de flambagem, escolhendo-se o autovetor de menor energia de deformação com respectivo autovalor positivo; a essa deformada atribui-se a imperfeição inicial máxima igual a $d_g/100$. Consideraram-se as tensões residuais utilizando-se a distribuição proposta por Vieira [6].

O programa de ensaios numéricos realizados consistiu de vigas casteladas com chapas expansoras com dimensões iguais a $0,25d$; $0,375d$ e $0,50d$. Foram analisadas vigas a partir de 12 diferentes perfis brasileiros (o mais esbelto, o mais robusto e o intermediário das séries W250, W310, W360 e W460), com quatro variações de comprimento do vão (L_v igual a $4d_g$, $5d_g$, $6d_g$ e $8d_g$) e quatro tipos de carregamento (uma força concentrada no centro do vão, CC1; duas forças concentradas nos terços médios do vão, CC2; três forças concentradas equidistantes entre si e entre os pontos de apoio nas extremidades, CC3; e carregamento uniformemente distribuído, CD), totalizando assim 576 análises.

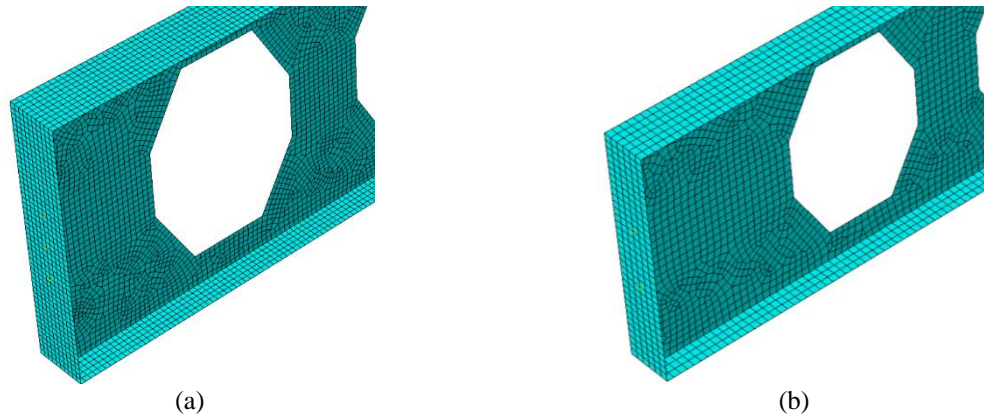


Figura 4. Malhas com elementos quadrilaterais utilizadas, com as dimensões de (a) 10x10 mm² e (b) 15x15 mm².

4 Resultados e Discussão

Concordante à literatura, nos ensaios numéricos analisados neste trabalho foram observados predominantemente dois modos de colapso (Fig. 5): mecanismo Vierendeel (MV) e flambagem do montante de alma (FMA). Observaram-se também vigas que colapsaram por modos comuns às vigas de alma cheia, como flambagem lateral com torção (FLT), mecanismo de flexão (MF) e flambagem local da mesa (FLM).

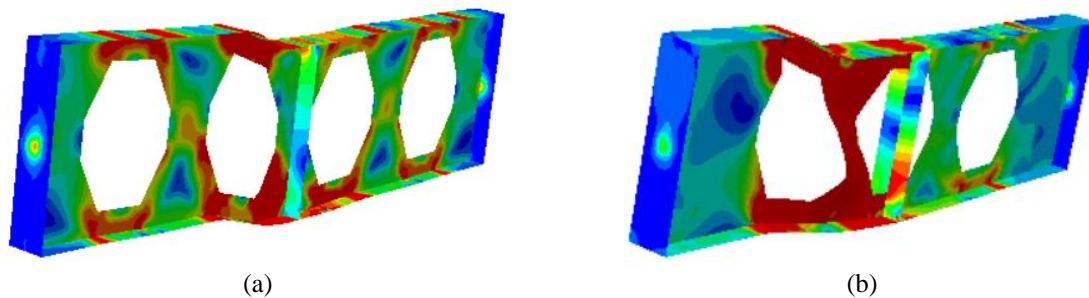


Figura 5. Principais modos de colapso: (a) mecanismo Vierendeel e (b) flambagem do montante de alma.

A flambagem do montante de alma foi predominante nas vigas curtas sob uma força concentrada no centro do vão, pelo fato de o esforço cortante ser mais importante nessas vigas e ser constante, em módulo, em todo o comprimento da viga. Esse modo de colapso também é predominante nas vigas com chapa expansora de maior altura, devido ao acréscimo da esbelteza da alma do perfil. O mecanismo Vierendeel, por sua vez ocorreu predominantemente nas vigas em que há melhor distribuição dos esforços no vão (duas e três forças concentradas ou carregamento distribuído). Os poucos casos observados de flambagem lateral com torção foram em vigas sob uma força concentrada (maior comprimento destravado) e relação vão-altura igual a 8. Algumas poucas vigas chegaram a colapsar por mecanismo por flexão: possuíam relação vão-altura igual a 6 ou 8, força concentrada no centro do vão, menor esbelteza de alma no perfil original e chapa expansora com altura $0,375d$ ou inferior.

Para realizar uma análise mais minuciosa dos resultados obtidos de capacidade resistente foram analisadas as vigas submetidas a uma força concentrada no centro do vão, com comprimentos iguais a $4d_g$ e $8d_g$, com a finalidade de comparar os resultados obtidos com os presentes na literatura de perfis de vigas casteladas sem chapa expansora.

Neste estudo da variação da altura da chapa expansora (h_p), manteve-se constante a relação vão-altura das vigas (L_v/d_g) como parâmetro para comparação. Tendo em vista que com o aumento da altura da chapa expansora, aumenta-se igualmente a altura d_g da viga castelada, para manter-se a mesma relação vão-altura, as vigas similares possuem comprimento de vão L_v diferentes, mesmo tendo as dimensões de largura dos alvéolos e largura dos montantes com mesma dimensão. Mantendo-se o montante de extremidade (espaço entre o apoio e o alvéolo adjacente) com a largura de no mínimo a largura b_w dos demais montantes de alma e adotando a maior quantidade possível de alvéolos para cada viga, pode-se ter vigas de mesma relação vão-altura com número de alvéolos diferentes, bem como com largura do montante de extremidade diferentes (Fig. 6).

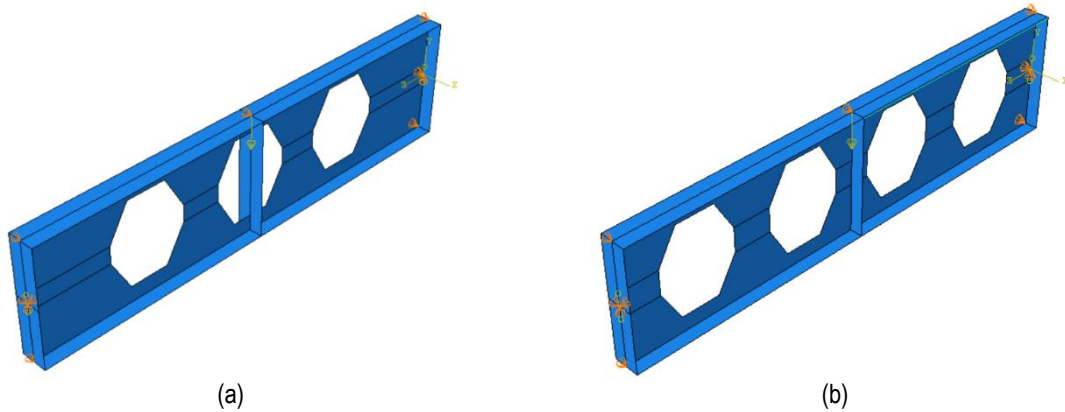


Figura 6. Viga castelada no perfil W250x44,8, com comprimento $4d_g$ e presença de chapa expansora com altura de (a) $0,25d$ e (b) $0,375d$.

Embora o incremento de altura da chapa expansora h_p aumente o momento de inércia da viga castelada, esse aumento de altura também amplifica o índice de esbeltez da alma dessas vigas, e, em alguns casos, como o exemplo ilustrado na Fig. 6, reduz a área de alma em uma região da viga. Na Fig. 7 são apresentadas curvas força-deslocamento das vigas da Fig. 6. Observa-se que, a viga com chapa expansora maior ($h_p = 0,375d$) possui uma capacidade resistente superior – cerca de 2% de aumento na força máxima resistida ou 18% de aumento no momento fletor resistente, causado pelo aumento de inércia da seção transversal (especialmente na região de momento fletor máximo). Por outro lado, a rigidez da viga com menor altura de chapa expansora ($h_p = 0,25d$) foi significativamente maior: atingiu a capacidade última com um deslocamento de 12 mm, enquanto a viga com $h_p = 0,375d$ teve um deslocamento na carga máxima igual a 31 mm.

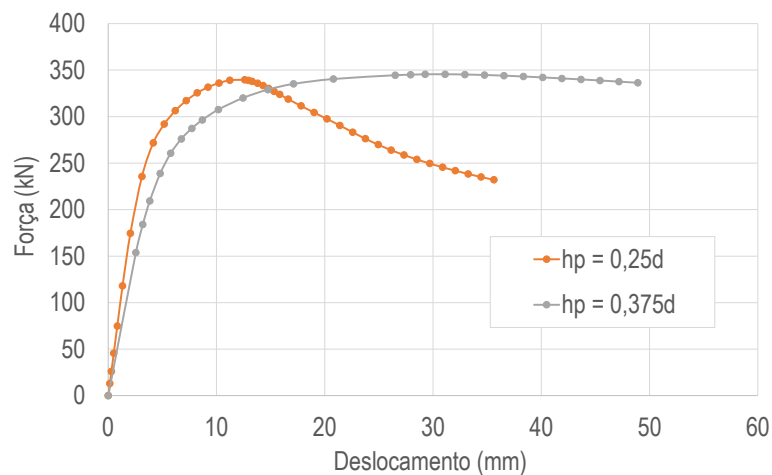


Figura 7. Força por deslocamento do perfil W250x44,8, com comprimento de $4 d_g$ e presença de chapa com altura de $0,25d$ e $0,375d$.

As vigas mais curtas, de comprimento igual a $4 d_g$ que obtiveram aumento do número de alvéolos em relação à viga similar com altura da chapa (h_p) imediatamente inferior estão marcadas com um “x” no gráfico da Fig. 8. As vigas com comprimento $L_v = 8 d_g$ (Fig. 9) apresentaram, independente do perfil original, a mesma quantidade de alvéolos para cada altura de chapa expansora utilizada. As vigas sem chapa expansora ($h_p = 0$) possuem seis alvéolos, as vigas com $h_p = 0,25d$ possuem sete alvéolos para e as vigas com $h_p = 0,375d$ e $h_p = 0,50d$ possuem oito alvéolos.

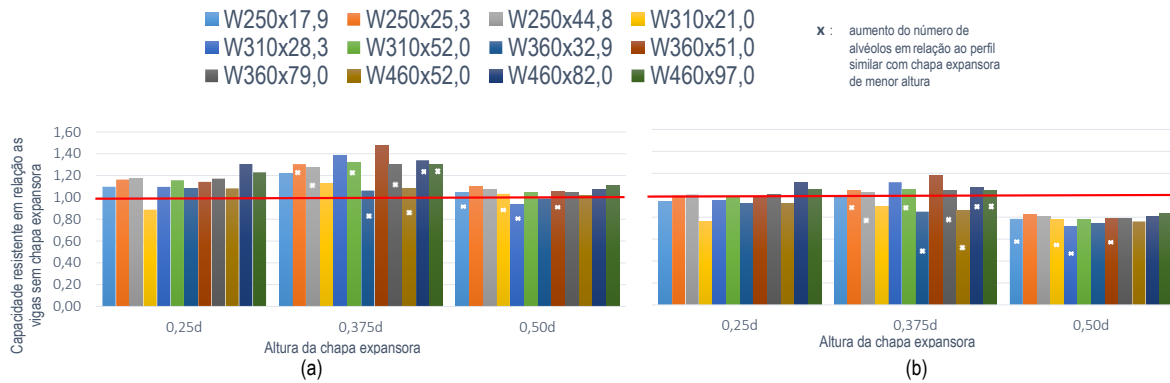


Figura 8. Relação entre a capacidade resistente das vigas casteladas com e sem chapa expansora, com $L_v = 4d_g$ e uma força concentrada no centro do vão, em termos de: (a) momento fletor e (b) força cortante.

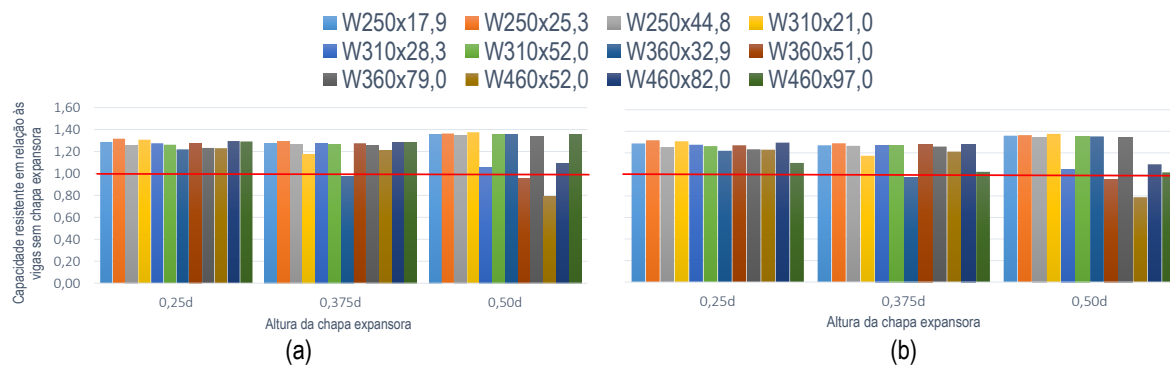


Figura 9. Relação entre a capacidade resistente das vigas casteladas com e sem chapa expansora, com $L_v = 8d_g$ e uma força concentrada no centro do vão, em termos de: (a) momento fletor e (b) força cortante.

Os resultados obtidos para as vigas mais curtas ($L_v = 4d_g$) com uma força concentrada mostraram que há, em praticamente todos os casos, aumento na capacidade resistente ao momento fletor em relação as vigas casteladas sem chapa expansora. No entanto, esse efeito não é constante em todas as vigas, sendo mais significativo naquelas com menor esbelteza de alma, tendo em vista que as vigas casteladas curtas com alma esbelta tendem a colapsar por flambagem do montante de alma, e, o incremento de altura no montante de alma aumenta sua esbelteza, de modo que o efeito do aumento de momento de inércia causado pela chapa expansora é praticamente anulado pelo efeito do aumento da esbelteza. O aumento da altura da chapa expansora de $h_p = 0,25d$ para $h_p = 0,375d$ nessas vigas mais curtas provoca ainda uma elevação na capacidade resistente – e aqui, a não uniformidade do efeito é causada não somente pela diferença de esbelteza de alma dos perfis, mas também pelo aumento na quantidade de alvéolos em alguns casos e pela alteração da configuração do ponto de aplicação de carregamento (sobre um alvéolo ou sobre um montante de alma, ver Fig. 6).

As vigas com comprimento $L_v = 8d_g$, por outro lado, apresentam um crescimento mais significativo e constante da capacidade resistente com a inserção da chapa expansora, tendo em vista que para essa relação altura-vão, os modos de colapso predominantes são aqueles de natureza global, seja plastificação ou flambagem lateral com torção, de forma que o incremento de momento de inércia é mais significativo. No entanto, para todos os casos, não há ganho de capacidade resistente com o aumento da altura da chapa expansora, indicando que para essa relação vão-altura, altura ótima de chapa expansora seria próxima de $0,25d$.

Em termos de esforço cortante resistente, para vigas de comprimento igual a $4d_g$ nota-se uma redução da capacidade em comparação a vigas sem chapa expansora, tendo em vista que nas vigas curtas, os modos de colapso ocorrentes são predominantemente relacionados à capacidade ao esforço cortante.

Em termos de capacidade resistente em um âmbito geral, abrangendo momento fletor e esforço cortante consta-se que a inserção das chapas expansoras tendem a incrementar a capacidade resistente em comparação as vigas similares sem adição de chapa. No entanto, ao se aumentar a altura da chapa expansora, o incremento de resistência diminui podendo haver redução da capacidade com chapas expansoras de maior altura.

5 Considerações Finais

Neste trabalho foi realizado um estudo comparativo do comportamento estrutural de vigas casteladas de aço padrão Litzka para três tamanhos de chapas expansoras quando submetidas a quatro tipos de carregamento: uma, duas e três forças concentradas e carregamento uniformemente distribuído. Realizou-se uma seleção de amostra dos resultados, com o intuito de realizar um estudo mais detalhado e minucioso, no qual escolheu analisar o comportamento de vigas com comprimentos de vão iguais a $4d_g$ e $8d_g$ e para o carregamento com uma força concentrada no centro do vão.

Os resultados mostraram que, na maioria dos casos, a inserção de chapas expansoras produz incremento na capacidade resistente, todavia o aumento da altura da chapa expansora não produz incremento de capacidade resistente indefinidamente, havendo, para cada caso, uma altura ótima de chapa expansora, em que a elevação do índice de esbeltez tenha efeito menos significativo que a elevação do momento de inércia produzido pelo aumento da altura do perfil. Para as configurações apresentadas neste trabalho, essa altura ótima parece ser algum valor próximo de $0,25d$.

O presente estudo oferece um suporte de dados significativo sobre modos de colapso e capacidade resistente apresentados pelas vigas casteladas de aço padrão Litzka com chapa expansora, sendo um amplo banco de dados para o desenvolvimento de futuros estudos e possíveis ajustes às formulações existentes na literatura sobre dimensionamento de vigas casteladas, da maneira mais vantajosa possível com segurança e economia. Uma sugestão para estudos futuros seria analisar economicamente se as chapas são vantajosas, tendo em vista que o incremento de altura da viga implica em aumento no custo de material e de mão de obra.

Agradecimentos. Os autores agradecem ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) – Recursos União pelo suporte financeiro a este trabalho e à Universidade Federal de Itajubá – *Campus* Itabira.

Declaração de autoria. Os autores confirmam que são os únicos responsáveis pela autoria deste trabalho, e que todo o material que foi incluído aqui como parte do presente artigo é de propriedade (e autoria) dos autores ou tem permissão dos proprietários para serem incluídos.

Referências

- [1] W. B. Vieira, G. S. Veríssimo, J. C. L. Ribeiro and J. L. R. Paes. Simulação numérica do comportamento estrutural de vigas casteladas de aço com ênfase na flambagem do montante de alma. *Ciência e Engenharia*, vol. 24: 105-113, 2015.
- [2] B. K. Dougherty. Buckling of web post in perforated beams. *Journal of the Structural Division*. 107:507-519;1981.
- [3] D. Kerdal and D. Nethercot. Failure Modes for Castellated Beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 4, 295-315.
- [4] R. Redwood and S. Demirdjian. Castellated beam web buckling in shear. *Journal of Structural Engineering*, v. 124, p. 1202-1207, 1998.
- [5] S. Demirdjian. *Stability of Castellated Beams Webs*, McGill University, 1999.
- [6] W. B. Vieira. *Simulação numérica do comportamento estrutural de vigas casteladas de aço com ênfase na flambagem do montante de alma*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, 2011.
- [7] H. M. S. Fernandes, W. B. Vieira, A. L. R. Brandão, P. H. F. M. Oliveira and J. Leocádio Neto. Estudo do comportamento estrutural de vigas casteladas de aço em padrão Litzka. In: *XIII SIMMEC - Simpósio de Mecânica Computacional*, 2018.
- [8] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8800: Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e de Concreto de Edifícios. Rio de Janeiro, 2008.