



ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE VIGAS CASTELADAS DE AÇO EM PADRÃO PEINER

Study of the structural behavior of Peiner castellated steel beams

José Leocádio Neto (P) (1); Washington Batista Vieira (2);
André Luis Riqueira Brandão (2); Henrique Mattos de Souza Fernandes (1);
Pedro Henrique Franco de Moraes e Oliveira (1)

(1) Graduando em Engenharia da Mobilidade, Universidade Federal de Itajubá, Itabira, MG, Brasil

(2) Eng. Civil, Prof. Dr., Universidade Federal de Itajubá, Campus Itabira, Itabira, MG, Brasil.

E-mail para Correspondência: jose_leoneto@hotmail.com; vieira@unifei.edu.br (P) Apresentador

Resumo: Este trabalho consiste no estudo do comportamento estrutural de vigas casteladas de aço em padrão Peiner. As vigas casteladas de aço são produzidas expandindo-se perfis I laminados, formando um perfil com maior altura – e, conseqüentemente, maior momento de inércia em relação ao eixo neutro – sem alteração do peso. A expansão das vigas faz com que estas tenham aberturas consecutivas ao longo da alma. A alteração nos parâmetros dimensionais de corte possibilita a criação de diversos padrões geométricos de vigas casteladas. Um dos mais usuais é o padrão Peiner, caracterizado por alvéolos com largura igual à altura. Para este estudo variaram-se os perfis originais (tabelados), o vão entre apoios e o tipo de carregamento para a realização de modelagem numérica com o ABAQUS, software baseado no método dos elementos finitos. O modelo numérico considera as imperfeições geométricas iniciais do perfil, as tensões residuais e não linearidade do material. Uma vez que as formulações para a predição da capacidade resistente de vigas casteladas apresentadas na literatura foram validadas apenas para vigas submetidas a uma única força concentrada no centro do vão, neste trabalho foram realizadas análises de flexão para diferentes tipos de carregamento, expondo-as a diferentes distribuições dos esforços solicitantes, a fim de fornecer meios para o ajuste de equações para avaliação da capacidade resistente de vigas casteladas de aço em padrão Peiner.

Palavras chaves: casteladas; vigas; modelagem; Peiner.

Abstract: This project consists of the study of the structural behavior of castellated steel beams (CSB) in Peiner pattern. CSB are produced by expanding I-hot rolled profiles, forming a section with higher height - and, consequently, greater moment of inertia with respect to the strong axis - without self-weight change. The expansion of the beams causes them to have consecutive openings along the web. The alteration in the dimensional parameters of cutting allows the creation of several geometric patterns of beams. One of the most common is the Peiner pattern, characterized by alveoli with width equal to height. For this study, the original profiles (tabulated), the span between supports and the



loading type were varied, to perform numerical modeling with the ABAQUS, software that is based in methods of finite elements. The numerical model considers the initial geometric imperfections of the profile and the residual stresses and the non-linearity in the material. Since the formations for the prediction of the resistant capacity of CSB in the literature were validated only for beams subjected to a single force concentrated in the center of the span, in this work were performed flexural analyzes for different types of loading, exposing them to different distributions of the requesting efforts, in order to provide means for the adjustment of equations for the evaluation of the resistant capacity of castellated steel beams in Peiner pattern.

Keywords: castellated; beams; modeling; Peiner.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

Os elementos horizontais das estruturas têm seu desempenho associado à rigidez e à resistência à flexão. Assim, ao desenvolver soluções para vigas, busca-se fazer ajustes na geometria das seções procurando a maximização da relação inércia/peso. Por este motivo, é usual a utilização de vigas de aço com perfis de seção I, onde a maior parte da área da seção transversal concentra-se nas mesas. Com o objetivo de aumentar ainda mais a relação inércia/peso foram pensadas as vigas casteladas.

Vigas casteladas são elementos estruturais fabricados a partir da expansão de perfis I, que são submetidos a um corte longitudinal ao longo da alma com traçado pré-determinado, possibilitando o destaque de duas metades, que são separadas, deslocadas longitudinalmente e soldadas entre si, com a intenção de formar, com a mesma quantidade de material, um perfil mais alto, porém com aberturas hexagonais ordenadamente espaçadas ao longo do eixo da alma, chamadas de alvéolos. O ganho de altura contribui favoravelmente com a resistência à flexão e as vigas casteladas também podem apresentar vantagens quanto ao aspecto arquitetônico, permitindo a passagem de dutos pelos alvéolos. O modelo de fabricação das vigas casteladas é apresentado na Figura 1.

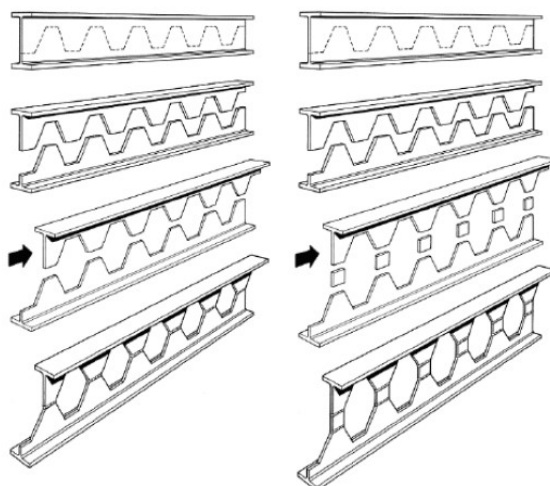


Figura 1 - Processo de fabricação de vigas casteladas de aço.

Fonte: (GRÜNBAUER, 2016).

1.2 Vigas casteladas de aço em padrão Peiner

Variando-se o traçado do corte é possível obter diferentes padrões geométricos de vigas casteladas, dentre os quais destaca-se o padrão Peiner ao longo da história. Esse padrão é caracterizado por alvéolos de altura igual à largura, inclinação do corte de $63,4^\circ$, razão de expansão entre a altura do perfil castelado e altura do perfil de alma cheia (dg/d)

igual à 1,5 e distância entre duas aberturas consecutivas igual ao triplo da largura mínima do montante de alma, como apresentado na Figura 2.

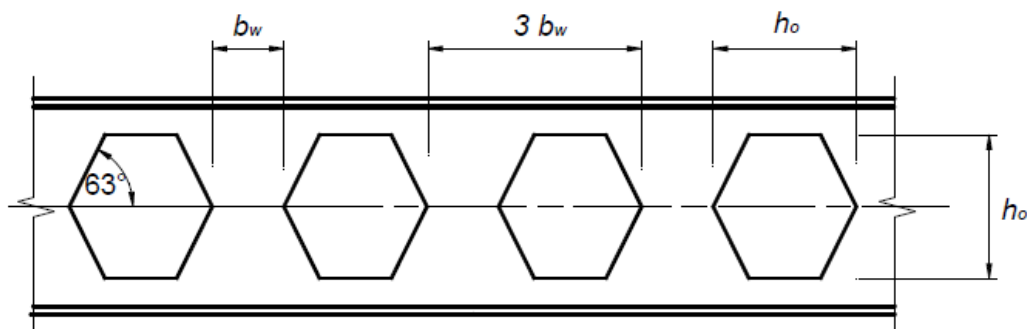


Figura 2 - Geometria de vigas casteladas em padrão Peiner

Fonte: (Vieira, 2015).

1.3 Modos de colapso

A presença de aberturas sequenciais na alma provoca variações no comportamento das vigas. Além dos modos de colapso ocorrentes nas vigas de alma cheia, destacam-se os seguintes: mecanismo Vierendeel, caracterizado pela formação de rótulas plásticas ao redor dos alvéolos devido à presença de altos valores de esforço cortante; flambagem do montante de alma por cisalhamento (FMA), que ocorre com deslocamento lateral com torção do montante; e flambagem do montante de alma por compressão (FMAC), que ocorre com deslocamento do montante semelhante ao enrugamento da alma em vigas de alma cheia.

2 MODELOS ANALÍTICOS PARA VERIFICAÇÃO A FMA E FLT

2.1 FMA: Modelo de Delesques (1968)

Delesques (1968) propõe uma formulação para a verificação do estado limite de flambagem do montante de alma. Segundo o mesmo, a verificação deste estado-limite utiliza, por referência, os valores da força cortante resistente de cálculo de escoamento do montante de alma por flexão considerando, apenas, a distribuição elástica das tensões.

Segundo Vieira (2015) o modelo para predição da capacidade resistente à FMA de Delesques (1968) apresenta soluções precisas para a flambagem elástica, mas propõem soluções empíricas aproximadas para o problema da FMA em regime inelástico, devido à dificuldade de efetuar uma análise mais refinada com os recursos disponíveis na época.

2.2 FMA: Modelo de Vieira (2015)

Vieira (2015) propõe um modelo de cálculo para determinação da capacidade resistente à flambagem do montante de alma para vigas casteladas de aço. No trabalho de Vieira (2015), foram desenvolvidos métodos de determinação da capacidade de carga



para vigas casteladas em padrão Litzka e Anglo-Saxão, contudo, ainda segundo Vieira (2015), o modelo proposto para o padrão Litzka pode ser utilizado também para vigas casteladas em padrão Peiner, por apresentar bons resultados, comparados aos resultados numéricos, e sempre em favor da segurança. O modelo de cálculo proposto possibilita uma análise mais realista da FMA, nos regimes elástico e inelástico.

Contudo, o modelo de Vieira (2015) para predição da capacidade resistente desses elementos foi desenvolvido compreendendo somente situações de carregamento concentrado no centro do vão. Neste estudo foi analisado o comportamento estrutural de vigas casteladas em padrão Peiner submetidas a diferentes tipos de carregamentos e, conseqüentemente, diferentes distribuições dos esforços solicitantes a fim de obter resultados para que seja possível propor adequações à metodologia de Vieira (2015).

2.3 FLT: Modelo de Bezerra *et al.* (2011)

O procedimento para obtenção do momento fletor resistente para o estado limite de flambagem lateral com torção proposto por (BEZERRA, 2011) tem como base adoção das prescrições da ABNT NBR 8800:2008 para vigas de alma sólida, mas substituindo-se os parâmetros de esbeltez λ_p e λ_r , relacionados respectivamente à plastificação e ao início do escoamento pelos valores correspondentes de comprimentos destravados, quais sejam L_p e L_r . Adotando-se como base as seguintes premissas:

- tomando as propriedades geométricas da seção vazada no centro dos alvéolos, com a constante de empenamento determinada conforme Kohnehpooshi e Showkati (2009) *apud* Abreu *et al.* (2010) e que se mostrou adequada também às vigas casteladas nos estudos realizados por Bezerra *et al.* (2010).
- substituindo o valor de L_r por um valor corrigido e acrescido de 20% ($L_{r,cor} = 1,2 L_r$);
- limitando o momento fletor máximo a um valor igual a 90% do momento de plastificação.

3 MODELAGEM NUMÉRICA

Para o estudo foram realizados ensaios computacionais com a utilização do *software* ABAQUS, pelo método dos elementos finitos, em que foram modeladas vigas casteladas fabricadas a partir de perfis brasileiros, variando-se o comprimento de vão (L) e os tipos de carregamento: (a) duas cargas concentradas nos terços médios da viga; (b) três cargas concentradas igualmente espaçadas entre si e os apoios, e (c) carregamento uniformemente distribuído. Foram utilizadas quatro famílias de perfis (W250, W310, W360 e W460) contendo três perfis diferentes cada: o mais esbelto, o intermediário e o mais robusto. Para cada um dos perfis foram modeladas vigas em 11 comprimentos diferentes, a saber: $2,5 d_g$, $4 d_g$, $5 d_g$, $6 d_g$, $8 d_g$, $10 d_g$, $12 d_g$, $15 d_g$, $20 d_g$, $25 d_g$ e $30 d_g$.

As vigas foram modeladas utilizando um modelo de casca fina deformável. Sob os carregamentos pontuais e nos apoios foram inseridos enrijecedores de alma. As condições de contorno utilizadas foram: impedimento do deslocamento vertical nas duas

extremidades; impedimento do deslocamento longitudinal em uma extremidade; e do deslocamento lateral nas extremidades e nos pontos de carga concentrada. Para os casos de carregamento distribuído, o travamento lateral foi contínuo por todo o eixo longitudinal da mesa superior. As condições de contorno e o modo de aplicação do carregamento são apresentados na Fig. 3.

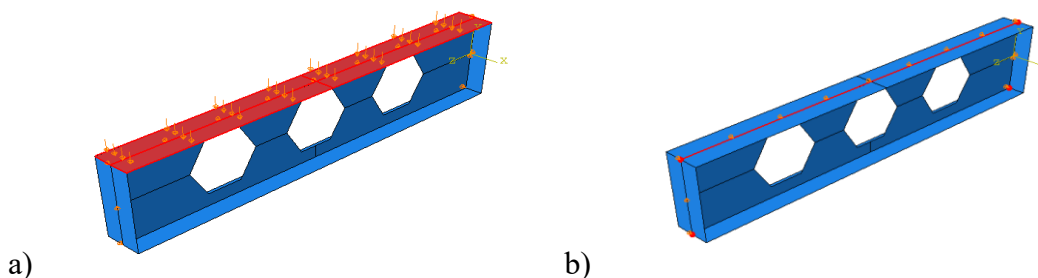


Figura 3 - Modelo mostrando (a) a aplicação do carregamento e (b) as condições de contorno.

Os elementos foram modelados em material com comportamento elastoplástico perfeito sem encruamento, com módulo de elasticidade de 200 GPa, coeficiente de Poisson igual a 0,3 e resistência ao escoamento igual a 345 MPa (aço ASTM A572 Grau 50).

A escolha da malha a ser utilizada foi feita com base em um estudo prévio realizado por Pereira (2016) acerca da precisão dos resultados em função do comprimento do vão. Tomou-se para esse trabalho a utilização da malha livre, com elementos do tipo S4R do ABAQUS. As dimensões da malha utilizada nos modelos são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Dimensões das malhas utilizadas nos modelos numéricos.

	Malha
$L/d_g \leq 3$	5 x 5 mm ²
$3 < L/d_g \leq 6$	10 x 10 mm ²
$6 < L/d_g < 20$	15 x 15 mm ²
$L/d_g \geq 20$	20 x 20 mm ² .

Realizou-se uma análise não linear, com algoritmo modificado Riks do ABAQUS, em que foram inseridas as imperfeições geométricas iniciais e tensões residuais. Os valores de imperfeições geométricas iniciais são aplicados associados à deformada de uma análise prévia de flambagem elástica, adotando-se o maior valor entre 1/1000 do vão e 1/100 da altura do perfil castelado, com base nos trabalhos de Silveira (2011) e Vieira (2015). As tensões residuais foram aplicadas conforme modelo proposto por Vieira *et al.* (2015), que é uma simplificação do modelo de Young (1972 apud Vieira *et al.*, 2015)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise dos Modos de Colapso

Após analisados os resultados dos modelos numéricos, pôde-se observar o comportamento das vigas casteladas para os diferentes tipos de carregamento, assim como identificar os modos de colapso ocorrentes nos perfis alveolares. É possível notar que os colapsos dos elementos seguiram determinados padrões. Para as vigas com relação $L/d_g \leq 10$ é evidente a predominância de ruínas locais, enquanto que para vigas com vão maiores, os modos de colapso globais acontecem com maior constância. Além disso, os modelos numéricos mostram a influência dos enrijecedores de alma, assim como das condições de contorno para a ocorrência dos modos de colapso. Nas vigas curtas submetidas a cargas pontuais os enrijecedores impediram a flambagem do montante de alma por compressão, fenômeno recorrente nas vigas com carregamento distribuído, que não contavam com esse elemento. E nos perfis longos com carga concentrada, devido ao comprimento livre, os modelos falharam, unanimemente, por flambagem lateral com torção (FLT), instabilidade que não ocorreu nas vigas com carga distribuída, em função do travamento contínuo na mesa, simulando o efeito de uma laje sobre estas, fazendo com que as mesmas falhassem por modos de colapso por plastificação, sendo mecanismo de flexão o modo de colapso mais frequente. As Tabelas 2, 3 e 4 mostram a frequência com que os modos de colapso ocorreram nas vigas.

Tabela 1- Modos de colapso ocorrentes para vigas submetidas a duas cargas concentradas.

Modo de Colapso	L/d_g											
	2,5	3	4	5	6	8	10	12	15	20	25	30
Vierendeel	12	12	12	12	3	1	7	1	-	-	-	-
FMA	-	-	-	-	9	11	5	3	2	-	-	-
FLT	-	-	-	-	-	-	-	8	9	12	12	12
MF	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-

Tabela 2 - Modos de colapso ocorrentes para vigas submetidas a duas três concentradas.

Modo de Colapso	L/d_g											
	2,5	3	4	5	6	8	10	12	15	20	25	30
Vierendeel	12	12	12	12	12	-	-	-	-	-	-	-
FMA	-	-	-	-	-	12	11	6	3	-	-	-
FLT	-	-	-	-	-	-	-	-	4	11	12	12
MF	-	-	-	-	-	-	1	6	5	1	-	-

Tabela 3 - Modos de colapso ocorrentes para vigas submetidas a carregamento distribuído.

Modos de Colapso	L/d_g											
	2,5	3	4	5	6	8	10	12	15	20	25	30
Vierendeel	-	-	-	2	6	5	3	3	2	-	-	-
FMA	-	-	-	-	6	1	4	2	1	-	-	-
FMAC	12	12	12	10	-	6	4	2	-	-	-	-
MF	-	-	-	-	-	-	1	5	9	12	12	12

4.2 Análise da Capacidade Resistente

Nas Figuras 4 a 9 são apresentados gráficos comparativos dos esforços solicitantes máximos de vigas fabricadas a partir de três perfis diferentes da série W360 para cada um dos três tipos de carregamento. Pode-se notar, pelos gráficos de momento fletor resistente, a influência das condições de contorno nas vigas com carregamento distribuído. Enquanto que os elementos sujeitos a cargas pontuais sofreram um decréscimo de resistência, devido à flambagem lateral com torção a flexão, a partir de determinado comprimento de vão, essa permaneceu constante para as vigas com carregamento distribuído, em função do travamento lateral contínuo, impedindo a ocorrência da instabilidade global.

Observa-se também que a capacidade resistente das vigas casteladas sujeitas a carregamento uniformemente distribuído ao longo do vão é, na maioria dos casos, ligeiramente superior à das vigas submetidas a forças concentradas aplicadas.

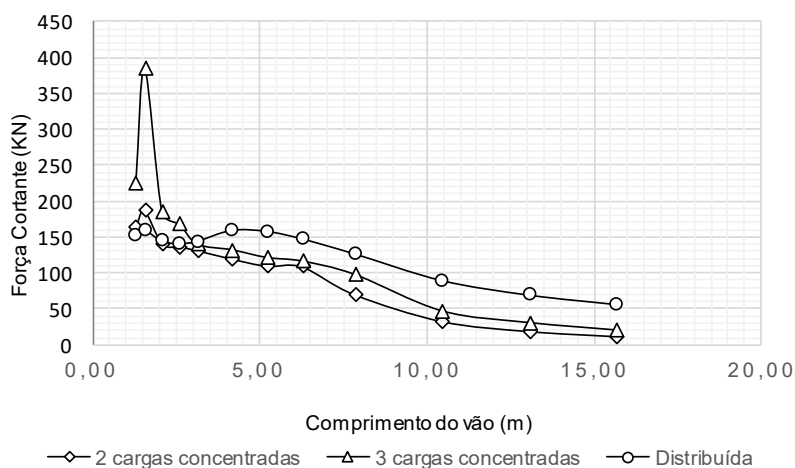


Figura 4 - Força cortante máxima do perfil W360x32.9

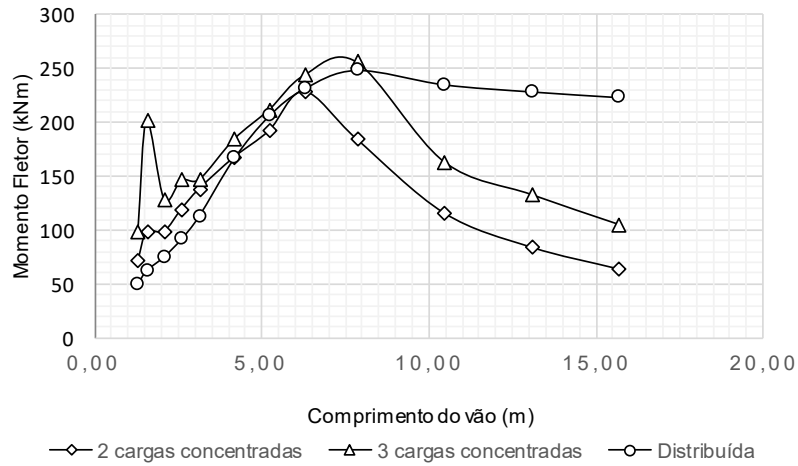


Figura 5 - Momento fletor máximo do perfil W360x32.9

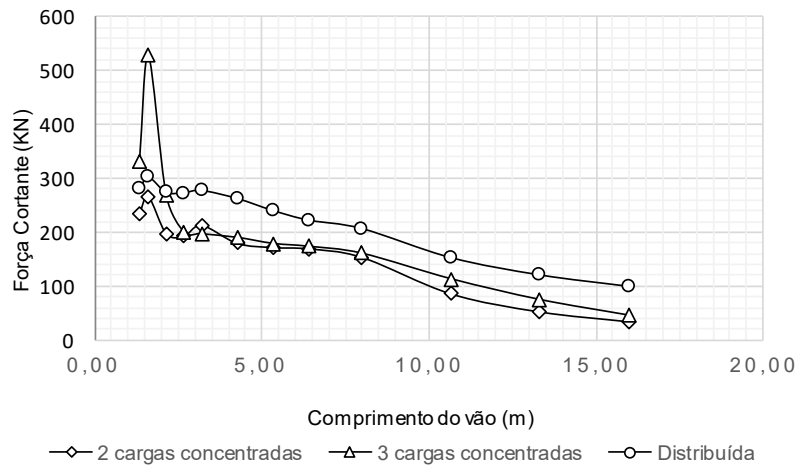


Figura 6 - Força cortante máxima do perfil W360x51

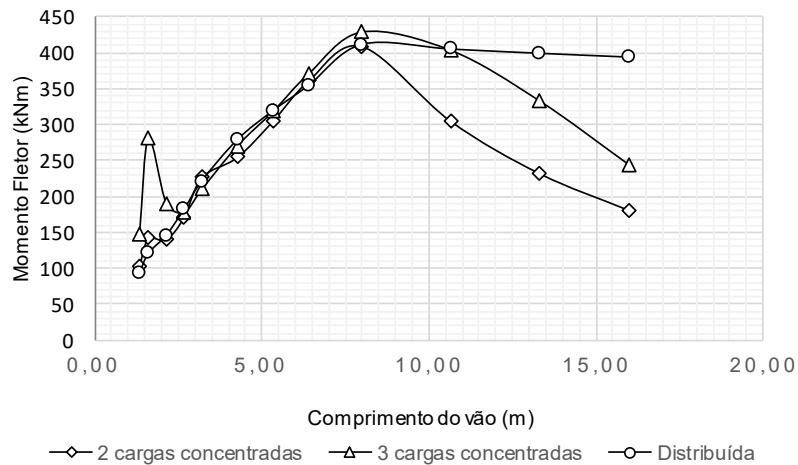


Figura 7 - Momento fletor máximo do perfil W360x51

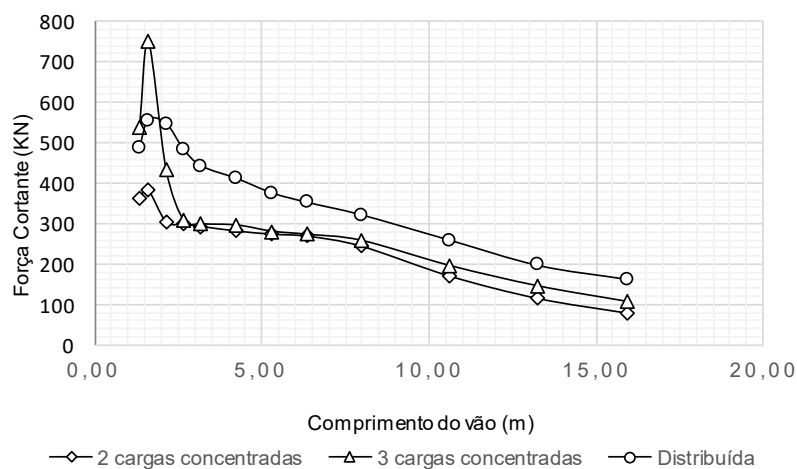


Figura 8 - Força cortante máxima do perfil W360x79

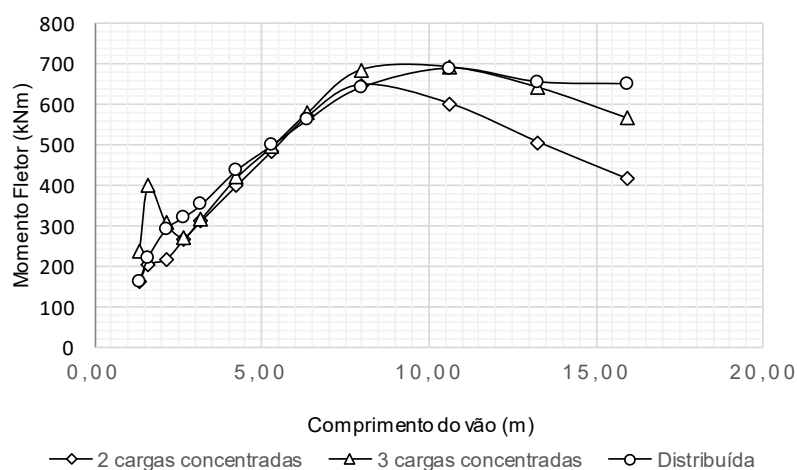


Figura 9 - Momento fletor máximo do perfil W360x79

4.3 Comparação dos resultados dos modelos numéricos com os modelos analíticos

Na Figura 10 é apresentada a comparação entre os resultados obtidos utilizando os métodos de cálculo de Delesques (1968), os de Vieira (2015) e os resultados do modelo numérico para as vigas que falharam por FMA, além dos resultados obtidos neste trabalho, foram utilizadas resultados do estudo de Pereira (2016), o qual analisou o comportamento de vigas casteladas submetidas a uma força concentrada no centro do vão.

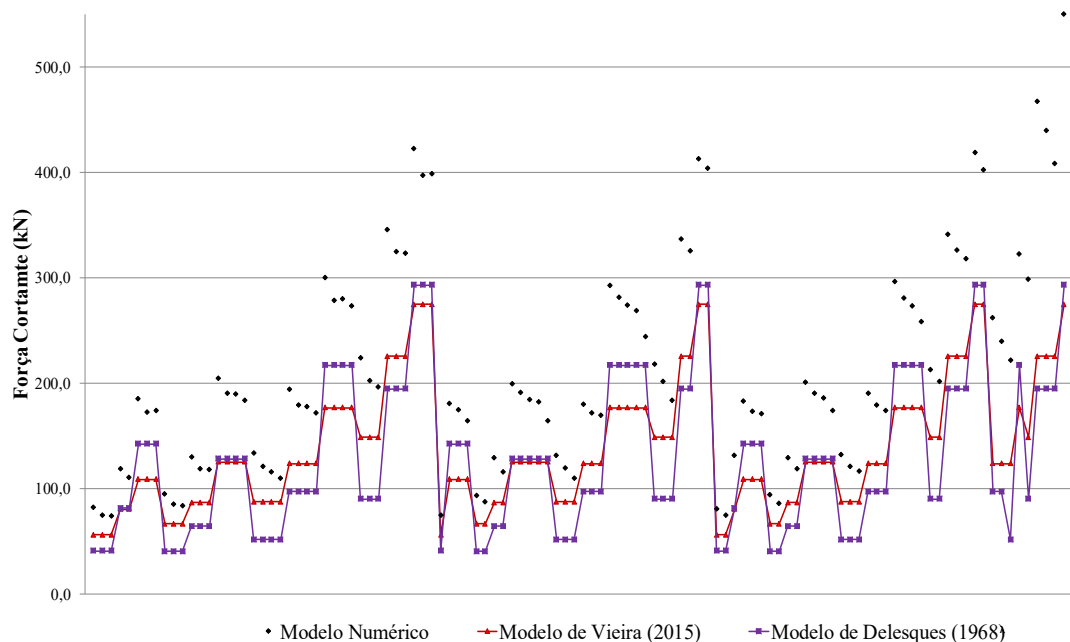


Figura 10- Resultados numéricos de FMA em comparação com o modelo de Vieira (2015) e Delesques (1968).

Comparando-se os métodos de cálculo propostos por Delesques (1968) e Vieira (2015), é possível notar que os resultados se mostram semelhantes com os resultados obtidos na simulação numérica, contudo, para algumas situações, é possível notar algumas divergências, que em geral, subestimam a capacidade resistente dos elementos estruturais. Tais divergências se justificam devido aos métodos não considerarem a influência da distribuição do esforço cortante e nem da influência do momento fletor na capacidade resistente à FMA.

Na Figura 11 são apresentados os resultados do modelo analítico de para predição de capacidade resistente à FLT proposto por Bezerra (2011). Observa-se uma excelente concordância entre os resultados numéricos e o valor calculado utilizando o referido modelo analítico.

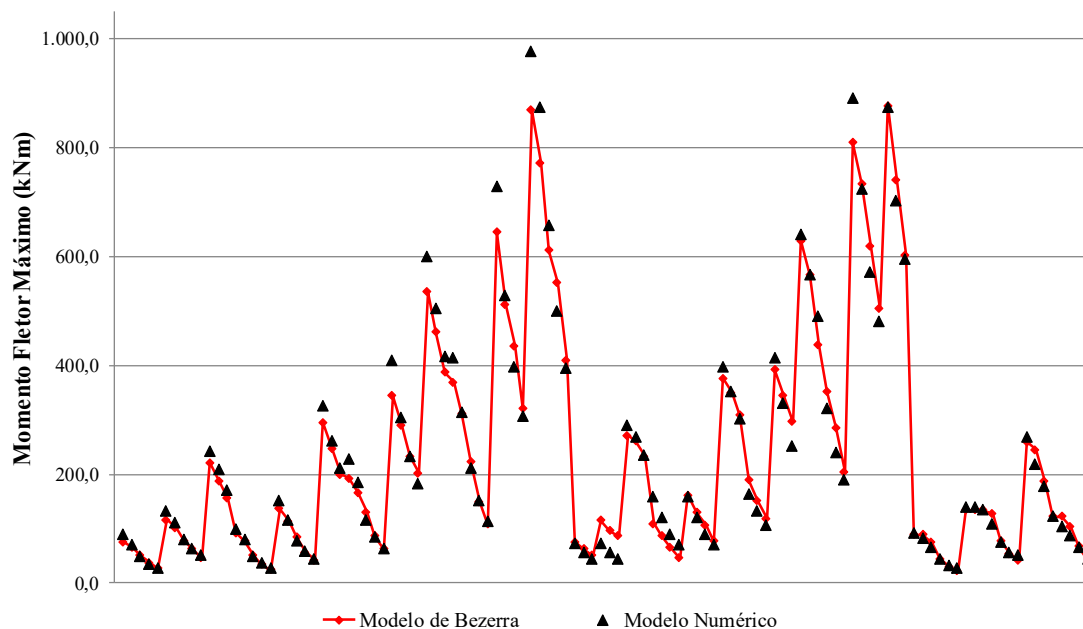


Figura 11 - Resultados numéricos de FMA em comparação com o modelo de Bezerra.

5 CONCLUSÕES

O estudo permitiu uma análise acerca do comportamento estrutural de vigas casteladas de aço em padrão Peiner, e a comparação do desempenho destas vigas em distintas situações de carregamento. Pode-se notar evidente relação entre o comprimento do vão e o modo de colapso ocorrente: vigas com a mesma relação vão/altura tendem a apresentar o mesmo modo de colapso para os diferentes perfis analisados. Para vigas curtas, $L/d_g \leq 6$, o colapso ocorre por falhas locais: Mecanismo Vierendeel é o mais frequente nas vigas com carga concentrada, e flambagem do montante de alma por compressão (FMAC), nas vigas com carga distribuída. Para as vigas com comprimento de vão intermediário, $6 < L/d_g \leq 15$, ocorre principalmente flambagem do montante de alma por cisalhamento (FMA) nas vigas sob cargas concentradas e modos de colapso diversos para vigas sob carga distribuída. As vigas longas, $L/d_g > 15$, com carregamento concentrado chegam ao colapso por FLT, ao passo que os modelos com carga distribuída resistem até a plastificação, devido ao impedimento ao deslocamento lateral.

Quanto à capacidade resistente, nota-se que as vigas sob carregamento distribuído possuem capacidade ligeiramente superior. Nas vigas longas ($L/d_g > 15$), a capacidade resistente à FLT é equivalente, mas, devido ao travamento lateral nas vigas com carga distribuída, a capacidade resistente é superior, colapsando por mecanismo de flexão.



Com relação à determinação da capacidade resistente de vigas casteladas à FMA, os modelos propostos por Delesques (1968) e Vieira (2015) mostram-se eficazes para tal. Contudo, ainda apresentam resultados que podem gerar superdimensionamento das vigas, o que é favorável à segurança, porém antieconômico.

Quanto ao modelo analítico para predição da capacidade resistente à FLT, após análise dos resultados a formulação pôde ser validada, visto que há grande convergência dos resultados da mesma com os obtidos com o modelo numérico. Ainda, que existam situações em que o modelo numérico apresente alguns desvios do modelo analítico, estes apresentam-se numa margem aceitável, podendo estes ser minimizados com utilização dos coeficientes de segurança normatizados para projetos, tornando, então, a equação favorável a segurança.

É importante ressaltar que para este estudo foram utilizadas as equações de cálculo de capacidade resistente à FMA, elaboradas para vigas casteladas em padrão Litzka, e aplicadas às vigas casteladas em padrão Peiner, o que justifica algumas divergências.

Os resultados apresentados neste trabalho constituem base relevante para estudos futuros acerca do tema, como exemplo, adequações às formulações existentes para verificação aos estados limites últimos de carga de vigas casteladas de aço em padrão Peiner.



AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais), à Universidade Federal de Itajubá pelo apoio e estrutura disponibilizados e à Universidade Federal de Viçosa pelo *software* ABAQUS concedido durante a pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Pereira, B.F.H. (2016). Estudo comparativo da capacidade resistente de vigas casteladas de aço em diferentes padrões. Trabalho Final de Graduação. Universidade Federal de Itajubá, Itabira, MG.
- Silveira, E.G. (2011). Avaliação do comportamento de vigas alveolares de aço com ênfase nos modos de colapso por plastificação. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- Vieira, W.B.; Paes, J.L.R.; Veríssimo, G.S.; Silveira, E.G.; Ribeiro, J.C.L. (2015). Desenvolvimento e validação de um modelo numérico para avaliação do comportamento de vigas alveolares susceptíveis ao colapso por flambagem do montante de alma. Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural, v. 12, n. 2, p. 46-65.
- Vieira, W.B. (2011). 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, Viçosa, MG.
- Vieira, W.B. (2015). Estudo numérico-experimental da flambagem do montante de alma em vigas casteladas de aço. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.