

ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE VIGAS CASTELADAS DE AÇO EM PADRÃO ANGLO-SAXÃO

Study of the structural behavior of Anglo-Saxon castellated steel beams

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

Correspondência: pedro_hfranco@yahoo.com.br; vieira@unifei.edu.br (P) Apresentador

Resumo: Este trabalho relata um estudo numérico do comportamento estrutural de vigas casteladas de aço produzidas no padrão Anglo-Saxão. As aberturas na alma das vigas modificam o comportamento estrutural do perfil, possibilitando a ocorrência de novos modos de colapso, o que deve ser considerado em projeto. A literatura contempla apenas estudos que avaliam o comportamento estrutural de elementos submetidos a uma carga concentrada no meio do vão, produzindo formulações matemáticas apenas para essa situação. Para obtenção da capacidade resistente e dimensionamento de vigas casteladas nos casos mais comuns de aplicação, decidiu-se modelar vigas submetidas a duas e três cargas concentradas aplicadas simetricamente e carregamento uniformemente distribuído ao longo do vão. Com um modelo numérico de elementos finitos capaz de representar vigas casteladas considerando imperfeições geométricas iniciais e tensões residuais, obtiveram-se resultados de capacidade resistente dessas vigas. Com os resultados, foram feitas comparações qualitativas em termos capacidade resistente e modos de colapso observados. Além disso, os modelos matemáticos da literatura foram avaliados com base nos resultados obtidos. Este trabalho fornece meios para ajustes nas equações para a avaliação da capacidade resistente de vigas casteladas de aço, sobretudo quanto ao padrão Anglo-Saxão.

Palavras chaves: casteladas, vigas, modelagem, comportamento.

Abstract: This paper is a study of the behavior of castellated steel beams produced in Anglo-Saxon pattern and numerically modeled. The openings in the web change the behavior of the steel frame, allowing the occurrence of new modes of collapse, which needs to be considered in the project. The literature only has cases which evaluate structural behavior of elements submitted to a concentrated load at the middle of the span, producing equations only for this situation. In order to obtain the resistant capacity and castellated steel beams design in the most common cases of using, this study aims to evaluate beams submitted to two and three concentrated loads equidistantly and uniformly distributed load in the entire span. With a finite elements numerical model representing castellated steel beams considering initial geometric imperfections and residual stresses, results of resistant capacity were obtained. With the results, qualitative comparisons were done in terms of resistant capacity and modes of collapse observed. Besides, the equations were evaluated based on the results obtained. This study provides means for adjustments in the equations for the evaluation of the resistant capacity of castellated steel beams, mainly in relation to the Anglo-Saxon pattern.

Keywords: *castellated, beams, modeling, behavior*

1 INTRODUÇÃO

Impulsionada pela criação da solda elétrica, no final da década de 1920, a construção metálica ganhou ainda mais relevância no setor construtivo. As principais inovações se deram com o surgimento de novas técnicas de conformação de perfis em aço, o que permitiu maior flexibilidade para a construção civil. Com os avanços da Engenharia Civil e a crescente necessidade de superar desafios, novas técnicas de construção metálica foram desenvolvidas. Uma delas, a criação de vigas com aberturas na alma, capazes de vencer grandes vãos, conhecidas como vigas alveolares. Um exemplo de vigas alveolares são as vigas casteladas.

Esses elementos estruturais são obtidos a partir de um perfil I ou H de alma cheia, realizando-se um corte longitudinal em zigue-zague e soldando-se as duas metades deslocadas longitudinalmente, formando aberturas hexagonais ou octogonais (essas últimas quando adicionadas chapas expansoras entre as partes a serem soldadas), como mostrado na Fig. 1. Seu nome deriva do padrão das aberturas da alma, que lembram os formatos das ameias de castelos e muralhas. Essa modificação aumenta o momento de inércia do perfil, o que aumenta sua resistência à flexão, e mantém a massa original, o que permite ao elemento vencer vãos maiores que o perfil original.

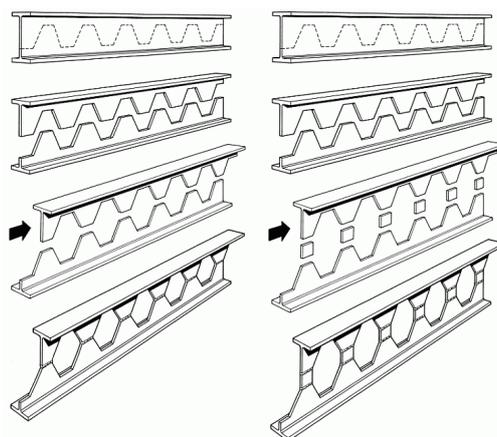


Figura 1. Esquema de formação de perfis castelados.

Contudo, a presença dos alvéolos modifica o comportamento estrutural do perfil. Há concentração de tensões nas bordas das aberturas, variações no momento de inércia do perfil ao longo do vão e alterações nas tensões residuais, principalmente após os processos de corte e solda, devido à exposição a altas temperaturas. Com isso, os modos de colapso possíveis para perfis castelados são diferentes dos presentes em perfis de alma cheia. Além disso, novos modos podem ocorrer (Vieira et al., 2015).

Para a realização deste trabalho, foram modeladas numericamente vigas casteladas no padrão Anglo-Saxão de fabricação. Este padrão é definido geometricamente pela norma britânica BS 5950 Parte 1 (2000), e foi desenvolvido com o intuito de reduzir os modos de colapso possíveis, mantendo um equilíbrio entre a largura do montante da alma e o ângulo das aberturas, parâmetros que exercem grande influência sobre o colapso do elemento.

Este estudo tem como objetivo avaliar os comportamentos estruturais de vigas casteladas nesse padrão e compará-los com resultados de estudos presentes na literatura. No entanto, são



encontradas na literatura apenas casos de elementos submetidos a uma carga concentrada no meio do vão. Com isso, propôs-se avaliar vigas casteladas quando submetidas a duas e três cargas concentradas atuando simetricamente, além de carregamento uniformemente distribuído ao longo do vão para comparação com as formulações matemáticas de Delesques (1868) e Vieira (2015) para dimensionamento à flambagem do montante de alma e de Bezerra (2011), à flambagem lateral com torção.

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 ele, 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 propõe 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 Anglo-Saxão. 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 Anglo-Saxão 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 (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 MODELO NUMÉRICO

Para a modelagem numérica, foi utilizado o *software* ABAQUS, programa de simulações baseado no método dos elementos finitos. Além de análises estruturais de tensão e deformação, como as feitas neste estudo, o *software* ainda é capaz de simular problemas de transferência de calor, difusão de massa e outros.

Foram modeladas vigas casteladas no padrão Anglo-Saxão, baseadas em perfis I de alma cheia comerciais no Brasil. Foram escolhidas quatro séries de perfis (W250, W310, W360 e W460) do catálogo da fabricante Açominas, de modo a combinar diferentes características, como altura da seção, largura e espessura da mesa e espessura da alma, e, para cada série, foram escolhidos os perfis de menor esbeltez da alma, o de esbeltez intermediária e o de maior esbeltez. Definida a geometria da seção transversal, decidiu-se variar os comprimentos de vãos fixando relações entre o comprimento da viga (L) e altura da viga castelada (d_g), produzindo as 12 relações L/d_g mostradas na Tabela 1, cobrindo grande parte dos comprimentos de vãos comumente aplicados na construção metálica.

Para obtenção da capacidade resistente de vigas casteladas de aço nos casos mais comuns de aplicação, decidiu-se modelar vigas submetidas a duas e três cargas concentradas equidistantes e carregamento uniformemente distribuído ao longo do vão, o que representa carregamentos comuns para vigas.

Dessa forma, foram modelados numericamente perfis castelados com 12 comprimentos de vãos para 12 seções transversais de perfis, submetidos a três carregamentos diferentes, totalizando 432 amostras.

Os modelos foram desenvolvidos com modelos tridimensionais, representando as superfícies médias das chapas dos perfis e utilizando elementos finitos do tipo S4R (elementos quadriláteros de casca fina com quatro nós e seis graus de liberdade em cada nó e integração reduzida). A objetividade de malha foi atingida no estudo de Pereira (2016) com elementos das dimensões mostradas na Tabela 1, que foram usadas neste estudo.

Tabela 1. Dimensão dos elementos da malha em função da relação vão-altura da viga castelada.

L/d_g	Dimensão da malha
2,5 e 3	5 x 5 mm ²
4, 5 e 6	10 x 10 mm ²
8, 10, 12 e 15	15 x 15 mm ²
20, 25 e 30	20 x 20 mm ²

Para as análises do comportamento do aço, foi assumido aço ASTM A572 G50, com módulo de elasticidade igual a 200 GPa, coeficiente de Poisson igual a 0,3 e modelo constitutivo elastoplástico perfeito sem encruamento, com resistência ao escoamento igual a 345 MPa.

Foram ainda consideradas as seguintes condições de contorno:

- restrição a deslocamentos verticais nos apoios;
- restrição a deslocamentos longitudinais em um dos apoios;
- restrição a deslocamentos laterais nos apoios e nos pontos de aplicação de carga (sendo travadas continuamente ao longo do vão as vigas submetidas a carregamento distribuído).

Além dos travamentos, foram inseridos enrijecedores de alma nos pontos de aplicação das cargas concentradas e nos apoios, a fim de evitar instabilidades locais na alma, como mostrado na Fig. 2.

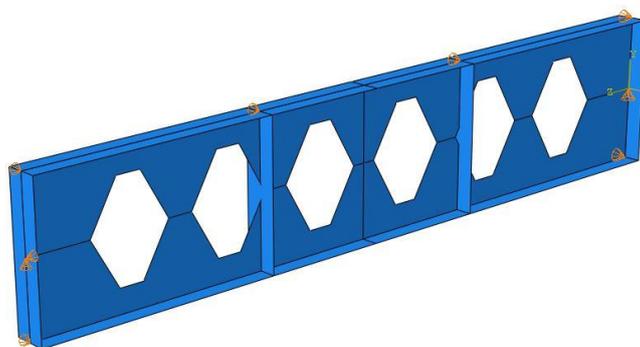


Figura 2. Detalhe das condições de contorno e enrijecedores de alma.

Modeladas as vigas, foram feitas inicialmente simulações para análise de instabilidade, para a obtenção da carga crítica de flambagem. Para isso, uma análise de flambagem elástica foi feita para cada viga, obtendo-se os autovalores referentes à carga crítica (optou-se pelos autovalores de menor energia, considerando sua maior facilidade de ocorrer) e os autovetores, referentes aos modos de flambagem.

Em seguida, procedeu-se com a análise não linear geométrica e material, que simula o comportamento da estrutura durante todo carregamento e na fase pós-flambagem. Nessa análise, foi considerada a influência de imperfeições geométricas iniciais e tensões residuais. As imperfeições geométricas foram inseridas no modelo associando-se o valor máximo da imperfeição inicial ao modo de flambagem de menor energia, obtido na análise de instabilidade. Os valores das imperfeições inseridas são referentes ao maior valor dentre $L/1000$ e $d_g/100$ (Vieira, 2015; Silveira, 2011).

As tensões residuais foram adotadas como tração uniforme nas mesas e compressão uniforme na alma, uma simplificação da distribuição parabólica de Young (1972 apud Vieira et al., 2015), onde adota-se valores uniformizados referentes aos valores máximos da distribuição parabólica. Essa simplificação justifica-se pelo fato de não haver na literatura modelos que descrevam as tensões residuais para perfis castelados. Como visto, o processo de fabricação dos perfis castelados altera a distribuição de tensões residuais, o que, certamente, torna os modelos para perfis de alma cheia inadequados.

O modelo numérico foi calibrado e validado com o programa experimental de Vieira (2015).

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Analisando o comportamento estrutural das vigas modeladas quanto aos modos de colapso, pode-se notar certo padrão nas ruínas. Vigas curtas tendem a colapsar devido a instabilidades locais, ao passo que vigas longas tendem a sofrer instabilidades globais. Um fator que claramente influencia os colapsos é a presença dos enrijecedores de alma. Apesar de evitar instabilidades locais na alma, esses elementos conduzem elementos curtos a certos modos de colapso, uma vez que atuam como restrições ao deslocamento para alguns pontos da alma, principalmente elementos próximos às bordas dos alvéolos, o que provoca concentração de tensões. Isso pode ser constatado em elementos curtos ($L/d_g < 4$, com dois enrijecedores e $L/d_g < 6$, com três enrijecedores), que sofrem colapso por mecanismo Vierendeel (ver Tabelas 2, 3 e 4), devido ao alto esforço cortante e à restrição dos enrijecedores, que, nesses comprimentos de vão, ficam dispostos de forma que quase todos os montantes de alma ficam restritos a instabilidades.

Por outro lado, às vigas submetidas a carregamento uniformemente distribuído foi atribuído travamento lateral contínuo sobre a mesa, simulando a aplicação do elemento sob uma laje, que atua como travamento lateral em situações reais. Esse travamento impede a ocorrência de flambagem lateral com torção (FLT), colapso identificado em todas as vigas longas ($L/d_g > 12$) sob carregamento concentrado, o que força outro colapso, normalmente mecanismo de flexão (MF), já que nessas vigas as instabilidades locais são menos importantes. Já nas vigas curtas, as instabilidades locais governam a ruína e tem-se predominantemente colapso por flambagem do montante de alma por cisalhamento (FMA) e flambagem do montante de alma por compressão (FMAC), que só é possível devido à ausência de enrijecedores de alma.

Tabela 2. Colapso por relação L/d_g para 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	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FMA	-	-	12	12	12	12	9	6	2	-	-	-
FLT	-	-	-	-	-	-	2	5	10	12	12	12
MF	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-

Tabela 3. Colapso por relação L/d_g para três 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	-	-	-	-	-	-	-	-
FMA	-	-	-	-	12	12	12	8	4	-	-	-
FLT	-	-	-	-	-	-	-	-	3	11	12	12
MF	-	-	-	-	-	-	-	4	5	1	-	-



Tabela 4. Colapso por relação L/d_g para carregamento distribuído.

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

Quanto à capacidade resistente, pode-se observar que o comportamento das curvas seguiu o esperado, estando as curvas das séries dos perfis mais robustos (com maiores espessuras de alma e mesas e, conseqüentemente, menor esbelteza de alma) indicando maior resistência e, dentro de cada série, os perfis com menor esbelteza de alma superando os valores de resistência dos demais, como exemplificam as Fig. 3 e 4.

Destaca-se ainda que as curvas tendem a aproximar-se à medida que a esbelteza da alma diminui, como pode ser claramente visto nas Fig. 3 e 4, o que indica capacidade de carga semelhante sob os carregamentos considerados. Salienta-se ainda que as curvas de resistência dos perfis submetidos a carregamento distribuído atingem valores maiores que as demais na maior parte do vão, devido ao travamento contínuo e ao fenômeno relacionado aos enrijecedores.

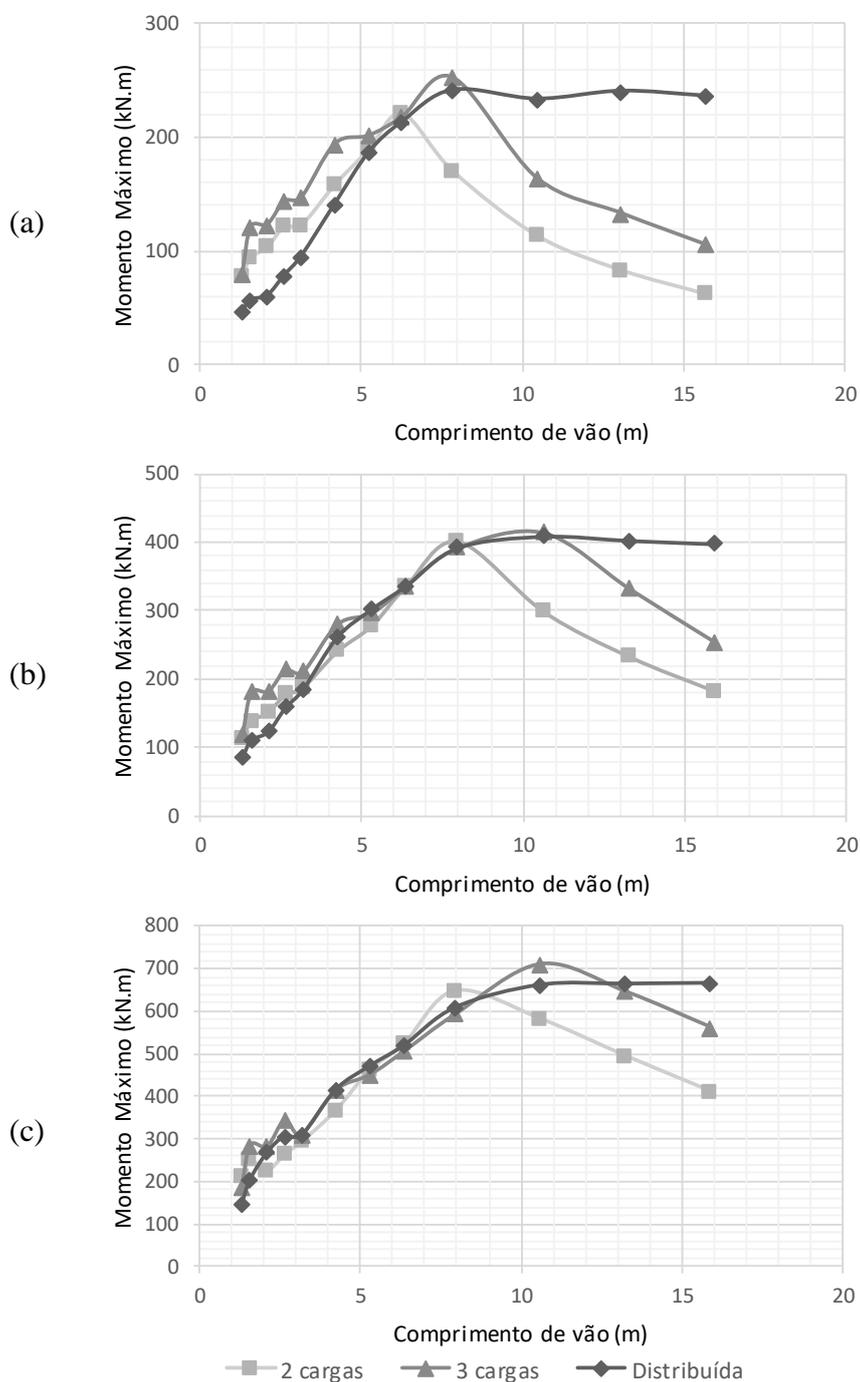


Figura 3. Momento fletor resistente dos perfis (a) W360x32.9, (b) W360x51.0 e (c) W360x79.0.

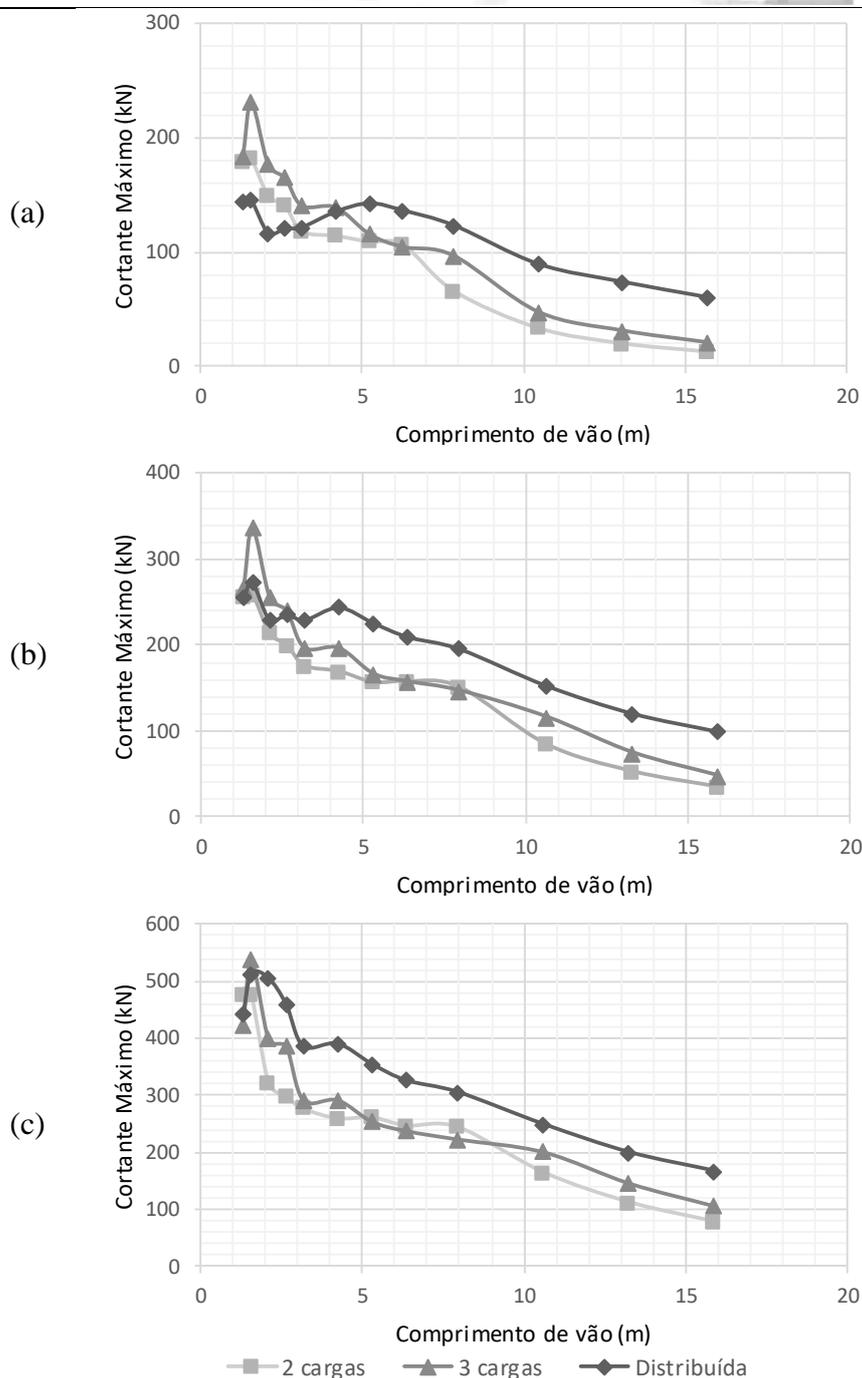


Figura 4. Esforço cortante resistente dos perfis (a) W360x32.9, (b) W360x51.0 e (c) W360x79.0.

Os resultados numéricos obtidos foram comparados com as principais formulações matemáticas presentes na literatura, a fim de avaliar sua representatividade e segurança.

A partir das comparações, pode-se observar que, como esperado, a formulação de Delesques (1968) produz resultados ora muito conservadores ora contra a segurança, o que pode ser causado principalmente devido à desconsideração do comprimento do vão e do carregamento na obtenção da capacidade resistente. Na Tabela 5 são mostrados os erros e



desvios padrões médios da comparação entre os resultados numéricos e os dados pela equação de Delesques (1968), obtidos pela divisão do valor numérico pelo valor dado pela equação.

Tabela 5. Erros e desvios-padrões médios da comparação com a formulação de Delesques (1968).

Carregamento	Erro médio	Desvio padrão médio
CC1	1,58	0,40
CC2	1,56	0,37
CC3	1,52	0,40
CD	1,65	0,19
TOTAL	1,58	0,34

Pode-se notar o quão conservadora essa formulação tende a ser, apresentando valores de erros médios acima de 50%, o que culmina em dimensionamento antieconômico, além de produzir resultados com elevada dispersão.

A equação de Vieira (2015), que também usa a grandeza força cortante resistente para dimensionamento, mostrou-se representativa, a favor da segurança, porém muito conservadora na maioria dos casos. Este melhor ajuste pode estar ligado, principalmente, à diferenciação das equações para diferentes padrões de fabricação, o que considera diferenças na seção transversal.

Assim como com a formulação de Delesques (1968), os resultados numéricos foram comparados com os resultados obtidos pela equação de Vieira (2015), e os erros e desvios-padrões médios, calculados da mesma forma como para Delesques (1968), são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6. Erros e desvios-padrões médios da comparação com a formulação de Veira (2015).

Carregamento	Erro médio	Desvio padrão médio
CC1	1,11	0,15
CC2	1,10	0,11
CC3	1,08	0,12
CD	1,36	0,12
TOTAL	1,12	0,15

Apesar de bastante conservadora para o carregamento distribuído, essa formulação tende a ser bem mais representativa que a de Delesques (1968), apresentando, para os casos de cargas concentradas, erros médios baixos. Além disso, a dispersão também é bem menor, o que indica resultados mais concisos e próximos do valor real (numérico).

A comparação entre os resultados dos modelos analíticos com os resultados numéricos é mostrada na Fig. 5.

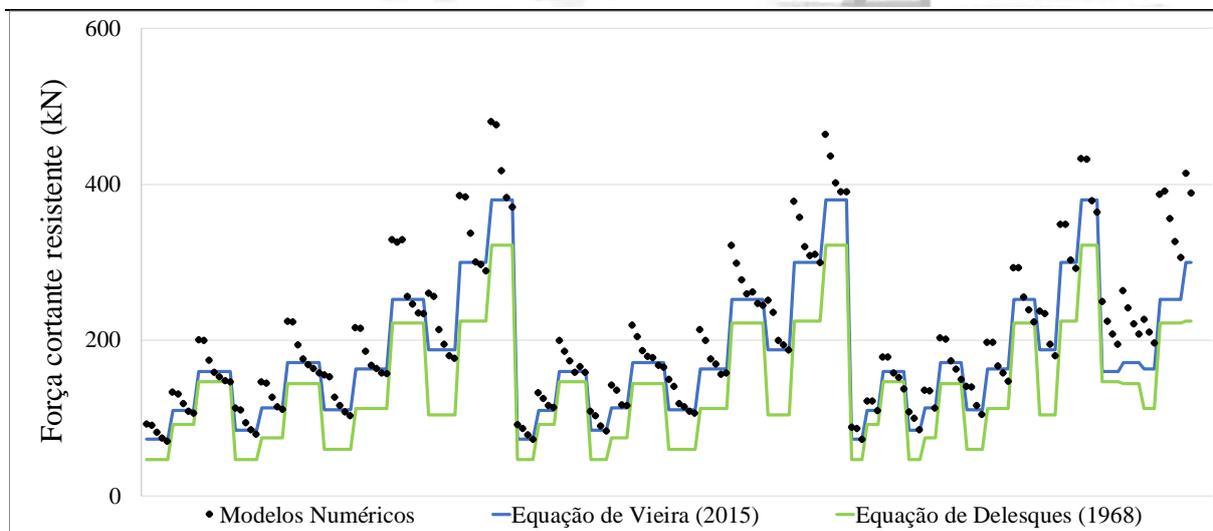


Figura 5. Resultados numéricos em comparação com as formulações de Vieira (2015) e Delesques (1968).

Para o dimensionamento à FLT, utilizou-se, nas comparações, a equação de Bezerra (2011), que considera o comprimento destravado L_b , assim como para perfis de alma cheia. Para as comparações foram consideradas aqui apenas as vigas que falharam por FLT nas análises numéricas, comparando-se os valores de momento fletor resistente com os resultados analíticos obtidos pela equação. Os valores médios de erro e de desvio padrão são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Erros e desvios-padrões médios para FLT, segundo o modelo de Bezerra (2011).

Carregamento	Erro médio	Desvio padrão médio
CC1	1,08	0,12
CC2	1,14	0,12
CC3	1,10	0,10
TOTAL	1,11	0,11

Cabe aqui ressaltar que as vigas submetidas à carregamento uniformemente distribuído estavam sujeitas a travamento lateral contínuo sobre a mesa, simulando a aplicação do elemento sob uma laje, que atua como travamento lateral em situações reais, o que impede a ocorrência de FLT, e, por isso, não houveram resultados com colapso por FLT nesse tipo de carregamento.

Essa equação apresentou-se bastante ajustada aos modelos numéricos, prevendo resultados próximos dos obtidos numericamente e boa margem de segurança, podendo, assim, ser considerada bem representativa e segura na predição da capacidade resistente vigas casteladas no perfil Anglo-Saxão. A influência do tipo de carregamento é inserida nesse modelo pelo coeficiente de modificação de diagrama de momento fletor não uniforme C_b . A Fig. 6 mostra a correspondência da curva de resultados analíticos em comparação com os resultados numéricos.

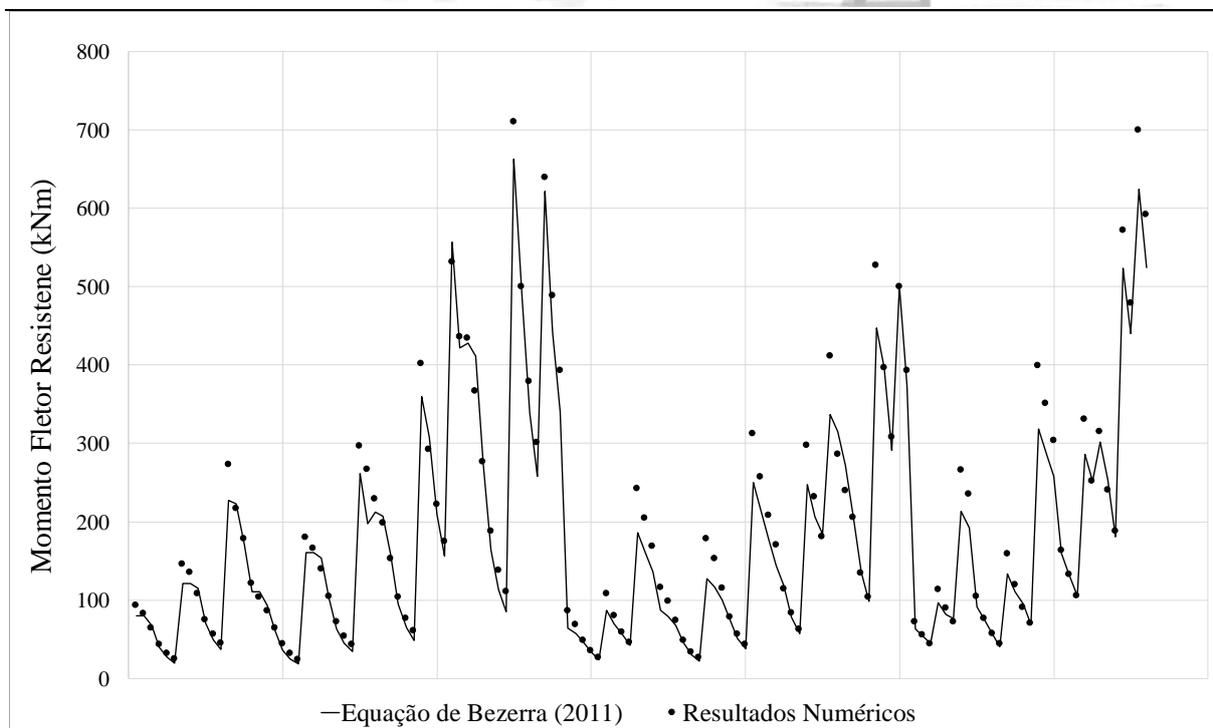


Figura 6. Resultados numéricos em comparação com a formulação de Bezerra (2011).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo propôs-se a avaliar qualitativamente o comportamento estrutural de vigas casteladas no padrão Anglo-Saxão quando submetidas a duas e três cargas concentradas equidistantes e carregamento uniformemente distribuído ao longo do vão.

Tratando-se de capacidade de carga, uma observação válida é quanto à diferença no comportamento do momento resistente entre o carregamento distribuído e as cargas concentradas. Enquanto nestas os gráficos apresentam um pico seguido de um decréscimo de resistência, naquele as curvas continuam aproximadamente constantes após atingido o valor máximo. Isso se dá pelo fato de as vigas mais longas sofrerem instabilidade por FLT quando submetidas às cargas concentradas que são aplicadas com os vãos travados lateralmente apenas nos pontos de aplicação. Esse fenômeno é impedido nas vigas longas submetidas ao carregamento distribuído, pois este atua sobre o vão travado continuamente lateralmente.

Em termos de modos de colapso, os resultados das análises seguiram um padrão, em que vigas muito curtas submetidas a carregamentos concentrados ($L/d_g < 4$ para duas cargas e $L/d_g < 6$ para três cargas) sofreram mecanismo Vierendeel, muito devido à posição dos enrijecedores de alma que impedem a FMA. As vigas de comprimento de vão intermediário são mais suscetíveis a instabilidades locais, sendo a mais comum a FMA. No caso de elementos submetidos a carregamento distribuído, mesmo as vigas mais curtas colapsaram por instabilidades locais, devido à ausência de enrijecedores de alma. Como dito anteriormente, vigas longas submetidas a cargas concentradas colapsaram por FLT, ao passo



que sob carregamento distribuído, o travamento lateral impediu instabilidade global e elas ruíram por plastificação, ocorrendo mecanismo de flexão.

Com os resultados obtidos, pode-se então concluir que a distribuição do carregamento solicitante influencia nos modos de colapso e no comportamento estrutural das vigas. Dessa forma, foram feitas análises comparativas para avaliação da aplicabilidade dos modelos analíticos para FMA e FLT, que não consideram essa influência em suas formulações, uma vez que foram propostas a partir de estudos de vigas solicitadas por uma carga concentrada no centro do vão.

Os resultados numéricos foram comparados com as equações de Delesques (1968) e Vieira (2015) para dimensionamento à FMA e de Bezerra (2011), à FLT. Concluiu-se que a formulação de Delesques (1968) produz resultados ora muito conservadores ora contra a segurança, devido à desconsideração do comprimento do vão e do carregamento na formulação.

Já a equação de Vieira (2015) mostrou-se representativa, a favor da segurança, porém muito conservadora, apesar de não considerar o comprimento do vão e o carregamento. No entanto, devido à boa representatividade dos resultados e da consideração do padrão de fabricação do perfil castelado na formulação, acredita-se que poucos ajustes são necessários para melhor refinamento dos resultados por ela produzidos.

Para o dimensionamento à FLT, a proposição de Bezerra (2011) mostrou boa concordância mesmo com a variação do carregamento e do vão, ajustando-se melhor quando há maior distribuição do carregamento ao longo do vão, não sendo necessário, por ora, maiores modificações para ajuste dos resultados.

Conclui-se que os objetivos deste trabalho foram alcançados, e os resultados obtidos fornecem diretrizes para o desenvolvimento de ajustes necessários à formulação da literatura para o cálculo da capacidade resistente à flambagem do montante de alma.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro à realização da pesquisa, à Universidade Federal de Itajubá - *Campus* Itabira, pela estrutura disponibilizada e à Universidade Federal de Viçosa pelo compartilhamento do *software* ABAQUS para a modelagem numérica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bezerra, E.M., 2011. Determinação do momento fletor resistente à flambagem lateral com torção de vigas de aço casteladas. Ph.D. Dissertação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- British Standards., 2000. BS 5950-1:2000: Structural use of steelwork in building – Part 1: Code of practice for design – Rolled and welded sections. Londres.
- Pereira, B.G.F.H., 2016. Estudo comparativo da capacidade resistente de vigas casteladas de aço em diferentes padrões. Universidade Federal de Itajubá, Itabira.



-
- Silveira, E.G., 2011. Avaliação do comportamento de vigas alveolares de aço com ênfase nos modos de colapso por plastificação. Ph.D. Dissertação, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- Vieira, W.B., 2011. Simulação numérica do comportamento estrutural de vigas casteladas de aço com ênfase na flambagem do montante de alma. Ph.D. Dissertação, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- Vieira, W.B., 2015. Estudo numérico-experimental da flambagem do montante de alma em vigas casteladas de aço. Ph.D. Tese, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- Vieira, W.B.; Paes, J.L.R.; Veríssimo, G.S.; Silveira, E.G. and 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.