



ANÁLISE NUMÉRICA ELÁSTICA DA FLAMBAGEM LATERAL DA ALMA DE VIGAS DE AÇO DE SEÇÃO I

Luiza Milene de Freitas

Ricardo Hallal Fakury

Ana Lydia Reis de Castro e Silva

luizamilenefreitas@gmail.com

fakury@dees.ufmg.br

analydiarcs@gmail.com

Universidade Federal de Minas Gerais

Av. Antônio Carlos, 6627, Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil

Resumo. Vigas de aço de seção transversal I sob ação de uma força transversal localizada em uma das mesas podem sofrer um modo de colapso denominado flambagem lateral da alma. Nesse modo de colapso, a alma perde estabilidade e movimenta-se lateralmente, fazendo com que a mesa oposta à de atuação da força (mesa tracionada) também se movimente na mesma direção. Neste artigo apresenta-se uma breve descrição dos principais estudos relacionados a esse estado-limite último disponíveis na literatura científica. O procedimento de cálculo das normas de projeto americana ANSI/AISC 360-16 e brasileira ABNT NBR 8800:2008, para determinação da força resistente (ambas adotam o mesmo procedimento, limitado ao comportamento elástico) é apresentado, indicando suas incertezas. Uma modelagem numérica pelo método dos elementos finitos, usando o programa ABAQUS, é desenvolvida e aferida para obtenção da força localizada crítica de vigas de aço biapoiadas com seção I duplamente simétrica. Com essa modelagem, é feito um estudo paramétrico, a partir do qual são obtidos resultados que mostram como os parâmetros geométricos da viga influem no valor da força crítica e permitem uma avaliação dos resultados do procedimento normativo. Todo o estudo se restringe aos casos em que a mesa carregada possui deslocamento lateral e rotação impedidos.

Palavras-chave: Estruturas de aço, Vigas de aço, Forças localizadas, Flambagem lateral da alma.

CILAMCE 2017

Proceedings of the XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering
P.O. Faria, R.H. Lopez, L.F.F. Miguel, W.J.S. Gomes, M. Noronha (Editores), ABMEC, Florianópolis, SC, Brazil,
November 5-8, 2017.

INTRODUÇÃO

Os perfis de aço de seção I (ou simplesmente perfis I) são usualmente utilizados nas estruturas como vigas. Esses perfis quase sempre são dispostos de modo que a flexão ocorra em relação ao eixo x (eixo centroidal principal perpendicular à alma), que é o eixo de maior inércia da seção transversal.

Muitas vezes, uma força localizada atua diretamente na mesa do perfil, comprimindo sua alma. Nas edificações, esse tipo de solicitação ocorre, por exemplo, nas vigas principais que apoiam vigas secundárias sobre sua face superior (Fig. 1.a), nas vigas de transição que apoiam pilares (Fig. 1.b) e nas vigas de rolamento que recebem as rodas da ponte rolante (Fig. 1.c).



(a) Viga principal apoiando secundária (extraído de Fakury *et al.*, 2016)



(b) Viga de transição apoiando pilar (extraído de Fakury *et al.*, 2016)



(c) Viga de rolamento suportando ponte rolante

Figura 1: Situações típicas de atuação de força localizada na mesa de um perfil I comprimindo a alma

A atuação de uma força localizada pode levar a diversos modos de colapso, um dos quais é a flambagem lateral da alma (Fig. 2). Nesse estado-limite último (ELU), a alma comprimida é desestabilizada pela força e move-se lateralmente na direção do eixo x , levando a mesa tracionada a movimentar-se nessa mesma direção.

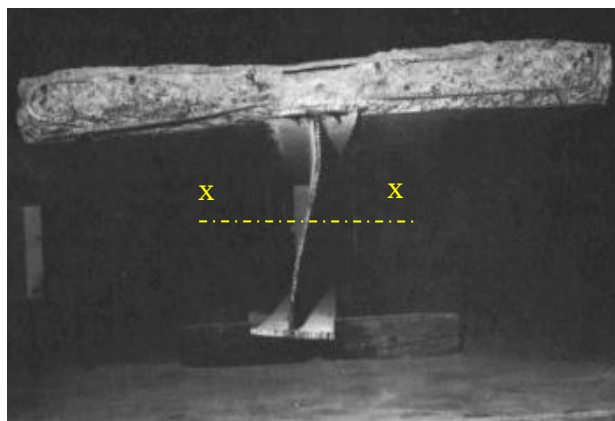


Figura 2: Flambagem lateral da alma (Daniels e Fisher, 1967).

Há atualmente poucos estudos a respeito da flambagem lateral da alma, apesar de a literatura reafirmar a necessidade de mais pesquisas devido à complexidade inerente a esse fenômeno e ao conservadorismo existente nos procedimentos adotados pelas normas de projeto de estruturas de aço, como é o caso das normas americanas do AISC, com publicações periódicas desde a década de 1960 (a norma atual é o ANSI/AISC 360-16, portanto de 2016), e da norma brasileira ABNT NBR 8800:2008.

Este artigo apresenta um estudo paramétrico realizado por meio do método dos elementos finitos, com intuito de se obter a força localizada crítica para flambagem lateral da alma em vigas de aço biapoiadas, com seção I duplamente simétrica e vínculos de garfo nos apoios, nas seguintes condições: (i) a força localizada situa-se na seção central das vigas, e; (ii) a mesa superior, na qual atua a força localizada, encontra-se totalmente contida contra deslocamento lateral e rotação ao longo de todo o seu comprimento. Adicionalmente, será definida a importância dos diversos parâmetros que influenciam na ocorrência desse fenômeno.

O termo força crítica usado neste trabalho refere-se ao valor da força localizada que provoca a flambagem lateral elástica da alma, em um problema clássico de bifurcação de equilíbrio. As normas de projeto supracitadas identificam a força localizada máxima que pode atuar nas vigas até a ocorrência do colapso, desconsiderando os coeficientes de ponderação da resistência, como força localizada resistente nominal, mas, a rigor, essas normas usam a própria força crítica, com alguns ajustes em determinadas situações. Assim, por simplicidade, o termo força crítica será adotado na maioria das vezes, mesmo quando se referir aos procedimentos normativos.

1 VISÃO HISTÓRICA

Apenas em 1967, nos ensaios realizados por Daniels e Fisher (1967) para a determinação do comportamento de uma viga mista simplesmente apoiada submetida a uma força localizada, que o fenômeno da flambagem lateral da alma foi primeiramente documentado (ver Fig. 2).

Um pouco antes, Basler *et al.* (1960) haviam apresentado uma teoria simplista para a determinação da força localizada crítica (considerada como correspondente à força de colapso), incorporada pela especificação de projeto de estruturas de aço americana da época, editada pelo AISC (*American Institute of Steel Construction*), desprezando a possibilidade da ocorrência do movimento lateral da mesa tracionada. Essa teoria, conforme se comprovou posteriormente, fornecia valores significativamente maiores que a força crítica real, ou seja, contrários à segurança.

Na teoria de Basler *et al.* (1960), a alma é isolada e considerada como uma barra comprimida engastada na extremidade superior (onde atua a força localizada) e simplesmente apoiada na extremidade inferior. Assume-se que a mesa superior (comprimida) esteja impedida de se deslocar lateralmente e girar, e que a mesa inferior (tracionada) esteja simplesmente apoiada na direção transversal (Fig. 3). A distribuição de tensões abaixo do ponto de aplicação da força localizada é considerada empiricamente como triangular (Fig. 3.a), em que a tensão é máxima na extremidade superior (junto à força) e nula na outra extremidade. Observa-se que, a rigor, essa teoria não trata do problema da flambagem lateral da alma, uma vez que o deslocamento lateral da mesa tracionada encontra-se impedido, mas sim de um modo de flambagem local da alma.

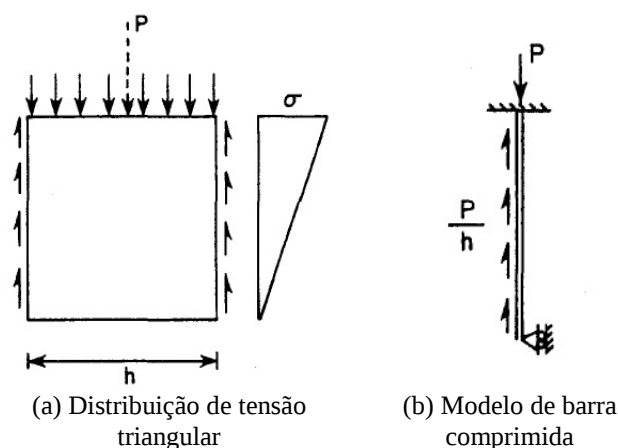


Figura 3: Teoria de Basler *et al.* (1960) (adaptado de Summers e Yura, 1982).

A especificação do AISC foi baseada nessa teoria até o ano de 1986, quando os resultados de uma pesquisa conduzida por Summers e Yura (1982) foram adotados. Nessa pesquisa, ensaios experimentais feitos com vigas em escala reduzida de material acrílico de seção transversal I, submetidas a uma força localizada no meio do vão, foram estudados de formas analítica e numérica.

Summers e Yura (1982) adotaram inicialmente nos seus estudos uma teoria de Yura (1970), que introduz uma mola de translação no ponto de apoio da mesa tracionada no modelo de barra comprimida de Basler, para procurar considerar a influência da rigidez lateral dessa mesa (ver Fig. 3, substituindo o apoio indeslocável lateralmente pela mola, e a Fig. 6). Como os resultados obtidos não foram satisfatórios, a pesquisa prosseguiu por meio de análise numérica com o programa de elementos finitos BASP (Buckling Analysis of Stiffened Plates), que possibilitou a determinação de dois modos de flambagem quando a mesa carregada possuía rotação impedida (Fig. 4). Esses modos de flambagem foram reafirmados posteriormente por Mullin e Cheng (1995), que ensaiaram experimentalmente catorze vigas de seção transversal I, sendo nove em escala reduzida feitas de estireno e cinco em escala real de aço.

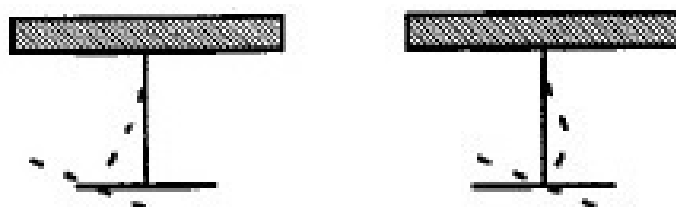


Figura 4: Modos de flambagem para a mesa carregada com rotação impedida (Adaptado de Mullin e Cheng, 1995).

Ao final, após um estudo paramétrico, Summers e Yura (1982) desenvolveram equações para prever a força crítica e observaram que o movimento lateral da mesa tracionada reduz em cerca de 20% essa força (em relação à teoria de Basler *et al.*, 1960). Observaram ainda que as dimensões da seção transversal – envolvendo a espessura e a altura da alma e a rigidez lateral da mesa tracionada – e o comprimento da viga são os parâmetros mais influentes no valor da força crítica.

Em um estudo relevante mais recente sobre a flambagem lateral da alma, Topkaya (2006) propôs novas equações para a determinação da força crítica para flambagem lateral da alma de vigas simplesmente apoiadas com a rotação da mesa carregada livre e impedida, mas limitadas

aos casos em que a razão entre o comprimento da viga e a altura da seção transversal (L/d) não supera 16. As equações foram desenvolvidas por meio de análise numérica realizada com o programa comercial ANSYS, e adotaram o fator adimensional β definido por Lagerqvist e Johansson (1996). Assim, a equação para a mesa carregada com rotação impedida, objeto deste trabalho, é representada por:

$$P_{cr} = \left[5,4 \left(\frac{L}{h} \right)^{-0,5} + 2,2 \left(\frac{L}{h} \right)^{0,3} \left(1 - e^{-\sqrt{\beta}} \right) \right] \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \frac{t_w^3}{h} \quad (1)$$

com β dado por

$$\beta = \frac{b_f t_f^3}{h_w t_w^3} \quad (2)$$

sendo E o módulo de elasticidade e ν o coeficiente de Poisson do aço, t_w a espessura da alma, t_f a espessura da mesa tracionada, h a distância entre as faces internas das mesas, b_f a largura da mesa tracionada e L o comprimento da viga.

2 FORÇA CRÍTICA SEGUNDO NORMAS VIGENTES

2.1 ANSI/AISC 360-16

Desde 1986, a especificação americana do AISC para edifícios com estrutura de aço fornece a força localizada resistente para flambagem lateral da alma por meio de equações simples obtidas com base no trabalho de Summers e Yura (1982). Assim, os valores da força resistente, a rigor, igual à força crítica, se mantêm praticamente inalterados até a norma atual, publicada em 2016, a ANSI/AISC 360-16.

Topkaya (2006) reforça que durante o desenvolvimento das equações do AISC, assumiu-se a teoria de Yura (1970). Nessa teoria uma parte da alma, com largura igual à altura, é dada como efetiva para suportar a força localizada aplicada (Fig. 5). Essa parte da alma é então isolada e analisada como uma barra comprimida, com uma extremidade na mesa comprimida da viga (mesa onde atua a força localizada) e outra extremidade na mesa tracionada. Como condições de contorno, considerou-se do lado da mesa comprimida translação lateral impedida e rotação livre ou impedida, com o efeito da restrição da mesa tracionada representado por uma mola linear com rigidez k (Fig. 6). A tensão normal transversal causada pela força localizada ao longo da altura da alma foi considerada com distribuições linear, quadrática e cúbica, por meio da introdução de forças cortantes verticais conservativas colocadas nessa altura (Fig. 6).

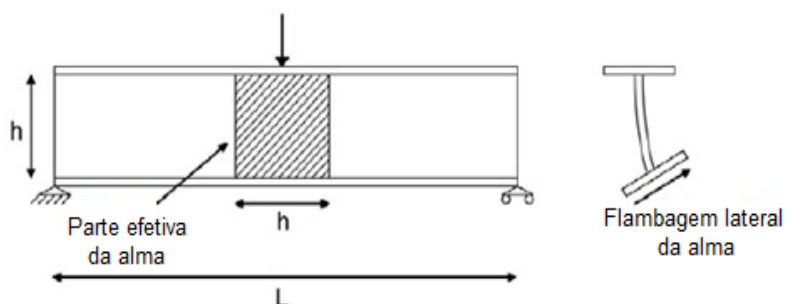


Figura 5: Parte da alma efetiva e flambagem lateral da alma (Topkaya, 2006)

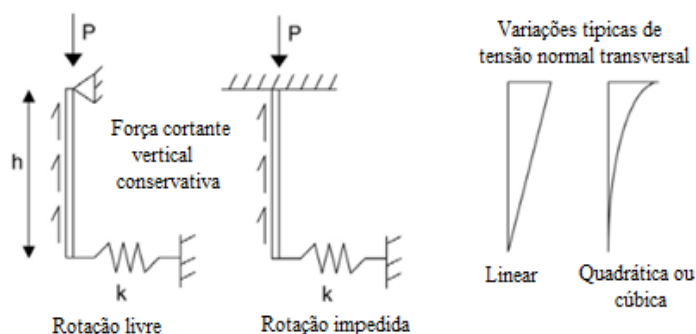


Figura 6: Modelo de barra comprimida adotada pelo AISC (Topkaya, 2006)

Conforme Topkaya (2006), para as três distribuições assumidas para a tensão normal transversal, a força crítica da barra comprimida (alma da viga), P_{cr} , foi obtida de forma adimensional (dividida pela força de flambagem de Euler de uma coluna birrotulada com altura igual à sua largura, P_E) em função da rigidez da mola linear que simula a restrição da mesa tracionada, k , multiplicada pela altura da alma h e dividida por P_E (a grandeza kh/P_E é denominada rigidez lateral adimensional da mesa). Os resultados para o caso de a mesa comprimida estar impedida são apresentados na Fig. 7, em que se observa o aumento da força crítica à medida que a tensão normal transversal varia de linear para cúbica. A resposta de todas as curvas é não linear e atinge assintoticamente um valor máximo, igual à força crítica para uma situação em que não há movimento lateral da mesa tracionada e a alma flamba entre as mesas, para cada uma das variações de tensão normal transversal.

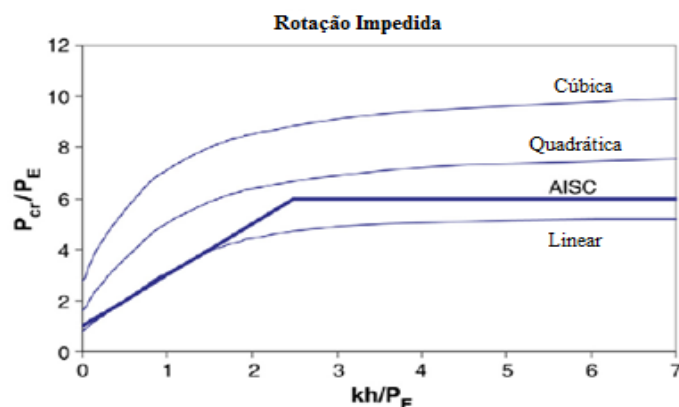


Figura 7: Variação da força crítica com a rigidez da mola para a mesa comprimida com rotação impedida (Topkaya, 2006)

Ainda, conforme Mullin e Cheng (1995), o procedimento do AISC foi desenvolvido com base na variação linear da tensão normal transversal, de modo que a expressão que relaciona P_{cr}/P_E com kh/P_E , ilustrada também na Fig. 7, é dada por:

$$\frac{P_{cr}}{P_E} = 1 + \frac{2 k h}{P_E} \leq 6 \quad (3)$$

A rigidez da mola pode ser derivada da rigidez lateral da mesa tracionada como segue:

$$k = \frac{CE t_f b_f^3}{12 L^3} \quad (4)$$

onde C é um coeficiente que depende da fixação das extremidades da viga.

A equação da norma ANSI/AISC 360-16, e das suas antecessoras do AISC desde 1986, para a força resistente nominal à flambagem (igual à força crítica) pode ser obtida substituindo-se a Eq. (3) na Eq. (4) e rearranjando os termos desta última, e é apresentada a seguir:

$$P_{cr} = \frac{C_r t_w^3 t_f}{h^2} \left[1 + 0,4 \left(\frac{h/t_w}{l/b_f} \right)^3 \right] \quad (5)$$

com

$$C_r = \frac{CE}{2,4} \quad (6)$$

Um valor de C_r de $6,6 \times 10^6$ MPa é usado, assumindo para C uma fixação de extremidade intermediária igual a 80. Esse valor de C_r é reduzido à metade, ou seja, para $3,3 \times 10^6$ MPa, nos casos em que o momento fletor solicitante de cálculo na posição da força localizada é maior que o momento correspondente ao início do escoamento, em uma maneira bastante simplificada de prever a possibilidade de colapso em regime inelástico. O limite na Eq. (3), lembrando que $P_E = \pi^2 EI/h^2$ com $I = h t_w^3/12$, pode então ser escrito como:

$$\frac{5C t_f}{\pi^2 h} \left[1 + 0,4 \left(\frac{h/t_w}{l/b_f} \right) \right] \leq 6 \quad (7)$$

Usando o valor aproximado de h/t_f de 40, que é válido para a maioria das vigas econômicas, e com C igual a 80, o limite para a flambagem lateral da alma se torna:

$$\left(\frac{h/t_w}{l/b_f} \right) \leq 2,3 \quad (8)$$

Se esse limite é excedido, considera-se que flambagem lateral da alma não ocorre e a alma flamba sem movimentação da mesa tracionada.

Topkaya (2006) reitera que o AISC adota um modelo muito simples para determinação da força resistente das vigas à flambagem lateral da alma, razão pela qual suas equações possuem várias lacunas, como:

- não levam em conta o nível de momento atuando na seção transversal sob a força localizada, apesar de sua importância ter sido apontada por Summers e Yura (1882);
- fornecem estimativas conservadoras da capacidade resistente;
- não distinguem as vigas com momento fletor negativo, apesar de Summers e Yura (1982) terem mostrado que vigas com esse tipo de momento nas extremidades são mais suscetíveis à flambagem lateral da alma.

Mullin e Cheng (1995) mencionam ainda que as equações do AISC têm as imprecisões de considerar, para todas as vigas, a razão entre a altura da alma e espessura da mesa (h/t_f) de 40, e de substituir a solução não dimensional das curvas de Summers e Yura (1982) por retas (Fig. 7).

O conservadorismo atribuído às equações do AISC foi provado por Topkaya (2006), conforme Fig. 8, na faixa de abrangência de seu estudo, ou seja, para L/d até 16. Nota-se nessa figura que os resultados obtidos por esse autor pelo método dos elementos finitos (indicados pelas posições representadas por quadrados) ficaram sempre acima dos resultados da norma americana, muitas vezes com uma diferença bastante elevada.

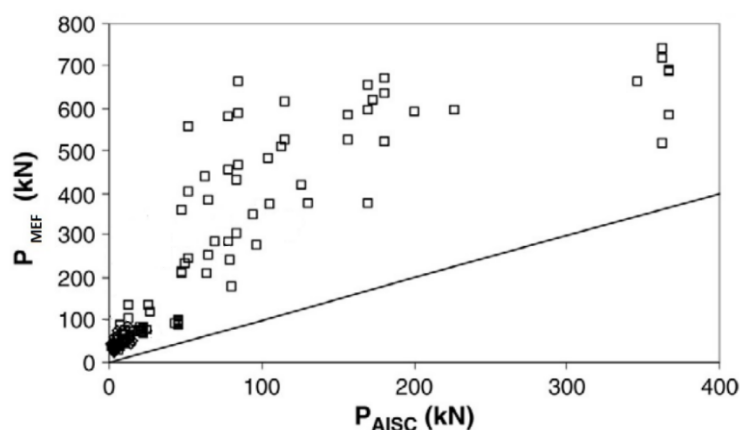


Figura 8: Comparação entre os resultados obtidos pelo AISC e pelo método dos elementos finitos. (adaptado de Topkaya, 2006)

Além das incertezas e lacunas supracitadas, não pode deixar de ser mencionado que as equações do ANSI/AISC 360-16 são baseadas na teoria da flambagem linear elástica, ao passo que, muitas vezes, as vigas podem experimentar escoamento devido aos altos momentos atuando na seção sob a força localizada. Quando isso ocorre, Topkaya (2006) comenta que as equações desenvolvidas superestimam grosseiramente a capacidade de flambagem das vigas. Apesar desse comentário de Topkaya (2006), acredita-se que isso, em muitos casos, possa não ocorrer por causa da redução à metade do fator C_r quando o momento fletor solicitante de cálculo na posição da força localizada é maior que o momento correspondente ao início do escoamento, como mostrado anteriormente. No sentido contrário, Summers e Yura (1982) explicitam que as vigas podem possuir uma resistência pós-flambagem que necessita de investigação.

O ANSI/AISC 360-16 representa a força resistente nominal à flambagem por R_n (e não P_{cr}) e estipula que força resistente de cálculo é igual a:

$$R_d = \phi R_n \quad (9)$$

onde ϕ é o fator de resistência, igual a 0,85.

Na hipótese de a força localizada solicitante de cálculo exceder a força resistente de cálculo, o ANSI/AISC 360-16 prescreve que pode ser colocado no ponto de atuação da força localizada travamento contra deslocamentos laterais na mesa tracionada, ou enrijecedores transversais de ambos os lados da alma ou chapas de reforço da alma.

2.2 ABNT NBR 8800:2008

A norma brasileira ABNT NBR 8800:2008 adota a mesma teoria do ANSI/AISC 360-16. Assim, fornece os seguintes valores para a força resistente de cálculo das vigas com relação à flambagem lateral da alma, para o caso da mesa comprimida com rotação impedida:

$$F_{Rd} = \frac{C_r t_w^3 t_f}{\gamma_{a1} h^2} \left[0,94 + 0,37 \left(\frac{h/t_w}{l/b_f} \right)^3 \right] \quad (10)$$

Pode-se constatar que a Eq. (10) fornece os mesmos resultados finais da Eq. (5) da norma americana, tendo em vista que o coeficiente de ponderação da resistência da norma brasileira, γ_{a1} , é igual a 1,10. A única diferença prática entre as duas é que a brasileira, na hipótese de a força localizada solicitante de cálculo exceder a força resistente de cálculo, não prevê a solução por meio de chapas de reforço da alma.

3 ANÁLISE NUMÉRICA

3.1 Desenvolvimento do modelo

A modelagem das vigas, neste trabalho, foi realizada por meio do programa comercial ABAQUS (Hibitt *et al.*, 2014), capaz de fazer análises numéricas a partir do método dos elementos finitos (MEF) baseando-se na aproximação das condições de equilíbrio de um corpo conforme as equações de Lagrange.

Para consideração do comportamento linear e isotrópico do aço foram considerados o módulo de elasticidade E igual a 200.000 MPa e o coeficiente de Poisson ν igual a 0,3. Ademais, a geometria foi definida pelas linhas médias do perfil de acordo com o sistema de coordenadas, apresentado pelo programa, conforme a Fig. 9.

As condições de contorno para simulação do vínculo de garfo dos apoios consistem na restrição da rotação em relação ao eixo z e ao deslocamento lateral na direção do eixo x em toda a seção transversal nas extremidades da viga e, para simulação do apoio rotulado, na restrição ao deslocamento na direção do eixo y nas extremidades da alma.

A mesa onde atua a força localizada foi considerada com o deslocamento lateral (na direção do eixo x) e a rotação em relação ao seu longitudinal impedidos ao longo de todo o comprimento da viga.

As mesas e a alma da viga foram simuladas com o elemento de casca S4. Esse elemento possui quatro nós com curvatura dupla, integração completa, deformação finita e seis graus de liberdade por nó, segundo o sistema de eixos anteriormente citado, sendo três referentes à translação e três à rotação.



Figura 9: Sistema de coordenadas

A determinação do tamanho do elemento foi realizada através de uma avaliação da influência do refinamento da malha de elementos finitos na precisão dos resultados em relação ao tempo de processamento, em que um perfil PS 800 x 320 x 16 x 9,5, assumido como padrão, com comprimento de 24 m. O resultado mostrado na Tabela 1 indica que a modelagem com o elemento de 25 mm de lados é a mais otimizada e, portanto, utilizada neste trabalho.

Tabela 1: Estudo de refinamento de malha

Tamanho dos lados do elemento (mm)	P_{cr} (kN)	Tempo	Δ (%)
5	426,77	28min 6s	-
10	426,98	4min 6s	0,05
25	427,49	1min 9s	0,17
50	428,86	32s	0,49

3.2 Calibração do modelo

Na literatura científica não existem resultados devidamente comprovados a respeito do cálculo da força localizada resistente em regime elástico que possam servir como instrumentos de calibração do modelo desenvolvido no presente trabalho. Sobre isso, inclusive, Topkaya (2006) informa que os resultados dos autores anteriores não devem servir como referência. No entanto, os resultados experimentais desse próprio autor não podem ser utilizados com precisão, pois são apresentados na forma de um conjunto de pontos obtidos de diversas vigas (ver Fig. 8), que não têm seu detalhamento fornecido. Assim, foi utilizada a sua Eq. (1) para a calibração, pois ela representa de modo aproximado os resultados dos ensaios. No Item 4 deste trabalho pode ser visto um grande número de resultados obtidos com o modelo numérico aqui definido, conjuntamente com os da equação de Topkaya (2006), verificando-se a boa concordância entre ambos.

3.3 Análise paramétrica

Com intuito de englobar um grande arranjo de valores de parâmetros, considerou-se a variação de todas as dimensões da seção transversal, além do comprimento da viga, partindo do perfil padrão PS 800 x 320 x 16 x 9,5 de comprimento de 12 m.

Dessa forma, variou-se a altura do perfil (d) para 1.000 mm e 600 mm, a largura das mesas (b_f) para 230 mm e 140 mm, a espessura da alma (t_w) para 8 mm, 12,5 mm e 16 mm, a espessura da mesa (t_f) para 22,4 mm e 31,5 mm, e nove valores de comprimento cobrindo uma faixa da razão entre o vão da viga e a altura da seção transversal (L/d) de 10 a 30. A combinação entre os perfis, resultantes da variação dos valores das dimensões da seção transversal e da razão L/d gerou 216 vigas, que foram usadas no estudo paramétrico, conforme sintetizado na Tabela 2.

Tabela 2: Síntese da combinação de parâmetros

d (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)	b_f (mm)	L/d
1.000	22,4	8	140	10
600	31,5	12,5	230	12,5
-	-	16	-	...
-	-	-	-	30

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Considerações iniciais

Os resultados das análises dos modelos numéricos desenvolvidos neste trabalho foram capazes de ilustrar o modo de flambagem e determinar a força crítica. A seguir, no Subitem 5.2 são mostrados os modos de flambagem obtidos. Mais adiante, nos subitens 5.3 a 5.6 são apresentados, na forma de gráficos, os valores da força crítica determinados com os modelos numéricos deste trabalho, conjuntamente com os valores da Eq. (1), de Topkaya (2006), e da Eq. (5) da norma americana ANSI/AISC 360-16 (nessa norma, esse valor corresponde à força resistente nominal), considerando-se as variações da espessura e da altura da alma, da espessura e da largura da mesa tracionada e do comprimento da viga, tendo como referência o perfil padrão definido no Subitem 4.1. Destaca-se que no uso da equação da norma americana, considerou-se sempre o fator C_r como igual a $6,6 \times 10^6 \text{ MP}_a$, para facilitar a comparação de seus resultados com os deste trabalho e com os de Topkaya (2006).

4.2 Modos de flambagem

Na análise dos modelos numéricos desenvolvidos neste trabalho, foram identificados os dois modos de flambagem lateral da alma (Fig. 10) indicados por Summers e Yura (1982) e Mullin e Cheng (1995) e mostrados anteriormente na Fig. 3.

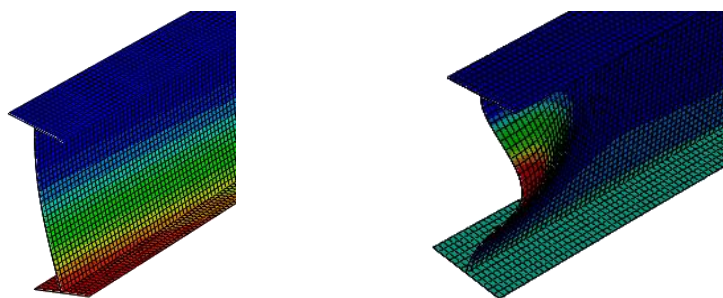


Figura 10: Modos de flambagem lateral da alma

Foram observados modos globais de flambagem em que a mesa tracionada apresentava de uma a quatro semiondas laterais (Fig. 11), dependendo da razão L/d (à medida que essa razão aumentava, havia tendência do aumento do número de semiondas).

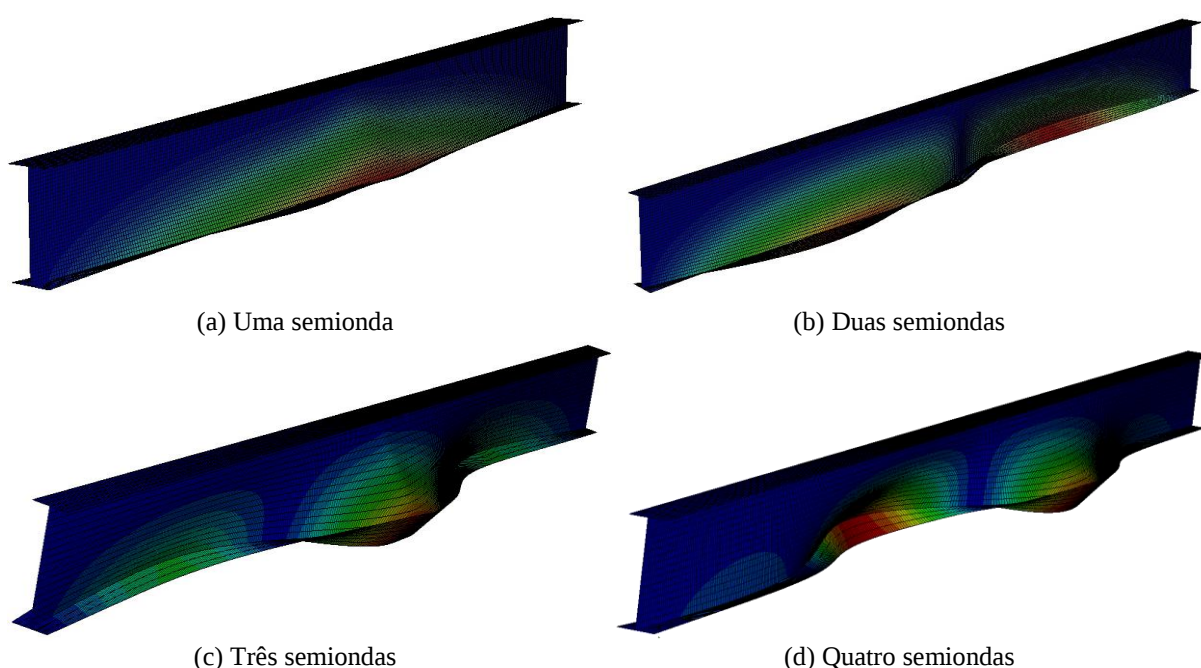


Figura 11: Modos globais da flambagem lateral da alma

4.3 Influência da espessura da alma

Na Fig. 12 são mostrados os valores da força localizada crítica obtidos segundo este trabalho e as equações de Topkaya (2006) e do ANSI/AISC 360-10, variando-se a espessura da alma do perfil padrão.

Observa-se que os resultados deste trabalho se aproximam muito dos de Topkaya (2006), com a força crítica sempre se elevando com o aumento da espessura da alma, uma vez que esse aumento eleva substancialmente a rigidez lateral da alma. Observa-se também que a equação do AISC fornece quase sempre resultados bastante inferiores a estes e, ainda, muito pouco dependentes da espessura da alma, o que contradiz Summers e Yura (1982), que afirmaram que essa espessura tem participação relevante no valor da força crítica.

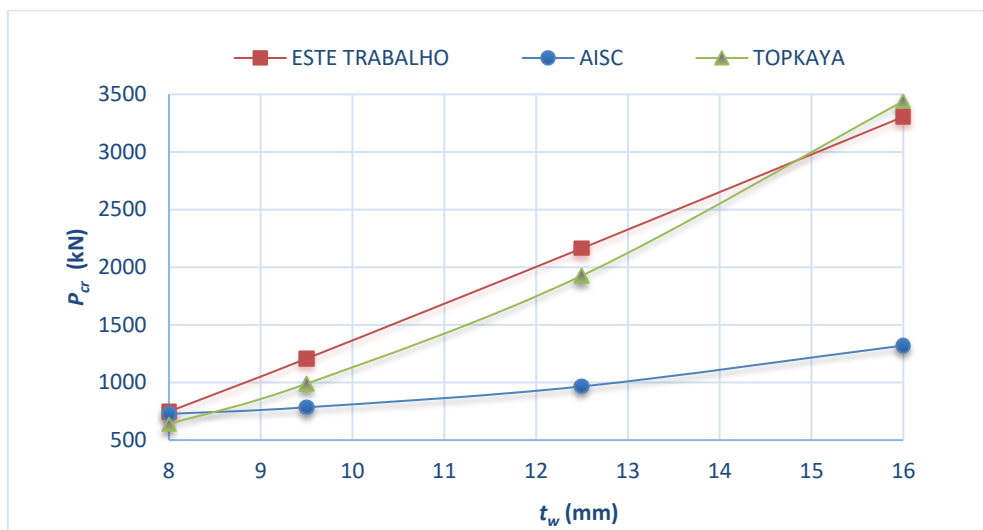


Figura 12: Força crítica em função da variação da espessura da alma do perfil padrão

4.4 Influência da altura da alma

A altura da alma (h) é um parâmetro muito influente no valor da força localizada crítica da viga, uma vez que, segundo Summers e Yura (1982), ela determina a magnitude das tensões normais atuantes, e também devido à esbeltez (h/t_w) estar relacionada diretamente com as tensões de cisalhamento.

Os resultados obtidos neste trabalho para o perfil padrão, variando-se a altura da alma, são apresentados na Fig. 13 (nessa figura, consta a altura total da seção transversal como indicativa da altura da alma), juntamente com os resultados de Topkaya (2006) e do AISC.

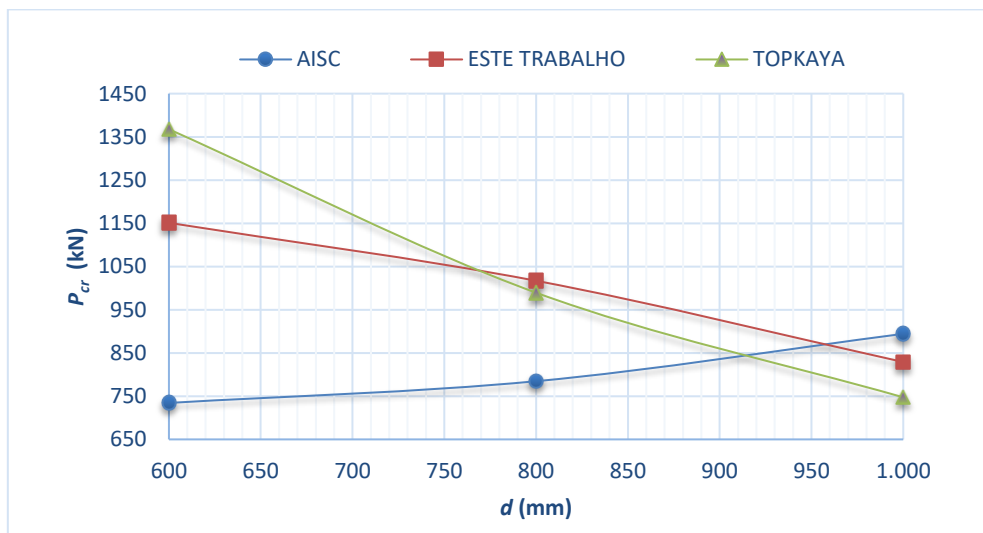


Figura 13: Força crítica em função da variação da altura da alma (representada pela altura total da seção transversal) do perfil

Verifica-se que as forças críticas obtidas neste trabalho e no trabalho de Topkaya (2006) ficaram bastante próximas e consistentes com a afirmação de Summers e Yura (1982) de que a força resistente decresce quase linearmente com o aumento da altura da alma. Os resultados fornecidos pelo AISC, no entanto, são conservadores na maioria da faixa estudada, e opostos

aos outros, com a elevação do valor da força resistente com o aumento da altura da alma. Isso parece inconsistente, uma vez que o aumento da altura da alma reduz proporcionalmente sua rigidez.

4.5 Influência das dimensões da mesa tracionada

4.5.1 Considerações iniciais

Summers e Yura (1982) estudaram a contribuição da mesa tracionada através de quatro larguras, mantendo a mesma área, de modo que o momento de inércia do perfil em relação ao eixo x (ver Fig. 2) permanecesse inalterado. Como conclusão, os pesquisadores afirmaram que a rigidez lateral pouco afeta a força crítica para vigas simplesmente apoiada, apesar de fazer parte da composição do procedimento normativo.

Para complementar esse estudo, as análises aqui realizadas não mantiveram a área da mesa tracionada constante, objetivando quantificar como a espessura e a largura da mesa tracionada influem separadamente no valor da força crítica das vigas.

4.5.2 Espessura

Para o perfil padrão deste estudo, variando-se a espessura das mesas, neste trabalho foram obtidos os valores da força crítica mostrados na Fig. 14, juntamente com os valores de Topkaya (2006) e do AISC. Obviamente, sempre a força crítica se eleva, pois com o aumento dessa espessura, a inércia da mesa tracionada em relação ao seu eixo de maior inércia aumenta. É possível perceber novamente uma boa convergência entre os resultados deste trabalho e os de Topkaya (2006), embora os primeiros estejam um pouco superiores aos últimos. Os resultados fornecidos pelo AISC foram bastante discordantes, com a espessura da mesa exercendo uma influência muito mais significativa no valor da força crítica. Por essa razão, a força crítica do AISC para menores espessuras da mesa é inferior, mas a partir de determinada espessura se torna superior aos valores obtidos neste trabalho e por Topkaya (2006).

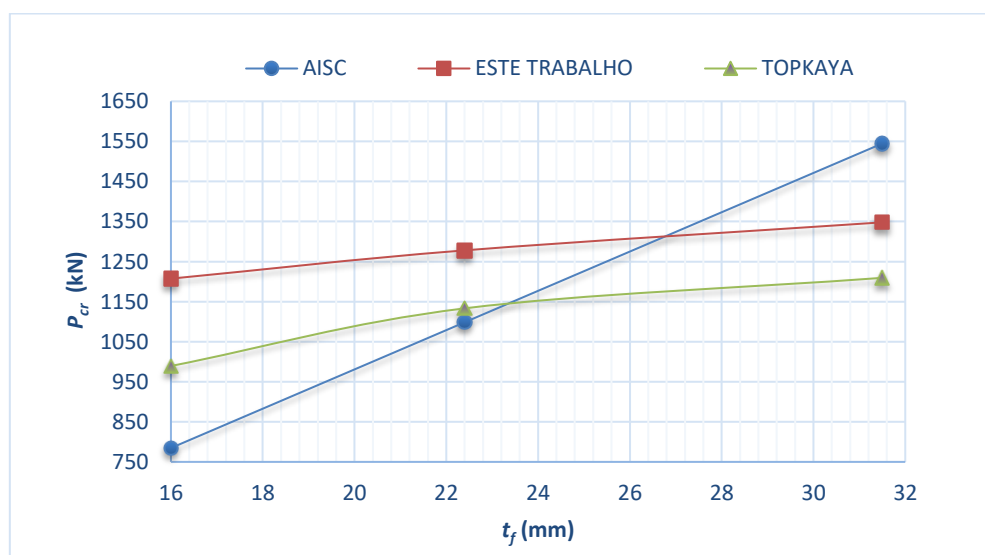


Figura 14: Força crítica em função da variação da espessura das mesas do perfil padrão

4.5.3 Largura

Os valores da força crítica obtidos neste trabalho do estudo paramétrico para o perfil padrão, variando-se a largura das mesas, são apresentados na Fig. 15, juntamente com os valores de Topkaya (2006) e do AISC. Nota-se, como era de se esperar, que sempre a força crítica se eleva, pois com o aumento dessa largura, a inércia da mesa tracionada em relação ao seu eixo de maior inércia aumenta substancialmente. Mais uma vez, observa-se o conservadorismo do procedimento de cálculo adotado pelo AISC, e ainda certa convergência entre os resultados deste trabalho e de Topkaya (2006). Nota-se que, no entanto, para Topkaya (2006), a largura das mesas tem pouca influência nos resultados, o que parece pouco consistente.

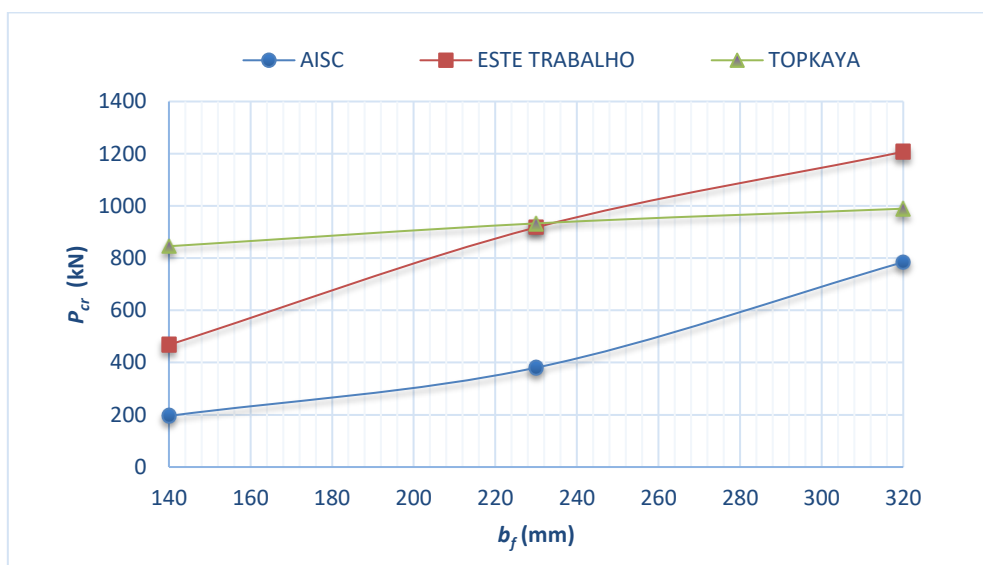


Figura 15: Força crítica em função da variação da largura das mesas do perfil padrão

4.6 Influência do comprimento da viga

Os valores da força crítica obtidos no perfil padrão, alterando-se o comprimento da viga entre 10 e 30 vezes a altura da seção transversal são apresentados na Fig. 16, juntamente com os valores de Topkaya (2006) e do AISC.

Percebe-se que a equação de Topkaya (2006) conduz a um comportamento incoerente, proporcionando aumento da força resistente com a elevação do comprimento da viga. No entanto, deve ser observado que essa equação só pode ser considerada válida para o comprimento da viga L máximo de 12,8 m, pois Topkaya (2006) limitou seu estudo a um valor de L/d igual a 16 (no caso do perfil padrão adotado neste trabalho, que possui altura da seção d igual a 800 mm, o limite de L é igual a 12,8 m). Apesar disso, mesmo na faixa de validade, como pode ser visto na Fig. 16 onde o comprimento de 12,8 m é destacado, essa incoerência se manifesta. Os resultados deste trabalho parecem mais consistentes, com a redução da força resistente com o aumento do comprimento, comportamento que também aparece no procedimento do AISC. Nota-se que os valores da força crítica do AISC são maiores que os deste trabalho até a razão L/d de aproximadamente 13,5, e depois ficam menores. Entretanto, deve ser mencionado que para esses casos em que os resultados do AISC são maiores, a norma americana indica que o fenômeno não tem a possibilidade de ocorrer, conforme a Eq. (8).

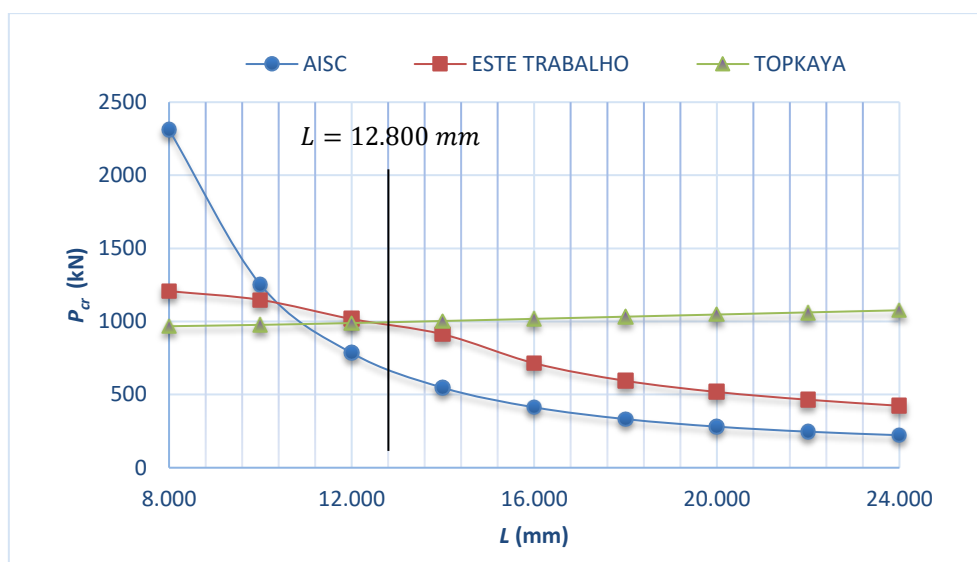


Figura 16: Força crítica em função da variação do comprimento da viga

5 CONCLUSÕES

Neste artigo, inicialmente, procurou-se dar uma visão histórica do tratamento da flambagem lateral da alma em vigas de aço desde a década de 1960, abrangendo o procedimento das normas de projeto de estruturas de aço americana (ANSI/AISC 360-10) e brasileira (ABNT NBR 8800:2008) – ambas adotam praticamente o mesmo procedimento, desenvolvido em 1986, portanto há mais de trinta anos. Mostrou-se que o procedimento dessas normas para determinação da força resistente se limita à obtenção da força crítica, com a introdução de alguns ajustes pouco fundamentados e apresentam muitas inconsistências e lacunas. Mostrou-se ainda que os estudos recentes não são muitos, e ainda não fornecem uma formulação definitiva para o problema, o que tornam necessárias novas pesquisas.

Procurando avançar no sentido de uma maior compreensão do fenômeno da flambagem lateral da alma, foi desenvolvida e aferida aqui uma modelagem numérica utilizando o MEF, com o uso do programa Abaqus (2014), para obtenção da força localizada crítica de vigas de aço biapoiadas com seção I duplamente simétrica e vínculos de garfo nos apoios. Considerou-se sempre a força localizada na seção central das vigas, e a mesa superior, na qual atua a força localizada, contida contra deslocamento lateral e rotação ao longo de seu comprimento. Com a modelagem, foi feito um estudo paramétrico, onde foram avaliadas as influências na flambagem lateral da alma da espessura e da altura da alma, da espessura e da largura da mesa tracionada e do comprimento da viga. Todos os resultados obtidos com a modelagem deste trabalho foram comparados graficamente com os de uma equação proposta por Topkaya (2006) e com os do procedimento normativo.

A realização das análises numéricas possibilitou a caracterização de como cada parâmetro influi na força crítica de flambagem lateral da alma. Comprovou-se também que de maneira geral, o procedimento normativo fornece valores conservadores, sendo exceção, casos com mesas muito pouco esbeltas e almas muito esbeltas. Também foi demonstrado que os valores fornecidos pela equação de Topkaya (2006) são satisfatórios dentro de sua faixa de aplicação,

ou seja, nas vigas em que a razão entre o comprimento da viga e a altura da seção transversal não ultrapasse 16.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem os apoios concedidos pela FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais), CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 8800:2008: *Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2008.
- ANSI/AISC 360-10: *Specification for Structural Steel Building*. Chicago, EUA: American Institute of Steel Construction (AISC), 2010.
- BASLER, K., "New Provisions for Plate Girder Design," Appendix C, 1961 Proceedings, AISC National Engineering Conference, pp. 65-74
- DANIELS, J.H, FISHER, J. W. *Static behavior of composite beams with variable load position*. Report no 324.3. Fritz Engineering Laboratory, Lehi University; 1967.
- FAKURY, R.H., CASTRO E SILVA, A.L.R., CALDAS, R.B. *Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto*. São Paulo. Pearson, 2016.
- GRONDIN, G. Y., GHENG, J. J. R. *Sidesway web buckling of steel beams*. Engineering Journal, AISC 1999, 36(4):169-79.
- HIBITT, KARLSSON, SORESEN. *Abaqus Online Documentation*. Version 6.14, Dassault Systèmes, SIMULIA, 2014.
- LAGERQVIST, O., JOHANSSON, B. *Resistance of I-girders to concentrated loads*. Journal of Constructional Steel Research 1996;39 (2):87-119.
- MULLIN, D., CHENG, J. J. R. *The effect of tension flange movement on the strength of point loaded I-beams*. Structural Engineering Report Np. 208. Edmonton, Alberta; 1995.
- SUMMERS, P. A., YURA, J. A. *The behavior of beams subjected to concentrated loads*. Report no 82-5. Phil M. Ferguson Structural Engineering Laboratory, University of Texas at Austin; 1982.
- TOPKAYA, C. *A numerical study on linear bifurcation web buckling of steel I-beams in the sidesway mode*. Engineering Structures. Ankara, Turkey, 2006.
- YURA, J. A. *Web behaviour of concentrated loads in steel beams*. Annual Meeting of the column Research Council, March 24-25, 1970. St. Louis, Missouri.