

Tema: Estruturas de aço e mistas de aço e concreto

INFLUÊNCIA DA DISTORÇÃO DA ALMA NA FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO DE PERFIS I SUBMETIDOS A MOMENTO CONSTANTE E CARGA UNIFORMEMENTE DISTRIBUÍDA

Carla Cristiane Silva¹
Ricardo Hallal Fakury²
Ana Lydia Reis de Castro e Silva³

Resumo

Este artigo trata da influência da distorção da alma no valor do momento crítico elástico de flambagem lateral com torção de vigas de aço com seção I duplamente simétrica. As vigas estudadas são biapoiadas no plano de flexão, com comprimento destravado igual ao vão, supostas com empenamento livre e torção impedida nas duas extremidades e submetidas a dois tipos de carregamento: i) momento uniforme e ii) carga uniformemente distribuída atuante na semialtura da seção transversal, na mesa superior e na mesa inferior. Para se chegar a conclusões consistentes, inicialmente são desenvolvidos e aferidos modelos numéricos para utilização do Método dos Elementos Finitos por meio do programa ABAQUS, e em seguida processados diversos modelos variando a esbeltez da alma e o comprimento destravado. Os resultados obtidos numericamente são comparados com soluções clássicas que não levam em conta o efeito da distorção da alma. Ao final, concluiu-se que, no geral, o efeito da distorção da alma aumenta com a redução do comprimento da viga e a elevação da esbeltez da alma e que esse efeito é maior para carga uniformemente distribuída que para momento uniforme.

Palavras-chave: Vigas de aço; Flambagem lateral com torção; Momento crítico elástico; Distorção da alma.

THE WEB DISTORTION'S INFLUENCE IN THE LATERAL TORSIONAL BUCKLING OF I-SECTIONS SUBJECT TO UNIFORM MOMENT AND UNIFORMLY DISTRIBUTED LOAD

Abstract

In this paper the web distortion's influence in the value of the elastic critical moment of lateral torsional buckling of steel beams with doubly symmetric I-sections is studied. The beams are simply supported with free warping and restraint twist in the both ends and subject to two types of loading: i) uniform moment; ii) uniformly distributed load acting in the half height of the cross section, in the top flange and in the bottom flange. To reach consistent conclusions, initially numerical models for use of the Finite Elements Method by means of program ABAQUS are developed and benchmarked and then are processed several models with variation the web slenderness and the beam laterally unbraced length. The results obtained with ABAQUS are compared with the classical solutions which do not take into account the

* Contribuição tecnológica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.



effect of web distortion. Finally, it is concluded that, in general, the effect of the web distortion increases with the reduction of the length of the beam and the elevation of the web slenderness e that this effect is greater for uniformly distributed load than uniform moment.

Keywords: Steel beams; Lateral torsional buckling; Elastic critical moment; Web distortion.

¹ Engenheira Civil, Mestranda em Engenharia de Estruturas, Departamento Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

² Engenheiro Civil, Dr. em Engenharia de Estruturas, Professor Titular, Departamento Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

³ Engenheira Civil, Dr^a. em Engenharia de Estruturas, Professora Adjunta, Departamento Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Flambagem Lateral com Torção

A flambagem lateral com torção (FLT), nas vigas com seção I, é um fenômeno causado pelo momento fletor atuante em relação ao eixo de maior inércia da seção transversal (eixo x, perpendicular à alma), e caracterizado por uma translação lateral (na direção do eixo de x), $\mu(z)$, e uma torção, $\varphi(z)$, combinados, conforme ilustra a Figura 1. Sucintamente, esses dois movimentos decorrem do efeito desestabilizante da parte comprimida da seção transversal, que tende a se movimentar lateralmente, e é parcialmente contida pelo efeito estabilizante da parte tracionada. O valor do momento fletor resistente a esse modo de colapso depende, em regime elástico, do comprimento destravado, das condições de contorno, das dimensões da seção transversal, da variação do momento fletor e do nível de atuação das cargas transversais.

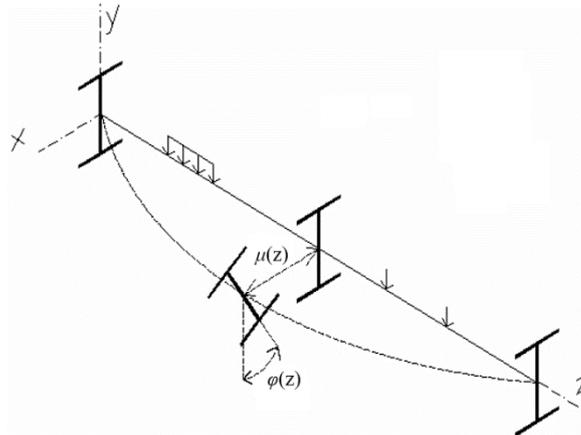


Figura 1: Flambagem lateral com torção (Fakury *et al.* [1])

1.2 Influência da Distorção da Alma na FLT

A teoria clássica da FLT parte do princípio de que a seção transversal da viga se mantém inalterada durante o fenômeno, indeformável no seu plano (Figura 2-a). No entanto, a alma das seções I pode apresentar flexão lateral (distorção), como se vê na Figura 2-b, o que causa a redução do momento fletor resistente da viga.

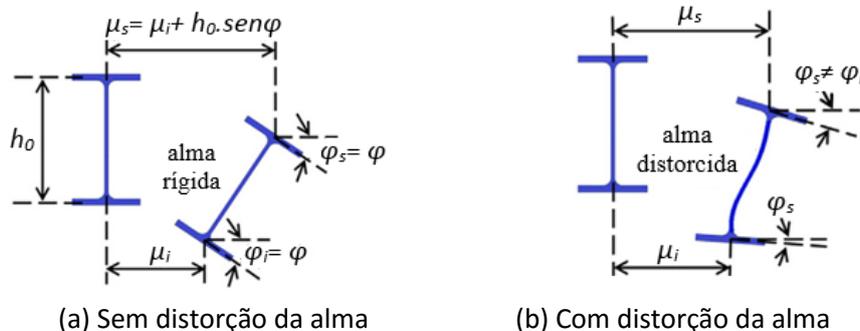


Figura 2: Modos de flambagem lateral de viga (adaptado de Kallan e Buyukkaragoz [2])

O efeito da distorção da alma na flambagem lateral com torção de vigas de aço com seção I, conforme diversos pesquisadores, entre os quais Bradford [3], Roberts e Jhita. [4], Wang *et al.* [5] e Zirakian [6], depende da esbeltez da alma, caracterizada pela relação entre a altura e a espessura desse elemento, e do comprimento destravado.

Em algumas situações, a flambagem lateral com torção, além de sofrer a influência da distorção da alma, pode ocorrer simultaneamente com a flambagem local da mesa comprimida (FLM) ou com a flambagem local da alma (FLA) ou, até, em conjunto com ambas essas flambagens locais.

1.3 Objetivo

Este artigo tem como objetivo avaliar o efeito da distorção da alma no valor do momento crítico elástico de flambagem lateral com torção de vigas de aço com seção I duplamente simétrica com vínculos de garfo (vínculos que não permitem a torção e o deslocamento lateral da seção transversal, mas permitem o empenamento e a rotação em relação ao eixo que passa pelo plano médio da alma, chamada de rotação lateral) nas duas extremidades do vão, assumindo sempre o vão como igual ao comprimento destravado, submetidas a dois tipos de carregamento: i) momento uniforme; ii) carga uniformemente distribuída atuante na semialtura da seção transversal (CDC), na mesa superior (CDS) e na mesa inferior (CDI). Quando a carga atua na mesa superior ela é desestabilizante e quando atua na mesa inferior, estabilizante.

Para se atingir o objetivo supracitado, serão usadas vigas com seção transversal com altura, largura e espessura das mesas constantes, variando-se a espessura da alma e o vão em uma ampla faixa, de modo a se levantar as influências da esbeltez da alma e do comprimento destravado. Nessas vigas, serão obtidos os valores do momento crítico elástico sem considerar a distorção da alma de acordo com a teoria clássica da FLT (ver Item 2), e os valores desse momento incorporando o efeito da distorção da alma por meio de análise numérica efetuada pelo Método dos Elementos Finitos usando o programa comercial ABAQUS (Hibbitt *et al.* [7]). O efeito da distorção será expresso pela razão entre esses dois momentos.

2 MOMENTO CRÍTICO ELÁSTICO CONFORME A TEORIA CLÁSSICA DA FLT

2.1 Considerações Gerais – Vigas de Alma Não-esbelta e Vigas de Alma Esbelta

De acordo com Basler e Thürlimann [8], devem ser utilizados procedimentos de cálculo distintos para determinação do momento crítico elástico de vigas de alma não-esbelta e vigas de alma esbelta. As vigas de alma não-esbelta são aquelas nas quais o parâmetro de esbeltez da alma, λ_w , dado pela relação h/t_w , em que h é a altura da alma (nos perfis laminados, a altura da parte plana da alma e, nos perfis soldados, a distância entre as faces internas das duas mesas) e t_w sua espessura, não supera o parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento, $\lambda_{w,r}$, e de alma esbelta aquelas em que λ_w é maior que $\lambda_{w,r}$, com:

$$\lambda_{w,r} = 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (1)$$

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

onde E é o módulo de elasticidade e f_y é a resistência ao escoamento do aço. Considerando que o módulo de elasticidade pode ser tomado como igual a 200.000 MPa, esse limite apresenta, respectivamente, valores de 161, 147 e 136 para aços com resistência ao escoamento de 250 MPa, 300 MPa e 350 MPa, os mais usados no Brasil.

A subdivisão das vigas em vigas de alma não-esbelta e de alma esbelta também é adotada por diversas normas de projeto, entre as quais a brasileira ABNT NBR 8800 [9] e a norte-americana ANSI/AISC 360 [10]. De acordo com essas duas normas, entre as vigas de alma não-esbelta, quando λ_w é inferior ou igual ao parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação $\lambda_{w,p}$, não ocorre FLA, e quando é maior que $\lambda_{w,p}$ e no máximo igual a $\lambda_{w,r}$, a FLA pode ocorrer em regime inelástico, com:

$$\lambda_{w,p} = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (2)$$

Esse parâmetro tem valores de 106, 97 e 90 para aços com resistência ao escoamento de 250 MPa, 300 MPa e 350 MPa, respectivamente.

2.2 Vigas de Alma Não-esbelta

Conforme a teoria clássica, nas vigas de alma não-esbelta, o efeito da distorção da alma não é considerado. Assim, o momento crítico elástico para o estado-limite último de flambagem lateral com torção de vigas de seção I com dois eixos de simetria fletidas em relação ao eixo de maior momento de inércia (eixo x), pode ser dado por:

$$M_{cr,an,1} = C M_{cr,0} \quad (3)$$

onde C é um fator que leva em conta a variação do momento fletor ao longo do comprimento destravado e o nível de aplicação das cargas transversais atuantes e $M_{cr,0}$ é o momento crítico elástico para o a situação de momento uniforme no comprimento destravado.

O valor de $M_{cr,0}$ é igual a (Timoshenko e Gere [11]):

$$M_{cr,0} = \frac{\pi^2 E I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + 0,039 \frac{J L_b^2}{C_w} \right)} \quad (4)$$

onde C_w é a constante de empenamento da seção transversal, I_y é o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo y , J é a constante de torção da seção transversal e L_b é o comprimento destravado da viga.

O fator C , para o caso de momento uniforme é igual a 1,0 e, para o caso de carga uniformemente distribuída, de acordo com obtidos por Chen e Lui [12], quando as duas mesas da viga estão livres para se deslocar lateralmente, pode ser expresso, com boa precisão, por:

$$C = \begin{cases} AB & , \text{ para carga atuando na mesa inferior} \\ A & , \text{ para carga atuando na semialtura da seção transversal} \\ A/B & , \text{ para carga atuando na mesa superior} \end{cases} \quad (5)$$

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

onde

$$A = 1,12 \quad (6)$$

$$B = 1,0 + 0,535W - 0,154W^2 \quad (7)$$

com

$$W = \sqrt{\frac{\pi^2 E C_w}{L_b^2 G J}} \quad (8)$$

2.3 Vigas de Alma Esbelta

De acordo com Basler e Thürlimann [8], nas vigas de alma esbelta o efeito da distorção da alma na FLT passa a ser importante. Para levá-lo em conta de modo simplificado, esses autores propõem assumir como nula a constante de torção J . Adicionalmente, em seus estudos, concluíram que quando o momento atuante excede o momento associado à flambagem local da alma, ocorre uma redistribuição de tensão da altura comprimida da alma para a mesa comprimida, ou seja, ocorre uma “transferência de responsabilidade” da alma comprimida para a mesa comprimida (Figura 3), o que causa uma redução no momento resistente proporcionada pelo seguinte fator:

$$k_{pg} = 1 - \frac{a_r}{1200 + 300a_r} \left(\frac{h_c}{t_w} - 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right) \leq 1,0 \quad (9)$$

onde a_r é a razão entre as áreas da alma e da mesa comprimida, que não pode superar 10 e h_c é duas vezes a distância do centro geométrico da seção transversal à face interna da mesa comprimida.

Desse modo, tendo em vista as equações (3) e (4), nas vigas de alma esbelta o momento crítico elástico se torna igual a:

$$M_{cr,an,2} = \frac{k_{pg} C \pi^2 E I_y}{L_b^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y}} \quad (10)$$

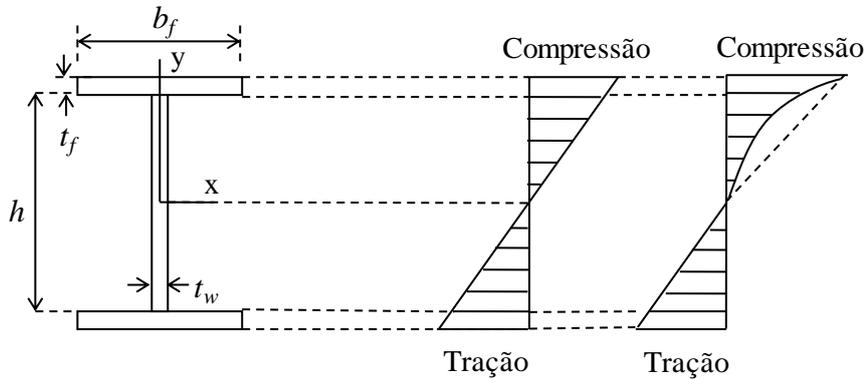


Figura 3: Diagrama de momento antes e depois da flambagem (Queiroz [13])

De acordo com a ABNT NBR 8800 [9], a esbelteza da alma, λ_w , dada por h/t_w , não pode exceder 260 nem $0,42E/f_y$, para se assegurar que a mesa comprimida não flambe por flexão na direção da alma (a alma demasiadamente esbelta não conseguiria impedir o movimento da mesa em sua direção).

3 ANÁLISE NUMÉRICA

Para investigar o fenômeno da distorção da alma na flambagem lateral com torção foram desenvolvidos e calibrados frente a resultados da literatura modelos numéricos no programa comercial ABAQUS (Hibbitt *et al.* [7]). Esse programa utiliza o Método dos Elementos Finitos, que se baseia na aproximação das condições de equilíbrio de um corpo sob o ponto de vista Lagrangiano, ou seja, cada ponto material do corpo é analisado como sendo uma função do tempo e de suas coordenadas, e as equações de equilíbrio são obtidas a partir do Princípio dos Trabalhos Virtuais.

Neste artigo foram feitas análises linearizadas de flambagem a fim de se obter o momento crítico elástico para o estado-limite de flambagem lateral com torção de vigas com seção I duplamente simétricas de aço. Foram utilizados nas mesas e na alma das vigas elementos de casca S4, representados na Figura 4, que são elementos de quatro nós de aplicação geral, curvatura dupla, integração completa e com deformação finita de membrana. Eles apresentam seis graus de liberdade por nó, referentes a três translações e três rotações segundo um sistema de três eixos (x, y e z). A malha de elementos finitos foi estruturada. Nesse processo, a distorção da alma é naturalmente incorporada aos resultados.

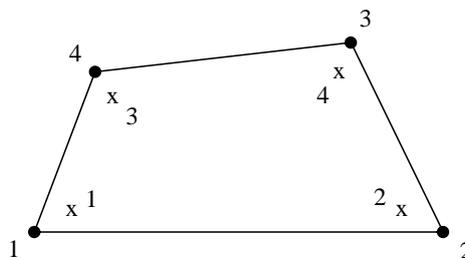


Figura 4: Representação elemento de casca S4

Visando definir uma malha de elementos finitos que possuísse um número de elementos adequado e com capacidade de adaptação aos contornos dos perfis, foi realizada uma avaliação da influência do refinamento da malha na precisão dos resultados, levando em consideração ainda o tempo de processamento, como mostra a Tabela 1. Para esse estudo, foi utilizado um modelo de viga de 10 m de vão, altura da seção transversal de 500 mm, larguras e espessura das mesas de 200 mm e 16 mm, respectivamente, e espessura de alma de 23,4 mm submetida a momento uniforme. Ao final, optou-se por utilizar uma malha com tamanho do elemento de 20 mm tendo em vista que seu tempo de processamento foi bem menor que o da malha com elemento de 10 mm e a diferença entre os resultados foi irrelevante.

Tabela 1: Estudo de refinamento de malha

Casca tipo	Tamanho do elemento (mm)	Número de elementos	Tempo de Processamento	Momento kN.m
S4	500	120	14s	310,62
S4	300	198	17s	310,12
S4	100	800	15s	309,20
S4	80	1.250	15s	308,82
S4	60	2.672	20s	308,47
S4	40	6.000	19s	307,87
S4	30	9.324	22s	307,65
S4	20	22.000	49s	307,13
S4	10	88.000	14min13s	306,57

O momento constante na viga foi simulado aplicando um binário de forças distribuídas nas mesas nas duas extremidades, com tração na mesa inferior e compressão na mesa superior, como se vê na Figura 5. Evidentemente, o momento atuante é igual ao valor da força distribuída multiplicada pela largura das mesas e pela distância entre as linhas médias das mesas.

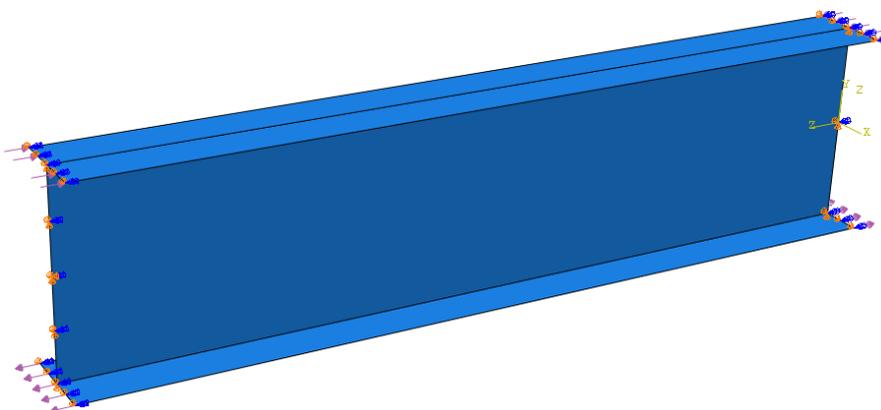
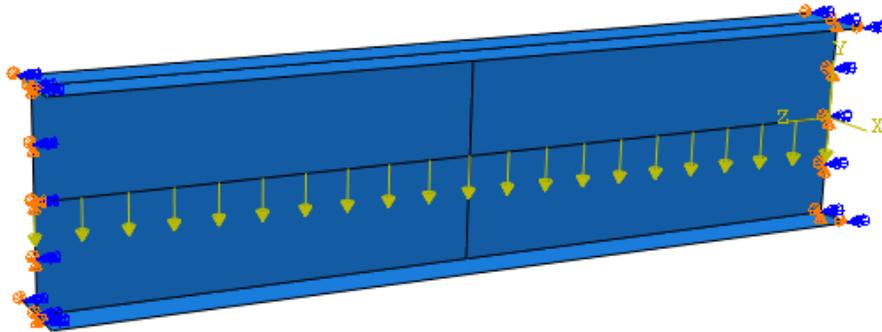
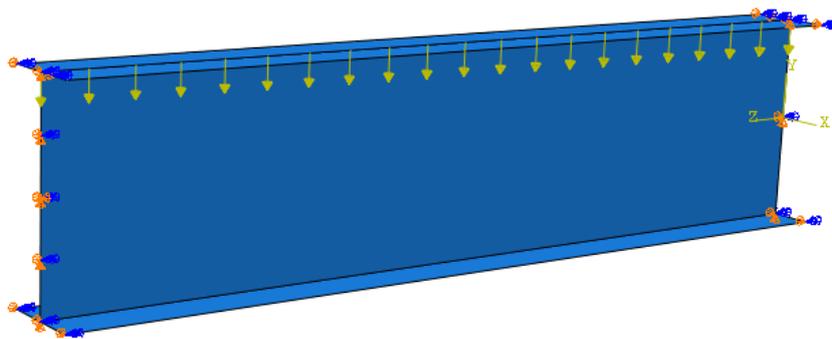


Figura 5: Simulação do momento constante na viga

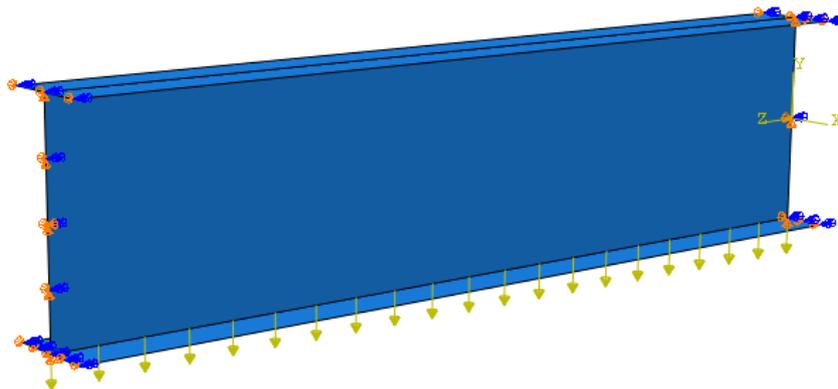
A carga uniformemente distribuída foi posicionada no centro da alma (Figura 6-a), na mesa superior (Figura 6-b) e na mesa inferior (Figura 6-c), ao longo de todo comprimento destravado da viga.



(a) No centro da alma (CDC)



(b) Na mesa superior (CDS)



(c) Na mesa inferior (CDI)

Figura 6: Simulação da carga uniformemente distribuída na viga

A geometria foi definida pelas linhas médias da seção transversal de acordo com o sistema de coordenadas global do programa ABAQUS (Hibbitt *et al.* [7]), onde a origem está situada na semialtura da seção e em uma das extremidades. O eixo y está na direção da alma, o eixo x na direção perpendicular à alma e o eixo z na direção longitudinal da viga. Para simular os apoios

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

rotulados no plano de flexão com vínculos de garfo para flambagem lateral, as translações na direção y foram impedidas em toda a altura da alma, ao passo que as translações na direção x e a rotação em torno de z foram impedidas em todos os nós de ambas as extremidades da viga. A translação na direção z foi restringida apenas no nó situado na semialtura da alma e em somente uma das extremidades da viga.

Nos modelos numéricos foi adotado um diagrama tensão *versus* deformação linear do aço, considerando o módulo de elasticidade E igual a 200.000 MPa e o coeficiente de Poisson ν igual a 0,3. Dessa forma, o programa ABAQUS (Hibbitt *et al.* [7]) pôde considerar um comportamento elástico e isotrópico do aço.

A seção transversal das vigas estudadas tem altura (d) de 500 mm. As mesas possuem largura (b_f) de 200 mm e espessura (t_f) de 16 mm, portanto têm esbelteza ($\lambda_f = \frac{1}{2}b_f/t_f$) de 6,25, indicando que esse elemento não pode sofrer flambagem local, conforme a ABNT NBR 8800 [9]. Para a alma, foram adotadas espessuras (t_w) hipotéticas de 23,4 mm, 11,70 mm, 7,80 mm, 5,85 mm, 4,68 mm, 3,90 mm, 3,34 mm, 2,93 mm, 2,60 mm e 2,34 mm, correspondentes a esbeltezes desse elemento ($\lambda_w = h/t_w$) iguais a 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180 e 200 (a altura h foi tomada igual à distância entre as faces internas das mesas), abrangendo seções transversais de alma esbelta e não-esbelta e, nestas últimas, seções em que a flambagem local da alma não pode ocorrer ou que pode ocorrer em regime inelástico. As vigas foram projetadas com comprimentos destravados (L_b) de 10 m, 8 m, 6 m e 4 m, correspondentes à razão entre altura da seção transversal e vão variando entre 1/20 e 1/8, faixa de utilização que cobre as situações usuais.

Como ilustração, a Figura 7 mostra a configuração após a flambagem lateral com torção de uma viga com a modelagem realizada no programa ABAQUS (Hibbitt *et al.*, 2005) e a sua seção central, podendo-se constatar a ocorrência da distorção da alma.

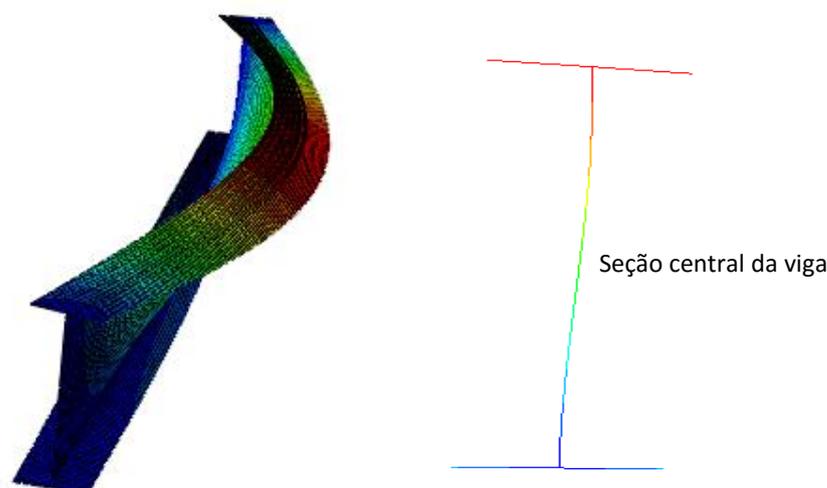


Figura 7: Efeito da distorção da alma na FLT (modelo com $L_b = 4$ m e $\lambda_w = 60$ – momento uniforme)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores dos momentos críticos elásticos calculados com a teoria clássica da FLT ($M_{cr,an}$), que não considera essa distorção da alma nas vigas, foram comparados com os valores dos momentos encontrados nos modelos numéricos ($M_{cr,num}$), que levam em conta de modo bastante preciso a distorção da alma, tanto para as vigas de alma não-esbelta como para as vigas de alma esbelta, independentemente de a esbeltez da alma λ_w caracterizar viga de um ou outro tipo. Para essa comparação, foram traçados gráficos da razão entre os momentos críticos elásticos ($M_{cr,an}/M_{cr,num}$), mostrados nas figuras 8, 9, 10, e 11 para momento uniforme, carga distribuída atuante na semialtura da seção transversal, na mesa superior e na mesa inferior, respectivamente, em função da esbeltez da alma para os vários comprimentos destravados da viga.

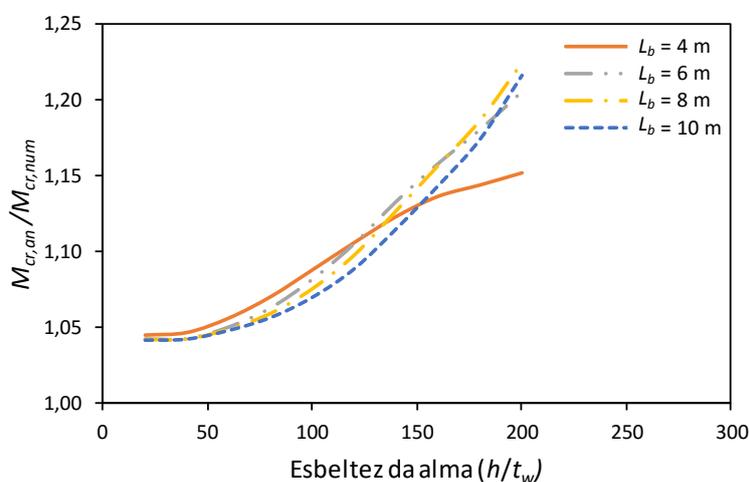


Figura 8: Razão $M_{cr,an}/M_{cr,num}$ em função da esbeltez da alma h/t_w para momento uniforme

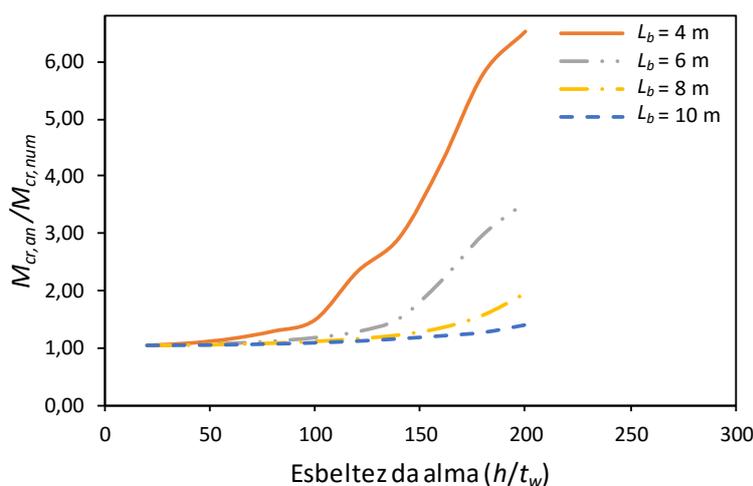


Figura 9: Razão $M_{cr,an}/M_{cr,num}$ em função da esbeltez da alma h/t_w para carga uniformemente distribuída na semialtura da seção transversal

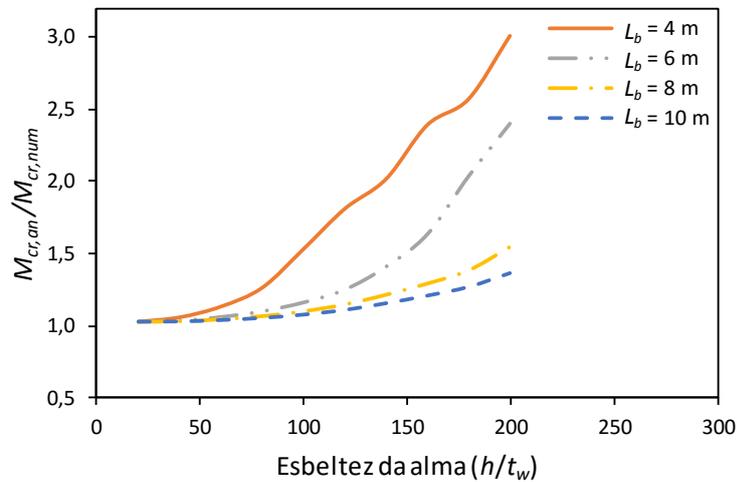


Figura 10: Razão $M_{cr,an}/M_{cr,num}$ em função da esbeltez da alma h/t_w para carga uniformemente distribuída na mesa superior

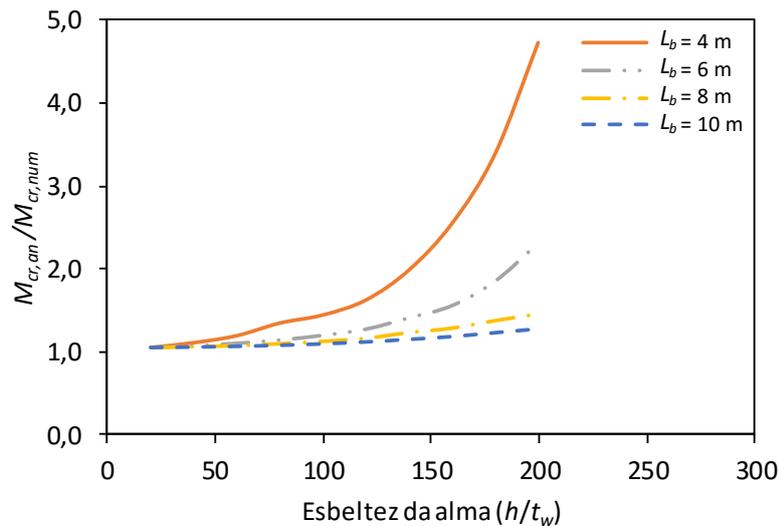


Figura 11: Razão $M_{cr,an}/M_{cr,num}$ em função da esbeltez da alma h/t_w para carga uniformemente distribuída na mesa inferior

Observa-se pelas figuras 8, 9, 10 e 11 que as curvas com todos os comprimentos destravados apresentam comportamentos similares, com o aumento da razão $M_{cr,an}/M_{cr,num}$ com a elevação da esbeltez da alma, indicando aumento da influência da distorção da alma.

Em vigas submetidas a momento uniforme, como se vê na Figura 8, nota-se que a influência máxima da distorção da alma é inferior a 22% e que, se a esbeltez da alma não supera um valor da ordem de 50, essa influência pode ser considerada desprezável, não superando 5%. Conforme Samanta e Kumar [14], nessa condição de momento uniforme, a alma não apresenta tensões de cisalhamento, ficando totalmente dedicada a suportar a distorção, razão pela qual a influência desse efeito não é grande.

Nas vigas submetidas a carga uniformemente distribuída no centro da alma (Figura 9), na mesa superior (Figura 10) e na mesa inferior (Figura 11), para todos os comprimentos destravados e esbeltezes da alma até um valor de 40, essa influência não supera 6%, para carga uniformemente distribuída na seção central e na mesa superior, e 11%, para carga uniformemente distribuída na mesa inferior. No entanto, para comprimentos destravados menores e esbeltezes da alma maiores, a influência da distorção da alma se torna extremamente elevada. Logo, a obtenção do momento crítico de vigas com pequenos comprimentos destravados sem considerar o efeito da distorção da alma pode levar a resultados superestimados, especialmente se a esbelteza da alma se aproxima do valor de $\lambda_{w,r}$.

De modo geral, nota-se que o efeito da distorção é maior quando a carga distribuída atua na semialtura da seção transversal e menor quando atua na mesa inferior.

Percebe-se que as curvas do comprimento destravado de 4 m das figuras 8, 9 e 10 apresentam uma discrepância muito grande em relação às curvas dos demais comprimentos destravados. Isso pode ser atribuído ao fato de que, nessas vigas com comprimentos destravados muito pequenos e elevada esbelteza de alma, a FLT se manifesta acompanhada da FLA.

5 CONCLUSÕES

Neste artigo, observou-se que a influência da distorção da alma no valor do momento crítico elástico à flambagem lateral com torção aumenta com a elevação da esbelteza da alma, como parece lógico, em conformidade com as conclusões de muitos pesquisadores.

Vigas submetidas a momento uniforme sofrem menor influência da distorção da alma do que vigas submetidas a carga uniformemente distribuída, pois a alma não está sujeita a tensão de cisalhamento, o que aumenta a sua capacidade resistente a esse efeito.

Os resultados para carga uniformemente distribuída atuante na semialtura da seção transversal, na mesa superior e na mesa inferior apresentam um comportamento similar. Para comprimentos destravados grandes e esbeltezes de alma reduzidas, ocorre uma pequena influência da distorção da alma. Para comprimentos destravados pequenos e esbeltezes de alma grandes, a influência da distorção da alma é extremamente elevada. Logo, a análise dessas vigas sem considerar o efeito da distorção da alma pode levar a resultados superestimados. Nota-se ainda que o efeito da distorção é maior quando a carga distribuída atua na semialtura da seção transversal e menor quando atua na mesa inferior.

Percebe-se que a curva da viga com menor comprimento destravado apresenta uma discrepância muito grande em relação às demais curvas. Isso pode ser atribuído ao fato de que nessa viga a FLT vem acompanhada da FLA.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro em forma de fomento à pesquisa concedido pela CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e pela FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais).

* Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2016** – Congresso Latino-americano da Construção Metálica – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.

REFERÊNCIAS

- 1 Fakury, R.H.; Castro e Silva, A.L.R.; Caldas, R.B. Dimensionamento de estruturas de aço em mistas de aço e concreto. São Paulo. Pearson, 2016.
- 2 Kallan, I.; Buyukkaragoz, A. A numerical and analytical study on distortional buckling of doubly-symmetric steel I-beams. Journal Constructional Steel Research. 2012; n. 70: p. 289-297.
- 3 Bradford, M.A. Lateral-Distortional Buckling of Steel I-Section Members. Journal Constructional Steel Research. 1992; n. 23: p. 97-116.
- 4 Roberts, T. M.; Jhita, P. S. Lateral, Local and Distortional buckling of I-beams. Thin-Walled Structures. 1983; n. 1: p. 289-308.
- 5 Wang, C.M.; Chin, C.K. And Kitipornchai, S. Parametric study on distortional buckling of monosymmetric beam-columns. Journal Constructional Steel Research. 1991; n. 18: p. 89-110.
- 6 Zirakian, T. Elastic distortional buckling of doubly symmetric I-shaped flexural members with slender webs. Thin-Walled Structures. 2008; n. 46: p. 466-475.
- 7 Hibbitt; Karlsson; Sorensen. ABAQUS/Standard – User’s Manual. USA, 2005.
- 8 Basler, K.; Thürlimann, B. Strength of Plate Girders in Bending. Transactions of the American Society of Civil Engineers. 1963; Vol. 128, Part II, p. 655–682.
- 9 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.
- 10 ANSI/AISC 360-10. Specification for Structural Steel Building. Chigaco, EUA: American Institute of Steel Construction (AISC), 2010.
- 11 Timoshenko, S.P.; Gere, J.M. Theory of Elastic Stability. 2nd. Ed. Engineering Societies Monographs, McGraw-Hill, New York, 1961.
- 12 Chen, W.F., and Lui, E.M. Structural Stability-Theory and Implementation. Elsevier Science Publishing, 1987, Chap. 5.
- 13 Queiroz, G. Elementos das estruturas de aço. Edição do Autor. 4ª Edição. Belo Horizonte, MG, Brasil, 1993.
- 14 Samanta, A.; Kumar, A. Distortional buckling in monosymmetric I-beams. Thin-Walled Structures. 2006; n. 44: p. 51-56.