

INFLUÊNCIA DO ENRIJECIMENTO EM PERFIS U FORMADOS A FRIO NA FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL DE VIBRAÇÃO

INFLUENCE OF STIFFENING IN COLD-FORMED CHANNEL SECTIONS IN THE NATURAL FREQUENCY OF VIBRATION

Lucas Fadini Favarato
Adenilcia Fernanda Grobério Calenzani
Felipe Barbosa Teixeira
Juliana da Cruz Vianna

lucasffavarato@gmail.com

afcalenzani@gmail.com

felipebarbosateixeira@gmail.com

jcviana30@gmail.com

Universidade Federal do Espírito Santo

Av. Fernando Ferrari, 51 4, Goiabeiras, 29.075-910 – Vitória, ES, Brasil

Resumo. A modernização da engenharia estrutural pôs em alta a busca por soluções econômicas e mais arrojadas, fazendo uso de sistemas de rápida execução, peças de menor peso próprio e com um mínimo de elementos verticais, permitindo maior flexibilidade arquitetônica. Essa postura, contudo, conduz ao uso de elementos mais esbeltos e com menores frequências naturais, muitas vezes próximas das frequências de excitação dinâmica de carregamentos decorrentes de atividades humanas, como corridas, saltos e caminhadas. Tal fato pode ser facilmente percebido em estruturas de aço de perfis formados a frio, em decorrência da baixa rigidez e leveza quando comparados a perfis de aço laminados e soldados. Deste modo, este estudo visa a avaliar a influência do enrijecimento em seções de perfis U na variação da frequência fundamental de vibração. Para a maioria dos resultados obtidos, o aumento da largura do enrijecedor de borda elevou a frequência natural de vibração, enquanto a presença ou ausência de enrijecedores intermediários na alma não afetou os resultados.

Palavras-chave: enrijecedores de borda e intermediários; frequência natural de vibração; análise modal.

Abstract. The modernization in structural engineering in the last years led to the search for economic and modern solutions, using quickly built systems, elements with lower self-weight as well as column-free structural systems, which allows for more architectural flexibility. This practice, however, gave rise to elements with thinner cross-section and, consequently, lower natural frequencies, which are closer to the dynamic excitation frequency of loads due to human activities such as running, jumping and walking. This fact can be specially noticed in cold-formed steel (CFS) structures on account of its lightness and lower stiffness when compared to rolled and welded steel sections. Hence, this article aims to evaluate the influence of stiffening in cold-formed isolated elements with lipped channel sections. Finite element analyses were carried out in order to assess its influence in the range of first natural frequency of vibration. For the most results obtained, the increment in the edge stiffener's width has increased the natural frequency of vibration while the presence or absence of web stiffener did not affect the outcomes.

Keywords: edge and web stiffener; natural frequency of vibration; modal analysis.

1 Introdução

A modernização tecnológica da construção civil conduziu ao aumento do consumo de aço nesse mercado em virtude das vantagens oferecidas sobre demais materiais, como redução do tempo de execução, menor peso próprio, maior resistência, facilidade no reaproveitamento, canteiros de obras mais limpos e peças estruturais com menores dimensões. Nesse contexto, as estruturas metálicas ganharam competitividade técnica e econômica em relação a sistemas construtivos tradicionais, fazendo-se presentes tanto em obras de pequeno como grande porte.

Nos últimos anos, tornou-se comum o emprego de perfis formados a frio em obras como galpões de pequeno e médio porte, mezaninos, casas populares, coberturas e pequenos edifícios, em elementos estruturais pouco solicitados [1]. Em decorrência do processo de fabricação por prensas dobradeiras ou perfiladeiras e da maleabilidade das chapas, há uma grande variação de seções presentes no mercado (Figura 1), desde cantoneiras simples em forma de L até perfis formados a frio duplos, de seção unicelular.

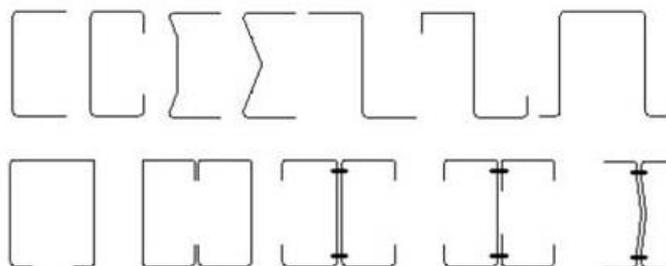


Figure 1. Seções transversais usuais de perfis conformados a frio (Fonte: <http://wwwo.metallica.com.br/arquitetura-e-aco-estudo-dos-condicionantes-para-projeto-arquitetonico-integrado>).

Silva e Silva [1] apontam ainda a finura das chapas como fator determinante para sua leveza, facilidade de manuseio, transporte e içamento, dispensando o uso de maquinário pesado para tal. A ABNT NBR 14762 [2] limita a espessura dos elementos a 8 mm, sendo permitido, no entanto, espessuras superiores quando há equipamentos disponíveis para sua dobra. As espessuras usualmente utilizadas estão compreendidas entre 1,9 e 4,76 mm.

Por outro lado, a elevada esbelteza dos elementos que compõem o perfil contribui para sua baixa rigidez. Soma-se a isso o pequeno peso próprio em decorrência da reduzida espessura das chapas. Quando analisados do ponto de vista dinâmico, os perfis formados a frio apresentam frequências naturais de vibração baixas, de forma que carregamentos de pequena intensidade, também com frequências reduzidas, podem induzir efeitos indesejados na estrutura, levando à ocorrência de estados limites de serviço ou até mesmo estados limites últimos, como o fenômeno da ressonância.

Souza *et al.* [3] analisaram o aumento da capacidade resistente de seções U devido ao uso de enrijecedores intermediários na alma, em colunas submetidas à compressão axial. A análise pelo método dos elementos finitos foi conduzida no programa comercial ANSYS. Para a maioria das seções analisadas, observou-se o aumento da tensão crítica de flambagem distorcional à medida que mais enrijecedores foram acrescentados à alma do perfil.

Bajoria *et al.* [4] conduziram análises de vibrações livres não amortecidas em modelos tridimensionais de estruturas de perfis formados a frio com ligações semirrígidas, por meio do programa ANSYS. Foi proposto o desenvolvimento de uma equação simplificada para o período fundamental do sistema segundo um modo de vibração pré-definido. A formulação assim obtida foi comparada com o resultado via elementos finitos, a fim de empregá-la no projeto da referida estrutura.

Basaglia *et al.* [5] investigaram o uso da Teoria Generalizada de Vigas (GBT) na avaliação dos modos de flambagem e vibração de elementos de paredes finas e estruturas de perfis formados a frio com seções circulares ocas. O estudo apresenta a formulação analítica do problema, abordando a determinação das matrizes de massa e rigidez, as quais incorporam a influência das ligações

estruturais. Por fim, a validação do modelo é feita por meio da comparação com modelo do ANSYS, utilizando elemento de placa, mostrando-se eficiente para o problema em questão.

Nesse trabalho, verificou-se como o enrijecimento de perfis formados a frio contribui para a modificação das frequências naturais de vibração por meio de análises de vibração livre não amortecida em software de elementos finitos. Os modelos estudados possuem seções transversais em perfil U formado a frio, bastante usual no mercado para aplicação em elementos comprimidos, modelados com elementos de casca e submetido a diferentes condições de contorno.

2 Análise de vibração livre não amortecida

Partindo-se da equação diferencial de equilíbrio dinâmico, Eq. (1), em que \mathbf{m} é a matriz de massa, \mathbf{c} é a matriz de amortecimento, \mathbf{k} é a matriz de rigidez, $\mathbf{v}(t)$ o vetor de deslocamentos da estrutura e $\mathbf{p}(t)$ é o vetor de cargas aplicadas, pode-se determinar as frequências e modos naturais de vibração de uma estrutura, omitindo-se a matriz de amortecimento e o vetor de cargas aplicadas, como ocorre na vibração livre não amortecida, descrita pela Eq. (2):

$$\mathbf{m} \ddot{\mathbf{v}}(t) + \mathbf{c} \dot{\mathbf{v}}(t) + \mathbf{k} \mathbf{v}(t) = \mathbf{p}(t). \quad (1)$$

$$\mathbf{m} \ddot{\mathbf{v}}(t) + \mathbf{k} \mathbf{v}(t) = \mathbf{0}. \quad (2)$$

em que $\mathbf{0}$ é um vetor nulo. Fazendo as considerações necessárias, chega-se à Eq. (3), denominada equação da frequência do sistema de N graus de liberdade, na qual ω^2 representa o quadrado das frequências naturais dos N possíveis modos de vibração do sistema.

$$\|\mathbf{k} - \omega^2 \mathbf{m}\| = \mathbf{0}. \quad (3)$$

A frequência natural representa a taxa de oscilação livre da estrutura após cessada a ação da força que iniciou seu movimento. Em outras palavras, é o número de ciclos por unidade de tempo, sendo comumente expressa em hertz (Hz). Muito embora a Eq. (3) forneça o resultado em rad/s, a conversão para a outra unidade é direta e tal que $\omega = 2\pi f$. Um sistema estrutural possui diversas frequências de vibração, posto que possa apresentar movimentos oscilatórios variados, segundo formas e direções distintas. No entanto, a mais importante das frequências é a primeira e menor delas, denominada frequência fundamental. A cada frequência, autovalor na Eq. (3), está associada uma forma, denominada modo de vibração ou autovetor, na mesma equação anterior [6], a qual pode ser resolvida com artifícios matemáticos que permitem a extração dos autovalores, como os métodos de Block Lanczos e PCG Lanczos.

3 Métodos

3.1 Perfis formados a frio estudados

Carvalho et al. [7] apontam a necessidade de definir métodos que possibilitem a determinação das propriedades geométricas dos elementos para dimensionamento. Nesse aspecto, admitiu-se simplificar os perfis com cantos vivos, desprezando-se o raio de curvatura das quinas decorrentes do processo de dobra. Os perfis foram aproximados por retângulos de base t (espessura da chapa) e altura b descontada de duas espessuras no caso de elementos AA e uma espessura para elementos AL.

O item 9.2.3.1 da ABNT NBR 14762 [2], por fim, restringe a dimensão nominal do enrijecedor de borda de peças comprimidas, d , em função da largura do elemento a que está ligado, D , de forma que $d/D \leq 0,8$. Acerca dos enrijecedores intermediários, centralizados na alma, foram seguidas as sugestões presentes no Eurocode 3 [8] e em Souza et al. [3], adotando-se chanfro a 45°.

Seguindo as recomendações supracitadas, foram selecionados para o estudo os seguintes perfis:

U150x60, U200x60 e U250x80, cujas medidas (H,D), em mm, são (150,60), (200,60) e (250,80), respectivamente, com e sem enrijecedor de borda (Figura 2). A chapa utilizada nos perfis possui espessura (t) de 2,25 mm, com massa de 17,66 kg/m². As larguras de enrijecedor adotadas foram 10, 20, 30 e 40 mm. Por fim, o enrijecedor intermediário escolhido tem medida b de 6 mm, conforme sugestões de Souza et al. [3]. A simbologia da Figura 2 é: H – altura do perfil; D – largura da mesa; d – largura do enrijecedor; b – distância da ponta do enrijecedor até a alma do perfil.

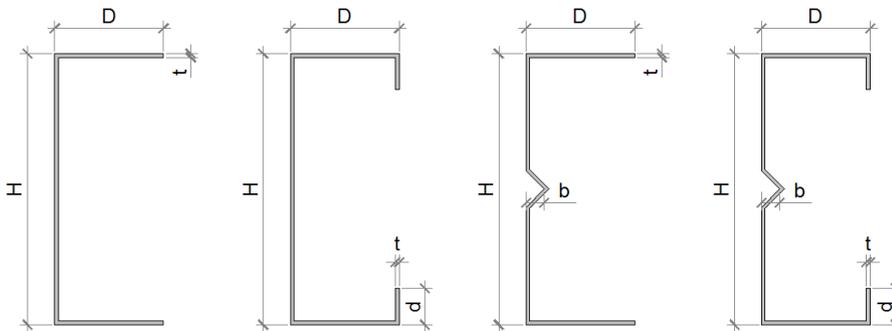


Figure 2. Dimensões dos perfis formados a frio analisados.

3.2 Análise numérica

Para a simulação do problema proposto, utilizou-se o ANSYS® versão 14.0 [9], para modelar uma estrutura em chapa fina conformada a frio com perfil U (Figura 3), de 250 cm de comprimento, com três condições de contorno diferentes: biapojada, biengastada e engastada e livre.

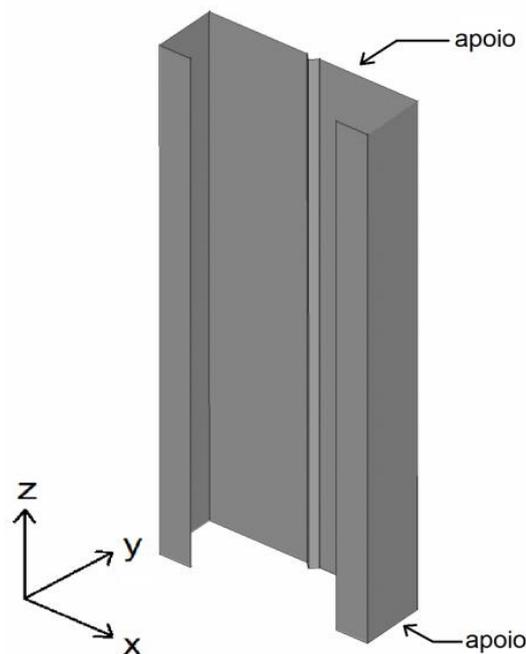


Figure 3. Estrutura modelada.

O elemento utilizado para a modelagem foi do tipo Shell181 de 4 nós, adequado para modelagem de estruturas de paredes finas, com 4 nós e 6 graus de liberdade por nó, as quais se referem às translações em torno dos eixos x , y e z e rotações em torno dos mesmo eixos. Por se tratar de uma estrutura de paredes finas, o Shell181 é adequado para capturar efeitos localizados nos elementos

constituintes da seção, além de fornecer resultados satisfatórios para análises lineares e não lineares.

As condições de contorno foram simuladas através do impedimento de translações e rotações em regiões específicas da seção do perfil. Para a modelagem da rótula (Figura 4a), foram colocados apoios nas direções x , y e z para impedir as translações apenas na alma do perfil, em $x = 0$. Os enrijecedores e mesas permaneceram livres para transladar e rotacionar. Por outro lado, para o engaste (Figura 4b), foram colocados apoios nas direções x , y e z para impedir as translações e rotações em todas as regiões da seção, exceto no enrijecedor intermediário, em $x = 0$.

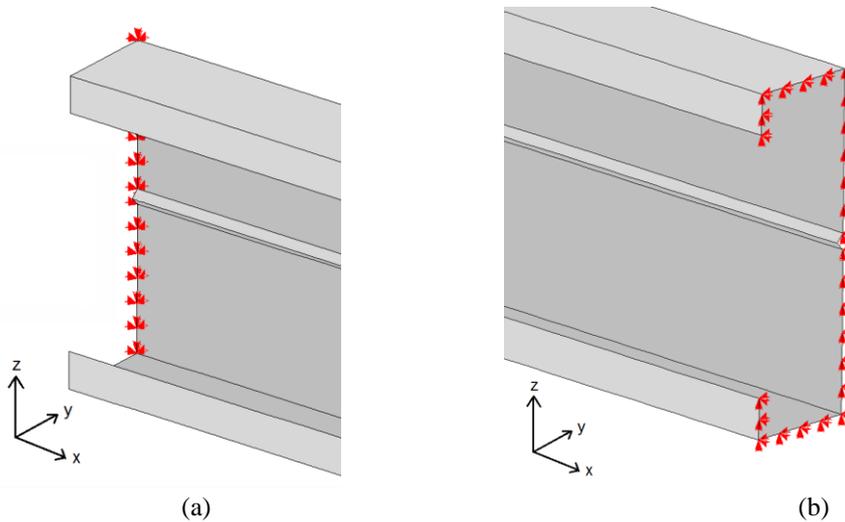


Figure 4. Modo de vinculação dos perfis: (a) apoio; (b) engaste.

O módulo de elasticidade longitudinal e o coeficiente de Poisson do aço de foram tomados iguais a 200 GPa e de 0,3, respectivamente. Análises de vibração livre foram conduzidas conforme item 2, utilizando o método de Block Lanczos para extração da frequência fundamental de cada modelo analisado.

Também foi realizado um estudo para determinar uma dimensão de malha quadrada de elementos finitos (d_m) a fim de produzir resultados satisfatórios. Para um modelo de referência – coluna em perfil U200x60 biapoiada, variou-se d_m e, para cada valor, foi extraída a primeira frequência natural de vibração (Figura 5). Adotou-se 15 mm para o referido parâmetro, a partir do qual não se observam grandes oscilações na frequência natural.

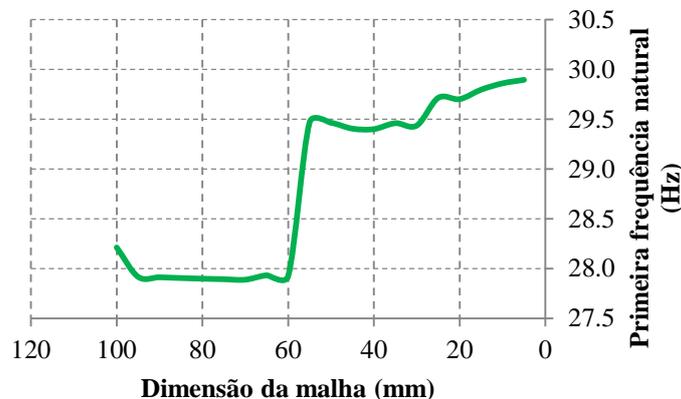


Figura 5. Resultado do estudo de malha.

4 Resultados e discussões

O estudo avaliou o impacto do enrijecimento apenas na frequência fundamental, a mais significativa do ponto de vista prático. Os resultados obtidos seguem a forma como os elementos são modelados, em especial o modo de vinculação das peças estruturais. Portanto, as condições apresentadas na Figura 4 devem ser asseguradas caso se deseje verificar as conclusões obtidas.

Dependendo do tipo de vinculação da coluna e do tamanho do enrijecedor de borda, a estrutura apresentou modos típicos de vibração (a presença do enrijecedor intermediário não o modificou). Para elementos rotulados nas duas extremidades, o movimento típico é tal qual flexão em torno do eixo de menor inércia, acompanhado, algumas vezes, por distorção das mesas e dos enrijecedores de borda (Figura 6). Para elementos engastados nas duas extremidades, por outro lado, a deformada típica foi ora de torção na seção central da peça (mais frequente, Figuras 7a e 7b), ora de flexão da barra em torno do eixo de menor inércia acompanhada de distorção das mesas, alma e enrijecedores (menos frequente, figuras 7c e 7d). Por fim, elementos engastados apenas em uma extremidade apresentaram uma deformada típica de flexão também em torno do eixo de menor inércia, com pequeno grau de distorção do perfil (Figura 8).

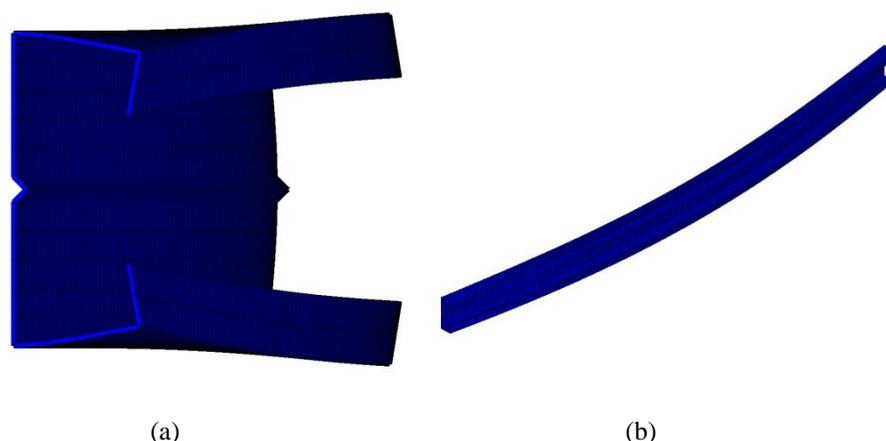
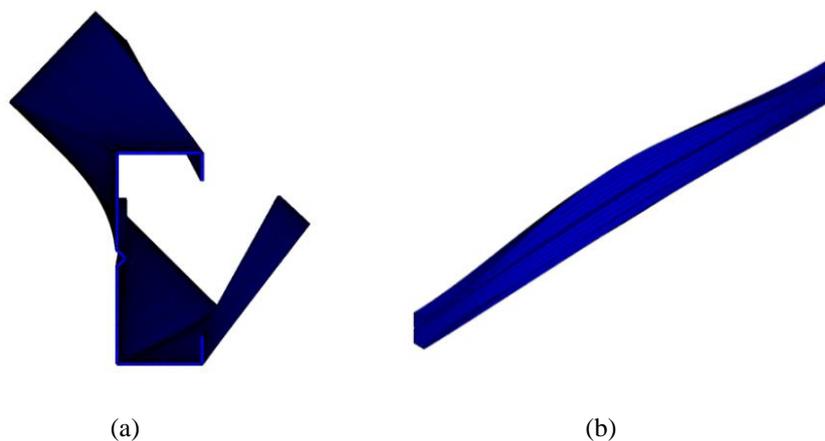


Figura 6. Modo de vibração típico de elementos biapoitados: (a) vista superior; (b) vista isométrica.



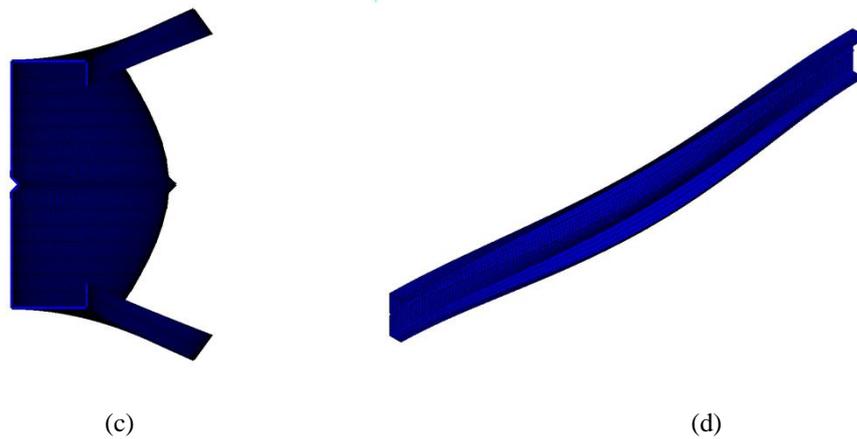


Figura 7. Modo de vibração típico de elementos engastados nas duas extremidades: (a) vista superior do modo mais frequente; (b) vista isométrica do modo mais frequente; (c) vista superior do modo menos frequente; (d) vista isométrica do modo menos frequente.

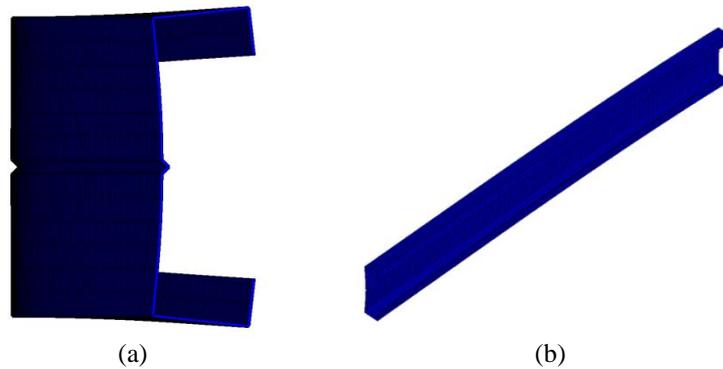


Figura 8. Modo de vibração típico de elementos engastados em uma extremidade: (a) vista superior; (b) vista isométrica.

Os resultados da análise encontram-se nas Figuras 9, 10 e 11, onde gráficos da frequência fundamental *versus* largura do enrijecedor foram plotados para cada tipo de perfil. As frequências naturais fundamentais são expressas em função da largura do enrijecedor de borda, para cada condição de contorno analisada (AA – biapojada; EE – biengastada; EL – engastada e livre). O termo b , presente, na legenda, refere-se à dimensão do enrijecedor intermediário, em mm, conforme Figura 2. Como se pode observar, todas as curvas $f \times d$ apresentam formato côncavo para baixo, com elevação da frequência fundamental pelo aumento da largura do enrijecedor de borda até certo momento. Há casos, como para coluna engastada e livre, que este fato é difícil de ser percebido, uma vez que a concavidade é suave em decorrência da escala gráfica adotada e a curva não ter atingido seu valor máximo pelas restrições à largura do enrijecedor impostas pela NBR 14762 [2].

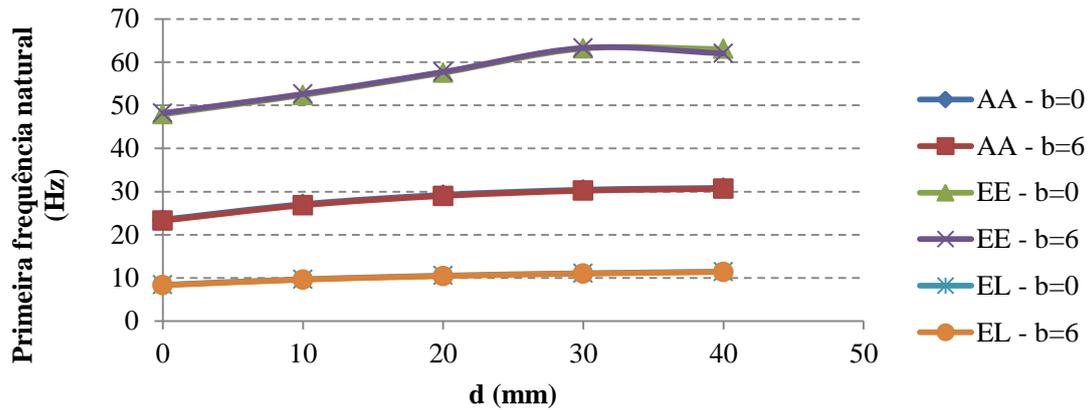


Figura 9. Variação da frequência fundamental de vibração – perfil U150x60.

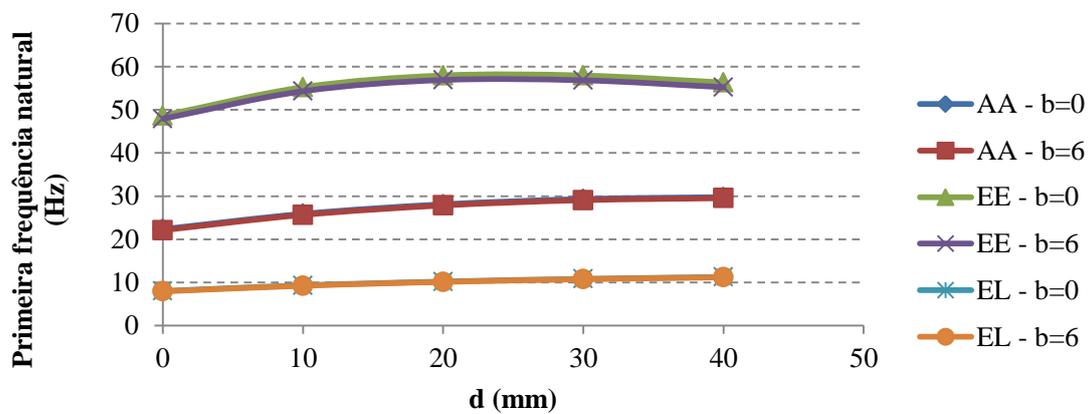


Figura 10. Variação da frequência fundamental de vibração – perfil U200x60.

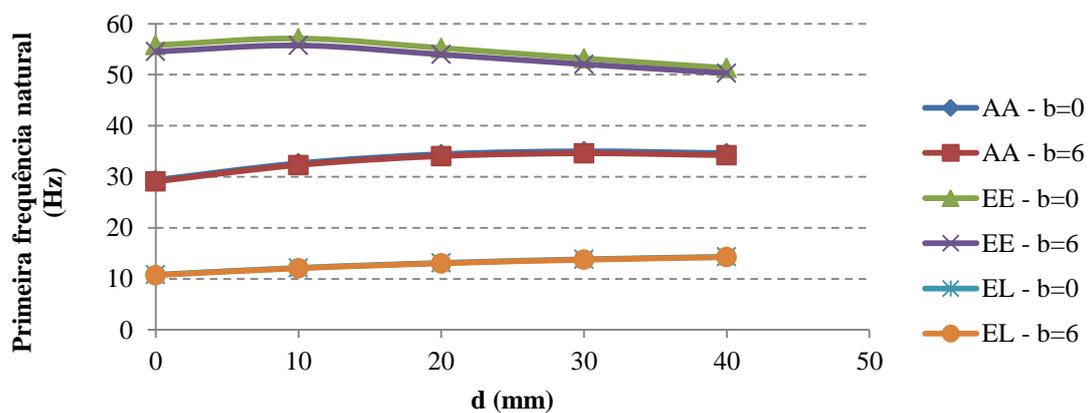


Figura 11. Variação da frequência fundamental de vibração – perfil U250x80.

Continuando a aumentar tal parâmetro para além dos valores permitidos pela norma brasileira, entretanto, tal comportamento se torna nítido. Para todas as situações, foi detectado um valor ótimo de largura do enrijecedor de borda que eleva a frequência natural de vibração relativa ao primeiro modo a um valor máximo, como se observa nas Figuras 12, 13 e 14.

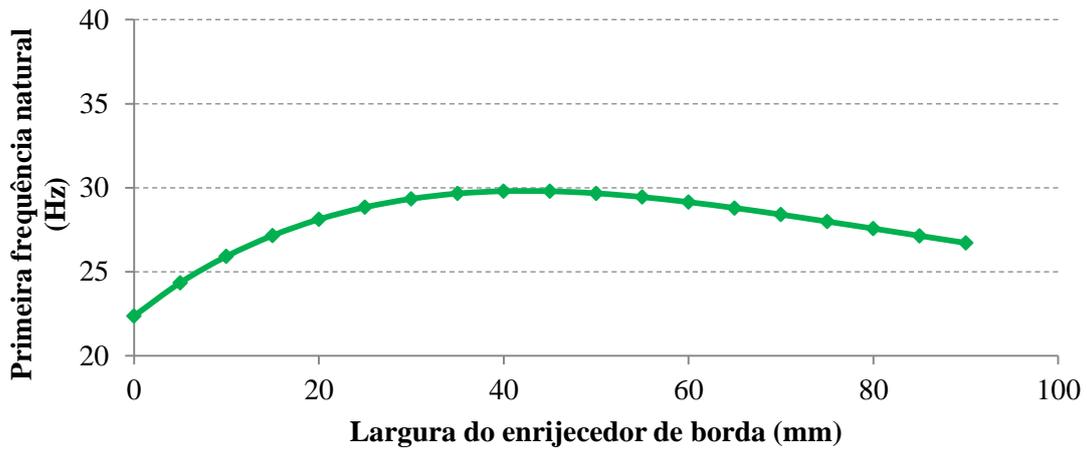


Figura 12. Curva $f \times d$ para perfil U200x60, coluna biapoiada

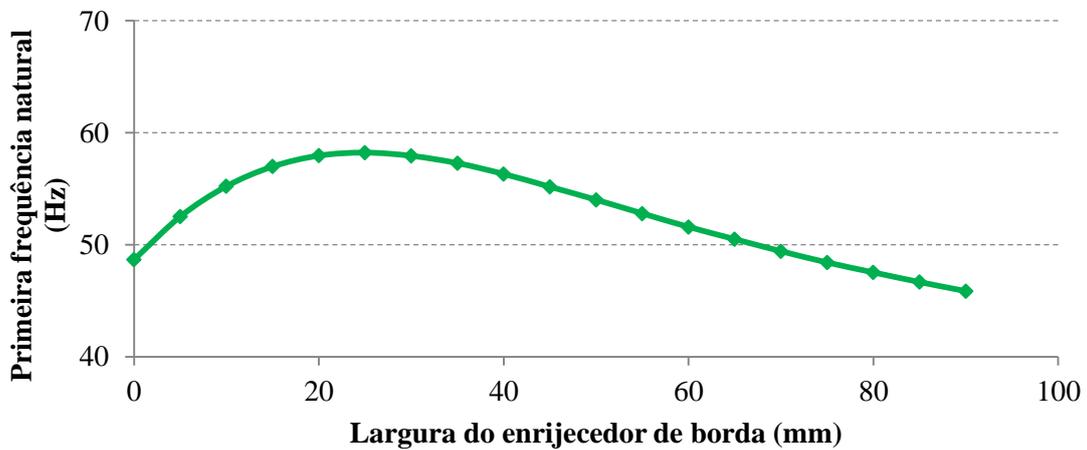


Figura 13. Curva $f \times d$ para perfil U200x60, coluna biengastada

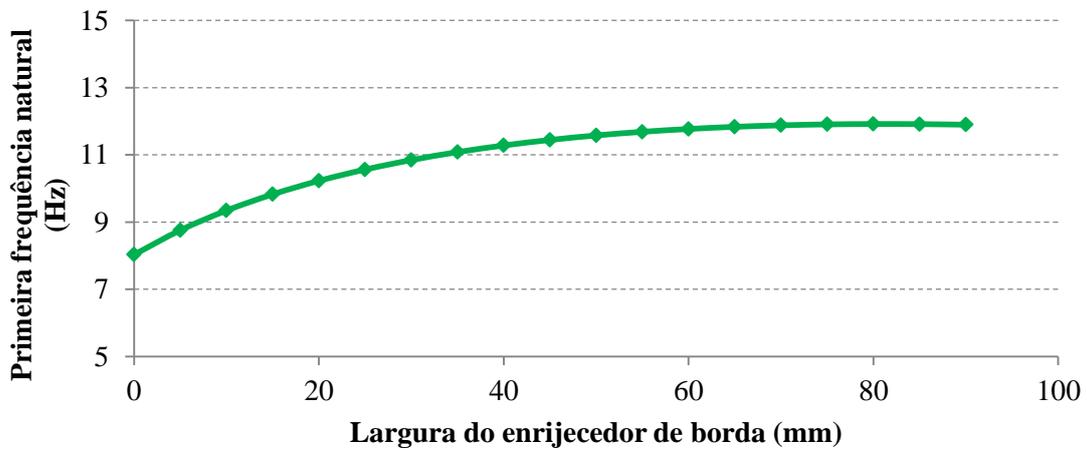


Figura 14. Curva $f \times d$ para perfil U200x60, coluna engastada e livre

Este comportamento pode ser explicado pelo fato de que o enrijecimento proporciona, até a largura ótima, ganhos na rigidez superiores ao incremento na massa do conjunto. Como a frequência é função direta da rigidez e inversamente proporcional à massa, a partir do valor ótimo, seu valor começa a cair. Para os casos avaliados, pode-se determinar a relação d/D entre as larguras do enrijecedor de borda e da mesa que proporcionam a máxima frequência natural de vibração (Tabela 1).

Tabela 1. Relação entre d/D e frequências máximas para cada caso analisado.

Condições de contorno		Biapoiada			Biengastada			Engastada e livre		
Perfil	D (mm)	$f_{máx}$ (Hz)	d (mm)	d/D	$f_{máx}$ (Hz)	d (mm)	d/D	$f_{máx}$ (Hz)	d (mm)	d/D
150x60	60	30,89	40	0,67	63,93	35	0,58	11,94	75	1,25
200x60	60	29,80	40	0,67	58,23	25	0,42	11,92	80	1,33
250x80	80	34,99	30	0,38	57,10	10	0,13	14,92	70	0,88

Os valores apresentados possibilitam observar que a relação d/D ótima para sistemas estruturais biapoiados e biengastados está dentro dos valores limites indicados pela NBR 14762:2010 [2] para elementos comprimidos. Por outro lado, para colunas engastadas e livres, o valor ótimo está além dos critérios de projeto e deve ser evitado. Entretanto, adotando-se o valor limite da razão $d/D = 0,8$ ($d = 64 \text{ mm}$), os resultados já seriam satisfatórios do ponto de vista dinâmico, refletidos pelo aumento de 46% em relação ao perfil similar sem enrijecedor.

O formato das curvas $f \times d$ também está associado ao comprimento da coluna adotada no projeto. Para tanto, foram mostrados os mesmos casos da análise anterior (perfil U200x60), para as três diferentes condições de contorno propostas. Os resultados encontram-se nas Figuras 15, 16 e 17. À medida que o comprimento de referência é reduzido, a curva $f \times d$ tem seu formato côncavo mais acentuado, isto é, a variação da frequência fundamental, em módulo, é tanto maior quanto menor tal comprimento, o que se explica pelo fato de a rigidez do conjunto ser uma função inversa deste parâmetro.

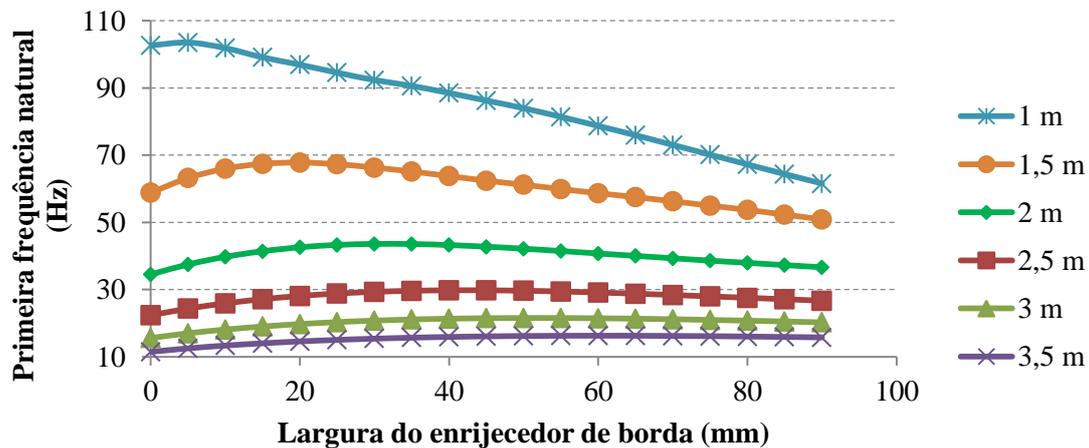


Figura 15. Influência do comprimento da coluna no formato da curva $f \times d$ para perfil U200x60 – biapoiada.

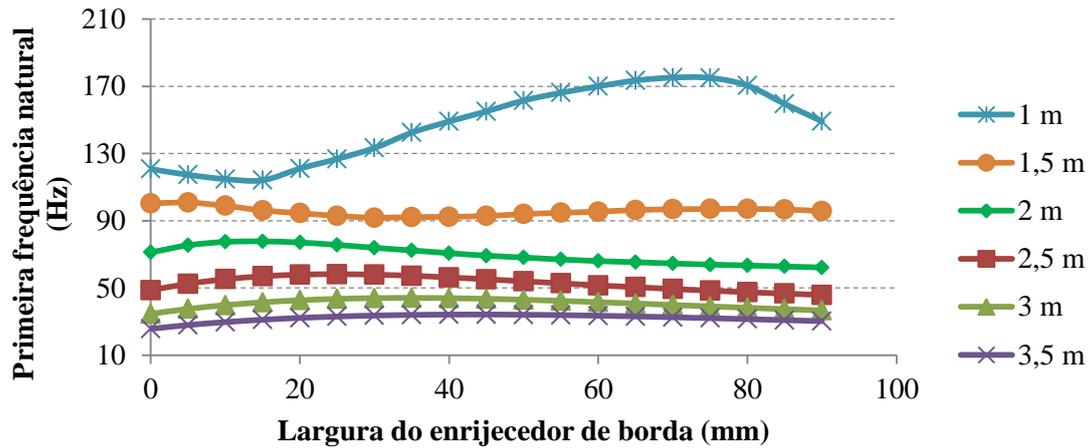


Figura 16. Influência do comprimento da coluna no formato da curva $f \times d$ para perfil U200x60 – biengastada.

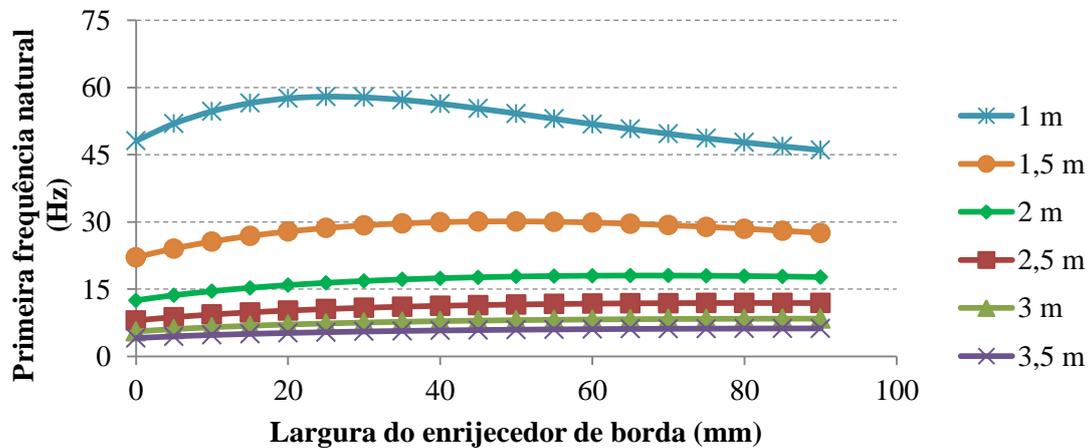


Figura 17. Influência do comprimento da coluna no formato da curva $f \times d$ para perfil U200x60 – engastada e livre.

Acerca do enrijecedor intermediário, os gráficos das Figuras 9, 10 e 11 sugerem pouca contribuição para o incremento na primeira frequência natural. De fato, sua presença reduziu as frequências na maioria das análises em decorrência da diminuição da rigidez pela menor inércia em y do perfil, quando se compara ao mesmo perfil, porém sem este tipo de enrijecedor.

Para cada condição de contorno e tipo de perfil, fixando o valor da largura do enrijecedor de borda e variando a largura do enrijecedor intermediário de 0 a 10 mm, com passos de 2 mm (Tabela 2), ocorreu uma redução média de 1,10% da frequência em relação ao caso sem o enrijecedor intermediário. Esse percentual variou de -0,03% para perfil U150x60, coluna biengastada, até -2,26% para perfil U250x80, com mesma condição de contorno. Quando a análise, por outro lado, é feita em conjunto à ação do enrijecedor de borda, o ganho na frequência natural chega a 15,27%, em média.

Tabela 2. Redução percentual da 1ª frequência natural para perfil U250x80 – coluna biapoiada.

Largura do enrijecedor de borda (mm)	Largura do enrijecedor intermediário (mm)				
	2	4	6	8	10
0	-0,26%	-0,59%	-0,99%	-1,47%	-2,00%
10	-0,28%	-0,63%	-1,03%	-1,52%	-2,07%
20	-0,30%	-0,67%	-1,09%	-1,60%	-2,16%
30	-0,33%	-0,71%	-1,14%	-1,65%	-2,21%
40	-0,34%	-0,73%	-1,15%	-1,65%	-2,20%

Analogamente ao representado na Tabela 2, pode-se calcular o percentual de elevação da primeira frequência natural em decorrência do enrijecedor de borda para as condições de contorno avaliadas, sem considerar o efeito do enrijecedor na alma. Tais valores se encontram nas Tabelas 3, 4 e 5. O percentual médio de incremento foi 20,66%.

Tabela 3. Elevação da frequência natural por efeito do enrijecimento de borda para coluna biapoiada.

Perfil	Largura do enrijecedor de borda (mm)			
	10	20	30	40
U150x60	15,16%	24,34%	29,36%	31,23%
U200x60	15,88%	25,73%	31,19%	33,23%
U250x80	11,14%	17,22%	19,14%	17,88%

Tabela 4. Elevação da frequência natural por efeito do enrijecimento de borda para coluna biengastada.

Perfil	Largura do enrijecedor de borda (mm)			
	10	20	30	40
U150x60	9,33%	20,11%	31,81%	31,59%
U200x60	13,46%	19,07%	19,04%	15,71%
U250x80	2,34%	-0,99% ^(*)	-4,64% ^(*)	-8,00% ^(*)

Tabela 5. Elevação da frequência natural por efeito do enrijecimento de borda para coluna engastada e livre.

Perfil	Largura do enrijecedor de borda (mm)			
	10	20	30	40
U150x60	15,39%	25,32%	31,95%	36,38%
U200x60	16,35%	27,37%	35,06%	40,47%
U250x80	12,57%	21,58%	28,11%	32,75%

^(*) Para estes casos, o aumento da largura do enrijecedor de borda para os valores indicados condicionou um modo de vibração diferente dos demais, alcançado com uma frequência natural inferior ao característico, quando comparado ao perfil sem qualquer tipo de enrijecimento.

5 Conclusões

O enrijecimento de borda em perfis formados a frio contribui, na maioria dos casos, para a elevação da frequência natural de elementos isolados correspondente ao primeiro modo de vibração, obtendo-se frequências de 13,66 a 34,28% maiores que aquelas de perfis similares sem esse enrijecimento, em média. Por outro lado, houve situações em que se verificou a redução da frequência fundamental – de 0,99 e 8,00%, fato explicado pela mobilização de um novo modo de vibração para certos valores de largura do enrijecedor de borda, com uma frequência inferior àquela do modo típico.

Além disso, foi mostrado que a relação $f \times d$, para todas as situações avaliadas, apresenta um ponto ótimo, fornecendo uma frequência máxima de vibração relativa ao primeiro modo. Tal comportamento é tão mais acentuado quanto menor o comprimento da coluna, uma vez que quanto maior este parâmetro, menor será sua rigidez.

Por fim, foi possível perceber que, embora os enrijecedores intermediários de alma contribuam positivamente para a elevação da tensão crítica de flambagem e da resistência de colunas submetidas à compressão axial [3], seu efeito dinâmico é pouco nítido, uma vez que redução da frequência natural de vibração em sua presença é pouco relevante, refletindo numa redução percentual inferior à acurácia da análise.

Compreender o efeito dinâmico do enrijecimento em seções de perfis de chapa fina, portanto, é essencial para o projeto de elementos em que se deseja evitar desconforto por vibrações, mesmo que o tamanho da peça esteja adequado pelo dimensionamento segundo os estados-limites dominantes.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal do Espírito Santo pelo apoio e incentivo no desenvolvimento deste estudo.

Referências

- [1] Silva, E. L.; Silva, V. P.. Dimensionamento de perfis formados a frio conforme NBR 14762 e NBR 6355 – Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2008. 119p.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14762: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro, 2010. 87p.
- [3] Souza et al.. “Estabilidade de colunas com seções enrijecidas em perfis de aço formados a frio”. REM: Revista Escola Minas, Ouro Preto, v.59, n.2, p.199-205, abr./jun. 2006.
- [4] Bajoria et al.. “Modal analysis of cold-formed pallet rack structures with semi-rigid connections”. Journal of Constructional Steel Research, março/2010, v.66, n.3, p.428-441.
- [5] Basaglia et al.. “Buckling and Vibration Analysis of Cold-Formed Steel CHS Members and Frames Using Generalized Beam Theory”. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2015, v.15, n.8, 25p.
- [6] Nóbrega, P.G.B.; Hanai, J.B. “A análise modal na avaliação de estruturas de concreto pré-moldado.” 1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-moldado. São Carlos, 2005.
- [7] Carvalho et al.. Curso básico de perfis de aço formados a frio. 3ª edição, 370p. Porto Alegre: [s. n.], 2014.
- [8] EN 1993-1-3: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. 2006. 133p.
- [9] ANSYS: Engineering Analysis System. Versão 14.0, 2011.