

## Avaliação de Perfis Compostos Formados a Frio com o Método de Elementos Finitos

Vítor S. Menezes, Márcio J. Dias, Adriano R. Silva, Jaques J. L. Silva & Cláudia G. O. Santos

A utilização de elementos finitos em estruturas possibilita economia e bom desempenho dos arranjos estruturais. O objetivo deste estudo foi determinar o valor da carga resistente à flambagem e seu respectivo modo de falha numa seção composta por dois perfis formados a frio. A modelagem foi construída a partir da releitura de um prévio ensaio experimental de outro autor. A malha dos modelos foi construída, utilizando-se um software de análise numérica, no qual os autovalores foram obtidos com auxílio das ferramentas estática estrutural e de flambagem. Foi observado que os resultados numéricos estiveram acima dos experimentais, como é conhecido na literatura.

**Palavras-chave:** *análise de flambagem; autovalor; seções caixa.*

The use of finite elements in structures allows savings and good performance of structural arrangements. The objective of this study was to determine the value of the load resistant to buckling and its failure mode in a section composed of two cold formed profiles. The modeling was constructed from the re-reading of a previous experimental essay by another author. The mesh of the models was constructed using a numerical analysis software, where the eigenvalues were obtained with the aid of structural and buckling static tools. It was observed that the numerical results were above the experimental ones, as is known in the literature.

**Keywords:** *buckling; Eigenvalue; Built-up sections.*

## Introdução

A utilização de elementos finitos em estruturas metálicas, constituídas por perfis compostos, formadas a frio, possibilita a economia aliada ao bom desempenho dos elementos nos arranjos estruturais, os quais tendem a se tornar cada vez mais leves, bem como atendem critérios de segurança estabelecidos por norma. Entretanto, a previsão da sua carga máxima de resistência se torna uma atividade complexa por estes apresentarem falha por flexão, torção, flexotorcional, distorção ou flambagem local.<sup>1</sup>

Segundo Nam-Ho Kim<sup>2</sup>, na análise de estruturas, a seleção de um modelo discreto para os corpos e hipóteses simplificadas que possam contemplar todas as suas características é fundamental para o bom desempenho do produto final.

As especificações da American Iron Institute (AISI), e da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), no que diz respeito aos perfis formados a frio, utilizados de forma simples ou composta, foram atualizadas recentemente. No entanto, até o presente momento, poucos estudos foram realizados na área de seções compostas, das quais existe maior complexidade no estudo das suas deformações, assim afirma Jessica Whittle.<sup>3</sup>

Segundo Carvalho<sup>4</sup>, “Seção composta é aquela formada por dois ou mais perfis unidos entre si por meio de uma ligação contínua, solda ou travejamento de quadro, que trabalhem como um só perfil.” Tal seção em estruturas é largamente utilizada por possuir flambagem local minimizada, conduzindo a estruturas com um menor peso por área construída.

No presente artigo, será analisada numericamente uma seção composta por dois perfis U enrijecidos em forma de caixa, conforme a Figura 1. O modelo será submetido a uma compressão centrada, considerando o elemento do tipo casca em sua modelagem. A análise será realizada com auxílio de um software de análise numérica e então determinado o seu autovalor, o qual, na prática, traduz-se como a carga crítica de resistência a flambagem.<sup>5</sup>

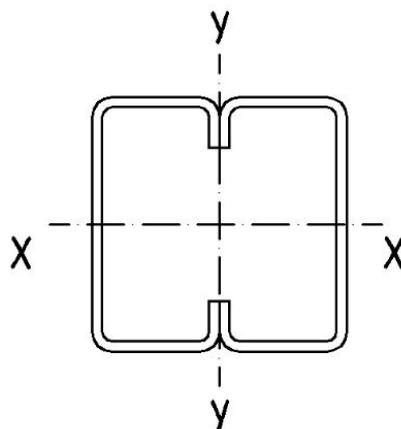


Figura 1. Seção caixa.

Após as análises realizadas, serão comparados os resultados com dados de outro estudo experimental, com a finalidade de apontar a eficiência da análise numérica nessas condições, visto que a análise computacional é meramente uma modelagem matemática de um fenômeno, como afirma Jacob Fish.<sup>6</sup>

## Referencial Teórico

### SEÇÕES COMPOSTAS

Seções compostas são fabricadas a partir da união de um ou mais perfis formados a frio, por meio de soldagem intermitente ou intercalada, de modo a se obterem componentes estruturais mais resistentes e leves. Este tipo de seção é largamente utilizado na construção devido seu baixo custo, favoravelmente, em regiões onde o salário por hora dos soldadores é baixo, fazendo com que seu emprego se torne atrativo, quando comparado com outros locais.<sup>7</sup>

As vantagens de se utilizar a combinação de perfis já são bem conhecidos na indústria da construção, sendo as seções caixa favoráveis ao aumento do comprimento destravado e da carga resistente, quando comparados aos mesmos componentes de forma simples. Neste tipo de seção, destaca-se também a boa rigidez à torção (eliminando travamentos), menor área exposta, (reduzindo a área de pintura) e menor área de estagnação de líquidos ou

detritos (reduzindo a possibilidade de corrosão) oferecendo soluções econômicas.<sup>8</sup>

Para Carvalho<sup>4</sup>, os perfis compostos são largamente utilizados no Brasil, principalmente em estruturas leves, visto a sua eficiência mecânica, além de possibilitar a execução de estruturas de menor consumo de aço. Tais estruturas podem ser empregadas em coberturas, fachadas, mezaninos, *pipe racks* de pequeno porte e dentre outras aplicações. No entanto, o mesmo autor comenta que, se utilizados de maneira inadequada, estes podem trazer problemas.

Tendo em vista tal questão, no dimensionamento destes componentes sendo comprimidos, considerações devem ser dadas nos estados limites, dependendo da configuração de construção da seção, espessura do material, comprimento destravado entre as extremidades e forma de apoio. Estes estados limites podem ser alcançados por flexão, torção, flexotorcional, distorção ou flambagem local, conforme é demonstrado na Figura 2.<sup>9</sup>

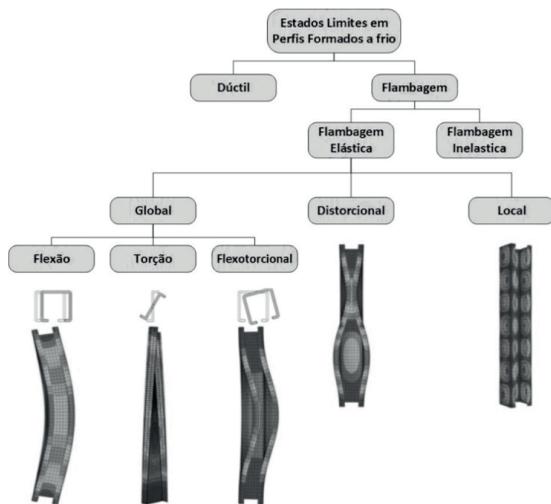


Figura 2. Modos de falha.

## FLAMBAGEM DE BARRAS

Basicamente, o conceito de flambagem em componentes comprimidos delgados ideais está diretamente relacionado com a ideia de estabilidade e instabilidade. Compreende-se como estável a condição em que um corpo, após submetido a

carregamento axial inferior ao seu carregamento crítico,  $P < P_{cr}$ , permanece em sua configuração original.<sup>10</sup>

Segundo Russell Hibbeler<sup>11</sup>, qualquer carga adicional à carga crítica  $P_{cr}$  provocará flambagem no corpo, portanto uma deflexão lateral, conforme a Figura 3.

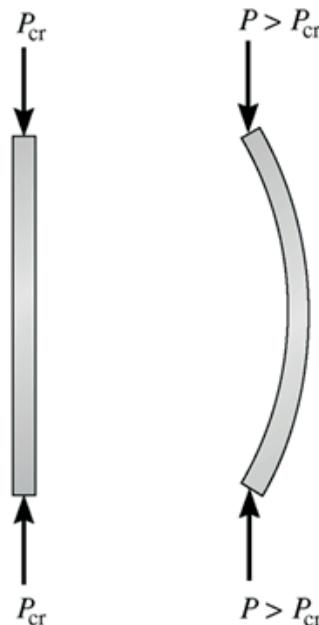


Figura 3. Flambagem de corpos.

Para determinar o menor valor da carga crítica de flambagem global de uma barra apoiada por pinos, semelhante à ilustração anterior, o mesmo autor demonstra analiticamente em seu livro que a carga crítica pode ser determinada com auxílio da equação 1, também conhecida como fórmula clássica de Euler.

$$P_{cr} = \frac{\pi EI}{L^2} \quad (1)$$

Sendo  $P_{cr}$  a carga crítica,  $E$  o módulo de elasticidade,  $I$  o momento de inércia da seção e  $L$  o comprimento da barra destravada.

Tratando-se de um elemento formado a frio composto, a carga de flambagem pode ser prevista analiticamente com base na norma NBR 14762<sup>12</sup>. Tal norma classifica o tipo

de perfil estudado como simétrico e estabelece que a força axial de flambagem global elástica  $N_e$  é o menor valor dentre os obtidos com as Equações 2, 3 e 4.

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 EI_x}{(K_x L_x)^2} \quad (2)$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} \quad (3)$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[ \frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} \right] + GJ \quad (4)$$

Em que,  $N_{ex}$ ,  $N_{ey}$ ,  $N_{ez}$  representam as cargas de flambagem elástica em relação ao eixo X, Y e Z; E equivale ao módulo de elasticidade; I o momento de inércia da seção; K L o comprimento efetivo de flambagem global por flexão em relação aos eixos X, Y e Z ; G representa o módulo de elasticidade transversal; J a constante de torção da seção e  $r_0$  é o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção dado pela Equação 5:

$$r_0 = [r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2]^{0.5} \quad (5)$$

Na última equação,  $r_x$  e  $r_y$  são os raios de giração da seção bruta em relação aos eixos principais de inércia x e y;  $x_0$  e  $y_0$  são as distâncias do centro de torção ao centroide, na direção dos eixos principais x e y.

## ELEMENTOS FINITOS

O método de elementos finitos teve sua origem na área de mecânica estrutural e foi, posteriormente, estendido a outras áreas da mecânica dos sólidos e outros campos. Hoje, é reconhecido como uma ferramenta poderosa para resolver equações diferenciais parciais e integrodiferenciais, das quais discretização de diversos problemas de engenharia.<sup>2</sup>

O mesmo autor afirma ainda que sua popularização se deve principalmente à sua versatilidade em resolver problemas práticos com pouco treinamento e domínio de conceitos básicos de resistência dos materiais. Entretanto, na discretização do problema físico em elementos, para que o comportamento desse seja analisado matematicamente, devem ser considerados alguns parâmetros como, unidade, tipo de elemento, controle da malha, propriedades do

material, condições de contorno do modelo e tipo de análise, linear ou não linear.

Os elementos do tipo casca, inicialmente, eram utilizados para representar eficientemente chapas finas ou placas, em superfícies planas e curvas. Este elemento modela a estrutura como um plano bidimensional com a espessura do corpo. Em sua formulação inicial, estes elementos incluem efeitos de cisalhamento transversal, tração e compressão, contidos no plano da estrutura, como visto na Figura 4. No entanto, efeitos de flexão estão fora do plano da estrutura.

Tal elemento se comporta particularmente bem para estruturas de paredes finas, nas quais a flexão e as forças no plano da estrutura são importantes. No entanto, similarmente ao elemento de viga, esse elemento não pode prever variação de tensões ao longo da espessura devido ao carregamento local.<sup>2</sup>

O mesmo autor afirma que esse tipo de elemento pode ser considerado como elemento de viga em duas direções coordenadas, sendo o número de elementos maior que o de viga. Entretanto, essa quantidade ainda é inferior a do tipo sólido, largamente utilizada em casos semelhantes.

Em concordância, o autor Avelino A. Filho<sup>13</sup> argumenta que a montagem da matriz de rigidez do elemento de casca segue a mesma montagem da matriz de rigidez do elemento viga. Em suma, o autor argumenta que na montagem da matriz de rigidez do elemento casca, esta contém os termos da matriz de rigidez de estado plano de tensões e a matriz de rigidez do elemento placa, tratado como a montagem de matrizes independentes, sendo essa formulação facilmente vista na Figura 4.

No caso de uma estrutura que está sob ação de cargas compressivas, esta poderá apresentar deslocamentos laterais perpendiculares à direção da carga, semelhante à seção analisada na Figura 5. Neste sentido, Avelino A. Filho<sup>5</sup>, afirma que matriz de rigidez geométrica leva em conta a interação entre força axial no elemento e deslocamentos de deflexão

Segundo o mesmo autor, para essa situação, a matriz de rigidez geométrica permite serem considerados os efeitos da instabilidade elástica, sendo desenvolvida uma nova matriz de rigidez a partir da matriz básica de flexão.

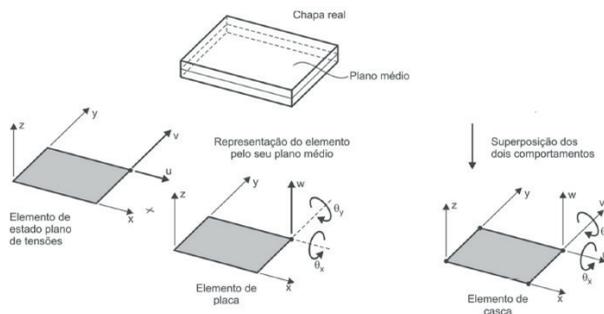


Figura 4. Elemento tipo casca.

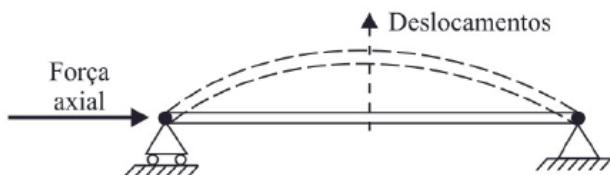


Figura 5. Instabilidade da viga

A equação 6 representa a matriz de rigidez corrigida na forma incremental, sendo as equações de equilíbrio válidas para um incremento de carga  $\{F\}$  e o correspondente deslocamento  $\{\Delta\}$ , sendo  $\{K_G\}$  avaliado no estado corrente da estrutura.

$$\{F\} = [k + k_G] \cdot \{\Delta\} \quad (6)$$

A partir desta, observamos que, à medida que a estrutura é carregada, sua rigidez é atualizada para permitir o cálculo adequado dos deslocamentos.

No caso em que ocorre instabilidade da estrutura, os deslocamentos  $\{\Delta\}$  crescem rapidamente na direção transversal, havendo pouco incremento de carga, como mostrado na Figura 5. Para ser estabelecida a condição de instabilidade do corpo, na qual ocorrerão os deslocamentos transversais, este pode ser definido como o valor no qual o incremento de carga  $\{F\}$  será nulo.

É então formulada a condição de instabilidade da estrutura definido pela Equação 7.

$$\{F\} = ([K] + [K_G]) \cdot \{\Delta\} = 0 \quad (7)$$

Como  $\{\Delta\}$  é não nulo, a equação de equilíbrio só pode ser satisfeita se a matriz e rigidez  $[K] + [K_G]$  for singular. A matriz de rigidez geométrica  $[K_G]$  está relacionada às forças internas, decorrentes do carregamento da estrutura, sendo a condição de instabilidade em um dado estágio deste carregamento. Analisando a matriz  $[K_G]$ , é definida uma carga de referência montada na matriz. A carga que produziria a instabilidade, seria multiplicada por  $\lambda$ .

Expressando matematicamente o vetor das cargas em relação à carga de referência, é obtido:

$$\{F\} = \lambda \cdot \{F_0\} \quad (8)$$

Então a matriz de rigidez geométrica é representada por:

$$[K_G] = \lambda \cdot [K_{G,0}] \quad (9)$$

Em que  $[K_{G,0}]$  é a matriz de rigidez geométrica computacional no nível de carga expressa por  $\{F_0\}$ , assim:

$$\det(K + \lambda \cdot K_G(F_x)) = 0 \quad (10)$$

A solução matemática deste problema é formalmente semelhante ao tipo de problema que é resolvido no estudo da análise dinâmica, e é conhecido como problema de autovalor, m que são calculados os valores por intermédio da solução de um polinômio característico.

$$[K + \lambda_i \cdot K_G(F_x)] \cdot \Phi_i = 0 \quad (11)$$

Nesta,  $K$  representa a matriz de rigidez elástica,  $\lambda_i$  o autovalor,  $K_G$  a matriz de rigidez geométrica em função de  $F_x$ ,  $\Phi_i$  o vetor que define o modo segundo o qual a estrutura instabiliza, ou seja, o modo de “flambar”.

Tendo como base esses conhecimentos, é estabelecida a condição de instabilidade da estrutura, impondo a esta tal condição matemática em que não ocorram incrementos de carga sem aumento de deslocamento.

O programa computacional é formado por elementos finitos de múltiplos propósitos, o qual pode ser usado para resolver várias classes de análises de engenharia. As possíveis análises do software incluem habilidade para resolver análises estrutural estática e dinâmica; problemas de transferência de calor transientes e de estado permanente; problemas de autovalores de flambagem e modo-frequência; análise magnética estática ou variado no tempo; vários tipos de aplicações em campo e junção em campo. O programa contém recursos especiais que permitem a inclusão na solução de não-linearidades ou efeitos secundários, como plasticidade, grandes deformações, hiperelasticidade, contato, fluência, encruamento, dependência de temperatura, material anisotrópico e radiação.

## Materiais e Métodos

### SEÇÃO COMPOSTA

Apartir da compreensão da sua aplicação e dos seus estados limites, realizamos uma análise numérica com a finalidade de facilitar o seu emprego e melhorar a sua aplicação. Neste enejo, torna-se necessário conceber um modelo a ser analisado. Para que possamos calibrar os resultados e indicar sua potencialidade de aplicação, repetimos o mesmo modelo testado experimentalmente pela autora Jessica Whittle<sup>3</sup> nos laboratórios de engenharia estrutural da Universidade de Oklahoma, nos Estados Unidos.

Em seus testes experimentais, foram investigadas mais de 150 seções submetidas à compressão centrada, considerando uma de suas extremidades engastada. Dentre seus resultados, foi determinada a máxima carga de flambagem para uma variedade de membros alterando sua configuração de construção.

Na construção das seção composta foram utilizados dois perfis enrijecidos com as dimensões apresentadas na Figura 6.

Como forma de união entre os perfis, foram utilizadas soldas intercaladas sendo as extremidades superior e inferior das seções unidas por uma soldas com 50,8 mm de comprimento. As demais uniões tiveram comprimento 25,4mm, conforme os modelos da Figura 7.

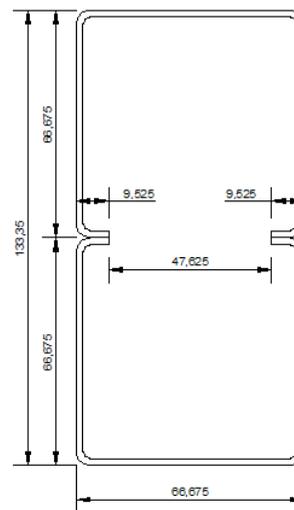


Figura 6. Seção caixa.

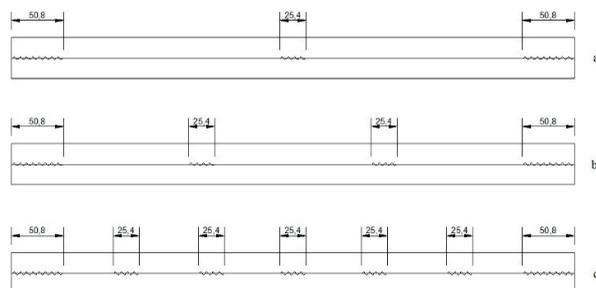


Figura 7. Modelos analisados. a) DW1, b) DW2, c) DW5

### MODELAGEM NUMÉRICA

Um modelo tridimensional da seção composta foi desenvolvido com auxílio do software de análise numérica, para a análise de autovalor. Primeiramente, foi desenvolvido um modelo geométrico em um software CAD (Computer Aided Design), importado para a ferramenta estática estrutural, como ilustra na Figura 8. Neste, foram definidas as propriedades do aço de aplicação estrutural, com módulo de elasticidade  $E = 2.000 \text{ GPa}$ , limite de resistência  $F_y = 250 \text{ MPa}$ , e tensão de ruptura  $F_u = 460 \text{ MPa}$ . O material da análise foi tratado como perfeitamente elástico e isotrópico.



**Figura 8.** Modelo numérico analisado.

Na Figura 8, é apresentada a forma como as restrições e cargas foram consideradas no modelo. A extremidade A foi considerada do tipo articulada, ou seja, livre ao movimento somente na direção do seu comprimento, enquanto as rotações nos seus eixos foram consideradas nulas, buscando, assim, repetir de forma fiel o ensaio experimental. Ainda nesta extremidade, representada pela letra C, foi aplicada uma carga de compressão de 1KN, na direção do seu comprimento, sendo esta perfeitamente centrada. Na extremidade B, o modelo foi considerado engastado em todos seus eixos, da mesma forma considerado no experimento.

Em seguida, foi gerada a malha com auxílio da ferramenta de modelagem interna do software, adotando o elemento SHELL 282, como apresentado na Figura 9 e Figura 10. A malha dos modelos considera elementos com tamanho uniforme mínimo de 2mm e máximo de 4mm, taxa de crescimento de 1,8 e conservando o meio do nó. Essa metodologia foi adotada com a finalidade de obtermos elementos no formato quadrilátero, pois sua matriz de rigidez jacobiana ser diagonal e constante.<sup>2</sup>, conduzindo a uma solução mais eficiente.

As quantidades de nós e elementos nos modelos são apresentados na Tabela 1.

Para a união dos corpos, foram consideradas chapas com o mesmo comprimento da solda nas extremidades e no meio, empregando o elementos do tipo SHELL 282. O contato entre os perfis e as chapas foi do tipo colada, considerando os parâmetros de união controlado pelo programa. A região de contato entre as seções foi livre para o deslizamento, não considerando variações nessa.

Na análise, não foram consideradas imperfeições geométricas dos perfis, o empenamento, efeito térmico da soldagem, de materiais e acréscimo de resistência

nas regiões de dobra, decorrentes da fabricação, sendo tal metodologia definida linear em sua modelagem.

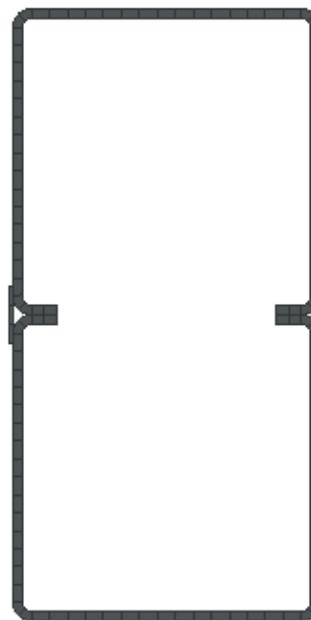
Em seguida, os resultados obtidos desta primeira análise foram direcionados para a ferramenta Linear Buckling, m que foram obtidos os modos de falha naturais do corpo e suas respectivas cargas de flambagem.

**Tabela 1.** Quantidade de nós por modelo.

Modelo	Nós	Elementos
DW1	157.022	51.606
DW2	157.168	51.642
DW5	157.606	51.750



**Figura 9.** Vista frontal da malha do modelo.



**Figura 10.** Vista lateral da malha do modelo.

## Resultados

Neste estudo de caso, as cargas resistentes dos modelos avaliados pela análise numérica foram expressas pelos autovalores, dados em quilonewtons (KN), e o seu respectivo modo de falha.

Dentre os diversos modos de falha encontrados, é adotado o primeiro modo como resultado característico, por este apresentar a menor carga resistente dentre os resultados obtidos. Curiosamente, nas análises de vibrações naturais de corpos ou estruturas, também é adotado como modo característico de vibração o primeiro modo, dentre os diversos possíveis de serem encontrados.

Os resultados dos autovalores são apresentados na Tabela 2, na qual são relacionados os corpos, suas cargas resistentes e seus respectivos modos de falha.

Tabela 2. Carga crítica e modos de falha.

Modelo	Carga (KN)	Modo
DW1	266,88	distorcional
DW2	275,56	distorcional
DW5	276,91	distorcional

Na Figura 11, é apresentado o primeiro modelo DW1, em que é realizada somente uma solda intermediária. Observa-se que a região central das seções enrijecidas, local onde é realizada a união, apresentou maiores deformações, sendo essa região de possíveis falhas. As demais regiões, em tons tendendo ao azul, apresentaram pouca ou nenhuma deformação. O resultado do primeiro autovalor encontrado ficou em 266,88 KN, enquanto o resultado experimental obteve média de 225,8 KN. Neste, o resultado ficou 18,19% acima do valor possivelmente real para essa situação.

Na Figura 12, é apresentado o resultado do segundo modelo analisado DW2, construído de forma semelhante ao anterior, reduzindo-se o espaçamento da soldagem intermediária em meio as barras. Também é observado que a região central das seções enrijecidas, local onde foi realizado a união das barras, apresentou as maiores deformações. O resultado do primeiro autovalor encontrado ficou em 275,56 KN, enquanto o resultado experimental apresentou média de

229,1 KN. Neste, o resultado ficou 20,27% acima do valor possivelmente real para essa situação.

Na Figura 13, é apresentado o terceiro modelo DW5, as seções enrijecidas foram ligadas de forma mais eficiente que as anteriores, sendo estas unidas por cinco soldas intercaladas. Semelhante às outras, essa também apresentou as maiores deformações na região central das seções enrijecidas, sendo esta a possível região de falha do conjunto. Esta análise apresentou resistência a compressão de 276,91KN, valor bem próximo ao anterior DW2. Nesta condição, o ensaio experimental obteve o média a valores de 240,2 KN de resistência. É observado então que, a análise numérica ficou 15,28% acima do média de valores encontrados experimentalmente.

A Figura 11 apresenta o primeiro autovalor, obtido na análise de autovalor da seção caixa DW1, em que são identificadas as regiões de maiores deformações, consideradas regiões críticas de flambagem.

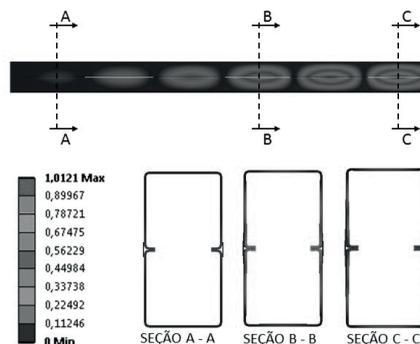


Figura 11. Modo de falha N° 1 do modelo DW1.

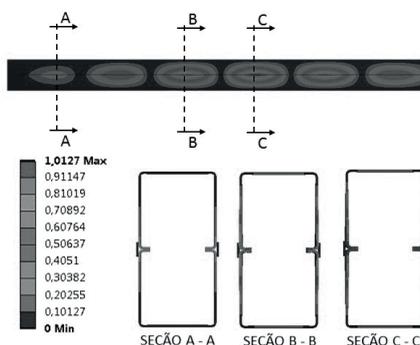


Figura 12. Modo de falha N° 1 do modelo DW2.

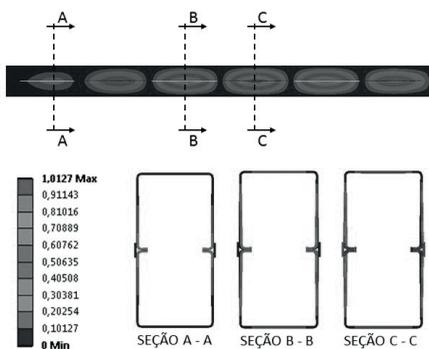


Figura 13. Modo de falha Nº 1 do modelo DW5.

## Conclusões

Dentre as vantagens da utilização do software de análise numérica, a fácil interpretação dos resultados apresentados por seus relatórios de cálculos e gráficos auxiliou-nos nesta etapa final deste estudo, em que foi realizada a leitura e a análise direta dos valores e dos modelos resultantes.

Com os resultados obtidos numericamente, observamos que esses apresentaram valores superiores aos encontrados experimentalmente. A menor diferença entre as análises numéricas e experimentais ficou em 15,28% e a maior em 20,27%, demonstrando que o método numérico nestas condições pode conduzir a uma estrutura subdimensionada, sendo desfavorável a segurança e estando contrário às recomendações da NBR 14762<sup>12</sup>.

## Referências

- Piyawat, Krisda; RAMSEYER, Chris; KANG, Thomas H. K. Development of an axial load capacity equation for doubly symmetric built-up cold-formed sections. *Jornal de Engenharia Estrutural, ASCE* v. 139, n 12, p. 1-13, **2013**.
- Kim, Nan-Ho; SANKAR, Bhavani V. Introdução à Análise e ao Projeto de Elementos Finitos. Tradução e revisão técnica Amir Elias Abdalla Kurban. Rio de Janeiro: LTC, **2011**.
- Whittle, Jessica; RAMSEYER, Chris. Buckling capacities of axially loaded, cold-formed, built-up C-channels. *Thin-Walled Structures, Jornal de Estruturas de paredes finas* v. 47, n 2, p. 190-201, **2009**.
- Carvalho, Paulo R. M.; GRIGOLETTI, Gladimir; TAMAGNA, Alberto; ITURRIOZ, Ignacio. Curso Básico de Perfis de Aço Formados a Frio. 2. ed. Porto Alegre: dos autores, **2006**.
- Filho, Avelino A. Elementos Finitos: a base da tecnologia CAE: análise não linear. 1 ed. São Paulo: Érica, **2012**.
- FISH, Jacob. Um primeiro curso de Elementos Finitos. Tradução: Ricardo Nicolau Nassar Koury e Luiz Machado. Rio de Janeiro: Ltc, **2009**.
- Reyes, Wilson; GUZMÁN, Andrés. Evaluation of the slenderness ratio in built-up cold-formed box sections. *Jornal de pesquisa da construção em aço* v. 67, n 6, p. 929-935, **2011**.
- Silva, Edson L.; PIERIN, Igor; SILVA, Valdir P. Estruturas compostas por perfis formados a frio: Dimensionamento pelo método das larguras efetivas e aplicação conforme ABNT NBR 14762:2010 e ABNT NBR 6355:2012. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil / CBCA, 2014. Disponível em: <<http://www.cbca-acobrasil.org.br/site/publicacoes-manuais.php>>. Acessado em: 07 jun. **2018**.
- Yu, Wei-wen. Cold-formed steel design. 3 ed. New York: John Wiley & Sons, **2000**.
- Gere, James M. Mecânica dos materiais. Tradução Luiz Fernando de Castro Paiva. Revisão Técnica Marcio Lucio Bittencourt. 7 ed. São Paulo: Cengage Learning, **2009**.
- Hibbeler, Russell C. Resistência dos materiais. 7 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, **2010**.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14762: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro, **2010**.
- Filho, Avelino A. Elementos Finitos: a base da tecnologia CAE. 6. ed. São Paulo: Érica, **2013**.

Vítor S. Menezes\*, Márcio J. Dias,  
Adriano R. Silva, Jaques J. L. Silva &  
Cláudia G. O. Santos

Centro Universitário de Anápolis –  
UniEVANGÉLICA, Av, Universitária, km 3,5 Centro  
Universitário, Anápolis – Goiás – Brasil.

\*E-mail: vitormenezes15@gmail.com

