



Contribuição tecnocientífica ao **Construmetal 2025**  
10º Congresso Latino-americano da Construção Metálica  
09 de Setembro de 2025, São Paulo - SP, Brasil

Tema: Outros temas

### **ANÁLISE EXPERIMENTAL DE COLUNAS DE PERFIL DUPLO RACK SUBMETIDAS À COMPRESSÃO CENTRADA\***

Lucas Roquete<sup>1</sup>  
Matheus M. de Oliveira<sup>2</sup>  
Jean Bernardo Dias Viol<sup>3</sup>  
Paulo Henrique Salgado Amorim<sup>4</sup>  
Gilney Afonso Gonçalves<sup>5</sup>  
Arlene M. C. Sarmanho<sup>6</sup>

#### **Resumo**

Os perfis formados a frio do tipo rack são amplamente utilizados em sistemas de armazenamento. Este trabalho apresenta uma avaliação de perfis formados a frio de seção duplo rack submetidos à compressão. A avaliação se baseou na realização de análise experimental e teórica dos perfis e comparação entre os resultados obtidos. A análise experimental dos perfis foi executada por meio da submissão de colunas curtas ao ensaio de compressão com o uso de prensa servo hidráulica, realizados no Laboratório de Estruturas Prof. Altamiro Tibiriçá Dias (DECIV/EM/UFOP), a fim de se obter suas capacidades resistentes. A análise teórica foi realizada considerando as prescrições brasileiras. A partir da avaliação observou-se que as colunas sofreram ruptura por escoamento e os resultados obtidos por meio da análise experimental ficaram próximos daquele obtido pela análise teórica, o que por sua vez indica que os perfis trabalharam em conjunto demonstrando que a união trouxe ganhos significativos para sua capacidade resistente.

**Palavras-chave:** Estruturas de aço; Perfis formados a frio; Duplo rack; Compressão Axial.

#### **EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF DOUBLE RACK PROFILE COLUMNS UNDER AXIAL COMPRESSION**

#### **Abstract**

Cold-formed rack profiles are widely used in storage systems due to their structural efficiency and ease of fabrication. This study presents a comprehensive evaluation of cold-formed double rack section profiles subjected to axial compression. The investigation comprises both experimental testing and theoretical analysis, with a comparative assessment between the obtained results. The experimental program involved compression tests on stub columns using a servo-hydraulic testing machine,

conducted at the Prof. Altamiro Tibiriçá Dias Structural Laboratory (DECIV/EM/UFOP), aiming to determine the ultimate load capacity of the profiles. The theoretical analysis was performed in accordance with the provisions of the Brazilian standard for cold-formed steel structures. The experimental results indicated that the failure mode was governed by yielding, and the load capacities measured experimentally were consistent with the theoretical predictions. The findings confirm that the double rack profiles exhibited effective composite action, and that the connection between the sections significantly enhanced their load-bearing capacity.

**Keywords:** Steel structures; Cold-formed steel profiles; Double rack sections; Axial compression.

<sup>1</sup> Engenheiro Civil, doutor, professor, DTECH, Universidade Federal de São João del Rei - UFSJ, Ouro Branco, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Civil, doutor, DECIV, Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

<sup>3,4</sup> Engenheiro Civil, Universidade Federal de São João del Rei - UFSJ, Ouro Branco, MG, Brasil.

<sup>5</sup> Engenheiro Civil, doutor, DECIV, Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

<sup>6</sup> Engenheira Civil, doutora, professora, DECIV, Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

A maleabilidade das chapas finas de aço permite a fabricação de grande variedade de seções transversais, desde a mais simples cantoneira (seção em forma de L), eficiente para trabalhar à tração e compressão, até os perfis formados a frio duplos, em seção unicelular, também conhecidos como seção caixão, que devido à 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 probabilidade de corrosão) oferecem soluções econômicas (Silva e Silva (2008)).

Tratando mais especificamente de elementos solicitados à compressão, a elevada esbeltez local traz grande influência no comportamento estrutural do perfil, pois o torna ainda mais susceptível à ocorrência dos modos de instabilidade locais. Ressalta-se que, devido a problemas de instabilidade, é comum que os perfis de paredes finas atinjam sua capacidade resistente mesmo apresentando valores de tensões inferiores à tensão de escoamento do material.

Dentre as diversas aplicações estruturais dos perfis formados a frio têm-se os Sistemas de Armazenagem Industrial conhecidos também como RACKs (**Figura 1**). Geralmente, esses sistemas apresentam elementos com elevada esbeltez e imperfeições geométricas devidas à fabricação e montagem.

De acordo com a NBR 14762 (2010) os perfis formados a frio (PFF's) são obtidos por dobramento, em prensa dobradeira, de tiras cortadas de chapas ou bobinas, ou por conformação contínua em conjunto de matrizes rotativas, a partir de bobinas laminadas a frio ou a quente, revestidas ou não, sendo ambas as operações realizadas com o aço em temperatura ambiente. Dentre as diversas seções de perfis formados a frio, tem-se a seção tipo rack ou garrafa (**Figura 2**), que será o objeto de estudo deste trabalho.



(a) Sistema de armazenamento industrial



(b) Sistema de armazenamento em perfil Rack

## Figura 1 – Sistema de armazenamento industrial em perfis formados a frio

Fonte: Água Sistemas (2018)

A seção rack (Figura 2) é caracterizada por uma seção aberta, apresentando perfurações de configurações diversas ao longo de seu comprimento (facilitando o encaixe das ligações) e possuindo flanges de ligação que permitem a fixação do sistema de contraventamento diretamente no perfil, facilitando e agilizando a montagem nos depósitos. O objetivo deste trabalho é avaliar experimentalmente a capacidade resistente de colunas curtas em perfis de parede esbelta de seção dupla tipo rack, comparadas a perfis simples do tipo rack, de forma a julgar sua viabilidade técnica e econômica.

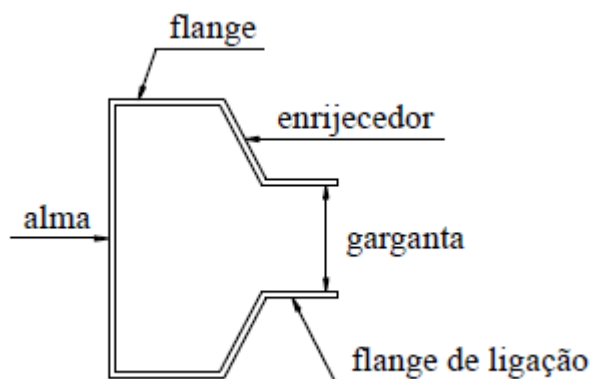


Figura 2 - Perfil Rack

## 2 PLACAS SUBMETIDAS À COMPRESSÃO

Nos perfis de aço formados a frio, os elementos planos constituem uma seção transversal sujeita a flambagem da chapa isolada, mesmo se submetidas a tensões inferiores à de

escoamento inicial, acarretando a flambagem local ou global do elemento. Este fenômeno pode ocorrer em elementos submetidos a compressão axial, à compressão por flexão, ao cisalhamento, etc. Porém, esse fenômeno não caracteriza a instabilidade do elemento, devido as tensões pós-flambagem, podendo chegar a níveis de tensões maiores que a caracterizada na flambagem local. Portanto, para levar em consideração esse fenômeno, as seções são analisadas separadamente como elementos planos sujeitos a tensões normais, aplicando-lhes a teoria da flambagem de chapa. Por sua vez, perfis formados a frio por serem esbeltos, apresentam modos de instabilidades que transformam a Compressão numa solicitação com procedimentos de verificação, por vezes de difícil solução. (CARVALHO, GRIGOLETTI, e BARBOSA, 2006). Os possíveis modos de colapso de um perfil formado a frio são: escoamento, flambagem local, flambagem global e flambagem distorcional.

O cálculo da força axial de compressão resistente característica, na ocorrência do escoamento, é feito de acordo com a Equação 1, sendo  $A$  a área da seção e  $f_y$  a resistência ao escoamento do aço.

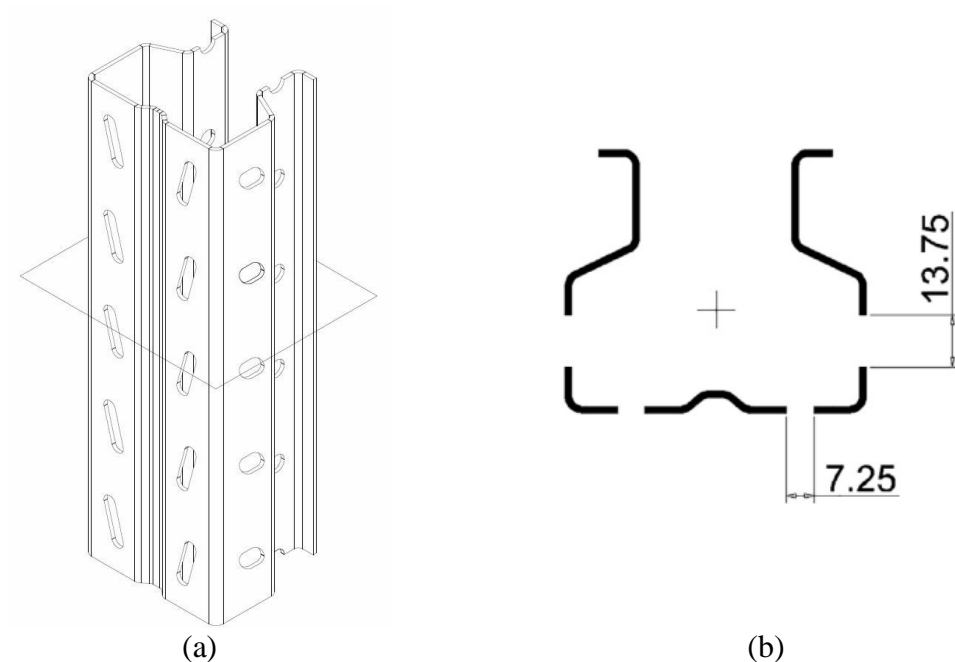
$$N_{c,Rk} = Af_y \quad (1)$$

A NBR 14762 (2010) não aborda os perfis de seção rack com furos em todo o comprimento.

Na presença de furos na seção transversal se define a área líquida da seção. No caso dos perfis rack é possível a existência de seções com diferentes configurações de furos. Para avaliação de resistência trabalha-se com a menor área.

A área líquida da seção  $A_{net,min}$  é calculada segundo um plano que intercepte o maior número de perfurações existentes ao longo do comprimento da coluna.

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados perfis com características semelhantes aos estudados por ELIAS (2018). Em seu trabalho os furos tinham dimensão padrão para serem utilizados na fixação das longarinas e de outros componentes do sistema de armazenagem. Na Figura 3 (a) está representado o plano que passa pelo maior número de furos e na Figura 3 (b) as dimensões destes furos.



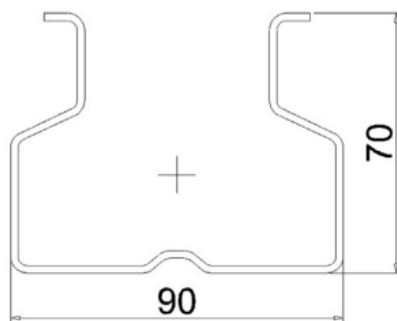
**Figura 3 - Área líquida mínima**  
**Fonte: ELIAS et al. (2018)**

ELIAS (2018) analisou teoricamente e experimentalmente painéis contraventados de sistemas de armazenagem, constituídos por colunas formadas por perfis formados a frio cuja seção transversal é do tipo rack. Na análise teórica considerou-se adaptações normativas ressaltando a necessidade de novas curvas de flambagem que considerem as perfurações nas seções transversais das colunas e o acoplamento entre os modos de flambagem.

### **3 ANÁLISE EXPERIMENTAL**

Os ensaios experimentais foram realizados utilizando-se três colunas de aço duplo rack com tensão de escoamento ( $f_y$ ) igual a 374,22 MPa determinada por meio de ensaio de caracterização do aço.

Foi considerada a seção transversal do tipo rack para as colunas, com larguras de alma de 90 mm (CDR 90) e espessura de 2 mm. A seção CDR 90 é mostrada na Figura 4.



**Figura 4 - Seção transversal CDR 90 (dimensões em mm)**

Fonte: ELIAS et al., 2018

As propriedades geométricas da seção estudada estão apresentadas Tabela 1.

**Tabela 1 - Propriedades geométricas da seção transversal CDR 90**

$b_w$ (mm)	$t$ (mm)	$A_g$ (cm <sup>2</sup> )	$A_e$ (cm <sup>2</sup> )	$I_x$ (cm <sup>4</sup> )	$I_y$ (cm <sup>4</sup> )	$C_w$ (cm <sup>6</sup> )	$J$ (cm <sup>4</sup> )
90	2,00	5,24	4,40	30,28	59,67	779,63	0,0698

Fonte: ELIAS, 2018

Para a formação do perfil de ensaio, foram realizadas soldas ponteadas unindo duas seções CDR 90, a uma distância padronizada de 250 mm, em duas colunas com 3 m de comprimento, de modo que os perfis trabalhem em conjunto. O perfil soldado foi cortado em colunas curtas para realização dos ensaios (Figura ). Na Figura são apresentadas as três colunas utilizadas nos ensaios.



**Figura 5 - Corte das colunas**



**Figura 6 – Protótipos das colunas tipo rack duplo**

Após a união dos perfis as propriedades foram recalculadas com o auxílio do software GBTUL em sua versão 2.0.4.2, tais propriedades estão representadas na Tabela 2.

**Tabela 2 - Propriedades geométricas da seção transversal CDR 90 duplo rack**

$b_w$ (mm)	$t$ (mm)	$A_g$ (cm <sup>2</sup> )	$A_e$ (cm <sup>2</sup> )	$I_x$ (cm <sup>4</sup> )	$I_y$ (cm <sup>4</sup> )	$C_w$ (cm <sup>6</sup> )	$J$ (cm <sup>4</sup> )
90	2,00	10,48	8,80	119,57	273,72	670,37	189,75

Para realização do ensaio foram consideradas três colunas com comprimentos variados, a relação destes comprimentos está representada na Tabela 3.

**Tabela 3 - Comprimentos das colunas ensaiadas**

Nº da coluna	Comprimento (mm)
Coluna 1	548
Coluna 2	549
Coluna 3	551

#### **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

A coluna foi centrada nas rótulas de ensaio com o uso de papel milimetrado com a marcação do centro geométrico da seção. O ensaio foi realizado com controle de deslocamentos e a velocidade do ensaio foi definida em duas zonas de controle: a primeira com velocidade de 1 mm/min até atingir 500 N de carga e a segunda com velocidade de 0,2 mm/min até o fim do ensaio.

Estando o perfil posicionado na prensa servo-hidráulica, iniciou-se a aplicação do carregamento a partir do controle de deslocamentos. Obteve-se uma curva de carga versus deslocamento que apresenta comportamento ascendente, sendo que o deslocamento axial medido se refere ao movimento vertical da prensa quando da aplicação de carga. O critério de parada é após atingir a carga última quando a curva carga versus deslocamento declina.

Nas Figuras 6 a 8 são apresentadas as colunas utilizadas ao final da realização de cada ensaio. A configuração deformada da Coluna 1 pode ser observada na alma do perfil na região dos furos próximo ao centro da coluna, como ilustrado na Figura 7. Este fato indica a ocorrência da plastificação da seção, ou seja, a resistência predominante deste ensaio é referente ao escoamento da seção líquida. A configuração deformada da Coluna 2 pode ser observada em ambas as almas do perfil na região dos furos próximo ao apoio superior, como ilustrado na Figura 8. Este fato também caracteriza a ocorrência da plastificação da seção, ou seja, que a resistência predominante deste ensaio é referente ao escoamento da seção líquida. A configuração deformada da Coluna 3 pode ser observada na alma do perfil na região dos furos próximo ao apoio superior, como ilustrado na Figura 9. Sendo assim observou-se também a ocorrência da plastificação da seção, sendo a resistência predominante deste ensaio é referente ao escoamento da seção líquida. É possível observar o modo de falha da coluna a partir das imagens dos ensaios realizados, indicando escoamento da seção líquida em todos.

Para a Coluna 1, foi registrado a carga máxima de 332,53 kN quando o deslocamento era de 3,47 mm. Para a Coluna 2, foi registrado a carga máxima de 314,04 kN e deslocamento de 2,98 mm e para a Coluna 3, foi registrado a carga máxima de 309,95 kN com o deslocamento de 3,11 mm, como representado pelo gráfico da Figura 10.

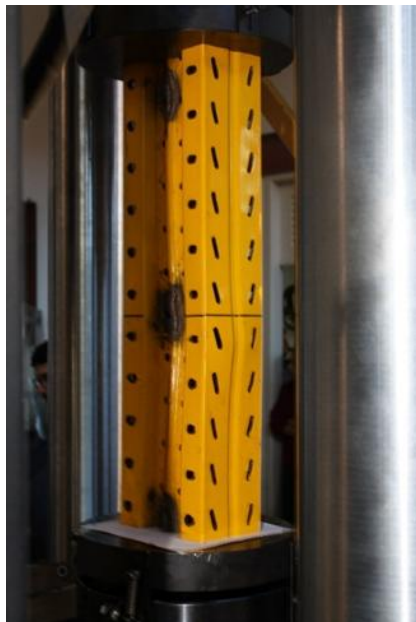


Figura 7 - Coluna 1



Figura 8 - Coluna 2



Figura 9 - Coluna 3

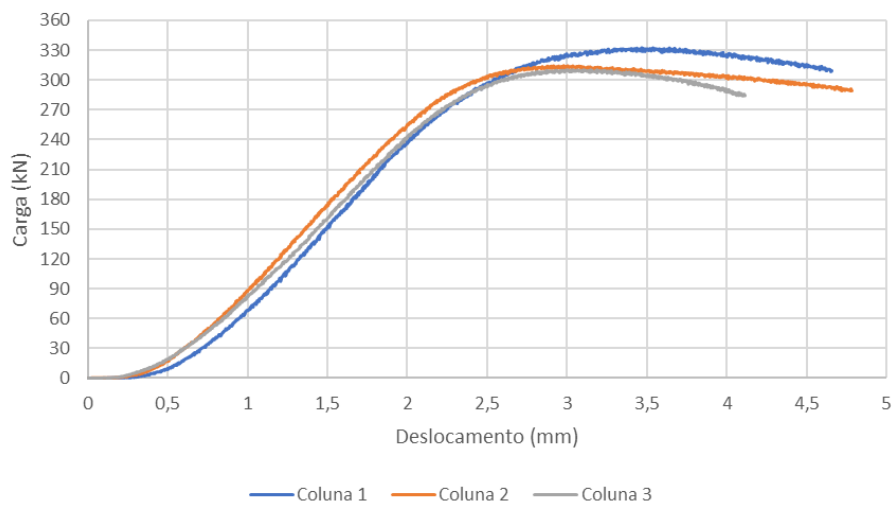


Figura 10 – Curvas de carga versus deslocamento

Na Tabela 4 são apresentados os valores dos resultados obtidos conforme Equação 3 considerando a área líquida mínima para o cálculo, para ambos os perfis rack simples e o duplo rack, sendo a tensão de escoamento igual a 374,22 MPa.

**Tabela 4 - Áreas dos perfis e suas forças axiais de compressão resistente de cálculo**

Perfil	Área líquida mínima (cm <sup>2</sup> )	N <sub>c,Rk</sub> (kN)
Rack	4,40	164,65
Duplo Rack	8,80	329,31

Apenas por comparação, utilizou-se o método da seção efetiva para calcular a capacidade resistente do perfil, para a seção rack apresentado na NBR 14762 (20110).

Sendo assim, de posse das propriedades geométricas da seção, conforme a Tabela 2, determinou-se a força normal de compressão elástica  $N_e$ , de acordo com o item 9.7.2.1 da NBR 14762 (2010), após o cálculo de  $N_e$ , determinou-se o valor do índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global ( $\lambda_0$ ), para calcular o valor do fator de redução da força axial de compressão resistente, associado à flambagem global ( $\chi$ ), obtendo-se um valor de 0,983. A partir do valor do fator de redução associado à flambagem global, calculou-se para a área efetiva da seção ( $A_e$ ). Determinou-se o índice de esbeltez reduzido  $\lambda_p$ , obtendo-se um valor de 0,853, em seguida calculou-se o valor da área efetiva, e desta forma o valor da área efetiva foi de 8,292 cm<sup>2</sup>. De posse de tais valores calculou-se a força axial de compressão resistente de cálculo ( $N_{c,Rk}$ ), obtendo-se um valor de 304,90 kN. Após o cálculo e os ensaios, foi feita uma comparação entre os valores obtidos experimentalmente e o valor teórico, como apresentado na Tabela 5.

**Tabela 5 - Valores das capacidades resistentes das colunas**

Coluna	N <sub>c,Re</sub> (kN)	N <sub>c,Rk(MSE)</sub> (kN)	N <sub>c,Rk(escoamento puro)</sub> (kN)
1	332,53		
2	314,04	304,90	329,31
3	309,95		

De posse dos resultados, é possível realizar uma comparação entre os valores ensaiados e o calculado e fazer algumas observações a respeito do método. Para quantificar a diferença, foi utilizado a Equação 2.

$$\varepsilon = \frac{N_{c,Re} - N_{c,Rk}}{N_{c,Rk}} \quad (2)$$

Na Coluna 1, que obteve maior resultado dentre as ensaiadas, o valor de resistência ao escoamento obtido experimentalmente difere do teórico pelo método da seção efetiva em + 9,06 % e do teórico considerando apenas escoamento em + 0,98 %, indicando um valor muito próximo do esperado.

Na Coluna 2 o valor da resistência ao escoamento foi inferior em relação ao da Coluna 1, diferindo do teórico pelo método da seção efetiva em + 3,00 % e do teórico considerando apenas escoamento em - 4,64 %, podendo ser justificado por imperfeições nas bases da coluna, gerando excentricidade na aplicação de carga, diminuindo a capacidade resistente.

Na Coluna 3, que obteve menor resultado, o valor da resistência obtida experimentalmente diferiu do teórico pelo método da seção efetiva em + 1,66 % e do teórico considerando apenas escoamento em - 5,88 %. Durante o ajuste dessa coluna na prensa, foi possível observar que houve imperfeições em uma ou nas duas bases fazendo com que a parte superior da prensa não toque por igual todo o contorno da base da coluna, gerando excentricidade e diminuindo a capacidade resistente.

A média das resistências encontradas no ensaio foi de  $N_{c,Re,médio} = 318,84 \text{ kN}$ , que difere do valor teórico pelo MSE em + 4,61 %, e do teórico considerando apenas escoamento em - 3,18 %. Quanto mais colunas forem ensaiadas, mais representativo será o valor da média.

Avaliar as colunas pelos dois métodos mostrou-se adequado. Pelos ensaios experimentais observa-se que o modo dominante foi o escoamento da seção. Destaca-se que a ocorrência ou não da flambagem local do perfil não foi observado experimentalmente. Pelo MSE foi observada a ocorrência de flambagem local, pois  $\lambda_p = 0,853$ . Porém como a NBR 14762 (2010) não prevê esse tipo de perfil (com furos) pode não ser adequado utilizá-la.

Outro fato que pode ser destacado é o aumento duplicado da resistência da coluna, pelo fato de se trabalhar com o perfil duplicado. Observa-se também que as soldas ponteadas se mostraram eficientes para o trabalho conjunto dos perfis.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho foi avaliar experimentalmente a capacidade resistente de colunas curtas em perfis de parede esbelta de seção dupla tipo rack à compressão axial.

A partir da análise experimental pode-se concluir que os perfis apresentaram ruptura por escoamento não ocorrendo efeitos de flambagem, o que é justificado pelo seu baixo índice de esbeltez, verificou-se também que a capacidade resistente do perfil duplo é equivalente àquela obtida utilizando-se a área de dois perfis isolados, indicando que as distâncias adotadas para execução das soldas foram suficientes para que ambos trabalhassem em conjunto.

A partir da comparação pode-se observar que os resultados obtidos na análise experimental apresentam grande proximidade daquele obtido pela análise teórica, sendo que as diferenças

encontradas estão abaixo de 10%, o que estaria respaldado pelo coeficiente de resistência de projeto, contemplado pela NBR 14762 (2010). Tal diferença pode ser justificada pelas imperfeições geradas durante processo de preparação das colunas, como por exemplo, a solda e o nivelamento fino, realizados manualmente. Porém, como a NBR 14762 (2010) não prevê o uso de perfis rack com furos não seria adequado o seu uso.

Foi possível observar também que na comparação dos valores obtidos experimentalmente com os teóricos, a não ocorrência de flambagem (local e global) é suficiente para avaliar o modo de falha de escoamento puro da coluna dupla, considerando o escoamento da área mínima.

A análise experimental de um maior número de colunas curtas tornaria o resultado mais consistente, além disso para análise dos fenômenos de flambagem é indicado o ensaio em colunas longas. Outra forma de comparação e validação de resultados pela análise numérica.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem a UFSJ, UFOP, CNPQ e FAPEMIG.

### **REFERÊNCIAS**

- Carvalho, P. M.; Grigoletti, G.; Barbosa, G. D. Curso Básico de Perfis de Aço Formados a Frio. 3 ed. Porto Alegre, (2014).
- Elias, G. C. Análise de painéis contraventados de sistemas de armazenagem industriais. Dissertação de Mestrado. PROPEC - UFOP, (2018).
- ELIAS, Guilherme Cássio et al. Ultimate load of steel storage systems uprights. **Engineering Structures**, v. 170, p. 53-62, 2018.
- GBTUL – Buckling and Vibration Analysis of Thin-Walled Members, DECivil/IST, Technical University of Lisbon. Disponível em <<http://www.civil.ist.utl.pt/gbt>>, 2008.
- NBR 14762 – Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, (2010).
- SILVA, E. L.; SILVA, V. P. Dimensionamento de perfis formados a frio conforme NBR 14762 e NBR 6355. Rio de Janeiro, (2008).