

## Análise teórico-experimental de elementos formados a frio perfurados submetidos à compressão

Arlene Maria Sarmanho Freitas

*D. Sc., Professora, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, UFOP  
E-mail: arlene@em.ufop.br*

Marcílio Sousa da Rocha Freitas

*D. Sc., Professor, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, UFOP  
E-mail: marcilio@em.ufop.br*

Flávio Teixeira de Souza

*Bolsista de Iniciação Científica PIBIC/CNPq, Escola de Minas, UFOP  
E-mail: ftxz@yahoo.com.br*

### Resumo

Sistemas de armazenagem industrial são amplamente utilizados em todo o mundo, pois aliam praticidade e economia. Eles possuem diversas particularidades estruturais, entre elas a existência de perfurações ao longo da altura das colunas, para encaixe de outros elementos, o que dificulta a previsão de sua resistência, devendo esta ser feita, segundo associações de fabricantes, por meio de ensaios. Esse trabalho apresenta a utilização da simulação via elementos finitos para previsão da resistência dessas colunas e nele também são apresentadas alternativas aos ensaios experimentais.

**Palavras-chave:** estruturas metálicas, perfis formados a frio perfurados, elementos finitos.

### Abstract

*Storage rack systems are widely used in the world due their practical and economic character. They possess some structural settings, for example, the existence of perforations in the height of the columns, to fit the connections, which make more difficult the prediction of their strength. So the manufacturers associations prescribe tests to determine this resistance. This work presents the use of the finite element method to preview the resistance of the column, and alternatives to the tests are showed.*

**Keywords:** *steel structures, thin-walled perforated members, finite element analysis.*

## 1. Introdução

Os sistemas de armazenamento industrial são grandes estruturas destinadas ao armazenamento de itens em depósitos e armazéns. Existe uma grande variedade de sistemas disponíveis, que se adaptam às mais diversas condições de uso.

Uma das particularidades estruturais que mais influenciam o comportamento dos racks é o fato de suas colunas serem constituídas por perfis formados a frio de seção transversal característica com flanges de ligação e de perfurações ao longo da altura. A coluna possui essas particularidades para possibilitar o encaixe de ligações, visando a facilitar a montagem. A Figura 1 apresenta o rack em funcionamento e uma ligação típica nele utilizada.

A existência das perfurações dificulta a previsão do comportamento estrutural da coluna a partir das normas de cálculo existentes. Os fabricantes, então, propõem que o dimensionamento seja baseado em resultados de ensaios. O objetivo desse trabalho é utilizar o software ANSYS<sup>[2]</sup> para simular o teste da coluna curta, prescrito pelo Racks Manufacturers Institute (RMI<sup>[3]</sup>). Será, ainda, avaliada a influência das características elasto-plásticas do aço na resistência final da coluna. Observa-se, ainda, que as prescrições do RMI não consideram o modo de instabilidade distorcional no cálculo da resistência da coluna. Assim, para verificar a influência da distorção da seção transversal, utilizaram-se as prescrições da norma brasileira, recentemente editada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT 14672<sup>[4]</sup>).

## 2. Prescrições do RMI para determinação da resistência das colunas

O RMI prescreve para a determinação da resistência da coluna a realização do teste da coluna curta. Nesse ensaio, um corpo de prova da coluna, com as dimensões determinadas de modo que não aconteça a flambagem global no pro-

tótipo, é ensaiado à compressão e é determinada a sua resistência última. A partir dessa resistência e da caracterização do material, tem-se a capacidade portante do elemento perfurado quando sob compressão. A Figura 2 apresenta a seção transversal da coluna, sua nomenclatura e as dimensões do corpo de prova.

São utilizadas, então, as seguintes equações, propostas por Pekoz<sup>[5]</sup>, para determinar a resistência nominal da coluna.

$$P_n = A_e F_n \quad (1)$$

Onde:

$P_n$  = carga nominal axial.

$A_e$  = área efetiva da seção transversal da coluna, admitida como a área líquida mínima da seção transversal da coluna.

$F_n$  = tensão nominal de flambagem, considerando-se as propriedades da seção transversal bruta da coluna.

$$A_e = \left[ 1 - (1 - Q) \left( \frac{F_n}{f_{ya}} \right)^Q \right] A_{net\ min} \quad (2)$$

Onde:

$A_e$  = área efetiva da seção transversal.

$F_n$  = tensão nominal, considerando-se as propriedades da área bruta e a tensão de escoamento especificada pelo fabricante do aço.

$f_{ya}$  = tensão de escoamento, obtida pelo ensaio de caracterização do aço.

$Q$  = fator redutor de forma, obtido através do ensaio de coluna curta.

$A_{net\ min}$  = área líquida mínima, considerando-se o plano da seção transversal com o maior número de furos.



Figura 1 - Vista do rack e detalhe das ligações (Altamira<sup>[6]</sup>).

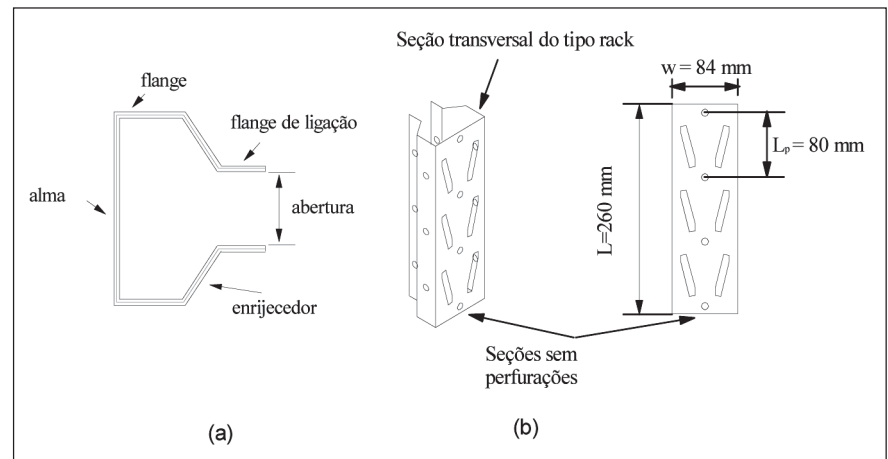


Figura 2 - (a) Nomenclatura da seção transversal; (b) Dimensões do corpo de prova.

$$Q = \frac{P_{ua}}{f_{ya} A_{anet\ min}} \quad (3)$$

Onde:

$P_{ua}$  = carga última média, obtida no ensaio da coluna curta;

$A_{anet\ min}$  = área líquida mínima média, obtida no plano que intercepta o maior número de furos da seção transversal da coluna.

### 3. Simulação numérica do teste da coluna curta

Nesse trabalho, o teste da coluna curta (RMI[3]) foi simulado a partir do software ANSYS. A Figura 3 apresenta a malha de elementos finitos gerada.

Foram utilizados, no modelo, elementos de casca (SHELL43), na simulação da coluna, elementos de sólido (SOLID45), na simulação das placas de reação, e elementos de contato (CONTAC49), na simulação do atrito entre as colunas e as placas (Davies<sup>[6]</sup>).

As placas de reação foram incluídas para simular a ação da prensa hi-

dráulica na aplicação da carga. O coeficiente de atrito entre as placas e a coluna foi considerado igual a 0,33.

O módulo de elasticidade do aço é de 205 GPa e seu coeficiente de Poisson é 0,3. Foram analisadas duas situações: a primeira utilizando as características nominais do aço ( $f_y = 250$  MPa e  $f_u = 400$  MPa) e a segunda utilizando os valores obtidos através de ensaios de caracterização, dados por Oliveira<sup>[7]</sup> ( $f_y = 320,23$  MPa e  $f_u = 432,50$  MPa). Esses valores foram aproximados, na análise, por diagramas tensão-deformação bilineares.

Para ambas as situações foram simulados quatro casos:

- Coluna nominal: com furos e dimensões nominais da seção transversal.
- Coluna real: com furos e dimensões reais de um corpo de prova não ensaiado.
- Coluna bruta: sem furos e com as dimensões nominais da seção transversal.
- Coluna líquida: sem furos e com a seção transversal de área igual à área líquida mínima.

A área líquida mínima é aquela onde existe a maior concentração de furos, conforme apresentado na Figura 4.

### 4. Apresentação e análise dos resultados

Conforme apresentado no item anterior, foram realizadas simulações de diversos casos, sendo consideradas as características nominais e experimentais do aço. Esses resultados foram, então, comparados com os resultados experimentais ( $P_{ua}$ ) e com os resultados obtidos a partir das prescrições do RMI, para o caso de propriedades experimentais para o aço ( $P_{RMI}$ ) e também nominais

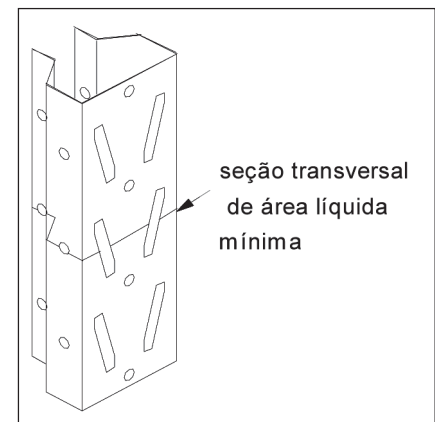


Figura 4 - Posição da seção de área líquida mínima.

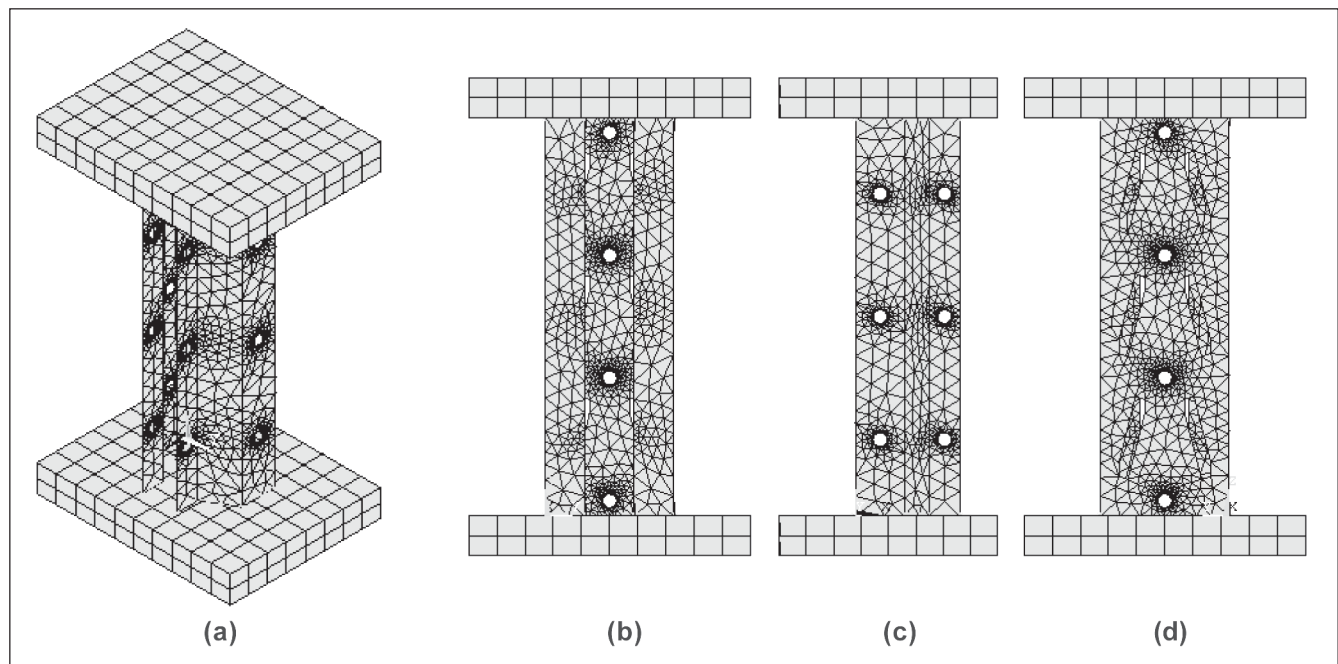


Figura 3 - Malha de elementos finitos gerada no ANSYS: (a) vista em perspectiva; (b) garganta; (c) flanges; (d) alma.

( $P_{RMI-n}$ ). Esses valores foram obtidos considerando as prescrições da AISI [8] para o cálculo da tensão nominal de flambagem, considerando as propriedades da seção bruta para perfis comprimidos ( $F_n$ ). Devido ao fato de que a AISI não leva em consideração a flambagem distorcional, esse modo de colapso foi, então, analisado de acordo com as prescrições da NBR 14672 [4] para a determinação da tensão nominal para a seção bruta, considerando-se o modo distorcional ( $F_{ndist}$ ), valor que foi levado às equações propostas pelo RMI, para as características experimentais ( $P_{RMI_{dist}}$ ) e nominais do aço ( $P_{RMI_{dist-n}}$ ).

A comparação desses resultados é feita nas Figuras 5 e 6 e na Tabela 1.

Observa-se que as imperfeições geométricas têm grande influência na resistência da coluna. Observa-se, ainda, que existe uma boa correlação, no caso em que são consideradas as características experimentais do aço, entre os resultados das colunas real e líquida com a carga última experimental.

Além da resistência, é analisado, também, o modo de colapso da coluna. A Figura 7 apresenta o modo de colapso experimental e a Figura 8, os modos observados na análise numérica. Nas simulações realizadas, observa-se que, nos casos em que são consideradas as perfurações, ocorrem maiores deslocamentos à meia altura do corpo de prova.

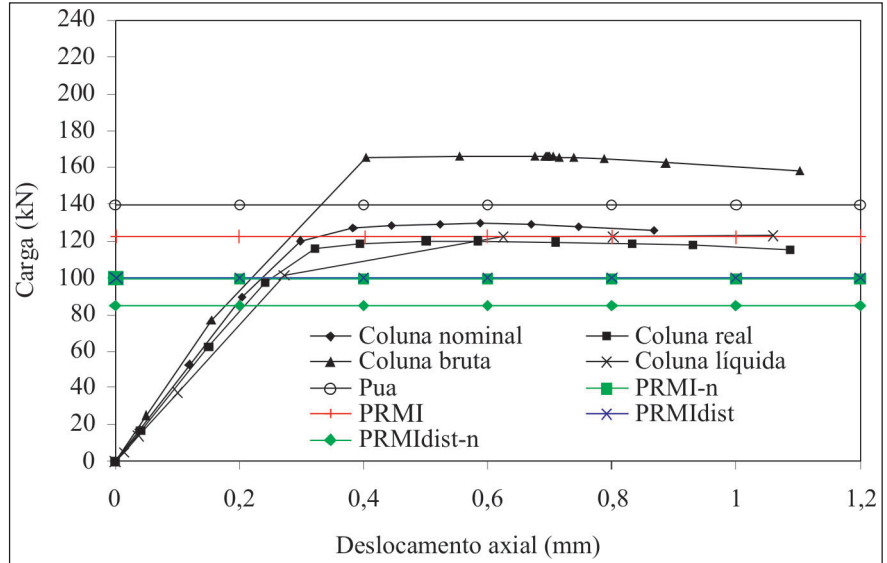


Figura 5 - Curva carga versus deslocamento ( $f_y = 250$  MPa).

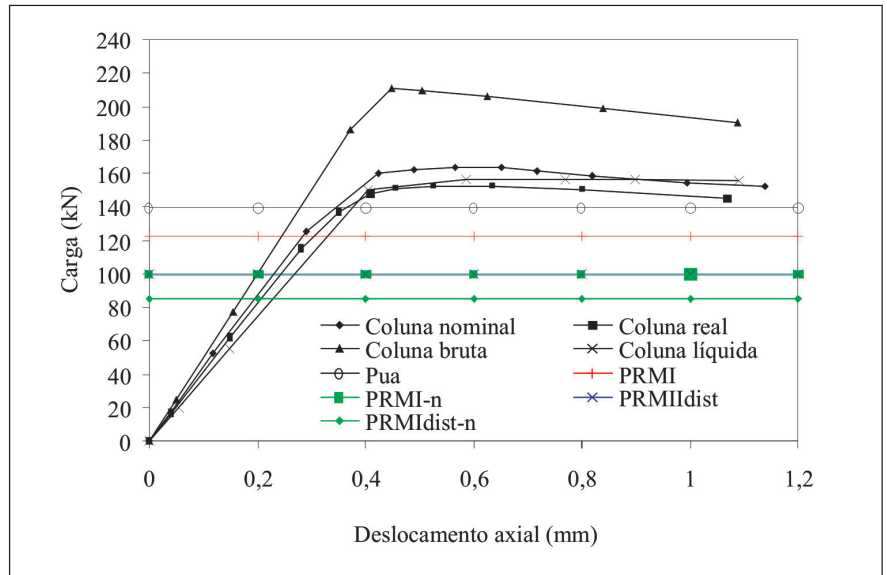


Figura 6 - Curva carga versus deslocamento ( $f_y = 320,23$  MPa).

Tabela 1 - Comparação entre as cargas últimas obtidas.

Caso estudado	$P_{ef}$ (kN)	$P_{ef}/P_{ua}$	$P_{ef}/P_{RMI}$	$P_{ef}/P_{RMI_{dist}}$	$P_{ef-n}$ (kN)	$P_{ef-n}/P_{RMI-n}$	$P_{ef-n}/P_{RMI_{dist-n}}$
Coluna nominal	163,64	1,17	1,34	1,64	129,38	1,31	1,51
Coluna real	150,78	1,08	1,23	1,51	119,92	1,21	1,41
Coluna bruta	210,95	1,51	1,73	2,12	165,73	1,67	1,95
Coluna líquida	156,57	1,12	1,28	1,57	122,48	1,24	1,44

$P_{ef}$  - carga última obtida por análise via elementos finitos com  $f_y = 320,23$  MPa

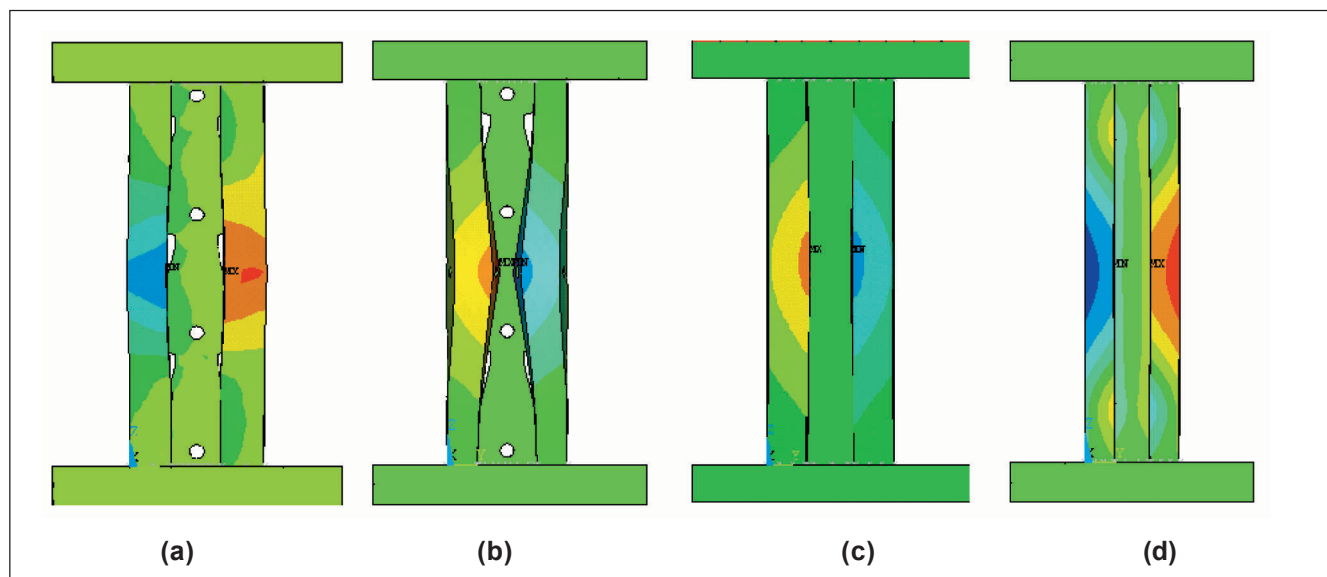
$P_{ua}$  - carga última experimental (139,73 kN)

$P_{RMI-n}$  - carga última segundo o RMI com  $f_y = 250$  MPa (98,98 kN)

$P_{RMI}$  - carga última segundo o RMI com  $f_y = 320,23$  MPa (122,14 kN)

$P_{RMI_{dist}}$  - carga última segundo o RMI considerando a distorção com  $f_y = 320,23$  MPa (99,57 kN)

$P_{RMI_{dist-n}}$  - carga última segundo o RMI considerando a distorção com  $f_y = 250$  MPa (84,95 kN)



**Figura 8** - Deslocamentos nas simulações, ampliados 10 vezes: (a) Coluna nominal; (b) Coluna real; (c) Coluna bruta; (d) Coluna líquida.



**Figura 7** - Deslocamentos nos ensaios experimentais

Isto se justifica pela fragilização induzida nessa seção, devido à existência de um furo no flange de ligação a essa altura do corpo de prova.

## 5. Conclusões

A partir dos estudos realizados, fica evidenciada a eficiência da simulação

numérica para a determinação da resistência de elementos formados a frio perfurados. Também foi observada a grande influência das propriedades elasto-plásticas do aço na resistência da coluna, destacando-se efeitos como o encruamento resultante do trabalho a frio na determinação dessa resistência. As imperfeições geométricas e as perfurações também são fatores que influenciam o comportamento estrutural da coluna. A partir da simulação da coluna líquida, constata-se que as propriedades líquidas da seção podem ser utilizadas em projeto para a determinação da resistência da coluna.

Pelos resultados dos ensaios e das simulações numéricas, observou-se que o modo de colapso preponderante é o distorcional. Assim, a verificação através do procedimento proposto pela NBR 14672 é mais coerente, uma vez que considera o efeito da distorção na análise.

## 6. Agradecimentos

Os autores agradecem à Águia Sistemas de Armazenagem Industrial e ao CNPq pelo apoio à pesquisa.

## 7. Referências bibliográficas

- [1] ALTAMIRA Ind. Metalúrgica (2002). [www.altamira.com.br](http://www.altamira.com.br), consulta em 04-12-2002.
- [2] ANSYS (1999). User's Manual for revision 5.6. Swanson Analysis Systems Inc. Inc., Houston, PA.
- [3] RMI (1997). Specification for Design, Testing, and Utilization of Industrial Steel Storage Racks, Rack Manufacturers Institute, Charlotte, NC.
- [4] ABNT 14672 (2001). Dimensionamento de Estruturas de Aço Constituídas por Perfis Formados a Frio.
- [5] PEKŐZ, T. Design of Perforated Cold Formed Steel Columns. 1988. In: INTERNATIONAL SPECIALTY CONFERENCE COLD-FORMED STEEL STRUCTURES, 9. St Louis, MO, November.
- [6] DAVIES J. M., LEACH, P., TAYLOR A. The Design of Perforated Cold-Formed Steel Sections Subject to Axial Load and Bending. *Thin Walled Structures*, v. 29, n. 1-4, p. 141-157, 1997.
- [7] OLIVEIRA, A. M. *Análise teórico-experimental de sistemas estruturais de armazenamento (Rack's)*. Ouro Preto: UFOP, 2000. (Dissertação de Mestrado).
- [8] AISI. Cold Formed Steel Design Manual. American Iron and Steel Institute, Washington, DC, 1996.

**Artigo recebido em 12/03/2003 e aprovado em 29/11/2003.**