

Comportamento de sistemas de armazenagem industrial do tipo *Drive-in*

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*

Simone Rodrigues Campos

*Engenheira Civil, Mestranda, Departamento de Engenharia Civil Escola de Minas, UFOP
E-mail: sissirc@hotmail.com*

Resumo

Os sistemas de armazenagem industrial são estruturas utilizadas para armazenar produtos manufaturados e são conhecidos também como *racks*. Variam de pequenas estantes carregadas manualmente até estruturas de mais de 30 m de altura com carregamento automatizado. São fabricados em perfis formados a frio com perfurações ao longo da coluna. Nesse trabalho, é analisado o modelo de *rack* do tipo *Drive-in* através de *software* comercial. Foram feitas análises numéricas linear e não linear, considerando o modelo bidimensional e tridimensional. Na ausência de especificações brasileiras para o projeto de *racks*, foram utilizadas as prescrições americanas do *Rack Manufacture Institute* com certas modificações, já que essas prescrições não abrangem o sistema *Drive-in*. Foram realizados estudos comparativos das diversas análises, foi avaliada a importância da determinação dos dados experimentais e foi analisada a eficiência da aplicação de forças horizontais como forma de representar a estrutura fora do prumo.

Palavras-chave: perfis formados a frio, sistemas de armazenagem industrial, *rack*, análise numérica, *Drive-in*.

Abstract

Steel storage rack systems are structures used to store manufacture products. These systems range from the simplest shelving structure a few meters high and hand loaded to rack clad buildings until 30 m high, served by automatic cranes. Racks are manufactured from cold-formed steel with holes in their columns. In this work is studied the Drive-in system by the commercial software ANSYS through linear and non-linear analysis, 2D and 3D models. The specific American code to steel storage racks systems of the Rack Manufacturers Institute - RMI - was used with some modifications because this code does not enclose the Drive-in system. In this study was researched the best analysis to represent the behaviour of the Drive-in, the importance of considering the experimental results and the efficiency of using horizontal forces to represent the effect of the out-of-plumb in the structure.

Keywords: *Cold formed sections, Steel storage rack, rack, numerical analysis, Drive-in.*

1. Introdução

Os sistemas de armazenagem industrial possuem elevada densidade de armazenagem, montagem prática e custo relativamente baixo. São estruturas compostas por perfis formados a frio, de variadas seções transversais. Suas colunas possuem características próprias, como perfurações ao longo de seu comprimento para possibilitar o encaixe de ligações, tornando, assim, uma avaliação analítica de seu comportamento bastante difícil. Diversos pesquisadores vêm contribuindo para a análise de vários desses tipos de sistemas, tais como Godley (1991), Godley et al. (2000), Baldassino e Bernuzzi (2000), Bernuzzi e Castiglioni (2001), Freitas et al. (2001), (2002)).

O modelo *Drive-in* possui, como característica fundamental, a ausência de vigas transversais, para permitir o deslocamento da empilhadeira em seu interior. Devido a isto, a estabilidade do sistema deve ser obtida através dos planos de contraentramentos e da rigidez das ligações. Além da ausência de vigas transversais, a estabilidade do sistema é afetada pela falta de prumo da estrutura no ato da montagem e pelas perfurações na coluna. A influência dessas perfurações na coluna e a rigidez das ligações foram quantificadas através de ensaios realizados por Oliveira (2000) e Campos (2003).

2. Materiais e métodos

As cargas consideradas nas análises são o peso próprio (DL) e a carga de armazenagem (PL), sendo o rack considerado totalmente carregado. As cargas foram impostas à estrutura seguindo a combinação de cargas mais crítica prescrita pelo RMI (1997) baseado no critério dos Estados Limites, o LRFD - *Load and Resistance Factor Design*.

Nesse trabalho, é utilizado o projeto de um sistema *Drive-in* fornecido pela empresa Águia Sistemas de Armazenagem (Águia, 1999). A estabilidade do sistema é garantida por meio de contraentramentos dispostos nos planos laterais, superior e fundos. As Figuras de 1 a 3

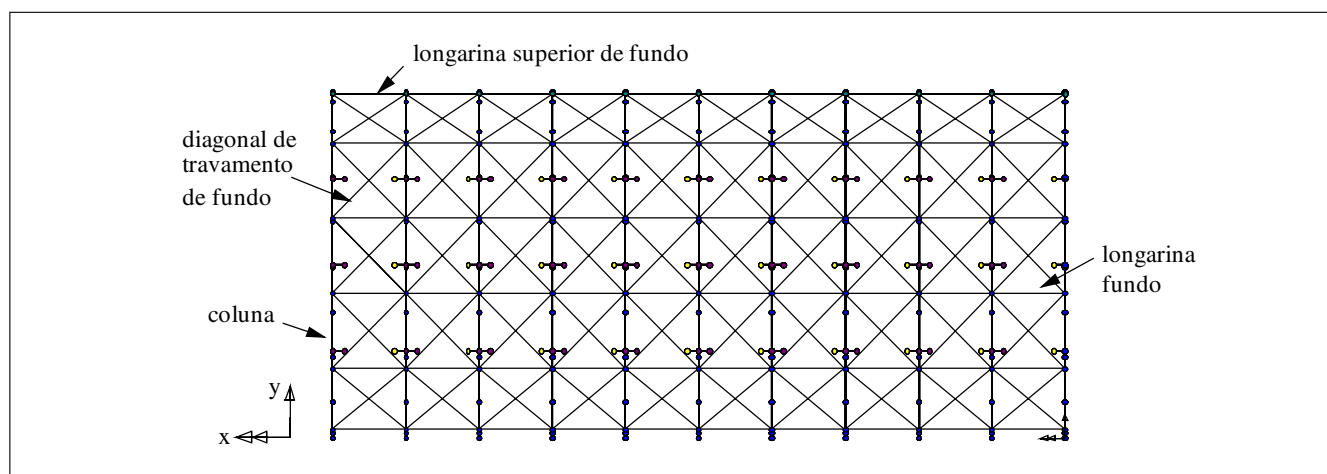


Figura 1 - Vista de fundo do modelo gerado do sistema *Drive-in* com a indicação de seus componentes.

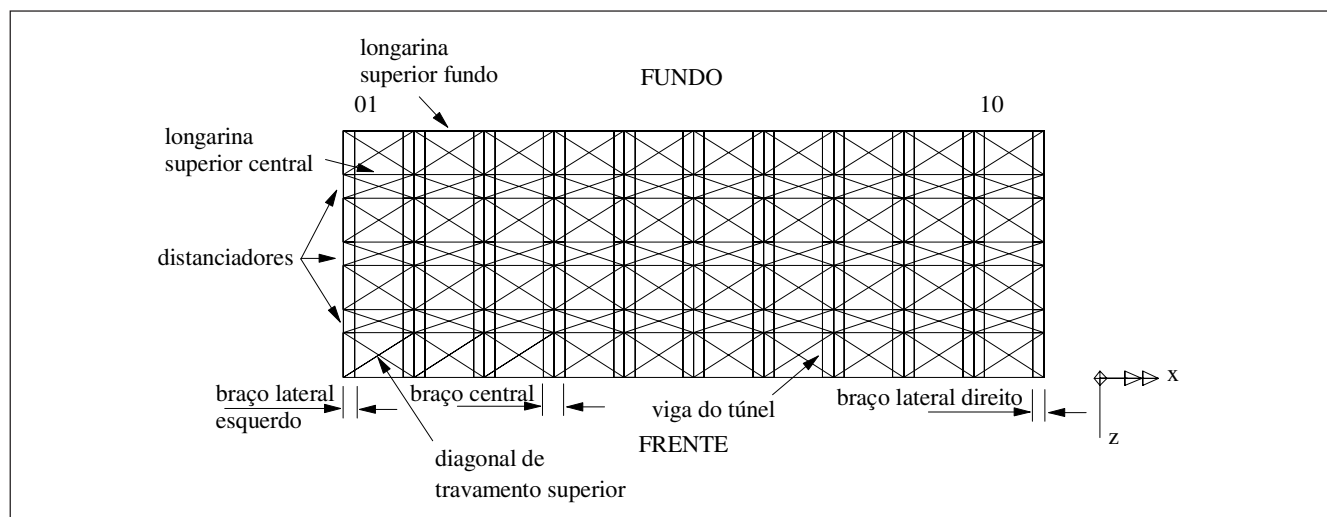


Figura 2 - Vista superior do modelo gerado do sistema *Drive-in* com a indicação de seus componentes.

apresentam esses planos de contraventamentos junto com a identificação dos demais elementos que compõem a estrutura.

Os furos nas colunas têm a função de facilitar o encaixe das vigas (Figura 4). O efeito dessas perfurações na capacidade de carga das colunas é considerado através do parâmetro Q , que é o parâmetro redutor de forma, obtido através do ensaio da coluna curta prescrito pelo RMI (1997) e realizado por Oliveira (2000). Com esse parâmetro, é determinada a área efetiva da seção transversal da coluna.

Os estudos realizados objetivam definir qual é o melhor tipo de análise para esse tipo de estrutura. Assim, como comparação, foram realizadas análises linear e não linear, tridimensional e bidimensional e foi, ainda, avaliada a importância da utilização de dados experimentais e a aplicação de forças horizontais na direção X para representação da estrutura fora do prumo no plano XY . Essas análises foram realizadas no *software* em elementos finitos ANSYS (2001). A estrutura foi modelada com elementos de viga e elemento de mola para representar a rigidez das ligações. Na análise não linear, a carga foi aplicada em dez etapas através do método de Newton Raphson Padrão.

A Figura 5 apresenta o aspecto tridimensional do modelo com a indicação

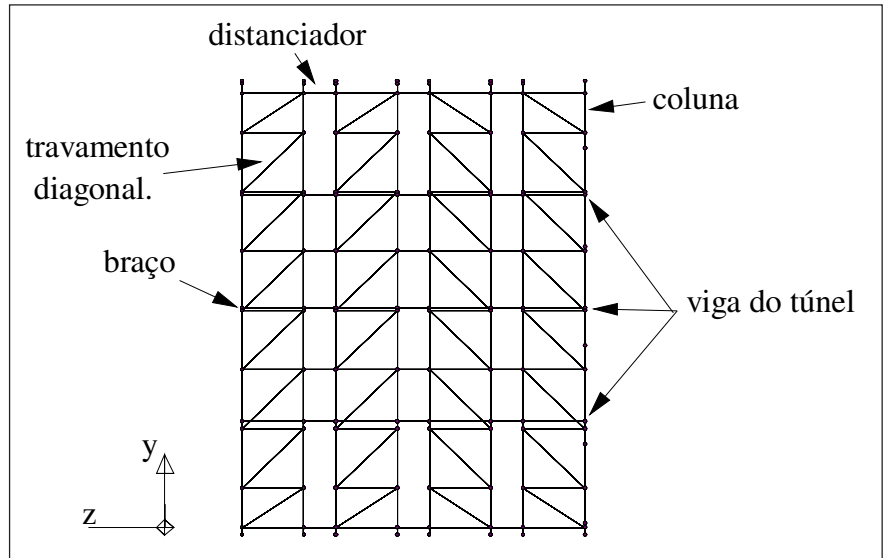


Figura 3 - Vista lateral do modelo gerado do sistema *Drive-in* com a indicação de seus componentes.

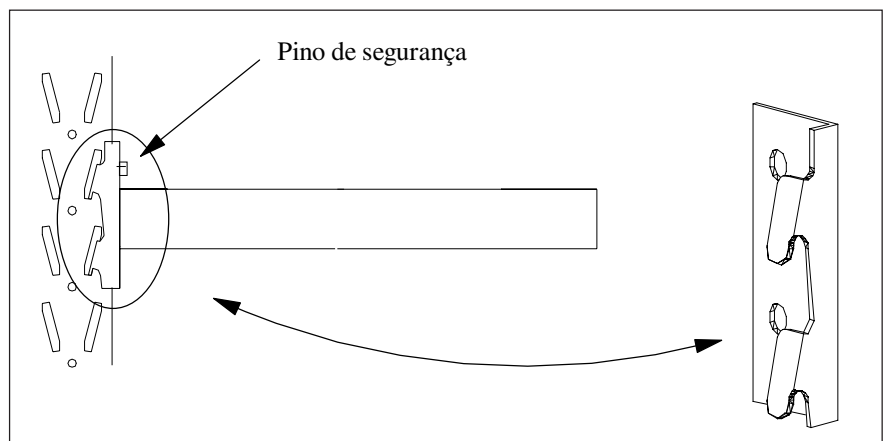


Figura 4 - Ligação de encaixe da viga com a coluna.

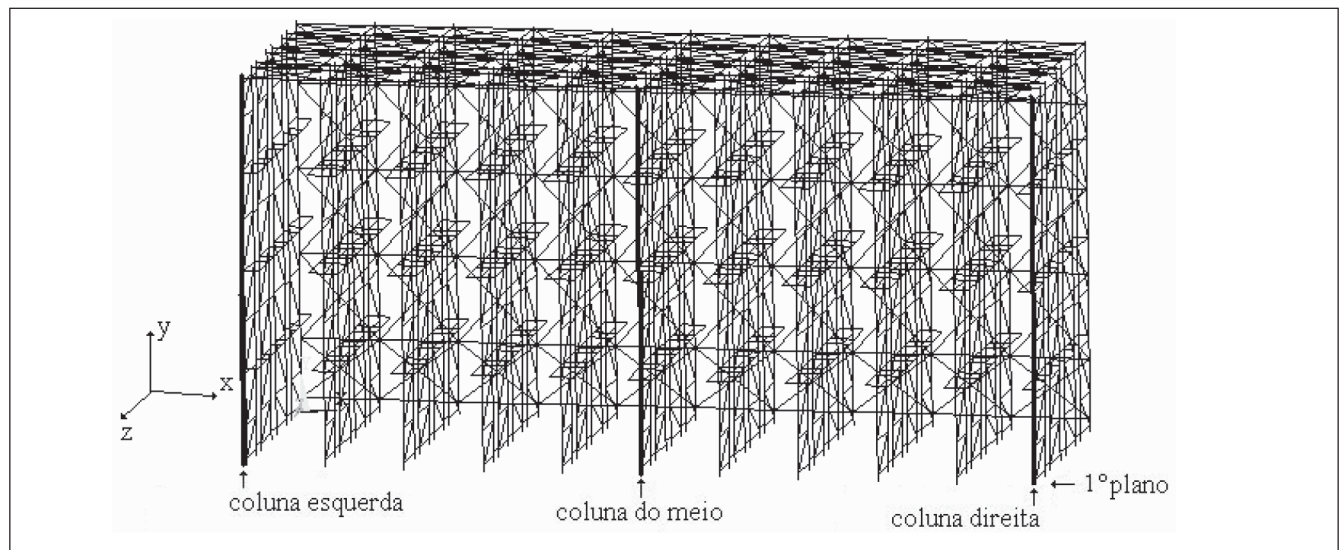


Figura 5 - Sistema *Drive-in* com a indicação das colunas.

de algumas colunas. A estrutura bidimensional é composta pelo primeiro plano da estrutura tridimensional e carregada de forma semelhante ao carregamento desta.

Foram modelados dois tipos de estrutura, uma com um ângulo de inclinação em relação a vertical de 0,004 rad no plano XY chamada imperfeita e outra com todos os elementos na vertical, chamada perfeita. Foram utilizados os dados experimentais obtidos através de ensaios e de medição das dimensões da seção transversal da coluna e valores nominais de projeto. A Tabela 1 apresenta estes valores. Os dados geométricos dos demais elementos constituintes do *Drive-in* são de projeto.

3. Resultados

Para mostrar a influência da análise não linear nos resultados de uma estrutura do tipo *Drive-in*, foram realizados estudos não lineares e lineares para a estrutura perfeita tridimensional (Campos, 2003). A Figura 6 apresenta as comparações de tensão axial e deslocamento da coluna direita da estrutura. Nos gráficos comparativos de tensão axial, a numeração dos elementos aumenta juntamente com a altura.

A diferença entre uma análise não linear bidimensional e tridimensional nos resultados do sistema *Drive-in* foi estudada através da comparação das tensões axiais nas colunas de uma estrutura perfeita. A Figura 7 apresenta os resultados encontrados para a coluna direita das estruturas bidimensional e tridimensional.

Para quantificar a importância da obtenção dos dados experimentais, foi realizada uma análise não linear de uma estrutura perfeita tridimensional com e sem dados experimentais. As Figuras 8(a) e 8(b) comparam, respectivamente, o nível de tensão axial e momento fletor em torno do eixo global z para uma mesma coluna nos dois tipos de estruturas.

A eficiência da aplicação de forças horizontais F_x como forma de representar a estrutura imperfeita no plano XY é

Tabela 1 - Dados experimentais e nominais de projeto utilizados.

Propriedades	Valores experimentais	Valores nominais de projeto
Área da seção transversal da coluna (cm^2)	4,33 ⁽¹⁾	4,79 ⁽²⁾
I_y ⁽³⁾ (cm^4)	19,98	20,04
I_z ⁽³⁾ (cm^4)	43,07	36,61
Rigidez da ligação braço-coluna (kNm/rad)	73,86	engaste
Rigidez da ligação longarina-coluna (kNm/rad)	75,19	rótula
Rigidez da ligação coluna-placa de base (kNm/rad)	10,44	engaste

⁽¹⁾ Área efetiva calculada considerando o fator redutor de forma Q.

⁽²⁾ Área líquida descontando o valor dos furos.

⁽³⁾ Momento de inércia relativo ao eixo local do elemento da coluna.

apresentada através da comparação dos resultados de tensão axial e momento fletor na coluna direita da estrutura imperfeita no plano XY com a estrutura perfeita com força horizontal F_x (Figura 9).

4. Discussão

Pela análise dos resultados, nota-se que a análise não linear fornece resultados superiores tanto de tensão axial (Figura 6(a)) como de deslocamentos na direção do eixo global x (Figura 6(b)). Observou-se, nas análises, que a estrutura em estudo tem um comportamento fortemente não linear em função da geometria dos elementos utilizados na estabilização do sistema. Assim a análise não-linear para o sistema *Drive-in*, apesar de ser complexa, é mais adequada em função da não linearidade do comportamento dessa estrutura.

A importância da consideração da estrutura tridimensional é justificada na Figura 7. Nesta é apresentada a diferença considerável para mais no nível de tensão axial da estrutura considerada tridimensional. Explica-se esse fato devido à interação do conjunto da estrutura na redistribuição dos esforços, o que é mais próximo à realidade.

Com relação à comparação entre os resultados experimentais e nominais, observa-se que: a área efetiva é muito próxima do valor da área líquida mínima (Tabela 1), o que gera pequena diferença entre os resultados; as rigidezes experimentais pouco influenciam no comportamento global da estrutura, quando são analisadas as tensões axiais, e que as diferenças são maiores nas comparações da distribuição dos momentos fletores devido à consideração das rigidezes das ligações. Assim a vantagem de modelar o sistema *Drive-in* com dados experimentais é interessante pela sua influência no momento fletor (Figura 8(b)), que é um dos esforços preponderantes no dimensionamento.

A eficiência da aplicação de forças horizontais F_x para representar a falta de prumo no plano XY pode ser comprovada pela Figura 9, onde tanto os níveis de tensão axial como de momento fletor para a estrutura perfeita com força F_x são maiores do que para a estrutura imperfeita, sendo, assim, a favor da segurança.

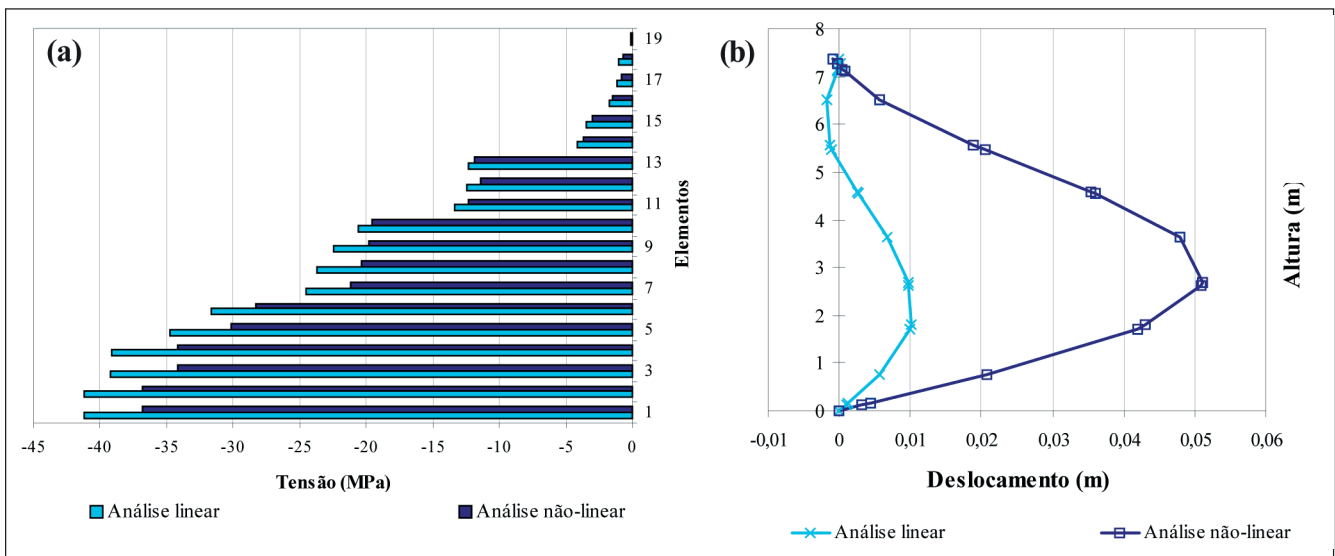


Figura 6 - Comparação entre a análise linear e não linear para a coluna direita da estrutura tridimensional; (a) comparação dos valores de tensão axial; (b) comparação dos valores de deslocamento na direção global x.

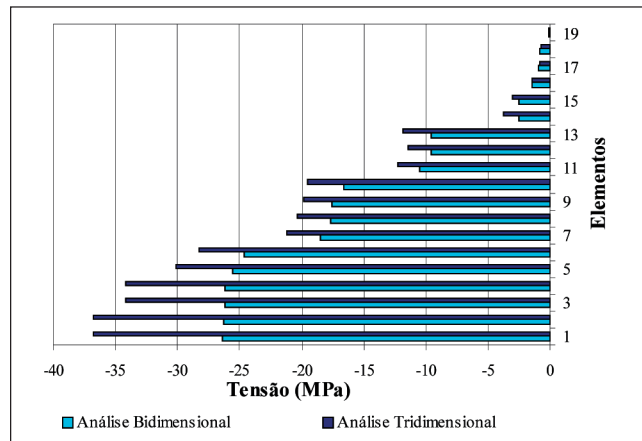


Figura 7 - Gráfico comparativo de tensão axial na coluna direita da estrutura bidimensional e da estrutura tridimensional.

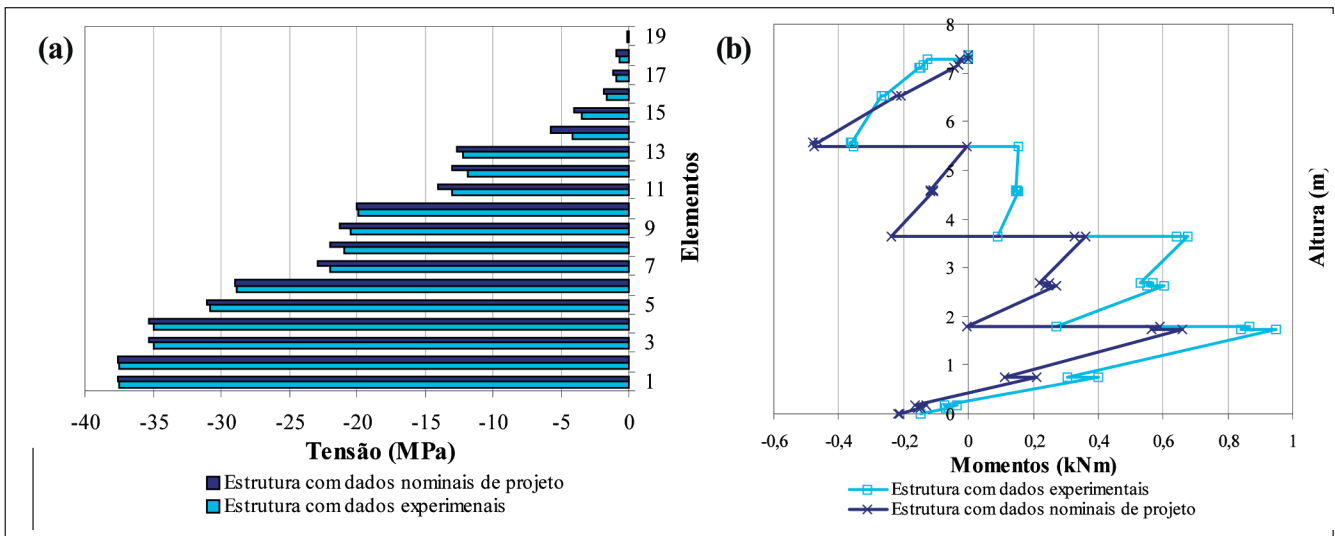


Figura 8 - Comparação entre a estrutura com dados experimentais e com dados nominais de projeto para a coluna direita; (a) comparação dos valores de tensão axial; (b) comparação dos valores de momento fletor em torno do eixo global z.

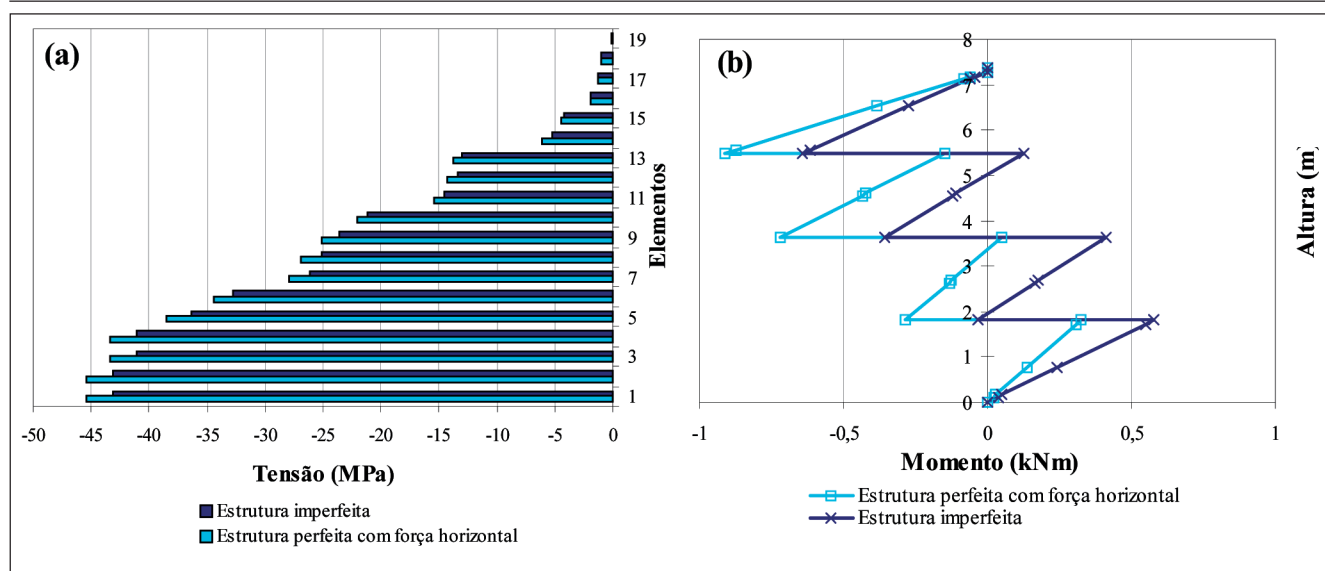


Figura 9 - Comparação dos resultados na coluna direita da estrutura imperfeita e da estrutura perfeita com F_x ; a) valores de tensão axial; b) esforços de flexão em torno do eixo global z.

5. Conclusões

A partir dos resultados apresentados, sugere-se que o estudo da estrutura do tipo *Drive-in* deve ser realizado através de uma análise tridimensional, não linear, considerando os resultados experimentais e a aplicação de forças horizontais F_x como forma de representar a falta de prumo da estrutura no plano XY.

6. Agradecimentos

Ao CNPq e à empresa Águia Sistemas de Armazenagem Ltda.

7. Referências bibliográficas

ÁGUIA. Projeto de sistemas de armazenagem industrial Tipo Drive-in (1999).
ANSYS. *User's manual for revision 6*. Swanson Analysis Systems Inc., Houston, PA, 2001.

BALDASSINO, N., BERNUZZI, C. Analysis and behavior of steel storage pallet racks. *Thin-Walled Structures*, v. 37, p. 277-304, 2000.
BERNUZZI, C., CASTIGLIONI, C.A. Experimental analysis on the cyclic behavior of beam-to-column joints in steel storage pallet racks. *Thin-Walled Structures*, v. 39, p. 841-859, 2001.
CAMPOS, S. R. *Estudo teórico-experimental de sistemas de armazenagem industrial tipo Drive-in*. Ouro Preto-MG: UFOP, 2003. (Dissertação de Mestrado).
FREITAS, A. M. S., FREITAS, M. S. R., SOUZA, F. T. Análise de sistemas de armazenamento industrial do tipo *Drive-in*. *XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural*. Brasília: Universidade de Brasília - UnB, 2002.
FREITAS, A. M. S., FREITAS, M. S. R., OLIVEIRA, A. M., CABRAL, J. B., SOUZA, F. T. Análise teórica-experimental de colunas metálicas perfuradas de perfis formados a frio. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE O USO DE ESTRUTURAS

METÁLICAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 4 e CONGRESSO INTERNACIONAL DA CONSTRUÇÃO METÁLICA, 1 (I CICOM) - Novembro, 2001. São Paulo: 2001.
GODLEY, M.H.R. Storage Racking In: *Design of Cold Formed Steel Members*, Cap 11, p. 361-399. Amsterdam: Ed Rhodes. Elsevier Applied Science, 1991.
GODLEY, M.H.R., BEALE, R.G., FENG, X. Analysis and design of down-aisle pallet rack structures. *Computers e Structures*, v. 77, p. 391-401, 2000.
OLIVEIRA, A. M. *Análise teórico-experimental de sistemas de armazenagem industriais (racks)*. Ouro Preto: UFOP, 2000. (Dissertação de Mestrado).
RMI. *Specification for design, testing, and utilization of industrial steel storage racks*. Rack Manufacturers Institute, Charlotte, NC: 1997.

Artigo recebido em 31/03/2003 e aprovado em 29/11/2003.

Vale a pena publicar seu trabalho na
REM - Revista Escola de Minas