

# ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE “PRATELEIRAS MISCELÂNEAS”

*Ricardo Ferreira Severo*

Engº. Mecânico, Mestre em Engenharia.

Professor e pesquisador na Faculdade Horizontina (FAHOR).

Email: <ricardo@fahor.com.br>.

*Richard Thomas Lermen*

Físico, Doutor em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - Processos de Fabricação (Soldagem).

Professor e pesquisador na Faculdade Horizontina (FAHOR).

Email: <richard@fahor.com.br>.

## RESUMO

O principal objetivo do presente trabalho foi avaliar, experimentalmente e analiticamente, a capacidade de carga, por nível, de dois diferentes tipos de “prateleiras miscelâneas”. Esta avaliação consistiu na realização de ensaios mecânicos, isto é, testes experimentais de carregamento dos níveis das prateleiras e modelamento através de elementos finitos das mesmas. Os resultados mostraram que os testes experimentais estão de acordo com o modelo analítico quanto aos pontos de maiores tensões e rupturas.

**Palavras-chave:** Prateleiras Miscelâneas, Ensaios Mecânicos, Elementos Finitos.

## INTRODUÇÃO

Os sistemas de armazenagem industrial, também conhecidos como “racks” (prateleiras miscelâneas), surgiram na década de 30 (Godley, 1991) e os elementos que os compunham eram cantoneiras de aço constituídas por perfis formados a frio com furos ao longo de seu comprimento. Esta configuração permitia grande flexibilidade, e as cantoneiras perfuradas tornaram-se usuais. Porém, o processo de montagem através de parafusos era trabalhoso, e a baixa resistência à torção das cantoneiras exigia uma grande quantidade de contraventamentos (Souza, 2005).

No Brasil, diversos estudos teórico-experimentais têm sido feitos para a avaliação do comportamento dos perfis formados a frio, utilizados na montagem de para a avaliação da manifesta-

ção dos modos de flambagem e do acoplamento entre eles, sob diversas condições de carregamento (Sarmanho (1991), Rodrigues (1993), Vazquez (2002), Pérez (2003)). Também, atualmente, duas normas regulamentadores são utilizadas para determinar as diretrizes para uso de estruturas porta-paletes seletivos (ABNT NBR 15524-2) e a terminologia empregada (ABNT NBR 15524-1).

A necessidade de garantir a segurança no armazenamento de peças (“paletes”) foi o principal fator que levou a realização dos testes experimentais de carregamento das prateleiras miscelâneas. Pois, as prateleiras têm mais de 15 anos e não havia nenhuma garantia sobre a carga que cada uma poderia suportar.

## MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Os materiais e métodos são apresentados em três etapas, isto é, a primeira descreve o aparato experimental utilizado nos testes de carregamento das prateleiras, a segunda apresenta a metodologia empregada nos ensaios das prateleiras e, por fim, é descrito o modelo de carregamento das prateleiras por elementos finitos.

### APARATO EXPERIMENTAL.

A Figura 1 apresenta o aparato experimental utilizado nos experimentos de carregamento das prateleiras. O aparato é formado pelos seguintes componentes: dois pilares (pórtico) com 5 m de altura que são fixados, em uma viga, através de 16 “parabolts” (8 cada pilar) com capacidade de 10 toneladas cada um; 4 vigas “I” utilizadas para distribuição de força sobre os “palets”; 16 “palets” para distribuir a força sobre os níveis das prateleiras; 4 macacos hidráulicos com indicador de carga, com capacidades de 15 e 30 toneladas e acionados manualmente; e 4 suportes (chapas soldadas nos pilares) para os macacos hidráulicos.



Figura 1. Aparato experimental.

### ENSAIOS DE CARREGAMENTO DAS PRATELEIRAS.

Duas “prateleiras miscelâneas” foram testadas. A Figura 2 mostra um desenho esquemá-

tico das prateleiras testadas, as quais diferem nas dimensões das longarinas. As prateleiras “modelo II” (Figura 2(a)) e “modelo I” (Figura 2(b)) tem longarinas duplo C com dimensões de 75x57x3,35 mm e de 127x55x4,75 mm respectivamente. Cada prateleira possui 4 níveis com dois lados cada.

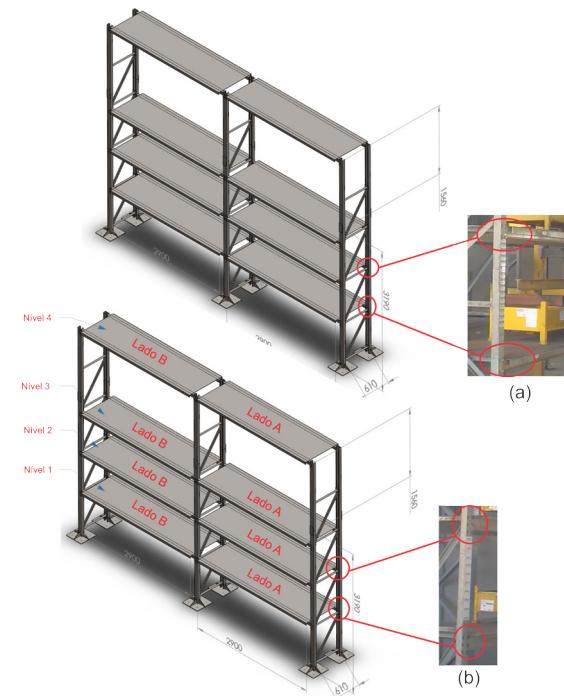


Figura 2. Prateleiras miscelâneas. (a) “modelo II” e (b) “modelo I”.

As longarinas da prateleira “modelo II” são fixadas aos pilares com dois parafusos em cada extremidade (Figura 3(a)). Já as longarinas da prateleira “modelo I” são fixadas com três parafusos nas extremidades dos pilares (Figura 3(b)).

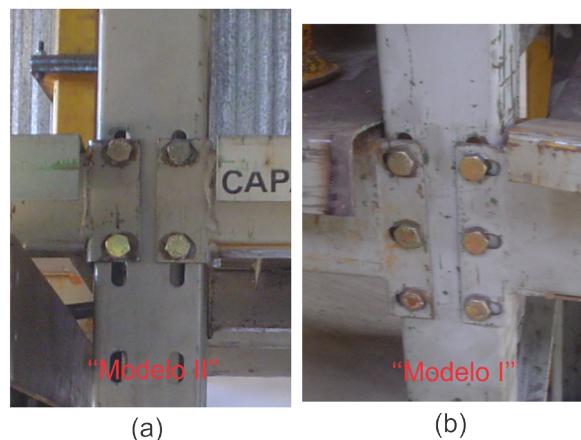


Figura 3. Fixação das longarinas nas extremidades dos pilares para a prateleira (a) “modelo II” e (b) “modelo I”.

Os testes foram realizados com quatro “palets”, em cada nível, posicionados no centro das

chapas de tal forma que os pés dos mesmos não coincidissem com as superfícies superiores das longarinas, conforme mostrado na Figura 4. Sobre estes “palets”, uma viga “I” foi posicionada (centralizada) para transmitir homogeneamente a força exercida pelo macaco hidráulico.



Figura 4. Posicionamento dos “palets” em relação às longarinas.

A primeira prateleira testada foi a do “modelo II”. Para esta prateleira, os níveis 1, 2, 3 e 4 foram carregados com 5.2, 5.0, 5.0 e 5.0 toneladas, respectivamente. Deflexões na longarina do primeiro nível e deformações nos pontos de fixação das longarinas com os pilares foram observadas.

Para a segunda prateleira, “modelo I”, os mesmos procedimentos foram utilizados, porém, os carregamentos nos níveis 1, 2, 3 e 4, foram de até 7.5, 7.5, 5.1 e 6.0 toneladas, respectivamente. Estes limites de carregamento foram limitados pela deformação dos “palets”, isto é, ao atingir os carregamentos citados acima, os “palets” começavam a deformar plasticamente e, consequentemente, a força não era transmitida para a prateleira. Também foram medidas as deflexões de uma longarina do nível 1 (lado B) em função dos carregamentos dos níveis (1, 2, 3 e 4) da prateleira. As deformações nos pontos de ligação (longarina/pilar, chapa/longarina, etc.) da prateleira foram observadas.

As medidas foram realizadas através da técnica por imagens, na qual foram utilizadas duas máquinas fotográficas, uma posicionada no centro da longarina (nível 1/lado B) com um padrão de distância e a outra posicionada junto ao manômetro do macaco hidráulico (Figura 5). As imagens foram geradas simultaneamente (vídeo e fotografia), podendo assim relacionar a deflexão na longarina com a força exercida. As imagens foram processadas e analisadas através dos softwares VirtualDub e ImageJ.



Figura 5. (a) Manômetro marcando carga zero e posição inicial da longarina. (b) Manômetro marcando carga de 5.2 toneladas e posição da longarina para esta carga.

Também, um teste simulando o pior caso de carregamento foi realizado para a prateleira “modelo I”. Este teste consistiu em carregar um “palet” centralizado em um nível (nível 1) e um lado (lado A) da prateleira. As posições dos pés do “palet” não coincidiram com a superfície superior da longarina, gerando maior esforço na chapa metálica. O aparato experimental pode ser observado através da Figura 6.



Figura 6. Aparato experimental simulando o pior carregamento possível da prateleira “modelo I”.

Por questão de segurança na operação do experimento, o carregamento máximo foi de 6 toneladas. A deflexão na chapa e na longarina também foram medidas.

## MODELAMENTO POR ELEMENTOS FINITOS.

O modelamento físico foi realizado através do software solidwork – simulation, onde foi utilizado o módulo estrutural e estudo estático. O suposto material utilizado na constituição das prateleiras foi o ASTM A-36. Os contatos entre

as superfícies das partes constituintes das prateleiras foram considerados fixos (“bonded”) entre si. Os pés dos pilares foram considerados fixos. Dois tipos de carregamentos foram utilizados, isto é, foi levada em consideração a força gravitacional com intensidade de campo de  $9,81 \text{ m/s}^2$  e o carregamento externo de acordo com os testes experimentais (Figura 7(a)). O carregamento foi considerado homogêneo sobre as superfícies das chapas metálicas. A malha (“mesh”) utilizada foi tetraédrica livre com: 957.789 graus de liberdade, 327.903 nós e 154.757 elementos para prateleira “modelo II” (Figura 7(b)); e 999.456 graus de liberdade, 341.792 nós e 161.861 elementos para a prateleira “modelo I”.

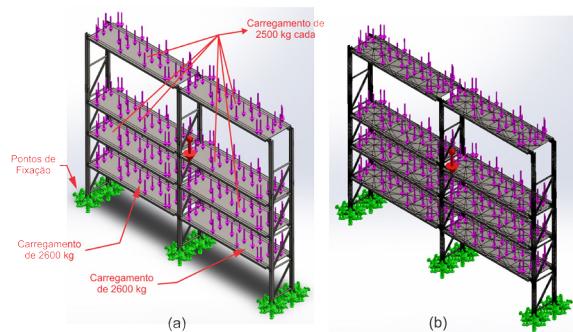


Figura 7. (a) Prateleira (“modelo II”) com indicação dos pontos fixos e pontos de aplicação dos carregamentos. (b) Malha (“mesh”) tetraédrica (“free tetrahedral”).

As tensões de Von Mises e deformações, para cada teste de prateleira, foram determinadas através do modelamento por elementos finitos.

## RESULTADOS

Dois tipos de resultados são apresentados, isto é, um referente aos testes experimentais com as prateleiras e outro referente ao modelamento por elementos finitos.

### TESTES EXPERIMENTAIS COM AS “PRATELEIRAS MISCELÂNEAS”.

A Figura 8 apresenta o gráfico da deflexão da longarina (nível 1/lado B) em função do carregamento total da prateleira “modelo II”. Neste gráfico observa-se que o carregamento no primeiro nível teve maior influência sobre a deflexão da longarina (nível 1/lado B). Também, com o carregamento dos outros níveis (2, 3 e 4) pouca variação na deflexão da longarina pode ser observada.

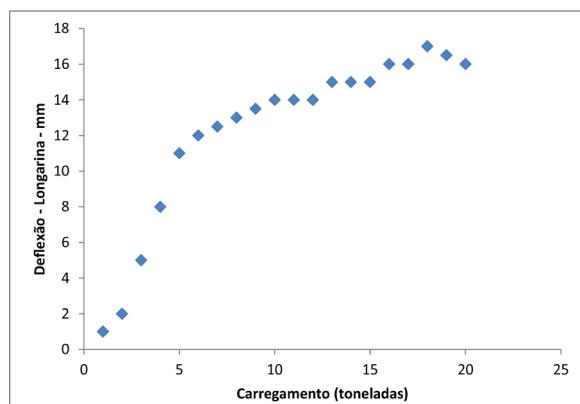


Figura 8. Deflexão da longarina (nível 1/lado B) em função do carregamento total da prateleira “modelo II”.

Para a prateleira “modelo II” foram observadas deformações da chapa em contato com os “palets” (Figura 9 (a e b)) e deformações dos pontos de fixação das longarinas com os pilares (Figura 9 (c-f)).



Figura 9. Pontos de deformação da prateleira “modelo II”.

Para os experimentos realizados com a prateleira “modelo I”, pouca deflexão foi observada na longarina (nível 1/lado B), isto comparado com os resultados obtidos nos experimentos realizados com a prateleira “modelo II”. A Figura 10 apresenta o gráfico da deflexão da longarina (nível 1/lado B) em função do carregamento total da prateleira “modelo I”.

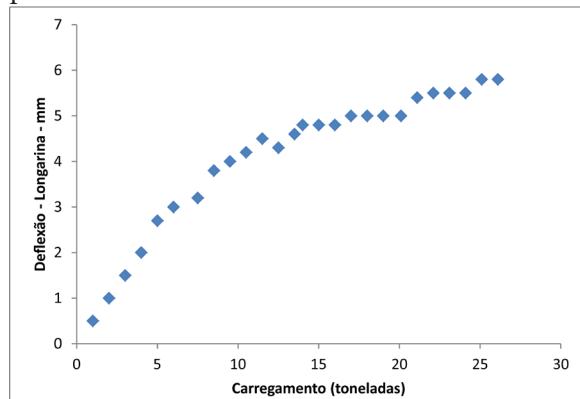


Figura 10. Deflexão da longarina (nível 1/lado B) em função do carregamento total da prateleira “modelo I”.

Também, não foram observadas deformações significativas nos pontos de fixação da longarina com o pilar (por exemplo: Figura 11 (a e b)). Por outro lado, observou-se uma grande deformação nas chapas metálica, chegando a deformar plasticamente (por exemplo: Figura 11(c e d)).



Figura 11. (a) e (b) Pontos de fixação entre a longarina e o pilar. (c) e (d) Deformações (elástica e plástica) nas chapas níveis 1 e 3, respectivamente.

O experimento realizado com na prateleira “modelo I” considerando o caso mais crítico de carregamento apresentou uma deflexão da chapa metálica de, aproximadamente, 40 mm e da longarina de, aproximadamente, 15 mm. Isto para um carregamento máximo de 6 toneladas no lado A do nível 1. Não foi possível aumentar o carregamento da estrutura devido à segurança dos operados. A Figura 12 mostra uma fotografia da deflexão da chapa metálica quando carregada com 6 toneladas.



Figura 12. Deflexão aparente da chapa metálica carregada com 6 toneladas.

A Figura 13(a) apresenta o nível 1 (lado A) da prateleira “modelo I” sem carregamento e a Figura 13(b) apresenta o mesmo carregado com 6 toneladas. Nesta fotografia pode ser observada grande deformação na chapa metálica.



Figura 13. (a) Nível 1 (lado A) da prateleira “modelo I” sem carregamento e (b) com carregamento de 6 toneladas.

Comparando as duas prateleiras, “modelo I” e “modelo II”, a prateleira “modelo I” mostrou-se mais resistente que a prateleira “modelo II”, o que era esperado. Os pilares, de ambas as prateleiras, não apresentaram deformações significativas quando relacionadas com as deformações sofridas pelas chapas metálicas, isto é, as chapas deformaram muito mais.

## MODELAMENTO POR ELEMENTOS FINITOS.

A Figura 14 mostra o resultado obtido para as tensões de Von Mises da prateleira “modelo II”. Observa-se uma tensão máxima de, aproximadamente, 800 MPa, na ligação entre a longarina (nível 4) e os pilares centrais, significando a ruptura neste ponto. Também, pode-se observar que as regiões de maiores tensões foram nas proximidades das ligações entre as longarinas e pilares, conforme observado nos testes experimentais.

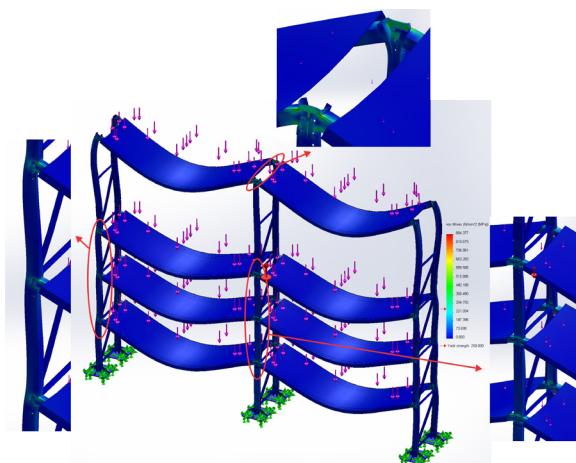


Figura 14. Tensões de Von Mises para o modelamento da prateleira “modelo II”.

A Figura 15 mostra a deformação sofrida pela prateleira “modelo II” com distribuição uniforme de carga entre os níveis. Uma deformação máxima de, aproximadamente, 8 mm pode ser observada na longarina e na chapa metálica do último nível. Comparando com os resultados experimentais, a deflexão na longa-

rina foi quase duas vezes maior que no modelo teórico, isto é, 15 mm no teste experimental e 8 mm no modelo teórico.

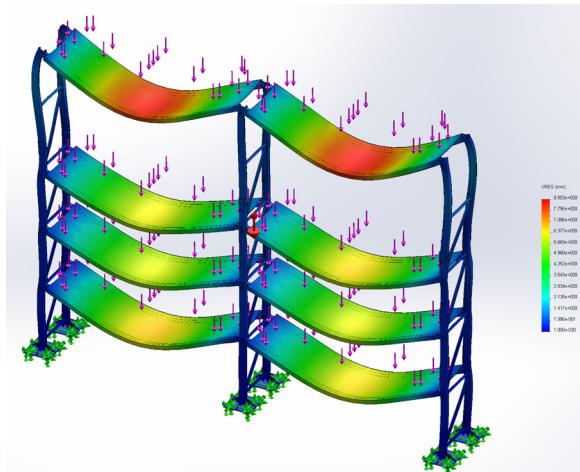


Figura 15. Deformação para o modelamento da prateleira “modelo II”.

A Figura 16 mostra o resultado obtido para as tensões de Von Mises da prateleira “modelo I”. Observa-se uma tensão máxima de, aproximadamente, 400 MPa, na ligação entre a longarina (nível 4) e os pilares centrais, significando a ruptura neste ponto. Também, pode-se observar que as regiões de maiores tensões foram nas proximidades das ligações entre as longarinas e pilares. Também, uma maior concentração de tensão nos pilares centrais pode ser observada, isto devido ao maior carregamento sofrido por esta prateleira (aproximadamente, 26 toneladas).

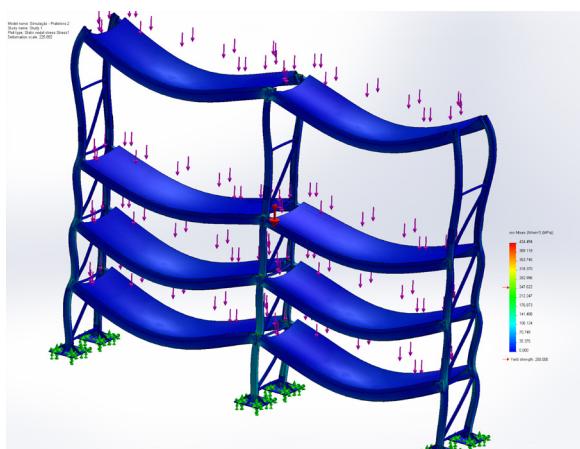


Figura 16. Tensões de Von Mises para o modelamento da prateleira “modelo I”.

A Figura 17 apresenta uma ampliação das regiões (críticas) de maiores tensões Von Mises mostradas na Figura 16.

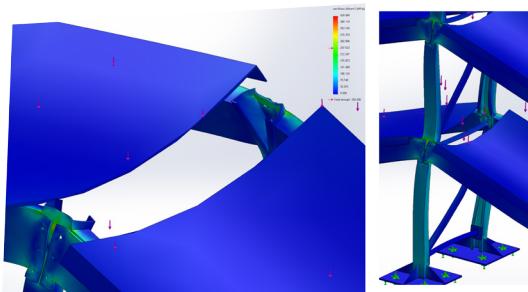


Figura 17. Regiões (críticas) de maiores tensões Von Mises para prateleira “modelo I”.

A Figura 18 mostra a deformação da prateleira “modelo I”, na qual o valor máximo de deformação, na chapa metálica do último nível, foi de, aproximadamente, 3 mm.

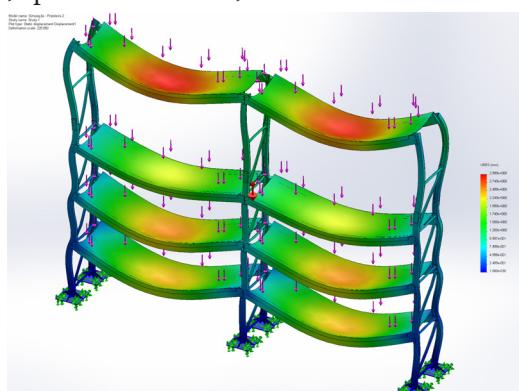


Figura 18. Deformação para o modelamento da prateleira “modelo I”.

As Figuras 19 e 20 apresentam os resultados, respectivamente, de tensão de Von Mises e deformação, obtidos na simulação do experimento com carregamento crítico, isto é, o pior carregamento possível. Neste caso, observa-se regiões de grandes tensões (aproximadamente, 450 MPa) próximas às ligações entre os pilares e longarinas. Também, uma deformação de, aproximadamente, 5 mm foi observada na longarina e chapa metálica, sendo que no teste experimental observou-se uma deformação na chapa metálica de, aproximadamente, 40 mm.

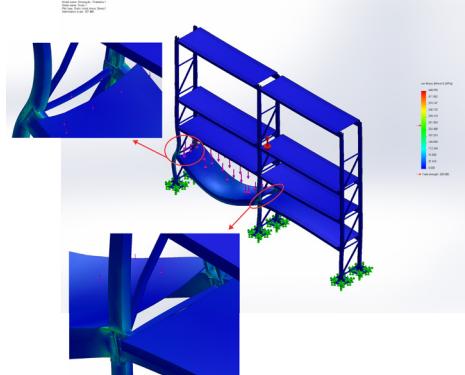


Figura 19. Tensões de Von Mises para prateleira “modelo I” em situação de pior carregamento de um lado do nível 1.

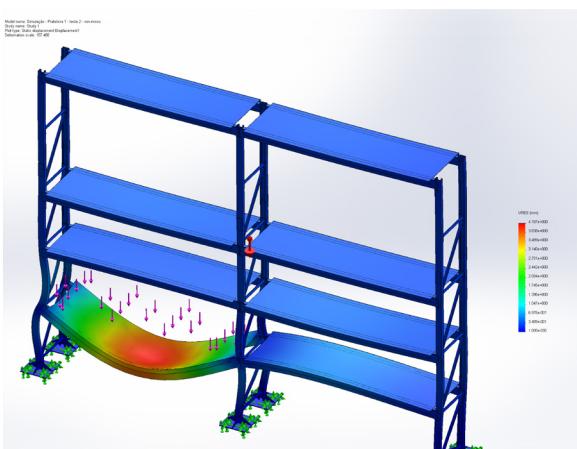


Figura 20. Deformação para prateleira “modelo I” em situação de pior carregamento de um lado do nível 1.

## CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos nos experimentos e as análises realizadas, as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

- ◆ Dois tipos de “prateleiras miscelâneas” foram testadas quanto às suas capacidades de carga. A prateleira “modelo II”, a qual possui longarinas duplo C com dimensões 75x57x3,35 mm, apresentou, para um carregamento total de, aproximadamente 20 toneladas, deformações significativas nas ligações entre as longarinas e os pilares, deflexão na longarina (nível 1/lado B) de, aproximadamente, 15 mm, e deformações nas chapas metálicas. A prateleira “modelo I”, a qual possui longarinas duplo C com dimensões 127x55x4,75 mm, mostrou-se muito mais resistente que a prateleira “modelo II”, pois, para um carregamento total de, aproximadamente, 26 toneladas, praticamente nenhuma deformação nas uniões entre as longarinas e pilares foi observada, a longarina (nível 1/lado B) apresentou, aproximadamente, 6 mm de deflexão, e as chapas metálicas apresentaram grande deformação elástica e, em alguns casos deformação plástica.
- ◆ O teste simulando o pior caso de carregamento para prateleira “modelo I” (carregamento de apenas um lado do primeiro nível), apresentou resistência para uma carga de 6 toneladas. Neste experimento, uma variação de 40 mm na deflexão da chapa metálica e uma variação de 15 mm na deflexão da longarina foram observadas.

- ◆ O modelamento por elementos finitos, para as duas prateleiras e seus respectivos carregamentos, apresentou pontos de ruptura nas proximidades das ligações entre as longarinas e pilares, nos quais, para os resultados experimentais, não chegaram a romper, porém, sofreram uma significativa deformação. Segundo o modelo, para todas as simulações propostas, as regiões de maior deformação foram no centro das chapas metálicas. Também, observou-se que a prateleira “modelo I” apresentou maiores tensões nos pilares centrais, devido sua maior capacidade de carregamento.
- ◆ Através do modelo teórico (elementos finitos) pode-se afirmar que os pontos críticos de possível ruptura, nas duas prateleiras, estão situados nas proximidades das ligações entre os pilares e as longarinas (conexões dos parafusos), resultado este que foi validado pelos ensaios experimentais.
- ◆ Em todos os testes experimentais nenhuma ruptura ocorreu, porém algumas deformações plásticas (deformação permanente associada à distorção e reformação de ligações atômicas) aconteceram, principalmente, nas chapas metálicas e extremidades de ligação das longarinas.

## REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2007). *NBR 15524-1: Sistemas de armazenamento – Parte 2: Diretrizes para o uso de estruturas tipo porta-paletes seletivos*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2007). *NBR 15524-2 – Sistemas de armazenamento – Parte 1: Terminologia*.
- Godley, M.H. R. *Storage racking in design of cold formed steel members*, 1991.
- Pérez, S. V. S. (2003). *Análise da instabilidade distorcional em perfis de paredes finas e seção aberta, sob carga de compressão excêntrica* (Doctoral dissertation). UFRJ, Rio de Janeiro.
- Rodrigues, F. C. (1993). *Estudo teórico-experimental de perfis de chapa dobrada submetidos à compressão* (Doctoral dissertation). UFRJ, Rio de Janeiro.

Sarmanho, A. M. C. (1991). *Estudo do Comportamento pós-critico de paredes esbeltas de perfis metálicos* (Master's thesis). UFRJ, Rio de Janeiro.

Souza, F. T. (2005). *Análise teórico-experimental de sistemas aporticados com elementos perfurados em perfis formados a frio – racks*. (Master's thesis). Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, .Ouro Preto-MG.