

CONSTRUÇÕES RURAIS E AMBIÊNCIA

ANÁLISE ESTRUTURAL DE PAINÉIS METÁLICOS PARA SILOS PRISMÁTICOS

José Wallace Barbosa do Nascimento¹ e Carlito Calil Júnior²

RESUMO

Esta pesquisa foi desenvolvida com o objetivo de fornecer subsídios técnicos para projeto e dimensionamento de silos prismáticos metálicos para uso industrial, mais especificamente para fábricas de ração e, também, para contribuir com o desenvolvimento da futura norma brasileira específica para projeto de ações e fluxo em silos. Para esta finalidade foram estudados os painéis de construção de silos prismáticos para fábrica de ração, com conformação ziguezague na horizontal e inclinação de 20° com o plano vertical, para aumentar a inércia das paredes. Foram realizados ensaios para se determinar a rigidez e a resistência dos painéis conformados em ziguezague, em escala natural, que formaram as paredes dos silos prismáticos para a construção modular. Os resultados experimentais foram comparados com os obtidos com as teorias simplificadas propostas para o cálculo estrutural de silos e com o software estrutural LUSAS, que utiliza o método dos elementos finitos. A comparação dos resultados teóricos com os obtidos experimentalmente mostra que a teoria de Troitsky (1988) apresenta boa correlação com os valores experimentais sendo, portanto, adequada ao dimensionamento dos painéis.

Palavras-chave: silos, metálico, painel, ração

STRUCTURAL ANALYSIS OF METALLIC PANELS FOR PRISMATIC SILOS

ABSTRACT

This research was developed purposing to generate technical hints for the design of steel prismatic silos for industrial use, especially in the ration industry, as well as to contribute for development of future Brazilian standard specifically for the design of actions and flow in silos. For this purpose the panels of construction of prismatic silos were studied for ration factory conformed in zigzag, in natural scale, that formed the walls of the prismatic silos for the construction to modulate. The experimental results were compared with obtained those with the simplified theories proposed for the structural calculation of silos and with the structural software LUSAS, that uses the method of the finite elements. The comparison of the theoretical results with those obtained in the tests shows that the theory of Troitsky (1988) presents good correlation with the tested data, therefore being adequate for the design of the panels

Key words: silos, metallic, panels, ration

¹ Prof. Dr. do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal da Paraíba Av. Aprígio Veloso 882 CP. 10087 – Campina Grande, PB, E-mail: wallace@deag.ufpb.br.

² Prof. Dr. do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Av. Dr. Carlos Botelho 1465 – São Carlos, SP, E-mail: calil@sc.usp.br.

INTRODUÇÃO

Atualmente, o Brasil se destaca no contexto mundial com a produção de frangos e suínos, ocupando posição de principal exportador na América Latina. Esta produção depende, essencialmente, de ração industrializada; daí a importância do país possuir tecnologia de construção de silos para fábricas de ração. Atualmente, a maioria ou quase todas as fábricas brasileiras, são do tipo horizontal; enquanto isto, nos países desenvolvidos a predominância é de fábricas do tipo vertical, com capacidade de até 150 toneladas por hora, para atender ao mercado, sempre crescente.

Desde o princípio da produção de ração utilizaram-se silos para armazenamento de cereais e, posteriormente, silos para ração; hoje, com esta nova concepção de fábricas verticais, exigem-se estruturas multicelulares, tanto para armazenagem da matéria-prima como da ração, pois sob os silos se instalam equipamentos de dosagem e pesagem para controle dos ingredientes da composição final do produto.

As fábricas de ração necessitam, basicamente, de dois tipos de armazenagem em silos: um para produtos granulares e outro para produtos pulverulentos. Em geral, o primeiro não apresenta problemas com relação ao fluxo, enquanto o segundo exige fluxo controlado (Calil Júnior *et al.* 1997).

Ravenet (1977,1992) foi um dos poucos pesquisadores que dedicaram parte de seus trabalhos no estudo de silos prismáticos pois, como diretor técnico de uma indústria de silos, construiu centenas de silos prismáticos multicelulares para fábricas de ração e outras aplicações. No Brasil, o estudo dessas instalações surgiu com as pesquisas desenvolvidas por Calil (1982, 1990).

Este trabalho tem como objetivo principal o estudo teórico e experimental de painéis modulares de silos multicelulares prismáticos com conformação zigzague na horizontal e inclinação de 20 graus com o plano vertical para aumentar a inércia das paredes e promover o fluxo do produto (Nascimento, 1996). Os resultados visam fornecer subsídios técnicos para projetistas e usuários de silos prismáticos destinados ao armazenamento de ração e seus ingredientes e, também, contribuir com uma proposta para a futura norma brasileira de ações e fluxo em silos.

MATERIAL E MÉTODOS

Análise teórica

A análise teórica foi realizada utilizando-se as teorias simplificadas propostas por Ravenet (teoria de vigas bi-engastadas) e Troitsky (teoria de viga bi-apoiada, considerando-se o efeito de membrana). Para o cálculo da tensão atuante foi considerada a inércia com relação ao eixo YY.

Foi feita, ainda, uma análise baseada no método dos elementos finitos, utilizando-se o software LUSAS (1992) adquirido pelo Departamento de Engenharia de Estrutura da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo. O elemento utilizado foi o QSL8 para que os elementos da malha possuíssem oito nós. Para a análise dos deslocamentos e das tensões utilizou-se o método de Gauss com cinco pontos (sendo um no centro e os outros distribuídos nos quatro cantos

dos elementos). Este ponto central coincide com os pontos onde foram instalados os extensômetros elétricos e transdutores diferenciais. A escolha do ponto central de Gauss foi para que o resultado sofresse pouca interferência da perturbação de bordas dos elementos. Para os dois painéis, a malha foi construída da seguinte forma: na largura, os elementos de borda apresentam 2,5cm e os demais 5,0cm, nas superfícies inclinadas os de borda 3,5cm e os outros 5,0cm, como mostra a Figura 1. Considerou-se o carregamento uniformemente distribuído nos elementos do painel; uma força de tração foi aplicada de um lado, enquanto o outro lado ficou engastado; analisou-se, também, o painel, considerando-se engastamento em ambas as bordas.

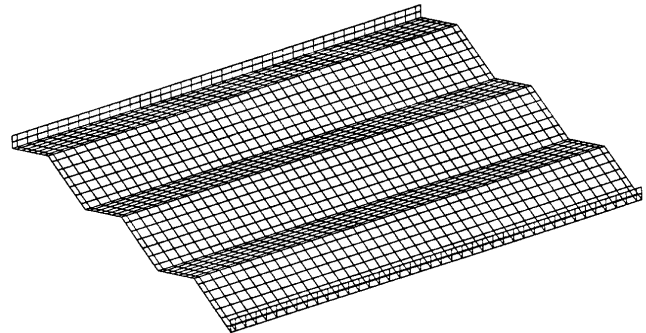


Figura 1. Malha construída para análise no software LUSAS.

Procedimento experimental

O presente trabalho experimental foi realizado no Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras (LaMEM) do Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo.

Os experimentos foram realizados em painéis com conformação zigzague horizontal, iguais aos painéis normalmente utilizados nas paredes de silos metálicos prismáticos para armazenamento de ração.

Os principais objetivos dos experimentos foram: a determinação da resistência e a rigidez dos painéis (que serão utilizados nas paredes dos silos prismáticos) simulando as condições de trabalho de um silo; para esta finalidade, foram construídos dois painéis em escala real, para representarem as paredes de silos quadrados de lados iguais a 1,0m e 2,0m.

Os ensaios foram divididos em duas fases: na primeira, realizou-se o carregamento de tração, que representa a reação da parede adjacente devido à pressão horizontal exercida pelo produto; na segunda, com os painéis tracionados, o carregamento foi feito colocando-se areia sobre os painéis até sua perda de estabilidade, a qual ocorreu por flambagem local na parte comprimida.

Descrição dos ensaios

Para a realização dos ensaios em laboratório foram instalados medidores de força (anel dinamométrico), de deformações (extensômetro elétrico de resistência) e de deslocamentos (transdutores diferenciais) nos painéis acoplados a um sistema de aquisição de dados Hewlett Packard, modelo 3497A.

Painéis

Para a realização dos ensaios construíram-se dois painéis na oficina mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, um com largura de 1,0m e outro com 2,0m, ambos possuindo 1,82m de comprimento. Esses painéis foram conformados em ziguezague horizontal, com inclinação de 20° com o plano vertical e altura de onda de 11cm. Utilizou-se a chapa de aço SAE 1010, de espessura nominal de 0,91mm, cujas extremidades foram soldadas às colunas pelo processo de soldagem mig. As colunas tinham seção caixão de 13cm e comprimento de 1,82m, construídas com aço SAE 1010, com espessura nominal de 1,9mm. A Figura 2 mostra as dimensões.

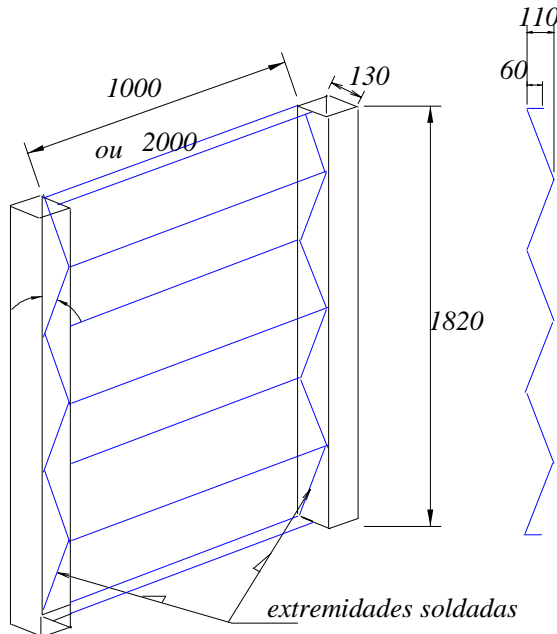


Figura 2. Painel construído para a realização dos ensaios de resistência e rigidez.

Para melhor interpretação das análises passar-se-á, no item posterior, a chamar de Painel 1 àquele que possui largura de 1,0m e Painel 2 ao outro, com largura de 2,0m.

Anel dinamométrico

Para a medição da força de tração aplicada aos painéis através de esticadores, foram utilizados quatro anéis dinamométricos com capacidade de 210N. A Figura 3 mostra os pontos de aplicação das forças de tração na coluna e o

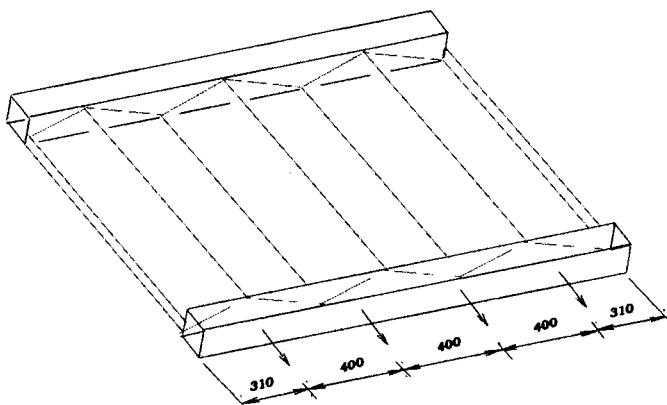


Figura 3. Pontos de aplicação da força de tração.

espaçamento entre si. A força de tração aplicada no Painel 1 foi de 112,5N e no Painel 2 de 187,5N, equivalentes às forças de tração das paredes adjacentes de silos quadrados de lado igual às larguras dos painéis.

Extensômetros elétricos de resistência

Os extensômetros elétricos instalados nos painéis foram do tipo KFC-5-C1-11, com comprimento de 5mm, resistência de $120W \pm 0,3$ e fator gage $2,1 \pm 1\%$, fabricados pela KYOWA Ltda. A Figura 4 mostra os pontos onde foram instalados os extensômetros.

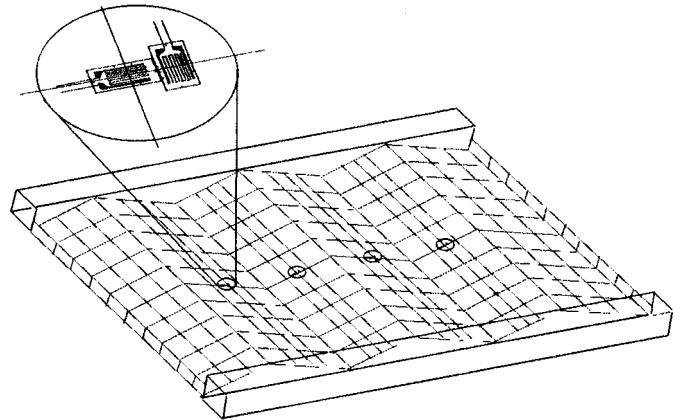


Figura 4. Pontos onde foram instalados os extensômetros elétricos.

Foram instalados dois extensômetros para cada ponto de medição no painel, como mostrado na Figura 4, tanto na superfície superior como na inferior, para determinar as deformações no estado duplo de tensão. Como se pode ver nesta figura, os pontos estão localizados nos nós do eixo central da malha. No painel 2 também foram instalados extensômetros na superfície inferior, a 1,75cm dos pontos, conformados no sentido longitudinal das ondas.

Transdutores diferenciais

Os transdutores diferenciais (LVDT's) utilizados foram os fabricados pela Hewlett Packard, modelo 14 DCDT500, que possuem uma variação de deslocamento de 25mm e trabalham com voltagem de excitação de 24 volts.

Instalaram-se 13 transdutores diferenciais no eixo central, no sentido longitudinal, conforme Figura 5.

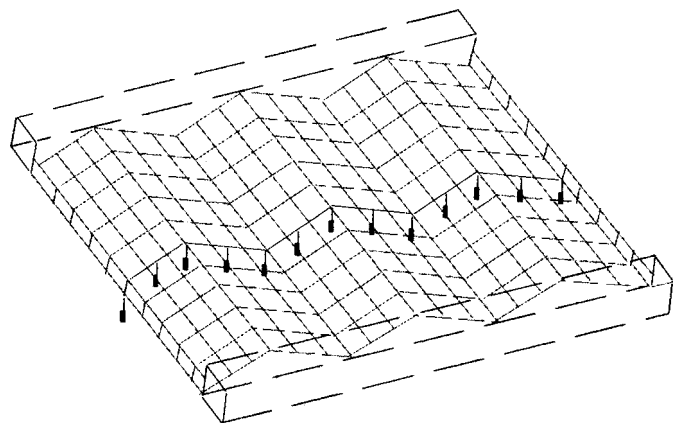


Figura 5. Pontos onde foram instalados os transdutores diferenciais (LVDTs).

Carregamento utilizado

Para o carregamento dos painéis foi utilizada areia a qual, dentro de um caixão de madeira, era contida sobre o painel. O carregamento foi realizado em camadas uniformes de areia, previamente pesadas; a leitura das deformações e dos deslocamentos foi realizada em intervalos de carga de aproximadamente 1,15kPa, para o Painel 1; após esta carga, colocou-se uma placa de madeira de 25mm de espessura e se aplicaram os próximos incrementos de carga através de cilindro hidráulico.

No Painel 2 o carregamento seguiu o mesmo procedimento do painel anterior, modificando-se os intervalos de carga, de aproximadamente 1,38 kPa até 7kPa.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Quanto às análises dos resultados experimentais e teóricos, foram realizadas apenas as medições na onda central dos painéis, porque as outras duas ondas sofrem perturbações, devido às condições de borda, além do que, nos silos reais construídos com esses painéis, a parede será formada por vários painéis sobrepostos; portanto, o comportamento da onda central do painel ensaiado representa mais fielmente aquilo que ocorrerá, na realidade, com os silos.

Os métodos simplificados para o dimensionamento das paredes dos silos prismáticos mais utilizados são: a teoria de viga bi-engastada utilizada por Ravenet (1977, 1990) e o método proposto por Troitsky (1982) que é a viga bi-articulada, considerando-se o efeito de membrana. Como citado em itens anteriores, existem poucas informações técnicas sobre o dimensionamento de silos prismáticos, embora sejam bastante utilizados no setor industrial. Para uma análise mais rigorosa, utilizou-se o método dos elementos finitos por meio do software LUSAS (1992).

Também para análise experimental, a onda central do painel foi instrumentada em cinco pontos, como mostrado na Figura 6.

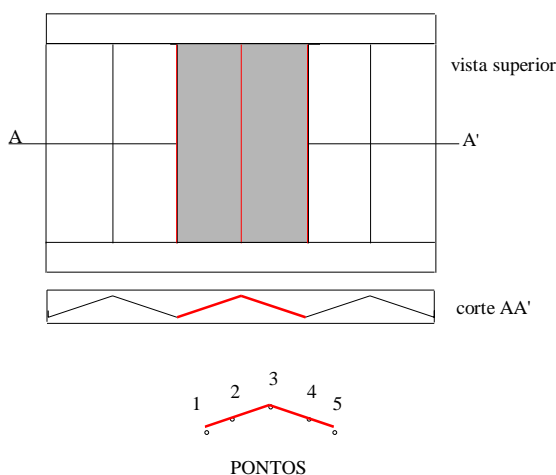


Figura 6. Detalhe da onda central e os pontos de análises.

Análise de deslocamentos

A Figura 7 mostra os deslocamentos do Painel 1, determinados pelo LUSAS, para as condições engastadas e articuladas e, pela teoria de viga bi-articulada e bi-engastada, para a pressão de 6,86kPa. Os deslocamentos determinados pelo

LUSAS correspondem aos pontos da onda em que foram instalados transdutores diferenciais. Os deslocamentos obtidos pelos métodos simplificados são determinados para a linha neutra e comparados com os pontos 1, 3 e 5, que representam os deslocamentos de viga. Como se vê na Figura 7, os deslocamentos neste painel com os dois tipos de restrição impostos ao modelo não apresentaram diferenças significativas, razão por que se pode concluir que o modelo numérico utilizado para a análise não reproduziu as condições em que foi realizado o ensaio. Os deslocamentos nos 5 pontos da onda do Painel 2, foram para a pressão de 5,55kPa e também bastante diferentes para os dois tipos de restrição impostos no LUSAS. Como se

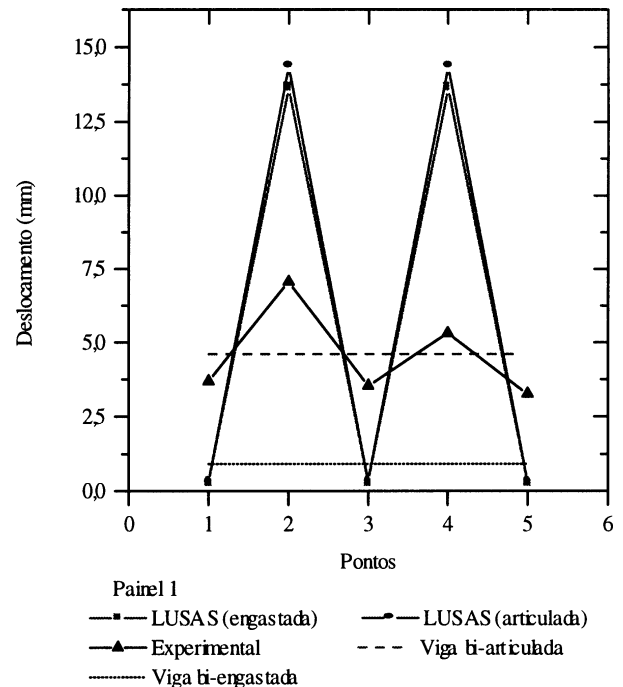


Figura 7. Deslocamentos nos 5 pontos da onda central do Painel 1.

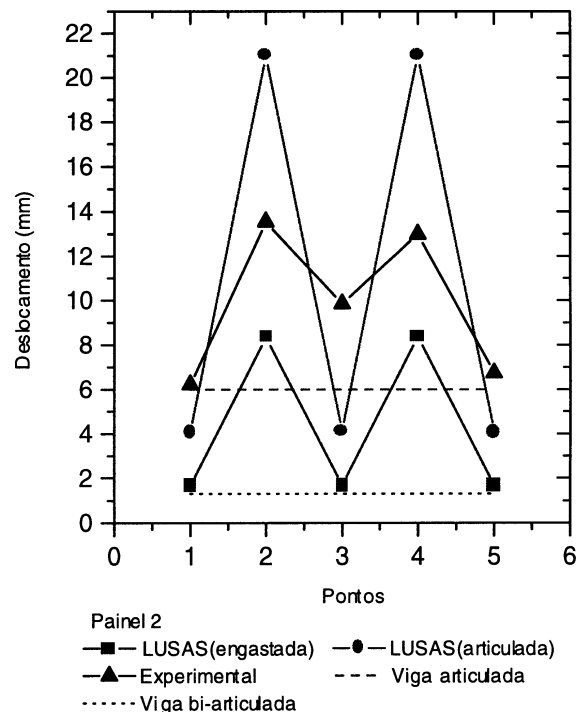


Figura 8. Deslocamentos nos 5 pontos da onda central do Painel 2.

observa na Figura 8, os deslocamentos experimentais nos pontos 1, 3, e 5 ficaram um pouco acima dos deslocamentos fornecidos pelo LUSAS para a condição de engaste/articulado, enquanto para os pontos 2 e 4 os deslocamentos experimentais ficaram entre as duas restrições dadas. As teorias de vigas bi-engastada e bi-articulada ficaram também numa faixa intermediária.

Análise de tensões

Painel 1

Este painel foi escolhido para se realizar os ensaios preliminares; por isto é que só foram instalados extensômetros no meio de cada superfície inclinada das ondas, mais especificamente para a onda central nos pontos 2 e 4, por serem simétricos em relação ao ponto 3, que é o ponto central do painel. As tensões foram analisadas no sentido longitudinal das ondas, ou seja, no sentido do vão entre as colunas, pois é neste sentido que se calculam as tensões pelos métodos simplificados; desta forma, pode-se confrontar os resultados teóricos com os experimentais. Nas Figuras 9 e 10 são apresentadas as curvas das tensões obtidas pelos métodos simplificados e dos elementos finitos e as tensões experimentais determinadas nos pontos 2 e

4. Observa-se que as curvas dadas pelo LUSAS nos dois pontos afastam-se bastante das curvas das tensões experimentais, depois da metade do carregamento, e possuem comportamento totalmente distinto; isto confirma que o modelo numérico proposto não conseguiu representar fielmente as condições de ensaio, a exemplo do que ocorreu com os deslocamentos.

Nos dois pontos as tensões obtidas pela teoria de viga bi-engastada ficaram abaixo das experimentais, isto é, este método subestima as tensões no painel; já o método proposto por Troitsky (1982) foi o que melhor se comportou com relação às tensões experimentais, principalmente na superfície inferior, cujas fibras externas da chapa estão tracionadas. Para a análise visual nos gráficos foram colocadas também as tensões da superfície superior, em módulo, porque são de compressão.

Painel 2

Após a realização do ensaio preliminar fez-se opção pela análise das tensões, não somente nos pontos 2 e 4, mas em todos (1 a 5) assim como no painel 1, em que as tensões foram analisadas no sentido longitudinal das ondas. As Figuras 11 e 12 mostram as curvas das tensões nos pontos 2 e 4, curvas experimentais, calculadas pelos métodos simplificados e as fornecida pelo LUSAS. Para este painel observa-se que as teorias de viga bi-articulada e a proposta por Troitsky (1982) são muito conservadoras em relação às experimentais, as fornecidas pelo LUSAS tiveram bom comportamento em relação às tensões experimentais das superfícies inferior e superior; com isto, conclui-se que o modelo numérico para o painel conseguiu

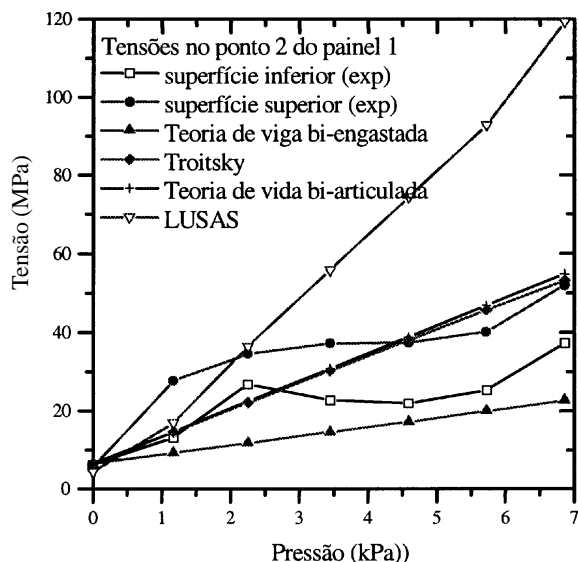


Figura 9. Tensões determinadas no ponto 2 do Painel 1.

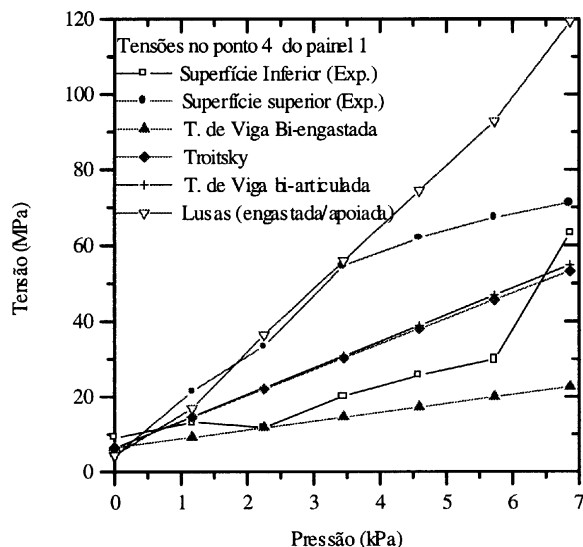


Figura 10. Tensões determinadas no ponto 4 do Painel 1.

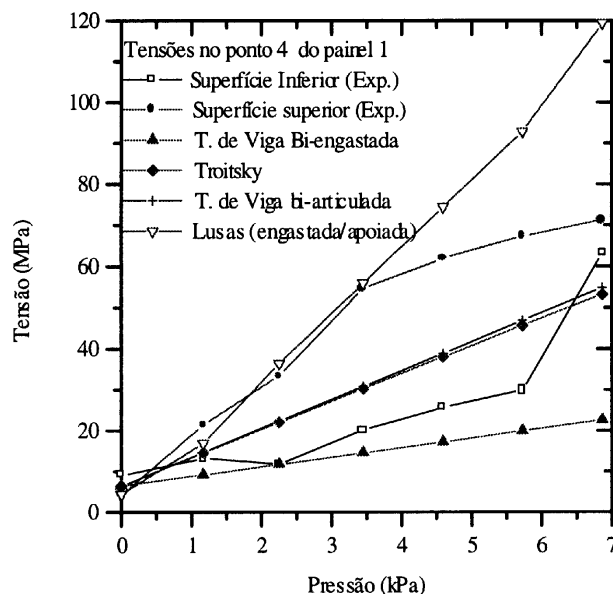


Figura 11. Curvas de tensões determinadas para o ponto 2 do Painel 2.

representar, de maneira satisfatória as condições em que foram realizados os ensaios. A teoria de viga bi-engastada foi a que obteve melhor comportamento com relação às tensões experimentais na superfície inferior; verifica-se pequeno aumento da diferença entre elas com o aumento da pressão normal.

Como a geometria do painel não é plana, devido à sua conformação, associada ao critério de dimensionamento (realizado por meio de teorias simplificadas) deve-se trabalhar com hipótese de cálculos que se aproximem das tensões fornecidas pelo LUSAS pois, como observado anteriormente,

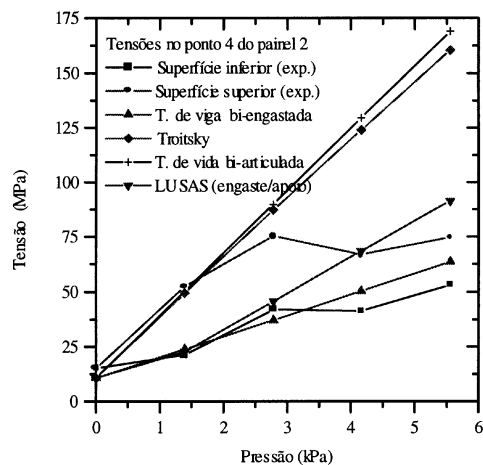


Figura 12. Curvas de tensões determinadas para o ponto 4 do Painel 2.

possui bom comportamento em relação às tensões de tração e compressão nas superfícies do painel.

Analisaram-se também, neste painel, as tensões próximas aos pontos 1 e 3, mais precisamente a 1,75cm do eixo longitudinal, onde estava localizado cada ponto. As Figuras 13 e 14 mostram as curvas teóricas e experimentais das tensões nesses pontos; observa-se que o comportamento das tensões fornecidas pelo LUSAS, a teoria de viga bi-articulada e a proposta por Troitsky, superestimaram as tensões no painel comparadas com as experimentais, enquanto a teoria de viga bi-engastada apresentou excelente comportamento, em que a diferença entre as tensões não é considerada significativa para os pontos 1 e 3 e, para o ponto 5, ocorreu pequeno desvio na última carga, a qual pode ser associada a alguma imperfeição geométrica na construção do painel mas, de maneira geral, pode-se dizer que a teoria apresentou boa compatibilidade com os dados experimentais; este fato talvez seja porque não ocorre rotação nesses pontos, por haver um equilíbrio de momentos no sentido da inclinação, devido à conformação ziguezague imposta ao painel para adquirir maior inércia e melhorar o escoamento da razão durante a descarga.

A carga limite última do painel verificou-se por instabilidade local próximo ao ponto 3 e nos dois outros simétricos, com a pressão de 7kPa, devido à plastificação de conformação do painel nas regiões.

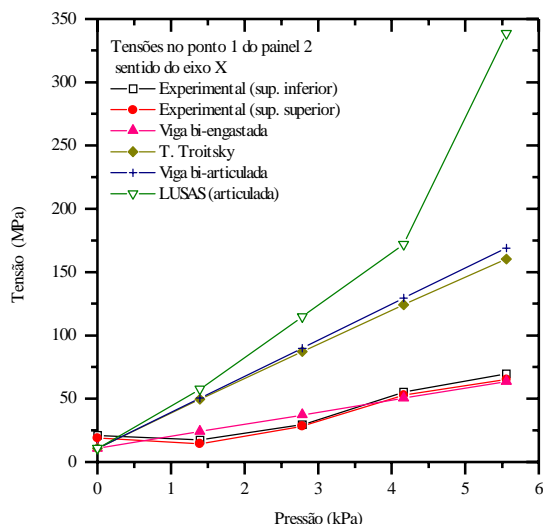


Figura 13. Tensões próximas ao ponto 1.

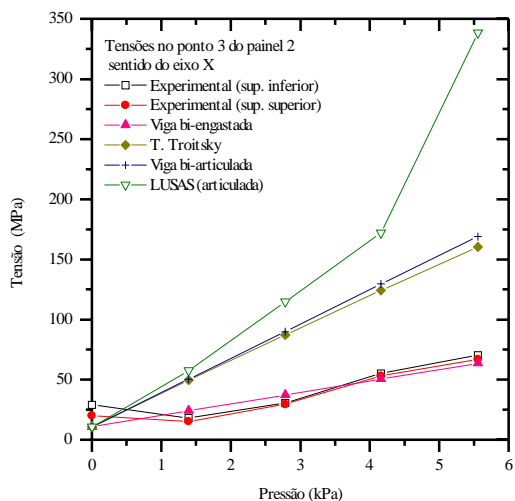


Figura 14. Tensões próximas ao ponto 3.

Como se pode observar nessas figuras, a teoria de viga bi-engastada é a que apresenta melhor comportamento; isto mostra que a conformação ziguezague imposta ao painel aumenta a rigidez nos pontos mencionados.

Quando às tensões atuantes nas paredes dos silos são calculadas pelos métodos simplificados; soma-se a tensão devido ao momento fletor, à tensão devida à tração na parede provocada pela reação das paredes adjacentes. Como a tração é independente do carregamento do painel analisado resta, como variável, o momento fletor; sendo este último dado por $P_h L^2/24$ ou, $P_h L^2/8$, dependendo da hipótese de cálculo adotada (engastada ou articulada), questionam-se as constantes dos denominadores. As curvas das tensões determinadas pela teoria de viga bi-engastada subestimaram as tensões experimentais, enquanto aquelas determinadas como vigas bi-articuladas superestimaram a expectativa.

Como geralmente a espessura das paredes dos painéis é pequena e estas são soldadas às colunas, que possuem alto momento de inércia, é aceitável a hipótese de que, por ser delgada, a parede se comporte com ligação semi-rígida (nem é engastada nem articulada); com isto, pode-se considerar a hipótese de viga articulada para o dimensionamento, mas a proposta por Troitsky (1982) é a mais recomendada, por considerar o efeito membrana.

Recomenda-se, também, a verificação das tensões pelo método de viga bi-engastada, porque, o dimensionamento das paredes dos silos é realizado em função das tensões e a máxima encontrada por este método deve ser analisada no anteprojeto.

CONCLUSÕES

1. O uso de painéis com conformação ziguezague apresenta uma série de vantagens estruturais, construtivas e funcionais. A conformação dada aos painéis aumenta o momento de inércia e, conseqüentemente, há diminuição da quantidade de material usado na fabricação; oferece, também, a possibilidade de construção modular, fabricando painéis com chapa conformada, soldando-se suas bordas em platibandas que serão unidas por parafusos, ou soldadas "in loco" formando-se, desta forma, as colunas dos silos prismáticos. A funcionalidade desses painéis está na inclinação imposta, pois é maior que o efetivo ângulo de atrito interno, produzindo fluxo de massa no corpo

do silo, não deixando, assim, existir acúmulo de produtos nas paredes, o qual provocaria foco de bactérias e fungos, fator indesejável numa instalação destinada ao armazenamento de ração.

2. A principal vantagem de silos com paredes conformadas é a não utilização de enrijecedores horizontais, pois em silos multicelulares tal uso provocaria obstrução do fluxo do produto próximo às paredes. As obstruções favorecem a formação do fluxo de funil que, em seu estado limite último, provocaria a formação de arcos instáveis, produzindo impacto de grande massa de produto nas paredes e no fundo do silo.

3. Com base nas análises teóricas e experimentais realizadas para se determinar as tensões nos Painéis 1 e 2, conclui-se que a teoria proposta por Troitsky (1988) é a mais adequada, pela simplicidade de cálculo e boa adequação aos resultados experimentais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CALIL JR., C. **Sobrepresiones en las paredes de los silos para almacenamiento de productos pulverulentos cohesivos**. Tese de Doutorado. Universidade Politécnica de Catalunya. Barcelona, Espanha, 1982, 184p.
- CALIL JR., C. **Recomendações de fluxo e de ações para projeto de silos verticais**. Tese de Livre Docência. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 1990, 186p.
- CALIL JR, C; NASCIMENTO, J. W. B. e ARAÚJO, E. C. **Silos metálicos multicelulares**. Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, SP, Brasil. 1997. 178p.
- LUSAS. **Theory manual**. FEA LIMITED. 1992.
- NASCIMENTO, J.W.B. **Estudo dos silos metálicos prismáticos para fábricas de ração**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. 1996. 152p.
- RAVENET, J. **Teoria, investigación e construcción**. Editores Técnicos Asociados. Barcelona, Espanha, 1977. 381p.
- TROITSKY, M. S. On the structural analysis of rectangular steel bins. **Journal Powder Technology**, v.4, n.4, pp. 19-25. 1982.
- TROITSKY, M. S. **Analysis and design of bins and bunkers**. In. Tubular steel structures. Cap. 7. 1988. pp7.1-7.72
- RAVENET, J. **Silos**. Barcelona, Espanha. 1992. 508p.