

AValiação DAS PRESSões NORMAIS EM TREMONHAS DE DIFERENTES GEOMETRIAS INSTALADAS EM UM SILO ESBELTO

WISNER COIMBRA DE PAULA¹, RÔMULO MARÇAL GANDIA², FRANCISCO CARLOS GOMES³, ESTÁCIO ANTUNES DE OLIVEIRA JÚNIOR⁴, LUIZ FELIPE SOUZA⁵, SIMONE MANCINI⁶

¹PhD, Federal University of Lavras (UFLA) (Brazil), Engineering Department, (35) 38291398, wisner.depaula@ufla.br

²PhD, UFLA, Agricultural engineering Department, romagandia@gmail.com

³PhD, UFLA, Agricultural engineering Department, fcgomes@ufla.br

⁴Agricultural Engineer, UFLA, Agricultural engineering Department, estacioantunes@gmail.com

⁵Agricultural Engineer, UFLA, Agricultural engineering Department, ifsouza94@hotmail.com

⁶Master student, UFLA, Agricultural engineering Department, simonemancini10@hotmail.com

Apresentado no
L Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2021
08 a 10 de novembro de 2021 - Congresso On-line

RESUMO: Silos verticais esbeltos são estruturas de armazenamento que ainda necessitam de estudos para o completo conhecimento dos esforços atuantes nas tremonhas, uma vez que existe grande variabilidade nas pressões causadas pelo produto armazenado e pela geometria da boca de descarga. O objetivo deste trabalho foi avaliar as pressões normais exercidas pelo armazenamento de milho em grãos nas paredes de tremonhas com 15°, 30°, 45° e 60° de inclinação com a vertical, em silos esbeltos (relação entre o diâmetro e a altura igual a 7,8 e 8,5). Para tal fim, propôs-se a análise do comportamento estrutural das tremonhas citadas, instalada em um silo piloto, cujo projeto baseia-se no princípio teórico do modelo de Pieper e Schütz (1980). Os estudos nessas tremonhas foram concebidos quando submetidas a cargas estáticas e dinâmicas (carregamento, armazenamento e descarregamento), em um silo com o corpo revestido por chapas metálicas lisas e onduladas. Os resultados dos esforços obtidos nos ensaios com o uso de células de pressão foram apresentados por meio de suas curvas de tendência, demonstrando o comportamento estrutural da tremonha de acordo com sua geometria. Observam-se valores máximos das pressões experimentais normais próximas à boca de descarga na situação de carregamento e a inversão dessa condição no descarregamento, ou seja, pressões máximas na região de transição. A conformação das paredes do silo também influenciou os valores máximos de pressão normal na tremonha.

PALAVRAS-CHAVE: silo piloto, cargas estáticas e dinâmicas, esforços em tremonhas.

EVALUATION OF NORMAL PRESSURES IN HOPPERS OF DIFFERENT GEOMETRIES INSTALLED IN A SLENDER SILO

ABSTRACT: Slender vertical silos are storage structures that still need to be studied in order to fully understand the efforts acting on the hoppers, since there is great variability in the pressures caused by the stored product and by the geometry of the discharge nozzle. The objective of this work was to evaluate the normal pressures exerted by the storage of grain corn on hopper walls with 15°, 30°, 45° and 60° inclination to the vertical, in slender silos (ratio between diameter and height equal to 7.8 and 8.5). For this purpose, it was proposed the analysis of the structural behavior of the hoppers mentioned, installed in a pilot silo, whose project is based on the theoretical principle of the model of Pieper and Schütz (1980). The studies in these hoppers were conceived when subjected to static and dynamic loads (loading, storage and unloading), in a silo with the body covered by smooth and corrugated metal

sheets. The results of the efforts obtained in the tests with the use of pressure cells were presented through their trend curves, demonstrating the structural behavior of the hopper according to its geometry. Maximum values of the normal experimental pressures near the discharge mouth in the loading situation and the inversion of this condition in the unloading are observed, that is, maximum pressures in the transition region. The conformation of the silo walls also influenced the maximum normal pressure values in the hopper.

KEYWORDS: pilot silo, static and dynamic loads, hopper loads.

INTRODUÇÃO:

A necessidade de ampliar a capacidade estática da rede armazenadora tornaram os estudos sobre silos bastante desafiadores para os pesquisadores, projetistas e construtores. Para a determinação das pressões exercidas pelos produtos armazenados sobre as paredes de silos, podem-se citar algumas normas internacionais: norma ISO 11697 (2012), a europeia EN 1991-4 (2006) e a australiana AS 3774 (1996). Entretanto, existem várias discordâncias no tratamento do assunto entre as referidas normas, como também é citado por diversos autores (CALIL (2007); PALMA (2005); MADRONA (2009) e DECKERS (2010)). O insuficiente conhecimento das pressões e do comportamento de fluxo dos produtos armazenados explica, ainda, o grande número de acidentes envolvendo silos, como ruínas, afundamentos, explosões, combustões, etc. Tanaka (2009) relata em seu trabalho que as estruturas de armazenamento devem ser robustas e confiáveis e, por isso, o cálculo deve priorizar segurança à economia. Portanto, devido à infinidade de possibilidades de geometrias de bocas de descarga de silos e dadas as importâncias econômica, científica e social relativas à questão, verifica-se a importância do conhecimento correto para determinação das ações e respectivas pressões que atuam nas tremonhas dos silos.

MATERIAL E MÉTODOS: O estudo das pressões nas diversas geometrias de tremonhas analisadas, com ângulos de inclinação de 15° , 30° , 45° e 60° , foi realizado em um silo piloto com paredes lisas e diâmetro interno de 70,6 cm e com paredes onduladas, cujo diâmetro interno é de 64,36 cm. O silo possui altura de 600 cm, com capacidade de armazenamento de $2,3 \text{ m}^3$ para produto granular. Ele é subdividido em 12 anéis independentes e suspensos por 3 pilares metálicos, medindo 49,5 cm de altura cada anel, conforme estrutura ilustrada nas Figuras 1-A, 1-B e 1-C.

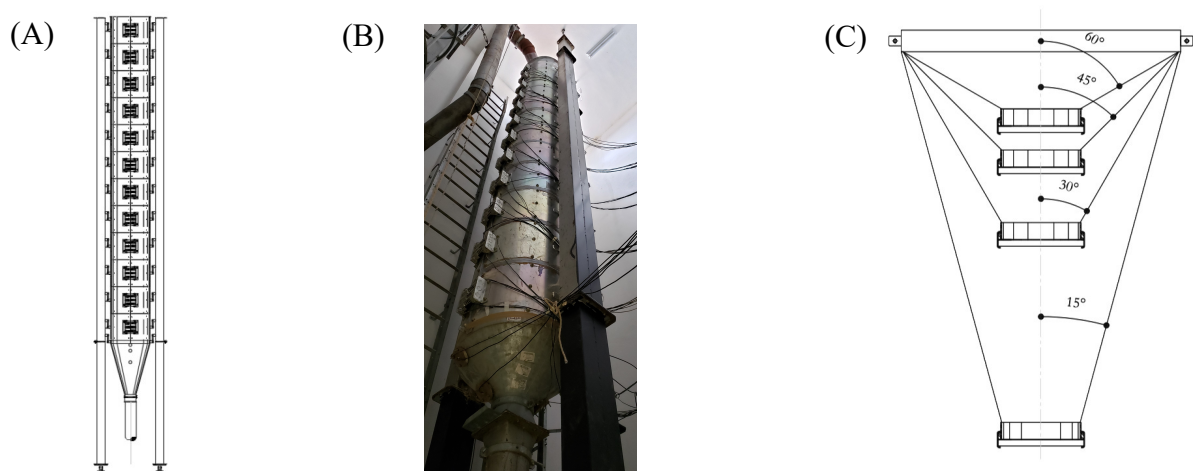
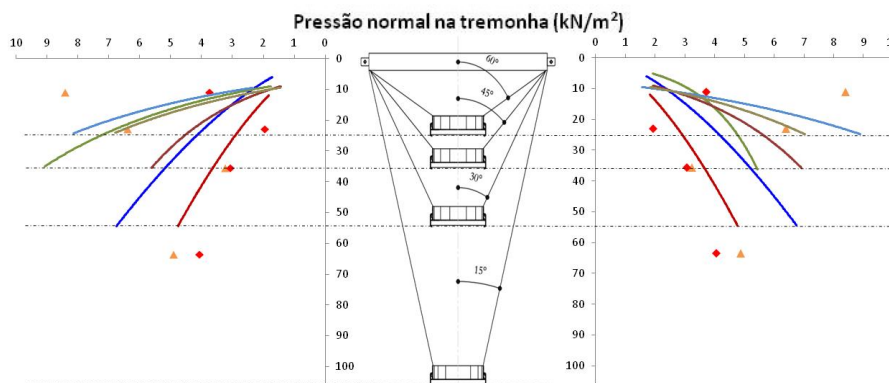


Figura 1- Vistas esquemáticas gerais do silo piloto (A e B) e vista frontal das geometrias das tremonhas utilizadas no estudo (C).

A altura de carregamento foi de 5,5m para todos os ensaios executados e o produto granular, o milho. Para verificar as pressões de enchimento e descarga nas tremonhas (sendo denominadas pressões estáticas e dinâmicas, respectivamente), foram utilizadas células de pressão do tipo diafragma instaladas ao longo da altura da estrutura, com capacidade nominal de 70 kPa e diâmetro de 53 mm. Realizaram-se quatro ensaios para cada tipo de parede considerada na pesquisa (lisa e ondulada) e as pressões verticais máximas foram registradas durante o carregamento e descarregamento do silo. Desses quatro ensaios, fizeram-se as médias dos valores máximos, considerando todos os sensores instalados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO: Observa-se, na Figura 2, que o comportamento das curvas de tendência das pressões normais nas tremonhas demonstra que, no enchimento do silo, as maiores pressões ocorrem perto da boca de descarga da estrutura (análogo ao proposto pela norma australiana AS 3774:1996, mas oposto ao preconizado pelas normas ISO 11697:2012 e EN 1991-4:2006). Esta orientação dos esforços se aplica às tremonhas de 60°, 45° e 30°. No entanto, por conta dos resultados obtidos nos sensores para a tremonha de 15° de inclinação, não foi possível definir uma curva de tendência com coeficiente de correlação conveniente. Nesta tremonha não se observou, nos estudos desenvolvidos neste trabalho, uma possibilidade de se prever a variação das pressões normais estáticas com a altura da tremonha, seja de incremento ou decréscimo de seu valor. Também se faz notar a expressiva influência da rugosidade da parede do silo, sendo que com a parede lisa as pressões normais se sobressaíram às obtidas com paredes onduladas.



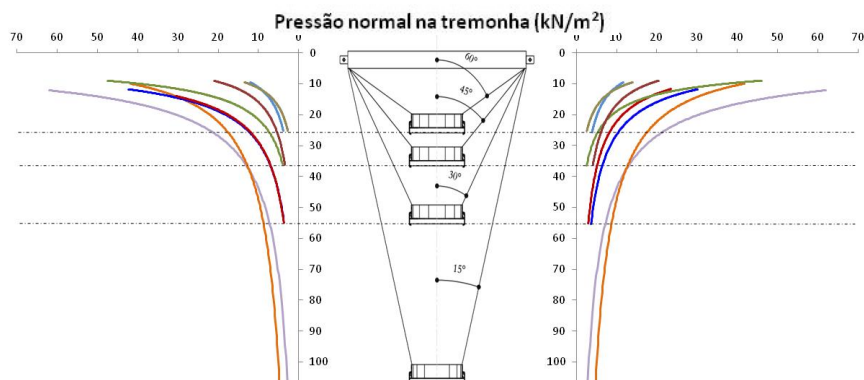
Eixo vertical: altura da tremonha (cm).

Legenda:

- ▲ $\alpha=15^\circ$ / parede lisa
- ◆ $\alpha=15^\circ$ / parede ondulada
- $\alpha=30^\circ$ / parede lisa
- $\alpha=30^\circ$ / parede ondulada
- $\alpha=45^\circ$ / parede lisa
- $\alpha=45^\circ$ / parede ondulada
- $\alpha=60^\circ$ / parede lisa
- $\alpha=60^\circ$ / parede ondulada

Figura 2 - Curvas de tendência das pressões normais estáticas nas tremonhas concêntricas de 15°, 30°, 45° e 60° de inclinação com a vertical.

Já as pressões normais dinâmicas nas quatro tremonhas inclinadas e concêntricas analisadas foram máximas próximas à região de transição com o corpo do silo, tendendo a uma grande redução à medida que se aproxima da boca de saída (Figura 3). Este comportamento estrutural é condizente com o preconizado nas normas estrangeiras de cálculo de silos. Assim como para as curvas de pressões normais estáticas, também para as dinâmicas os coeficientes foram próximos de um, fazendo-se confiáveis as curvas obtidas para representar esses esforços nas tremonhas.



Eixo vertical: altura da tremonha (cm).

Legenda:

— $\alpha=15^\circ$ / parede lisa — $\alpha=15^\circ$ / parede ondulada — $\alpha=45^\circ$ / parede lisa — $\alpha=45^\circ$ / parede ondulada
 — $\alpha=30^\circ$ / parede lisa — $\alpha=30^\circ$ / parede ondulada — $\alpha=60^\circ$ / parede lisa — $\alpha=60^\circ$ / parede ondulada

Figura 3 - Curvas de tendência das pressões normais dinâmicas nas tremonhas concêntricas de 15° , 30° , 45° e 60° de inclinação com a vertical.

CONCLUSÕES: O comportamento estrutural das pressões estáticas normais à tremonha divergiu daquele preconizado pelas normas ISO 11697:2012 e EN 1991-4:2006. O experimento com o silo piloto demonstrou, então, que pode haver situações em que o dimensionamento dado pelas normas subestima ou superestima as pressões normais atuantes em tremonhas. A rugosidade das paredes do corpo de silo também exerce considerável influência nos valores máximos das pressões normais, os quais ocorrem na região de transição.

REFERÊNCIAS:

- AUSTRALIAN STANDARD. AS 3774. Loads on bulk containers. Sydney. AS 3774 Supplement 1 (1997). Loads on bulk containers – Commentary. Sydney, 1996.
- CALIL JR., C.; CHEUNG, A. B. **Silos: pressões, fluxo, recomendações para projeto e exemplos de cálculo**. São Carlos: EESC, 2007, 232 p.
- CHEUNG, A. B. (2007) **Modelo estocástico de pressões de produtos armazenados para a estimativa da confiabilidade estrutural de silos esbeltos**. Tese de doutorado. EESC/USP – São Carlos – SP. 305p.
- COUTO, A.; RUIZ, A.; AGUADO, P. J. Experimental study of the pressures exerted by wheat stored in slender cylindrical silos, varying the flow rate of material during discharge. Comparison with Eurocode 1 part 4. **Powder Technology**, v. 237, p. 450–467, 2013.
- EUROPEAN COMMITTEE OF STANDARTIZATION. **Eurocode 1. EN 1991-4 Part 4: Actions on silos and tanks**. Brussels, 2006.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDART. **ISO 11697. Bases for design of structures: Loads due to bulk materials**. London, 2012.
- MADRONA, F. S., CALIL JÚNIOR, C. **Análise das pressões em silos esbeltos com descarga excêntrica**. Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v. 11, n. 49, p. 37-56, 2009.
- PALMA, G. (2005) **Pressões e fluxo em silos esbeltos ($H/D \geq 1,5$)**. São Carlos. 109 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos. USP. Orientador Prof. Titular Carlito Calil Júnior.
- PIEPER, K.; SCHÜTZ, M. **Bericht Über das Forschungsvorhaben - Norm-Mess-Silo für Schüttguteigenschaften**. Technische Universität Braunschweig - Lehrstuhl für Hochbaustatik, Deutschland. 1980.