

## **AValiação DAS PRESSões VERTICAIS NO FUNDO PLANO DE UM SILO ESBELTO**

**WISNER COIMBRA DE PAULA<sup>1</sup>, RÔMULO MARÇAL GANDIA<sup>2</sup>, FRANCISCO  
CARLOS GOMES<sup>3</sup>, JOSÉ WALLACE BARBOSA DO NASCIMENTO<sup>4</sup>, ESTÁCIO  
ANTUNES DE OLIVEIRA JUNIOR<sup>5</sup>, LUIZ FELIPE SOUZA<sup>6</sup>**

<sup>1</sup> Engenheiro Civil (UFOP), Mestre em Engenharia Civil (UERJ), Doutorando em Engenharia Agrícola (UFLA), (35)38291398, wisner.depaula@ufla.br

<sup>2</sup> Engenheiro Agrícola (UFLA), Mestre em Engenharia Agrícola, Doutorando em Engenharia Agrícola (UFLA), (35)988822405, romagandia@gmail.com

<sup>3</sup> Engenheiro Agrícola (UFLA), Mestre em Engenharia Civil (USP), Doutor em Engenharia Civil (USP), (35)38291484, fcgomes@ufla.br

<sup>4</sup> Engenheiro Agrícola (UFPB), Mestre em Engenharia Agrícola (UFPB), Doutor em Engenharia Civil (USP), (83)21011482, wallace@deag.ufcg.edu.br

<sup>5</sup> Graduando em Engenharia Agrícola, UFLA, (35)991542642, estacioantunes@estudante.ufla.br

<sup>6</sup> Graduando em Engenharia Agrícola, UFLA, (35)991547405, lfsouza94@hotmail.com

Apresentado no  
XLIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2020  
23 a 25 de novembro de 2020 - Congresso On-line

**RESUMO:** O estudo do comportamento dos esforços atuantes em silos, especialmente nas diversas geometrias possíveis de boca de descarga, tem se destacado em diversas áreas de pesquisa. Pouco se conhece sobre as teorias empregadas no estudo dos silos agregada à qualidade do armazenamento, na busca de uma interação entre o produto e o sistema construtivo e estrutural. Neste trabalho objetivou-se a avaliação das pressões verticais no fundo plano de um silo metálico esbelto (relação entre o diâmetro e a altura igual a 7,8 e 8,5), quando submetido ao carregamento e descarregamento de milho em grãos. O silo piloto utilizado na pesquisa baseia-se no princípio teórico do modelo de Pieper e Schütz (1980) e foi ensaiado com o corpo vertical revestido com chapas lisas e onduladas. Os valores empíricos obtidos foram comparados com algumas normas estrangeiras de cálculo silos esbeltos (ISO 11697:2012, EN 1991-4:2006 e AS 3774:1996) e com a teoria de Janssen (1895). Observaram-se valores máximos das pressões experimentais verticais muito inferiores aos calculados pelas normas e teoria, chegando a 301,42% de diferença entre valores extremos. Ademais, a conformação das paredes do silo não influenciou os valores máximos de pressão vertical.

**PALAVRAS-CHAVE:** silo piloto, cargas estáticas e dinâmicas, normas estrangeiras de cálculo

## **EVALUATION OF VERTICAL PRESSURES IN A FLAT BOTTOM SLENDER SILO**

**ABSTRACT:** The study of the behavior of efforts acting in silos, especially in the different possible geometries of discharge mouth, has been highlighted in several research areas. Little is known about the theories used in the study of silos added to the quality of storage, in the search for an interaction between the product and the constructive and structural system. This work aimed to evaluate the vertical pressures on the flat bottom of a slender metallic silo (ratio between diameter and height equal to 7.8 and 8.5), when subjected to the filling and discharging of corn in grains. The pilot silo used in the research is based on the theoretical principle of the model by Pieper and Schütz (1980) and was tested with the vertical body

covered with smooth and corrugated sheets. The empirical values obtained were compared with some foreign standards for the calculation of slender silos (ISO 11697: 2012, EN 1991-4: 2006 and AS 3774: 1996) and with Janssen's theory (1895). Maximum values of vertical experimental pressures were observed much lower than those calculated by norms and theory, reaching a 301.42% difference between extreme values. Furthermore, the conformation of the silo walls did not influence the maximum vertical pressure values.

**KEYWORDS:** pilot silo, static and dynamic loads, foreign standards of calculation

**INTRODUÇÃO:** Numa análise geral, os projetos de silos são desenvolvidos com base nos critérios de dimensionamento adotados pelas normas estrangeiras, com o uso de dados de propriedades físicas de produtos armazenados. Entre os diversos temas relacionados ao processo de dimensionamento, o estudo do comportamento das pressões atuantes nessas estruturas tem se destacado nas diversas áreas de pesquisa. Por sua vez, estas pressões atuantes são diretamente dependentes das propriedades físicas dos produtos armazenados, do padrão de fluxo e da forma geométrica do corpo do silo e de sua tremonha, entre outros fatores. Os procedimentos utilizados pelas normas na estimativa das pressões na estrutura são bastante variáveis. As mais importantes normas existentes no mundo adotam coeficientes de sobrepressão para atender os efeitos durante a descarga, podendo-se citar a *Australian Standard* (AS 3774:1996), a *European Committee of Standardization* (EN 1991-4:2006) e a *International Organization for Standardization* (ISO 11698:2012). Tais constatações induziram ao desenvolvimento deste trabalho de pesquisa com o propósito de abordar o comportamento das pressões verticais atuantes em um silo esbelto de fundo plano, sob a ótica da correlação entre um modelo teórico, experimental e com as normas estrangeiras.

**MATERIAL E MÉTODOS:** As pressões verticais no fundo do silo foram obtidas por meio de quatro células de pressão do tipo diafragma instaladas em um silo piloto com diâmetro interno de 0,706 m quando ensaiado com parede vertical lisa e 0,644 m, com parede vertical ondulada. O diâmetro da boca de descarga é de 0,2 m. Sua altura é de 6 m, com capacidade de armazenamento de 2,3 m<sup>3</sup> para produto granular. As células de pressão têm capacidade nominal de 70 kPa e diâmetro de 53 mm, conforme ilustram as Figuras 1-A e 1-B. A altura de carregamento foi de 5,5m para todos os ensaios executados.

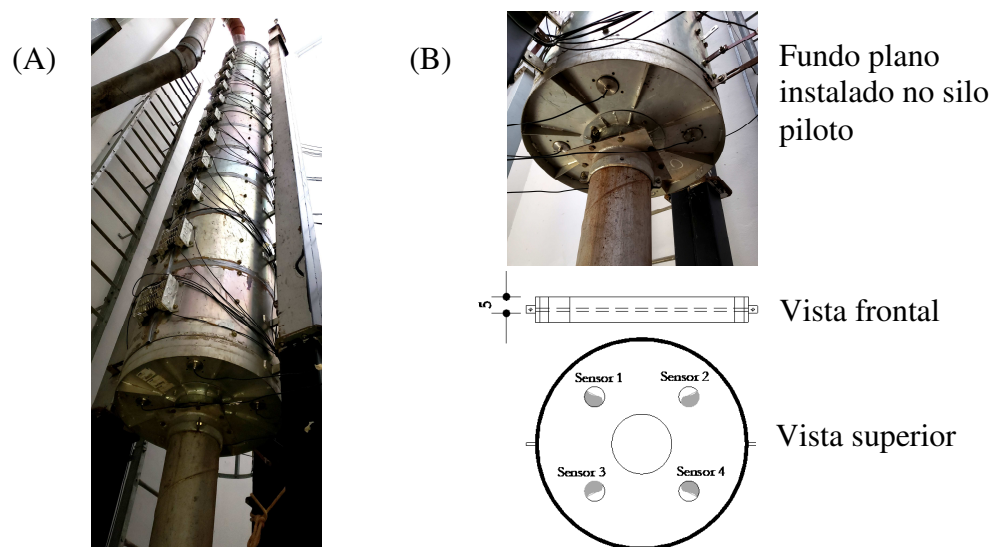


Figura 1 – Vista geral do silo piloto (A) e detalhes da boca de descarga e sensores instalados no fundo plano (B).

Foram realizados 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, sendo denominadas pressões estáticas e dinâmicas, respectivamente. Desses quatro ensaios, fizeram-se as médias dos valores máximos, considerando todos os sensores.

As propriedades físicas do milho utilizadas para o cálculo das pressões verticais no fundo do silo (normativas e teórica) foram determinadas por meio de ensaio de cisalhamento direto (por translação) do milho no equipamento conhecido como “Jenike Shear Cell”, sendo apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades físicas do milho obtidas nos ensaios de cisalhamento direto.

Teor de umidade (%)	Peso específico $\gamma$ (kN.m <sup>-3</sup> )		Ângulo de atrito interno $\phi_i$ (°)		Efetivo ângulo de atrito interno $\phi_e$ (°)		Ângulo de atrito com a parede $\phi_w$ (°)	
	$\gamma_{inf.}$	$\gamma_{sup.}$	$\phi_{i,inf.}$	$\phi_{i,sup.}$	$\phi_{e,inf.}$	$\phi_{e,sup.}$	$\phi_{w,inf.}$	$\phi_{w,sup.}$
12,70	7,6082	7,9782	23,00	38,00	35,00	48,00	10,64	16,64

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** Na Figura 2 são apresentados os resultados experimentais para cada tipo de geometria de parede do silo, considerando as pressões verticais estáticas e dinâmicas, além das pressões calculadas pela teoria de Janssen (1895) e pelas referidas normas estrangeiras de silos.

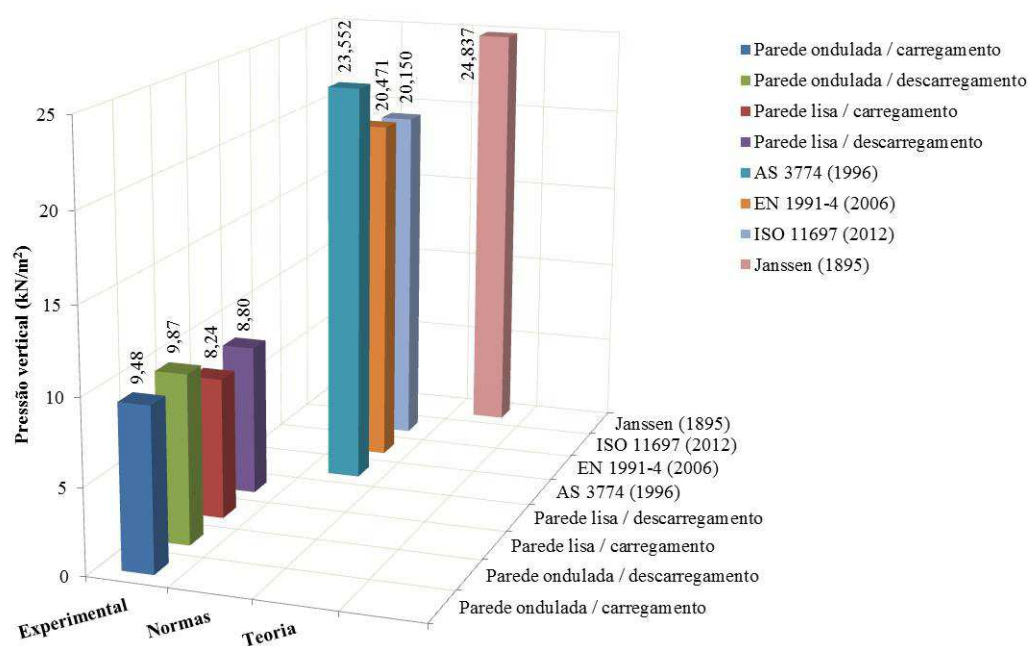


Figura 2 – Pressões verticais no fundo plano do silo.

Fonte: Autor (2020).

Pode-se notar que, considerando os valores empíricos conjuntamente com seus respectivos desvios padrões ( $9,48 \pm 2,22$  kN.m<sup>-2</sup>;  $9,87 \pm 2,01$  kN.m<sup>-2</sup>;  $8,24 \pm 0,97$  kN.m<sup>-2</sup>;  $8,80 \pm 0,76$  kN.m<sup>-2</sup>), não houve diferença considerável nas pressões verticais no fundo plano do silo esbelto analisado, mesmo quando se variou a geometria da parede ou quando se promoveu a descarga do silo. Estes resultados reforçam a hipótese de ocorrência de fluxo de funil durante a

descarga, já que, neste caso, a transição efetiva ocorre no corpo do silo, deslocando as sobrecargas devidas ao fluxo para esta região. Este fato justifica, por exemplo, a norma EN 1991-4 (2006) preconizar que a pressão vertical que atua sobre o fundo plano de um silo vertical esbelto durante a descarga possa ser considerada idêntica à pressão vertical no final do carregamento, com seus coeficientes de segurança.

Ainda com relação à Figura 2, percebe-se grande afastamento entre os valores empíricos e os demais apresentados na figura, chegando a 301,42% de diferença entre os valores extremos (“parede lisa / carregamento” e “Janssen (1895)”).

Com relação às pressões normais dinâmicas atuantes no fundo do silo, Lopes Neto *et al* (2014) também concluíram que os valores teóricos de pressão vertical propostos pelas normas foram superestimados em relação aos obtidos experimentalmente para a maioria das formas de descarregamento analisadas em seu trabalho (concêntricas, excêntricas e múltiplas).

**CONCLUSÕES:** A geometria do silo piloto, configurando em silo esbelto com fundo plano, juntamente com as características do milho, conduziram às características de fluxo de funil e, nesta situação, à não ocorrência de sobrepressão no descarregamento do silo de fundo plano. Os valores máximos das pressões experimentais verticais foram inferiores aos calculados pelas normas EN1991-4, AS3774:1996, ISO11697:2012 e ao obtido pelo método de Janssen (1895). A conformação das paredes do silo, neste caso, não exerceu influência nos valores máximos obtidos pelas células de pressão.

#### **REFERÊNCIAS:**

- AUSTRALIAN STANDARD. **AS 3774. Loads on bulk containers.** Sydney. AS 3774 Supplement 1 (1997). Loads on bulk containers – Commentary. Sydney, 1996.
- 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.
- JANSSEN, H. A. (1895) Experiments on grain pressures in silos. **Verein Deutscher Ingenieure**, Zeitschrift.
- LOPES NETO, J. P.; NASCIMENTO, J. W. B.; FANK, M. Z. Forças verticais e de atrito em silos cilíndricos com fundo plano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 18, n. 6, 2014.
- NASCIMENTO, F. C. (2008) **A relação entre as pressões horizontais e verticais em silos elevados: o parametro K.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Orientador: Carlito Calil Junior.
- PIEPER, K.; SCHÜTZ, M. **Bericht Über das Forschungsvorhaben - Norm-Mess-Silo für Schüttguteigenschaften.** Technische Universität Braunschweig - Lehrstuhl für Hochbaustatik, Deutschland. 1980.
- VASCONCELOS, L. D. S. **Estudo experimental de pressões horizontais em silos verticais com tremonha e inserts.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Orientador Prof. José Wallace Barbosa do Nascimento. 2019.