

AVALIAÇÃO DAS PRESSÕES NORMAIS EM SILOS ESBELTOS VARIANDO O ÂNGULO DA TREMONHA E A ESBELTES DO SILO

RÔMULO MARÇAL GANDIA¹, WISNER COIMBRA DE PAULA², SIMONE MANCINI³, ESTÁCIO ANTUNES DE OLIVEIRA JÚNIOR⁴, FRANCISCO CARLOS GOMES⁵, PEDRO JOSÉ AGUADO RODRIGUEZ⁶

¹PhD, Federal University of Lavras (UFLA) (Brazil) and Universidad de León (ULE), Agricultural engineering Department, (35) 998337777, romagandia@gmail.com

²PhD, UFLA, Engineering Department, wisner.depaula@ufla.br

³Master student, UFLA, Agricultural engineering Department, simonemancini10@hotmail.com

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

⁵PhD, UFLA, Agricultural engineering Department, fcgomes@ufla.br

⁶PhD, University of León (Spain), Agricultural engineering Department, pedro.aguado@unileon.es

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

RESUMO: É notável a importância do armazenamento em silos tanto no âmbito nacional quanto internacional. Falhas devido as pressões na parede do silo devido a esbeltes e ângulo da tremonha são relatadas. O trabalho teve o objetivo de avaliar as pressões normais na parede do silo variando a esbeltes a inclinação da tremonha. Neste trabalho, foi relatado os resultados para as pressões horizontais na parede de silos em escala piloto obtidos a partir de ensaios realizados em uma estação de teste usando um produto de fluxo livre. Seis tipos diferentes de geometria de silo (esbeltes e ângulo da tremonha) foram testados enchendo o silo até a altura de interesse e observando a fase estática (10 minutos) seguida de descarga completa. Os resultados mostram que a pressão máxima na parede do silo durante o enchimento ocorreu perto da transição, independentemente da esbeltes do silo ou do ângulo da tremonha. Na descarga, os momentos de ocorrência das pressões foram completamente diferentes de acordo com tipo de fluxo (massa e funil), seguindo um padrão para fluxo funil. Além disso, a pressão normal máxima no cilindro com esbeltes máxima (8hd) e vazão mássica (tremonha $\beta = 15^\circ$) apresentaram picos que ultrapassaram o padrão.

PALAVRAS-CHAVE: Pressões de silo, produto de fluxo livre, tremonha concêntrica

EVALUATION OF NORMAL PRESSURES IN SLENDER SILOS VARYING THE HOPPER ANGLE AND THE SLENDERNESS OF THE SILO

ABSTRACT: The importance of storage in silos both nationally and internationally is remarkable. Failures due to cylinder wall pressures due to slender and hopper angle are reported. The aim of this work was to evaluate the normal pressures in the silo wall, varying the hopper inclination to slender. In this work, the results for the horizontal wall pressures of pilot scale silos obtained from tests carried out in a test station using a free-flowing product were reported. Six different types of silo geometry (slenderness and hopper angle) were tested by filling the silo to the height of interest and observing the static phase (10 minutes) followed by complete discharge. The results show that the maximum silo wall pressure during filling occurred near the transition, regardless of silo slender or hopper angle. At discharge, the moments of occurrence of pressures were completely different according to the type of flow (mass and funnel), following a pattern for funnel flow. In addition, the maximum normal pressure in the cylinder with maximum slenders (8hd) and mass flow (hopper $\beta = 15^\circ$) showed peaks that exceeded the standard.

KEYWORDS: Silo pressures, free-flowing product, concentric hopper

INTRODUÇÃO: No mercado internacional, o milho e seus derivados constituem um produto líder de alto consumo devido ao seu alto índice nutricional e ampla prevalência na alimentação animal. Só no Brasil, a produção de grãos em 2020 foi de 268,7 milhões de toneladas (CONAB, 2020). Os silos de torres têm sido estudados desde o século 19, mas devido à complexidade das leis que governam o comportamento mecânico dos materiais armazenados, muitos aspectos permanecem mal compreendidos (AYUGA, 2008; DOGANGUN et al., 2009; NIELSEN, 2008). O comportamento das pressões em um silo é influenciado pelo padrão de fluxo e os dois parâmetros que influenciam diretamente são o ângulo da tremonha e o ângulo de atrito entre o material e a parede da tremonha. A estação de teste em escala piloto proposta por Pieper e Schütz em 1980 (PIEPER; SCHÜTZ, 1980), que forneceu suporte para DIN 1055-6: Base de projeto e ações em estruturas - Parte 6 (DIN, 2005), pode ser usada para obter inúmeras variáveis que influenciam diretamente o comportamento das pressões em um silo (SONG; TENG, 2003; ZEGZULKA, 2013). A estação foi calibrada e validada pelo grupo de pesquisa da Universidade Federal de Lavras (UFLA) (GANDIA et al., 2021a). Diversos estudos foram realizados na estação experimental, demonstrando que as pressões (atrito e normal) estáticas e dinâmicas são influenciadas pela esbeltes e ângulo das tremonhas (GANDIA et al., 2021b). Modelos experimentais de silos em grande escala fornecem proximidade com valores reais, permitindo confiança nos dados e aumentando nossa compreensão das pressões em silos (CHEN et al., 2007). Além disso, os modelos experimentais servem para validações de modelos numéricos (AYUGA et al., 2006; GALLEGO et al., 2010; GALLEGO; RUIZ; AGUADO, 2015; GANDIA et al., 2021c). Portanto, o objetivo do presente estudo foi elucidar a relação entre o padrão de fluxo e esbeltes em relação às pressões do silo.

MATERIAL E MÉTODOS: Os componentes principais consistiam em dois silos: um para realização dos testes (silo piloto), contendo a instrumentação necessária para medir o comportamento do material armazenado, e o outro (silo de armazenamento) para armazenar o produto utilizado nos testes, armazenando o material durante os testes. O silo é cilíndrico, elevado e metálico. O cilindro do silo e a tremonha são independentes e podem ser desmontados. O silo cilindro tem 600 centímetros de altura e 70 centímetros de diâmetro, e é dividido em 12 semicilindros (anéis) estruturalmente independentes. Cada anel tem 49,50 cm de altura com um vão de 0,50 cm, totalizando a altura do cilindro do silo em 6 metros (Figura 1). O uso de anéis independentes permite a medição da força vertical e horizontal na parede do cilindro (em cada anel). Para medir as pressões normais da parede, uma geratriz vertical foi localizada na parede do cilindro, ao longo da qual 12 pares de leituras foram feitas em diferentes alturas usando uma célula de carga de tensão, cada par produzindo a medição de pressão normal para cada anel. Para evitar erros de leitura, cada anel possui uma folga de 5 mm na abertura (Figura 1).

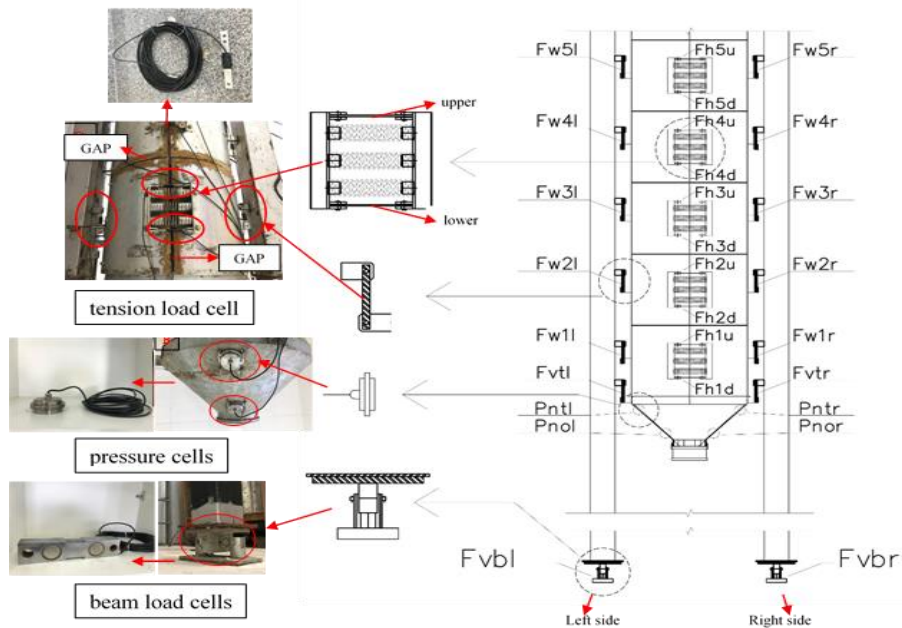


FIGURA 1. Localização das células de medição no silo piloto.

Célula de carga tipo viga, base do pilar (a), célula de pressão, tremonhas (b), célula de carga de tensão, anéis de silo (vertical - atrito, normal - horizontal) (c).

Utilizando milho e preenchimento concêntrico, foram realizados 30 testes, divididos em seis configurações com cinco repetições cada. Cada configuração difere quanto ao ângulo da tremonha e à altura de enchimento do produto (esbeltes). Foram utilizadas três alturas de enchimento: 2,5 metros (4hd), 4,0 metros (6hd) e 5,0 metros (8hd) (Figura 6); e dois ângulos concêntricos da tremonha: $\beta = 15^\circ$ (C15) e $\beta = 60^\circ$ (C60) (Figura 2). Embora a relação altura / diâmetro não fosse exatamente 4, 6 e 8, esse termo foi usado para facilitar a escrita.

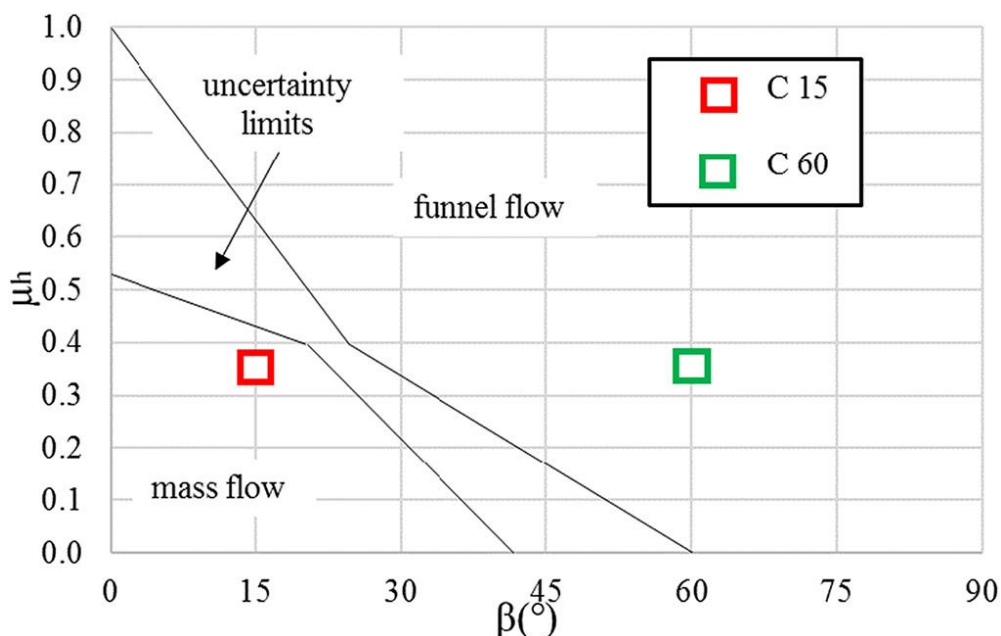


FIGURA 2. Condições para o padrão de fluxo de acordo com a Eurocode 1, parte 4 (CEN, 2006).

As tremonha utilizadas foram escolhidas por se tratar de dois tipos de fluxo distinto de acordo com a Eurocode 1, parte 4 (CEN, 2006): fluxo massa e fluxo funil. Portanto, as pressões normais no cilindro do silo foram obtidas para essas 6 configurações.

RESULTADOS E DISCUSSÃO: Foi verificado (Figura 3) que com maior esbeltes e menor ângulo em β as pressões normais nas alturas dos cilindros se cruzaram, ou seja, diferiram das pressões hidrostáticas, conforme observado no teste C15 4hd onde ph3 superou ph2 logo após 200 segundos, ainda em fase de enchimento. Este comportamento foi observado em todos os casos, exceto no C60 4 hd (menor esbeltes e menor ângulo da tremonha).

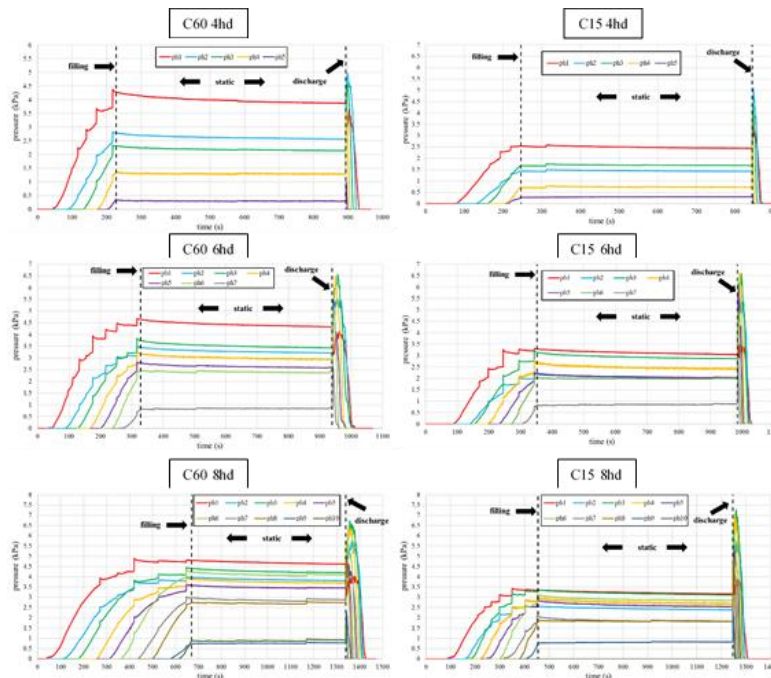


FIGURA 3. Pressões normais da parede do cilindro do silo (ph), em cada tempo t. Ensaios do tipo C15 e C60, teste C60 4hd, C60 6hd, C60 8hd, C15 4hd, C15 6hd e C15 8hd.

Em geral, a Figura 3 mostra que as pressões normais na parede do cilindro após o enchimento foram maiores quando se utilizou a tremonha $\beta = 60^\circ$, uma vez que as pressões aumentaram com o aumento da altura do produto (aumentando paralelamente à esbeltes). Como exemplo, a pressão na altura 0,25 m (ph1) aumentou de 3,9 kN em C60 4hd para 4,65 kN em C60 8hd, enquanto para $\beta = 15^\circ$ houve um aumento de 2,5 kN em C15 4hd para 3,1 kN em C15 8hd.

Em relação à fase estática, a acomodação do material foi aparente após o enchimento do silo e mais evidente quanto maior a esbeltes do silo, com pontos de acomodação ocorrendo com maior frequência no início (COUTO; RUIZ; AGUADO, 2013; GANDIA et al., 2021a, 2021b; RUIZ; COUTO; AGUADO, 2012).

Embora as pressões em tremonhas com $\beta = 60^\circ$ fossem maiores do que com $\beta = 15^\circ$ nas fases de enchimento e estática, descobriu-se que as pressões normais máximas durante a descarga atingiram a mesma magnitude em alturas entre 0,75 e 1,25 m (ph2 e ph3) para esbeltes 4hd, e entre 1,25 a 1,75 metros para esbeltes 6hd e 8hd, demonstrando que há diferença na altura do canal estático no momento da descarga em relação à esbeltes.

Os pontos de pressões máximas foram comparados com as calculadas pela Eurocode 1, parte 4. Durante a descarga, nenhuma das seis configurações ultrapassou os valores calculados pela norma. Durante o enchimento em todas as alturas utilizando a tremonha $\beta = 60^\circ$ (C60), a pressão normal na parede do silo na altura de 0,25 m (ph1) excedeu a pressão obtida pela Eurocode 1 parte 4.

CONCLUSÕES: Para silos muito delgados ($h / d \leq 4$), a pressão máxima na parede do silo durante o enchimento ocorreu perto da transição, independentemente da esbeltes do silo ou do ângulo da tremonha. Durante a descarga, os silos de fluxo de massa não seguiram um padrão na localização da pressão máxima na parede. Porém, para silos de fluxo em funil, a pressão máxima na parede ocorreu a 1/3 da altura do cilindro, independente da esbeltes.

AGRADECIMENTOS: Os autores agradecem a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior) pelo financiamento da bolsa de doutorado relacionada a este projeto.

REFERÊNCIAS:

- AYUGA, F. et al. Experimental tests to validate numerical models in silos design. **2006 ASABE Annual International Meeting**, v. 0300, n. 06, 2006.
- AYUGA, F. Some unresolved problems in the design of steel cylindrical silos. In: CHEN, J.F., TENG, J. G. (Ed.). . **Structures and Granular Solids: From Scientific Principles to Engineering Applications**. Boca Raton, USA: CRC Press-Taylor & Francis Group, 2008. p. 123–133.
- CEN. **EN 1991-4:2006. Eurocode 1: Actions on Structures. Part 4: Silos and Tanks**. Brussels: [s.n.].
- CHEN, J. F. et al. Correlation between the flow pattern and wall pressures in a full scale experimental silo. **Engineering Structures**, v. 29, n. 9, p. 2308–2320, 2007.
- CONAB, C. N. DE A. **Acompanhamento da safra brasileira 2019/2020 Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos 2019/2020**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras>>.
- 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.
- DIN. **DIN 1055-6: Basis of design and actions on structures – Part 6: design 623 loads for buildings and loads in silo bins**. Berlin, Verlaz: 2005
- DOGANGUN, A. et al. Cause of damage and failures in silo structures. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 23, n. 2, p. 65–71, 2009.
- GALLEGO, E. et al. SIMULATIONS OF GRANULAR FLOW IN SILOS WITH DIFFERENT FINITE ELEMENT PROGRAMS: ANSYS VS. SILO. **Transactions of the ASABE**, v. 53, n. 3, p. 819–829, 2010.
- GALLEGO, E.; RUIZ, A.; AGUADO, P. J. Simulation of silo filling and discharge using ANSYS and comparison with experimental data. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 118, p. 281–289, 2015.
- GANDIA, R. M. et al. Static and dynamic pressure measurements of maize grain in silos under different conditions. **Biosystems Engineering**, v. 209, p. 180–199, 2021a.
- GANDIA, R. M. et al. Evaluation of pressures in slender silos varying hopper angle and silo slenderness. **Powder Technology**, v. 394, p. 478–495, 2021b.
- GANDIA, R. M. et al. Influence of specific weight and wall friction coefficient on normal pressures in silos using the Finite Element Method. **Revista Engenharia na Agricultura - Reveng**, v. 29, p. 192–203, 2021c.
- NIELSEN, J. From silo phenomena to load models. In: CHEN, J. F.; TENG, J. G. (Eds.). . **Structures and Granular Solids: From Scientific Principles to Engineering Applications**. Boca Raton, USA: CRC Press-Taylor & Francis Group, 2008. p. 49–57.
- PIEPER, K.; SCHÜTZ, M. **Bericht Über das Forschungsvorhaben - Norm-Mess-Silo für Schüttguteigenschaften**. [s.l.] Technische Universität Braunschweig, 1980.

RUIZ, A.; COUTO, A.; AGUADO, P. J. Design and instrumentation of a mid-size test station for measuring static and dynamic pressures in silos under different conditions - Part II: Construction and validation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 85, p. 174–187, 2012.

SONG, C. Y.; TENG, J. G. Buckling of circular steel silos subject to code-specified eccentric discharge pressures. **Engineering Structures**, v. 25, n. 11, p. 1397–1417, 2003.

ZEGZULKA, J. The angle of internal friction as a measure of work loss in granular material flow. **Powder Technology**, v. 233, p. 347–353, 2013.