

AValiação DAS PRESSões NORMAIS MÁximas EM SILOS ESBELTOS VARIANDO O ÂNGULO DA TREMONHA E A ESBELTEZ DO SILO

**RÔMULO MARÇAL GANDIA¹, WISNER COIMBRA DE PAULA², SIMONE
MANCINI³, MARCELO BAHUTI, FRANCISCO CARLOS GOMES⁵, PEDRO JOSÉ
AGUADO RODRIGUEZ⁶**

¹PhD, Federal University of Lavras (UFLA) (Brazil), 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

⁴PhD student, UFLA, Agricultural engineering Department, marcelo_bahuti@hotmail.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 cilindro devido a esbeltes e ângulo da tremonha são relatadas. Além de não ser encontrado muitos relatos a respeito da influência das pressões devido a esbeltes. O trabalho teve o objetivo de avaliar as pressões normais máximas do silo variando a esbeltes e a inclinação da tremonha. Neste trabalho, foi relatado os resultados para as pressões máximas normais na parede de silos em escala piloto obtidos a partir de ensaios realizados em uma estação de teste usando um produto de fluxo livre e comparados com as obtidas pela Euro código 1, parte 4. Seis tipos diferentes de geometria de silo (esbeltez 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 para a configuração C15 durante a descarga foi superior que o Euro código 1, parte 4. Para silos muito delgados, a pressão máxima na parede do silo durante o enchimento ocorreu perto da transição, independentemente da esbeltes do silo ou do ângulo da tremonha.

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

EVALUATION OF MAXIMUM 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. In addition to not being found many reports about the influence of pressures due to slender. The aim of this work was to evaluate the maximum normal pressures in the silo wall, varying the hopper inclination to slender. In this work, the results for the maximum normal wall pressures of pilot scale silos obtained from tests carried out in a test station using a free-flowing product were reported and compared with Eurocode 1, part 4. 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 for the C15 8hd configuration during discharge was higher than the Euro code 1, part 4. For very thin silos, the maximum silo wall pressure during filling occurred near the transition, regardless of silo slender or angle of the hopper.

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). 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). Portanto, o objetivo do presente estudo foi elucidar a relação entre o padrão de fluxo e esbeltez em relação às pressões do silo.

MATERIAL E MÉTODOS: Os componentes principais consistem 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).

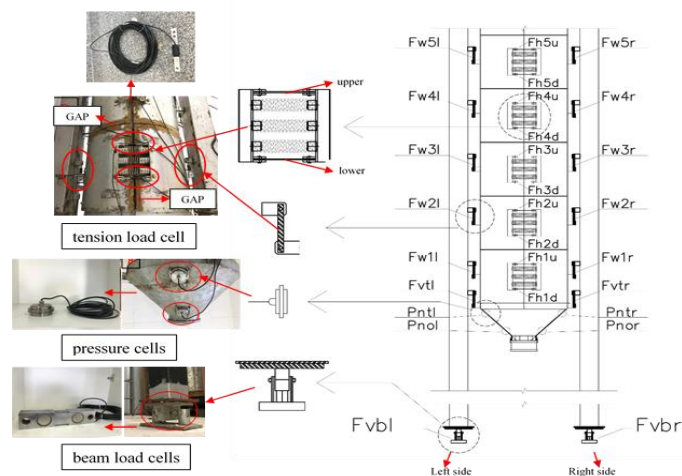


FIGURA 1. Localização das células de medição no silo piloto.

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 diferia 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). Embora a relação altura / diâmetro não fosse exatamente 4, 6 e 8, esse termo foi usado para facilitar a escrita.

RESULTADOS E DISCUSSÃO: Para facilitar a comparação, a Figura 2 mostra as pressões máximas devido ao ângulo da tremonha em comparação com a esbeltes em cada caso. Como esperado, as pressões máximas na transição foram de maiores magnitudes quando se utilizou uma tremonha caracterizada como fluxo mássico, $\beta = 15^\circ$ (C15), conforme (CEN, 2006).

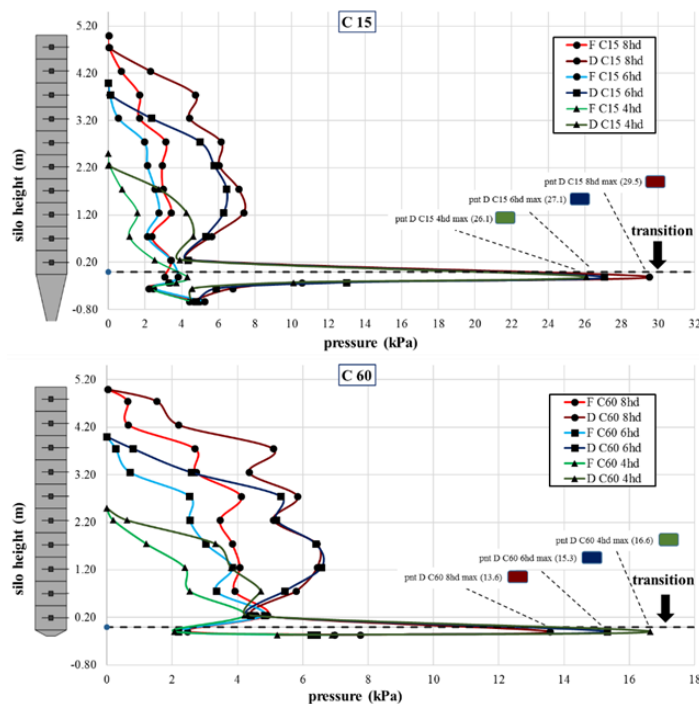


FIGURA 2. Pressões normais máximas na parede (ph) variando a esbeltes do silo.

F: Enchimento. D: Descarga.

As pressões normais máximas na parede do cilindro usando a tremonha $\beta = 15^\circ$ (C15) não mostraram padrão de distribuição de pressão máxima durante o enchimento ou descarga. No entanto, algumas observações interessantes foram registradas. Por exemplo, a pressão máxima para 8hd ocorreu ao mesmo tempo durante o enchimento e descarga, a 1/4 da altura do silo (1,25 m, ph3). Para todas as relações altura / diâmetro (4hd, 6hd e 8hd), a pressão normal máxima na parede do cilindro durante o enchimento ocorreu na mesma altura, próximo à transição em 0,25 metros (ph1). Em contraste, a pressão máxima durante a descarga ocorreu em diferentes alturas (4hd: 0,75 m, 6hd: 1,75 m e 8hd: 1,25 m, nas posições ph2, ph4 e ph3).

Para a tremonha $\beta = 60^\circ$ (C60) em todas as alturas do material (4hd, 6hd e 8hd), a pressão normal máxima na parede do cilindro durante o enchimento ocorreu em uma altura fixa, próximo à transição em 0,25 metros (ph1). Durante a descarga, porém, ocorreu em alturas diferentes, mas na mesma proporção, a 1/3 da altura máxima do silo em relação à transição (4hd: 0,75 m, 6hd: 1,25 m, e 8hd: 1,75 m, em posições ph2, ph3 e ph4). É interessante notar que para o fluxo de massa (C15), as pressões máximas na transição (pnt) aumentaram em paralelo com um aumento na esbeltes, enquanto o oposto ocorreu para o fluxo em funil (C60),

onde as pressões diminuíram em paralelo com um aumento em esbeltes, um achado que será discutido em mais detalhes abaixo.

CONCLUSÕES: As pressões normais máximas na parede do cilindro durante a descarga em comparação com o Euro código 1, parte 4, apenas a configuração com uma razão de diâmetro de altura = 8 e padrão de fluxo de massa (C15 8hd) superou o calculado pela norma. 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. 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>>.
- 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.
- 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.
- 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.