

## SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE SILO CILÍNDRICO METÁLICO VARIANDO A MASSA ESPECÍFICA DO PRODUTO ARMAZENADO

RÔMULO MARÇAL GANDIA<sup>1</sup>, WISNER COIMBRA DE PAULA<sup>2</sup>, ESTÁCIO ANTUNES DE OLIVEIRA JUNIOR<sup>3</sup>, LUIZ FELIPE SOUZA<sup>4</sup>, FRANCISCO CARLOS GOMES<sup>5</sup>, PEDRO JOSÉ AGUADO RODRIGUEZ<sup>6</sup>

<sup>1</sup>PhD student, Federal University of Lavras (UFLA) (Brazil), Agricultural engineering Department, (35) 988822405, romagandia@gmail.com

<sup>2</sup>Professor, UFLA, Engineering Department, [wisner.depaula@ufla.br](mailto:wisner.depaula@ufla.br)

<sup>3</sup>Graduation student, UFLA, Agricultural engineering Department, [estacioantunes@estudante.ufla.br](mailto:estacioantunes@estudante.ufla.br)

<sup>4</sup>Graduation student, UFLA, Agricultural engineering Department, [lfsouza94@hotmail.com](mailto:lfsouza94@hotmail.com)

<sup>5</sup>Professor, UFLA, Agricultural engineering Department, [fcgomes@deg.ufla.br](mailto:fcgomes@deg.ufla.br)

<sup>6</sup>Professor, University of León (Spain), Agricultural engineering Department, [pedro.aguado@unileon.es](mailto:pedro.aguado@unileon.es)  
Inserir aqui Titulação, Faculdade, Fone, e-mail

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

**RESUMO:** O armazenamento de produtos agrícolas tem importância mundial, visto que há grande necessidade de estocagem, sejam devido à especulação do preço de mercado futuro, logística de transporte e beneficiamento. O estudo das ações em silos é essencial para cálculos, projetos e construções de unidades armazenadoras. O uso de elementos finitos para validação de modelos experimentais e análises aprofundadas das ações do produto/silo vem sendo utilizado cada vez mais nesta área por apresentar bons resultados e relativamente menor custo em relação as estações experimentais. Dentre os parâmetros dos produtos armazenados, a massa específica, além de variar muito de produto a produto apresenta grande influência nas pressões em silos. Farelos variam entre 6,5 até 7 kN . m<sup>-3</sup>, milho e soja variam entre 7 até 8 kN . m<sup>-3</sup> e trigo varia entre 7,5 a 9 kN . m<sup>-3</sup> (EN 1991-4, 2006). Portanto neste trabalho foi elaborado um modelo numérico simulando a etapa de carregamento para três massas específicas: 6; 7,5 e 9 kN.m<sup>-3</sup> tomando como referência as dimensões do silo de uma estação experimental localizada na Universidade de León. Foi observado boa aproximação com diversos trabalhos. Verificou-se que a pequena mudança da massa específica do produto, as pressões transferidas ao silo oscilam demasiadamente.

**PALAVRAS-CHAVE:** Elementos finitos, pressão normal, pressão vertical.

### NUMERICAL SIMULATION IN A METALLIC CYLINDRICAL SILO UNDER GRAIN WITH DIFFERENT SPECIFIC MASSES

**ABSTRACT:** The storage of agricultural products has a global importance, due to the great need for storage, motivated by the speculation of the future market price, transport logistics and processing. The study of actions in silos is essential for calculations, projects and construction of storage units. The use of finite elements for validation of experimental models has been used more frequently in this area because it presents good results and relatively less cost than the experimental stations. Among the parameters of the stored materials, the specific mass, besides varying a lot from product to product, is also a property of great influence of

pressures in silos. Bran can have from 6,5 to 7 kN . m<sup>-3</sup>, corn and soy from 7 to 8 kN . m<sup>-3</sup> and wheat from 7,5 to 9 kN . m<sup>-3</sup> (EN 1991-4, 2006). Therefore, in this work a numerical model was elaborated simulating the silo loading stage for three specific masses: 6; 7,5 and 9 kN. m<sup>-3</sup> taking as reference the dimensions of the silo of an experimental station located in the University of León. A good approximation was observed with several studies. It was found that in the small oscillation of the specific mass of the stored material, the actions transferred to the silo vary considerably.

**KEYWORDS:** Finite elements, normal pressure, vertical pressure.

**INTRODUÇÃO:** Em 1980 o Brasil havia capacidade de armazenagem de 40,45 milhões de toneladas de grãos, esse valor quadriplicou em 2018, chegando a 162,32 milhões de toneladas (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2018). Dentre as principais estruturas de armazenamento existem os convencionais (por meio de sacarias) e os a graneis (silos e armazéns). Infelizmente é comum se deparar com acidentes envolvendo silos. Os acidentes podem ser ocasionados por diversos fatores. Destes fatores, considerável parte é pela falta de conhecimento entre o produto armazenado e a estrutura do silo. As propriedades físicas do produto armazenado são diretamente relacionadas às pressões exercidas no silo, tornando essencial o entendimento de cada produto em particular. A massa específica é uma propriedade dos produtos armazenados que varia muito, sendo que os farelos podem apresentar de 6.5 a 7 kN/m<sup>-3</sup>, já o milho e soja de 7 a 8 kN/m<sup>-3</sup> e o trigo de 7.5 a 9 kN/m<sup>-3</sup> (EN 1991-4, 2006). Para entendimento das ações em silos é necessário compreender as diversas teorias que embasam as normas, porém muitos fatores ainda são pouco conhecidos devido a aleatoriedade que englobam as propriedades dos produtos armazenados (diferentemente dos líquidos). É possível a análise das ações por meio do estudo experimental com estações experimentais de silos, portanto, tais estações são de alto custo. Uma alternativa de menor custo e que vem apresentando bons resultados é o estudo numérico por meio de elementos finitos. Portanto, esse trabalho visa estudar a etapa de carregamento do silo variando a massa específica por meio de elementos finitos.

**MATERIAL E MÉTODOS:** A simulação numérica foi feita com elementos finitos e foi utilizado o software Ansys 19.2. A simulação foi feita nas condições estáticas (carregamento do silo). As dimensões do silo, tremonha, inclinação da tremonha foi inspirado pelo silo da estação experimental da Universidade de León (Espanha) que foi projetada e construída pelo grupo de pesquisa do Departamento de Engenharia Agrícola e Ciências (Couto, Ruiz e Aguado, 2012; Ruiz, Couto e Aguado, 2012). O silo contém dois metros de altura e um de diâmetro com uma tremonha concêntrica de 34,3° com 48 centímetros de altura. O material do silo é metálico polido e é instrumentado de maneira que possibilita todos os esforços normais e verticais, assim como as forças de atrito na parede do silo e na tremonha. Para a simulação numérica foram utilizadas a comparação de três massas específicas do produto, variando entre 6 a 9 kN/m<sup>-3</sup> (valores que englobam a massa específica superior e inferior de grande parte dos produtos agrícola, trigo, soja, milho) (EN 1991-4, 2006). Os valores correspondentes aos demais parâmetros do produto armazenado e da chapa de aço do silo foram obtidos por referências (MOYA et al., 2002; MOYA et al., 2006; GALLEGO, RUIZ, AGUADO, 2015) e estão apresentados na Tabela 1.

TABELA 1. Parâmetros para aço e sólidos.

Parâmetro do Material	Valor
Material armazenado	
Massa Específica, $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	6, 7,5 , 9
Modulo de elasticidade, $E$ (kPa)	5000
Coefficiente de Poisson, $\nu$	0,3
Coefficiente de atrito da parede, $\mu$	0,4
Coesão, $c$ (kPa)	0,71
Angulo de dilatação do material armazenado, $\psi_i$	2,5
Efetivo Angulo de atrito interno do material armazenado, $\phi_i$	25
Aço	
Modulo de elasticidade, $E$ (kPa)	210000000
Coefficiente de Poisson, $\nu$	0,3
Espessura (m)	0,02

O modelo proposto foi realizado com material elastoplástico para simular o comportamento do sólido no interior do silo. O modelo isotrópico e linear comum foi utilizado para representar o comportamento elástico, enquanto o critério de plasticidade perfeito de Drucker e Prager (1952) foi utilizado para definir a parte plástica.

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** As curvas de pressões foram extraídas dos três modelos com diferentes massas específicas e são apresentadas abaixo, na Figura 1a (para pressões normais) e Figura 1b (para pressões verticais).

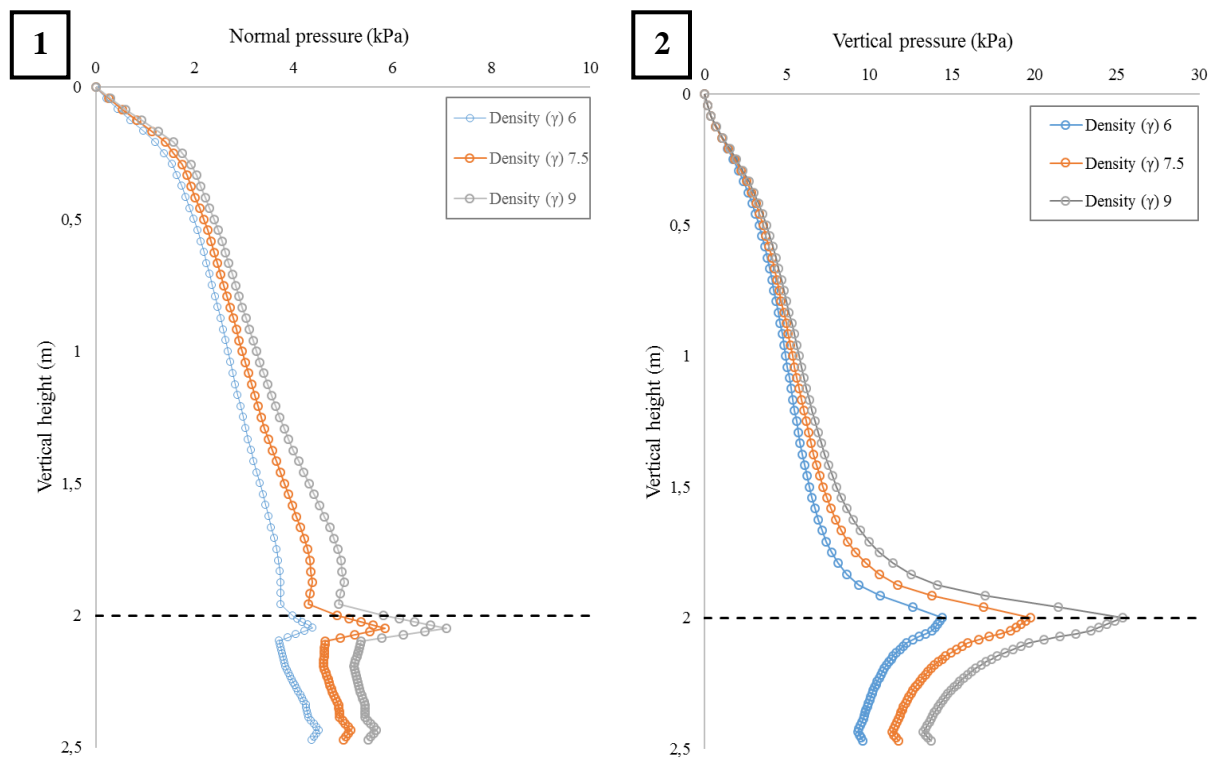


FIGURA 1. Curva das pressões normal e vertical obtida na parede e na tremonha do silo.

Observa-se um aumento de aproximadamente 30% e 57% (4,52 para 5,85 e 7,10 kPa) na zona de transição quando o material passa de 6 para 7,5 e 9 kN/m<sup>3</sup> respectivamente.

Observa-se um aumento de aproximadamente 37% e 76% (14,42 para 19,77 e 25,34 kPa) na zona de transição quando o material passa de 6 para 7,5 e 9 kN/m<sup>3</sup> respectivamente.

Como esperado na zona de transição corpo do silo/tremonha (linha pontilhada) ocorrem os picos de pressão.

As pressões obtidas neste modelo são muito próximas com o trabalho de Gallego, Ruiz e Aguado, (2015), avaliando os esforços do trigo experimentalmente, numericamente e comparando com EN 1991-4. No trabalho de Ruiz, Couto e Aguado (2012), também utilizando trigo, a pressão máxima vertical, obtida experimentalmente, no carregamento é próxima ao modelo proposto no presente trabalho.

**CONCLUSÕES:** O modelo proposto apresenta uma aproximação dos modelos experimentais e da EN 1991-4. A variação da massa específica dos grãos é uma variável de grande peso para o cálculo e projetos em silo, visto que alterando apenas 3 kN.m<sup>3</sup> ocorrem aumento de 57 a 76% nas pressões normais e verticais, respectivamente.

**AGRADECIMENTOS:** Os autores agradecem a Capes por financiar o estudo e a parceria entre a Universidade Federal de Lavras e a Universidad de León. Agradecem também a Finep por financiar o projeto da estação experimental da Universidade Federal de Lavras. Agradecem também a parceria da Universidad de León (Espanha).

## **REFERÊNCIAS:**

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento de safra brasileiro – grãos: Nono levantamento, junho 2018 – safra 2017/2017. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento. 2017. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/armazenagem/serie-historica-da-armazenagem> . Acesso em: 02 jul. 2018.

COUTO, A.; RUIZ, 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 I: Description. **Computers and Electronics in Agriculture**, 2012, vol. 85, p. 164-173.

DRUCKER, Daniel Charles; PRAGER, William. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. **Quarterly of applied mathematics**, v. 10, n. 2, p. 157-165, 1952.

EUROPEAN COMMITTEE OF STANDARDIZATION. EN 1991-4: Eurocode 1: **Basis of Design and Actions on Structures, Part 4 – Silos and Tanks**. CEN, Brussels, 2006.

GALLEGO, Eutiquio; RUIZ, Angel; AGUADO, Pedro J. Simulation of silo filling and discharge using ANSYS and comparison with experimental data. **Computers and Electronics in Agriculture**, 2015, vol. 118, p. 281-289.

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**, 2012, vol. 85, p. 174-187.

MOYA, M., et al. Mechanical properties of granular agricultural materials. **Transactions of the ASAE**, 2002, vol. 45, no 5, p. 1569.

MOYA, M., et al. Mechanical properties of granular agricultural materials, part 2. **Transactions of the ASABE**, 2006, vol. 49, no 2, p. 479-489.