

SIMULAÇÃO NUMÉRICA EM UM SILO CILÍNDRICO METÁLICO VARIANDO O COEFICIENTE DE ATRITO COM A PAREDE

RÔMULO MARÇAL GANDIA¹, WISNER COIMBRA DE PAULA², ESTÁCIO ANTUNES DE OLIVEIRA JUNIOR³, LUIZ FELIPE SOUZA⁴, FRANCISCO CARLOS GOMES⁵, PEDRO JOSÉ AGUADO RODRIGUEZ⁶

¹PhD student, Federal University of Lavras (UFLA) (Brazil), Agricultural engineering Department, (35) 998337777, romagandia@gmail.com

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

³Graduation student, UFLA, Agricultural engineering Department, estacioantunes@estudante.ufla.br

⁴Graduation student, UFLA, Agricultural engineering Department, lfsouza94@hotmail.com

⁵Professor, UFLA, Agricultural engineering Department, fcgomes@deg.ufla.br

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

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 para armazenamento. O uso de elementos finitos para validação de modelos experimentais e análises aprofundadas das ações do produto/silo vem crescendo nesta área por apresentar bons resultados e menor custo em comparação as estações experimentais. Dentre os parâmetros dos produtos armazenados, o coeficiente de atrito entre a parede do silo e o produto armazenado, além de variar muito de produto a produto apresenta grande influência nas pressões em silos. Portanto neste trabalho foi elaborado um modelo numérico simulando a etapa de carregamento para três coeficiente de atrito com a parede: 0,2; 0,4 e 0,6 tomando como referência as dimensões do silo de uma estação experimental localizada na Universidad de León (Espanha). Foi observado boa aproximação com diversos trabalhos. Verificou-se que a pequena mudança no coeficiente de atrito com a parede altera significativamente as pressões transferidas ao silo.

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

NUMERICAL SIMULATION IN A METALLIC CYLINDRICAL SILO VARIATING THE WALL FRICTION COEFFICIENT

ABSTRACT: The storage of agricultural products presents global importance, since there is a great need for storage, whether due to speculation in the future market price, transportation logistics and processing. The study of actions in silos is essential for analysis, projects and construction of storage units. The use of finite elements for validation of experimental models and more detailed analysis of the product / silo actions has been increasingly used in this area because it presents good results and relatively less cost in relation to the experimental stations. Among the parameters of the stored products, the wall friction coefficient, besides quite varying from product to product, has a great influence on the pressures in silos. Therefore, in this work, a numerical model was elaborated simulating the filling stage for three wall friction coefficient: 0.2; 0.4 and 0.6 referring to the dimensions of the silo of an

experimental station located at the Universidad de León (Spain). A fine approximation was observed between the numerical results in this work and some reference papers. It was found that the small change in the wall friction coefficient of the stored product changes quite the pressures transferred to the silo

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. O coeficiente de atrito com a parede é uma propriedade dos produtos armazenados com a parede do silo que varia muito, sendo que os farelos e soja podem apresentar de 0,24 a 0,48, já o milho e soja de 0,22 a 0,53 e o trigo de 0,24 a 0,57 (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 o coeficiente de atrito com a parede 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 utilizados três diferentes coeficientes de atrito com a parede e o produto, variando entre 0.2 a 0.6 (valores que englobam a coeficiente de atrito com a parede 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; GALLEGU, RUIZ, AGUADO, 2015) e estão apresentados nas Tabelas 1.

TABELA 1. Parâmetros para aço e sólidos.

Parâmetro do Material	Valor
Material armazenado	
Massa Específica, γ (kN.m ⁻³)	6, 7,5, 9
Modulo de elasticidade, E (kPa)	5000
Coeficiente de Poisson, ν	0,3
Coeficiente de atrito da parede, μ	0,4
Coesão, c (kPa)	0,71
Angulo de dilatação do material armazenado, ψ_i	2,5
Efetivo Angulo de atrito interno do material armazenado, ϕ_i	25
Aço	
Modulo de elasticidade, E (kPa)	210000000
Coeficiente de Poisson, ν	0,3
Espessura (m)	0,02

O modelo proposto foi realizado com material elastoplastico 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: A partir dos modelos numéricos gerados foram extraídas informações tais como deformação, tensão e tensão principal da massa do produto no interior do silo de acordo com a variação do coeficiente de atrito (Figura 2). Para simplificação dos resultados, plotou-se os modelos gerados com mesma escala de cor.

Observa-se que na Figura 2^a, referente ao deslocamento pelo eixo vertical (z) em decorrência do aumento do coeficiente de atrito, a diminuição do deslocamento da massa de grãos, visualmente observado pelo afunilamento da parte superior da massa e numericamente confirmado pelo valor do deslocamento máximo (DMX) plotado em cada caso, sendo: 0.003177; 0,0029 e 0,002694 respectivamente para o coeficiente de atrito 0,2; 0,4 e 0,6.

A tensão na direção z e a tensão principal, referente a força vertical também está de acordo com o esperado, aumentando de acordo com a diminuição do coeficiente de atrito. Podendo ser observado na Figura 1b e Figura 1c. Verifica os valores máximos (DMX) expostos tal afirmação.

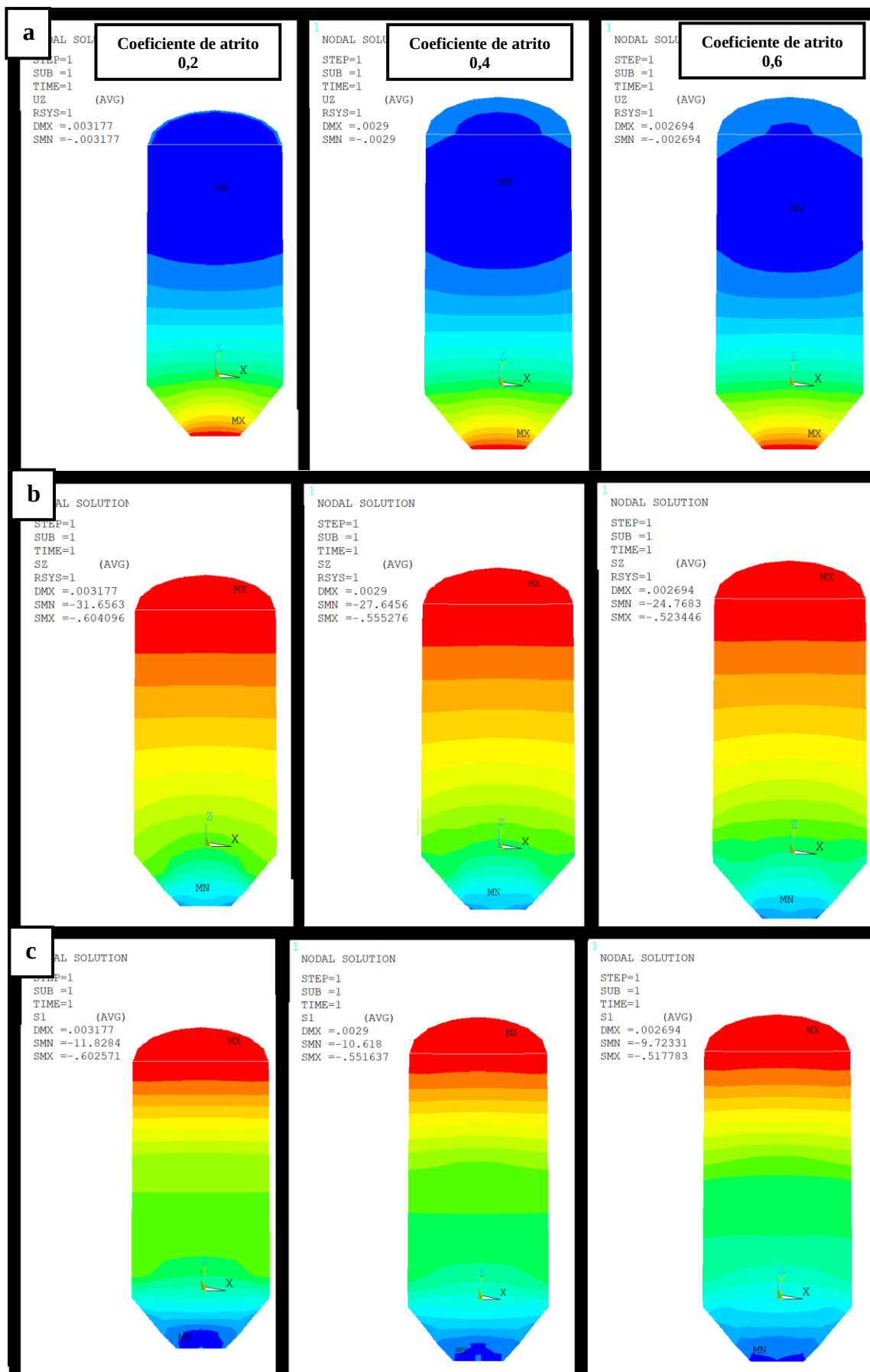


FIGURA 1. Comportamento do deslocamento (a), tensão (b) e tensão principal (c) pelo aumento do coeficiente de atrito.

As curvas de pressões foram extraídas dos três modelos numéricos com coeficientes de atrito com a parede e o produto armazenado e são apresentadas abaixo, na Figura 2a (para pressões normais) e Figura 2b (para pressões verticais).

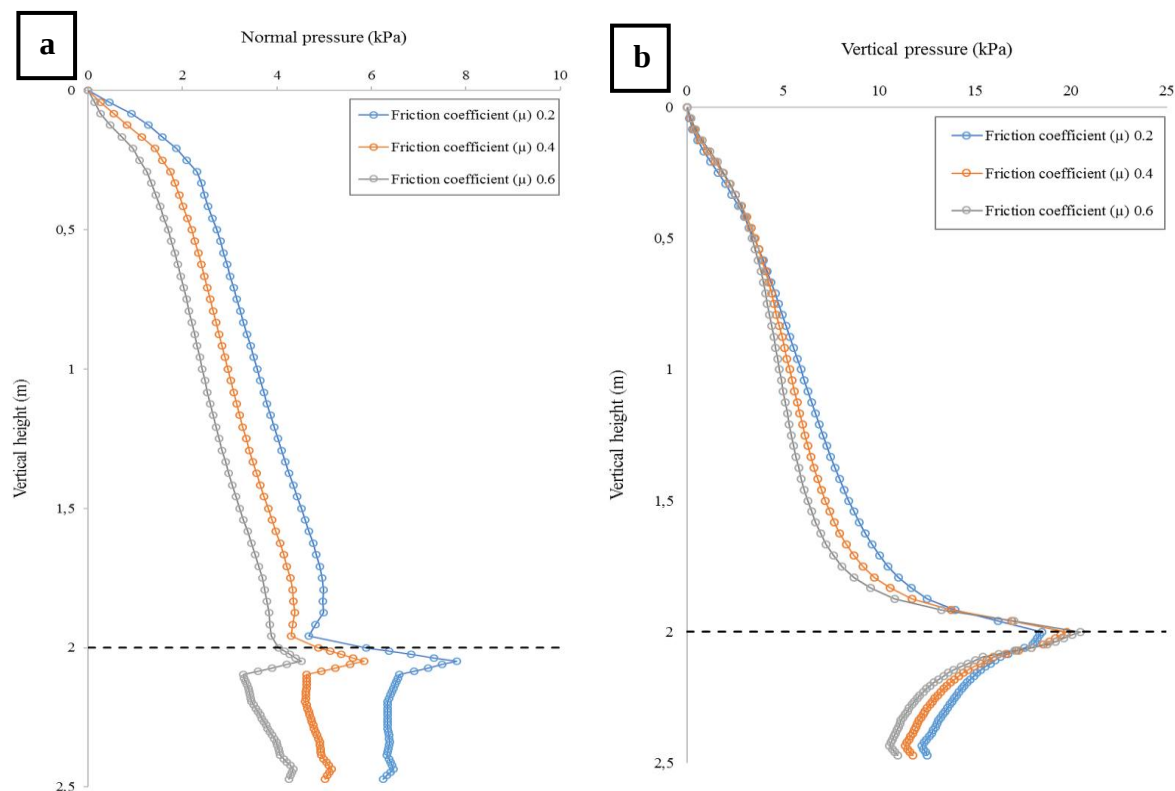


FIGURA 2. Curva de pressão normal e vertical obtida na parede e tremonha do silo.

Na Figura 2a é possível observar a diminuição da pressão normal em relação ao aumento do coeficiente de atrito. O pico de pressão ocorre um pouco abaixo da transição (linha pontilhada que delimita o corpo do silo e a tremonha). Verifica-se que a diminuição da pressão em relação ao aumento do coeficiente de atrito foi de aproximadamente 30% e 73% (7,80 para 5,85 e 4,52 kPa), respectivamente para o menor coeficiente de atrito (0,2) até o maior coeficiente de atrito (0,6), apresentando a menor pressão normal.

Já na Figura 2b observa-se um aumento da pressão vertical de aproximadamente 7% e 11% (18,47 para 19,77 e 20,47 kPa) na zona de transição quando o coeficiente de atrito com a parede e o material armazenado passa de 0,2 para 0,4 e 0,6, respectivamente. Como esperado na zona de transição corpo do silo/tremonha (linha pontilhada) ocorrem os picos de pressão.

Verifica-se que no trabalho de Gallego, Ruiz e Aguado, (2015), avaliando os esforços do trigo experimentalmente, numericamente e comparando com EN 1991-4 são encontradas pressões com magnitudes próximas ao desse trabalho para propriedades semelhantes do material armazenado. 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 numéricos, assim como da EN 1991-4. A variação do coeficiente de atrito com a parede é uma variável que influencia consideravelmente o estudo e projetos em silo, visto que alterando tal

coeficiente em apenas 0.4 ocorre uma diminuição da pressão normal de 73 e um aumento de 11% na pressão vertical.

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: Modelos de 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.