

## ANÁLISE DE TENSÕES VERTICAIS NOS PRODUTOS ARMAZENADOS EM SILOS PELO METODO DE ELEMENTOS FINITOS

HYGOR CESAR SOARES RODRIGUES<sup>1</sup>, VALNEIDE RODRIGUES DA SILVA<sup>2</sup>, RAFAEL TORRES DO NASCIMENTO<sup>3</sup>, ARIADNE SOARES MEIRA<sup>4</sup>, JOSÉ WALLACE BARBOSA DO NASCIMENTO<sup>5</sup>

Mestrando em Engenharia de Agrícola, UFCG, Campina Grande-PB, [hygor2\\_soares@hotmail.com](mailto:hygor2_soares@hotmail.com)

<sup>2</sup> Doutoranda em Engenharia de Processos, UFCG, Campina Grande-PB, [rval707@yahoo.com.br](mailto:rval707@yahoo.com.br)

<sup>3</sup> Mestrando em Engenharia de Agrícola, UFCG, Campina Grande-PB, [cgtorresrafael@gmail.com](mailto:cgtorresrafael@gmail.com)

<sup>4</sup> Doutoranda em Engenharia de Agrícola, UFCG, Campina Grande-PB, [ariadnesm\\_eng@hotmail.com](mailto:ariadnesm_eng@hotmail.com)

<sup>5,6</sup> Dr. Professor de Engenharia Agrícola, UFFG, Campina Grande, [wallace@deag.ufcg.edu.br](mailto:wallace@deag.ufcg.edu.br)

Apresentado no

Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC

Palmas/TO – Brasil

17 a 19 de setembro de 2019

**RESUMO:** Silos são estruturas amplamente utilizadas em indústrias e fazendas para armazenar, alimentar e processar produtos sólidos que são essenciais para agricultura, mineração, processamento de produtos químicos, transporte e outras indústrias. No entanto, pouco se sabe sobre todos os parâmetros que venham a provocar alterações nas pressões em paredes de silos. Devido a isso, existem silos operando em condições não ideais. Diante disso, o objetivo desse trabalho foi construir um modelo matemático com o método dos elementos finitos a partir programa de simulação numérica ANSYS para estimar as pressões nas paredes de silos com condições de contorno condizentes com a realidade, condições essas que na maioria dos casos é quase impossível de ser realizadas por equações analíticas, com isso deixando o modelo muito mais próximo da realidade. A pressões obtidas no programa tiveram comportamento idênticos aos encontrados na literatura, com a não linearidade, comportamento esse semelhante ao da teoria de pressão em paredes de silos de Janssen.

**PALAVRAS-CHAVE:** Silos verticais, elemento finito, tensões

## ANALYSIS OF VERTICAL VOLTAGES IN THE PRODUCT STORED IN SILOS BY THE METHOD OF FINITE ELEMENTS

**ABSTRACT:** Silos are structures widely used in industries and farms to store, feed and process solid products that are essential for agriculture, mining, chemical processing, transportation and other industries. However, little is known about all the parameters that will cause changes in the pressures in silo walls. Because of this, there are silos operating in non-ideal conditions. . Therefore, the objective of this work was to construct a mathematical model with the finite element method from numerical simulation program ANSYS to estimate the pressures on the walls of silos with contour conditions consistent with reality, which conditions are in most cases almost impossible to perform by analytical equations, thus leaving the model much closer to reality. . The pressures obtained in the program had the same behavior as those found in the literature, with nonlinearity, a behavior similar to that of the pressure theory in Janssen silo walls.

**Keywords:** Vertical silos, finite element, tensions

## INTRODUÇÃO

Silos são estruturas amplamente utilizadas em indústrias e fazendas para armazenar, alimentar e processar produtos sólidos que são essenciais para agricultura, mineração, processamento de produtos químicos, transporte e outras indústrias (Wójcik et al., 2017). Podem ser construídos com os mais diversos materiais, como concreto armado, aço, madeira, argamassa armada, etc., porém os mais utilizados atualmente na agricultura são os silos metálicos com chapa corrugada (PALMA, 2005).

Para que novas unidades de armazenamento sejam projetadas com segurança, economia e eficiência é essencial o correto conhecimento das máximas pressões capazes de atuar sobre as paredes do silo durante sua vida operacional (Madrona, 2008). Apesar disto, tão somente o conhecimento de seus valores máximos não é suficiente para garantir um projeto bem desenvolvido, uma vez que imperfeições das paredes e excentricidade de carga e descarga podem ocasionar o desenvolvimento de ações não previstas e desuniformes ao longo da profundidade da parede dos silos (Lopes neto et al. 2014).

Tradicionalmente, as pressões atuando em paredes de silo foram obtidas analiticamente usando as equações clássicas de Janssen (1895) ou Reimbert e Reimbert (1956). No entanto, os métodos analíticos nem sempre predizem corretamente essas pressões, especialmente quando as condições da situação em análise são diferentes das contempladas na formulação de um método (González montellano et al. 2012). Portanto, estudos analíticos e numéricos para determinação das pressões sobre paredes de silos são muitas vezes necessários para serem validados usando informações obtidas de testes realizados em silos de teste (Ramírez et al. 2010).

O método dos elementos finitos (MEF) é uma importante ferramenta de cálculo matemático que permite resolver inúmeros problemas de engenharia, muitas vezes com abordagem mais realista do que os modelos físicos. Pode ser aplicado amplamente em projetos de silos, assumindo hipóteses difíceis de serem investigadas por meio de cálculos analíticos (Guaita, 2003). Portanto o objetivo do trabalho foi determinar as propriedades físicas e de fluxo, como também construir um modelo matemático com o método dos elementos finitos a partir programa de simulação numérica ANSYS da arroquina para empregar nos cálculos teóricos e utiliza-las na simulação numérica com elemento finito no *software* ANSYS e a validação do comportamento experimental em um modelo desenvolvido com o método dos elementos finitos.

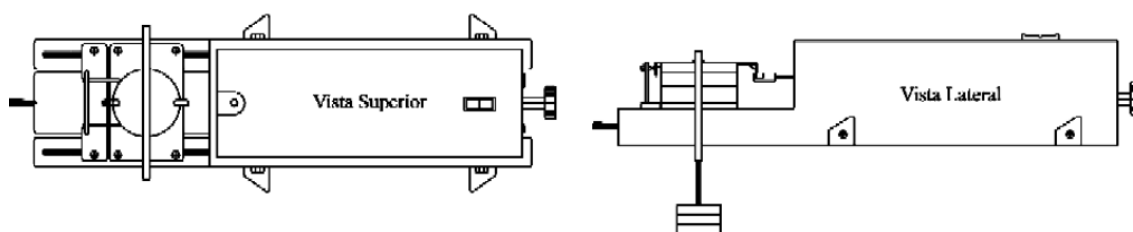
## MATERIAL E MÉTODOS

Todas as etapas desse projeto foram realizadas no Laboratório de Construções Rurais e Ambiente – LACRA na Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Para alcançar os objetivos propostos, o mesmo foi dividido em três etapas: 1) foi determinada as propriedades físicas, de fluxo da arroquina que foram utilizados na pesquisa para a obtenção dos parâmetros empregados no modelo numérico; 2) construção do protótipo do silo vertical, com paredes de aço; e 3) foi modelado um silo com elementos finitos no *software* ANSYS.

Na determinação da densidade, ângulo de atrito interno e ângulo de atrito do produto com a parede foram realizadas através do ensaio de cisalhamento com metodologia proposta por BHMD (1985). Para tal utilizou-se o aparelho de cisalhamento Translation Shear Tester TSG 70-40 conhecido como Jenike Shear Cell (Figura 1), recomendado pela maioria das normas estrangeiras.

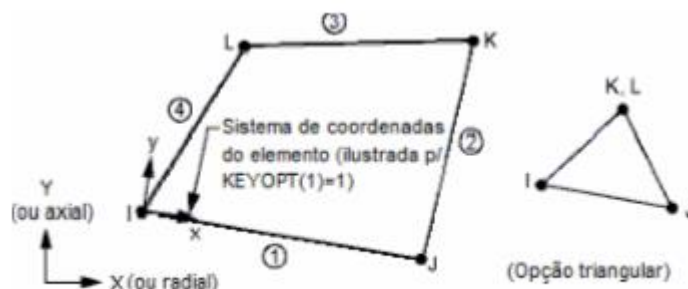
Foram utilizadas as séries 7kg (5, 3,5 e 2 kg) e 5kg (3,5, 2 e 1 kg) como cargas de pré-cisalhamento e de cisalhamento.

**Figura 1** - Esquema do aparelho de cisalhamento direto de Jenike.



Para o elemento utilizado para representar o produto nas análises numéricas bidimensional no programa ANSYS foi o PLANE42 que consiste em um elemento plano de 4 nós e dois graus de liberdade em cada nó: translações no eixo x e y, e permite análise simétrica (Figura 2). O PLANE42 é um elemento que permite usar o modelo elasto-plástico de Drucker-Prager. Para análises numéricas é o que melhor representa o produto na fase estática e dinâmica.

**Figura 2 - Características do elemento finito PLANE42**



Para representar a interação entre o produto armazenado e a parede do silo na simulação numérica com o método dos elementos finitos, no programa ANSYS, foi necessário criar um par de contato do tipo Superfície-para-Superfície, através dos elementos CONTA171 que simula a interação entre o produto e a parede (Figura 3), e o TARGET169 (Figura 4) que representa a superfície alvo (Parede).

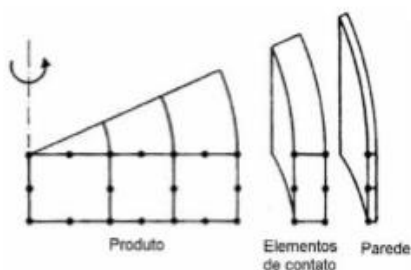


Figura 3 – representação do contato

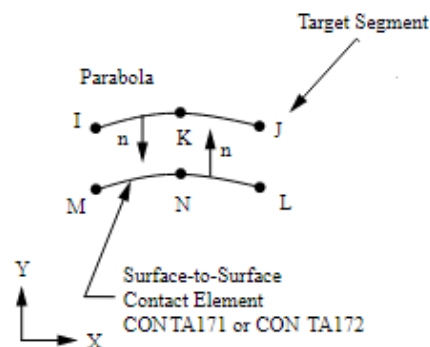


Figura 4 - Elem. Conta171 e target169

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pelos resultados obtidos na Tabela 1, observa-se que com a diminuição da carga o ângulo de atrito aumentou, para o efetivo ângulo de atrito ocorreu pouca diferença entre as cargas. Observou-se que com a diminuição da carga ocorre diminuição na tensão principal e na coesão do produto estudado.

Tabela1 - Propriedades de fluxo da Arrozina

Carga (kg)	$\phi_i$ (°)	$\phi_e$ (°)	$f_c$ (Pa)	$\sigma_m$ (Pa)	C (Pa)
7	35,23 °	38,31°	2361,41	18811,19	611,63

Carga (kg)	$\phi_i$ (°)	$\phi_e$ (°)	$f_c$ (Pa)	$\sigma_m$ (Pa)	C (Pa)
5	36,21 °	39,16 °	1671,56	13701,18	423,9
Carga (kg)	$\phi_i$ (°)	$\phi_e$ (°)	$f_c$ (Pa)	$\sigma_m$ (Pa)	C (Pa)
3,5	38,83 °	38,99 °	71,31	10117,93	17,07

$\Phi_i$  - Ângulo de atrito interno,  $\phi_e$  - Efetivo ângulo de atrito interno,  $f_c$  - Tensão inconfineda de deslizamento,  $\sigma_m$  - Tensão principal maior de consolidação e C - Coesão

Pela classificação da fluidez dos produtos segundo Jenike, o índice de fluxo a arrozina foi superior a 10 portanto, segundo a classificação de fluidez de produtos de Jenike, o produto tem fluxo livre.

Observa-se na Tabela 2 que as características geométricas para que dimensionamento da tremonha pelo método de Jenike.

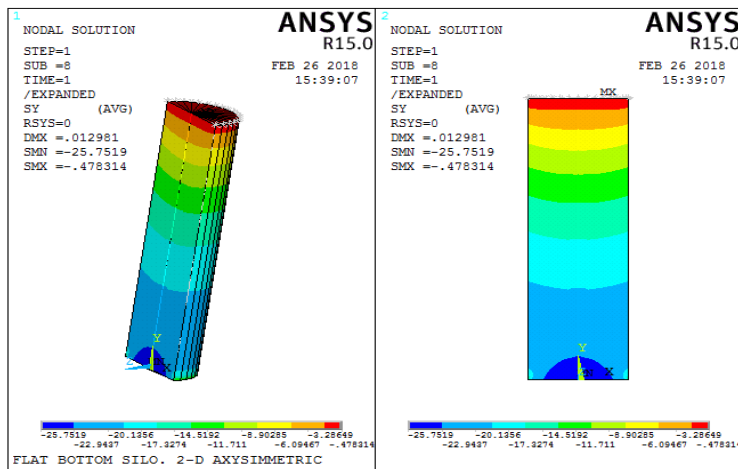
Tabela 2 - Características geométricas da tremonha na parede estudadas

Parede	$\theta_m$	$\phi_{wu}$	Cr	ff	Inclinação da ff
Aço liso	67,53	23,28	0,43	1,48	34,03
Aço rugoso	78,91	30,74	0,59	1,41	35,31
Alumínio	67,82	23,48	0,43	1,48	34,06

brusca  
base  
do

a  
se tem

do produto e uma diminuição das pressões.



As tensões verticais atuando no produto armazenado obtidas pela simulação com o método numérico foram condizentes com resultados encontrados na literatura. A queda de pressão próxima a do silo se dar pelo falado modelo numérico ser simulado usando os princípios da mecânica do contínuo, portanto, quando descontinuidade do modelo uma concentração de tensão

Analisando as tensões verticais ao longo do sentido longitudinal em pontos centrais do silo, observou-se que as tensões aumentaram em função da altura do silo.

Analisando as tensões verticais a partir da seção transversal do silo simulado, notou-se que as tensões próxima da parede do silo diminuirão.

## CONCLUSÃO

A arrozina tem comportamento de um material coeso, pois sua coesão determinada pelo teste de cisalhamento foi entre 17 e 611.33 Pa

A função fluxo em todos os casos analisados permaneceu acima do fator fluxo da tremonha, caracterizando como produto de difícil fluidez.

Os resultados das tensões dos grãos na parede obtidas através da simulação numérica, modelada para analisar o protótipo do silo real, tiveram comportamentos correspondente as pressões reais encontradas na literatura

### **AGRADECIMENTOS**

Ao Capes pela concessão de bolsa de pesquisa ao primeiro autor.

### **REFERÊNCIAS**

- González Montellano, C.; Ramírez, A.; Fuentes, J. M.; Ayuga, F. Numerical effects derived from em masse filling of agricultural silos in DEM simulations. *Computers and Electronics in Agriculture*. 81, 2012, p.113–123.
- Guaita, M.; COUTO, A.; Ayuga, F. Numerical Simulation of wall pressure during discharge of granular material from cylindrical silos with eccentric hoppers. *Biosystems Engineering*, v.85, 2003, p. 101-109.
- 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*. V.18, n. 6, 2014, p.652-657.
- Madrona, F. S. Pressões em silos esbeltos com descarga excêntrica. São Carlos: EESC/USP, 196p. Dissertação de Mestrado, 2008.
- Palma, G. Pressões e Fluxo em Silos Esbeltos ( $H/D \geq 1,5$ ). São Carlos: EESC/USP, 121p. Dissertação de Mestrado, 2005.
- Ramírez, A.; Nielsen, J.; Ayuga, F. On the use of plate-type normal pressure cells in silos part 2: Validation for pressure measurements. *Computers and electronics in Agriculture*, 71, 2010, p. 64-70.
- Wójcik, M.; Sondej, M.; Rejowski, K.; Tejchman, J. Full-scale experiments on wheat flow in steel silo composed of corrugated walls and columns. 311, 2017, p.537-555.