

PROPRIEDADES MECANICAS DE PRODUTOS GRANULARES PARA SIMULAÇÃO DE PRESSÃO E FLUXO EM SILOS VERTICAIS

ARIADNE SOARES MEIRA*; VALNEIDE RODRIGUES DA SILVA²; PATRÍCIO GOMES LEITE³; RENATA TOMAZ DIAS⁴; JORDÂNIO INÁCIO MARQUES⁵

¹Mestre em Engenharia Agrícola, UFCG, Campina Grande-PB, ariadnesm_eng@hotmail.com;

²Mestre em Engenharia Agrícola, UFCG, Campina Grande-PB, rval707@gmail.com;

³Mestre em Engenharia Agrícola, UFCG, Campina Grande-PB, pgomesleite@gmail.com;

⁴Mestranda em Engenharia Agrícola, UFCG, Campina Grande-PB, renatatomazdias@outlook.com;

⁵Mestre em Engenharia Agrícola, UFCG, Campina Grande-PB, jordanioinacio@hotmail.com

Apresentado no

Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2018
21 a 24 de agosto de 2018 – Maceió-AL, Brasil

RESUMO: Objetiva-se com o presente trabalho determinar propriedades mecânicas da massa de grãos de milho e soja em três teores de umidade distintos para posterior simulação da distribuição de pressões e fluxo no silo. Os grãos estiveram com 10, 12 e 14% de teor de umidade, ensaiados em uma célula de compressão uniaxial sob a máquina universal de compressão. O coeficiente de Poisson foi determinado para o carregamento e descarregamento assim como o módulo de elasticidade foi o experimental e o calculado. Já o ângulo de dilatação levou em consideração a deformação vertical e o deslocamento horizontal. Concluiu-se que o coeficiente de Poisson foi maior no descarregamento que no carregamento e não sofreu alterações considerável com o acréscimo do teor de umidade na massa de grãos de milho e soja; o módulo de elasticidade tanto para o milho quanto para a soja, decresce com o teor de umidade do produto e o ângulo de dilatação é inversamente proporcional a carga de compressão aplicada.

PALAVRAS-CHAVE: Poisson, ângulo de dilatação, módulo de elasticidade

MECHANICAL PROPERTIES OF GRANULAR PRODUCTS FOR PRESSURE AND FLOW SIMULATION IN VERTICAL SILOS

ABSTRACT: The goal is with the present work determine such properties of corn and soybeans in three different moisture levels for subsequent simulation of the distribution of pressure and flow in the silo. The beans were with 10, 12 and 14% moisture content, tested in uniaxial compression cell under the universal machine. Poisson coefficient was determined for loading and unloading as well as the modulus of elasticity was the experimental and calculated. Dilatância angle already took into account the vertical and horizontal displacement deformation. It was concluded that the Poisson coefficient was higher in the unloading that loading and not suffer considerable changes with the addition of moisture content in corn and soybeans; the modulus of elasticity for both corn and soybeans, decreases with the moisture content of the product and the dilatância angle is inversely proportional to compressive load applied.

KEYWORDS: Poisson, dilatância angle, modulus of elasticity

INTRODUÇÃO

A soja é o cereal mais produzido no mundo e o milho o grão mais consumido. O Brasil é o maior produtor de grãos de milho e maior exportador de grãos de soja do mundo. Segundo a Conab (2018) a safra 2017/ 2018 de milho e soja foi de 511,7 milhões de toneladas de grãos, em contrapartida, a capacidade estática do Brasil até o segundo semestre de 2017 era de 162 mil toneladas, aproximadamente 3,18% da produção destes grãos, fazendo-se necessário a elaboração de projetos e expansão dos silos verticais para armazenamento em todo o território nacional.

Na elaboração de projetos de silos, os modelos numéricos estão sendo largamente utilizados para a simulação das mais diversas situações ocorridas durante o carregamento e descarregamento, sendo uma das principais situações a distribuição das pressões. Para tanto, é necessário que se determinem as propriedades mecânicas dos produtos a serem armazenados.

As simulações das ações atuantes em silos verticais realizadas por Staron (2014); Gallego et.al. (2015); Wang et.al. (2015); Fank et.al. (2015); Cheng et.al. (2016); Kachurenko & Bannikov (2016); Zheng et.al. (2017) entre outros pesquisadores, evidenciam a necessidade da simulação para o melhor entendimento do arranjo da massa de grãos no interior do silo.

Na elaboração de modelos numéricos, algumas propriedades mecânicas são solicitadas como dados de entrada e segundo Gallego (2015) as principais são o coeficiente de Poisson (ν), o módulo de elasticidade (E) e o ângulo de dilatação (ψ) dos produtos armazenáveis, sendo o Método dos Elementos Finitos a técnica mais adequada para determinar as tensões e os deslocamentos que aparecem nas paredes ou no produto tanto para o carregamento quanto o descarregamento do silo.

Alguns autores como Bastos & Ferraz (2014) e Putri (2015) determinam as propriedades mecânicas de um grão individual a fim de determinarem a resistência deste grão a compressão e ruptura individual, não sendo representativo para a situação de grãos armazenados em silos verticais. Stasiak (2014) e Ostrowska-Ligeża & Lenart (2015) determinam as propriedades mecânicas módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson de uma massa de produtos pulverulentos como fécula de batata e cacau em pó respectivamente, encontrando uma relação direta entre o teor de umidade dos produtos e os resultados das propriedades mecânicas.

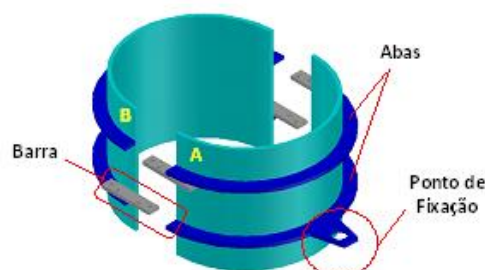
Sendo assim, o presente trabalho tem por objetivo determinar experimentalmente as propriedades mecânicas de uma determinada massa de grãos agroindustriais para elaboração de rotinas para simulação numérica do fluxo dos produtos armazenados e das pressões exercidas pelos produtos nas paredes dos silos.

MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios para determinação das propriedades mecânicas foram realizados no laboratório de Materiais Recicláveis e Resíduos Sólidos, na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campus de Campina Grande - PB.

Foram determinadas em triplicata as propriedades mecânicas como o coeficiente de Poisson (ν), módulo de elasticidade (E) e o ângulo de dilatação (ψ) da massa de grãos de milho e soja com teores de umidade de 10, 12 e 14%, sendo utilizada uma célula de compressão uniaxial (Figura 1).

Figura 1. Célula de compressão Uniaxial



A célula de compressão uniaxial era composta por dois semicírculos (A – ponto de fixação à base e B – extremidade livre), com 125 mm de raio e 200 mm de altura, confeccionada em chapa de aço de espessura 6,35 mm (1/4”), relação Altura/Diâmetro (H/D) de 0,8 e o volume de $9,817 \times 10^{-3} \text{ m}^3$, possuindo duas abas laterais com distância entre si de 77,5 mm e equidistância das bordas de 55,0 mm e largura de 20,0 mm, posicionadas em suas uniões.

Fazem parte deste conjunto duas tampas (Superior – com duas alças e Inferior – sem alças), circulares de mesmo material com diâmetro de 250 mm, às quais foi apoiada uma célula de carga

(modelo LT 6/3; FS: 30 kN da marca KYOWA) para registrar a força de compressão e um transdutor LVDT (marca KYOWA, capacidade máxima de 30 mm) para registrar o deslocamento vertical.

Em cada barra forma posicionados longitudinalmente extensômetros *strain gages*, tipo KFG-5-120-C1-11, fator de escala de $2,12 \pm 1,0\%$ e fator de resistência de $119,8 \pm 0,2 \Omega$, da marca KYOWA – Kyowa Electronic Instruments CO. LTD, para medição de deformação do material, conectados ao *datalogger* Modelo Spider8 600Hz de fabricação da HBM. Anterior e posteriormente ao processo de colagem foi realizada, com auxílio de um multímetro, a verificação da resistência dos extensômetros para aferição de prováveis danos aos seus micros filamentos.

Os parâmetros de elasticidade e plasticidade foram determinados pela compressão da massa de grãos com base na metodologia proposta por Sawicki (1994) cujo procedimento consistiu de duas etapas: carregamento (OA) e descarregamento.

O carregamento (OA) é dotado de duas fases simultâneas no material: da fase reversível (elástica) e da fase irreversível (plástica), baseadas na teoria elasto-plástica. Nesta fase, o fator K_0 calculado, representa a relação entre a tensão horizontal, σ_x , e a tensão vertical, σ_y , com uma dependência linear.

Na fase do descarregamento, o ensaio foi dividido em dois estágios: AB e BC, sendo AB, a fração linear do gráfico, caracterizado pela deformação elástica onde foram extraídas as informações sobre o módulo de elasticidade (E), e coeficiente de Poisson, (ν); já no segundo estágio, caracterizado pela deformação elástica e plástica onde o produto foi considerado reversível, sendo então, regido pela lei de Hooke.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As propriedades mecânicas do milho e da soja para cargas de compressão de 5, 10, 15 e 20 kN, estão apresentadas na tabela 1 seguinte, propriedades estas que segundo Wang et. al. (2015) devem relacionar ao menos duas etapas do armazenamento que são o carregamento e o descarregamento.

Tabela 1. Coeficiente de Poisson para milho e soja

Produto	Teor de		Cargas de Compressão				
	Umidade	Poisson	5 (kN)	10 (kN)	15 (kN)	20 (kN)	Média
Milho	10	ν^*	0,12	0,14	0,13	0,19	0,14
		ν	0,21	0,22	0,23	0,22	0,20
	12	ν^*	0,12	0,18	0,10	0,14	0,13
		ν	0,29	0,24	0,23	0,24	0,25
	14	ν^*	0,08	0,14	0,13	0,18	0,13
		ν	0,20	0,23	0,22	0,20	0,21
Soja	10	ν^*	0,04	0,05	0,09	0,12	0,07
		ν	0,16	0,18	0,23	0,22	0,19
	12	ν^*	0,08	0,14	0,15	0,12	0,12
		ν	0,18	0,26	0,21	0,23	0,22
	14	ν^*	0,04	0,11	0,17	0,12	0,11
		ν	0,21	0,22	0,22	0,16	0,20

(ν^*) – Coeficiente de Poisson no carregamento

(ν) – Coeficiente de Poisson no descarregamento

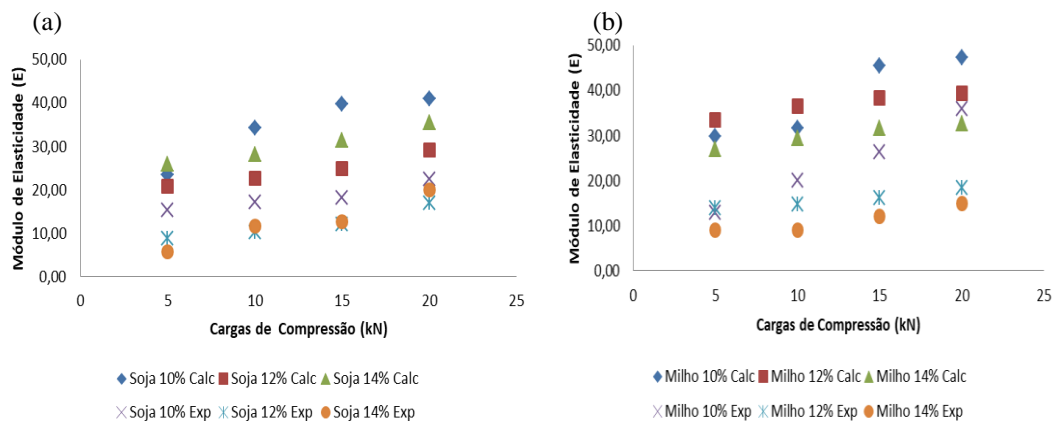
É notório que o teor de umidade dos grãos de milho e soja não tem muita influência sobre o coeficiente de Poisson haja vista a pouca variação numérica apresentada. Com relação à resposta do coeficiente de Poisson com as cargas de compressão impostas, pode-se notar que as cargas de 5, 10, 15 e 20 kN não apresentaram uma variação considerável.

Segundo Gustafsson (2013), os valores típicos para o coeficiente de Poisson para materiais de grão grosso são de 0,15 a 0,35. Deve-se notar que, na situação de carregamento o coeficiente de Poisson para a massa de grãos de milho e soja nos três teores de umidade se manteve sempre aquém do indicado na literatura supracitada, sendo validados os valores obtidos para a situação de descarregamento.

Costa et al. (2014) e Lopes Neto et al. (2016) para massa de grãos de arroz e feijão, apresentam um coeficiente de Poisson no descarregamento maior que no carregamento, sem diferença numérica entre os valores obtidos com diferentes teores de umidade.

Para a massa de grãos de soja, foi determinado o módulo de elasticidade para os três teores de umidade com os quais os grãos se encontravam, sendo possível a comparação. (Gráficos 1a e 1b).

Gráficos 1 – Módulo de elasticidade da soja e do milho



O módulo de elasticidade da massa de grãos de soja foi maior quando calculado pelas equações do que experimentalmente, variando em torno de 47% para o teor de umidade de 10%, 50% para o teor de umidade de 12% e 58% para o teor de umidade de 14%. O módulo de elasticidade segue a proporção de inversibilidade quando relacionado ao teor de umidade dos grãos, efeito confirmado pela afirmativa feita por Costa et al (2014) que relaciona o decréscimo do módulo de elasticidade ao acréscimo de teor de umidade com o qual os grãos se encontram. Lopes Neto et al. (2016) para a massa de grãos de feijão e arroz, também encontra valores de módulo de elasticidade menores nos maiores teores de umidade estudados.

Assim como para a soja, o módulo de elasticidade da massa de grãos de milho também foi determinada para três teores de umidade, em modelo experimental. Onde, determinando algumas propriedades mecânicas do milho, Costa et al. (2014) encontra o módulo de elasticidade para uma determinada massa de grãos de arroz e milho triturado variando entre 15 e 30° sendo esta propriedade um fator contrário ao acréscimo do teor de umidade dos referidos produtos. Afirmativa esta, confirmada experimental e empiricamente no presente trabalho.

CONCLUSÕES

- O coeficiente de Poisson foi maior no descarregamento que no carregamento e não sofreu alterações consideráveis com o acréscimo do teor de umidade na massa de grãos de milho e soja;

- O módulo de elasticidade tanto para a massa de grãos de milho quanto de soja, decresce com o teor de umidade do produto, ficando evidente o acréscimo de valores obtidos pelas equações sugeridas na literatura;
- O ângulo de dilatação é inversamente proporcional a carga de compressão aplicada na célula de compressão uniaxial confeccionada, apresentando maiores valores com carga de 5kN e menores com a carga de 20kN.

AGRADECIMENTOS

A Capes pela concessão de bolsa de pesquisa dos autores.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bastos, A. C. & Ferraz, A. C. de O. Mechanical properties of castor beans subject to different drying temperatures aiming to disrupt the bean coat. *Revista de Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, v.34, n.1, p.93-101, 2014
- Cheng, X.D.; Yan, X.J. & Hu, M.Z. The effect of storage pressure on the mechanical properties of paddy grains. *Journal of Stored Products Research*. v.68, p.19-24, 2016
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento – Safra 2017/2018 para milho e soja. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=2>, Acesso em: 20/01/2018
- Costa, C. A. da; Lopes Neto, J. P.; NASCIMENTO, J. W. B. do; Diniz, M. J. & Silva, V. R. da. Propriedades mecânicas e de fluxo de produtos agroindustriais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Campina Grande, PB, ISSN 1807-1929 v.18, n.7, p.774–780, 2014
- Fank, M. Z.; Christ, D.; Cardoso, D. L.; Willrich, F. L. & Lorenzi, V. Coeficiente de transferência de carga nas fundações de silos verticais cilíndricos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.19, n.9, p.887–891. ISSN 1807-1929, 2015
- 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
- Gustafsson, G.; Häggblad, H. A.; Jonsén, P. & Marklund, P. Determination of bulk properties and fracture data for iron ore pellets using instrumented confined compression experiments. *Powder Technology*, v.241, p.19-27, 2013
- Kachurenko, V. V. & Bannikov, D. O. Experimental study of horizontal pressure distribution on corrugated steel silo walls. *Ciência e progresso do transporte. Visnyk de Dnipropetrovs'k. Ukraine, Universidade Nacional de Transporte Ferroviário*, v.4, n.64, p. 151-160, 2016. ISSN 2307-3489 (Print), ISSN 2307-6666 (Online).
- Lopes Neto, J. P.; Nascimento, J. W. B. do; Marques, J. I. & Costa, C. A. da. Mechanical properties of grain in silos for simulation designs. *Revista de Engenharia Agrícola, Jaboticabal*. v.36, n.4. ISSN 1809-4430, 2016
- Ostrowska-Ligeza, E. & Lenart, A. Influence of water activity on the compressibility and mechanical properties of cocoa products. *Food Science and Technology*, v.60, p.1054-1060, 2015
- Putri, R. E.; Yahya, A.; Adam, N. M. & Aziz, S. A. Correlation of Moisture Content to Selected Mechanical Properties of Rice Grain Sample. *International journal on advanced Science endeniengineering information technology*. v.5, n.5, p. 264-267, 2015. ISSN: 2088-5334.
- Sawicki, A. Elasto-plastic interpretation of oedometric test. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, v.41, p.111-131, 1994
- Staron, L.; Lagrée, P.Y. & Popinet, S. Continuum simulation of the discharge of the granular silo. *The European Physical Journal E*. v.5, n.37, p. 1-12, 2014. DOI 10.1140/epje/i2014-14005-6.
- Stasiak, M. Determination of elastic parameters of grain with oedometric and acoustic methods. *Researchin Agricultural Engineering*. v.2, n.49, p.56–60, 2003
- Zheng, Q. J; Xia, B. S.; Pan, R. H. & Yu, A. B. Piping flow of cohesive granular materials in silo modelled by finite element method. *Granular Matter*. v.2, n.19, p. 1-13, 2017. DOI 10.1007/s10035-016-0688-z
- Wang, Y.; Lu, Y. & Ooi, J. Y. A numerical study of wall pressure and granular flow in a flat-bottomed silo. *Powder Technology*. n.282, p. 43–54, 2015