

## **PRESSÕES E FLUXO DE PRODUTOS ALIMENTÍCIOS EM SILO VERTICAL DE PAREDE LISA**

ARIADNE SOARES MEIRA<sup>1\*</sup>; RENATA TOMAZ VIEIRA DIAS;  
PATRÍCIO GOMES LEITE<sup>3</sup>; JORDÂNIO INÁCIO MARQUES<sup>4</sup>; HYGOR SOARES RODRIGUES<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Doutoranda em Engenharia Agrícola, UFCG, Campina Grande-PB, ariadnesm\_eng@hotmail.com;

<sup>2</sup>Mestranda em Engenharia Agrícola, UFCG, Campina Grande-PB, renatatomazdias@outlook.com;

<sup>3</sup>Doutorando em Engenharia Agrícola, UFCG, Campina Grande-PB, pgomesleite@gmail.com;

<sup>4</sup>Doutorando em Engenharia Agrícola, UFCG, Campina Grande-PB, jordanioinacio@hotmail.com;

<sup>5</sup>Graduando em Engenharia Agrícola, UFCG, Campina Grande-PB, hygor2.\_soares@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:** O silo, de maneira geral, é um elemento viável de estocagem, sendo necessário que, na elaboração de projetos e construção de novos silos, fatores como a magnitude e distribuição das pressões durante a carga e a descarga sejam objeto de estudo tendo em vista que ainda apresentam algumas incógnitas. Logo, o presente trabalho teve por objetivo, o estudo das pressões e do padrão de fluxo de produtos pulverulentos alimentícios armazenados em silo de parede lisa. Adotando para tanto, a determinação das propriedades de fluxo através do aparelho de cisalhamento translacional que utiliza os anéis de Jenike – “*Jenike Shear Cell*”- e para a determinação das pressões a norma europeia BS EN 1991:4 (2006). Obtendo por resultados de propriedades de fluxo ângulo de atrito e efetivo ângulo de atrito dos produtos com valores acima dos normatizados. Com relação às pressões, há uma tendência de uniformidade com relação aos produtos, sendo a Pvf (carregamento) mais evidente que as demais como prediz a norma.

**PALAVRAS-CHAVE:** Amidos, normatização, Jenike

### **PRESSURE AND FLOW OF FOOD PRODUCTS IN VERTICAL SILO OF SMOOTH WALL**

**ABSTRACT:** The silo, in General, is a viable storage element, requiring that, in the preparation of projects and construction of new silos, factors such as the magnitude and distribution of pressure during the loading and unloading are object of study as yet have some unknowns. Soon, the present work had as objective, the study of pressure and flow pattern of sift food products stored in silos of smooth wall. Adopting the determination of flow through the apparatus of translational shear using the Jenike rings – “*Jenike Shear Cell*”-and for the determination of the European standard BS EN 1991:4 (2006). Obtaining results of flow properties and effective friction angle angle of friction of the above standardized products. About the pressures, there is a trend of uniformity with respect to the products, being the Pvf (loading) more evident than the other as predicts the norm.

**KEYWORDS:** Starches, standardization, Jenike

### **INTRODUÇÃO**

Fenômenos característicos podem ser gerados durante o fluxo no descarregamento que segundo Wojcik (2017) podem ser: o aumento súbito e significativo das tensões de parede, diferentes padrões de fluxo, formação e propagação de zonas de cisalhamento no interior do silo, flutuação de pressões e fortes efeitos autógenos dinâmico-acústicos. Além disso, o padrão de fluxo é influenciado pela altura do silo, pelo fato das pressões apresentarem valores distintos para cada nível e também, devido a uma razão diferente entre o diâmetro médio do grão e a relação altura/diâmetro (H/D).

Mesmo em condições simétricas de carregamento e descarregamento concêntricos, faz-se necessária a previsão do padrão de fluxo para que se reconheça o padrão de pressão que ocorrerá principalmente durante a descarga (Ding, 2013).

A teoria de Janssen (1895) norteia as normas estrangeiras e internacionais para predição das pressões em silos e relaciona as propriedades de fluxo do produto armazenado com a distribuição das pressões no corpo do silo e na tremonha.

Conforme Coelho (2016), as pressões de carregamento apresentam distribuição simétrica aplicada em todos os pontos verticais do silo que estejam em contato com o produto armazenado, embora haja acréscimo nos valores decorrentes da profundidade. Também chamadas de pressões estáticas, as pressões no carregamento são distribuídas entre pressão horizontal à parede do silo, pressão vertical à parede e pressão de atrito no contato do produto com a parede.

As pressões que ocorrem durante a descarga não são perfeitamente entendidas, levando-se em conta que a pressão no início da descarga é muito próxima da pressão no final da descarga. Também pode ser notada uma discrepância existente entre a pressão calculada e a medida experimentalmente na extremidade superior da tremonha (Ding, 2014).

Lopes Neto et al. (2014) estudando a distribuição das pressões exercidas pela areia no silo de chapa lisa, encontra valores experimentais abaixo dos encontrados pela resolução de diversas normas internacionais, sendo evidenciada a norma BS EN 1991:4 (2006) sendo uma das que apresentam maiores valores, ficando evidente a majoração dos cálculos e superdimensionamento do projeto obtido através das especificações desta norma.

Fank (2015) enfatiza a distribuição de tensões em um ponto na massa do produto armazenado constatando que embora a distribuição interna seja praticamente uniforme, assim como o carregamento, a distribuição das pressões nas colunas de sustentação é desuniforme quando ocorrendo o fluxo.

Sendo assim, objetiva-se com o presente trabalho, o estudo das pressões e do padrão de fluxo de produtos pulverulentos alimentícios armazenados em silo de parede lisa, sendo determinadas durante o carregamento e o descarregamento, segundo a resolução das equações propostas na norma europeia BS EN 1991:4 (2006).

## **MATERIAL E MÉTODOS**

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Construções Rurais e Ambiente (LACRA) do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), campus de Campina Grande – PB, Brasil.

Os ensaios de cisalhamento foram em triplicata para cada produto utilizando amido de milho e de arroz, denominados AM e AA, respectivamente, os quais apresentam granulometrias similares.

Para a granulometria adotou-se o método do peneiramento, utilizando-se 300g de massa de produto na bateria de peneiras com 10 vibrações por segundo, durante 5 minutos. Os produtos ainda foram classificados em função das dimensões do diâmetro de suas partículas, baseada nas considerações de Calil Júnior (1984) como pulverulentos extra finos.

A umidade dos produtos foi determinada a partir do método da estufa que expõe o produto a  $105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  por 24 horas.

Os ensaios de cisalhamento seguiram as recomendações do Manual – “Operating Instruction for the Translational Shear Tester TSG – 70/140”, exclusivo para o manuseio do Jenike Shear Cell. Com os dados obtidos a partir do aparelho de cisalhamento de Jenike pode-se construir gráficos de tensão normal versus cisalhamento que possibilita traçar semicírculos de tensões de Mohr responsáveis por determinar a Tensão principal de consolidação ( $\sigma_m$ ) e a Tensão confinada ( $f_c$ ).

Após este feito, traçar os gráficos de tensão normal versus tensão de cisalhamento (semicírculo de Mohr) no programa gráfico AutoCAD e com este determinar-se as propriedades de fluxo tais como: ângulo de atrito interno ( $\phi_i$ ), efetivo ângulo de atrito interno ( $\phi_e$ ) e ângulo de atrito do produto com a parede ( $\phi_w$ ).

Para a determinação das pressões exercidas pelos amidos, foram utilizadas as equações Eq.1 a Eq. 6 que tem por base a Teoria de Janssen e são sugeridas na norma BS EN 1991:4 (2006) e plotadas em gráficos para a comparação simultânea.

$$Phf(z) = Ph_0 Yj(z) \quad \text{Eq. (1)}$$

$$Pwf(z) = \mu Ph_0 Yj(z) \quad \text{Eq. (2)}$$

$$Pvf(z) = \frac{Ph_0}{K} Yj(z) \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde:

$$Ph_0(z) = \gamma K z_0 \quad \text{Eq. (4)}$$

$$z_0 = \frac{1}{K \mu U} A \quad \text{Eq. (5)}$$

$$Yj(z) = 1 - e^{-\frac{z}{z_0}} \quad \text{Eq. (6)}$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por propriedades de fluxo dos amidos em estudo temos o ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito, peso específico consolidado, coesão e ângulo de atrito dos produtos com a parede em aço liso, destacados na tabela 1 seguinte.

Tabela 1. Propriedades de fluxo dos amidos

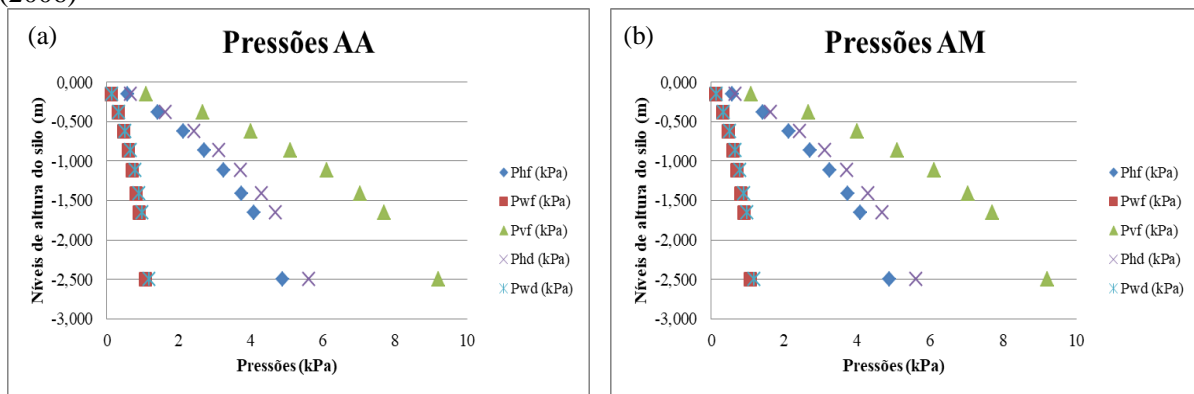
Produto	Propriedades de Fluxo							
	$\phi_i$ (°)		$\phi_e$ (°)		$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	C	$\phi_w$	
	inf	sup	inf	sup			inf	sup
AA	26	28	33	35	8,60	660	10,8	17,4
AM	28	31	31	32	6,57	258	11,2	19,1

Nota-se que, apesar da mesma granulometria, os amidos apresentam propriedades de fluxo bastante distintas, porém, apresentando tendência similar com relação ao ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito e ângulo de atrito dos amidos com a parede em aço liso.

Com relação à coesão, mesmo apresentando diâmetro médio de partículas equivalente, o amido de arroz (AA) é mais coeso, numericamente, que o amido de milho (AM). Quando relacionando o peso específico consolidado, o valor para o AA é mais aproximado da farinha de trigo normatizada que o AM. Lobato et al. (2016) encontra uma relação direta entre o teor de umidade do produto em estudo e as propriedades de fluxo, explicando em parte, a diferença entre os amidos em questão, haja vista, que estiveram com teor de umidade de 4 e 7% respectivamente.

Para a determinação das pressões partindo das equações normalizadas, foram determinadas as pressões de carregamento e descarregamento ao longo do corpo do silo sendo referidas como Phf as pressões horizontais de carregamento, Pwf a pressão advinda do atrito do produto com a parede interna do silo durante o carregamento, Pvf a pressão vertical no carregamento, Phd a pressão horizontal no descarregamento e Pwd a pressão advinda do atrito do produto com a parede interna do silo durante o descarregamento (Figura 1a e 1b)

Figura 1 – Pressões de carregamento e descarregamento dos amidos segundo a norma BS EN 1991:4 (2006)



Por pressão, ambos os amidos apresentam por pressão mais alta a Pvf, assim como expresso na norma BS EN 1991:4 (2006) que afirma que no ato do carregamento, as maiores pressões são as distribuídas verticalmente no interior do silo. Realizando simulações com silo prismático, Goodney (2017) também encontra maiores valores para as pressões verticais no carregamento concêntrico.

A pressão de atrito sofre uma pequena alteração durante a transição entre o carregamento e o descarregamento chegando à ordem de 10% de acréscimo durante essa transição. Lopes Neto et al. (2014) em seu estudo, encontra valores de pressão de atrito obtidos por quatro normas internacionais e afirma que para todas as normas, os valores teóricos foram aproximados aos valores obtidos experimentalmente.

Já a pressão horizontal no descarregamento foi em torno de 20% maior que a pressão horizontal no carregamento, muito disso pelo fato de que a norma BS EN 1991:4 (2006) utiliza um coeficiente de sobrepressão para determinar as pressões no descarregamento.

Wang (2014) realizando estudos com simulação de pressão encontra valores de pressões durante o carregamento a partir da norma BS EN 1991:4 (2006) superiores aos encontrados durante a fase experimental e de simulação, assim como os valores das pressões durante o descarregamento, ficando evidente o desajuste de tal norma para a situação imposta.

## CONCLUSÃO

Conclui-se então, que mesmo os amidos apresentando mesma granulometria, há a individualização das propriedades de fluxo, sendo diferentes entre os produtos, sendo evidenciados a coesão e o peso específico como propriedades que mais caracterizam e individualizam os produtos.

Com relação as pressões, a pressão vertical se sobressai sobre as demais durante o carregamento e durante o descarregamento a pressão horizontal, sendo esta majorada da pressão horizontal de carregamento pelo coeficiente de sobrepressão.

## AGRADECIMENTOS

A Capes pela concessão de bolsa de pesquisa dos autores.

## REFERÊNCIAS

- BS EN 1991-4- Eurocode 1. Actions on structures. Silos and tanks. 2006. 112p.
- Calil Júnior, C. Sobresiones en las paredes de los silos para almacenamiento productos pulverulentos cohesivos. Universidad Politecnica de Barcelona. Tese em Engenharia Industrial, 1984.
- Coelho, L. C. (2016). Software para cálculo de fluxo e pressões em silos cilindricos metálicos para armazenamento de produtos agrícolas e industriais. (Dissertação de Mestrado). 105f. Mestrado em Engenharia de Estruturas, São Carlos, 2016
- Ding, S.; Rotter, J. M.; Ooi, J. Y.; Enstad, G.; Xub, D. Normal pressures and frictional traction son shallow conical hopper walls after concentric filling: Predictions and experiments. Chemical Engineering Science, p. 264–272, 2013

- Ding, S.; Ji, Y.; Senbin, Y.; Rotter, J.M.; Li, Q. Measurements of pressure and frictional tractions along walls of a large-scale conical shallow hopper and comparison with Eurocode1991-4:2006. *Thin-Walled Structures*, p. 231–238, 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*, 2015 887–891p.
- Goodey, R.J.; Brown, C.J.; Rotter, J.M. Rectangular steel silos: Finite element predictions of filling wall pressures. *Engineering Structures*, n.132, p. 61–69, 2017
- Janssen, J. Versuche uber Getreidedruck in Silozellen. *Z. Ver. Dtsch. Ing.*, 1895. 1045–1049p.
- Lobato, J. C. M.; Mascarenhas, F. P.; Mesquita, A. L. A.; Mesquita, A. L. A. conical hopper design for mass flow – case of red mud. *HOLOS*, Year 32, Vol. 2, 2016
- Lopes Neto, J. P.; Nascimento, J. W. B.; Fank, M. Z. Forças verticais e de atrito em silos cilíndricos com fundo plano. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, v.18, n.6, p.652–657, 2014.
- Wang, Y.; Yong Lu, Y.; Ooi, J. Y. Finite element modelling of wall pressures in a cylindrical silo with conical hopper using an Arbitrary Lagrangian–Eulerian formulation. *Powder Technology*, n.257, p.181–190, 2014
- Wojcik, M.; Sondej, M.; Rejowski, K.; Tejchman, J. Full-scale experiments on wheat flow in steel silo composed of corrugated walls and columns. *Powder Technology*, 2017.