

PROPRIEDADES DE FLUXO DE PRODUTOS PULVERULENTOS ALIMENTÍCIOS PELO POWDER FLOW TESTER E JENIKE SHEAR CELL

ARIADNE SOARES MEIRA^{1*}; RENATA TOMAZ VIEIRA DIAS²;
PATRÍCIO GOMES LEITE³; VALNEIDE RODRIGUES DA SILVA; HYGOR SOARES RODRIGUES⁵

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

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

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

⁴Doutorando em Engenharia de Processos, UFCG, Campina Grande-PB, rval707@gmail.com;

⁵Graduando 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: No presente trabalho o amido de arroz, o amido de milho, a fécula de batata e a fécula de mandioca tiveram suas propriedades de fluxo analisadas através do cisalhamento em dois aparelhos distintos: o Jenike Shear Cell (aparelho de cisalhamento translacional TGS 70/140) e o Powder Flow Tester (aparelho de cisalhamento rotacional fabricado pela Brookfield), com o objetivo do cálculo do orifício mínimo de descarga dos produtos. Com o Jenike Shear Cell, os valores obtidos do ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito, coesão e ângulo de atrito com a parede em aço liso, se mantiveram relativamente parecidos com os valores indicados pelas normas Australian Standard (AS 3774 – 1990) e Eurocod1 (BS EM 1991- 4:2006). Por deterem alto poder coesivo, o amido de milho e a fécula de batata, nas condições impostas nos ensaios, não apresentaram meios para o cálculo do orifício mínimo da sua descarga por nenhum dos dois ensaios. Para ensaios no Powder Flow Tester, o diâmetro mínimo do orifício de descarga foi entre 0,05 e 0,15 apenas para a fécula de mandioca, mostrando uma grande discrepância entre os testes realizados.

PALAVRAS-CHAVE: orifício de descarga, dimensionamento, silo

PROPERTIES POWDERY PRODUCTS FLOW FOOD BY POWDER FLOW TESTER AND JENIKE SHEAR CELL

ABSTRACT: In this study rice starch, corn starch, potato starch and cassava starch had their flow properties analyzed by shear in two separate devices: the Jenike Shear Cell (shear apparatus translational TGS 70/140) and Powder Flow Tester (rotational shear apparatus manufactured by Brookfield) for the purpose of calculating the minimum discharge orifice of the products. With Jenike Shear Cell, the values obtained from the internal friction angle, effective friction angle, cohesion and friction angle with the wall smooth steel, were relatively similar to the values indicated by the standards Australian Standard (AS 3774-1990) and Eurocod1 (BS IN 1991- 4: 2006). For detaining high cohesive power, corn starch and potato starch, the conditions imposed in the tests did not show means for calculating the minimum hole being discharged by any of the two tests. For testing the Powder Flow Tester, the minimum diameter of the discharge port was between 0.05 and 0.15 only for cassava starch, showing a large discrepancy between the tests.

KEY WORDS: discharge orifice, sizing, silo

INTRODUÇÃO

Atualmente o Brasil possui, segundo a Conab (2016), capacidade para armazenar apenas 5 % de tudo o que produz em suas unidades armazenadoras, havendo-se assim, a necessidade de projetos eficientes de silos armazenadores para resguardo da produção e venda em tempos de demanda.

Os projetos de silos para armazenamento de produtos agrícolas segundo Carrion (2015) dependem diretamente do cálculo das propriedades físicas e de fluxo desses produtos, visando o seu dimensionamento de maneira segura e econômica.

Há uma grande quantidade e variedade de produtos pulverulentos alimentícios produzidos, e ainda nos dias de hoje não há uma maneira precisa para se obterem todas as informações sobre o seu comportamento durante o armazenamento, manuseio e processamento (Fitzpatrick, 2004).

As propriedades de fluxo dos produtos dependem da sua composição e características físicas, tais como a distribuição do tamanho das partículas, forma das partículas, a estrutura de superfície, densidade de partícula, densidade, teor de água e a composição química (Crowley et al, 2014)

No entanto, a capacidade de pós finos de fluir é complicado pela presença de forças inter partículas (forças eletrostáticas ou capilares, forças de Van der Waals) que se tornam preponderante em comparação com as forças gravitacionais e/ou hidrodinâmicas (Yang, 2005).

Jenike (1964) foi pioneiro na aplicação das células de cisalhamento como técnica para medir propriedades de fluxo do um pó. Em um conjunto com os dados de propriedade medidos, ele analisou a tensão bidimensional aplicada e desenvolveu uma metodologia matemática para determinar o ângulo mínimo entre a tremonha e a horizontal e o diâmetro mínimo de orifício de descarga para tremonhas em forma de cunha.

Sabendo-se de todas estas características intrínsecas às propriedades de fluxo, o presente trabalho teve por objetivo comparar as propriedades de fluxo e o diâmetro mínimo para a descarga de produtos pulverulentos alimentícios obtidos através de dois diferentes aparelhos de cisalhamento, a fim de caracterizar melhor cada produto analisado e otimizar o projeto do silo armazenador de cada um destes.

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 testes realizados no aparelho de cisalhamento transversal que utiliza a célula de Jenike e no aparelho de cisalhamento rotacional conhecido como PFT tiveram por finalidade caracterizar os produtos quanto as propriedades de fluxo. Foram utilizados nessa pesquisa dois amidos, (de milho e de arroz), e duas féculas (de batata e de mandioca), adquiridos no comércio local, denominados neste trabalho como AA (Amido de Arroz), AM (Amido de Milho), FB (Fécula de Batata) e FM (Fécula de Mandioca), apresentando entre si 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. No presente trabalho, cada produto foi ensaiado com dois teores de umidade distintos.

Os ensaios de cisalhamento seguiram as recomendações do Manual – “Operating Instruction for the Translational Shear Tester TSG – 70/140”, exclusivo para o manuseio deste aparelho utilizando o conjunto de anéis que compõem a célula de Jenike. Assim como o PFT, que tem seu manual baseado na norma ASTM – D – 6128 (Jenike Shear Tester Standard), para o processo dos ensaios de cisalhamento.

A partir dos resultados obtidos com os ensaios no aparelho de cisalhamento de Jenike, utilizou-se o programa gráfico AutoCAD, para traçar os gráficos de tensão normal versus tensão de cisalhamento (semicírculo de Mohr) e com este determinaram-se as propriedades de fluxo de ângulo de atrito interno (ϕ_i), efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e) e ângulo de atrito do produto com a parede (ϕ_w).

Todos os comandos de execução do PFT (Powder Flow Tester) são iniciados a partir do software Powder Flow Pro Software 1.2, que permite a escolha de tipos de teste e capturas de tela, bem como curvas de fluxo automático com carga máxima utilizada pelo aparelho para o cisalhamento rotacional dos produtos testados de 4,819 KPa.

As propriedades de fluxo obtidas através dos ensaios nos dois aparelhos de cisalhamento Jenike Shear Cell e Powder Flow Tester foram comparadas com valores estabelecidos pelas normas

internacionais Australian Standard (AS 3774 – 1990) e Eurocode1 (BS EN 1991- 4:2006) para a farinha de trigo, tendo em vista que este produto apresenta características aproximadas dos produtos em estudo neste trabalho.

No cálculo do diâmetro mínimo do orifício de descarga á partir de ensaios realizados no Jenike, foi utilizada a equação:

$$D = \frac{H(\theta) * \sigma_{cr}}{\gamma}$$

proposta na BMHB (1985), que leva em consideração a densidade média de cada produto nos distintos teores de umidade assim como da tensão crítica de cada produto encontrada na intersecção entre a reta função fluxo do produto e fator fluxo da tremonha, assim como a função H(θ) da tremonha.

No cálculo do diâmetro mínimo para a descarga dos produtos mensurado a partir dos ensaios realizados no PFT, que utiliza a equação:

$$D = \frac{2 * \sigma_{cr} * 1000}{\gamma * g}$$

que leva em consideração a densidade média de cada produto nos distintos teores de umidade assim como a tensão crítica de cada produto.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O teor de umidade dos produtos estudados foi determinado pelo método da estufa e variaram entre 9,8 a 17,5% para umidade de armazenamento e 14,4 a 18,7% para umidade de laboratório. Durante os ensaios, Lopes Neto et al. (2009) encontrou o teor de umidade médio para o amido de milho de 12,2% e para a fécula de mandioca de 12,6 %.

Baseando-se nas considerações de Callil Júnior (1990), os produtos foram caracterizados como pulverulentos extrafinos, exceto o AA (Amido de Arroz) que por esta classificação é designado como pulverulento coesivo em função das dimensões do diâmetro de suas partículas.

Na Tabela 1 seguem os valores de ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito, peso específico e coesão do amido de arroz, amido de milho, fécula de batata e fécula de mandioca, obtidos através do Jenike Shear Cell.

Tabela 1. Ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito, peso específico e coesão por Jenike Shear Cell

Produto	U(%)	Jenike					
		φ _i (°)		φ _e (°)		γ	C
		inf	sup	inf	sup		
A.A.	U1	26,0	28,0	33,0	35,0	8,60	660
	U2	32,0	35,0	37,0	39,0	8,47	468
A.M.	U1	28,0	31,0	31,0	32,0	6,57	258
	U2	31,0	33,0	32,0	34,0	6,26	156
F.B.	U1	22,0	26,0	24,0	28,0	8,78	255
	U2	22,0	23,0	25,0	28,0	8,32	242
F.M.	U1	28,0	30,0	32,0	32,0	6,78	363
	U2	27,0	31,0	30,0	32,0	6,43	274

U = Teor de umidade; φ_i= ângulo de atrito interno, φ_e = efetivo ângulo de atrito; γ = peso específico consolidado (KN/m³); C = coesão.

A Tabela 2 representa os valores de ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito, peso específico e coesão do AA, AM, FB e FM obtidos através do Powder Flow Tester.

Tabela 2. Ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito, peso específico e coesão por Powder Flow Tester

Produto	U(%)	PFT					
		ϕ_i (°)		ϕ_e (°)		γ	C
		inf	sup	inf	sup		
A.A.	U1	19,2	27,3	23,9	27,3	7,22	370
	U2	15,0	21,2	18,6	22,4	6,95	276
A.M.	U1	17,4	21,1	20,3	32,3	5,07	213
	U2	22,6	26,9	26,0	26,9	4,94	276
F.B.	U1	23,1	24,5	24,6	26,2	7,61	170
	U2	21,1	24,2	27,6	35,6	6,93	324
F.M.	U1	23,0	34,9	41,4	53,0	5,43	770
	U2	23,6	24,7	26,5	35,9	6,13	502

Comparando os valores de ângulo de atrito interno obtido a partir dos ensaios de cisalhamento no Jenike Shear Cell e no Powder Flow Tester, admite-se que, em favor de que a amostra permanece no interior do anel durante toda a sequência de cargas, o PFT (Powder Flow Tester) apresenta valores mais baixos, independente do teor de umidade em que o produto se encontra.

Não houve intersecção entre as retas da FF e ff para o AA, AM e a FB. A FM foi o único produto onde pode calcular-se o diâmetro mínimo de descarga nos dois aparelhos de cisalhamento. Isto se deve ao fato de ser um produto com baixo peso específico e alta tensão crítica. Para a FM com o teor de umidade de armazenamento, o valor do diâmetro mínimo é equivalente nos dois ensaios de cisalhamento. Já com um teor de umidade maior, houve uma diferença superior a 300% entre os valores do orifício de descarga. Podendo ser explicado pelo fato de que o valor de tensão crítica encontrado através dos testes de cisalhamento também foram bastante distintos, induzindo assim, ao erro no final do cálculo.

Tabela 3. Diâmetro de orifício de descarga

Prod.	Jenike				PFT		
	H	σ_{cr}	γ	D	σ_{cr}	γ	D
A.A.1	2,52	367	8,44	0,11	-	7,50	-
A.A.2	2,54	815	8,31	0,25	-	7,32	-
A.M.1	2,49	-	6,45	-	136	5,65	0,05
A.M.2	2,48	-	6,14	-	-	5,22	-
F.B.1	2,51	-	8,61	-	340	7,09	0,09
F.B.2	2,47	224	8,32	0,07	193	8,90	0,06
F.M.1	2,50	499	6,71	0,19	387	5,96	0,15
F.M.2	2,48	850	6,30	0,33	115	6,10	0,05

σ_{cr} – Tensão crítica média (Pa), γ - peso específico médio (KN/m³), D – diâmetro mínimo de orifício de descarga do silo (m).

Lopes Neto et al. (2009) não obteve êxito no cálculo para o diâmetro mínimo do orifício de descarga para a FM. Nóbrega (2003) no cálculo das propriedades de fluxo de rações avícolas também não obteve êxito nos cálculos de diâmetro de orifício de descarga por não haver intersecção entre as retas de FF e ff.

Ainda segundo BMHB (1985) e Leite (2014), como não houve intersecção entre as curvas do fator fluxo e da função fluxo, não foi possível determinar a tensão crítica (σ_{cr}).

Tanto Fitzpatrick et al. (2004) quanto Lopes Neto et al. (2009) afirmam que a metodologia de Jenike para a determinação do orifício de descarga pode, em alguns casos, calcular valores questionáveis, afirmativa esta, confirmada pelos dados obtidos neste trabalho.

Conforme afirmativa apresentada por Slettengren (2016), as propriedades de fluxo obtidas através do Powder Flow Tester diferem para menos quando comparadas aos valores encontrados a partir dos ensaios no Jenike Shear Cell, confirmando o ocorrido no presente trabalho.

O teste de cisalhamento rotacional executado no PFT, quando comparado ao translacional de Jenike com carga inicial de pré-cisalhamento de 5,0kg, apresentou valores bem abaixo nos quesitos coesão, ângulo de atrito interno e efetivo ângulo de atrito. Quando os testes de cisalhamento a diferença entre valores foi bem menor, porém, ainda muito significativa.

Pode ser lançada ainda outra hipótese de que, como o aparelho de cisalhamento de Jenike é translacional e o aparelho de cisalhamento PFT é rotacional, pode haver influencia na obtenção das propriedades de fluxo.

CONCLUSÃO

Assim, conclui-se que, para o amido de arroz (AA), amido de milho (AM), fécula de batata (FB) e fécula de mandioca (FM) as propriedades de fluxo obtidas no Powder Flow Tester são aquém das obtidas através do Jenike Shear Cell.

Pelo fato do alto poder higroscópico e coesivo dos produtos estudados, o orifício de descarga apresenta inviabilidade de execução, haja vista que, há discrepância significativa quando calculado levando em consideração o teor de umidade do produto, chegando a não existir em alguns casos.

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 cilíndricos 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 on 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 über 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.