

**NOTA TÉCNICA:****PROPRIEDADES DE FLUXO E PRESSÕES PARA PROJETO DE SILO VERTICAL ARMAZENADOR DE AÇÚCARES**

Ariadne Soares Meira¹, Elizangela de Lima Mota², Diego José Araújo Bandeira³, Valneide Rodrigues da Silva⁴ & Luanna Amado da Silva⁵

1 - Doutoranda em Engenharia Agrícola, UFCG, ariadnesm_eng@hotmail.com

2 - Mestre em Engenharia Agrícola, UFCG

3 - Doutorando em Engenharia de Processos, UFCG

4 - Doutorando em Engenharia de Processos, UFCG

5 - Mestranda em Engenharia Agrícola, UFCG

Palavras-chave:

normalização
silo protótipo
Jenike Shear Cell

RESUMO

Para elaboração de um projeto de silo vertical capaz de armazenar açúcares mantendo a total integridade de tais produtos, foram analisadas, no presente trabalho, as propriedades de fluxo e a distribuição das pressões ao longo do corpo de um silo confeccionado em acrílico, armazenando três tipos de açúcar (cristal, de confeito e demerara). As propriedades de fluxo foram determinadas utilizando o aparelho de cisalhamento Jenike Shear Cell. O estudo das pressões, pressupondo o carregamento e descarregamento dos açúcares, utilizou as equações recomendadas na norma BS EN 1991/4 (2006). Notou-se que os valores obtidos das propriedades de fluxo para o açúcar cristal se mantiveram acima dos normatizados, sendo este o único produto a fluir por gravidade. As propriedades do açúcar demerara se mostraram dentro do estipulado pela norma BS EN 1991/4 (2006). O açúcar demerara fluiu apenas após interferência de vibrações. O açúcar de confeito não fluiu, assumindo assim a impossibilidade de confecção de um silo no padrão estudado que atenda às exigências dos produtos. Com relação à distribuição das pressões, os três açúcares apresentaram assíntota de pressão similar, apresentando a tendência de estabilidade de pressão próxima ao orifício de descarga.

Keywords:

Standardization
silo prototype
Jenike Shear Cell

FLOW PROPERTIES AND PRESSURES FOR SUGAR STORAGE SILO PROJECT**ABSTRACT**

For the elaboration of a project of a vertical silo capable of storing sugar while keeping the total integrity of such products, we analysed in this work the properties of flow and pressure distribution over the body of a silo made of acrylic, which was storing three types of sugar (crystal, demerara and icing sugar). The flow properties were determined using the Jenike Shear Cell device. The pressure study, which assumed sugar loading and unloading, used the recommended equations in BS EN 1991/4 (2006) regulation. It was noted that the values obtained from the properties of crystal sugar flow remained above the regulated, this being the only product to flow by gravity force. The demerara sugar properties were within the specified by BS EN 1991/4 (2006). The demerara sugar flowed only after interference from vibration. Icing sugar did not flow thus the impossibility of considering a silo in the studied standard, which meets the requirements of the products. Regarding the distribution of pressures, the three sugars presented similar asymptote pressure, showing a pressure stability tendency next to the outlet.

INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar e seus subprodutos, tais como o açúcar, tem grande importância na cadeia econômica nacional e internacional, sendo umas das principais *commodities* nacionais (CONAB, 2017).

Castro (2017) descreve que aproximadamente 90% da produção de açúcar destina-se ao uso alimentar, que abrange desde o açúcar vendido a granel para uso doméstico, como a parte empregada nas indústrias de bebidas e alimentícias.

As exportações brasileiras de açúcar são realizadas, em grande maioria, em contêineres, por apresentarem a vantagem de menor manuseio das sacarias, menor nível de avarias ou perdas por contaminação, estufagem simples e potencial utilização de transporte multimodal (YEMAL & PASCOTTO, 2009).

A estocagem do açúcar, por sua vez, é realizada em sacarias de 50 kg enfileiradas em grandes armazéns ou silos horizontais (CAMPAROTTI & ROTTA, 2013). Porém, segundo Jambassi (2017), esse tipo de armazenamento pode causar aumento no teor de água do produto, haja vista o açúcar ter propriedades higroscópicas e absorver água muito facilmente, apresentando a necessidade de ser armazenado em local hermeticamente fechado e livre de agentes físicos e biológicos.

Sendo assim, por saber-se que um silo vertical preserva as características dos produtos armazenados nele, a viabilidade e a necessidade de execução são eminentes, trazendo benefícios a longo prazo ao produtor.

Para elaboração de tal projeto, fazem-se necessários o dimensionamento de máquinas e equipamentos para manuseio de material a granel e o conhecimento das propriedades de fluxo, assim como dos parâmetros geométricos dos silos (MELLMANN et al., 2014).

As propriedades de fluxo, por sua vez, dependem da composição dos produtos e de suas características físicas, tais como a distribuição do tamanho das partículas, forma das partículas, peso específico, teor de água e a composição química (CROWLEY et al., 2014).

A coesão como propriedade de fluxo é diretamente responsável pelo fluxo do produto no

processo de descarregamento. A alta coesão do produto juntamente à geometria da tremonha do silo podem induzir a formação de arco coesivo. Lobato et al. (2016) caracterizam a formação do arco coesivo como sendo a consolidação das partículas pela ação vertical de acordo com a granulometria do produto armazenado.

A consolidação, ou compactação do produto, ocorre durante o carregamento deste no silo e tem sentido vertical. Já as pressões que esse produto exerce nas paredes do silo durante e após o carregamento tem direção horizontal, o que interfere diretamente no padrão de fluxo que o produto apresentará durante o seu descarregamento (BARLETTA & POLETTI, 2015).

Para a determinação das propriedades de fluxos dos produtos sólidos (ângulo de atrito interno, o efetivo ângulo de atrito interno e o ângulo de atrito com a parede, a coesão, a função fluxo do produto e o fator fluxo da tremonha), Jenike (1964) desenvolveu um aparelho de cisalhamento direto, denominado Jenike Shear Cell, sendo seu uso recomendado pela maioria das normas internacionais.

Ante o exposto, o objetivo deste estudo foi determinar as propriedades de fluxo, as características de atrito do produto com a parede do silo e a distribuição das pressões ao longo do corpo do silo, para os açúcares cristal, de confeito e demerara, utilizando a técnica de células de cisalhamento, tendo em vista o alto poder higroscópico e coesivo dos produtos.

MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Construções Rurais e Ambiente (LaCRA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), em Campina Grande-PB.

Inicialmente, foi determinado o teor de água dos açúcares através da metodologia expressa na norma International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis (ICUMSA, 2007), que consiste na pesagem de uma amostra de 30 g do produto antes e após a secagem em estufa a $105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ por 40 minutos.

Para a determinação da granulometria, foi utilizado o método de peneiramento, com amostra

de 300 g durante 10 minutos em agitador mecânico modelo 0402, do fabricante Bertel Indústria Metalúrgica LTDA, utilizando um conjunto de peneiras que variaram de 0,150 a 1,20 mm de abertura de malha (NBR 07217, 1987).

Para a determinação das propriedades de fluxo, utilizou-se o aparelho de cisalhamento translacional Jenike Shear Cell, que permite, com os dados obtidos, traçar círculos de tensões de Mohr responsáveis por determinar o ângulo de atrito interno (ϕ_i), o efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e) e a coesão (C) dos açúcares para os níveis de carga adotados. Além dessas propriedades, ainda foi determinado o ângulo de atrito do produto com a parede do silo (ϕ_w).

O silo foi confeccionado em acrílico, por ser um material translúcido e permitir o acompanhamento visual do carregamento e descarregamento do silo, sendo possível assim a determinação do padrão de fluxo que o produto segue nas condições impostas.

O silo apresentava paredes com 0,0015 m de espessura, 1 m de altura e diâmetro interno de 0,145 m, representando um silo com relação H/D de 6,9 m. As tremonhas eram em aço zincado com inclinação média com a horizontal de 45° e orifício de descarga de aproximadamente 0,005 m, conforme Figura 1.



Figura 1. Silo acrílico

Para a determinação das pressões ao longo do corpo do silo durante o carregamento e o descarregamento, foram utilizadas as equações indicadas pela norma estrangeira BS EN 1991/4 (2006).

Para o carregamento, foram utilizadas as seguintes equações:

$$Phc = Pho Yj \quad (1)$$

$$Pwc = \mu Pho Yj \quad (2)$$

$$Pvc = \frac{Pho}{K} Yj \quad (3)$$

$$Pho = \gamma K Z_o \quad (4)$$

Onde,

$$Z_o = \frac{1}{K\mu} \frac{A}{U} \quad (5)$$

$$Yj = 1 - e^{-\frac{Z}{Z_o}} \quad (6)$$

Para a determinação das pressões no descarregamento, foram utilizadas as seguintes equações:

$$Phd = Ch Phc \quad (7)$$

$$Pwd = Cw Pwc \quad (8)$$

Para silos de paredes finas com uma relação $Dc/t > 200$ e classificados segundo a norma BS EN 1991/4, como de classes 2 e/ou 3, têm-se os coeficientes de sobrepressão impostos numericamente sobre os valores de:

$$Ch = 1,15$$

$$Cw = 1,10$$

Com Dc sendo o diâmetro interno ao silo e t a espessura da chapa que compõe a parede do silo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O teor de água do açúcar demerara manteve-se aproximadamente 18,7% acima do teor de água do açúcar cristal, fato esse sendo fundamento

importante para explicar a existência de interrupção de fluxo e aderência do açúcar demerara nas paredes do silo.

O teor de água do açúcar de confeiteiro esteve 76,3 e 70,90% acima do teor de umidade do açúcar cristal e demerara, respectivamente.

Apesar de apresentarem características granulométricas semelhantes e distinguirem-se demasiadamente do açúcar de confeiteiro, o açúcar cristal e o demerara não apresentam padrão de fluxo semelhante no interior do silo.

Levando em consideração a predição de fluidez de Jenike (1964), que classifica o fluxo dos produtos a partir da Função Fluxo (FF), o fluxo do açúcar cristal, de confeiteiro e demerara são classificados conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Análise de fluidez para os açúcares

Produto	FF	Análise da Fluidez
AC1	4,0	Produto de fluxo livre
AC2	2,9	Produto coesivo
AC3	10,4	Produto flui com restrições

AC1=açúcar cristal; AC2=açúcar de confeiteiro; AC3=açúcar demerara.

Fonte: Adaptado Jenike (1964).

Para a projeção do silo vertical, além do conhecimento sobre a fluidez do produto, é necessário que se conheçam as propriedades intrínsecas ao fluxo. Nota-se a semelhança entre produtos quanto às propriedades de fluxo dos açúcares apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades de fluxo do açúcar cristal (AC1), de confeiteiro (AC2) e demerara (AC3)

Prod.	γ		ϕ		δ		C	ff
	inf	sup	inf	sup	inf	sup		
AC1	9,79	9,99	21	34	32	35	217	1,71
AC2	8,61	9,44	28	33	33	36	2128	1,60
AC3	9,02	9,35	32	34	31	32	572	1,66

γ = específico consolidado (KN.m⁻³); ϕ = ângulo de atrito interno (°); δ = efetivo ângulo de atrito interno (°); C = coesão (Pa); ff = fator fluxo.

A partir dos ensaios de cisalhamento, notou-

se que os valores obtidos das propriedades de fluxo para o açúcar cristal se mantiveram acima dos encontrados na norma, já as propriedades do açúcar demerara se mostraram dentro do estipulado pela norma BS EN 1991/4 (2006). O açúcar de confeiteiro foi o que apresentou valores mais baixos, quando relacionados com os normatizados.

Com relação às propriedades de fluxo, o peso específico dos açúcares de confeiteiro e demerara tem valor aproximado ao estipulado pela norma BS EN 1991/4 (2006). O açúcar cristal apresentou valores acima do estipulado pela norma.

O efetivo ângulo de atrito dos açúcares obtido experimentalmente em todos os casos teve valores acima dos normatizados, estando o AC2 (açúcar confeiteiro) com valor mais aproximado ao indicado pela norma.

No que diz respeito à coesão, quando comparados os açúcares, o de menor coesão foi o açúcar cristal, e, em contrapartida, o açúcar de confeiteiro apresentou coesão 90,09% maior que a coesão do açúcar cristal e 73,7% maior que a coesão do açúcar demerara.

Com relação às pressões, as Figuras 1-3 representam a distribuição no carregamento e descarregamento dos açúcares cristal, de confeiteiro e demerara, respectivamente.

O açúcar cristal, classificado como de fluxo fácil, apresenta pressões no carregamento (Figura 2), mais altas que os outros açúcares estudados.

Como especificado na norma BS EN 1991/4 (2006), as pressões horizontais são as mais evidentes no ato do carregamento, fato observado quando comparadas às curvas representativas do açúcar cristal, sendo em torno de 13,04% no descarregamento superiores ao carregamento. No caso das pressões de atrito, a diferença foi ainda menor quando comparadas às ações do descarregamento com o carregamento, chegando à ordem de 9,09%, aproximadamente. Já para a pressão vertical, a norma BS EN 1991/4 (2006) estabelece equações para a distribuição no carregamento, sendo esta a mais presente de todas nessa condição.

O açúcar de confeiteiro, classificado como coesivo, apresentou problemas de fluxo do início ao fim do ciclo do descarregamento. No carregamento

foi observado o efeito segregação das partículas. Mesmo só havendo fluxo após interfeirência externa, as pressões no descarregamento (Figura 3) foram as menores entre os três açúcares estudados.

Assim como no açúcar cristal, as pressões horizontais no carregamento do açúcar de confeiteiro e demerara (Figura 4) foram mais representativas do que no descarregamento, assim como as pressões de atrito. A pressão vertical se manteve a mais acentuada no ciclo do carregamento.

Mesmo o açúcar demerara apresentando um teor de umidade superior ao do açúcar cristal e

de confeiteiro, a distribuição das pressões foram similares.

Para o açúcar de confeiteiro, entre a cota estabelecida no meio do silo e a cota próximo ao orifício de descarga, pôde ser observada uma constância da pressão vertical. Nos açúcares cristal e demerara essa diferença foi de aproximadamente 3% entre as pressões equacionadas nessas cotas.

Pode-se notar que, como esperado, as pressões aumentam, ao passo que, no ciclo do carregamento e descarregamento, a cota estipulada se aproxima do orifício de descarga.

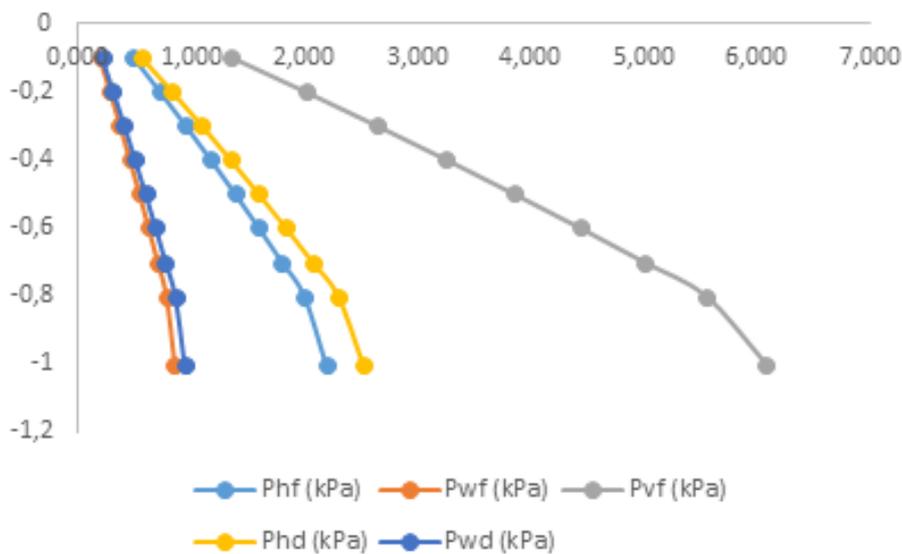


Figura 2. Representação das pressões de carregamento e descarregamento para o açúcar cristal

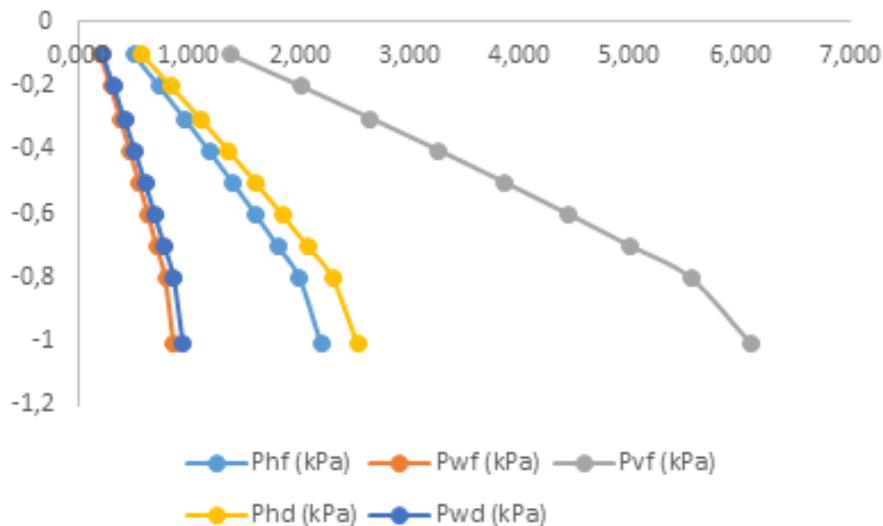


Figura 3. Representação das pressões de carregamento e descarregamento para o açúcar de confeiteiro

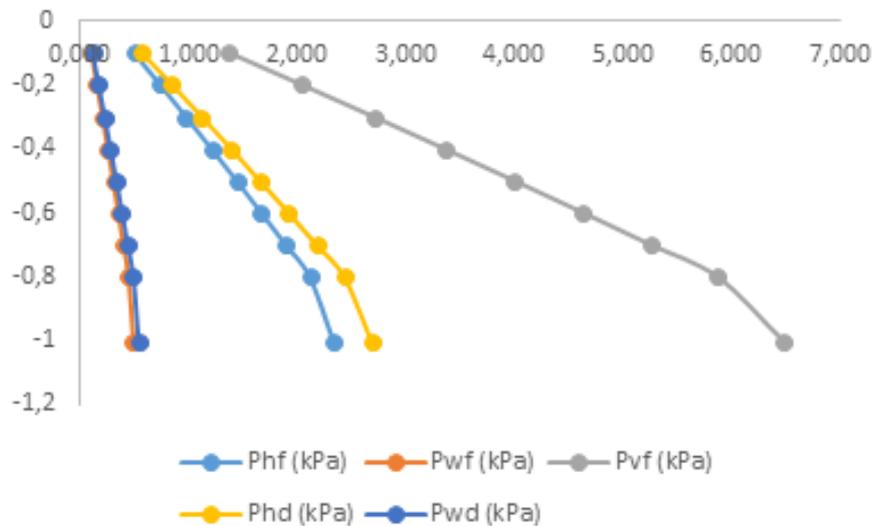


Figura 4. Representação das pressões de carregamento e descarregamento para o açúcar demerara

CONCLUSÕES

- O açúcar de confeito, por ser classificado como coesivo, não apresentou fluxo no ato do descarregamento experimental, apresentou o maior teor de umidade dos três açúcares estudados e a melhor regularidade na distribuição das pressões do nível central ao nível acima da zona de transição entre o corpo e a tremonha.
- O açúcar demerara, embora tenha propriedades físicas muito aproximadas das características do açúcar cristal, apresentou necessidade de artifícios externos ao silo para que houvesse fluxo apresentando ainda, distribuição das pressões muito próxima às encontradas para o açúcar cristal.
- O açúcar cristal foi o único dos três açúcares estudados que não apresentou problemas no fluxo e obteve os níveis de pressão mais elevados no nível logo abaixo da cobertura, caracterizando pressões consideráveis no ato do carregamento.
- O estudo sobre a ação das pressões exercidas sobre a estrutura do silo quando armazenando açúcares ainda é escasso e requer maiores investigações e experimentação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARLETTA, D., POLETTI, M. Pipe stability in aerated silos. **Powder Technology**, v.250, p.252–261, 2015.
- BS EN 1991-4- Eurocode 1. **Actions on structures**. Silos and tanks. 2006. 112p.
- CAMPAROTTI, C.E.S.; ROTTA, I.S. **Análise da armazenagem de uma usina sucroalcooleira com proposição de melhorias no layout do armazém**. XXXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Salvador/BA, 2013.
- CASTRO, HEIZIR F. **Produção de Açúcar Completo da EEL – USP**. Indústria Açucareira, 2017. Disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAR3wAB/producao-acucar-completo>, Acessado em: 15/09/2017.
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento, 2017.
- CROWLEY, S.V. GAZI, IKELLY, A.L. Huppertz, T. O’Mahony. J.A. Influence of protein concentration on the physical characteristics and flow properties of milk protein concentrate powders. **Journal of Food Engineering**, p.31-38, 2014.

ICUMSA - Methods Book. - Method GS2/1/3/9-15 - **The Determination of Sugar Moisture by Loss on Drying**. Published by Verlag Dr. Albert Bartens KG, Berlin, Germany, 2007.

JAMBASSI, J.R. **Aspectos da qualidade do açúcar: impactos de diferentes condições de armazenamento e método de classificação por espectroscopia Raman**. 147p. (Dissertação) – Mestrado em Engenharia Agrônômica, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – USP, 2017.

JENIKE, A.W. **Storage and flow of silos**. Bulletin 123. Salt Lake City: University of Utah, p.89, 1964.

LOBATO, M.; MASCARENHAS, F.P.; MESQUITA, A.L.A. **Conical hopper design for mass flow – case of red mud**. J.C. HOLOS, 2016.

MELLMANN, J.; HOFFMANN, T.; FÜRLI, CHRISTIAN. Mass flow during unloading of agricultural bulk materials from silos depending on particle form, flow properties and geometry of the discharge opening. **Powder Technology**. v.253, p.46-52, 2014.

YEMAL, J.A.; PASCOTTO, F.L. **Exportação de açúcar: a conteneurização das sacas de açúcar**. IV Simpósio Internacional de Administração e Marketing e VI Congresso de Administração da ESPM. São Paulo, 2009.