

Rompimento de arcos coesivos em silos verticais com emprego de pneumáticos: Uma revisão bibliográfica

Breaking of cohesive arches in vertical silos with pneumatic ventilation: A bibliographic review

Gypson D. J. Ayres, José W. B. do Nascimento & Nágela M. H. Mascarenhas*

*Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Departamento de Engenharia Agrícola, Campina Grande-PB, Brasil
(*E-mail: eng.nagelamaria@gmail.com)*

<https://doi.org/10.19084/rca.18390>

Recebido/received: 2019.11.12

Aceite/accepted: 2020.09.28

RESUMO

A revisão visa avaliar uma técnica para solucionar a formação de arcos coesivos em silos verticais responsáveis pela obstrução do fluxo do material armazenado nos silos no processo de descarga, demonstrando que a utilização de ventilação de pneumático lateral é eficiente para a desobstrução de fluxo. A metodologia propõe a construção de um modelo reduzido de um silo, em função da viabilidade econômica do projeto e da funcionalidade. Parte-se de um percurso pela literatura referente a uma perspectiva histórica dos silos e contribuição sobre o fluxo dos produtos armazenados em silos, sobre as propriedades físicas de produtos armazenados, contribuição sobre a tremonha como parte influente para o estudo do escoamento do produto ensilado, tempo de armazenagem do produto como fator que favorece a formação de arcos coesivos, algumas diretrizes sobre o uso de modelos reduzidos em pesquisas, a possibilidade de um modelo com automação, e o uso de sensores de nível em silos. A maioria dos silos existentes no mundo não apresenta condições ideais de operação, seus projetos ainda são complexos e, muitas vezes, rodeados de incertezas.

Palavras-chave: coesão; tensão normal; tensão cisalhante

ABSTRACT

The review aims to evaluate a technique to solve the formation of cohesive arcs in vertical silos responsible for obstructing the flow of material stored in the silos in the discharge process, demonstrating that the use of lateral pneumatic ventilation is efficient for unblocking flow. The methodology proposes the construction of a reduced model of a silo, depending on the economic viability of the project and functionality. It starts from a journey through the literature referring to a historical perspective of the silos and contribution on the flow of products stored in silos, on the physical properties of stored products, contribution on the hopper as an influential part for the study of the flow of the ensiled product, product storage time as a factor that favors the formation of cohesive arcs, some guidelines on the use of reduced models in research, the possibility of a model with automation, and the use of level sensors in silos. Most of the existing silos in the world do not have ideal operating conditions, their projects are still complex and, often, surrounded by uncertainties.

Keywords: cohesion; normal tension; shear stress

INTRODUÇÃO

O armazenamento representa uma contribuição relevante para o processo de comercialização na produção agrícola ante a sazonalidade, possibilitando a transferência ao longo do tempo, garantindo assim a disponibilidade do produto para atender o consumo.

O escoamento dos produtos alocados em unidades de armazenagem apresenta frequentemente problemas operacionais, uma vez que esses ocorrem em sistemas onde as estruturas são projetadas desconsiderando características relevantes do fluxo do produto a ser armazenado, sem o necessário conhecimento técnico (Chen *et al.*, 2020). Observamos que o armazenamento estático no Brasil, até o mês de novembro de 2017, está na ordem de 161t segundo dados obtidos da Companhia Nacional de Abastecimento – Conab (Kock, 2018).

A mecânica dos fluidos estuda a física de materiais contínuos que se deformam quando submetidos a uma força. É a partir destes princípios que parte-se para determinar as propriedades físicas e de fluxo de produtos granulares e/ou pulverulentos e assim, se comparar o comportamento dos fluidos com os grãos (Stevanovic *et al.*, 2014).

As propriedades físicas (teor de umidade e granulometria) e as propriedades de fluxo (ângulo de atrito interno, efetivo ângulo de atrito interno, ângulo de atrito do produto com a parede, densidade em função da consolidação, função fluxo e fator fluxo), são necessárias para caracterização do produto levando em conta que elas influenciam no padrão de fluxo, pressões atuantes, geometria e rugosidade da parede da célula de armazenamento e dispositivo de descarga (tremonha ou não), entre outros (Tascón, 2017; Heng *et al.*, 2019).

As pressões que o produto exerce sobre a estrutura do silo geralmente podem ser divididas em três categorias: com relação ao carregamento inicial; ao resultado do fluxo do produto armazenado (descarregamento); ou à transição entre estes dois estados (Carson & Craig, 2015).

É no descarregamento do silo, o momento onde a tremonha sofre maiores pressões, pois, todo o produto que está armazenado inicia o movimento,

sendo então submetida a toda carga, tendendo a fluir pelo orifício de descarga (Manjula *et al.*, 2017). O uso da tremonha excêntrica é vastamente difundida em cooperativas e indústrias pelo fato de possuir uma descarga mais livre, porém, a distribuição das pressões internas, assim como a formação de arco coesivo (também conhecido por arqueamento, no caso de fluxo em massa ou *piping* no caso de fluxo em canal), é um grande entrave na utilização do silo com essas características (Iwicki *et al.*, 2017; Du *et al.*, 2020).

A Eurocode BS EN 1991-4 (Eurocode, 2006), norma europeia para cálculo de pressões em silos, determina alguns parâmetros e características para silo excêntrico. Normalmente, os silos equipados com tremonha possuem a vantagem de poder ser descarregados por gravidade, enquanto que os silos com fundo plano necessitam de equipamentos especiais para fazê-lo (Du *et al.*, 2020). Em contrapartida, os silos com fundo plano podem ser mais vantajosos financeiramente uma vez que a carga vertical pode ser suportada pelo próprio terreno reduzindo custos com fundação e sapatas para as colunas (Saleh *et al.*, 2018).

Localizar a posição da obstrução, determinando se esta trata-se de um arco mecânico ou arco coesivo é um dos primeiros passos para a desobstrução (Tascón, 2017). O arco é um tipo de estrutura que pode ocorrer na seção convergente de silos verticais, no momento em que se abre sua saída, ou durante o escoamento do material e pode ocorrer em silos com qualquer conformação pois depende unicamente da consolidação do produto armazenado (Khatchatourian *et al.*, 2017).

Calil Junior (1984) explica que dois tipos de arcos podem formar-se na saída: arco coesivo ou arco intertravante (também chamado arco mecânico). A formação de arcos ocorre geralmente com produtos pulverulentos quando uma porção da massa próxima ao orifício de descarga tende a se compactar sob a compressão das camadas superiores incitando a interrupção do fluxo (Carson & Craig, 2015).

Automação consiste na aplicação de técnicas computadorizadas ou mecânicas para diminuir o uso de mão-de-obra em qualquer processo, utilizando especialmente robôs nas linhas de produção.

De acordo com Lacombe (2004), a automação diminui os custos e aumenta a velocidade da produção, além disso, o uso de sensores de nível utilizados em silos de armazenagem podem auxiliar na detecção do arco.

Os canhões de ar (ou *blasters*) são projetados para injetar jatos de gás de alta pressão, a uma curta duração (tipicamente frações de um segundo). A onda de choque que se propaga através do sólido, fornece uma força substancial para romper um arco ou um furo, os canhões aéreos devem estar localizados onde o material armazenado possa ser movido para um canal de fluxo vazio, a típica aplicação inclui o uso com materiais pegajosos, úmidos, adesivos, finos, aglomerantes e fibrosos (Nascimento & Bandeira, 2017).

A maioria dos silos existentes no mundo não apresenta condições ideais de operação, seus projetos ainda são complexos e, muitas vezes, rodeados de incertezas, pois diversas são as variáveis que afetam o comportamento estrutural (Tascón, 2017).

Uma forte razão para isso é o insuficiente conhecimento das pressões e do comportamento de fluxo dos produtos armazenados. Isso explica, também, a grande quantidade de acidentes e colapsos de silos.

Além de serem prejudiciais ao processo de descarga, os arcos se constituem em grande perigo à integridade estrutural do silo, uma vez que seu desprendimento tende a gerar efeito de sucção do ar na parte superior do corpo do silo, simultaneamente a um acréscimo abrupto de pressão nos elementos logo abaixo de sua localização.

Nesta revisão iremos discutir sobre a técnica do rompimento de arcos coesivos em silos verticais com emprego de pneumáticos como uma alternativa para solucionar o problema de formação de arcos coesivos.

REVISÃO DE LITERATURA

Jenike e Johanson (1968), afirmam que os primeiros grandes silos foram construídos em 1860 para o armazenamento de grão, desde então, milhares de grandes e pequenos silos têm sido construídos

para o armazenamento de uma extensa variedade de farinhas, grãos, torrões, fibras. São unidades de armazenagem caracterizadas por compartimentos estanques ou herméticos, ou ainda semi-herméticos (Gomes, 2000).

Em virtude da compartimentação disponível, permitem o controle das características físicobiológicas dos grãos, já que, embora estes percam a identidade de origem, as espécies e padrões agrícolas são armazenados separadamente (Calil Junior *et al.*, 2009; Lopes Neto *et al.*, 2014). No que se diz respeito ao fluxo dos produtos armazenados em silos, Jenike e Johanson (1968) estabelecem que este acontece quando as pressões são tais que o cisalhamento ocorre sem destruir a isotropia do produto armazenado.

A descarga do produto armazenado por gravidade pode ocorrer conforme dois tipos principais de fluxo: por fluxo de massa e fluxo de funil. O tipo de fluxo que vai ocorrer depende, principalmente, das propriedades físicas do produto, assim como, da geometria e rugosidade da superfície da tremonha.

Jenike (1964), pioneiro no estudo do comportamento de sólidos sob condições de armazenagem, ainda define fluxo de massa como aquele onde o produto entra substancialmente em movimento em todas as partes do silo no momento do processo de descarregamento (ocorre quando as paredes da tremonha são suficientemente inclinadas e lisas e não existem abruptas transições).

Com relação ao fluxo de funil, conceitua-se como sendo o tipo de fluxo onde apenas parte do produto entra em movimento através de um canal vertical formado no centro do silo (Matchelt, 2020). Para Calil Junior e Cheung (2007), a determinação das propriedades físicas de produtos armazenados, é o primeiro passo para o projeto de fluxo e estrutural e, deve ser realizada nas condições mais severas daquelas esperadas em um silo.

Milani (1993), admite que o teste de cisalhamento de Jenike consiste na preparação da amostra e depois o seu pré-cisalhamento, com uma seleção das cargas para desenvolver uma zona de cisalhamento dentro da qual ocorra fluxo de estado estável. Dentre as partes de um silo (cobertura, corpo

do silo, anel enrijecedor, “saia”, transição, colunas e tremonha), a tremonha tem a função de possibilitar um melhor escoamento do produto ensilado. Sua altura exerce forte influência no dimensionamento do comprimento das colunas, enquanto que sua forma determina a geometria do orifício de descarga (Lopes Neto, 2009; Chen *et al.*, 2020).

A excentricidade na tremonha utilizada em algumas situações, segundo Rotter (1998) tem o propósito de simplificar o processo de descarregamento dos produtos armazenados, porém ao longo do tempo de armazenamento podem ocorrer problemas de fluxo, que são comuns e de soluções onerosas.

A saída excêntrica em silos com fluxo misto e em tubo, provoca carregamentos assimétricos que são muito problemáticos para silos metálicos, devido à pequena espessura das paredes e que, mesmo para saídas concêntricas, a transição efetiva pode não ocorrer na mesma altura em todo o perímetro (Freitas, 2001; Calil Júnior & Cheung, 2007).

Lopes Neto *et al.* (2009) afirma que dentre os principais obstáculos enfrentados pelas indústrias que manuseiam produtos como farinhas, se destacam a formação de arcos coesivos capazes de restringir, parcial ou completamente, a descarga cuja ocorrência está intrinsecamente relacionada às geometrias dos silos e tremonhas, às propriedades físicas e de fluxo dos produtos sólidos e condições ambientais como pressão, temperatura e umidade.

O efeito de arqueamento pode ser dividido em arcos mecânicos e coesivos. Ravenet (1983) cita que os arcos mecânicos são geralmente formados por partículas. O tempo de armazenagem é outro fator que pode afetar consideravelmente o tipo de fluxo e favorecer a formação de arcos coesivos (Maleki & Mehretehran, 2018). Quanto maior for o período do produto no interior do silo, maior será o nível de compactação de suas partículas uma vez que todas as camadas estarão submetidas à ação da

gravidade (Nobrega & Nascimento, 2005; Batista, 2009; Manjula *et al.*, 2017).

Geralmente, os testes de fluxo ou interrupção de fluxo são realizados em escala reduzida que, não gerando adversidade, a situação é convertida para prática. Os modelos reduzidos são muito utilizados devido ao baixo custo e permitem que se multipliquem todos os parâmetros que influenciam na descarga do silo, na situação real (Garnier, 1998; Lopes Neto *et al.*, 2014). Automação (do latim *Automatus*, que significa mover-se por si), é um sistema automático de controle pelo qual os mecanismos verificam seu próprio funcionamento, efetuando medições e introduzindo correções, sem a necessidade da interferência do homem (Holanda, 1975; Knob, 2010; Klinzing, 2018).

Concomitante a isto, os sensores de nível detectam o nível de substâncias contidas em um recipiente, tais substâncias podem ser materiais granulares ou farinhas. A medição de nível pode ser tanto de valores contínuos quanto pontuais (Cassiolato, 2005; Engblom *et al.*, 2012). Na passagem forçada do fluxo de ar em todas as regiões do armazém ou silo, o objetivo é manter a qualidade dos grãos, reduzindo o teor de umidade, a temperatura e o custo de armazenagem, a aeração é realizada por circulação forçada de ar-ambiente (Maleki & Mehretehran, 2018).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para que haja um estudo mais aprimorado, tanto do fluxo quanto da formação de arco coesivo, se mostra necessária a instrumentação do mesmo. Assim, a utilização de sensores de movimento assim como da utilização lateral de canhões pneumáticos, ou o *insert* localizados na tremonha do silo, podem se constituir como relevante recurso para desobstrução do fluxo causado por arcos coesivos, garantindo melhor fluxo de escoamento, o que justifica a presente pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Batista, C.S. (2009) - *Estudo teórico e experimental do fluxo de sólidos particulados em silos verticais*. Tese de Doutorado, Campina Grande, Universidade Federal de Campina Grande, 81p.
- Calil Junior, C. (1984) - Determinação das propriedades físicas de materiais granulares e pulverulentos para o projeto estrutural. *Revista Brasileira de Armazenagem*, vol. 9, n. 10, p. 3-6.
- Calil Junior, C. & Cheung, A.B. (2007) - *Silos: pressões, fluxo, recomendações para o projeto e exemplos de cálculo*. 1ª ed. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, 240p.
- Calil Junior, C.; Palma, G. & Cheung, A.B. (2009) - Failure Modes of Cylindrical Corrugated Steel Silos in Brazil. *Bulk Solids Handling*, vol. 29, n. 2, p. 346-349.
- Carson, J. & Craig, D. (2015) - Silo Design Codes: Their Limits and Inconsistencies. *Procedia Engineering*, vol. 102, n. 2, p. 647-656. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.157>
- Cassiolato, C. (2005) - Medição de nível & nível de interface. *Revista Controle & Instrumentação*, vol. 110, n. 3, p. 27-35.
- Chen, Y.; Liang, C.; Wang, X.; Guo, X.; Chen, X. & Liu, D. (2020) - Static pressure distribution characteristics of powders stored in silos. *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 154, n. 4, p. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.10.050>
- Du, J.; Liu, C.; Wang, C.; Wu, P.; Ding, Y. & Wang, L. (2020) - Discharge of granular materials in a hemispherical bottom silo under vertical vibration. *Powder Technology*, vol. 372, n. 5, p. 128-135. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.06.006>
- Engblom, N.; Saxén, H.; Zevenhoven, R.; Nylander, H. & Enstad, G.G. (2012) - Segregation of powder mixtures at filling and complete discharge of silos. *Powder Technology*, vol. 215-216, n. 6, p. 104-116. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.09.033>
- Eurocode (2006) - *EN 1991-4: Eurocode 1: Actions on structures - part 4: Silos and tanks*. European Committee of Standardization. Brussels, 109 p.
- Freitas, E.G.A. (2001) - *Estudo teórico e experimental das pressões em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano*. Tese de Doutorado. São Carlos, Universidade de São Paulo, 175p.
- Garnier, J. (1998) - Classification of silo tests. In: *Silos fundamentals of theory, behaviour and design*. 1.ed. London: Routledge Ed., p.612- 619.
- Gomes, F.C. (2000) - *Estudo teórico e experimental das ações em silos horizontais*. Tese de Doutorado, São Carlos, Universidade de São Paulo, 205p.
- Heng, J.; New, T.H. & Wilson, P.A. (2019) - Application of an Eulerian granular numerical model to an industrial scale pneumatic conveying pipeline. *Advanced Powder Technology*, vol. 30, n. 2, p. 240-256. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.10.028>
- Holanda, A.B. (1975) - *Novo dicionário da língua portuguesa*. 12ª ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 163p.
- Iwicki, P.; Rejowski, K. & Tejchman, J. (2017) - Simplified numerical model for global stability of corrugated silos with vertical stiffeners. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 138, n. 4, p. 93-116. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.06.031>
- Jenike, A.W. & Johanson, J.R. (1968) - Big Loads. *Journal of the Structural Division*, vol. 94, n. 4, p. 1011-1042.
- Jenike, A.W. (1964) - Storage and Flow of Solids. *Utah Engineering Experiment Station*. vol. 123, n. 7, p. 197-183.
- Khatchaturian, O.A.; Binelo, M.O.; Neutzling, R. & Faoro, V. (2017) - Models to predict the thermal state of rice stored in aerated vertical silos. *Biosystems Engineering*, vol. 161, n. 3, p. 14-23. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.06.013>
- Klinzing, G.E. (2018) - A review of pneumatic conveying status, advances and projections. *Powder Technology*, vol. 333, n. 5, p. 78-90. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.04.012>
- Knob, A.H. (2010) - *Aplicação do processamento de imagens digitais para análise da anisotropia da massa de grãos*. Dissertação de Mestrado, Ijuí, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 71p.
- Kock, M.A. (2018) - *Dimensionamento de um silo metálico com fundo plano para o armazenamento de soja*. Trabalho de Conclusão de Curso, Pato Branco, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 71p.
- Lacombe, F.J.M. (2004) - *Dicionário de administração*. 1ª ed. São Paulo: Editora Saraiva, 358p.

- Lopes Neto, J.P.; Nascimento, J.W.B. & Silva, V.R. (2009) - Forças de atrito em silos verticais de paredes lisas em diferentes relações altura/diâmetro. *Revista de Engenharia Agrícola*, vol. 34, n. 1, p. 8-17.
- Lopes Neto, J.P. (2009) - *Análise teórico-experimental das forças verticais e de atrito em silos cilíndricos*. Tese de Doutorado, Campina Grande, Universidade Federal de Campina Grande, 137p.
- Lopes Neto, J.P.; Nascimento, J.W.B. & Silva, V.R. (2009) - Efeito do tempo de armazenagem de rações avícolas no dimensionamento de silos. *Revista de Engenharia Agrícola*, vol. 29, n. 2, p. 518-527.
- Maleki, S. & Mehrehtehran, A.M. (2018) - 3D wind buckling analysis of long steel corrugated silos with vertical stiffeners. *Engineering Failure Analysis*, vol. 90, n. 2, p. 156-167. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.03.031>
- Manjula, E.V.P.J.; Ariyaratne, W.K.H.; Ratnayake, C. & Melaaen, M.C. (2017) - A review of CFD modelling studies on pneumatic conveying and challenges in modelling offshore drill cuttings transport. *Powder Technology*, vol. 305, n. 5, p. 782-793. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.10.026>
- Matchett, A.J. (2020) - Exponential stress in silos — An example from literature. *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 161, n. 2, p. 125-129. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.06.030>
- Milani, A.P. (1993) – *Determinação das propriedades de produtos armazenados para o projeto de pressões e fluxo em silos*. Tese de Doutorado, São Carlos, Universidade de São Paulo, 272p.
- Nascimento, J.W.B. & Bandeira, D.J.A. (2017) - Descarga em silos verticais sem obstrução do fluxo com uso de inserts. In: *Anais do Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia*. Belém, Brasil, SOEA, p. 77-83.
- Nóbrega, M.V. & Nascimento, J.W.B. (2005) - Fluxo de ração avícola em silos prismáticos com tremonha excêntrica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 9, n. 3, p. 413-419.
- Ravenet, J. (1983) - *Silos: flujo de vaciado de sólidos, formacion de bovedas*. 1ª ed. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 330p.
- Rotter, J.M. (1998) - Challenges for the future in numerical simulation. In: *Silos: fundamentals of theory behaviour and design*. 1ª ed. London: Routledge Ed., p.584-604.
- Saleh, K.; Golshan, S. & Zarghami, R. (2018) - A review on gravity flow of free-flowing granular solids in silos – Basics and practical aspects. *Chemical Engineering Science*, vol. 192, n. 3, p. 1011-1035. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.08.028>
- Stevanovic, V.D.; Stanojevic, M.M.; Jovovic, A.; Radic, D.B.; Petrovic, M.M. & Karlicic, N.V. (2014) - Analysis of transient ash pneumatic conveying over long distance and prediction of transport capacity. *Powder Technology*, vol. 254, n. 3, p. 281-290. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.01.038>
- Tascón, A. (2017) - Design of silos for dust explosions: Determination of vent area sizes and explosion pressures. *Engineering Structures*, vol. 134, n. 1, p. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.12.016>