VAZÃO MÁSSICA DE DESCARGA EM SILO MODELO REDUZIDO

GYPSON DUTRA JUNQUEIRA AYRES[1], JOSÉ WALLACE BARBOSA DO NASCIMENTO[2], PAULO ROBERTO MEGNA FRANCISCO[3]

[1]Doutorando em Eng. Agrícola, UFCG, Campina Grande-PB, fgypsond@gmail.com
[2]Dr. em Eng. Agrícola, Prof. Titular, UFCG, Campina Grande-PB, wallacebosa@hotmail.com
[3]Doutorando em Eng. e Gestão em Recursos Naturais, UFCG, Campina Grande-PB, paulomegna@gmail.com

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC
15 a 17 de setembro de 2021

RESUMO: Para este trabalho foi construído um silo de grãos em modelo reduzido metálico e através da instrumentação e da implantação de sensores e de microcontroladores objetivou-se realizar ensaios de vazão mássica para o milho in natura e ração tipo final. Foram determinadas o teor de umidade, granulometria, diâmetro de partícula, densidade e massa específica. O procedimento experimental de fluxo consistiu em carregar o silo e após 30 min efetuou-se o descarregamento do silo realizado em 4 ensaios de aberturas da tremonha em 1/4, 1/2, 1/3, 1/1 em 4 repetições. Os resultados demostraram que, A ração avícola tipo final utilizada neste trabalho não se mostrou adequada para a inclinação de 45º da tremonha pois formou arco coesivo. As menores vazões de descarregamento do milho foram registradas com a tremonha de abertura de 1/4. A vazão mássica apresentou proporcionalidade entre as aberturas utilizadas da tremonha. O tempo médio de descarga entre todas os ensaios e as aberturas da tremonha adotada foi de 27,15 segundos. O modelo de Beverloo apresentou boa aproximação para os dados experimentais.
PALAVRAS-CHAVE: Protótipo, velocidade de descarga, fluxo, Lei de Beverloo.

MASSIC DISCHARGE FLOW IN SILO REDUCED MODEL

ABSTRACT: For this work, a grain silo was constructed in a reduced metallic model and, through instrumentation and the implantation of sensors and microcontrollers, the objective was to carry out mass flow tests for fresh corn and final type feed. The moisture content, particle size, particle diameter, density and specific mass were determined. The experimental flow procedure consisted of loading the silo and after 30 min, the silo was unloaded in 4 hopper openings tests in 1/4, 1/2, 1/3, 1/1 in 4 repetitions. The results showed that the final type of poultry feed used in this work was not suitable for the 45º hopper inclination as it formed a cohesive arc. The lowest unloading flow rates for corn were recorded with the 1/4 opening hopper. The mass flow showed proportionality between the openings used in the hopper. The average discharge time between all tests and the hopper openings adopted was 27.15 seconds. The Beverloo model presented a good approximation for the experimental data.
KEYWORDS: Prototype, discharge speed, flow, Beverloo Law.

INTRODUÇÃO

A agroindústria brasileira cresceu de forma acentuada nos últimos anos, garantindo ao país o destaque mundial, como reflexo da produção (NASCIMENTO, 1996). Os silos são utilizados em larga escala em fábricas de ração, por se tratar de estruturas que garantem, se bem projetadas, a qualidade do produto durante bom tempo e além de facilitar o processo de sua distribuição (NÓBREGA & NASCIMENTO, 2005). De acordo com Lopes Neto et al. (2008) sabe-se, que as fábricas de ração possuem forte tendência à arquitetura vertical devido a carência de maior facilidade e rapidez nas etapas de produção interna.

Lopes Neto (2005) afirma que, o tipo de fluxo desenvolvido por um sólido está intimamente relacionado com as características geométricas do silo, e pode, conforme Calil Junior (1990),

caracterizar o descarregamento do produto, o tipo de segregação, a formação ou não de zonas de estagnação de movimento, e se o silo pode ser esvaziado completamente. A forma como um produto escoa por gravidade em um silo é restringido, por um lado, pelas próprias propriedades físicas do produto e, por outro, pela geometria e estrutura da superfície de contato (atrito com a parede) da tremonha.

Bandeira et al. (1999) afirmam que, o conhecimento preciso do comportamento do fluxo é de essencial importância para dimensionar corretamente silos industriais para rações, permitindo um descarregamento uniforme, sem segregações, sem parada no processo industrial e desbalanceamento das rações; portanto, é necessário a utilização de fluxo de massa. De acordo com Calil Junior (1984), dentre os fatores que influenciam no tipo de fluxo a ser desenvolvidos por produtos sólidos em condição de armazenagem, destacam-se a dimensão das partículas, a temperatura, o teor de umidade do produto e o tempo de armazenamento.

Nóbrega e Nascimento (2005) afirmam que existe a preocupação de muitos pesquisadores em desenvolver trabalhos experimentais que simulem, através de protótipos ou de modelos reduzidos, as formas mais desfavoráveis que ocorrem durante o armazenamento, para que se possa desenvolver silos que não acarretem problemas de fluxo. Geralmente, os testes são realizados em escala reduzida, não gerando adversidade quando 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).

Este trabalho objetiva através da construção de um silo armazenador em escala reduzida, sua instrumentação por sensores e microcontroladores, e avaliar a vazão mássica de grãos de milho *in natura* e ração avícola.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Laboratório de Construções Rurais e Ambiência (LACRA) do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), campus de Campina Grande.

Neste trabalho foi construído um silo metálico protótipo armazenador de ração fabricado com zinco liso com dimensões de 83 cm de altura, sendo 42 cm de montante e 41 cm de corpo do silo, e 30 cm de diâmetro, com uma tremonha de seção cônica confeccionada em aço zincado de espessura nominal de 1,2 mm, com inclinação de 37º, e entre o corpo do silo, e a tremonha foi conectada uma extensão emborrachada que desobstrui caso haja a possível formação de arcos coesivos, onde a desobstrução foi montada utilizando-se um motor vibratório de baixa rotação.

O silo foi composto por três montantes que realizaram o apoio sobre uma base onde encontram-se as células de carga. Na base foram instaladas 3 células de cargas tipo A0455 de 20 kg cada, estando a mesma conectada ao sistema de aquisição de dados, permitindo obter assim obter a variação da massa de sólido no interior do silo ao longo dos ensaios.

Para a determinação das propriedades de fluxo no descarregamento do silo protótipo foi utilizado o milho in natura e ração avícola tipo final. Foram determinadas o teor de umidade, granulometria conforme a norma NBR NM 248 (ABNT, 2001), diâmetro de partícula, densidade pela BMHB (1985) e massa específica. O procedimento experimental de fluxo consistiu em carregar o silo e após 30 min onde efetuou-se o descarregamento realizado em 4 ensaios de aberturas da tremonha em 1/4, 1/2, 1/3, 1/1 em 4 repetições.

Nesta pesquisa foi utilizado a análise dimensional proposta por Beverloo et al. (1961) para os ensaios de vazão do silo protótipo em que, a vazão mássica (W) é proporcional a $\rho_B\, g^{1/2}\, d^{5/2}$, onde ρ_B e g são a densidade volumétrica e aceleração devido à gravidade, respectivamente, correlacionados conforme a Equação 1.

$$W = C\rho_B \sqrt{g}(do - kd)^{2,5} \quad \text{(Eq.1)}$$

Onde: W – vazão mássica; C = 0,59 a 0,62; ρ (B) – massa específica do produto; g – aceleração da gravidade; k = 1,4; do – diâmetro da partícula; d – diâmetro de saída.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observa-se que o módulo de finura obtido é de 5,938 com diâmetro máximo de 9,6mm da peneira. Constata-se que o maior peso retido em percentagem está na peneira de 4,8mm com peso retido de 475,375 gramas de grãos e, portanto, classifica-se como granulação média.

Conforme classificação dos produtos sólidos em função das dimensões do diâmetro das partículas proposta por Calil Junior (1990), pode-se considerar o milho como um produto de característica granular, pois sua granulometria resultou em valor superior a 1mm.

Lopes Neto e Nascimento (2013) realizando ensaios de granulometria para o milho em grãos em pesquisa das características de fluxo e projeto de tremonhas cônicas em silos verticais observaram que possuiu quase a totalidade de suas partículas com dimensão imediatamente superior a 4,8 mm. Resultado este, bem próximo a deste estudo.

De acordo com os testes para a determinação do teor de umidade, o milho em grãos in natura utilizado na determinação das propriedades de fluxo encontra-se com teor de umidade de 9,74%. Pode-se observar uma variação em função do comprimento (a), largura (b) e espessura (c) dos grãos, que variam de 12,08 a 13,34mm, 7,94 a 8,30mm e de 4,64 a 5,26mm, respectivamente. Tanto a média das dimensões obtidas, quanto o desvio padrão e o coeficiente de variação são maiores no comprimento dos grãos analisados. Para a esfericidade o coeficiente de variação apresenta 8,56% em relação as amostras estudadas e suas repetições.

Segundo Coimbra (2007), o teor de água inicial das sementes é um fator primordial para a padronização dos testes de avaliação da qualidade fisiológica a serem realizados, ressaltando que o teor elevado de água pode favorecer o desempenho das sementes nos testes.

Sarmento et al. (2015) em experimento utilizando a mesma metodologia deste trabalho obteve para grãos de milho com 12,6% de umidade. Araújo et al. (2017) em determinação das propriedades físicas de grãos de milho, identificou um teor de água de 11,6% (b.u.). Harrington (1973) ressalta que, o teor de água ideal para armazenamento e comercialização de sementes amiláceas é de 6,0 a 12,0%.

De acordo com Araújo et al. (2017), determinando as propriedades físicas de grãos de milho, observaram que a esfericidade média dos grãos encontrada foi de 65,9%, corroborando com os valores encontrados por Baraviera et al. (2014) ao avaliar as propriedades físicas de grãos de híbridos de milho que foi de 66,1% para o híbrido Dekalb 177 PRO 2.

Os resultados obtidos na determinação da massa específica nos grãos de milho apresentam o valor para a densidade volumétrica média de 759,076 (kg/m³) com uma variação entre 752,66 e 767,45 (kg/m³) em suas repetições. De acordo com os cálculos elaborados para o volume do silo protótipo os resultados apresentam um valor de 0,036587 m³. Com o valor obtido no cálculo do volume total do silo e pela densidade do milho obtida de 759,07 kg/m³ o resultado apresenta-se com um valor de 27,77 kg.

De acordo com as leituras obtidas durante os ensaios de vazão no silo, observa-se valores médios de 27,00 kg, próximo ao valor de 27,77 kg estimados pelo cálculo da massa específica total, portanto observa-se que, essa diferença se dá entre os espaços vazios que ficam entre os grãos de milho armazenados no silo.

Para a abertura de 1/4 a área obtida pelos cálculos é de 15,35462 cm² correspondente à uma circunferência de diâmetro de 4,4 cm. Para a abertura de 1/2 a área encontrada é de 39,2699 cm² correspondente à uma circunferência de diâmetro de 7,0710 cm. Para a abertura de 1/3 a área obtida é de 63,1852 cm² correspondente à uma circunferência de diâmetro de 8,9638 cm. Para a abertura de 1/1 (100%) obteve-se o valor de 78,53982 cm² correspondente à uma circunferência de diâmetro de 10,00 cm (Tabela 1).

Tabela 1. Vazão mássica em relação a abertura dos orifícios de descarga

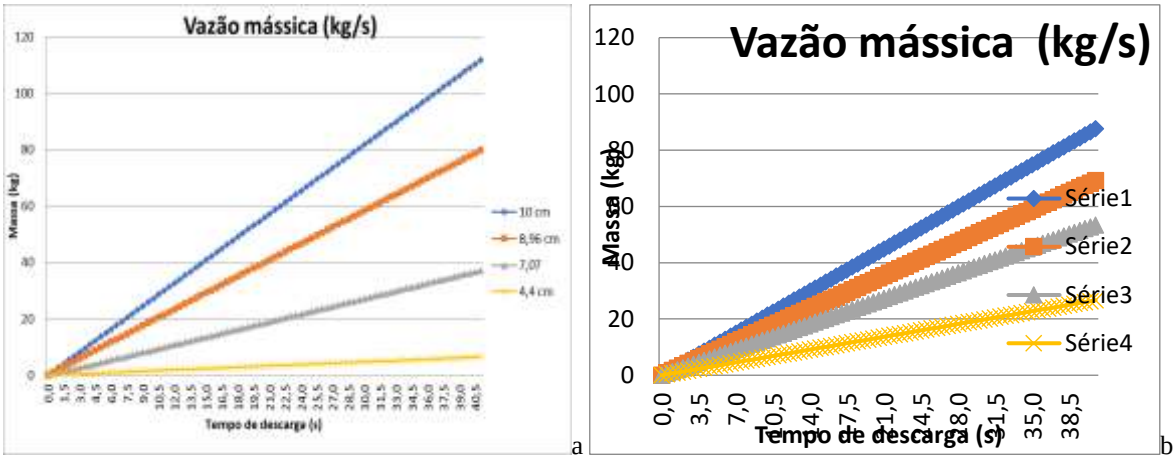
Orifício de descarga (cm^2)	**Orifício de descarga Ø (cm)**	**Abertura do orifício em proporção**	**Vazão mássica Beverloo (kg/s)**	**Vazão mássica (kg/s)**
78,53	10,00	1/1	1,617	2,13624
63,18	8,96	1/3	0,654	1,68710
39,26	7,07	1/2	0,156	1,30244
15,35	4,40	1/4	0,038	0,65027

Pode-se observar pela Tabela 1 e pela Figura 1 a vazão mássica do grão de milho obtida com o orifício aberto em ¼ (4,4 cm) da descarga comparada com a prevista pela metodologia de Beverloo, onde o ensaio realizado apresenta uma vazão mássica de 0,650 (kg/s), valores maiores do que a prevista

de 0,038 (kg/s). Observa-se a vazão mássica obtida com o orifício de descarga aberto em 1/2 (7,07 cm) e nota-se que, o ensaio realizado apresenta uma vazão mássica de 1,30 (kg/s), valores maiores do que o prevista pelo método de Beverloo de 0,156 (kg/s). Na vazão mássica obtida com o orifício de descarga aberto em 1/3 (8,96 cm) pode-se constatar que, o ensaio realizado apresenta uma vazão mássica de 1,68 (kg/s), valores menores do que o previsto de 0,654 (kg/s). A vazão mássica obtida com o orifício de descarga aberto em 1/1 (10 cm) comparada com Beverloo, pode-se constatar que, o ensaio realizado apresenta uma vazão de 2,13 (kg/s), valores menores do que o previsto de 1,617 (kg/s).

Batista (2009) afirma que, o modelo de Beverloo et al. (1961) apresentou boa aproximação para grande parte dos dados experimentais, sendo este ineficiente para a saídas com inclinação diferente de 0o, principalmente para a inclinação de saída 30o. O modelo de Beverloo et al. (1961) é amplamente utilizado para descrever a descarga de sólidos em silos (Mankoc, 2007; Huang et al., 2009), o que justificaria de certa forma a sua boa aproximação aos resultados experimentais.

Figura 1. Vazão mássica prevista pela metodologia de Beverloo versus ensaio realizado



O modo como o produto flui por gravidade em um silo é governado, por um lado, pelas propriedades de fluxo do produto e, por outro lado, pela geometria e estrutura da superfície da tremonha (Nóbrega, 2003). No entanto, uma variável que interfere significativamente no tipo de fluxo é a dimensão das partículas (Lopes Neto et al., 2009).

Por este trabalho pode-se constatar um comportamento da vazão constante durante a descarga em cada abertura estudada. Esses resultados concordam com Wang et al. (1995) ao concluírem que, com o aumento da área do orifício de descarga do silo, a vazão da farinha de soja aumentou significativamente.

Batista (2009) estudando a vazão mássica de painço, farelo de milho e areia fina, relata que o comportamento da vazão de descarga é bastante semelhante e independente da rugosidade usada nas paredes do silo. Ainda Batista (2009), observou que a vazão mássica durante o descarregamento, apresentou uma tendência a manter-se constante, e com valores próximos, entre as diferentes inclinações de saída da tremonha.

CONCLUSÃO

O protótipo desenvolvido cumpriu com suas funções, foi capaz de obter dados e fornecer com segurança e rapidez ao sistema de aplicativo desenvolvido sobre a carga e descarga, além de ter sido satisfatório nos ensaios de vazão mássica. A ração avícola tipo final utilizada neste trabalho não se mostrou adequada para a inclinação de 45º da tremonha pois formou arco coesivo. As menores vazões de descarregamento do milho foram registradas quando se utilizou a tremonha com abertura de 1/4. A vazão mássica apresentou proporcionalidade entre as aberturas utilizadas da tremonha nos ensaios e suas repetições. O tempo médio de descarga entre todas os ensaios e as aberturas da tremonha adotada foi de 27,15 segundos. O modelo de Beverloo apresentou boa aproximação para os dados experimentais.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela concessão de bolsa de pesquisa ao primeiro autor.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR NM 248: Agregados-Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2001.

Araújo, K. T. A.; Correia, F. G.; Silva, R. C. da; Santos, F. S. dos. Determinação das propriedades físicas de grãos de milho (*Zea mays* L.). In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, 4, 2017, Belém. Anais...Belém, 2017.

Bandeira, I. S. A.; Nascimento, J. W. B. do; Silva, F. de A. S. Análise de fluxo de ração e farelo de trigo em silos prismáticos. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.3, n.2, p.233-238, 1999.

Baraviera, C. M. C.; Caneppele, C.; Dourado, L. G. A.; Aguero, N. F. Avaliação de propriedades físicas de grãos de híbridos de milho. Enciclopédia Biosfera, v.10, n.19, p.291-297, 2014.

Beverloo, W. A.; Leniger, H. A.; Van De Velde, J. The flow of granular solids through orifices. Chemical Engineering Science, v.15, p.260-269, 1961.

BMHB. British Materials Handling Board. Draft code of practice for the design of silos, bins, bunkers and hoppers. Berkshire: 1985. 143p.

Calil Junior, C. Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais. São Carlos: USP, 1990. 197p.

Coimbra, R. A. Teste de germinação com acondicionamento dos rolos de papel em sacos plásticos. Revista Brasileira de Sementes, v.29, n.1, p.92-97, 2007.

Garnier, J. Classification of silo tests. In: Silos fundamentals of theory, behaviour and design. 1. ed. London: Routledge Editora, 1998. p.612-619.

Harrington, J. F. Biochemical basis of seed longevity. Seed Science and Technology, v.1, n.2, p.453-461, 1973.

Huang, W.; Gong, X.; Guo, X.; Dai, Z.; Liu, H.; Zheng, L.; Zhao, J.; Xiong, Y. Discharge characteristics of cohesive fine coal from aerated hopper. Power Technology, v.194, p.126-131, 2009.

Lopes Neto, J. P. Análise estrutural de silos metálicos prismáticos. 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2005.

Lopes Neto, J. P.; Nascimento, J. W. B. do; Silva, V. R. Efeito do tempo de armazenagem de rações avícolas no dimensionamento de silos. Engenharia Agrícola, v.29, p.518-527, 2009.

Lopes Neto, J. P.; Nascimento, J. W. B. do. Características de fluxo e projeto de tremonhas cônicas em silos verticais. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.17, n.3, p.339–345, 2013.

Mankoc, C. P. Flujo de medios granulares en la descarga de silos bajo la acción de la gravedad. Memoria de investigacion. Pamplona, 2007. 34p.

Nascimento, J. W. B. Estudos de silos metálicos prismáticos para fábricas de ração. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 1996.

Nóbrega, M. V. da; Nascimento, J. W. B. do. Fluxo de ração avícola em silos prismáticos com tremonha excêntrica. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.9, n.3, p.413-419, 2005.

Nóbrega, M. V. Análise de vazão e fluxo de ração e fluxo de ração avícola em silos prismáticos com descarga excêntrica. 88f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2003.

Sarmento, H. G. dos S.; David, A. M. S. de S.; Barbosa, M. G.; Nobre, D. A. C. N.; Amaro, H. T. R. Determinação do teor de água em sementes de milho, feijão e pinhão-manso por métodos alternativos. Energ. Agric., Botucatu, v.30, n.3, p.249-256, 2015.

Wang, Y. J.; Chung, D. S.; Sppillman, C. K. Gravity flow characteristics of soybean meal. Transactions of the ASAE, v.38, n.4, p.1179-1186, 1995.