

## **EFEITO DA RELAÇÃO H/D NAS PRESSÕES DE CARREGAMENTO ACIMA DA ZONA DE TRANSIÇÃO DE SILO METÁLICO VERTICAL**

ARIADNE SOARES MEIRA<sup>1</sup>, VALNEIDE RODRIGUES DA SILVA<sup>2</sup>, RAFAEL TORRES DO NASCIMENTO<sup>3</sup>, HYGOR CÉSAR SOARES RODRIGUES<sup>4</sup> e PATRÍCIO GOMES LEITE<sup>5</sup>

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

<sup>2</sup>Doutoranda em Engenharia de Processos, UFCG, Campina Grande-PB, rval707@gmail.com;

<sup>3</sup>Mestrando em Engenharia Agrícola, UFCG, Campina Grande-PB, cgtorresrafael@hotmail.com;

<sup>4</sup>Mestrando em Engenharia Agrícola, UFCG, Campina Grande-PB, hygor2.\_soares@hotmail.com;

<sup>5</sup>Doutorando em Engenharia Agrícola, UFCG, Campina Grande-PB, pgomesleite@gmail.com.

Apresentado no  
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC  
Palmas/TO – Brasil  
17 a 19 de setembro de 2019

**RESUMO:** Tem-se por objetivo com o presente trabalho avaliar a influência da relação H/D nas pressões imediatamente acima da zona de transição, comparando o estado experimental com a norma AS 3774 (1990). Para que os objetivos sejam atingidos, um silo metálico, de parede lisa com espessura de 1mm, foi instrumentado com células de carga ao longo de seu eixo vertical. A célula estudada está a 0,095m de distância da zona de transição entre o corpo do silo e a tremonha e registrou valores de pressão horizontal durante o carregamento e o descarregamento. Por resultados obtiveram-se curvas da distribuição das pressões que, ao serem comparadas com a distribuição das pressões no mesmo ponto para a norma estrangeira AS 3774, apresentam valores acima dos experimentais, sendo importante lembrar que, a norma impõe um coeficiente de segurança aos cálculos das pressões para que não haja incidentes decorrentes de mal dimensionamento dos silos. A relação H/D igual 1 apresentou menores valores de pressão, estando a 1/3 dos valores de pressão para o silo na relação H/D igual a 4 e a 1/4 da norma AS 3774. A relação H/D igual a 2 e H/D igual a 3 apresentaram valores de pressão aproximado, ficando evidente que, para silos muito esbeltos, para relação H/D acima de 2 não há variações numericamente significativas nas pressões.

**PALAVRAS-CHAVE:** Tremonha, pressão, zona de Pressão

## **H/D RATIO EFFECT ON THE CHARGING PRESSURE ABOVE THE TRANSITION ZONE OF METALLIC VERTICAL SILO**

**ABSTRACT:** Has the objective of this work to evaluate the influence of H/D ratio in the pressure just above the transition zone, comparing the experimental State with the standard the 3774 (1990). So the goals are attained, a metal silo, smooth wall with 1 mm thickness was instrumented with load cells along your vertical axis. The cell studied is 0, 095m from the transition zone between the body of the silo and the hopper and recorded values of horizontal pressure during loading and unloading. By results of the distribution curves were obtained from the pressures which, when compared with the distribution of pressures at the same point for the foreign standard 3774, above, and it is important to remember that the standard imposes a safety coefficient to pressure calculations for incidents arising from wrong sizing of silos. The H/D ratio equal 1 presented minors values of pressure, being the 1/3 of the pressure values for the silo in the H/D ratio equal to 4 and the 1/4 of the standard 3774. The H/D ratio equal to 2 and H/D equal to 3 values approximate pressure, getting clear that, to very slender silos, for H/D ratio above 2 no numerically significant variations in pressure.

**KEYWORDS:** Hopper, pressure, Pressure zone

## INTRODUÇÃO

Silos experimentais são usados para estudos dos processos de fluxo e pressão. Em silos esbeltos, a tremonha suporta a maior parte do peso do sólido armazenado de modo que o carregamento é fundamental na avaliação da integridade estrutural. No entanto, as pressões nas paredes do silo sofrem mudanças desde o carregamento até o descarregamento (Ding, 2013).

Com relação à classificação do silo a partir da geometria deste, diferentes proporções de silos, geometrias de tremonha e arranjos de descarga levam a diferentes situações de projeto que devem ser consideradas (NASCIMENTO, 1998).

Ravenet (1974) esclarece que, no descarregamento em silos esbeltos, as sobrepressões e depressões são mais evidentes e prejudiciais a estrutura do silo do que em silos de esbeltez intermediária ou baixos. Ainda analisando os efeitos da esbeltez de um silo nas ações internas a este, Madrona (2008) aponta que influencia diretamente o padrão de fluxo, onde, quanto mais esbelto mais tendência ao fluxo excêntrico no descarregamento.

Ravenet (1977), em seus estudos encontrou uma relação direta entre o coeficiente de sobrepressão no descarregamento e a estrutura do silo, ou seja, a relação H/D (altura/diâmetro) do silo.

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.

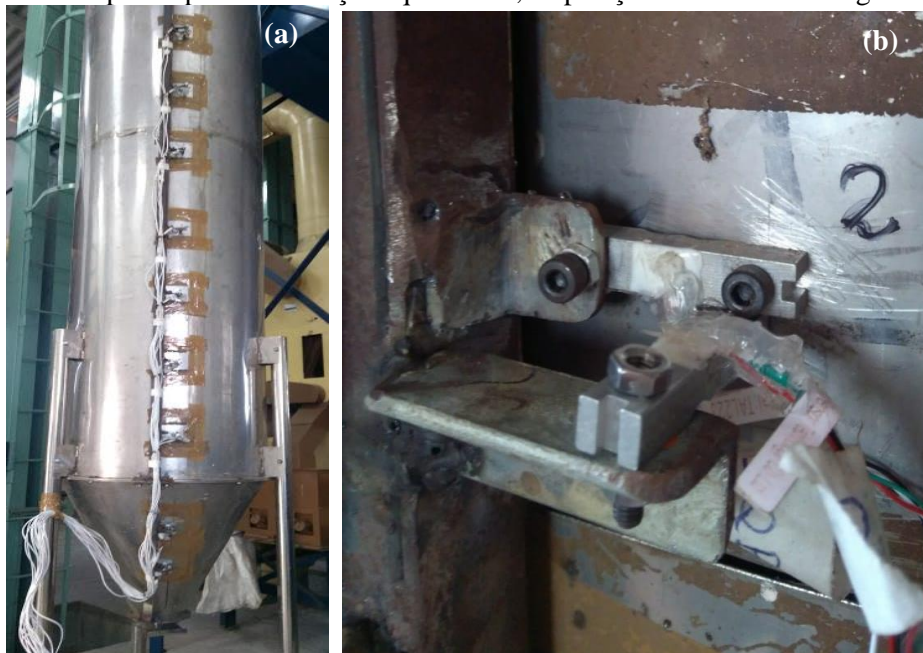
Conforme Coelho (2016), as pressões de carregamento apresentam distribuição simétrica aplicada em todos os pontos verticais do silo que estejam em contato com o produto armazenado, embora haja acréscimo nos valores decorrentes da profundidade.

Assim, objetiva-se a partir da execução deste trabalho avaliar a influência da relação H/D nas pressões imediatamente acima da zona de transição, comparando o estado experimental com a norma AS 3774 (1990).

## MATERIAL E MÉTODOS

O silo protótipo foi confeccionado em aço inox, com parede lisa de 1mm de espessura. O silo é elevado e composto por tremonha concêntrica com inclinação de 60° com a horizontal. Foram realizados cortes quadrados com dimensões de 0,09x0,09m ao longo do corpo e da tremonha do silo (Figura 1a) onde foram instaladas células de carga com capacidade de 50 kg (Figura 1b) cada e reintegrados ao silo por meio de fixação de parafuso e porca.

**Figura 1** - Silo protótipo com inserções quadradas; disposição de células de carga



Para obtenção das pressões, os valores de força registrados pelas células de carga, foram integrados a equação simples de pressão que utiliza a razão entre a força e a área a qual esta força é aplicada.

No presente trabalho, foram determinadas apenas as pressões na seção acima da zona de transição, caracterizada pela célula C1 a aproximadamente 0,095m de distância da transição entre o corpo do silo e a tremonha.

As células determinaram as forças horizontais no decorrer do carregamento e descarregamento do produto armazenado, instantaneamente, sendo utilizadas quatro situações distintas.

Na situação 1 o silo foi totalmente carregado estabelecendo assim a relação H/D máxima de 3,9 e descarregado posteriormente; na situação 2, o silo foi carregado até atingir a relação H/D igual a 3; na situação 4 a relação H/D em estudo foi 2 e na situação 4 foi utilizada a menor relação, quando H/D foi igual a 1.

Por propriedades físicas, o presente trabalho utilizou grãos de milho adquiridos no comércio regional, com teor de umidade de 12,5% e peso específico aparente de aproximadamente 7,5 kN.m<sup>-3</sup> com uniformidade granulométrica, apresentando diâmetro médio de partículas na ordem de 6,3mm, sendo classificado de acordo com a determinação de Callil Júnior (1990) como produto granular de fluxo livre.

As propriedades de fluxo tais como o ângulo de atrito interno ( $\Phi_i$ ), efetivo ângulo de atrito ( $\Phi_e$ ) e o ângulo de atrito do produto com a parede ( $\Phi_w$ ) assim como o coeficiente de atrito do produto com a parede foram determinados com o aparelho de cisalhamento TSG 70/140, utilizando os anéis de Jenike.

Para a determinação das pressões teóricas durante o carregamento, foram utilizadas as equações de 1 a 5, normatizadas na AS 3774 (1990) que leva em consideração a teoria de Janssen (1895) para a predição das pressões ao longo de uma fatia infinitesimal da circunferência da parede do silo circular.

$$Phf = \gamma rc Cz / \mu \quad \text{Eq. (1)}$$

$$Pvf = \gamma rc Cz / K1\mu \quad \text{Eq. (2)}$$

$$K1 = \frac{1 + \text{sen}^2\Phi_i - 2\sqrt{\text{sen}^2\Phi_i - \mu^2 \text{cos}^2\Phi_i}}{4\mu^2 + \text{cos}^2\Phi_i} \quad \text{Eq. (3)}$$

$$Pwf = \gamma rc Cz \quad \text{Eq. (4)}$$

$$Cz = 1 - e^{(-\frac{z}{zo})} \quad \text{Eq. (5)}$$

Onde  $rc = 0,25dc$  para seção de silo circular

O fator K utilizado pela norma relaciona o efetivo ângulo de atrito e o ângulo de atrito do produto com a parede, onde aceita a condição imposta por Walker que limita o fator a no máximo 0,35.

Para a determinação das pressões durante o descarregamento, a norma utiliza as equações de 6 a 8, que levam em conta fatores de sobrepressão e coeficientes de segurança.

$$Phe = Cnf Phf \quad \text{Eq. (6)}$$

$$Cnf = 1,2 Cc \quad \text{Eq. (7)}$$

$$Pwe = Cqf Pwf \quad \text{Eq. (8)}$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

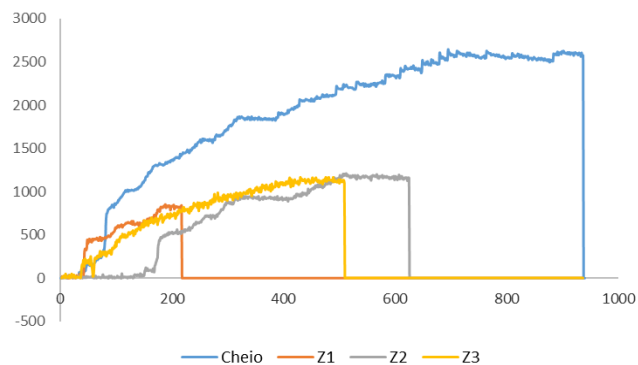
A Tabela 2 apresenta as propriedades de fluxo determinadas com os anéis de Jenike que foram utilizadas na determinação teórica das pressões no carregamento e descarregamento do produto armazenado.

**Tabela 1** - Propriedades de fluxo do produto armazenado

| Produto | Propriedades de Fluxo |     |                    |     |                    |      |                               |     |
|---------|-----------------------|-----|--------------------|-----|--------------------|------|-------------------------------|-----|
|         | $\Phi_i(^{\circ})$    |     | $\Phi_e(^{\circ})$ |     | $\Phi_w(^{\circ})$ |      | $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) |     |
|         | Inf                   | Sup | Inf                | Sup | Inf                | Sup  | Inf                           | Sup |
| Milho   | 22                    | 25  | 30                 | 35  | 17,5               | 20,5 | 7,2                           | 7,7 |

A partir dos ensaios experimentais, foram determinadas as pressões acima da zona de transição pela célula C1 nas situações 1, 2, 3 e 4 para a relação H/D, citadas na metodologia do presente trabalho, onde o Gráfico 1, representa as pressões no momento do carregamento do silo.

**Gráfico 1** - Pressões de carregamento nas situações de relação H/D

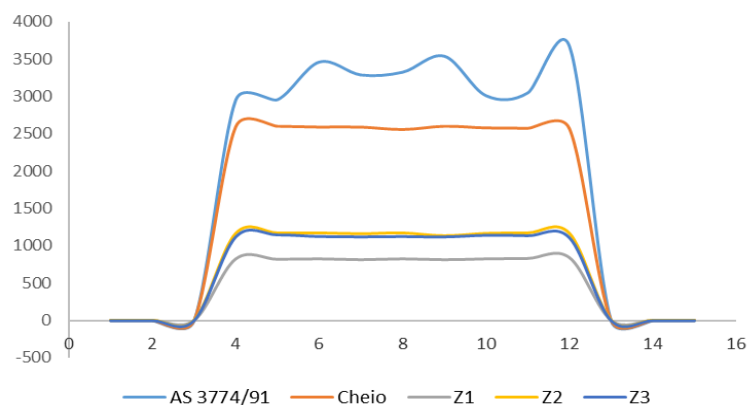


Como era esperado, as pressões para a situação do silo cheio ou silo com relação H/D máxima de 3,9 são as mais altas quando comparadas com os demais ensaios, sendo decrescentes as assíntotas de distribuição das pressões durante o carregamento quando se levam em conta as relações H/D. As menores pressões foram expressas quando o silo esteve cheio até a situação 1 ou seja, na relação H/D igual a 1.

Freitas e Callil Júnior (2005) estudando as pressões em um silo de relação H/D igual a 0,98, encontra valores de pressão próximos ao orifício de descarga, na situação do silo cheio, as maiores pressões encontradas, e em comparação com a norma AS 3774 (1990) os valores experimentais foram aproximadamente 32% mais baixos que os normatizados.

Afirmativa esta, constatada pelo presente trabalho quando comparadas as pressões teóricas determinadas pelas equações contidas na AS 3774 e as pressões experimentais como apresentadas no Gráfico 2 que segue.

**Gráfico 2** - Comparativo entre valores experimentais e normatizados



As pressões encontradas nas situações 2 e 3 diferem numericamente em aproximadamente 4% durante o tempo de carregamento, sendo possível afirmar que, na presente situação, acima da relação H/D igual a 2, as pressões não sofrem variações expressivas.

Fank *et al.* (2018) encontram para um silo metálico, de fundo plano, em verdadeira grandeza, valores para as pressões normatizadas acima dos valores das pressões experimentais exceto na situação onde a célula de pressão esteve no centro do fundo do silo e a carga foi uniformemente distribuída sobre ela.

## CONCLUSÃO

As pressões encontradas acima da zona de transição entre o corpo do silo e a tremonha a partir da força expressa pela célula de carga C1 estão abaixo dos valores normatizados pela AS 3774, porém, quando em analogia a relação H/D, as pressões, para a situação em estudo, não apresentam diferença numérica significativa para H/D maior que 2. As pressões normatizadas são aproximadamente 75% superiores as pressões experimentais com a relação H/D igual a 1 e 20% acima das pressões experimentais encontradas com H/D igual a 3.

## AGRADECIMENTOS

A Capes e CNPq pela concessão de bolsas de pesquisa aos autores.

## REFERÊNCIAS

- AS 3774. Australian Standard. Loads on bulk containers. Sydney: Australian Standard, 1990. 62p.
- Calil Junior, C. Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais. Tese de Doutorado. São Carlos: Universidade de São Paulo, 1990. 198p
- 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*, 2013. 264–272p.
- Fank, M. Z.; Nascimento, J. W. B.; Cardoso, D. L.; Meira, A. S.; Willrich, F. L. Vertical pressures and compressive friction force in a large silo. *Eng. Agrícola*, vol.38, n.4, Jaboticabal, 2018.
- Freitas, E. G. A.; Calil Júnior, C. Estudo teórico e experimental das pressões em silos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, São Carlos, v. 7, n. 24, p. 1-34, 2005.
- Janssen, J. Versuche über Getreidedruck in Silozellen. *Z. Ver. Dtsch. Ing.*, 1895. 1045–1049p. *Stenocarpella*. *Fitopatologia Brasileira*, v.31, n.5, p.427-439, 2006.1049p.
- Jenike, A. W. Storage and flow of silos. Salt Lake City: University of Utah, 1964. 89p.
- Madrona, F. S.; Calil Junior, C. Análise das pressões em silos esbeltos com descarga excêntrica. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, São Carlos, 2009. p. 37-56.
- Nascimento, F.C; Calil Junior, C. A relação entre as pressões horizontais e verticais em silos elevados: o parâmetro k. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, 2008. 17-37p.
- Ravenet, J. Silos, flujo e vaciado sólidos, formacion de bovedas, efectos. Barcelona, Espanha: Técnicos Asociados, S.A., 335p, 1977.