

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DA PRESSÃO INTERNA EM SILOS DE ARMAZENAMENTO A
PARTIR DO MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS.

por

Bruno Bruscato Schmidt

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Agosto de 2022.

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Página obrigatória com a ficha catalográfica que consiste na descrição dos dados internacionais de catalogação na publicação, sendo sua elaboração de responsabilidade do aluno a partir da utilização do Catalográfica disponível na página do Sistema de Bibliotecas da UFRGS (SBUFRGS).

A ficha catalográfica gerada pelo sistema deve ser copiada como imagem e colada no verso da folha de rosto.

CIP - Catalogação na Publicação

SCHMIDT, BRUNO BRUSCATO
AVALIAÇÃO DA PRESSÃO INTERNA EM SILOS DE
ARMAZENAMENTO A PARTIR DO MÉTODO DE ELEMENTOS
DISCRETOS / BRUNO BRUSCATO SCHMIDT. -- 2022.
20 f.
Orientador: JAKSON MANFREDINI VASSOLER.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2022.

1. Silos de Armazenamento. 2. Método de Elementos
Discretos. I. VASSOLER, JAKSON MANFREDINI, orient.
II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Bruno Bruscato Schmidt

AVALIAÇÃO DA PRESSÃO INTERNA EM SILOS DE ARMAZENAMENTO A
PARTIR DO MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS.

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Jakson Manfredini Vassoler

Comissão de Avaliação:

Prof. Jakson Manfredini Vassoler

Prof. Heraldo José de Amorim

Prof. Ignacio Iturrioz

Porto Alegre, setembro de 2022

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Jakson Manfredini Vassoler por ter me orientado não somente na elaboração dessa monografia, como também em diversas outras atividades ao longo do curso;
À Ciber Equipamentos Rodoviários LTDA. por possibilitar a utilização de seus equipamentos.

SCHMIDT, BRUNO. **Avaliação da pressão interna em silos de armazenamento a partir do método de elementos discretos**. 2022. 20. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

RESUMO

Silos são estruturas utilizadas para o armazenamento de material granular promovendo uma economia de espaço físico, mão-de-obra e custo de transporte ao mesmo tempo em que retardam a degradação do material neles armazenado. Por mais que possuam geometrias simples, os silos de armazenamento apresentam uma frequência de falha muito maior do que quaisquer outras estruturas industriais. Um dos fatores que levam a isso está na dificuldade em determinar as pressões internas nos silos e, por conseguinte, em dimensioná-los corretamente. Normas internacionais e métodos analíticos de cálculo apresentam grande grau de incerteza, bem como limitações geométricas, impossibilitando sua utilização em silos com geometrias mais complexas. Na busca de uma metodologia mais precisa e versátil, propõe-se a utilização do método de elementos discretos para calcular a pressão interna em silos de armazenamento, um método de cálculo numérico utilizado para a avaliação do comportamento de materiais particulados. Para tanto, foi feita a comparação entre valores de pressão obtidos de forma experimental, numérica, analítica e através da norma EN 1991 – 4: Actions on Silos. Foram avaliados três silos de geometrias distintas para o armazenamento de grãos de soja - o método de elementos discretos se apresentou o mais preciso na maioria dos casos avaliados. Por fim, foi apresentado um exemplo de geometria de silo não prevista em norma, demonstrando a flexibilidade e representatividade do método de elementos discretos.

PALAVRAS-CHAVE: Silos, Pressão interna, Método de elementos discretos.

SCHMIDT, BRUNO. **Evaluation of internal pressure in storage silos using the discrete element method.** 2022. 20. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

ABSTRACT

Silos are structures used to store granular material, promoting savings in physical space, labor and transport costs while delaying the degradation of the material stored in them. However, even though they have simple geometries, storage silos have a much higher frequency of failure than any other industrial structure. One factor that leads to this is the difficulty in determining the internal pressures in the silos and, therefore, in sizing them correctly. International standards and analytical calculation methods present a high uncertainty and geometric limitations, making it impossible to use them in silos with more complex geometries. In search of a more precise and versatile methodology, it is proposed to use the discrete element method to calculate the internal pressure in storage silos, a numerical calculation method used to evaluate the behavior of particulate materials. Therefore, a comparison was performed between pressure values obtained experimentally, numerically, analytically, and through the standard EN 1991 – 4: Actions on Silos. Three silos with different geometries of soybean grains were evaluated, and the discrete element method was the most accurate in the most of the evaluated cases. Finally, an example of a silo geometry not provided for in regulations was presented, demonstrating the flexibility and representativeness of the discrete element method.

PALAVRAS-CHAVE: Silos, Internal pressure, Discrete element method.

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>Símbolos</i>	<i>Descrição</i>	<i>Unidade</i>
$p_{n,c}$	Pressão normal no corpo do silo	[kPa]
$p_{v,c}$	Pressão vertical no corpo do silo	[kPa]
$p_{n,t}$	Pressão normal na região da tremonha	[kPa]
$p_{v,t}$	Pressão vertical na região da tremonha	[kPa]
γ	Peso específico do sólido	[kNm ⁻³]
$p_{n,c,d}$	Pressão normal dinâmica no corpo do silo	[kPa]
$p_{n,t,d}$	Pressão normal dinâmica na região da tremonha	[kPa]
w	Peso total em uma fatia do silo	[kN]
μ	Atrito entre partícula e parede do silo	[-]
z	Nível do silo	[m]
A	Área da seção transversal do silo	[m ²]
U	Perímetro da seção transversal do silo	[m]
K	Proporção entre pressão normal e tangencial	[-]
ϕ_i	Ângulo de atrito interno	[rad]
C_h	Coefficiente de pressão dinâmica	[-]
h_{cn}	Altura da região de transição corpo/tremonha	[m]
ϕ_w	Ângulo de atrito entre parede do silo e partícula	[rad]
α_w	Ângulo característico da tremonha	[rad]
m	Parâmetro geométrico de Jenike	[-]
F_e	Razão característica entre pressões estáticas na região da tremonha (EN 1991-4)	[-]
F_d	Razão característica entre pressões dinâmicas na região da tremonha (EN 1991-4)	[-]
F_c	Força de contato	[N]
F_l	Força de contato: mola	[N]
F_a	Força de contato: amortecedor	[N]
k	Rigidez da partícula	[N/m]
δ	Sobreposição entre partículas	[m]
ν	Coefficiente de Poisson	[-]
E	Módulo de Elasticidade	[MPa]
R	Raio característico das partículas	[m]
G	Módulo de cisalhamento	[MPa]
c	Coefficiente de amortecimento	[Nm ⁻¹ s ⁻¹]
e	Coefficiente de restituição	[-]
F_p	Força entre partículas em contato	[N]
<i>RMSE</i>	<i>Root mean square error</i>	[kPa]
n	Número de pontos avaliados	[-]
p_e	Pressão experimental	[kPa]
p	Pressão calculada	[kPa]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVO	2
3. SILOS DE ARMAZENAMENTO E SUAS FALHAS.....	2
3.1 Pressão Interna em Silos de Armazenamento	3
3.2 Métodos matemáticos para previsão de pressão interna em silos de armazenamento	4
3.2.1 Métodos Analíticos	4
3.2.2 Normas Existentes.....	6
3.2.3 O Método de Elementos Discretos (DEM)	8
4. METODOLOGIA	11
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	12
6. ESTUDO DE CASO	14
7. CONCLUSÕES	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	16
APÊNDICE A: DEFINIÇÃO DO PARÂMETRO K PARA JENIKE – CONDIÇÃO DINÂMICA.....	19
APÊNDICE B: AJUSTE DE CURVA E TAMANHO DE PARTÍCULA	20

1. INTRODUÇÃO

Visando possuir uma maior confiabilidade em seus cálculos, empresas da indústria de equipamentos rodoviários e agrícola vêm refinando suas análises estruturais para que seja possível desenvolver um projeto com custo reduzido ao mesmo tempo garantindo sua integridade estrutural. Um dos componentes que apresentam grande desafio frente à previsão de seu carregamento, e, por conseguinte, dificultando a análise estrutural, são os silos de armazenamento. Além de seus esforços internos, estes componentes são também sucessíveis a ações externas como sismos e ventos (JÚNIOR, 1998).

Os silos são estruturas amplamente utilizadas para o armazenamento de material granular ou pulverulento a granel, uma vez que promovem uma economia de espaço físico, mão-de-obra e custo de transporte ao mesmo tempo em que retardam a degradação do material nele armazenado (PALMA, 2005). Normalmente utilizados para o armazenamento de grão por produtores agrícolas, os silos podem ainda ser vistos na indústria siderúrgica, na construção civil e em usinas de asfalto, por exemplo. No geral são estruturas metálicas cilíndricas de grande porte, mas podem apresentar geometrias variadas de acordo com sua aplicação (KOCK, 2018).

Na área de produção agrícola existe uma insuficiência na capacidade de armazenamento dos produtores brasileiros que pode ser associada a limitações no desenvolvimento de silos no Brasil (HENZEL, 2007). Esta insuficiência é observada na Fig. 1, que contempla a comparação da produção agrícola brasileira e a inferior capacidade de armazenamento dos produtores ao longo dos anos.

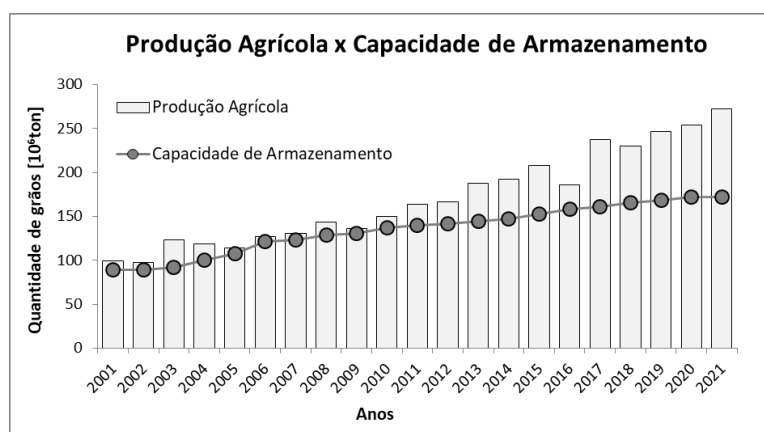


Figura 1 – Comparação da quantidade de produção agrícola e armazenamento no Brasil (Boletim Logístico Conab, abril 2021).

Por mais que sejam estruturas de geometria relativamente simples, os silos de armazenamento apresentam uma frequência de falha muito maior do que outras estruturas industriais (DOGANGUN, 2009). Um dos principais fatores que justificam a grande quantidade de falhas é a dificuldade em determinar a distribuição de pressão interna resultante da interação entre o material ensilado e a parede dos silos. Normas internacionais baseadas em avaliações analíticas propõem metodologias para que seja feita a avaliação das pressões internas, todavia nota-se uma limitação a sua aplicabilidade bem como uma discordância entre uma norma e outra (HEZEL, 2007). O Brasil não possui uma norma própria para regular o dimensionamento dos silos.

Para que silos sejam produzidos com maior confiabilidade uma adequada determinação da distribuição de pressão sobre as paredes é necessária, principalmente em geometrias com descontinuidades. Uma das possibilidades é o uso do método de

elementos discretos, um método de solução numérica capaz de prever o comportamento de materiais particulados comumente utilizados para avaliar a pressão interna em silos de armazenamento (GONZÁLEZ, 2012).

2. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver uma metodologia para determinar a pressão interna em silos de armazenamento de geometrias diversas, através da utilização do método de elementos discretos. Para isso, pretende-se realizar comparações de resultados numéricos com resultados oriundos de soluções analíticas, procedimento proposto por normas internacionais e resultados experimentais presentes na literatura.

3. SILOS DE ARMAZENAMENTO E SUAS FALHAS

A produção dos primeiros silos de armazenamento data do período entre os anos 1870 e 1880 substituindo práticas comuns como o armazenamento de grãos ao ar livre ou em fossas subterrâneas (PALMA, 2005). O seu desenvolvimento foi realizado primeiramente utilizando materiais como madeira, concreto e tijolos (SPARROW et. Al, 1915), entretanto, atualmente os silos são produzidos em sua maioria a partir de materiais metálicos (DOGANGUN, 2009). A longa data de desenvolvimento de silos, todavia, não condiz com o nível de confiabilidade dessas estruturas, haja vista que apresentam uma frequência de falha muito mais alto que outras estruturas industriais (DOGANGUN, 2009).

Por mais que não se possuam dados estatísticos precisos, centenas de silos industriais apresentam algum tipo de falha todos os anos (CARSON, 2009). Normalmente a falha de silos é catastrófica, colapsando a estrutura como um todo, o que resulta na perda da estrutura, contaminação do material armazenado, necessidade de limpeza e possivelmente perda de vida humana (LEWIS, 2006). Como exemplo, NETO 2018 apresenta uma coletânea de falhas em silos de armazenamento no Brasil. Destaca-se o caso apresentado na Fig. 2 em que um silo de armazenamento de soja com 2 mil toneladas de soja se rompeu na cidade de Júlio de Castilhos – RS, resultando na morte de dois trabalhadores que foram soterrados.



Figura 2 – Falha catastrófica em silo de armazenava soja na região sul do Brasil (NETO 2018)

São diversas as causas que podem levar à falha de um silo. Como exemplo, pode-se citar a falha por dimensionamento incorreto, onde as simplificações adotadas não correspondem à realidade do problema, ou ainda devido a fatores mais complexos e

extremos, como a explosão de gases inflamáveis produto da fermentação do material armazenado, corrosão, deterioração ou ainda o carregamento e descarregamento disforme dos silos (DOGANGUN, 2009). O objetivo do presente trabalho está relacionado ao incorreto dimensionamento dos silos durante o desenvolvimento inicial das estruturas, isto devido à falta de metodologias adequadas para determinar com maior precisão as pressões internas atuantes nos silos de armazenamento. Esta grandeza depende do fluxo do material particulado e de muitas variáveis que mudam de acordo com o material armazenado (PALMA, 2005).

3.1 Pressão Interna em Silos de Armazenamento

De uma forma geral, nos silos de armazenamento são duas as principais pressões atuantes, uma pressão vertical (P_v) e uma pressão normal suportada pelas paredes do silo (P_n). Ambas são resultantes da contenção dos silos ao fluxo natural do material nele armazenado. Parte do peso do material confinado é ainda suportada pelo atrito entre a parede do silo, originando a pressão paralela à parede do silo. (MANFRIM, 1994). A Fig. 3 apresenta uma representação esquemática das pressões atuantes, além disso, é feita a importante distinção entre o corpo e a tremonha do silo bem como as pressões atuantes em cada região. A tremonha é utilizada para direcionar o fluxo do material na boca dos silos.

Como exposto por PALMA 2005, é esperado que o perfil da pressão ao longo do nível z silo siga aquele apresentado na Fig. 3 para casos em que se há um livre fluxo de material no interior da estrutura. Percebe-se um incremento da pressão na região de transição entre o corpo e a tremonha do silo, bem como um aumento na pressão no instante do início do descarregamento do silo fazendo a distinção entre a condição estática e dinâmica.

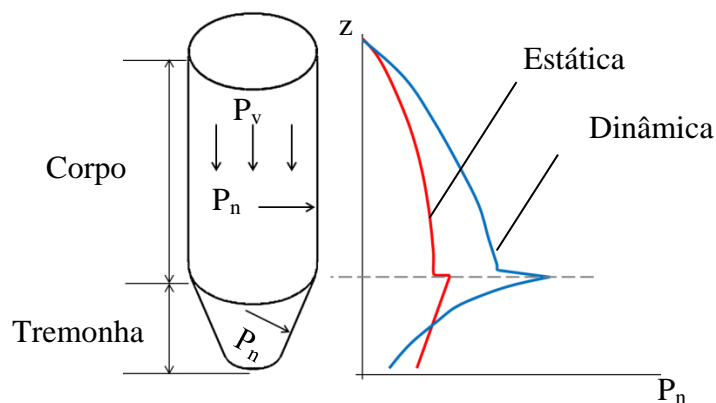


Figura 3 – Representação das pressões presentes nas paredes dos silos de armazenamento e sua diferenciação entre pressão estática e dinâmica.

Para o desenvolvimento dos primeiros silos, as pressões eram calculadas a partir da altura e da densidade do material armazenado, resultando em um comportamento linear das pressões ao longo da altura do silo, isto é, muito semelhante à pressão hidrostática, tratando o material particulado como líquido. Essa formulação foi proposta por RANKINE 1857. Entretanto, diferentemente dos fluidos, os materiais granulares são capazes de transmitir esforços tangenciais devido ao atrito desses com a parede do silo. Esse fator altera significativamente as pressões exercidas nos silos (FREITAS, 2001).

Todavia, mesmo com o desenvolvimento de novas metodologias fisicamente mais adequadas, o método de Rankine ainda continuou a ser implementado devido a sua simplicidade. Um exemplo disso é ORLANDO 1948, que apresentou uma proposta de dimensionamento de silos baseada no método de Rankine. Além de pouco representativo, o método de Rankine é perigoso, uma vez que pode levar a determinação de pressões menores que as reais, e, por conseguinte, ao dimensionamento de estruturas não seguras, suscetíveis a falhas catastróficas (XU, 2022).

Em JANSSEN 1895, é proposta a primeira equação para cálculo de pressões em silos considerando o equilíbrio de forças em uma parte elementar do material ensilado. Sua teoria até hoje é utilizada, inclusive servindo como base para normas reguladoras internacionais (PALMA, 2005). Entretanto, com o refinamento dos métodos produtivos e consequente redução nos fatores de segurança de estruturas metálicas em gerais, um grande número de silos falhou após utilizarem o método de Janssen como base para seu dimensionamento (PALMA, 2005). Novos estudos como JANSSEN 1985, JAMIESON 1904 e ZHU et. Al. 2005 ainda apontam a invalidade do modelo proposto por Janssen durante o enchimento e esvaziamento dos silos de armazenamento, onde efeitos dinâmicos do descarregamento passam a ser governantes. Por sua vez, AYUGA 1995 indica a utilização dessa formulação apenas para silos altos em estado estático e com produtos pouco compressíveis como grãos.

Em JENIKE et. Al, 1973, é apresentada outra metodologia capaz de determinar a da pressão na parede dos silos para condições de carregamento não contempladas por JANSSEN 1895. A metodologia tem capacidade de determinar a pressão atuante não somente no corpo do silo, como também nas paredes das tremonhas dos silos para os casos estáticos ou dinâmicos, isto é, durante o carregamento e descarregamento do material ensilado. Isso fez com que o método de Jenike seja uma das teorias mais utilizadas. Todavia, o procedimento proposto apresenta complicadores, uma vez que demanda uma série de fatores de correção geométricos, os quais dificilmente condizem com as reais estruturas dos silos a serem projetados (PALMA, 2005).

Com isso em mente, a utilização de métodos numéricos tem se tornado cada vez mais popular. SHANSHAN et. Al. 2018, afirma que a utilização do método de elementos discretos é capaz de representar o comportamento de silos com geometrias variadas submetidas à descarga do produto ensilado, simulando comportamentos inelásticos plásticos e viscosos do produto, bem como a interface de contato com a parede do silo.

3.2 Métodos matemáticos para previsão de pressão interna em silos de armazenamento

Como exposto previamente, os métodos para a previsão da pressão interna em silos de armazenamento podem ser divididos em três: métodos analíticos, avaliações normativas, e métodos que utilizam o auxílio de ferramentas de solução numérica.

3.2.1 Métodos Analíticos

Recomendado por ROBERTS 1987, o cálculo analítico para a previsão da pressão interna em silos deve ser dividida em dois. Uma para a avaliação da pressão no corpo do silo, através do método de Janssen, e outra para a avaliação da pressão na região da tremonha, através do método de Jenike. Estes são aplicados tanto para pressões estáticas quanto também para pressões dinâmicas durante o descarregamento dos silos.

3.2.1.1 Corpo dos silos: Janssen

Como exposto por PALMA 2005, a formulação de Janssen foi desenvolvida baseando-se no equilíbrio de uma fatia elementar de um silo cheio. Para que isso fosse verdade, foi necessária a definição de algumas hipóteses, como: pressões constantes em um mesmo plano horizontal, peso específico uniforme, paredes dos silos totalmente rígidas, além de considerar a relação entre pressão horizontal e vertical constantes em todo o silo.

A Fig. 4 apresenta a fatia elementar, de forma que essa apresenta uma altura dz com um material de peso específico γ que resulta em um peso dw . Constam ainda as pressões normais $p_{n,c}$ e as pressões verticais $p_{v,c}$ devido ao atrito μ entre material e a parede dos silos. Além disso, define-se A como a área da seção transversal e U o perímetro.

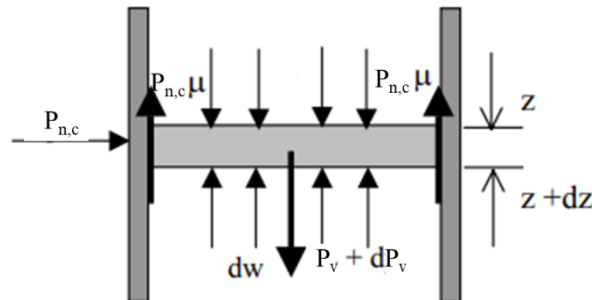


Figura 4 – Fatia elementar de um silo cheio de acordo com Janssen (PALMA 2005, adaptado)

Tratando de uma situação em que o material está estático dentro do silo, tem-se o somatório de forças como mostra a Eq. (1).

$$p_{n,c}\mu dzU + (p_{v,c} + dp_{v,c} - p_{v,c})A - \gamma Adz = 0 \quad (1)$$

Para simplificar a relação acima, Janssen propõe o termo K de forma a correlacionar $p_{n,c}$ e $p_{v,c}$. Essa correlação é apresentada a partir da Eq. (2), tal qual é tida como constante ao longo de todo o silo, assim se mantendo verdade para uma fatia dz do silo.

$$K = \frac{p_{n,c}}{p_{v,c}} \quad (2)$$

Para a determinação de K , utiliza-se a Eq. (3), a qual tem como parâmetro de entrada o ângulo de atrito interno do material ensilado,

$$K = \frac{1 - \text{sen}\phi_i}{1 + \text{sen}\phi_i} \quad (3)$$

onde ϕ_i é o ângulo de atrito interno do material ensilado. A relação, como exposto por HEZEL 2007, não é exata, mas é capaz de prover valores precisos excluindo casos de silos muito baixos e com materiais altamente compressíveis. A partir das relações (1) e (2) chega-se então na relação (4) que segue:

$$dz = \frac{A}{UK\mu} \frac{dp_{n,c}}{\left(\frac{\gamma A}{\mu U} - p_{n,c}\right)} \quad (4)$$

Integrando e assumindo que em $z = 0$ $p_{n,c} = 0$, chega-se na Eq. (5), a qual resulta em um valor da pressão lateral dos silos como uma função do nível z .

$$p_{n,c}(z) = \frac{\gamma A}{\mu U} (1 - e^{-zK\mu\frac{U}{A}}) \quad (5)$$

Já para a determinação da pressão durante o descarregamento do silo, utiliza-se a Eq. (6), semelhante a Eq. (5), porém acrescido do coeficiente de pressão dinâmica,

$$p_{n,c,d}(z) = C_h \frac{\gamma A}{\mu U} (1 - e^{-zK\mu\frac{U}{A}}) \quad (6)$$

onde $p_{n,c,d}$ é a pressão normal dinâmica no corpo do silo e C_h é o coeficiente de pressão dinâmica.

3.2.1.2 Tremonha dos silos: Jenike

Diferentemente de Janssen, Jenike et al 1973 baseou sua solução a partir da avaliação da energia interna, dentro do silo. Dessa forma, o cálculo para avaliação da pressão normal na região da tremonha do silo é o dado a partir das Eq. (6) e (7),

$$p_{n,t}(z) = K\gamma \left[\frac{h_{cn} - z_t}{\nabla - 1} + \left(\frac{p_{v,c}(z_t)}{\gamma} - \frac{h_{cn}}{\nabla - 1} \right) \left(\frac{h_{cn} - z_t}{h_{cn}} \right)^{\nabla} \right] \quad (6)$$

$$\nabla = (1 + m) \left[\left(1 + \frac{tg\phi_w}{tg\alpha_w} \right) K - 1 \right] \quad (7)$$

onde $p_{n,t}$ é a pressão normal à parede da tremonha, h_{cn} a altura do cone da tremonha, z_t o nível da transição entre tremonha e corpo do silo, $p_{v,c}(h_{tr})$ a pressão vertical do corpo do silo na altura da transição entre silo e tremonha, m um parâmetro associado a geometria da tremonha, ϕ_w o ângulo de atrito do produto com a parede do silo, e α_w a inclinação das paredes da tremonha com a vertical.

O valor de K , diferentemente do apresentado para o método de Janssen, varia de acordo com o estado do material ensilado, mas ainda representa a mesma relação entre pressões normais e tangenciais apresentado em (3). Para uma condição estática esse assume o valor apresentado em (8).

$$K = \frac{tg\alpha_w}{tg\phi_w + tg\alpha_w} \quad (8)$$

Para a situação dinâmica de descarregamento do silo, K pode ser determinado a partir das relações apresentadas no Apêndice A.

3.2.2 Normas Existentes

Na tentativa de criar um processo seguro para o desenvolvimento de silos de armazenamento, diversos órgãos reguladores desenvolveram normas voltadas à determinação dos esforços atuantes nas paredes dos silos. Destaca-se a norma australiana AS3774 (1997): *Loads on bulk solids containers* e a norma europeia EN

1991 – 4 (2006): *Action on silos*. No Brasil não existem normas reguladoras específicas para a regulamentação desse tipo de estrutura, com exceção de duas referências a terminologias para silos de grão vegetais TB-374 e TB-377 (HEZEL 2007).

De uma forma geral, a formulação básica para a determinação da pressão interna dos silos é bastante semelhante, haja vista que a maioria das normas baseia-se na metodologia proposta por Janssen (HEZEL, 2007). Entretanto, métodos distintos de determinação das propriedades físicas dos materiais armazenados (FREITAS, 2001) pode levar a diferenças significativas, como apresentado por HEZEL 2007 essa diferença pode resultar em valores de pressão com uma variação de até 400% entre uma norma e outra. Por ser uma referência, a norma europeia EN 1991 – 4 é apresentada em detalhes.

3.2.2.1 Norma EN 1991-4 (2006)

A norma EN 1991-4 (2006): *Action on silos* é uma norma reguladora voltada a fornecer princípios gerais e ações para o design estrutural de silos para o armazenamento de partículas sólidas dentro do continente europeu (EUROCODE, 2006). A norma apresenta uma metodologia para determinar a pressão nas paredes dos silos, além de apresentar parâmetros físicos para materiais tipicamente armazenados nessas estruturas, e os ensaios necessários para que esses sejam determinados. Para o presente trabalho será exposto de forma resumida como é realizado a determinação das pressões internas.

De início são apresentadas as limitações geométricas dos silos as quais a norma atende. A Fig. 5 apresenta uma representação típica de um silo com as restrições expostas pela norma. Ainda assim, a seção transversal do silo deve seguir as apresentadas também na Figura 6, onde as dimensões são parametrizadas em função do perímetro (U) e área (A) da seção transversal – pequenas variações são aceitas.

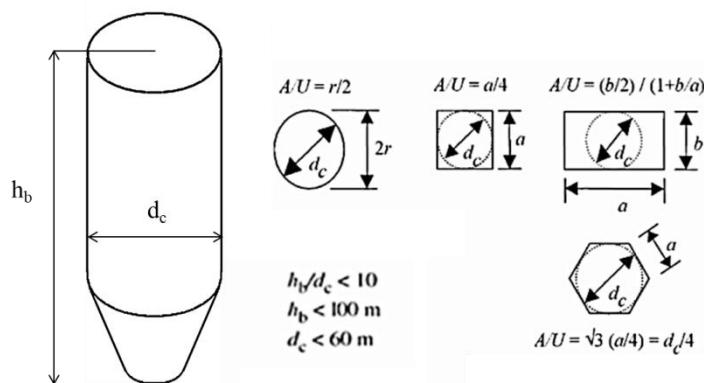


Fig. 5 – Restrições geométricas impostas pela norma EN 1991-4 (2006) (EN 2006, adaptado).

Feitas essas considerações a norma apresenta cálculos distintos para o corpo do silo e para a região da tremonha. Para o corpo do silo é utilizado a mesma formulação de Janssen apresentado na Eq. (5) (HENZEL, 2007), com uma única diferença, o valor de K é obtido através da Eq. (9), sendo esta uma abordagem alternativa para a Eq. (3). Essa formulação tem como base a os estudos realizados por GAYLORD 1984.

$$K = 1,1(1 - \text{sen}\phi_i) \quad (10)$$

Para a região da tremonha inicialmente é determinado a pressão tangencial a parede do silo de acordo com a Eq. (10).

$$p_{v,t}(z) = \left(\frac{\gamma h_{cn}}{n-1} \right) \left\{ \frac{z}{h_{c,n}} - \left(\frac{z}{h_{cn}} \right)^n \right\} + \gamma z_t \left(\frac{z}{h_{cn}} \right)^n \quad (10)$$

onde $p_{v,t}$ é a pressão vertical em uma dada altura z e n é dado a partir da Eq. (11),

$$n = S(F\mu \cot\alpha_w + F) - 2 \quad (11)$$

onde $S = 2$ para tremonhas cônicas ou piramidais, $S = 1$ para tremonhas em cunha, e $S = (1 + \frac{b}{a})$ para tremonhas retangulares onde a e b são as dimensões dos lados da tremonha. Ainda assim, F é a razão característica entre pressão vertical e pressão atuante na parede da tremonha assemelhando-se a razão apresentada na Eq. (2). Esse é definido pela Eq. (12) para a condição estática,

$$F_e = 1 - \frac{0,2}{\left(1 + \frac{\tan\alpha_w}{\mu}\right)} \quad (12)$$

onde F_e é razão entre pressão vertical e pressão atuante na parede da tremonha para a condição estática. Para a condição dinâmica tem-se a Eq. (13),

$$F_d = \frac{1 + \sin\phi_i \cos\left(\phi_{wh} + \sin^{-1}\left\{\frac{\sin\phi_w}{\sin\phi_i}\right\}\right)}{1 - \sin\phi_i \cos\left(2\alpha_w + \phi_{wh} + \sin^{-1}\left\{\frac{\sin\phi_w}{\sin\phi_i}\right\}\right)} \quad (13)$$

onde F_d é razão entre pressão vertical e pressão atuante na parede da tremonha para a condição dinâmica. Sob posse desses valores é possível determinas as pressões normais estáticas e dinâmicas na parede da tremonha como apresentados respectivamente pelas Eq. (14) e Eq. (15),

$$p_{n,t,e} = F_e p_{v,t} \quad (14)$$

$$p_{n,t,d} = F_d p_{v,t} \quad (15)$$

onde $p_{n,t,e}$ é a pressão normal estática e $p_{n,t,d}$ a pressão normal dinâmica na parede da tremonha. Maiores detalhes sobre a metodologia normatizada podem ser obtidos em EN 1991-4 (2006): *Action on silos*.

3.2.3 O Método de Elementos Discretos (DEM)

A limitação imposta pelos métodos analíticos para predição das pressões atuantes nos silos de armazenamento, bem como a divergência entre metodologias propostas por diferentes normas reguladoras, têm sido razões para a procura por novos meios de cálculo. Uma opção viável é a utilização do método de elementos discretos. Este é um método de solução numérica utilizado para simular o comportamento de

materiais granulares, possibilitando prever o comportamento do choque entre partículas (FLORIAN et al., 2007), sendo comumente utilizadas para determinar a pressão causada por essas partículas às paredes dos silos de armazenamento (GONZÁLEZ et. Al, 2012).

O método de elementos discretos foi primeiro desenvolvido por CUNDALL 1979 visando avaliar o comportamento dos solos através de elementos circulares em um esquema computacional com geometria 2D. Exposto por MISHRA 1979, o algoritmo de solução se dá a partir da solução individual da segunda lei de Newton para cada uma das partículas, essas sendo elementos com uma geometria, massa e outras propriedades que regem o comportamento das colisões entre partículas. Uma vez que duas partículas se sobrepõem então as forças normais e cisalhantes são determinadas a partir da magnitude e taxa em que ocorre dita superposição. Dessas forças é determinada a aceleração, velocidade e deslocamento das partículas são calculados entre um incremento de tempo e outro.

Diversos modelos foram propostos para melhor representar o comportamento entre partículas em contato. Na sua maioria esses são modelos reológicos que aproximam a colisão entre partículas a um sistema massa, mola e amortecedor. Os modelos comumente utilizados são o modelo linear mola-amortecedor e o modelo não linear de Hertz-Mindlin (COETZEE, 2017). A um nível macroscópico, foi determinado por BOAC 2014 que ambos os modelos apresentam um resultado similar, assim, para o caso da avaliação em um silo de armazenamento se dá preferência ao modelo linear mola-amortecedor pela maior simplicidade a assim menor tempo de processamento para solução de um problema.

Com isso em mente, a Fig. 6 apresenta uma típica interação entre duas partículas em contato a partir do modelo linear mola-amortecedor. A força de contato é obtida a partir da Eq. (16),

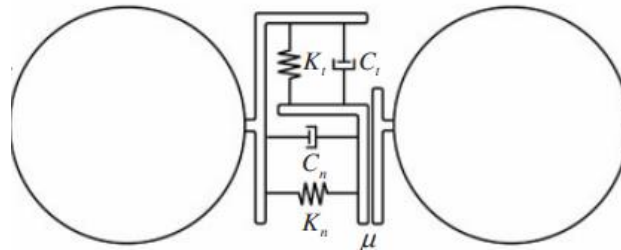


Figura 6– Representação do contato entre duas partículas a partir do modelo linear mola-amortecedor (FLORIAN et al., 2007).

$$F_c = F_l + F_d \quad (16)$$

Onde a força de contato F_c é dividido em um componente F_l proveniente da mola, e um componente F_d do amortecedor. F_l ainda pode ser decomposto em uma força normal e tangencial como mostrado nas Eq. (17) e Eq. (18),

$$F_l^n = k_n \delta_n \quad (17)$$

$$F_l^t = (F_l^t)_0 + k_t \Delta \delta_t \quad (18)$$

onde F_l^n e F_l^t , são as forças normal e tangencial respectivamente, k_n e k_t são as rigidezes normal e tangencial respectivamente, e δ_n e δ_t a sobreposição tangencial e normal respectivamente. A força normal normalmente é atualizada em termos absolutos, isto é, a partir da sobreposição total em dado instante de tempo. Entretanto, a força tangencial é obtida através da variação na sobreposição $\Delta \delta_t$, uma consideração

necessária de ser realizada devido à rotação das partículas entre um incremento de tempo e outro (PFC3D, 2022) As rigidezes são obtidas através da Eq. (19) e Eq. (20),

$$k_n = \frac{4}{3} \left(\frac{1 - \nu_i^2}{E_i} + \frac{1 - \nu_j^2}{E_j} \right)^{-1} * \sqrt{\left(\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \right)^{-1}} \quad (19)$$

$$k_t = 8 \left(\frac{2 - \nu_i}{G_i} + \frac{1 - \nu_j}{G_j} \right)^{-1} \sqrt{\left(\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \right)^{-1}} \delta_n \quad (20)$$

onde E é o módulo de elasticidade, ν é o coeficiente de Poisson, R o raio e G o módulo de cisalhamento das partículas i e j envolvidas em dada colisão. É ainda possível determinar o atrito entre as partículas, tal qual a força tangencial deve respeitar a relação apresentada em (21).

$$F_i^t = F_i^t \text{ se } F_i^t \leq \mu F_i^n \quad (21)$$

$$F_i^t = \mu F_i^n \text{ caso contrário}$$

A parcela do amortecedor por sua vez é dada por (22) e (23),

$$F_a^n = c_n \dot{\delta}_n \quad (22)$$

$$F_a^t = c_t \dot{\delta}_t \quad (23)$$

onde F_a^n e F_a^t são as forças normais e tangenciais respectivamente, c_n e c_t são os coeficientes de amortecimento e tangenciais respectivamente e $\dot{\delta}_n$ e $\dot{\delta}_t$ a taxa de sobreposição tangencial e normais respectivamente. Os coeficientes de amortecimento são obtidos a partir de (24) e (25),

$$c_n = \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}} \sqrt{\left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j} \right)^{-1}} k_n \quad (24)$$

$$c_t = \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}} \sqrt{\left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j} \right)^{-1}} k_t \quad (25)$$

onde e é coeficiente de restituição entre partículas, e m a i e j envolvidas em dada colisão.

Para a determinação da pressão nos silos, a colisão entre a parede sólida e uma partícula é aproximada a colisão entre duas partículas iguais (FLORIAN, 2007). A superfície é dividida em uma malha assim sendo possível determinar a pressão em cada elemento a partir da Eq. (26),

$$P_p = \frac{\sum F_{p,i}}{A_p} \quad (26)$$

onde P_p é a pressão em um elemento da malha, A_p a área de um elemento da malha e $\sum F_{p,i}$ o somatório das forças resultantes da colisão das partículas e um elemento da malha.

4. METOLOGIA

Com o objetivo de estudar a utilização do método de elementos discretos para a avaliação da pressão interna em silos de armazenamento, será analisada a pressão em silos de geometria simples visando comparar os resultados obtidos através da solução numérica com as demais metodologias de cálculo propostas. Busca-se averiguar se o método de elementos discretos é tão eficiente quanto os demais em representar o fenômeno físico em questão, de forma que esse pode se demonstrar como uma alternativa para as geometrias de silo não atendidas pelo cálculo analítico ou o proposto pela norma EM 1994-1 (2006). Como referência serão utilizados valores experimentais presentes em literatura.

CHEUNG 2007 realizou a medição da pressão interna em três silos cilíndricos de armazenamento de grãos de soja para as condições estáticas bem como durante o descarregamento do material ensilado. As diferentes geometrias são apresentadas na Fig. 7, as quais para cada condição, os testes foram repetidos um total de 5 vezes. Deve-se notar que a geometria #01 corresponde apenas a um corpo cilíndrico reto, sem tremonha.

Os valores obtidos por CHEUNG 2007 serviram como referência para àqueles obtidos através dos métodos de cálculo. A capacidade dos métodos de se aproximarem dos valores experimentais será avaliada a partir do parâmetro RMSE (*root mean square error*) o qual é determinado a partir da Eq. (27) e contabiliza a diferença entre os valores de referência e os valores calculados. O parâmetro RMSE foi selecionado haja vista sua maior sensibilidade a erros em pontos com maiores valores absolutos (CHAI, 2014), isto é, os pontos críticos de maior pressão serão mais relevantes para que se obtenha um melhor ajuste entre valores numéricos e experimentais.

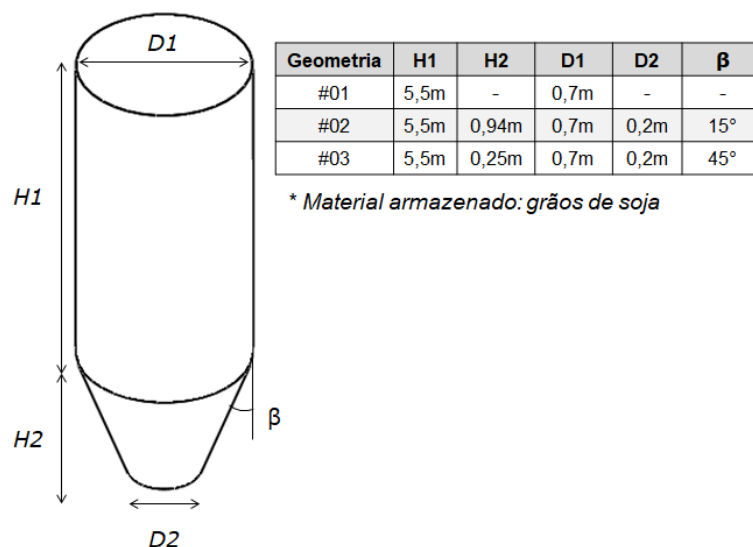


Figura 7 – Configurações geométrica dos silos de avaliados

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_e - p)^2} \quad (27)$$

onde n é o número de pontos avaliados, P_e valores experimentais de pressão e P_c os valores de pressão calculados de acordo com cada metodologia.

Com isso em mente, para que se obtenham resultados condizentes é necessária ainda a definição dos parâmetros materiais que regem as equações presentes nas metodologias de solução apresentadas. Para o cálculo analítico e o indicado pela norma EN 1991-4 foram utilizados os valores apresentados na Tabela 1, que são valores obtidos através de experimentos realizados por CHEUNG 2007. Para a solução numérica, utilizou-se os parâmetros expostos por XU et. al 2020 em que foi proposto um modelo de elementos discretos para a simulação de grãos de soja.

Tabela 1 - Parâmetros do grão soja utilizados para a solução analítica e indicada pela norma EN 1991 4

Parâmetros	Valores
Peso específico (γ)	7,15 kN/m ³
Ângulo de atrito interno (ϕ_i)	34,8°
Atrito parede/soja (μ)	0,205
Coefficiente de pressão dinâmica (C_h)	1,9

Tabela 2 - Parâmetros do grão soja utilizados para a solução numérica

Parâmetros	Valores
Módulo de Elasticidade Soja (E)	32,4 MPa
Módulo de Cisalhamento Soja (G)	11 MPa
Coefficiente de Poisson Soja (ν)	0,4
Coefficiente de Restituição Soja – Soja (e)	0,41
Coefficiente de Restituição Soja – Parede (e)	0,32
Coefficiente de Atrito Soja – Soja (μ_s)	0,56
Formato das partículas	Esférico
Diâmetro das partículas ($2R$)	17,5 mm

Atenta-se somente ao tamanho de partícula utilizado. O tempo computacional demandado para as soluções através do método de elementos discretos está diretamente ligado ao tamanho das partículas. Para que fosse possível obter os resultados numéricos dentro de um tempo hábil, foi selecionada partículas com diâmetro 2,74 vezes maior que aquele proposto por XU et al. 2022. Essa tomada de decisão baseia-se no estudo de sensibilidade do tamanho do diâmetro da partícula apresentado no Apêndice A, em que indica que a simplificação não afetou significativamente os resultados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O primeiro dos casos avaliados foi o perfil de pressão para Geometria #01, sem tremonha. Na Fig. 8 é possível identificar o perfil de pressão para os três métodos de cálculos propostos juntamente com os resultados experimentais obtidos por CHEUNG 2007. A Fig. 8 ainda conta os valores de RSME.

De forma qualitativa, percebe-se a capacidade dos três métodos de representar o comportamento da curva experimental. O método de elementos discretos, entretanto, é o que resulta em valores mais próximos dos experimentais evidenciados, pelo fator RMSE.

A mesma avaliação foi realizada para a Geometria #02, onde os perfis de pressão são apresentados na Fig. 9. Nota-se a similaridade das curvas obtidas ao perfil de pressão esperado como apresentado na Fig. 3. Novamente o método de elementos discretos apresentou o melhor ajuste quando comparado com as demais metodologias. Destaca-se ainda os valores de pressão na região mais solicitada do silo, isto é: a

transição entre o corpo e a tremonha do silo. Para esse ponto específico o método de elementos discretos também apresentou os valores mais próximos, como apresentado na Fig.9.

Para a mesma configuração foi avaliado o perfil de pressão durante o descarregamento do silo, como apresentado na Fig. 10. Ainda assim percebe-se a capacidade dos métodos de cálculos de representar os valores experimentais, entretanto, diferentemente dos casos anteriores, o método analítico é aquele que melhor se aproxima da curva experimental. A comparação dos valores de pressão na região de transição também é apresentada na Fig. 10.

Essa avaliação também foi realizada para o silo com tremonha a 15° (Geometria #03). O valor dos fatores RMSE é apresentado na Tabela 3 juntamente com os demais casos analisados.

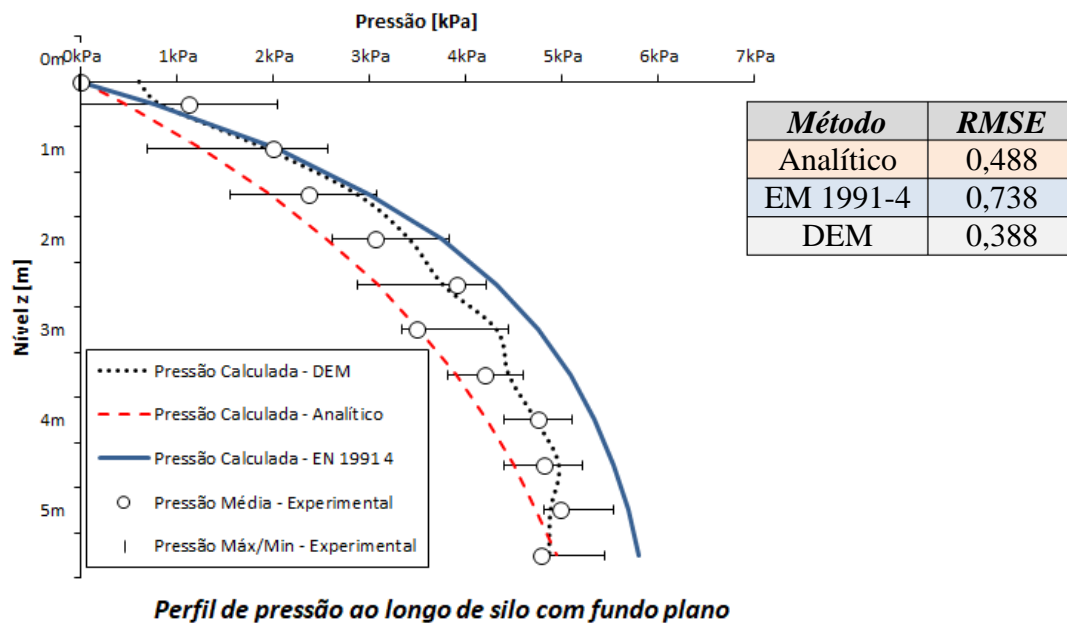


Figura 8 – Perfis de pressão silo cilíndrico de fundo reto e fator de correlação RMSE.

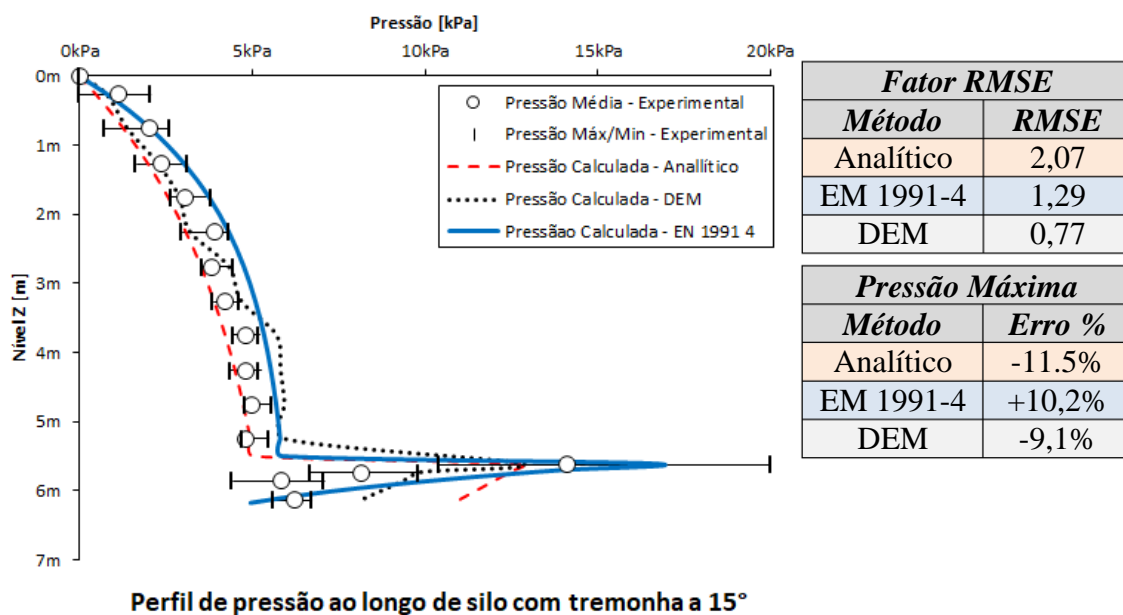


Figura 9 – Perfis de pressão silo cilíndrico com tremonha a 15° - condição estática. É apresentado o fator de correlação RMSE e erro no ponto mais solicitado.

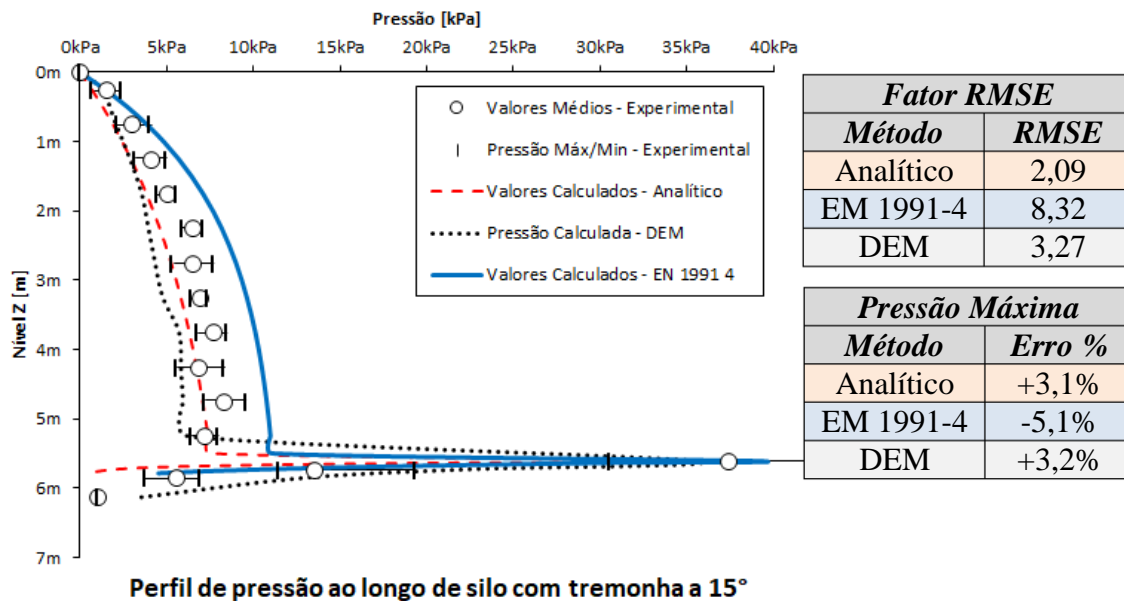


Figura 10 – Perfis de pressão silo cilíndrico com tremonha a 15° - descarregamento. É apresentado o fator de correlação RMSE e erro no ponto mais solicitado.

Tabela 3 – Parâmetro RMSE para os casos avaliados.

Método de Cálculo	RMSE				
	Geo #01 - Estático	Geo #02 - Estático	Geo #02 - Dinâmico	Geo #03 - Estático	Geo #03 - Dinâmico
Analítico	0,49	2,07	2,09	1,86	5,90
EM 1991-4	0,74	2,29	8,32	1,10	8,31
DEM	0,39	1,77	3,27	0,95	7,06

6. ESTUDO DE CASO

Como exposto previamente, o método de elementos discretos se apresentou uma metodologia capaz de mensurar a pressão interna em silos de armazenamento com uma precisão semelhante, ou melhor, que os demais métodos de cálculo avaliados. A vantagem da utilização do método de elementos discretos, entretanto, está no fato de que diferentemente do método analítico e o proposto pela norma EN 1991-4, esse não apresenta limitações geométricas se tornando a única metodologia indicada para a avaliação da pressão interna em silos de geometria complexa. Para ilustrar essa afirmação, traz-se o um estudo de caso de um silo retangular com uma moega bipartida as quais as dimensões apresentadas na Fig. 11. A utilização de silos retangulares, por mais que menos comum, é uma alternativa de mais fácil fabricação, menor custo e com uma mais eficiente utilização do espaço disponível (GOODEY 2017). Além disso, moegas bipartidas se tornam uma alternativa para o descarregamento concomitante do material armazenado a duas estruturas de interesse.

A avaliação do perfil de pressão deste silo através de cálculos analíticos e cálculos propostos por normas demandaria que sua geometria fosse simplificada para atender as limitações geométricas dessas metodologias e assim possivelmente resultando em pressões não condizentes com os presentes na real geometria do silo. Dessa forma, através do método de elementos discreto é possível obter o perfil de pressão da real geometria do silo como apresentado na Fig. 11, em que foi avaliado o armazenamento de grãos de soja.

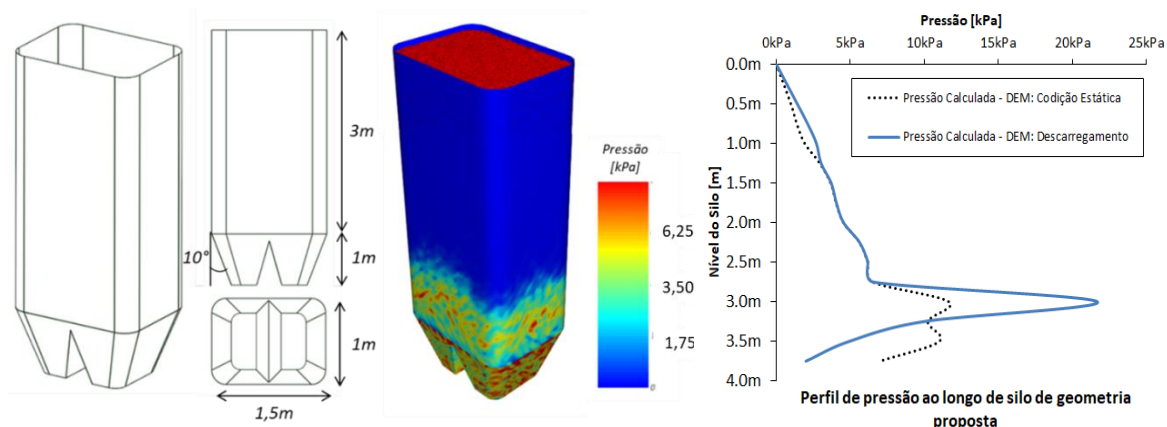


Figura 11 – Dimensões do silo de proposto à direita e a simulação do armazenamento de grãos de soja, com o código de cores indicando a pressão ao longo da estrutura.

7. CONCLUSÕES

A metodologia proposta neste estudo foi capaz de avaliar o uso do método de elementos discretos para previsão do perfil de pressão em silos, comparando sua capacidade preditiva frente a dados experimentais e resultados obtidos de forma analítica e por procedimentos normatizados.

Os resultados demonstraram que a aplicação dos métodos de cálculo propostos, isto é, o método analítico, o método de elementos discretos e o proposto pela norma EN 1991 4, todos resultaram em um perfil semelhante ao obtido experimentalmente por CHEUNG 2007 em um silo cilíndrico para armazenamento de grãos de soja.

O método de elementos discretos se demonstrou um método de cálculo tão capaz quanto os demais métodos propostos para determinar a pressão interna em silos de armazenamento. Esse fato é evidenciado pelo fator RSME no qual o método de elementos discretos foi menor que os demais para 3 dos 5 casos analisados.

A possibilidade de simular silos de geometrias diversas torna o método de elementos discretos o mais indicado para avaliar a pressão interna de estruturas mais complexas as quais não são contempladas pelo método analítico e a norma EN 1991-4. O exemplo disso destaca-se o estudo de caso que conta com a avaliação do perfil de pressão de um silo com geometria complexa através do método de elementos discretos, o que não é possível de ser realizado através dos outros métodos de cálculo propostos.

Para silos de geometria cilíndrica, entretanto, pode-se recomendar a utilização da norma EN 1991-4. A utilização dessa metodologia resultou em pressões maiores que as pressões obtidas experimentalmente, fato esse que levaria ao dimensionamento seguro do silo de armazenamento. Dá-se preferência a esse método ao método de elementos discretos por conta de sua simplicidade, o método de elementos discretos pode demandar demasiado tempo computacional principalmente na avaliação do armazenamento de grãos com geometria irregular e menores dimensões que o grão de soja. Deve-se observar que os resultados pelo método numérico devem ainda ser usados juntamente com coeficientes de segurança a serem definidos para cada projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PALMA, GIOVANE. Pressões e fluxos em silos esbeltos ($h/d > 1,5$). **Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo**, São Carlos/SP, 2005.

KOCK, MAIKOL ANDERSON. Dimensionamento de um silo metálico com fundo plano para armazenamento de soja. **Departamento Acadêmico da Mecânica da Universidade Federal do Paraná**, Pato Branco/PR, 2018.

JUNIOR, LUCIOANO JORGE DE ANDRADE. Análise estrutural das chapas metálicas de silos e de reservatórios cilíndricos. **Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo**, São Carlos/SP, 1998.

SPARROW SAM, et. Al. The silo and its use. **University of missouri college of agriculture agricultural experiment station bulletin 133**, Columbia, Missouri, 1915.

ADEM, DOGANGUN; ZEKI, KARACA; AHMET, DURMUS; HALIL, SEZEN. Cause of Damage and Failures in Silo Structures. **Journal of Performance of Constructed Facilities Vol. 23, Issue 2**, ASCE, 2009.

CARSON, J. W. Silo failures: Case histories and lessons learned. **Proc., 3rd Israeli Conf. for Conveying and Handling of Particulate Solids, Dead Sea, Vol. 1, 4.1–4.11**, Israel, 2000.

LEWIS, J. 2006. Silo failures - Why do they happen? <<http://www.powderandbulk.com/blog/archives/2006/02/>> , 2006.

NETO, JOSÉ PINHEIRO LOPES NETO; NASCIEMNTO, JOSÉ WALLACE BARBOSA DO. Desastres com silos verticais no brasil. uma breve coletânea de acontecimentos e suas causas. **Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia CONTECC**, Maceio/AL, 2018.

MANFRIM, IARA MARTA DA SILVA. Um estudo dos silos para açúcar: propriedades físicas do material armazenado, recomendações construtivas, normativas e análise estrutural. **Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo**, São Carlos/SP, 1994.

RANKINE, W. On the stability of loose earth, **Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Vol. 147, pp. 9–27**, London/UK, 1857.

CARNEIRO, ORLANDO. Silos e sua construção. **Aula inaugural dos anuais da E. S. A. Luiz de Queiroz**, Piracicaba/SP, 1948.

XU, ZHIJUN; LIANG PENGFEI. Modified lateral pressure formula of shallow and circular silo considering the elasticities of silo wall and storage materials. **Henan University of Technology, Zhengzhou 450001**. China, 2022.

JANSSEN, H. A. Versuche Uber Gentreidedruck in Silozellen. **Zeitschrift Verein Deutscher Ingenieure, Vol. 39, pp. 1045-1049**, Alemanha, 1895.

JAMIESON, J. A. Grain pressures in deep bins, **Canadian Society of Civil Engineers**, Vol. 17, pp. 554-607, Canadá, 1904.

ZHU H. P., YU A. B. Steady-state granular flow in a 3D cylindrical hopper with flat bottom: macroscopic analysis **Granular Matter**, 7(2-3):97-107, China, 2005.

AYUGA, F. Los empujes del material almacenado em silos. **Informes de la construcción**, V.46, n.436, p. 27-34, Chile, 1995.

JENIKE A. W., JOHANSON J. R., CARSON J. W. Bin Loads. **Journal of Engineering for Industry**, 95(1):1, ASME, 1973.

SHANSHAN, SUN; JUNHAI, ZHAO; CHANGGUANG, ZHANG. Calculation of Silo Wall Pressure considering the Intermediate Stress Effect. **Advances in Civil Engineering Volume 2018, Article ID 3673515, 10 pages**, Chine, 2018.

PATEL C.P.; SUNIL KUTE. Prediction of wall pressures and stresses developed by grainy materials in cylindrical ferrocement silo in static condition. **Asian Journal of Civil Engineering** <https://doi.org/10.1007/s42107-021-00376-x>, Suiça, 2021.

ROBERTS, A.W. Fundamental principal of storage bin and discharge system design for bulk solids handling. **Paper 2. Storage, Flos and Handling of Bulk Solids**, Nova Zelândia, 1987.

HEZEL, CLAUDIA REGINA. Avaliação das pressões em silos verticais conforme diferentes normas internacionais. **Programa pós-graduação do centro de ciências exatas e tecnológicas**, Cascavel/PR, 2007.

FREITAS, EDNA, DAS GRAÇAS, ASSUNÇÃO. Estudo teórico e experimental das pressões em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro e fundo plano. **Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo**, São Carlos/SP, 2001.

EUROCODE 1 – EM 1991-4. Actions os silos and tanks, Bruxelas, 2006.

GAYLORD JR, E.H.; GAYLORD, C.N. Desing of steel bins for storage of bulk solids. **Penitence-Hall, INC, New Jersey. 359p.**, Estados Unidos, 1984.

FLORIAN, FLEISSNER; TIMO GAUGELE ; PETER, EBERHARD. Applications of the discrete element method in mechanical engineering. **Multibody Syst Dyn (2007) 18: 81–94**, Alemanha, 2007.

C. GONZÁLEZ-MONTELLANO , A. RAMÍREZ, J.M. FUENTES, F. AYUGA. Numerical effects derived from en masse filling of agricultural silos in DEM simulations. **Computers and Electronics in Agriculture Vol. 81 P. 113-123**, Espanha, 2012.

CUNDALL, P. A.; STRACK, D. L. A discrete numerical model or granular assemblies. **Georechnique 1979, 29, 47-65**, Estados Unidos, 1979.

B. K. MISHRA AND RAJ K. RAJAMANI. The discrete element method for the simulation of ball mills. **Comminution Center, University of Utah**, Estados Unidos, 1992.

COETZEE , C.J. Review: Calibration of the discrete element method. **Powder Technology Vol.310 p.104-142**, Africa do Sul, 2017.

BOAC, J.M., AMBROSE, R.P.K., CASADA, M.E. ET AL. Applications of Discrete Element Method in Modeling of Grain Postharvest Operations. **Food Eng Rev 6, 128–149** <https://doi.org/10.1007/s12393-014-9090-y>, Estados Unidos, 2014.

PFC3D (Particle Flow Code in Three Dimensions), User's Guide, www.itascacg.com, 2022.ioZ2021.pdf

MANFRIN, I.M.S. Um estudo de silos para açúcar: propriedades físicas do material armazenado, recomendações construtivas, normativas e análise estrutural. **Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo**, São Carlos/SP, 1994.

CHEUNG, A. B. Modelo estocástico de pressões de produtos armazenados para a estimativa da confiabilidade estrutural de silos esbeltos. **Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo**, São Carlos/SP, 2007.

CHAI, T., DRAXLER, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature. **Air Resources Laboratory (ARL), NOAA Center for Weather and Climate Prediction**, Estados Unidos, 2014.

Goodey, R.J., Brown, C. J. and Rotter, J. M. (2017). Rectangular steel silos: Finite element predictions of filling wall pressures. **Engineering Structures, 132**, pp. 61-69.[doi: 10.1016/j.engstruct.2016.11.023](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.11.023), Inglaterra, 2006

APÊNDICE A: DEFINIÇÃO DO PARÂMETRO K PARA JENIKE – CONDIÇÃO DINÂMICA

Para a condição de descarregamento, a determinação do coeficiente K segue a relação (A1) apresentada. As relações (A2) a (A5) definem os coeficientes faltantes.

$$K = \left[\frac{\frac{\sigma_w}{\gamma B}}{q \left(\frac{4}{\pi}\right)^m} \right] \quad (A1)$$

$$\frac{\sigma_w}{\gamma B} = \frac{Y(1 + \text{sen}\phi_i \cos\phi_i)}{2(X - 1)\text{sen}\alpha} \quad (A2)$$

$$cq = \left(\frac{\pi}{3}\right)^m \frac{1}{4tg\alpha} \left[2 \left(\frac{\sigma_w}{\gamma B}\right) (tg\alpha + tg\phi_i) - \frac{1}{1+m} \right] \quad (A3)$$

$$X = \frac{2^m \text{sen}\phi_i}{1 - \text{sen}\phi_i} \left[\frac{\text{sen}(\phi_i + \alpha)}{\text{sen}\alpha} + 1 \right] \quad (A4)$$

$$Y = \frac{\left\{ 2 \left[1 - \cos\left(\frac{\phi_i}{2} + \alpha\right) \right] \right\}^m \left(\frac{\phi_i}{2} + \alpha\right)^{1-m} \text{sen}\alpha + \text{sen}\left(\frac{\phi_i}{2}\right) \text{sen}^{1+m}\left(\frac{\phi_i}{2} + \alpha\right)}{(1 - \text{sen}\phi_i) \text{sen}^{2+m}(\phi_i + \alpha)} \quad (A5)$$

onde o parâmetro $m = 1$ para uma tremonha cônica, e $m = 0$ para uma tremonha em cunha.

APÊNDICE B: AJUSTE DE CURVA E TAMANHO DE PARTÍCULA

Como exposto previamente, para a solução numérica através do método de elementos discreto foi necessário a utilização de partículas com diâmetro 2,74 vezes maiores do aquele proposto por XU et. al 2020 para a simulação de grãos de soja. Isto por conta do grande tempo computacional demandando para a simulação com partículas de menor diâmetro.

Para fundamentar essa escolha foi realizada uma avaliação do fator RSME de acordo com o tamanho de partícula selecionado. Essa avaliação é apresentada na Figura B.1 no qual se percebe que a partir de partículas com 5,71 vezes o tamanho da partícula o ajuste entre os perfis de pressão numéricos e experimentais apresentam um erro semelhante. Entretanto, o tempo computacional demandado aumenta exponencialmente com a redução do diâmetro das partículas. Foi selecionado partículas com diâmetro 2,74 vezes maiores que o indicado por XU et. al 2020 por apresentar o menor fator RSME dentro de um tempo de processamento viável.

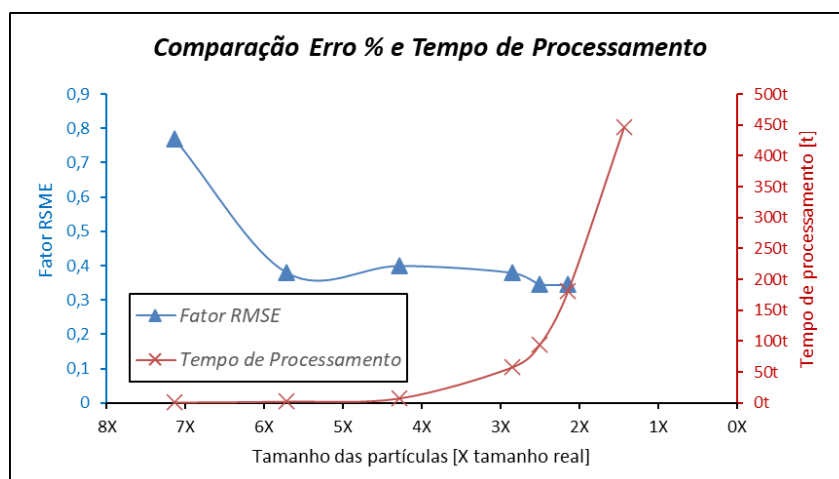


Figura B.1 – Comparação do fator RSME de ajuste entre valores numéricos e experimentais e tempo de processamento em função do tamanho de partículas selecionado.