

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DO SERTÃO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

RODRIGO JANUÁRIO DE MELO

**Análise Estática de Estruturas de Armazenamento de
Grãos Através do Método dos Elementos Discretos**

Delmiro Gouveia
Maio de 2016

RODRIGO JANUÁRIO DE MELO

Análise Estática de Estruturas de Armazenamento de Grãos Através do Método dos Elementos Discretos

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas – Campus do Sertão, como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Romildo dos Santos Escarpini Filho

Co-Orientador: Diogo Tenório Cintra

Delmiro Gouveia
Maio de 2016

Análise Estática de Estruturas de Armazenamento de Grãos Através do Método dos Elementos Discretos

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas – Campus do Sertão, como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

M528a Melo, Rodrigo Januário de

Análise estática de estruturas de armazenamento de grãos através dos métodos dos elementos discretos / Rodrigo Januário de Melo. - 2016.

54f.: il.

Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia, 2016.

Orientação: Prof. Dr. Romildo dos Santos Escarpini Filho.

1. Análise Estática. 2. Armazenamento de Grãos. 3 Elementos Discretos.

CDU 631

Folha de Aprovação

AUTOR: RODRIGO JANUÁRIO DE MELO

Análise Estática de Estruturas de Armazenamento de Grãos Através do Método dos Elementos Discretos

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo professor orientador e pelo Colegiado do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas – Campus do Sertão em 25 de maio de 2016.

Romildo S. Escarpini Filho

Profº. Dr. Romildo dos Santos Escarpini Filho, UFAL (Orientador)

Diogo J.C.

Diogo Tenório Cintra, UFAL (Co-Orientador)

Banca Examinadora:

Christiano Augusto Ferrario Várady Filho

Christiano Augusto Ferrario Várady Filho, UFAL (Examinador Interno)

Karljsson Andre Nunes da Silva

Karljsson Andre Nunes da Silva, UFAL (Examinador Interno)

Romildo S. Escarpini Filho

Profº. Dr. Romildo dos Santos Escarpini Filho, UFAL (Examinador Interno)

Folha de Aprovação

AUTOR: RODRIGO JANUÁRIO DE MELO

Análise Estática de Estruturas de Armazenamento de Grãos Através do Método dos Elementos Discretos

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo professor orientador e pelo Colegiado do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas – Campus do Sertão em 25 de maio de 2016.

Profº. Dr. Romildo dos Santos Escarpini Filho, UFAL (Orientador)

Diogo Tenório Cintra, UFAL (Co-Orientador)

Banca Examinadora:

Christiano Augusto Ferrario Várady Filho, UFAL (Examinador Interno)

Karlisson Andre Nunes da Silva, UFAL (Examinador Interno)

Profº. Dr. Romildo dos Santos Escarpini Filho, UFAL (Examinador Interno)

DEDICATÓRIA

Primeiramente, dedico este trabalho a Deus por ser o meu grande orientador na vida, que me concede sonhos e realizações.

Dedico este trabalho a minha mãe, que foi a primeira pessoa a me apoiar na realização desse sonho, estando comigo em todos os momentos difíceis me incentivando e ajudando para que eu pudesse seguir firme nessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que é a luz para o meu caminho e a força maior para prosseguir.

Aos meus pais, Marinília e Elio por todo o esforço e dedicação que foram essenciais para minha formação, principalmente a minha mãe, que sempre me apoiou em tudo.

Ao meu irmão, Tiago, por sempre estar presente e me ajudando em diversos momentos.

A todos os professores, que foram fundamentais durante o curso transmitindo todo o seu conhecimento.

Aos amigos e colegas que sempre estiveram juntos nessa jornada, me ajudando a enfrentar todas as dificuldades e compartilhando momentos de alegria. Principalmente ao meu grande amigo Sirlandro Amorim, que esteve junto comigo desde o ensino médio até a conclusão do curso, buscando solução para todos os problemas aos quais fomos submetidos.

Especialmente ao meu orientador, Romildo dos Santos Escarpini Filho, por toda a sua dedicação e paciência durante este trabalho, sobretudo pelo conhecimento que me passou.

RESUMO

MELO, R. J. (2016). Análise Estática de Estruturas de Armazenamento de Grãos Através do Método dos Elementos Discretos. (Monografia de Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia, 2016.

Silos verticais são estruturas de armazenamento com alto índice de colapsos, dado que em sua maioria não apresentam condições ideais de operação, devido ao conhecimento insuficiente das pressões exercidas nas paredes do mesmo pelo produto armazenado, principalmente na condição de descarga. Assim, é possível explicar a grande quantidade de acidentes em estruturas deste tipo. Além disso, esses problemas são potencializados quando se trata de silos esbeltos, os quais apresentam a relação entre a altura e o diâmetro superior a 1,5. Atualmente, não existe norma brasileira para a determinação das pressões exercidas pelos grãos armazenados sobre as paredes do silo. Desta forma, são utilizadas teorias empíricas e normas internacionais para auxiliar no projeto desse tipo de estrutura. Entretanto, esses códigos normativos apresentam divergências no que diz respeito à determinação das pressões, o mesmo ocorre com as teorias. Este trabalho tem por finalidade a modelagem e simulação numérica de estruturas de armazenamento de grãos, conhecidas como silos, para analisar seu comportamento devido à presença das pressões laterais nas paredes e na tremonha (parte inclinada) em regime estático através do Método dos Elementos Discretos. Este método foi escolhido uma vez que o mesmo permite simular com eficiência problemas de natureza discreta, sendo adequado para modelar e estudar problemas que envolvam meios descontínuos como o armazenamento e o fluxo de grãos. Assim, as solicitações encontradas serão comparadas com valores obtidos por meio das teorias e normas, tornando-se possível identificar as ações que são negligenciadas pelas mesmas e possibilitando maior segurança no projeto, na execução e na operação de silos, reduzindo o número de acidentes e colapsos.

ABSTRACT

MELO, R. J. (2016). Static analysis of grain storage Structures using the Discrete Element Method. Under-Graduation Thesis – Civil Engineering Course, Federal University of Alagoas, Delmiro Gouveia, 2016.

Vertical silos are storage structures with high index collapses, as mostly do not present ideal operating conditions, due to insufficient knowledge of the pressures exerted on the walls of the same by the stored product, particularly in the discharge condition. Thus, it is possible to explain the large number of accidents in such structures. Moreover, these problems are exacerbated when dealing with slender silos, which show the relationship between the height and diameter of more than 1.5. Currently, there is no Brazilian standard for the determination of pressure from grain stored on the walls of the silo. Thus, they are used empirical theories and international standards to assist in the design of this type of structure. However, these normative codes have differences with regard to the determination of the pressures, so does the theories. This work aims at modeling and numerical simulation of grain storage structures, known as silos, to analyze their behavior due to the presence of lateral pressures on the walls and in the hopper (inclined part) in static regime through the Discrete Element Method. This method was chosen since it allows effectively simulate problems discrete nature, being suitable for modeling and studying problems involving discrete media such as storage and grain flow. Thus, requests found will be compared with values obtained through the theories and standards, making it possible to identify the actions that are neglected by them and allowing greater safety in the design, implementation and silos of operation, reducing the number of accidents and collapses.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da capacidade estática de armazenamento de grãos no Brasil, 1980 - 2015.	15
Figura 2 - (a) Grupo de silos elevados. (b) Silo semi-subterâneo.....	17
Figura 3 – Partes constituintes e dimensões dos silos utilizadas pelas teorias e normas.	19
Figura 4 - Silo da cidade de Maceió.	20
Figura 5 - Pressões na estrutura do silo devido ao produto armazenado.	23
Figura 6 - Forças agindo sobre uma camada elementar do produto armazenado. ...	28
Figura 7 - Resumo da sequência de cálculo para o Método dos Elementos Discretos.	33
Figura 8 - Critério de contato entre partículas circulares.	34
Figura 9 - Diagrama de corpo livre e decomposição da força de contato.....	35
Figura 10 - Modelo de interface de contato.	36
Figura 11 - Tela do programa DemoopView.....	39
Figura 12 - Geometria e dimensões do silo analisado.....	41
Figura 13 - (a) Malha do silo no GMSH. (b) malha do silo no DemoopView.	42
Figura 14 – (a) Preenchimento da tremonha. (b) preenchimento da casca cilíndrica.	43
Figura 15 - Silo preenchido.....	44
Figura 16 - Divisão dos processos na análise em paralelo.....	46
Figura 17 - Gráfico das pressões horizontais iniciais.	48
Figura 18 - Pressões obtidas no MED com vários k_0	50
Figura 19 - Comparativo entre as pressões das teorias e normas e do modelo numérico.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Déficit do armazenamento no Brasil, 2001-2015.	16
Tabela 2: Emprego do limite inferior e superior das propriedades físicas dos produtos.	25
Tabela 3: Valores das propriedades físicas dos produtos.	25
Tabela 4: Classificação dos silos segundo a relação h/d	30
Tabela 5: Pressões iniciais e parâmetros K.....	30
Tabela 6: Pressões horizontais iniciais.....	47
Tabela 7: Pressões horizontais obtidas através do MED.	49

LISTA DE SÍMBOLOS

h	Altura efetiva do produto armazenado
d	Diâmetro interno do silo
p_w	Pressão de atrito na parede do silo
p_v	Pressão vertical
p_h	Pressão horizontal na parede do silo
p_t	Pressão tangencial à parede da tremonha
p_n	Pressão normal à parede da tremonha
K	Relação entre a pressão vertical e horizontal
ρ	Densidade do produto armazenado
ϕ_i	Ângulo de atrito interno
ϕ_e	Efetivo ângulo de atrito interno
ϕ_w	Ângulo de atrito com a parede
γ	Peso específico do produto
z	Profundidade onde é calculada a pressão
μ	Razão de atrito entre as pressões de atrito e horizontal
dz	Parcela infinitesimal da altura z
dp_v	Parcela infinitesimal da pressão vertical
dp_h	Parcela infinitesimal da pressão horizontal
A	Área da seção transversal do silo
U	Perímetro da seção transversal do silo
dw	Parcela infinitesimal da força de atrito
M	Matriz de massa
C	Matriz de amortecimento
F_{cont}	Força de contato entre as partículas
F_{elem}	Força de vínculo entre duas partículas
F_{int}	Esforços internos
F_{ext}	Ações externas aplicadas sobre as partículas
\ddot{u}	Vetor de aceleração
\dot{u}	Vetor de velocidade
r_1	Raio da partícula u_1

r_2	Raio da partícula dois
d	Distância entre o centro das partículas
\vec{v}_1	Velocidade translacional da partícula 1
\vec{v}_2	Velocidade translacional da partícula 2
$\vec{\omega}_1$	Velocidade rotacional da partícula 1
$\vec{\omega}_2$	Velocidade rotacional da partícula 2
k_n	Rigidez normal da partícula
k_t	Rigidez tangencial da partícula
C_n	Coefficiente de amortecimento normal
C_t	Coefficiente de amortecimento tangencial
\vec{F}_n	Força normal de contato
$F_{n,e}$	Parcela elástica da força normal de contato
$F_{n,d}$	Parcela de amortecimento da força normal de contato
\vec{n}	Vetor que liga o centro das partículas
u_{rn}	Interpenetração das superfícies de contato
v_{rn}	Velocidade relativa entre o centro das partículas em contato
\vec{v}_{rT}	Velocidade tangencial relativa
\vec{r}_c	Vetor que conecta o centro das partículas com o ponto de contato
k_0	Coefficiente de empuxo

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Considerações Iniciais	13
1.1.1	Produção de Grãos.....	13
1.1.2	Tipos de Silos	16
1.2	Justificativa	19
1.3	Objetivo Gerais	21
1.4	Objetivos Específicos	21
2	ESTRUTURAS DE ARMAZENAMENTO DE GRÃOS.....	22
2.1	Propriedades Físicas do Produto Armazenado	24
2.2	Pressões Exercidas Pelo Produto Armazenado	26
2.3	Teorias	26
2.3.1	Teoria de Janssen	26
2.3.2	Teoria de Jenike	28
2.3.3	Teoria de Walker	28
2.4	Normas Internacionais Analisadas	29
3	MÉTODO NUMÉRICO.....	31
3.1	Descrição Geral	31
3.2	Equacionamento	32
3.2.1	Leis de Força-Deslocamento.....	33
3.2.2	Componente de Força Normal.....	36
3.2.3	Componente de Força Tangencial.....	37
3.3	Programas Computacionais	38
4	EXEMPLOS E DISCUSSÕES	40
4.1	Modelo	40
4.1.1	Geometria.....	40
4.1.2	Preenchimento do Silo.....	42
4.1.3	Análise.....	45
4.2	Resultados	46
5	CONCLUSÃO	52
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A produção de grãos como a soja, o milho, o arroz e diversos outros, representa uma parcela importante da agricultura em todo o mundo. Como em outros setores da economia, os produtos granulares oriundos do setor agrícola passam por diversas etapas até chegar à sua destinação final, nesse sentido, após a colheita, os grãos geralmente são armazenados a granel em estruturas denominadas silos.

O armazenamento em estruturas desse tipo é considerado uma opção muito viável, uma vez que é possível armazenar grande quantidade de grãos em espaços menores, reduzir a mão de obra e ainda garantir que o produto armazenado será conservado de maneira eficiente para que não haja perdas. Além disso, esta técnica de armazenamento auxilia em estratégias financeiras, possibilitando o controle do escoamento da safra diante das variações do mercado. (PALMA, 2005)

A palavra silo vem do grego *sirus*, que significa um lugar escuro e cavernoso. Contudo, atualmente, o silo é denominado como sendo um depósito para grandes quantidades de produtos como cereais, forragens e outros. Nesse sentido, os silos podem ser entendidos como estruturas destinadas ao armazenamento de materiais granulares ou pulverulentos, podendo ser construídos com os mais diversos materiais. (CHEUNG, 2007)

1.1.1 Produção de Grãos

Historicamente, a agricultura é uma das principais bases da economia brasileira, tendo em vista que a mesma vem crescendo ao longo das décadas e, devido a isso, o Brasil é um dos países que mais se destacada no cenário mundial. Esse crescimento pode ser associado ao desenvolvimento tecnológico que impulsionou a produção de

grãos por todo o país, tornando possível produzir em maior quantidade por unidade de área e, além disso, com maior qualidade.

O armazenamento é uma etapa indispensável no processo de produção de grãos, uma vez que estocar em períodos de safra e entressafra, quando não se produz mais grãos, garante o abastecimento e distribuição de alimentos durante todo o ano, possibilitando ainda alcançar uma estabilidade nos preços e evitar grandes variações no mercado. (PATURCA, 2014)

Os sistemas de armazenamento devem possuir estrutura adequada para garantir a conservação do produto, assegurando que sua qualidade seja mantida por longos períodos de tempo. Dessa forma, pode-se destacar outros benefícios relacionados a esse sistema, como escoar a produção em períodos que o frete esteja mais barato e aumentar o poder de barganha dos produtores quanto à escolha da melhor época para comercializar os produtos. (AZEVEDO *et al.*, 2008)

Diante desse crescimento da agricultura no Brasil, os números da produção de grãos vem crescendo em um ritmo acelerado nas últimas décadas, contudo, a capacidade de armazenamento não consegue acompanhar o crescimento da produção para suprir sua demanda, dando origem a um *déficit* na estocagem. Com a capacidade de armazenamento menor que a produção, milhões de toneladas de grãos deixam de ser armazenadas adequadamente todos os anos, gerando perdas consideráveis para os produtores e conseqüentemente para a economia do país. (MADRONA, 2008)

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2016), o Brasil apresentou *déficit* no armazenamento no início dos anos oitenta, onde nos anos de 1980 e 1981 a capacidade estática foi menor que a produção. Contudo, logo se recuperou e conseguiu atender a demanda até o início dos anos dois mil, quando a produção novamente ultrapassou a capacidade de armazenamento, mantendo-se dessa forma até os dias atuais. A evolução da produção de grãos e da capacidade estática de armazenamento pode ser observada na **Figura 1**, que mostra as séries históricas de ambas a partir de 1980 até 2015.

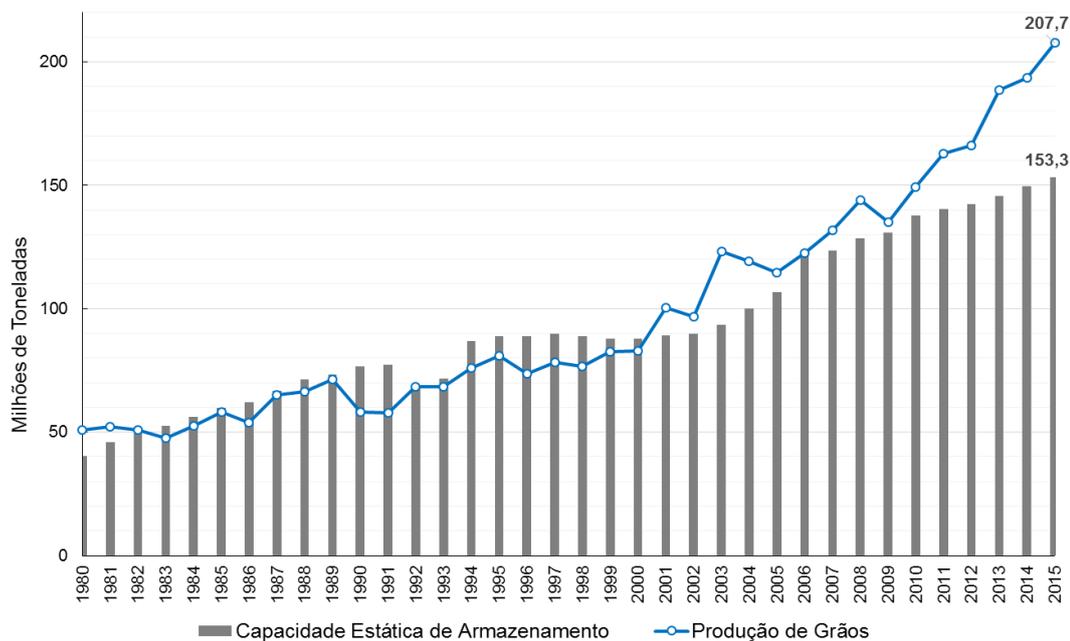


Figura 1 - Evolução da capacidade estática de armazenamento de grãos no Brasil, 1980 - 2015.

Fonte: CONAB, 2016.

Nesse sentido, através de uma análise das séries históricas da capacidade estática de armazenamento e da produção de grãos, é possível perceber que a partir do ano de 2001, a produção ultrapassou a capacidade de armazenamento e deu início ao *déficit* no armazenamento. A **Tabela 1** traz valores das séries históricas, especificamente dos últimos quinze anos, onde é possível observar o *déficit* e a sua dimensão em relação à produção total de grãos.

Tabela 1: Déficit do armazenamento no Brasil, 2001-2015.

Ano	Capacidade Estática de Armazenamento	Produção de Grãos	Déficit (%)
2001	89,227	100,267	11,00
2002	89,734	96,799	7,3
2003	93,359	123,168	24,20
2004	100,056	119,114	16,00
2005	106,539	114,695	7,11
2006	121,988	122,531	0,44
2007	123,402	131,751	6,34
2008	128,484	144,137	10,86
2009	130,781	135,135	3,22
2010	137,828	149,255	7,66
2011	140,456	162,803	13,73
2012	142,482	166,172	14,26
2013	145,486	188,658	22,88
2014	149,507	193,622	22,78
2015	153,320	207,667	26,17

Fonte: Dados do CONAB,2016.

Percebe-se então a necessidade de se estudar as estruturas de armazenamento, uma vez que a produção de grãos é uma das bases do desenvolvimento econômico do Brasil e está diretamente ligada a análise estrutural, por se tratar, basicamente de estruturas metálicas projetadas para suportar esforços internos e externos.

1.1.2 Tipos de Silos

Os silos são divididos de acordo com algumas características principais, como o material estrutural empregado, a sua forma geométrica e ainda o tipo de construção em relação ao solo. No que se refere ao tipo de material estrutural, os silos podem ser construídos com uma grande variedade de materiais, como o concreto armado, concreto protendido, madeira, alvenaria, chapas de aço, entre outros. (FRAN, 2014)

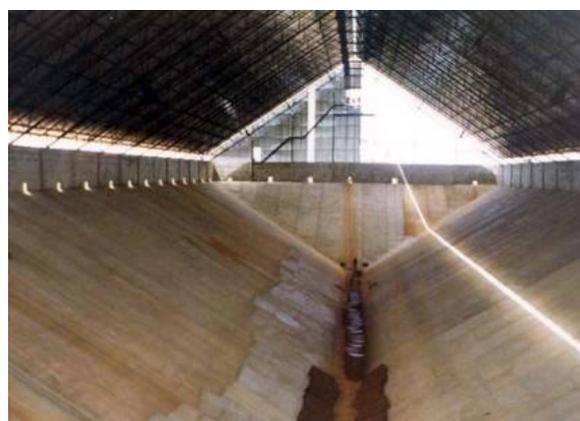
De acordo com Cheung (2007), quanto ao tipo de construção em relação ao solo, os silos podem ser divididos em três grupos:

- Silos elevados ou aéreos: são inseridos nesse grupo os silos que são construídos acima do nível do solo, dessa forma, o procedimento de descarga do material armazenado é facilitado quando se adota esse tipo de estrutura. Além disso, deve-se destacar que devido ao custos com a estrutura, a construção de silos elevados é mais cara do que a de silos subterrâneos e semi-subterrâneos;
- Silos subterrâneos: esse tipo de silo é caracterizado por ser construído abaixo do nível do solo, possuindo uma estrutura mais simples do que os silos elevados. Contudo, por estar em contato direto com o solo, esse tipo de silo é mais suscetível à infiltração de água e seu descarregamento torna-se mais difícil;
- Silos semi-subterrâneos: são um tipo intermediário entre o silo elevado e o subterrâneo, o qual apresenta parte da estrutura enterrada e parte acima do nível do solo.

A **Figura 2** mostra exemplos de silo elevado e silo semi-subterrâneo, possibilitando uma breve visualização das diferenças entre as estruturas de ambos os tipos de silos.



(a)



(b)

Figura 2 - (a) Grupo de silos elevados. (b) Silo semi-subterrâneo.

Fonte: CHEUNG, 2007.

No que se refere à geometria, os silos são classificados de acordo com a altura efetiva de armazenamento do produto (h) e o seu diâmetro interno (d) (**Figura 3**), Palma (2005) classifica a geometria dos silos em três tipos:

- Silos baixos: são aqueles que possuem uma pequena relação entre a altura e o diâmetro: $\left(\frac{h}{d}\right) < 1,5$.
- Silos esbeltos: ao contrário dos silos baixos, os silos esbeltos são aqueles que apresentam alta relação altura-diâmetro: $\left(\frac{h}{d}\right) \geq 1,5$.
- Silos horizontais: esse tipo de silo é caracterizado por apresentar a sua dimensões em planta maiores que a dimensão vertical.

Os silos elevados, geralmente são constituídos basicamente de duas partes principais, o corpo do silo e a tremonha. O corpo do silo é a parte da estrutura que compreende do topo do silo até a parte base, onde se inicia a tremonha. A tremonha é responsável pelo escoamento do produto armazenado, pode ser construída com diversas formas geométricas e com inclinações diferentes em relação ao plano horizontal. Nesse sentido a **Figura 3** traz uma representação dessas partes que constituem o silo. (REIS, 2011)

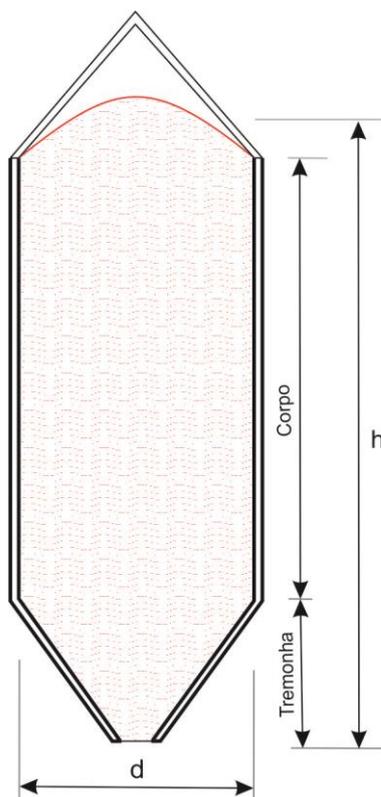


Figura 3 – Partes constituintes e dimensões dos silos utilizadas pelas teorias e normas.

Fonte: Autoria própria.

1.2 Justificativa

Segundo PALMA (2005), a maioria dos silos existentes pelo mundo não apresentam condições ideais de operação. Esse fato pode ser associado as dificuldades encontradas para elaboração do projeto desse tipo de estrutura, uma vez que existe um grande número de variáveis que influenciam diretamente no seu comportamento. Como exemplo, pode-se citar o conhecimento insuficiente das pressões internas exercidas pelo produto armazenado sobre as paredes do silo. Dessa forma, erros de projeto e operação são indicados como as principais causas dos grandes números de acidentes e colapsos relacionados aos silos.

Como exemplo de acidente relacionado a falha da estrutura de armazenamento, pode-se destacar o colapso de um silo, localizado na cidade de Maceió – AL, utilizados para armazenar trigo. Esse evento ocorreu no dia 04 de Abril de 2014, espalhando pela vizinhança um volume de 800 toneladas do trigo armazenado que valiam R\$ 1 milhão, ferindo pelo menos 20 pessoas e sendo percebido em um raio de 500 m

(Figura 4). Esse acidente gerou uma paralisação da produção que poderia atingir 350 mil sacas de farinha, gerando prejuízo de aproximadamente R\$ 37 milhões.

Nesse acidente, os riscos contra a vida foram potencializados, tendo em vista que o silo encontra-se em um bairro residencial. Cabe ressaltar, que nesse caso não foram identificadas vítimas fatais e os prejuízos se resumiram a bens materiais.



Figura 4 - Silo da cidade de Maceió.

Fonte: g1.globo.com

Nesse contexto, uma análise das principais normas internacionais e de teorias empíricas e baseadas nas normas mostram divergências no que se refere à determinação das pressões exercidas pelo produto armazenado sobre as paredes dos silos (PALMA, 2005). Então, torna-se importante realizar um comparativo dos resultados obtidos a partir de cada uma delas a fim de se obter melhores estimativas das pressões e conseqüentemente tornar o projeto e a operação de silos mais seguros.

Além disso, esse estudo torna-se importante pois, do ponto de vista econômico o Brasil é considerado um dos maiores produtores de grãos do mundo. Do ponto de vista técnico não possui normatizações para construção de estruturas de armazenamento e avaliação das tensões geradas pelo carregamento,

armazenamento de descarregamento de grãos, para incrementar sua capacidade de armazenamento de grãos.

1.3 Objetivo Gerais

Este trabalho tem por objetivo modelar computacionalmente uma estrutura de armazenamento e os grãos, a fim de estudar o comportamento das tensões ao longo das paredes internas, com o objetivo de comparar os resultados obtidos numericamente com aqueles provenientes das recomendações de teorias e normas internacionais, possibilitando identificar esforços que são negligenciados pela formulação das mesmas.

O estudo é realizado através da modelagem da estrutura e a simulação do seu uso em situação estática, através do software DEMOOP que utiliza o Método dos Elementos Discretos, sendo este um método relativamente novo e que vem sendo aplicado com sucesso na solução de problemas que envolvem meios granulares. (JÚNIOR; CINTRA, 2005)

1.4 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são descritos a seguir:

- Estudar as normas internacionais, buscando compreender a geometria dos silos;
- Buscar os equacionamentos que modelem a análise estática de silos carregados;
- Obter as propriedades físicas dos produtos que são armazenados em silos;
- Estudar a técnica numérica conhecida como Método dos Elementos Discretos para a modelagem do meio descontínuo;
- Comparar os resultados obtidos com aqueles provenientes das normas e trabalhos técnicos encontrados na literatura da área.

2 ESTRUTURAS DE ARMAZENAMENTO DE GRÃOS

Segundo PALMA (2005), no projeto de uma estrutura, seja ela de concreto armado, madeira, aço ou qualquer outro material, independentemente da complexidade arquitetônica ou estrutural, é necessário garantir que a mesma seja capaz de desempenhar a função para qual foi projetada com eficiência, para tanto, é necessário que o custo, durabilidade e segurança estrutural sejam satisfeitas.

Nesse sentido, pode-se dizer que uma estrutura possui segurança estrutural quando a mesma é capaz resistir a todas as ações aplicadas durante a sua vida útil. Além disso, determinar as ações é de suma importância para o projeto da estrutura, garantindo um correto dimensionamento da mesma.

Para a verificação de segurança é necessário realizar diversas combinações das ações que atuam na estrutura. Essas combinações devem ser feitas diversas vezes até que se consiga determinar qual delas será a que mais solicitará a estrutura. Dessa forma, de acordo com CALIL JR. & NASCIMENTO (1997, *apud* PALMA, 2005), para o projeto de silos devem ser consideradas as seguintes ações:

- Ações Permanentes: são as ações provenientes do peso próprio da estrutura do silo, da plataforma e dos equipamentos instalados na cobertura e suspensos na tremonha.
- Ações Variáveis: são caracterizadas pelas pressões de carregamento e descarga do produto armazenado, pressões de insuflação do ar, dilatação térmica do produto, entre outros fatores.

Para o projeto de silos, as principais ações que devem ser consideradas são as provenientes dos produtos armazenados, as quais exercem pressões nas paredes verticais e no fundo do silo. Dessa forma, as pressões nas paredes verticais ocorrem perpendiculares, frequentemente denominadas de pressões horizontais (p_h), e no plano, onde ocorrem as pressões de atrito do produto com a parede. A **Figura 5** representa a forma como essas ações atuam sobre a estrutura do silo.

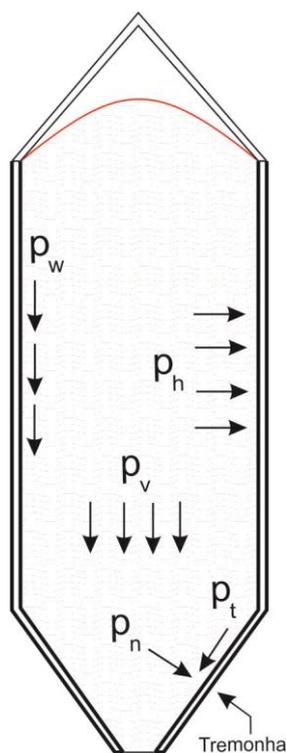


Figura 5 - Pressões na estrutura do silo devido ao produto armazenado.

Fonte: Autoria própria.

As pressões de atrito (p_w) são distribuídas na superfície das paredes e dessa forma equilibram parte do peso total do produto, devido a isso, surgem esforços de compressão nas paredes do silo. A existência desse atrito faz com que as pressões horizontais exercidas pelo produto sobre a parede não aumentem com a profundidade como acontece com as pressões hidrostáticas, mas apresentem um crescimento exponencial até atingir um valor máximo. Além disso, cabe ressaltar que o campo de tensões para situações onde o silo está completamente cheio e com a boca de descarga fechada é completamente diferente do campo de tensões em situações onde é realizada a descarga do produto.

A pressão vertical (p_v) que age sobre o fundo do silo, parte conhecida como tremonha, pode ser dividida em duas componentes, uma normal (p_n) e outra tangencial à parede (p_t) da tremonha. Além disso, existe um coeficiente que relaciona a pressão vertical com a pressão horizontal, representado comumente por K .

2.1 Propriedades Físicas do Produto Armazenado

As propriedades físicas do produto armazenado em um silo têm um importante papel no comportamento das pressões que atuam nas paredes verticais e no fundo da estrutura. Entretanto, ainda há uma grande variabilidade no que diz respeito a forma como estas propriedades devem ser obtidas e, dessa forma, os valores encontrados variam muito entre as normas existentes.

Dessa maneira, a caracterização do produto a ser armazenado consiste em determinar as suas propriedades físicas, visto que este é o primeiro passo para o projeto de um silo seguro. Para encontrar essas propriedades é comumente utilizado um aparelho conhecido internacionalmente como “Jenike Shear Tester”, este aparelho vem sendo utilizado por um grande número de pesquisadores e códigos normativos.

Algumas das propriedades que são frequentemente utilizadas pelas teorias e normas são as seguintes:

- densidade (ρ)
- ângulo de atrito interno (ϕ_i)
- efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e)
- ângulo de atrito com a parede (ϕ_w)

Conforme FREITAS (2005), tendo em vista que as propriedades físicas dos produtos armazenados em silos variam ao longo da vida útil do silo, é recomendável que seja delimitado dois limites para cada parâmetro relacionado ao produto armazenado, de modo a se obter uma faixa de variação e, com isso, obter as combinações de ações mais desfavoráveis. Estes limites são o menor valor possível (limite inferior) e o maior valor possível (limite superior) para o parâmetro considerado durante a vida útil do silo. A **Tabela 2** apresenta os limites que devem ser utilizados para cada objetivo.

Tabela 2: Emprego do limite inferior e superior das propriedades físicas dos produtos.

Aplicação da Propriedade	Peso específico do produto (γ)	Ângulo de atrito com a parede (ϕ_w)	Ângulo de atrito interno (ϕ_i)	Relação entre a pressão horizontal e vertical (K)
Cálculo da máxima pressão horizontal na parede do silo, p_h	Superior	Inferior	Inferior	Superior
Cálculo da máxima pressão vertical, p_v	Superior	Inferior	Superior	Inferior
Força máxima de atrito na parede, p_w	Superior	Superior	Inferior	Superior
Força vertical máxima na tremonha	Superior	Inferior	Superior	Inferior

Fonte: Adaptada de PALMA, 2005.

A **Tabela 3** apresenta valores máximos, mínimos e médios das propriedades físicas de dois produtos que são frequentemente armazenados em silos, a soja e o painço. Estes valores foram obtidos a partir da literatura disponível e considerando o material do silo como sendo aço rugoso, material empregado com grande frequência na construção de silos.

Tabela 3: Valores das propriedades físicas dos produtos.

Produto	Peso Específico (kN/m³)			Atrito Interno (°)			Efetivo Atrito Interno (°)			Aço Rugoso (°)		
	γ_i	γ_s	γ_m	ϕ_{ii}	ϕ_{is}	ϕ_{im}	ϕ_{ei}	ϕ_{es}	ϕ_{em}	ϕ_{wi}	ϕ_{ws}	ϕ_{wm}
Painço	6,1	6,2	6,15	23	25	24	23	25	24	12	14	13
Soja	5,8	6,4	6,1	33	36	34,5	35	37	36	13	15	14

Fonte: PALMA, 2005.

2.2 Pressões Exercidas Pelo Produto Armazenado

2.3 Teorias

2.3.1 Teoria de Janssen

Janssen em 1985 propôs a teoria da camada elementar, a qual consiste basicamente em considerar o equilíbrio de uma massa de produto em repouso, salientando-se que esta proposição é válida somente para a situação de carreamento do silo (PALMA, 2005).

A teoria de Janssen é uma das mais utilizadas como base para as normas internacionais sobre projeto de silos, uma vez que a mesma prevê com boa precisão as pressões exercidas pelo produto armazenado, tanto no corpo do silo como na tremonha (SCALABRIN, 2008).

De acordo com REIS (2011), a teoria de Janssen é baseada nas seguintes hipóteses:

- as pressões horizontais são constantes no mesmo plano horizontal;
- o valor do ângulo de atrito do produto com a parede é constante;
- o peso específico do produto é uniforme;
- as paredes do silo são totalmente rígidas;
- a relação entre as pressões horizontais e verticais (K) é constante em toda a altura do silo.

As pressões vertical e horizontal são determinadas fazendo-se o equilíbrio das forças verticais que atuam em uma camada de espessura infinitesimal do produto armazenado. Dessa forma, o peso próprio da camada, as forças nas faces superior e inferior, devido ao produto armazenado e a força devido ao atrito entre a parede e o produto atuam sobre a camada.

De acordo com SCALABRIN (2008), sabendo que γ é o peso específico do produto armazenado (kN/m^3), p_v é a pressão vertical (kN/m^2), p_h é a pressão horizontal

sobre a parede (kN/m^2), p_w é a pressão de atrito (kN/m^2), z é a profundidade onde será calculada a pressão (m), A é a área da seção transversal do silo (m^2), U é o perímetro da seção do silo (m) e K é um coeficiente que relaciona a pressão horizontal e a pressão vertical, tem-se a seguinte relação:

$$p_h = K \cdot p_v \quad 2.1$$

e

$$p_w = \mu \cdot p_h = \mu \cdot K \cdot p_v \quad 2.2$$

onde μ é a razão entre a pressão de atrito e a pressão horizontal p_w / p_h .

Considerando o equilíbrio de forças verticais na camada infinitesimal, ilustrado na figura **Figura 6**:

$$p_h \cdot \mu \cdot dz \cdot U + (p_v + dp_v + p_v)A - \gamma \cdot A \cdot dz = 0 \quad 2.3$$

Fazendo $k \cdot dp_v = dp_h$ e separando as variáveis, tem-se:

$$\frac{A}{U} \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{\mu} \cdot \frac{dp_h}{\frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{A}{U} - p_h} = dz \quad 2.4$$

Integrando a Equação 2.4, chega-se a seguinte equação:

$$\frac{-A}{U} \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{\mu} \cdot \ln\left(\frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{A}{U} - p_h\right) = z - cte \quad 2.5$$

Nesse sentido, aplicando-se a condição de contorno $z = 0$, tem-se:

$$p_h(z) = \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{A}{U} \left(1 - e^{-zk\mu\frac{U}{A}}\right) \quad 2.6$$

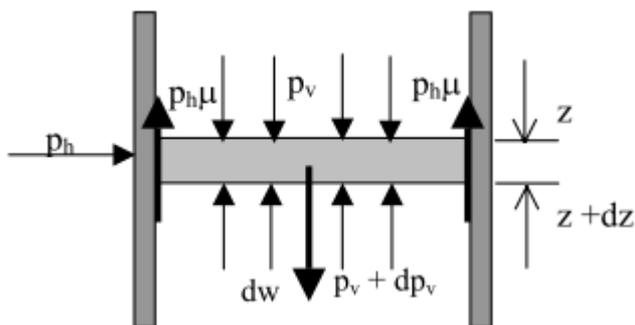


Figura 6 - Forças agindo sobre uma camada elementar do produto armazenado.

Fonte: PALMA (2005).

2.3.2 Teoria de Jenike

Segundo MADRONA (2008), Jenike e Johanson foram os primeiros pesquisadores a apresentar uma teoria para previsão de pressões em silos baseada na teoria da teoria do balanço de energia. Nesse sentido, para o caso de pressões em situações estáticas, esses pesquisadores mostraram que a formulação proposta por Janssen fornece bons resultados para as pressões no corpo do silo quando comparados com os resultados obtidos através da teoria do balanço de energia.

Portanto, esses autores recomendam que para o caso estático as pressões no corpo do silo sejam determinadas através da teoria de Janssen com $K=0,4$.

2.3.3 Teoria de Walker

Em 1996, na Inglaterra, Walker desenvolveu uma teoria sobre o fluxo de produtos armazenados em silos. Assim como na teoria de Janssen, Walker se baseia nas forças que atuam sobre uma camada elementar. (PALMA, 2005)

De acordo com REIS (2011), para pressões estáticas no corpo do silo, Walker considera a relação entre as pressões verticais e horizontal dada pelo efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e). Além disso, as pressões iniciais são:

$$p_v = \gamma \cdot z \quad 2.7$$

$$p_h = K \cdot p_v \quad 2.8$$

onde:

$$K = \frac{1 - \text{sen}\phi_e}{1 + \text{sen}\phi_e} \quad 2.9$$

2.4 Normas Internacionais Analisadas

Como o Brasil não possui norma nacional para o projeto de silos, é frequente o uso de normas que são utilizadas internacionalmente para a determinação das pressões exercidas pelo produto armazenado sobre as paredes laterais e o fundo do silo, como a norma alemã DIN 1005-6 (2000), a norma internacional ISO 11697 (1995), a norma europeia EURO CODE ENV 1991-4 (2006) e a norma australiana AS 3774 (1996).

De acordo com PALMA (2005), essas normas internacionais são utilizadas na determinação das pressões em condições estáticas (quando o silo está em fase de enchimento ou totalmente cheio) ou dinâmicas (quando ocorre a descarga do produto armazenado). Além disso, as normas classificam os silos de acordo com a geometria em três tipos básicos, considerando a relação entre a sua altura (h) e o seu diâmetro (d), como sendo baixos, medianamente esbeltos e esbeltos. Entretanto, algumas normas internacionais não apresentam um consenso no que diz respeito a essa classificação, havendo divergências em classificar os silos. Nesse sentido, a **Tabela 4** apresenta um resumo da classificação dos silos segundo as principais normas internacionais utilizadas.

Tabela 4: Classificação dos silos segundo a relação h/d

NORMA	CLASSIFICAÇÃO		
	Baixo	Medianamente esbelto	Esbelto
AS 3774 (1996)	$h/d < 1,0$	$1 \leq h/d \leq 3$	$h/d > 3$
ENV 1991-4 (2006)	$h/d < 1,5$	---	$h/d \geq 1,5$
ISO 11697 (1995)	$h/d < 1,5$	---	$h/d \geq 1,5$
DIN 1055-6 (2000)	$h/d < 1,5$	---	$h/d \geq 1,5$

Fonte: PALMA, 2005.

Segundo REIS (2011), para a determinação das pressões estáticas no corpo do silo a maior parte das normas internacionais adotam a formulação proposta na teoria de Janssen para o cálculo das pressões horizontais, verticais e pressões de atrito com a parede, diferindo apenas no valor do coeficiente K, que relaciona a pressão vertical com a pressão horizontal, dessa forma, a **Tabela 5** apresenta um resumo da formulação adotada por cada norma analisada.

Tabela 5: Pressões iniciais e parâmetros K.

NORMA	Pressões Estáticas			K
	p_v	p_h	p_w	
AS 3774 (1996)	JANSSEN			$\frac{1 + \text{sen}^2\phi_e - 2\sqrt{\text{sen}^2\phi_e - \mu^2 \text{cos}^2\phi_e}}{4\mu^2 + \text{cos}^2\phi_e} \geq 0,35$
ENV 1991-4 (2006)				$1,1(1 - \text{sen}\phi_e)$
ISO 11697 (1995)				$1,1(1 - \text{sen}\phi_e)$
DIN 1055-6 (2000)				$1,1(1 - \text{sen}\phi_i)$

Fonte: Adaptada de PALMA, 2005.

3 MÉTODO NUMÉRICO

3.1 Descrição Geral

Nas últimas décadas, os meios computacionais passaram por uma grande ascensão, possibilitando uma vasta elevação da capacidade de processamento de dados. Dessa forma, o Método dos Elementos Discretos (MED) também foi impulsionado por esse avanço, uma vez que o mesmo tem elevada demanda de processamento computacional associada ao seu uso.

Embora envolvam um número finito de partículas individuais, os sistemas discretos trabalham com quantidades excessivamente grande das mesmas, onde o seu comportamento é determinado pelo movimento e interação dessas partículas. Nesse sentido, os métodos discretos consideram seus elementos separados e, possivelmente, conectados em pontos discretos em sua superfície, onde se aplicam leis de interação fisicamente apropriadas. (CINTRA; JÚNIOR, 2006)

Uma das principais características do MED é o fato do mesmo assumir intervalos de tempo suficientemente pequenos para que, ao longo de apenas um único intervalo de tempo, a perturbação causada pela interação entre as partículas não se propague além da vizinhança de cada partícula, possibilitando que a demanda computacional possa ser reduzida e permitindo simulações com um grande número de partículas.

Inicialmente, CUNDALL & STRACK (1979) assumiram que cada elemento do MED é rígido e há a possibilidade da sobreposição das partículas, desde que sua magnitude seja pequena quando comparada ao tamanho das mesmas. Nesse sentido, estudos mais recentes que utilizam o MED, consideram a incorporação das deformações nas partículas (CLEARY; SAWLEY, 2002). Além disso, existe uma busca constante por contatos e cálculo de forças entre as partículas, para que a cada passo de tempo o comportamento do meio seja investigado e modelado o mais próximo possível da realidade. (RIOS, 2002)

3.2 Equacionamento

De maneira geral, o equacionamento do MED é resumido à aplicação da Segunda Lei de Newton às partículas e, dessa forma, realiza-se o cálculo dos deslocamentos provenientes das forças que agem sobre elas. Além disso, são aplicadas as Leis de Força-Deslocamento nos contatos das partículas a fim de calcular as forças originadas devido ao deslocamento das mesmas (CINTRA; JÚNIOR, 2006).

Nesse contexto, cada uma das partículas consideradas no método possui uma equação que descreve o seu movimento, escrita da seguinte forma:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} = -F_{cont}(\dot{u}, \ddot{u}) - F_{elem}(\dot{u}, \ddot{u}) - F_{int}(\dot{u}, \ddot{u}) + F_{ext}(t) \quad 3.1$$

onde M e C representam, respectivamente, as matrizes de massa e amortecimento da partícula, \dot{u} é o vetor de velocidades e \ddot{u} é o vetor de acelerações. Além disso, a parcela total de forças é composta pelo contato entre as partículas (F_{cont}), pelas forças de vínculo entre as duas partículas (F_{elem}), pelos esforços internos (F_{int}) e pelas ações externas aplicadas sobre a partícula (F_{ext}). Dessa forma, as principais etapas empregadas no cálculo do Método dos Elementos Discretos estão resumidas na **Figura 7**.

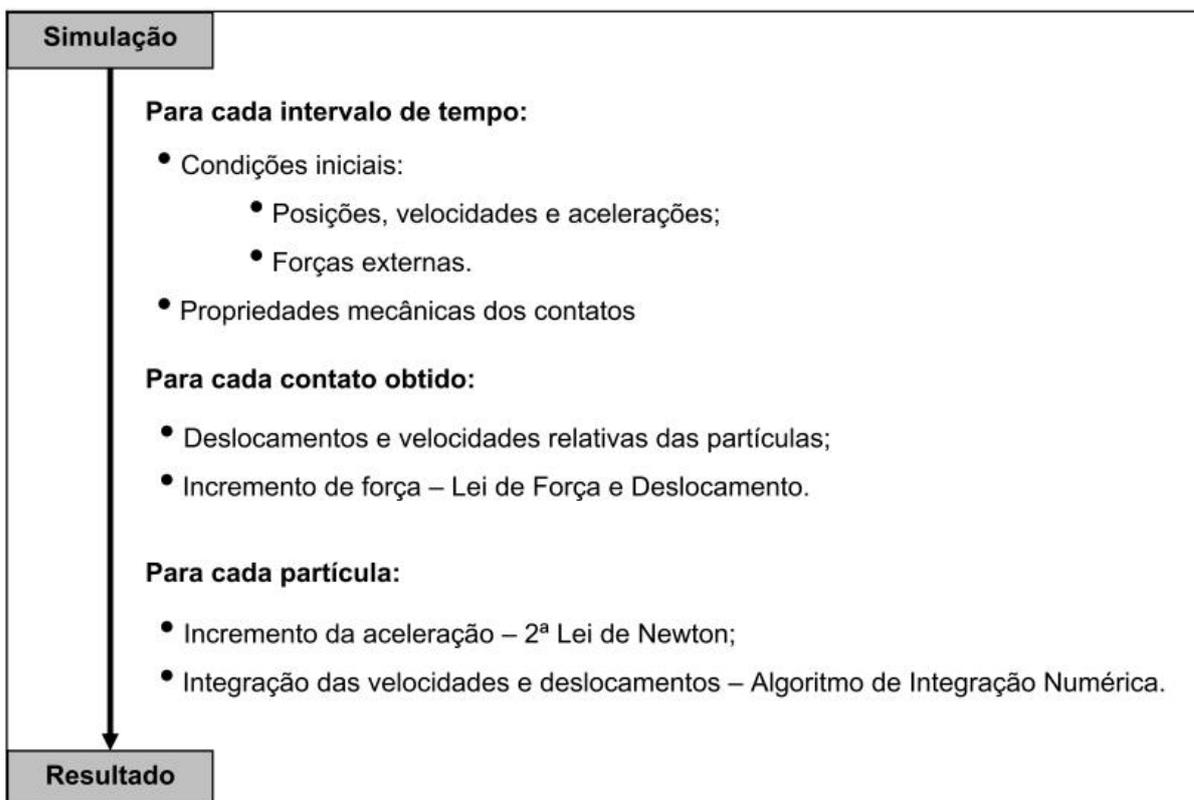


Figura 7- Resumo da sequência de cálculo para o Método dos Elementos Discretos.

Fonte: CINTRA; JÚNIOR, 2006.

3.2.1 Leis de Força-Deslocamento

A lei de força-deslocamento pode ser entendida como a relação entre as forças de contato que atuam em duas entidades que possuem movimentos relativos entre elas. A força de contato entre duas partículas surge quando ocorre o toque entre elas e, além disso, uma força e momento adicionais podem atuar em cada partícula. (VOGEL, 2009)

Em seu trabalho, CINTRA & JÚNIOR (2006) afirmam que os sistemas de elementos discretos englobam um extenso número de partículas, desde poucos milhares a alguns milhões, onde cada uma interage com as demais partículas vizinhas a ela. Dessa forma, no algoritmo de simulação torna-se primordial considerar dois aspectos importantes: a detecção dos contatos e a modelagem da interação entre as partículas nesses pontos de contato. Nesse sentido, os algoritmos de busca compõem o primeiro aspecto, enquanto o segundo envolve as leis de força-deslocamento.

Após o contato ser detectado, é possível determinar as forças de contato (F_{cont}), baseando-se na configuração apresentada na **Figura 8**. Para determinar se existe força de contato entre as partículas, sendo elas circulares, é necessário verificar se a soma dos raios de ambas as partículas (r_1 e r_2) é maior que a distância (d) entre o centros das mesmas, caso essa verificação seja verdadeira, existirá força de contato entre elas.

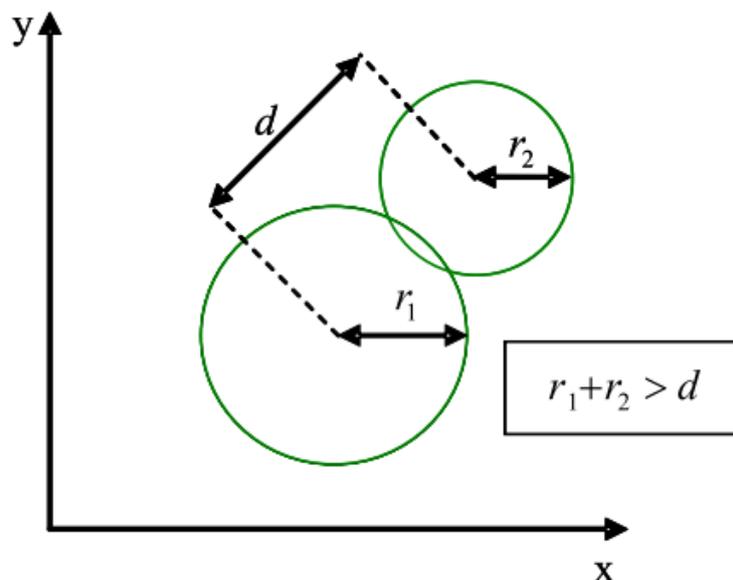


Figura 8 - Critério de contato entre partículas circulares.

Fonte: CINTRA; JÚNIOR, 2006.

As forças de contato atuam em ambas as partículas que estão em contato, onde a força de contato é decomposta nas direções normais e tangenciais à superfície onde houve o impacto. O contato entre as duas partículas circulares, que possuem velocidades translacionais e rotacionais \vec{v}_1 , \vec{v}_2 e $\vec{\omega}_1$, $\vec{\omega}_2$, assim como as forças normais e tangenciais ao plano de contato são ilustradas na **Figura 9**.

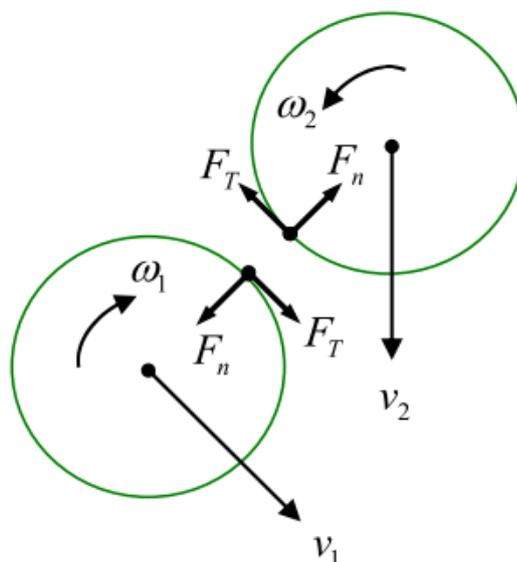


Figura 9 - Diagrama de corpo livre e decomposição da força de contato.

Fonte: CINTRA; JÚNIOR, 2006.

Após detectar o contato entre as duas partículas, a interação entre as mesmas pode ser retratada pelas seguintes forças:

$$\vec{F} = \vec{F}_n + \vec{F}_T \quad (3.2)$$

As componentes das forças de contatos normais e tangenciais podem ser obtidas empregando-se o modelo reológico que foi utilizado por Nakashima & Oida (2004, apud CINTRA; JÚNIOR, 2006), sendo que o mesmo é formulado tanto para esferas rígidas (3D) quanto para discos (2D). Nesse modelo, a interface de contato empregada na formulação é caracterizada pela rigidez normal e tangencial, representadas respectivamente por k_n e k_t , pelo coeficiente de atrito de Coulomb (μ) e pelos coeficientes de amortecimento normal e tangencial (C_n e C_T). (**Figura 10**)

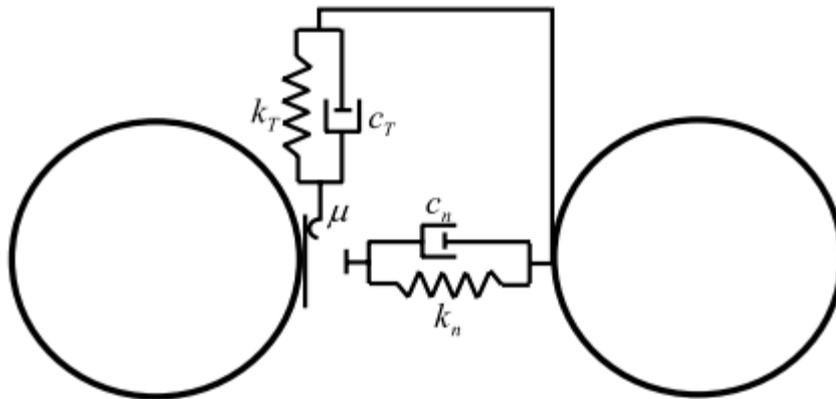


Figura 10 - Modelo de interface de contato (Kelvin-Coulomb).

Fonte: CINTRA; JÚNIOR, 2006.

3.2.2 Componente de Força Normal

Ainda de acordo com CINTRA & JÚNIOR (2006), a força normal de contato (\vec{F}_n) pode ser decomposta em duas parcelas de forças, uma elástica ($F_{n,e}$) e outra de amortecimento ($F_{n,d}$). Dessa forma, aplicando-se o vetor unitário (\vec{n}) que liga os centros das esferas ou discos, nos modelos tridimensionais e bidimensionais respectivamente, obtém-se o vetor de força normal, representado por:

$$\vec{F}_n = \vec{n}(F_{n,e} + F_{n,d}) \quad (3.3)$$

Nesse sentido, cabe ressaltar que a parcela elástica da força normal de contato das partículas é proporcional à rigidez normal (k_n) e à interpenetração das superfícies de contato entre as duas partículas (u_{rn}), logo:

$$F_{n,e} = k_n u_{rn} \quad (3.4)$$

Além disso, a interpenetração pode ser encontrada pela seguinte expressão:

$$u_{rn} = (r_1 + r_2) - d \quad (3.5)$$

onde r_1 e r_2 são os raios das partículas e d é a distância entre o centro das mesmas.

Esse modelo de cálculo assume que a parcela responsável pelo amortecimento tem natureza viscosa, podendo ser descrita por:

$$F_{n,d} = c_n v_{rn} \quad (3.6)$$

onde v_{rn} representa a velocidade relativa entre o centro das partículas que estão em contato, sendo definida por:

$$\vec{v}_{rn} = n(\vec{v}_2 - \vec{v}_1) \quad (3.7)$$

3.2.3 Componente de Força Tangencial

Para o cálculo da componente de força tangencial, CINTRA & JÚNIOR (2006) determinam inicialmente o vetor de velocidade tangencial relativa (\vec{v}_{rT}) referente ao ponto de contato entre as partículas, que pode ser descrito por:

$$\vec{v}_{rT} = \vec{v}_r - (\vec{v}_r \cdot \vec{n})\vec{n} \quad (3.8)$$

sendo:

$$\vec{v}_r = (\vec{v}_2 + \vec{\omega}_2 \times \vec{r}_{c2}) - (\vec{v}_1 + \vec{\omega}_1 \times \vec{r}_{c1}) \quad (3.9)$$

onde \vec{r}_{c1} e \vec{r}_{c2} são os vetores que conectam os centros das partículas com os pontos de contato.

3.3 Programas Computacionais

Para utilização do método numérico empregado neste trabalho, optou-se por utilizar o software DEMOOP (*Discrete Element Method Object Oriented Programming*), um sistema orientado a objetos que é capaz de analisar sistemas particulados utilizando o Método dos Elementos Discretos (MED). O DEMOOP trata-se de uma ferramenta computacional que viabiliza a análise de meios descontínuos na escala granular, para tanto o meio é simulado através da utilização de partículas. (DEMOOP – Guia do Usuário)

Dentre os principais desafios enfrentados no seu desenvolvimento está a demanda computacional exigida para sua utilização. Além disso, o tempo de simulação é diretamente ligado a capacidade de processamento utilizada, sendo influenciado por diversos fatores, como o número total de partículas consideradas na simulação, os modelos de contato que caracterizam a interação elas, entre outros. (PetroDEM, 2016)

Devido à grande demanda computacional exigida para utilização do programa, novas tecnologias vem sendo estudadas para tornar viável a simulação de modelos cada vez mais robustos, tornando possível utilizar cada vez mais partículas e reduzir o tempo de análise. Nesse sentido o DEMOOP possui dois modelos de processamento, um sequencial e outro paralelo. (PetroDEM, 2016)

No modelo de processamento sequencial a quantidade máxima de partículas é de aproximadamente 500 mil e o uso de memória fica na faixa de 1 MB/mil partículas. Para o processamento em paralelo o domínio do problema pode ser dividido em várias faixas, tornando possível rodar a análise utilizando vários processadores e, dessa forma, pode-se aumentar o número de partículas e reduzir o tempo necessário para rodar a análise. Assim, no processamento paralelo pode-se estudar problemas com 500 mil, 750 mil e 1 milhão de partículas. (PetroDEM, 2016)

Após o processamento das análises no DEMOOP, a visualização pode ser feita a partir do programa DEMView (**Figura 11**). Este é um ambiente de interface gráfica onde os dados provenientes da análise são apresentados de forma interativa ao usuário, facilitando a interpretação dos resultados obtidos, uma vez que o usuário pode esboçar animações do processo de análise, montar gráficos de propriedades das partículas, como acelerações, deslocamentos, massas, dentre outros. (CINTRA; JÚNIOR, 2006)

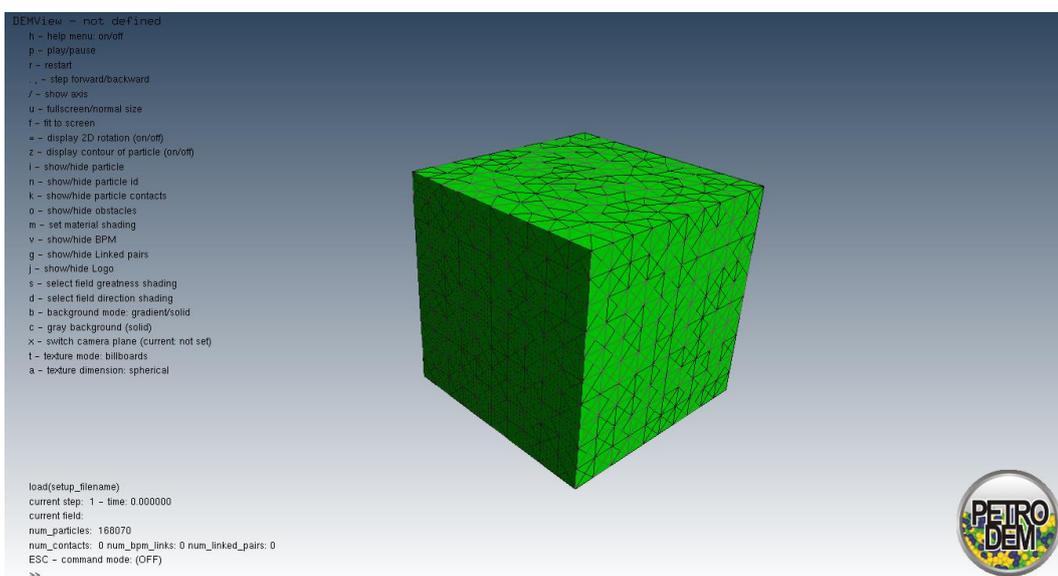


Figura 11 - Tela do programa DemoopView.

Fonte: Autoria própria.

4 EXEMPLOS E DISCUSSÕES

A partir do estudo das teorias de diferentes pesquisadores e das normas internacionais para o projeto de silos, optou-se por analisar um modelo de silo que atendesse as recomendações das mesmas. Dessa forma, foi modelado um silo vertical para armazenamento de soja.

4.1 Modelo

4.1.1 Geometria

O objeto de estudo deste trabalho consiste de um silo vertical esbelto, destinado ao armazenamento de grãos de soja. A geometria do mesmo foi escolhida de forma que atendesse aos parâmetros estabelecidos pelos principais códigos normativos internacionais e teorias nas quais os mesmos se baseiam. Além disso, foram consideradas recomendações de pesquisadores com respaldo nacional, como Giovano Palma e Itagildo Garbazza.

Dessa forma, observando as recomendações da literatura, foi modelado um silo vertical com dimensões que o caracterizassem como esbelto, com a relação altura diâmetro $h/d \geq 1,5$. A **Figura 12** apresenta um perfil do silo analisado e suas respectivas dimensões.

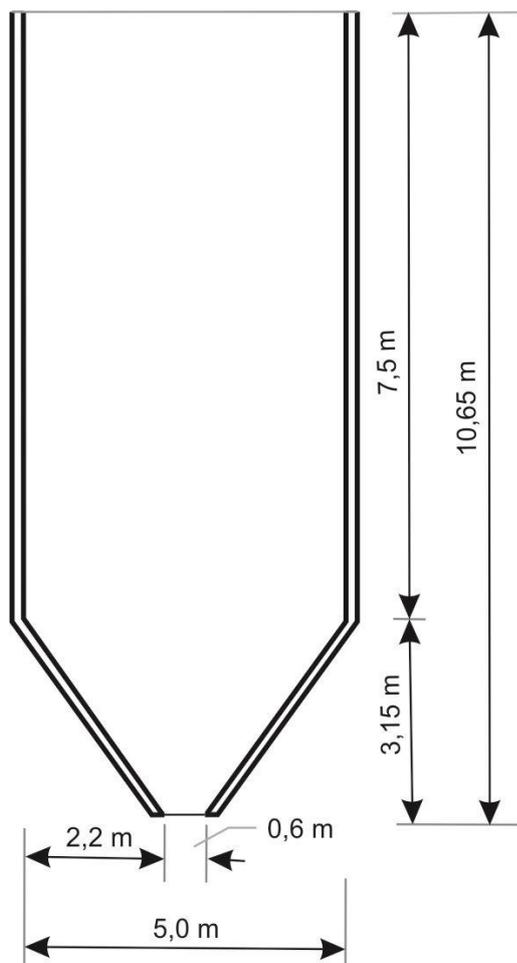


Figura 12 - Geometria e dimensões do silo analisado.

Fonte: Autoria própria.

Para modelagem das paredes do silo foi utilizado o *software* livre GMSH (GEUZAINÉ, 2009). Nele o silo foi modelado através de uma malha em três dimensões (3D) que é utilizada para representar os obstáculos na utilização do DEMOOP, a **Figura 13-** (a) e (b) apresenta a malha do silo no GMSH e no DEMVIEW, respectivamente.

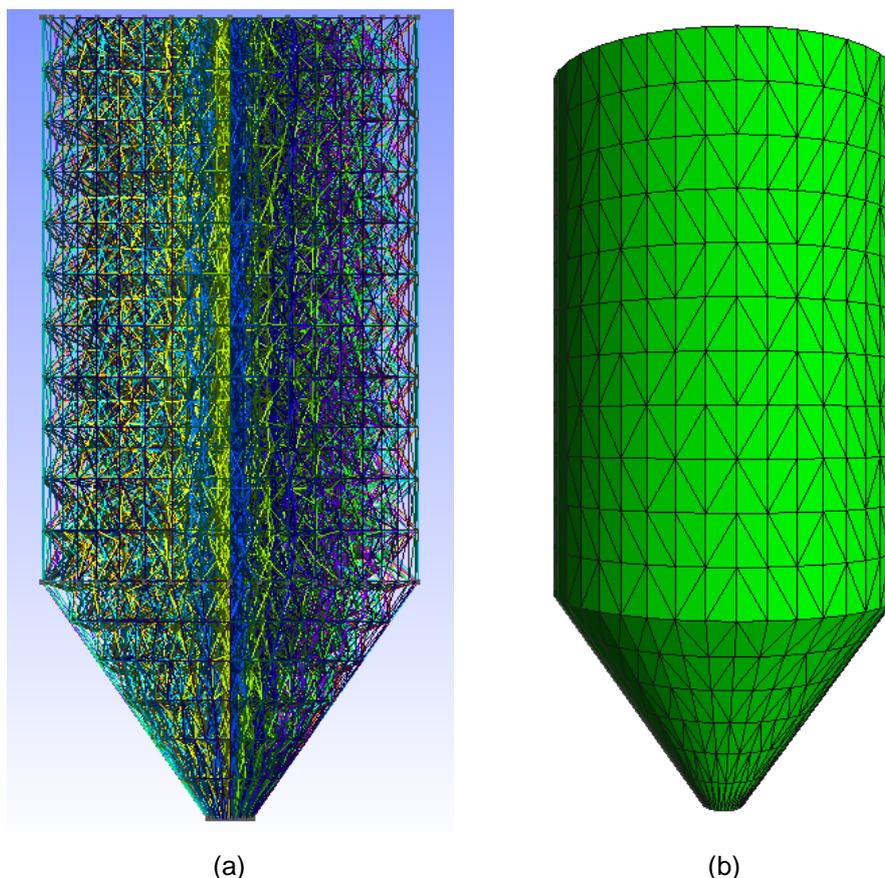


Figura 13 - (a) Malha do silo no GMSH. (b) malha do silo no DemoopView.

Fonte: Autoria própria.

4.1.2 Preenchimento do Silo

A soja foi escolhida como material para preenchimento do silo. Nesse sentido as propriedades físicas da mesma foram adotadas de acordo com os valores recomendados por PALMA (2005). Desta forma foi utilizado o peso específico médio de acordo com a **Tabela 3**, com um valor de $6,2 \text{ kN/m}^3$.

Além disso, outro fator a se considerar é a dimensão dos grãos de soja. Em seu trabalho ZARA & REIS (2009) mostram que o diâmetro médio de um grão de soja é de 6 mm, dessa forma, torna-se inviável utilizar partículas com essa dimensão, uma vez que a quantidade necessária para preencher o silo seria exageradamente grande, o que restringiria a análise devido a limitações de tempo e de hardware. Contudo, optou-se por utilizar partículas com raio variando de 4 a 7 cm, pois dessa maneira é

possível reduzir drasticamente o número de partículas na simulação e ainda conseguir resultados que se aproximem da realidade. Cabe ressaltar que essa variação no raio das partículas contribui para que o índice de vazios seja reduzido quando comparado ao preenchimento com um raio constante.

Para obter um preenchimento mais rápido do silo foi adotada a estratégia de dividir o mesmo em duas partes: a tremonha e a casca cilíndrica. Dessa forma, foi criado um anteparo separando as duas partes e cada uma delas foi preenchida de forma independente. Nesse sentido, para a tremonha foi utilizada uma análise com tempo final de 7 segundos, sendo que a mesma foi processada em um computador com 4 Gb de memória RAM e processador Intel Core i5 de 1,80 GHz, o qual necessitou de aproximadamente 14 horas para finalizar a análise. (**Figura 14 –(a)**)

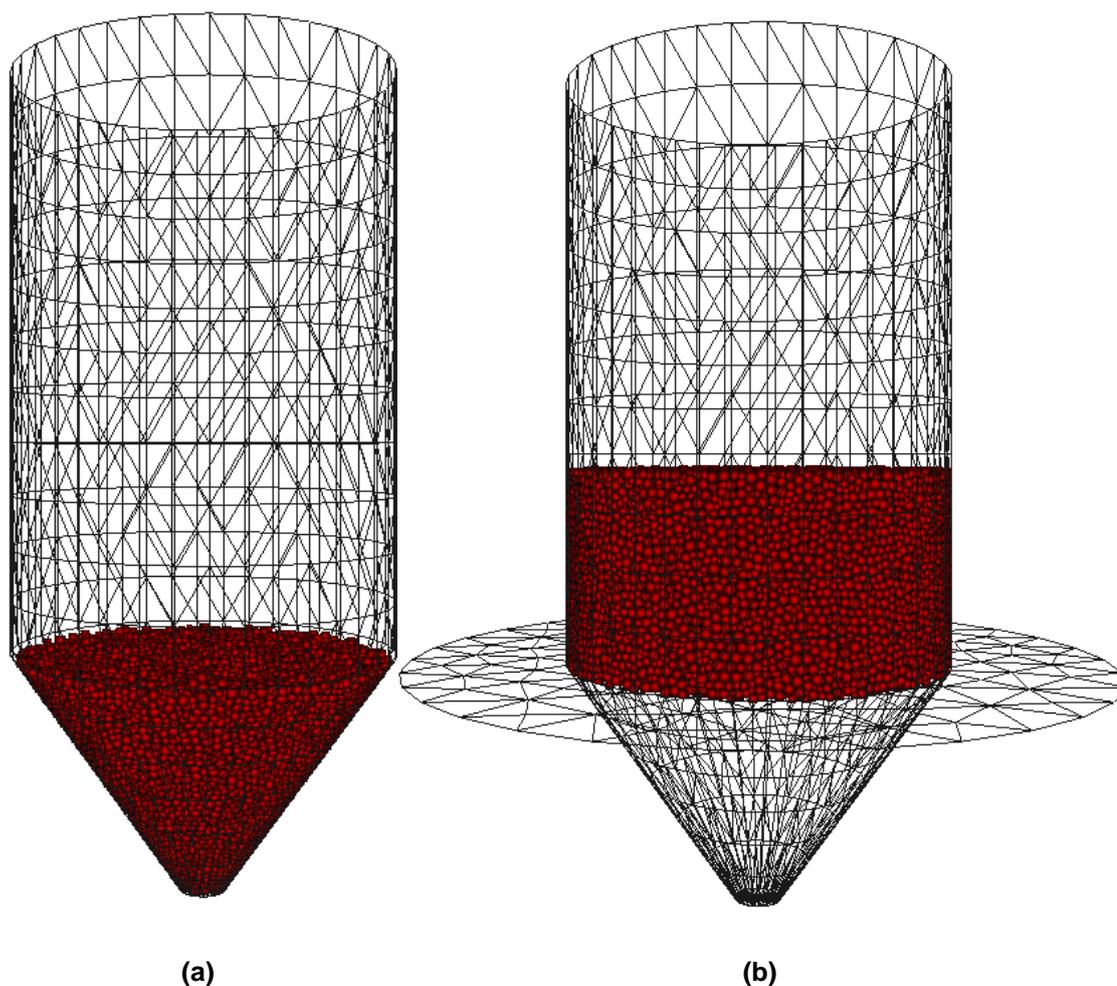


Figura 14 – (a) Preenchimento da tremonha. (b) preenchimento da casca cilíndrica.

Fonte: Autoria própria.

Utilizando a mesma máquina foi realizada uma análise com tempo final de 13 segundos, para esta análise foram necessárias aproximadamente 25 horas de simulação. Como a parte cilíndrica não foi totalmente preenchida com os 13 segundos de análise, foi necessário replicar a faixa de partículas gerada, alterando sua coordenada no sentido da altura do silo a fim de preenchê-lo totalmente. (**Figura 14 – (b)**)

Ao finalizar o preenchimento total do silo foram geradas 154.566 partículas com raios variando entre 4 e 7 cm. O silo totalmente preenchido é apresentado na **Figura 15**, onde é possível observar a variação dos raios, em metros, através de uma escala de cores presente na imagem.

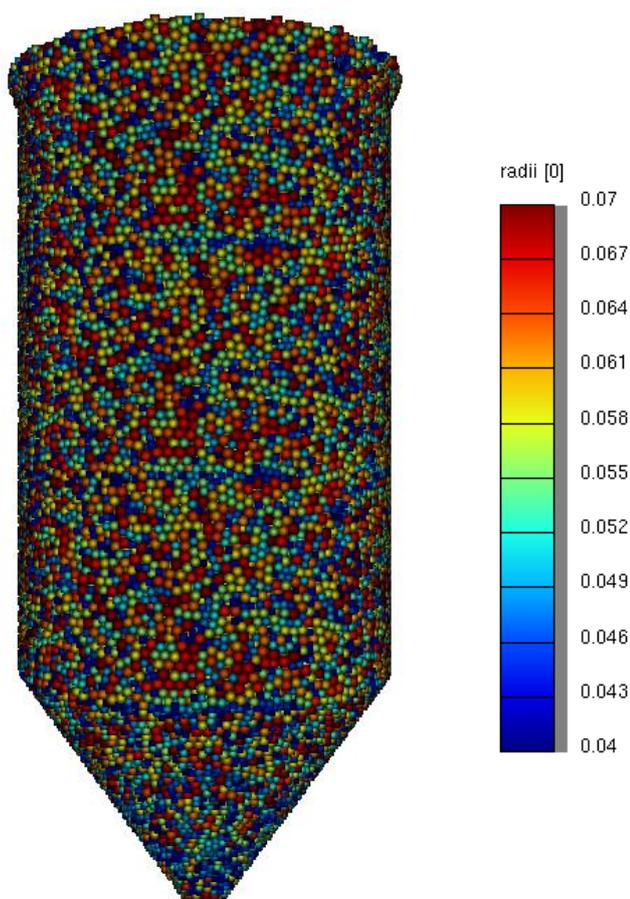


Figura 15 - Silo preenchido.

Fonte: Autoria própria.

4.1.3 Análise

Com o silo totalmente preenchido, foi necessário acomodar as partículas para que as mesmas chegassem ao repouso, condição necessária para realizar a análise de pressões simulando a situação de carregamento estático do silo. Dessa forma, foram realizadas 5 análises em sequência com tempo final de 0,2 segundos cada uma, onde as partículas foram submetidas a força da gravidade para que pudessem ser acomodadas. Essas análises foram realizadas na máquina com 4 Gb de memória RAM e processador Intel Core i5 de 1,80 GHz, totalizando 12 horas por análise. Entretanto, essas análises não foram suficientes para que as partículas pudessem ser totalmente acomodadas, pois ao final da 5ª análise a energia cinética do sistema ainda era consideravelmente alta.

Diante dessa problemática, optou-se por realizar uma análise com tempo final de 13 segundos utilizando o módulo de processamento paralelo do DEMOOP, a execução dessa análise foi realizada com 40 processadores Intel Xeon X5570 4-core de 2,93 GHz do supercomputador (Cluster) do Laboratório de Computação Científica e Visualização (LCCV) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), contudo, mesmo com um aumento significativo da capacidade de processamento empregada, foi possível perceber que o tempo necessário para execução da análise seria de 15 dias, atrasando o processo de obtenção de resultados.

Então, decidiu-se realizar uma análise com tempo final de 2 segundos e empregando as mesmas configurações do exemplo anterior. Assim, para essa nova análise o tempo de processamento foi de aproximadamente 3 dias. A **Figura 16** - (a) e (b) mostra, respectivamente, a divisão de processos para execução da análise no tempo inicial (0s) e final (2s), onde cada cor representa um processador diferente. Cabe ressaltar que em todas as análises a rigidez tangencial das partículas (k_t) foi desconsiderada, essa foi uma solução encontrada para reduzir os custos computacionais associados ao processamento e tornar as análises mais rápidas.

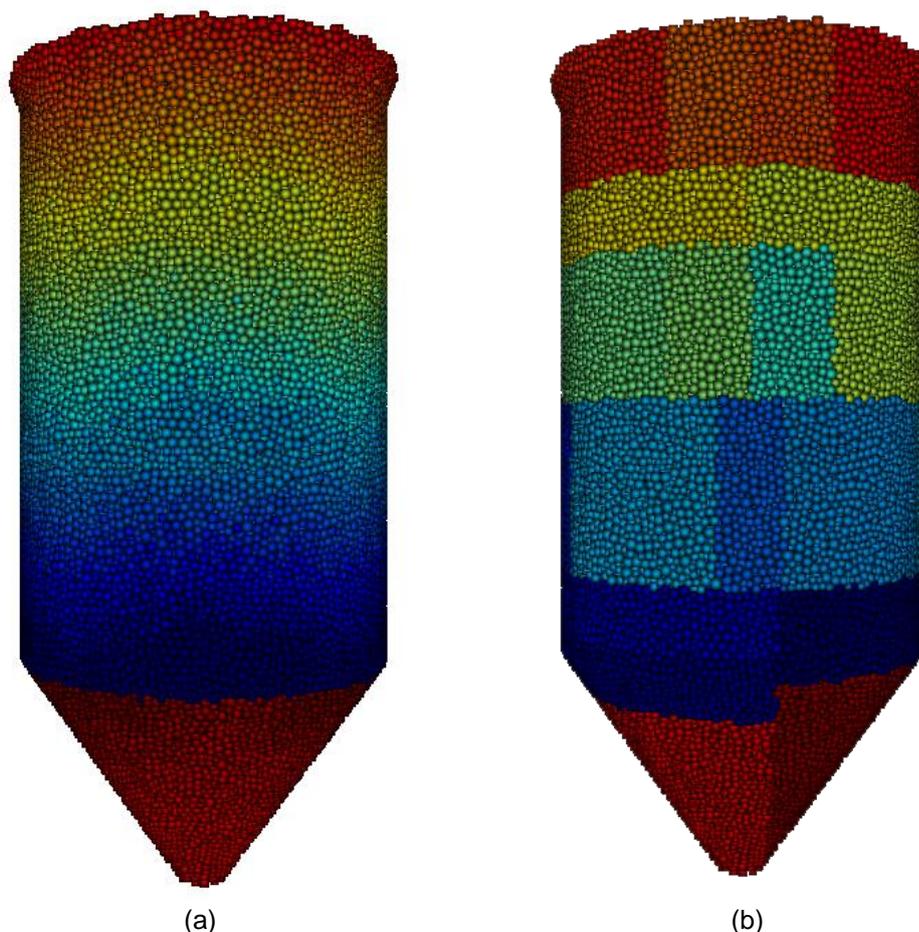


Figura 16 – (a) Divisão dos processos na análise em paralelo (0s); (b) divisão dos processos (2s).

Fonte: Autoria própria.

4.2 Resultados

As pressões horizontais e verticais atuantes no silo estudado foram analisadas de acordo com as teorias e normas internacionais expostas anteriormente, utilizando os valores das propriedades físicas recomendados nesse trabalho. Nesse sentido, os valores das pressões dos principais códigos normativos e teorias se encontram na **Tabela 6**. A partir disso, percebe-se que entre as teorias a que forneceu maiores valores para a pressão horizontal foi a Teoria de Walker, pela qual foi calculada uma pressão de 11,93 kPa na profundidade de 7,5 m. Entre as normas internacionais analisadas, para a profundidade de 7,5 m, as normas ENV 1991-4 e ISO 11697 forneceram uma pressão de 9,64 kPa e a norma DIN 1055-6 forneceu 9,85 kPa. Entretanto, cabe ressaltar que a norma AS 3774 (1996) não pôde ser aplicada ao silo,

uma vez que o mesmo não se encaixa na relação altura diâmetro (h/d) imposta por ela.

Tabela 6: Pressões horizontais iniciais.

Pressões Horizontais Iniciais (kPa)												
z (m)	Teoria de Janssen		Teoria de Jenike		Teoria de Walker		ENV 1991-4		ISO 11697		DIN 1055-6	
	p_h	p_v	p_h	p_v	p_h	p_v	p_h	p_v	p_h	p_v	p_h	p_v
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	0,83	2,98	1,17	2,94	0,80	3,20	1,36	2,91	1,36	2,91	1,45	2,90
1,0	1,59	5,75	2,23	5,57	1,59	6,40	2,56	5,46	2,56	5,46	2,71	5,42
1,5	2,30	8,31	3,17	7,92	2,39	9,60	3,62	7,71	3,62	7,71	3,82	7,62
2,0	2,96	10,69	4,01	10,03	3,18	12,80	4,54	9,69	4,54	9,69	4,78	9,53
2,5	3,57	12,89	4,77	11,92	3,98	16,00	5,36	11,42	5,36	11,42	5,61	11,20
3,0	4,13	14,93	5,45	13,62	4,77	19,20	6,07	12,95	6,07	12,95	6,34	12,66
3,5	4,66	16,82	6,05	15,13	5,57	22,40	6,70	14,29	6,70	14,29	6,97	13,92
4,0	5,14	18,57	6,60	16,49	6,36	25,60	7,26	15,47	7,26	15,47	7,53	15,03
4,5	5,59	20,20	7,08	17,71	7,16	28,80	7,74	16,51	7,74	16,51	8,01	15,99
5,0	6,01	21,70	7,52	18,80	7,95	32,00	8,17	17,42	8,17	17,42	8,43	16,83
5,5	6,39	23,10	7,91	19,78	8,75	35,20	8,55	18,22	8,55	18,22	8,80	17,56
6,0	6,75	24,39	8,26	20,65	9,55	38,40	8,88	18,92	8,88	18,92	9,11	18,20
6,5	7,08	25,59	8,58	21,44	10,34	41,60	9,17	19,54	9,17	19,54	9,39	18,75
7,0	7,39	26,70	8,86	22,14	11,14	44,80	9,42	20,08	9,42	20,08	9,63	19,23
7,5	7,67	27,72	9,11	22,77	11,93	48,00	9,64	20,56	9,64	20,56	9,85	19,66

Fonte: Autoria própria.

A partir dos valores das pressões horizontais expostos na **Tabela 6**, foi possível esboçar um gráfico que caracteriza o comportamento da pressão ao longo da profundidade, sendo que esta inicia-se no topo do silo onde a profundidade é considerada zero (**Figura 17**). Nesse gráfico é possível observar a pressão de cada uma das teorias e normas internacionais analisadas. Além disso, é possível notar que as pressões calculadas pelas normas ENV 1991-4 e ISO 11697 apresentam o mesmo comportamento e valores iguais. A teoria de Janssen é a que fornece menores valores das pressões horizontais, seguida pela teoria de Jenike que apresenta mesmo comportamento e maiores valores. Percebe-se ainda que a teoria de Walker não apresenta o mesmo comportamento das demais, sendo que a pressão calculada pela mesma cresce linearmente com a profundidade do silo.

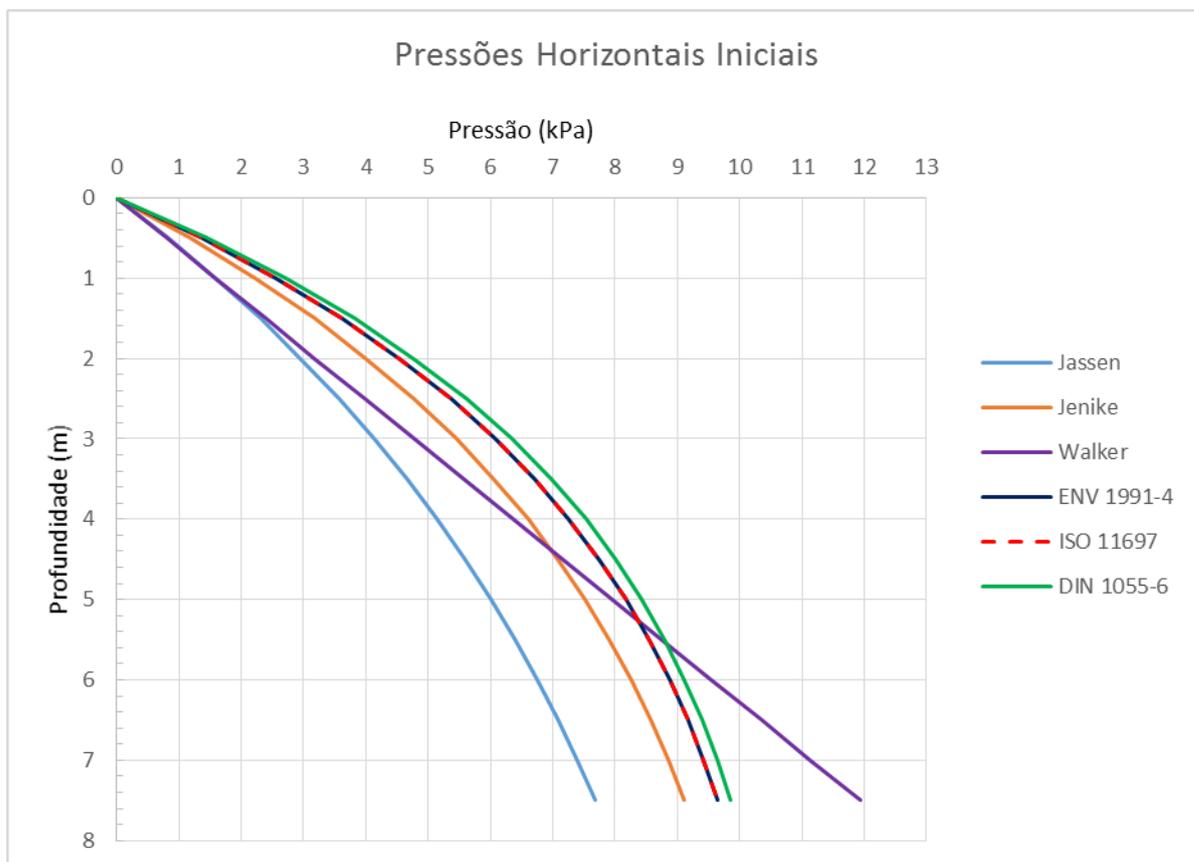


Figura 17 - Gráfico das pressões horizontais iniciais.

Fonte: Autoria própria.

A fim de corrigir as variações ocasionadas ao se desconsiderar a rigidez tangencial das partículas (k_t), as pressões obtidas através do MED foram multiplicadas por um coeficiente de empuxo (k_0), o qual relaciona as pressões verticais e horizontais e seu valor depende do material granular armazenado. Assim, foram adotados valores de k_0 variando de 0,3 a 0,85 e os valores das pressões encontram-se na **Tabela 7**.

Tabela 7: Pressões horizontais obtidas através do MED.

Pressão (kPa)								
z (m)	k_0							
	0,25	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,85
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,68	0,44	0,52	0,70	0,87	1,04	1,22	1,39	1,48
1,36	0,73	0,87	1,16	1,45	1,74	2,03	2,33	2,47
2,05	1,10	1,32	1,76	2,20	2,63	3,07	3,51	3,73
2,73	1,31	1,57	2,10	2,62	3,15	3,67	4,20	4,46
3,41	1,78	2,13	2,84	3,55	4,26	4,97	5,68	6,04
4,09	2,05	2,46	3,28	4,10	4,92	5,75	6,57	6,98
4,77	2,57	3,09	4,12	5,15	6,18	7,21	8,24	8,75
5,45	2,59	3,10	4,14	5,17	6,21	7,24	8,28	8,80
6,14	3,05	3,66	4,88	6,10	7,32	8,55	9,77	10,38
6,82	3,34	4,01	5,34	6,68	8,01	9,35	10,68	11,35
7,50	3,73	4,47	5,96	7,45	8,95	10,44	11,93	12,67

Fonte: Autoria própria.

Dessa forma, a **Figura 18** mostra o comportamento das pressões obtidas através do MED para cada valor de k_0 adotado. Onde a menor pressão calculada foi para $k_0 = 0,25$ e a maior pressão foi obtida empregando-se $k_0 = 0,85$. Além disso, todos os valores de k_0 fornecem perfis de pressão que apresentam o mesmo comportamento ao longo da profundidade do silo, variando apenas os valores, que crescem à medida que o valor de k_0 aumenta.

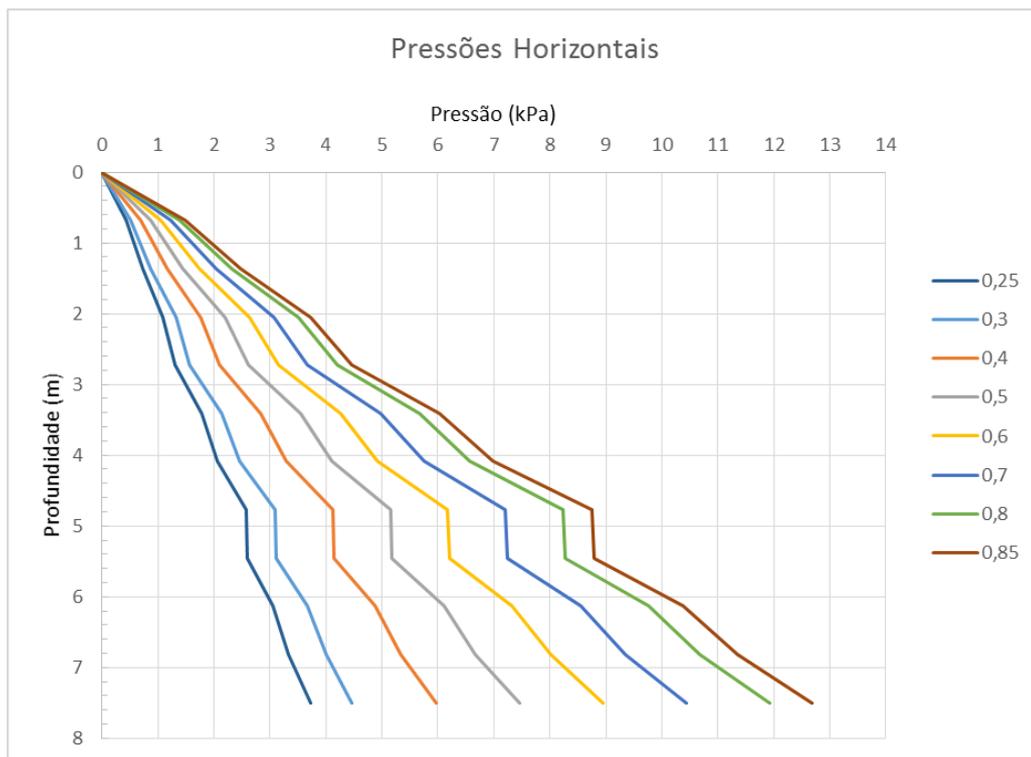


Figura 18- Pressões obtidas no MED com vários k_0

Fonte: Autoria própria.

A **Figura 19** mostra um comparativo entre as pressões obtidas através das teorias e normas e do modelo numérico. Para o modelo numérico optou-se por esboçar curvas a partir das pressões obtidas empregando-se três valores de k_0 , sendo eles o menor valor ($k_0 = 0,25$), o valor médio ($k_0 = 0,59$) e o maior valor ($k_0 = 0,85$). Dessa forma, é possível perceber que as pressões obtidas empregando-se o menor valor de k_0 são consideravelmente menores que as obtidas pelas teorias e normas internacionais analisadas. Além disso, as pressões obtidas com o valor médio de k_0 foram coerentes com as dos códigos normativos e teorias, aproximando-se da curva da teoria de Janssen, que é a mais empregada no cálculo das pressões horizontais no corpo do silo. Para $k_0 = 0,85$ a pressão na profundidade de 7,5 foi maior que a obtida pelas teorias e normas, contudo é possível perceber que ao longo da profundidade foram obtidos valores de pressão que se encaixam entre as teorias e normas.

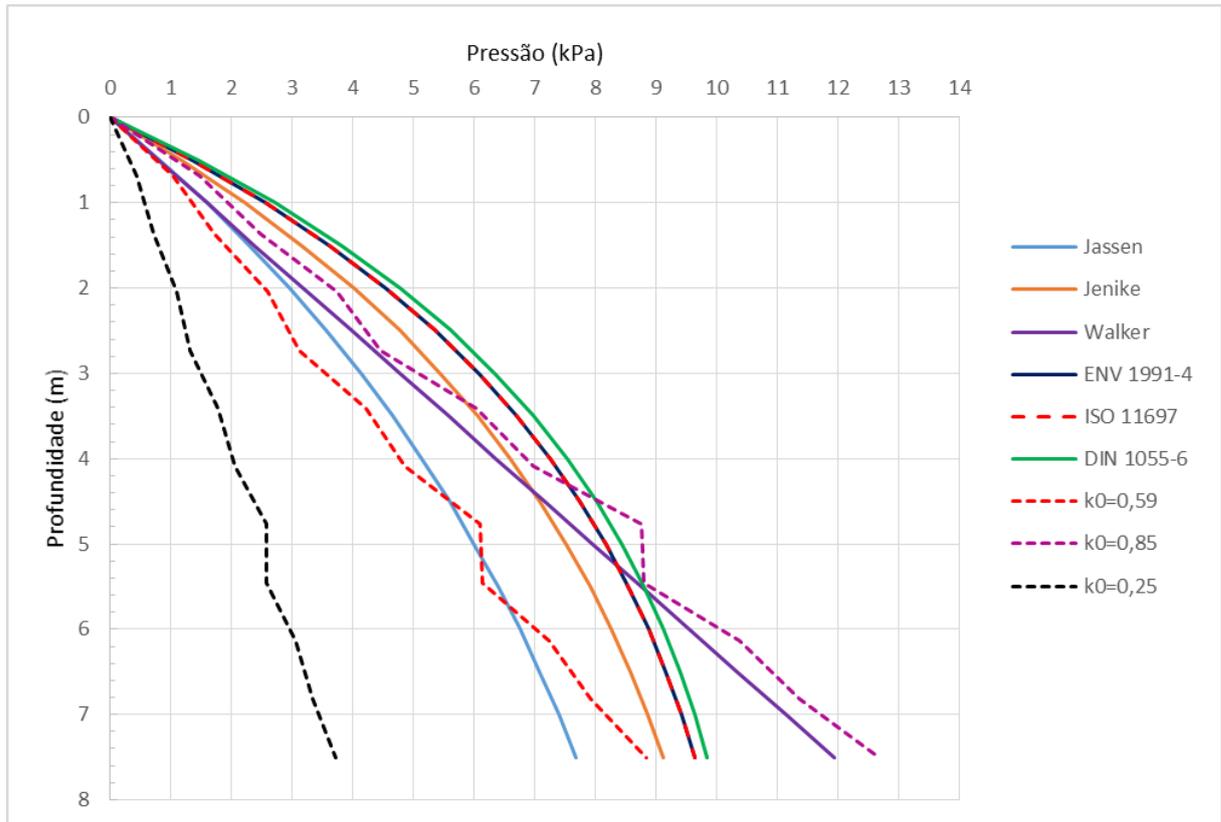


Figura 19 - Comparativo entre as pressões das teorias e normas e do modelo numérico.

Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho visa-se analisar o comportamento das pressões horizontais nas paredes de silos verticais esbeltos através do Método dos Elementos Discretos e comparar os resultados obtidos com as teorias e normas internacionais aplicadas ao projeto desse tipo de estrutura. Os resultados são encontrados utilizando-se modelos numéricos do programa DEMOOP.

Com o trabalho pôde-se observar que existem divergências no que diz respeito ao cálculo de pressões entre as normas internacionais analisadas, ocorrendo o mesmo com as teorias. Essas diferenças são responsáveis por gerar valores que variam muito, dificultando o projeto estrutural uma vez que solicitações podem ser negligenciadas a depender da metodologia adotada.

A depender da quantidade de partículas consideradas na simulação, o modelo pode se tornar complexo, exigindo uma grande demanda computacional e tornando inviável a sua análise. Além disso, os valores obtidos através do método numérico apresentaram coerência com os códigos normativos e teorias, mostrando que o método pode ser aplicado para auxiliar na previsão de pressões em silos.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Considerar a rigidez tangencial entre as partículas durante a simulação;
- Estudar as pressões em situações dinâmicas, simulando o procedimento de descarga do silo;
- Estudar as pressões exercidas na tremonha do silo, em situações estáticas e dinâmicas.
- Estudar modelos de silos reais através do método computacional e comparar com valores experimentais.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZEVEDO, L. F. et al. **A Capacidade Estática De Armazenamento De Grãos No Brasil**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 28., 2008, Rio de Janeiro: ABEPRO, 2008. p. 1-14.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Companhia Nacional de Abastecimento. **Evolução da capacidade estática de armazenamento**. Disponível em: http://www.conab.gov.br/conaweb/armazenagem/serie_historica.xls>. Acesso em: 03 mai. 2016.
- BARBOSA, C. Z. R. **Relação entre Tamanho e Armazenamento de Sementes de Soja Colhidas no Cerrado de Roraima na Qualidade Física e Fisiológica**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Roraima, Roraima, 2009.
- CHEUNG, A. B. **Modelo Estocástico de Pressões para a Estimativa da Confiabilidade Estrutural de Silos Esbeltos**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- CINTRA, D. T.; JÚNIOR, H. C. **Desenvolvimento de Ferramentas de Análise e Visualização do Método dos Elementos Discretos e suas Aplicações na Engenharia**. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2006.
- CLEARY, P. W.; SAWLEY, M. L. **DEM modelling of industrial granular flows: 3D case studies and the effect of particle shape on hopper discharge**. v. 26, n. 2, p. 89–111, 2002.
- CUNDALL, P.A.; STRACK, O.D.L. **A discrete numerical model for granular assemblies**. *Geotechnique*, 1979.
- DEUTSCHE NORM - DIN 1055-6. **Basis of design and actions on structures: design loads for buildings and loads in silo bins**. 2000.
- EUROCODE 1 - ENV 1991- 4 Part 4. **Actions on structures - Part 4: Silos and tanks**. Bruxelas, 2006.
- FREITAS, E. G. A. **Estudo Teórico E Experimental Das Pressões Em Silos De Baixa Relação Altura / Diâmetro E Fundo Plano**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2005.
- GEUZAINÉ, C. **Gmsh : a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities**. In: INTERNATIONAL JOURNAL FOR NUMERICAL METHODS IN ENGINEERING. p. 1–24, 2009.
- JÚNIOR, H. C.; CINTRA, D. T. **Simulação do Lançamento e Cravação de Estacas-Torpedo em Solo Marinho com a Utilização do Método dos Elementos Discretos**. CILAMCE, Guarapari - ES, 2005.
- LIMA, R. F. **Modelagem Matemática do Escoamento de Grãos de Soja em um Secador com Fluxo Misto usando o Método dos Elementos Discretos**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, Ijuí - RS, 2014.

MADRONA, F. S. **Pressões em silos esbeltos com descarga excêntrica**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Estruturas, São Carlos - SP, 2008.

PALMA, G. **Pressões e Fluxo em Silos Esbeltos ($h/d \geq 1$)**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Estruturas, São Carlos - SP, 2005.

PATURCA, E. Y. **Caracterização das Estruturas de Armazenagem de Grãos : Um Estudo de Caso no Mato Grosso**. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Departamento de Economia, Administração e Sociologia, 2014.

REIS, S. G. **Determinação das Ações Atuantes nos Silos Através De Redes Neurais**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG, 2011.

RIOS, R. D. **Aplicações do Método dos Elementos Discretos em Estruturas de Concreto**. Tede (Doutorado) - Univesidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

SCALABRIN, L. A. **Dimensionamento de Silos Metálicos Para Armazenagem de Grãos**. Dissertação (Mestrado) - Univesidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

STANDARDS ASSOCIATION OF AUSTRALIA - AS 3774. **Loads on bulk solids containers**. Homebush, 2002.

SANCHES,C.; CÓLEN, R. **Torre de moinho desabada em Maceió**. Disponível em: <<http://g1.globo.com/al/alagoas/noticia/2014/04/parte-de-uma-das-torres-do-moinho-motrisa-desaba-em-maceio.html>>. Acesso em: 02 mai. 2016.

UFAL, **PetroDem**. Disponível em: < <http://petrodem.lccv.ufal.br/> >. Acesso em: 22 mai. 2016

VOGEL, J. **Comportamento de Materiais Granulares Usando o Método dos Elementos Discretos**. Dissertação (Mestrado) -Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 2009.