

Simulação dos Efeitos de Tensão nos Silos pelo Método dos Elementos Finitos através do programa computacional SAP 2000

Simulation of Stress Effects in Silos by the Finite Element Method using the SAP 2000 computer program

Fabricio Macedo Furtado¹, Aline Costa Ferreira², Rosilene Agra da Silva², Rubenia de oliveira Costa², Patricio Borges Maracaja², Aline Carla de Medeiros², Jefferson Gismont Correia Andrade¹, Rossino Ramos de Almeida¹, Tayana Adélia Palmeira Gomes Nepomucena¹ e José Pereira da Silva Filho¹

¹ Alunos do Programa de Pós-graduação em Gestão em Sistemas Agroindustriais (PPGGSA) da Universidade Federal de Campina Grande – PB Campus de Pombal – PB – Brasil E-mail: fabriciomfurtado@mecengenharia.net; <https://orcid.org/0009-0001-7525-4393> B:<https://orcid.org/0009-0001-7525-4393>; <https://orcid.org/0009-0004-8802-6885>; <https://orcid.org/0009-0000-2745-7674> e <https://orcid.org/0000-0003-0064-5274jopereiracat@gmail.com>

² Professores do Programa de pós-graduação em Gestão em Sistemas Agroindustriais (PPGGSA) da Universidade Federal de Campina Grande – PB Campus de Pombal – PB – Brasil <https://orcid.org/0000-0002-5518-1924>; <https://orcid.org/0000-0003-2559-2885>; <https://orcid.org/0000-0003-4812-0389>; <https://orcid.org/0000-0002-0161-3541>

Submetido em: 22/06/2024, revisado em: 02/08/2024 e aceito para publicação em: 10/07/2024.



RESUMO: A instabilidade nas montantes é um dos principais motivos para colapsos de silos metálicos. Apesar de esbeltos são responsáveis por resistir às forças de atrito existente entre o produto ensilado e a parede do silo, predominantemente o esforço tende a ser de compressão. Além disso, as normas brasileiras não possuem diretrizes específicas para o dimensionamento das forças ou análise dos esforços de flambagem. Este trabalho propõe um método para análise destes montantes, a partir da sua instabilidade utilizando o método da estabilidade elástica, baseado no estudo técnico científico de normas e trabalhos, e modelagens numéricas baseadas no método dos elementos finitos com o programa computacional SAP 2000.

Palavras-chave: grãos, estrutura metálica, montante, silo, SAP 2000, compressão.

ABSTRACT: Instability in the risers is one of the main reasons for collapsing metal silos. Although slender they are responsible for resisting the frictional forces existing between the silage product and the silo wall, predominantly the stress tends to be compression. In addition, Brazilian standards do not have specific guidelines for force sizing or buckling stress analysis. This work proposes a method for analyzing these amounts, based on their instability using the elastic stability method, based on the scientific and technical study of standards and work, and numerical modeling based on the finite element method with the SAP 2000 computer program.

Keywords: grain, metal structure, upstream, silo, SAP 2000, compression.

INTRODUÇÃO

No Brasil, a agricultura é uma das principais bases para a economia do país por possuir uma vasta extensão territorial e com grande capacidade produtora (Carvalho, Silva e Medeiros, 2024). Dentro deste contexto, os grãos, a exemplo do milho e da soja são uns dos produtos agropecuários de maiores retornos financeiros. No entanto, se os mesmos não forem armazenados de maneira adequada, sofrem grandes perdas pela falta de planejamento logístico (Araújo et al 2024).

Como crescente aumento na produção de grãos no país, torna-se cada vez maior a necessidade da construção de estruturas de armazenamento específico para esse tipo de produto. Essas estruturas que armazenam materiais sólidos, granulares ou pulverulentos e a granéis são denominadas de silos e podem ser projetadas e, construídas em diversas

formas e tamanhos, dependendo do tipo de utilização e do processo para os quais são requeridos para o produto (Torione et al 2024). Com os avanços tecnológicos, os processos de armazenagem devem contribuir com a manutenção da qualidade dos grãos, aumento da velocidade do fluxo dos produtos e redução de custos, atendendo às exigências do mercado.

Os silos metálicos são estruturas bastante eficientes, as quais recebem os esforços provenientes das pressões do produto ensilado. O dimensionamento de silos se baseia nos estudos das pressões nas suas paredes. O produto fica estagnado estaticamente por horas ou meses, onde, as pressões são baixas ou nulas, porém, durante a movimentação, principalmente nos momentos iniciais, as pressões se elevam de maneira vertiginosa.

Para representar este aumento, as maiorias das normas estrangeiras se utilizam da teoria de Janssen, que é

baseada no cálculo das pressões estáticas e de carregamento. No entanto, as pressões ditas dinâmicas podem ser obtidas através de coeficientes de sobrepressão, sendo bastante conservadoras e muitas vezes ultrapassando a realidade.

Segundo a EUROCODE, os silos estão submetidos a dois tipos de cargas, as cargas primárias que se definem como os esforços aplicados diretamente sobre a estrutura do silo, enquanto que as cargas secundárias são as cargas que surgem devido à deformada da estrutura (Dornelas, 2022).

No Brasil a inexistência de normas específicas sobre o dimensionamento de silos, bem como a pouca literatura técnica escritas na língua nativa, fazem com que a utilização de silos em solos brasileiros se torne perigoso, pois, não existem parâmetros oficiais para julgar as falhas que podem surgir durante a utilização em solo brasileiro, para tanto, é necessário estudar o comportamento de um silo para melhor adequá-lo ao país. Entretanto, a construção de um silo para estudos analíticos é inviável economicamente. Além disso, existem muitas dúvidas a respeito do comprimento de flambagem das colunas que estão trabalhando à compressão em silos metálicos.

Neste contexto, para solucionar tais problemas, podem ser feitas simulações computacionais, com a utilização do método de elementos finitos que é um procedimento numérico para determinar soluções aproximadas de problemas de valores sobre o contorno de equações diferenciais. Está baseado diretamente na discretização, ou seja, divisão dos elementos, mantendo as propriedades como um todo. Os elementos se dividem, mas, mantém a união através de malhas e nós, as equações então podem ser resolvidas para estes elementos e quando unidas podem representar o problema inteiro.

Dessa forma, o SAP 2000 é um software comercial que utiliza a aplicação do método dos elementos finitos para calcular e dimensionar diferentes tipos de forças e pressões atuantes no sistema desenvolvido, podendo descrever de maneira computacional a realidade encontrada e demonstrar quais os comportamentos da estrutura durante o uso e sob condições extremas existentes no Brasil.

Portanto este estudo irá simular as tensões exercidas por um silo nos montantes e comparar os resultados com os coeficientes e dados propostos pela literatura existente comparando-as com as normas vigentes.

A ensilagem de grãos é considerada um ponto de grande importância dentro da engenharia agrícola. Essa estrutura representa uma das causas da expansão da agricultura, uma vez que possibilita a economia de espaço físico, diminui a mão de obra e conserva o produto por um tempo maior (DA COSTA et. al, 2014).

Por ser de grande relevância na área, o tema constitui um extenso campo para pesquisas, podendo destacar os seguintes:

- Dimensionamento de silo metálico (KOCK, 2018; SCALABRIN, 2008)
- Cálculo de fluxo e pressões em silos cilíndricos metálicos (COELHO, 2016)
- Análise de silos de grande diâmetro (MA e MENG, 2011);
- Medidas experimentais de pressões estáticas e dinâmicas (COUTO et al., 2012; RUIZ et al., 2012);

Pressões em Silos Esbeltos com descarga excêntrica (MADRONA, 2008);

A relação entre as Pressões horizontais e verticais em Silos Elevados: o parâmetro K (NASCIMENTO, 2008);

Simulação numérica das pressões exercidas pelos grãos nas paredes dos silos verticais pelo método dos elementos finitos (ANJOS, 2018);

Pressões em silos verticais: instrumentação de um protótipo e análise numérica pelo método dos elementos finitos (FANK, 2017).

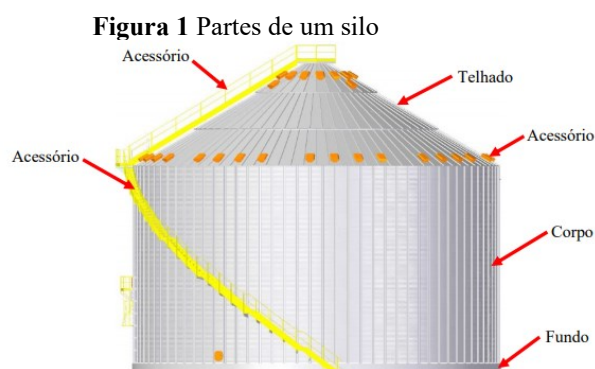
Desta forma, o presente trabalho dá continuação às pesquisas já realizadas, somando ao conhecimento já adquirido e contribuindo com propostas que irão agregar nas etapas de projetos, construção e segurança de silos metálicos com chapas onduladas.

Silos são estruturas de armazenamentos para materiais granulares, podendo ser utilizado em diferentes níveis: desde o produtor (fazendas), a parte intermediária (distribuição) e final (consumidor).

Normalmente se tratam de cascas com fina espessura que recebem esforços provenientes do carregamento, estocagem e descarregamento do produto. As chapas, que compõem a casca, trabalham principalmente a tração, devido à pressão horizontal e os montantes trabalham a compressão devido ao cisalhamento do produto com as paredes (RODRIGUES, 2019).

A EUROCODE 1 (2006) corrobora com o autor supracitado afirmando que silos são estruturas utilizadas para armazenamento e conservação de produtos sólidos, particulados ou pulverulentos, e que podem ser utilizados na agricultura, mineração e indústria. Portanto, um tema multidisciplinar que envolve engenharia agrícola, engenharia civil, engenharia mecânica entre outras.

Segundo Scalabrin (2008); Wendland (2018) os silos são divididos em corpo, telhado, fundo e acessórios, conforme a Figura 1.



FONTE: Reis, 2018

O telhado é formado por chapas planas perfiladas nas bordas que podem ser autoportantes ou fixadas na estrutura que são formadas por longarinas e travessas, para garantir a sua estabilidade. O corpo se divide em duas partes: chapa lateral e montante (WENDLAND, 2018).

A chapa lateral é ondulada e calandrada de acordo com o diâmetro desejado para o silo, formando anéis que se sobrepõem uns aos outros até a altura desejada, cuja

espessura varia conforme a carga que deverão resistir. comprimento de onda de 101,6mm e altura de 12 mm.

Já os montantes são colunas dos silos que podem ser montadas no interior ou exterior (WENDLAND, 2018; SCALABRIN (2008).

Os silos podem ter vários tipos de fundos (Figura 2 e 3): plano, cônico, tronco de cone e tipo “Mellita”, que podem ser utilizados de acordo com as necessidades.

Freitas (2001) classifica os silos em dois tipos de fundo:

Fundo Plano:

Silo de fundo horizontal;

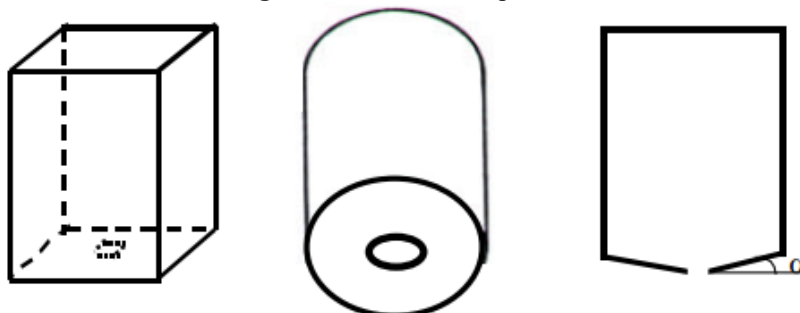
Fundo com paredes inclinadas de um ângulo $\alpha \leq 20^\circ$ com relação à horizontal;

Fundo com tremonha: Fundo em forma de funil, podendo ser:

Tronco-cônicas;

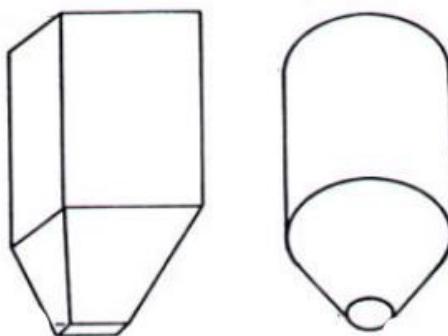
Tronco-piramidais.

Figura 2 Silos de fundo plano



FONTE: Freitas (2001)

Figura 3 Fundo com tremonha: a) piramidal; b) cônica.



(b)

FONTE: Freitas, 2001

Além disso, têm-se os acessórios que facilitam a utilização do silo, podendo-se citar: escadas externas e internas, respiros para circulação de ar, portas de entrada no telhado e no corpo; controle de nível; espalhador de grãos; rosca varredora para a descarga do excesso de grãos e registro de descarga (WENDLAND, 2018).

Reis (2016) classifica os silos quanto ao material empregado, quanto à construção em relação ao solo e quanto a sua forma geométrica (REIS, 2016).

Quanto ao material empregado, os silos podem ser construídos a partir de concreto armado, concreto protendido, chapas metálicas (lisas, corrugadas e trapezoidais), madeira, alvenaria, argamassa armada, fibras, plástico, entre outros (ANJOS, 2018).

Entre os silos metálicos, os circulares e metálicos são os mais comumente utilizados. Os de chapas lisas ou parede corrugada, ambas galvanizadas são úteis para armazenamento de diferentes produtos por terem uma facilidade de montagem e desmontagem maior em relação

aos outros, além de evitar corrosão. São parafusados e com um custo menor no caso de grandes capacidades, também possuem um maior controle de umidade e melhores propriedades dos grãos estocados (KOCK, 2018).

Os silos que possuem chapas corrugadas horizontalmente são submetidas às tensões causadas pelas pressões horizontais na parede e as colunas verticais submetidas a esforços de compressão devidos à pressão de atrito exercida pelo produto. O carregamento vertical é responsável por falhas por flambagem (WÓJCIK et al, 2011)

Segundo Scalabrin (2008), o metal mais utilizado para silos metálicos varia conforme os esforços e peças solicitadas e compõem-se em chapas laterais, montantes e parafusos. Um bom projeto padroniza o perfil e varia a espessura destas peças de acordo com os esforços que deverão suportar.

As chapas laterais do silo utilizam aços galvanizados, seguindo a NBR7008 (2003), tipo ZAR (sigla que significa aço de alta resistência) sendo comum o emprego dos revestimentos de zinco.

Conforme Scalabrin (2008), as espessuras das chapas normalmente empregadas são: 0,80; 0,95; 1,25; 1,55; 1,95; 2,30; 2,70 e 3,00 mm. No entanto, em sua grande maioria, existe a necessidade de uma maior espessura. Logo, os fabricantes utilizam uma sobreposição de chapas, chegando a uma espessura de até 6,00mm, ou seja, duas chapas de 3,00 montadas uma sobre a outra.

De acordo com Scalabrin (2008), nos montantes, diversos tipos de aços podem ser utilizados. Popularizou-se nas empresas o aço fornecido pela CSN (Companhia Siderúrgica Nacional), tipo ARC-600, ou tipos de ligas semelhantes produzidas por outras siderúrgicas, a depender do custo benefício. Em alguns silos, devido à facilidade de obtenção no mercado, utilizam-se aços sem qualificação estrutural, tais como SAE-1008, NBR7008-ZC entre outros.

As propriedades mecânicas dos aços ZAR (sigla que indica aço de qualidade estrutural, zincado, de alta resistência) e ARC-600.

As ligações que compõem um silo são unidas por parafusos com acabamento através do processo de zincagem ou bicromatização. Seguindo a especificação NBR ISO 7411, os parafusos mais utilizados são os de grau 8,8 com alta resistência, os diâmetros varia de 8 mm a 12 mm.

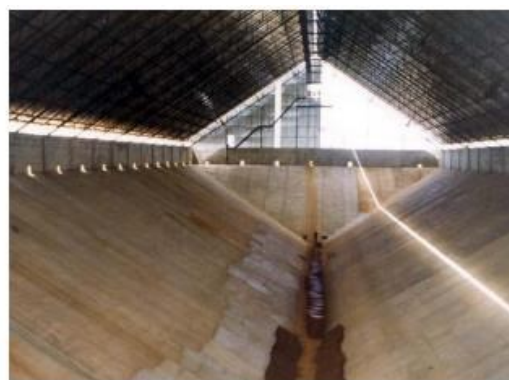
No Brasil, os fabricantes de silos utilizam parafusos com cabeça flangeada, onde fica alojada uma arruela de neoprene, evitando assim a penetração da água da chuva pelos furos da chapa e danifique o produto armazenado (SCALABRIN, 2008).

Quanto à construção em relação ao solo, podem ser elevados, ou seja, construídos acima do nível do solo, subterrâneos cujos compartimentos para estocagem se localizam abaixo do nível do solo, sendo mais susceptíveis à infiltração da água e com um descarregamento mais difícil e semi-subterrâneos: tipo intermediário entre o elevado e o subterrâneo, conforme ilustra a Figura 4 (CHEUNG, 2007).

Figura 4a) Grupos de silos elevados. b) Silo horizontal semi-subterrâneo.



(a)



(b)

Fonte: Cheung (2007)

Com relação à geometria, os silos podem ser classificados em função da relação hc/dc , entre a altura da parede vertical e o maior diâmetro inscrito na seção transversal. Freitas (2001) resumiu a classificação dos silos

quanto à geometria de acordo com as normas estrangeiras (Tabela 1).

Tabela 1 Classificação dos silos quanto à relação H/D

Norma	Classificação		
	Baixo	Medianamente baixo	Esbelto
Australiana AS-1996	$H/D < 1$	$1 \leq H/D \leq 3$	$H/D > 3$
Eurocode EN-1995	$H/D < 1,5$	-	$H/D \geq 1,5$
ISO-1997	$H/D < 1,5$	-	$H/D \geq 1,5$
Americana ACI-1991	$H/D < 2$	-	$H/D > 3$
Alemã DIN-1987	$H/D < 2,5\mu$	$2,5\mu \leq H/D \leq 5\mu$	$H/D > 5\mu$
Inglesa BMHB-1985	$H/D < 1,5$	-	$H/D \geq 1,5$
Canadense CFBC-1983	$H/D < 0,75$	-	$H/D \geq 0,75$
Francesa SNABTI-1975	$H/D < 2,5$	-	$H/D \geq 2,5$

Fonte: Freitas, 2001

De acordo com a norma europeia EN 1991-4 (EUROCODE, 2006), os silos se classificam em:

- ◆ Silos esbeltos, quando $hc/dc \geq 2,0$;
- ◆ Silos intermediários, quando $1,0 < hc/dc < 2,0$;

- ◆ Silos baixos, quando $0,4 < hc/dc \leq 1,0$ ou quando $hc/dc \leq 0,4$ sendo o fundo tremonhado;

- ◆ Silos de contenção, quando $hc/dc \leq 0,4$ possuindo fundo plano.

A EUROCODE 1 (2006) ainda classifica os silos:

- Quanto à excentricidade:
 - Silos de pequena excentricidade ($e_0 \leq 0,25D$);
 - Silos de grande excentricidade ($e_0 > 0,25D$).
- Quanto as Classes de capacidades:
 - Classe 1: Silos com capacidade abaixo de 100 toneladas;
 - Classe 2: Todos os silos que não pertencem às classes 1 e 3;
 - Classe 3:
 - Silos com capacidade acima de 10000 toneladas;
 - Silos com capacidade acima de 1000 toneladas em que ocorre pelo menos uma das seguintes situações:
 - a) Descarga excêntrica com $e_0/d_c > 0,25$;
 - b) Silos quadrados com excentricidade de carregamento $e_t/d_c > 0,25$.

Segundo Jenike (1964) podemos classificar os silos em dois tipos de fluxo:

- Fluxo de massa: Definido quando o produto é descarregado de forma uniforme, sob toda a parede do silo;
- Fluxo de funil: Definido quando o produto forma um canal vertical em uma parte delimitada do silo, alinhado com a boca de descarga, cercado por parte do produto que ficou estagnado.

Segundo Medeiros (2012), o cálculo da estrutura de um silo é baseado no material que será armazenado. As cargas advindas do material são lançadas na estrutura principalmente por gravidade dos grãos no fundo do silo ou por atrito com as paredes laterais transmitindo os esforços aos montantes. Logo, para obter a máxima eficiência no dimensionamento é necessário conhecer as propriedades físicas e as propriedades ocasionadas pelo fluxo.

A determinação do teor de umidade é um dos principais fundamentos na armazenagem de grãos. Os valores de umidades considerados adequados para uma melhor qualidade dos grãos durante a armazenagem são conhecidos, e devem ser cumpridos (MEDEIROS, 2012).

Para a determinação da umidade dos grãos utilizam-se os métodos diretos onde a água é retirada por um processo de aquecimento, calculando o teor de umidade pela diferença de peso das amostras durante o processo. Segundo o Ministério da Agricultura, para a determinação da umidade, as amostras devem ser secas em uma estufa na temperatura de cerca de 103°C durante 24 horas (BRASIL, 1992).

São definidos, basicamente, três diferentes valores de densidade, “solta”, “compacta” e “aerada”, para os quais são usados os seguintes símbolos: γ e γ_u , γ_a respectivamente. O valor determinado na célula de cisalhamento corresponde à densidade compacta (γ_u). Quando só um valor (γ) é disponível, então γ_a deverá ser tomado como $0,75\gamma$ e γ_u como $1,25\gamma$. O valor inferior, isto é, γ ou γ_a , deve ser na estimativa da capacidade de armazenamento do silo (CALIL JUNIOR, 1990).

A densidade influencia diretamente de acordo com a sua granulometria. De acordo com Calil Júnior (1984), os produtos pulverulentos de baixa densidade têm a vantagem de fluir com menor resistência à compactação na tremonha, mas tem a desvantagem da inércia em repouso e alta resistência ao ar. Um produto pulverulento de alta densidade pode compactar para uma resistência maior na tremonha, porém terá baixa inércia em repouso. O produto granular não é tão compressível, logo, não ganha muita resistência na boca de descarga do silo.

A dimensão das partículas é relevante da seguinte maneira: a fração fina facilita o fluxo do produto, enquanto a fração grossa permite o agrupamento e compactação do material na boca da descarga (LOPES NETO, 2013).

Segundo Calil Junior (1984), pode-se classificar o produto armazenado em função do diâmetro da partícula. Esta classificação é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 Classificação dos produtos armazenados segundo a granulometria

Diâmetro (D) das partículas sólidas	Classificação do produto armazenado
$D > 0,42\text{mm}$	Granulares
$0,42 \leq D \leq 0,149\text{mm}$	Pulverulentos coesivos
$0,149 \leq D \leq 0,074\text{mm}$	Pulverulentos coesivos finos
$D < 0,07\text{mm}$	Pulverulentos coesivos extrafinos

Fonte: Calil Junior, 1990

O tipo de fluxo caracteriza o descarregamento do produto, o tipo de segregação, afirmação ou não de zonas de produto sem movimento e se o silo pode ser esvaziado completamente. Determina, também, a distribuição das pressões nas paredes do silo e fundação e a integridade e custo das construções. O tipo de fluxo depende também das dimensões dos silos, da inclinação e rugosidade das paredes da tremonha e da configuração da boca de saída: centrada ou excêntrica (ANJOS, 2018).

De acordo com Deckers (2010), a primeira etapa para o projeto de fluxo e estrutura de silos verticais é a determinação das propriedades de fluxo dos produtos armazenados, conforme segue abaixo:

Segundo Calil Junior (1990) inexistente relação direta entre a razão peso e volume de uma amostra do produto com a predição do fluxo; entretanto, esta variável precisa ser calculada, pois é um parâmetro importante para determinação das pressões em silos.

Calil Junior (1990) conceitua o ângulo de atrito interno como o valor obtido entre a linha reta do lugar geométrico de deslizamento e a horizontal. Essa reta é determinada pelo cisalhamento da amostra do produto sob várias cargas normais aplicadas, configurando o ciclo de tensões de Mohr.

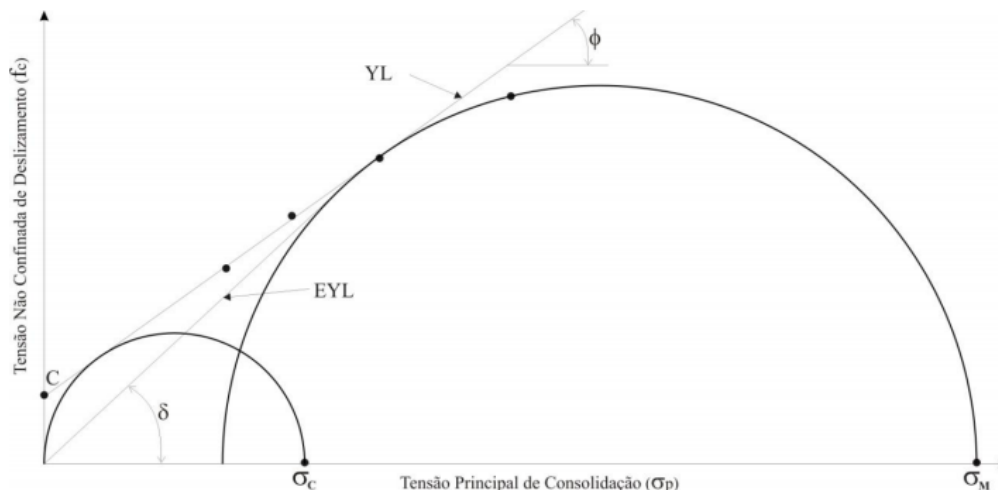
Quando o produto armazenado não é de fluxo livre, a reta não passa pela origem; portanto, o ângulo de atrito interno é definido nessa situação pela abertura entre a linha

que passaria pela origem e o eixo horizontal (CALIL JUNIOR, 1990).

O mesmo autor supracitado ainda discute sobre o lugar geométrico de deslizamento, trata-se de como o material desliza em relação a si próprio e em relação ao material da parede de construção do silo. É determinado pela

envoltória de resistência, que é relação entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal, representado pela curva que tangencia os ciclos de Mohr (Figura 5), construídos com as tensões principais atuantes no produto

Figura 5 Círculo de Mohr



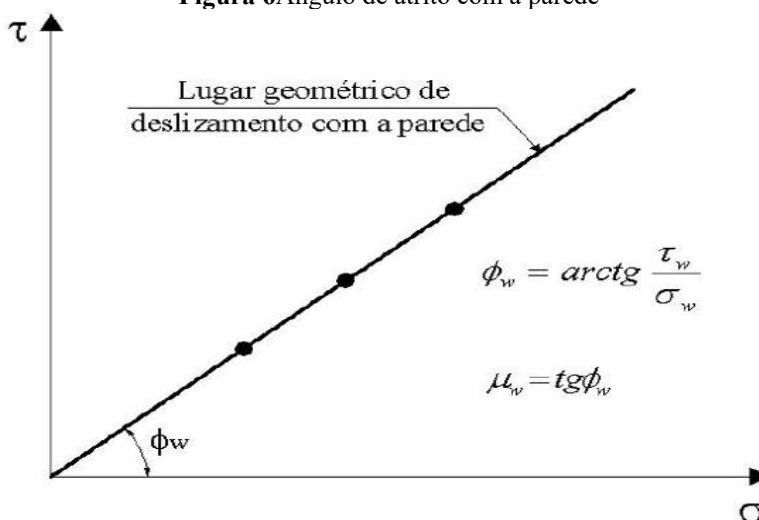
Fonte: Calil Junior, 1990

O ângulo definido entre a linha reta do lugar geométrico de deslizamento com a parede e o eixo horizontal. A tangente desse ângulo corresponde ao coeficiente de atrito com a parede (NETO, 2013)

Para se obter o ângulo de atrito com a parede (ϕ_w), segundo Palma(2005), se faz necessário utilizar uma amostra do material que será utilizado nas paredes do silo, para

compor a base da célula de cisalhamento direto (Figura 6). As tensões de cisalhamento (τ_w), que são necessárias para mover a célula de cisalhamento com o produto armazenado, em contato com o material da parede são medidas para diferentes valores de tensões normais (σ_w).

Figura 6 Ângulo de atrito com a parede



Fonte: Nascimento, 2009

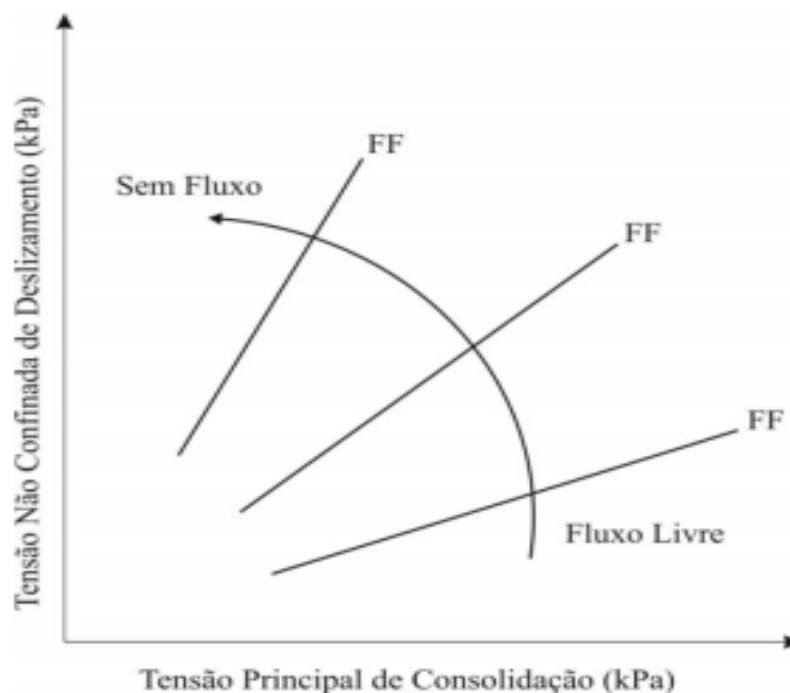
Segundo Junior (1990) função fluxo é uma relação entre a resistência e as pressões de consolidação que atuam diretamente na massa armazenada. Na verdade, a fluidez do produto é utilizada para a obtenção da abertura mínima de descarga, prevenindo assim o arqueamento, devendo ser

conhecida sobre condições severas durante a aplicação (BENINK, 1989).

Segundo Medeiros (2012) a função fluxo de um produto é um gráfico (Figura 7) no qual é plotada a tensão não confinada de deslizamento do produto versus o maior

valor de tensão de consolidação e representa o esforço atuante no produto quando em situação de consolidação.

Figura 7 Gráfico da função do fluxo



Fonte: Medeiros, 2012

Segundo Medeiros (2012) o fator fluxo da tremonha consiste em importante parâmetro para o estudo da fluidez dos produtos armazenáveis que, diferentemente da Função Fluxo, é uma propriedade do conjunto silo (geometria e ângulo de atrito com a parede) e do produto.

De acordo com Calil Junior (1990), o fator fluxo da tremonha é uma função da forma da tremonha e das propriedades do produto armazenado e indica a escoabilidade do produto na tremonha; quanto menor este valor, melhor será a tremonha.

Segundo Nascimento (2009), o fator fluxo tremonha é uma função que depende das propriedades do conjunto do silo (geometria, formato da tremonha, ângulo de atrito com a parede) e das propriedades físicas do produto armazenado.

Atualmente o silo é utilizado em todo o mundo, sendo os Estados Unidos, o principal mercado fora da Europa. Apesar de ser produzida por indústrias, a previsão das pressões exercidas pelo produto armazenado ainda diverge entre os pesquisadores e normas existentes (RODRIGUES, 2019).

Devido à inexistência de uma norma brasileira específica para o projeto de silos, os requisitos para o seu dimensionamento são seguidos a partir de normas estrangeiras. Estas utilizam a teoria de Janssen para a determinação das pressões de descarregamento do silo, multiplicando as pressões estáticas por coeficiente de sobre pressão (ANJOS, 2018).

As normas mais relevantes são: norma australiana AS3774/1996, norma europeia EN 1991-4/2002, EN1991-4: 2006, EN1993-4-1:2007, ISO 11697/95, norma americana ANSI/ASAE EP433/1988, norma britânica BMHB/1985, norma alemã DIN1055/2005, norma canadense CFBC/1983 e norma francesa SNBATI/1975. Dentre as quais, a mais aceita, ao menos no Brasil, é a EUROCODE, uma vez que, a própria norma brasileira de aço a cita.

As normas europeias mais recentes são EN 1991-4: 2006 e EN 1993-4-1: 2007 e tratam, respectivamente do cálculo das ações atuantes no silo e do dimensionamento dos elementos estruturais metálicos dos silos. Nesta última também é conhecido como Eurocode 3 onde se aborda o tema de chapas onduladas horizontalmente e se alude sobre o dimensionamento à instabilidade destas chapas submetidas à compressão axial.

A análise estrutural consiste no estudo do comportamento das estruturas que irão sustentar a edificação e transmitir seus esforços ao terreno. A estabilidade do projeto parte da verificação dos equilíbrios dos esforços externos e internos inerentes à estrutura (FREITAS et. al., 2014).

Segundo Silva Neto (2013), o processo de cálculo para o projeto estrutural dos silos é similar ao utilizado em outras construções. No entanto, o carregamento e o descarregamento ocasionam cargas que inexitem em outro tipo de estrutura. Dessa forma, quanto maior a incerteza, maior o coeficiente de segurança e menos econômica se

apresenta a estrutura. Se o coeficiente é alto, serão utilizados mais materiais do que o necessário; se é baixo, não há segurança quanto ao dimensionamento e permite a ocorrência de acidentes relacionados à ruptura do elemento estrutural (RODRIGUES, 2019).

Para que o dimensionamento seja econômico e seguro, é necessário considerar algumas características (SILVA NETO, 2013):

- Ações das pressões ocasionadas pelo produto em contato com as paredes, os ventos entre outros;
- Forma geométrica, sendo que a relação altura/diâmetro e a espessura devem ser determinadas de maneira a garantir um dimensionamento ótimo;
- O carregamento e descarregamento;
- As propriedades físicas dos produtos armazenados.

Deckers (2014) afirma que a complexidade do estudo de descarga excêntrica nesses silos provém dos efeitos gerados de elevadas sobrepressões seguidas de depressões que, por sua vez, são responsáveis por deformações na parede do silo devido a sua elevada esbelteza.

Durante a descarga, o fenômeno de formação de arcos coesivos e efeito tubopotencializam sua periculosidade estrutural já que a ruptura repentina dessas camadas compactadas causa enormes sobrecargas na estrutura, bem como queda de arcos coesivos ou das paredes resultantes do efeito tubo tem sido a causa de grande parte dos acidentes registrados com silos ao redor do mundo (MEDEIROS, 2012).

A determinação das ações é importante para a determinação dos esforços atuantes, dimensionamento, estabilidade e segurança estrutural. Estas ações são normalmente

devidas a causas externas que ocasionam esforços internos e deformações na estrutura. Como exemplo, pode-se citar o peso próprio dos elementos estruturais e construtivos, dilatações térmicas, vento, etc. (ANJOS, 2018).

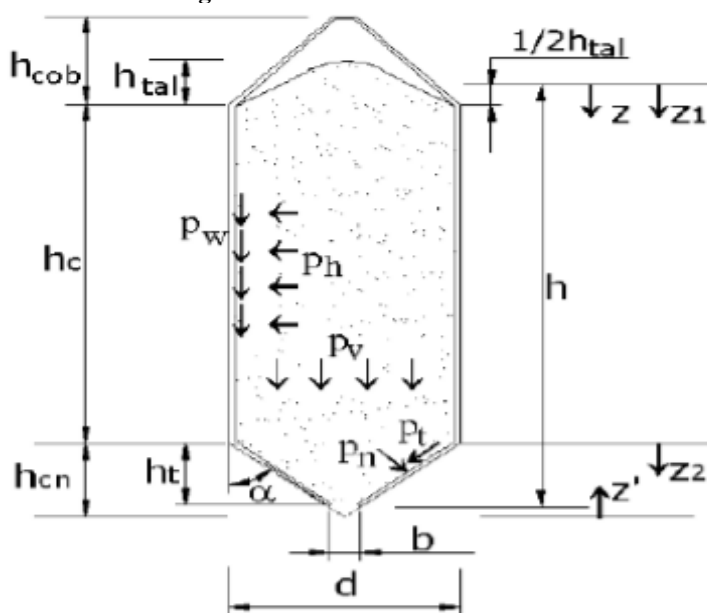
Madrona; Calil Junior (2009) citam que é necessário conhecer as propriedades físicas dos produtos, como: o tipo de fluxo, a geometria do silo, além do método de operação do silo para determinar as pressões exercidas pelos produtos armazenados.

Segundo Calil Junior e Nascimento (1997), no projeto de silos devem ser consideradas as seguintes ações:

- Ações Permanentes: Constituídas pelo peso próprio da estrutura, da plataforma e dos equipamentos mecânicos instalados na cobertura e suspensos pela tremonha;
- Ações Variáveis: Constituídas pelas pressões de carregamento e descarga do produto armazenado, pressões de insuflação de ar, dilatação térmica do produto, deformações na fundação, dispositivos vibradores, efeitos climáticos, vento, etc;
- Ações Excepcionais: Devida ao possível impacto de veículos na estrutura de suporte ou com o silo e pressões decorrentes da explosão de pós.

Segundo Coelho (2016), as principais ações que devem ser consideradas são as pressões nas paredes verticais e no fundo dos silos, causadas pelos produtos armazenados. Na parede vertical atuam forças perpendiculares chamadas de pressões horizontais e forças axiais atrito do produto com a parede. No fundo do silo atuam forças denominadas pressões verticais conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 Pressões atuantes nos silos.



Legenda: (Ph = pressão horizontal; Pv = pressão de atrito; h = altura; hcob = altura da cobertura; hc = altura do corpo do silo; ht = altura da tremonha; Pt = pressão tangencial na tremonha; Pn = pressão normal na tremonha; b = raio do silo; d = diâmetro do orifício de descarga; α = inclinação da tremonha com a vertical).

Fonte: Palma e Calil Junior, 2008.

Conforme Silva-Neto (2013), as tensões iniciais presentes na fase inicial do carregamento do silo são completamente diferentes das tensões dinâmicas que atuam quando da descarga do produto armazenado. Estas diferenças entre as tensões de carregamento e descarregamento do silo levam a formação de picos de tensões consideráveis que atuam sob a parede e fundo do silo quando a situação de fluxo é obtida.

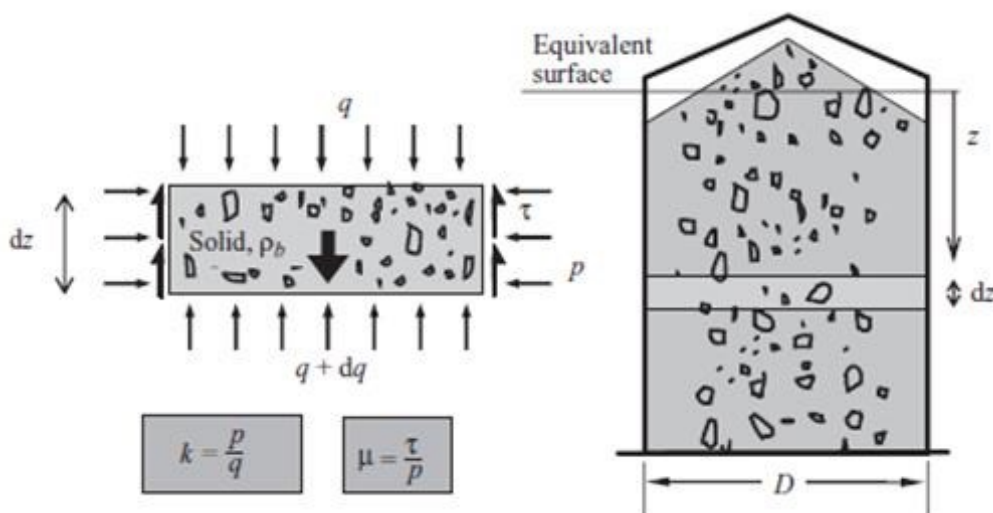
Logo, segundo Calil Junior; Cheung (2007), muitos pesquisadores estudaram pressões em silos, criando formulações e desenvolvendo várias metodologias para avaliar distribuições de pressões.

As estimativas das cargas em silos são basicamente apoiadas em duas teorias: a de Janssen (1895) para

estimativas de cargas iniciais ou de carregamento no silo; e a teoria de Jenike (1968) para estimativas de cargas de fluxo em silo. É importante lembrar que as pressões variam no espaço e no tempo e que os silos são uma das estruturas que apresentam o maior número de ruínas no mundo.

A teoria de pressão de Janssen (1895) é a mais utilizada no cálculo das pressões estáticas das normas internacionais de silos. Ela se baseia no equilíbrio estático de uma porção infinitesimal do produto armazenado, Figura 12, considerando a contribuição do atrito lateral realizado nas paredes conforme Nascimento (2009).

Figura 9 Fatia elemental do sólido.



Fonte: Rotter (2008)

A pressão de atrito na parede causa esforço de compressão na parede que é distribuída na superfície interior e equilibra parte do peso do produto. A existência do atrito faz com que pressões horizontais que o produto exerce nas paredes não aumentem linearmente com a altura como as pressões hidrostáticas, mas apresentem um crescimento que tende a um valor máximo exponencial (MADRONA, 2008).

Para Janssen (1895) a pressão vertical estática (pvf) pode ser calculada por:

$$pvf(z) = \frac{\gamma A}{K\mu U} \left(1 - e^{-zK\mu\frac{U}{A}}\right) \quad (1)$$

Onde:

pvf = pressão vertical no produto armazenado após o enchimento do silo;

γ = peso específico do produto;

K = razão entre as pressões horizontal e vertical (valor característico);

μ = coeficiente de atrito;

A = área da seção transversal do silo;

U = perímetro da seção transversal da parede;

z = comprimento abaixo da superfície do sólido para condição de enchimento máximo do silo.

A partir da Equação 1, pode-se obter a pressão horizontal estática (phf) e a de atrito (pwf), considerando as hipóteses que $K \cdot dphf = dphf$ e $pwf = \mu \cdot phf$.

$$phf(z) = K \cdot pvf(z) \quad (2)$$

$$pwf(z) = \mu \cdot w \cdot phf(z) \quad (3)$$

Onde:

phf = pressão horizontal após o carregamento;

pvf = pressão vertical no produto armazenado após o carregamento;

pwf = pressão de atrito na parede durante a descarga;

μw = coeficiente de atrito característico da parede vertical.

De acordo com a sua teoria, o aumento ou a redução depende das pressões horizontais considerando um raio imaginário de seção transversal (r_i) cujo centro coincide com o centro do orifício de saída. A sobre pressão devido à descarga excêntrica é considerada constante na parede da tremonha e decresce linearmente até zero desde a transição até a parte superior do silo (ANJOS, 2018).

Diante da evolução na tecnologia dos materiais, em que se têm utilizado estruturas cada vez mais esbeltas, nos projetos de engenharia, principalmente quando se trata de estruturas de aço, o fenômeno da flambagem, antes secundário perante a grande robustez das estruturas, passou a se tornar cada vez mais importante, influenciando significativamente na resistência das estruturas (COSTA, 2009).

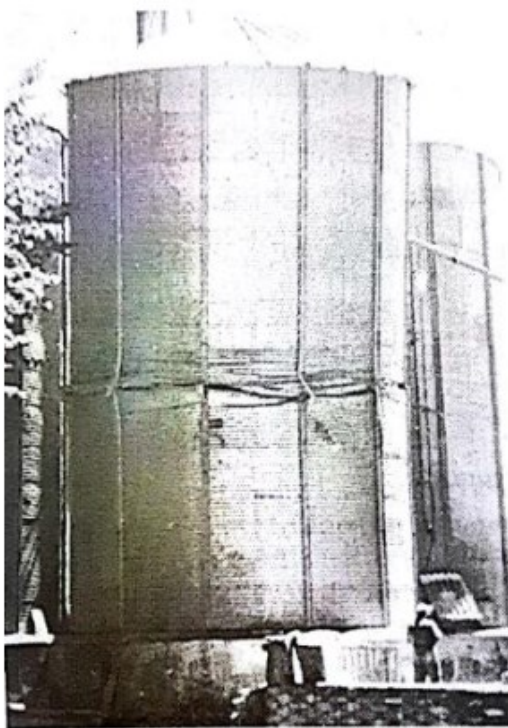
Uma das causas de patologias em estruturas metálicas é a verificação incorreta na estabilidade, ocasionando flambagem local ou global. Silos são vulneráveis a falhas por flambagem causadas pela força de atrito com a parede devido à interação entre o produto

armazenado e a parede, particularmente durante uma descarga excêntrica. Como consequência, pressões horizontais não-uniformes na parede se desenvolvem, contribuindo com a flexão meridional e a distribuição assimétrica de forças de compressão na parede (IWICKI et al., 2016).

Na prática de projetos no Brasil, é muito comum admitir o comprimento de flambagem igual ao comprimento entre as chapas e verificar o montante à compressão simples, adotando as orientações da Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 14762:2010 sobre dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Com isso, muitos colapsos em silos acontecem devido à instabilidade destes montantes, como exemplo da Figura 10 e 11 (RODRIGUES, 2019).

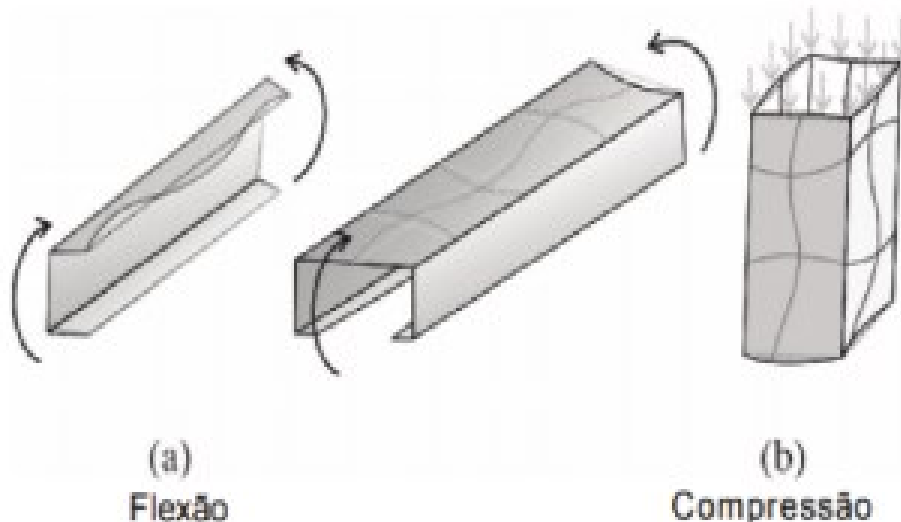
No dimensionamento de chapas dobradas a frio, é necessário verificar os elementos quanto à flambagem local. Os elementos planos que constituem o perfil de chapa dobrado podem se deformar (flambar) localmente quando solicitados a compressão axial com flexão e cisalhamento (KOCK, 2018).

Figura 10 Flambagem de um silo metálico cilíndrico de chapas onduladas



Fonte: Cheug, 2007

Figura 11 Flambagem local



Fonte: Silva; Silva, 2008

Na norma brasileira NBR 14762:2010 é recomendado o método das larguras efetivas, calculado segundo a fórmula abaixo:

$$b_{ef} = \frac{b(1 - \frac{0,22}{X_p})}{X_p} \leq b \quad (4)$$

$$X_p = \frac{b}{0,95 \sqrt{\frac{kE}{\sigma}}} \quad (5)$$

Sendo

b - Largura do elemento;

t - Espessura;

X_p - Índice de esbeltez reduzido do elemento;

E - Módulo de elasticidade do aço (MPa);

K - Coeficiente de rigidez.

Nos casos onde há tensões de tração e compressão no elemento, somente para elementos com borda livre, calcula-se as larguras efetivas, substituindo na equação, a largura total do elemento pela largura comprimida, b_c (KOCK, 2018).

$$b_{ef} = \frac{b_c(1 - \frac{0,22}{X_p})}{X_p} \leq b \quad (6)$$

Sendo:

b_c: comprimento da parte comprimida do elemento

AL

A EN 1993-4-1 apresenta dois métodos de cálculo de flambagem em silos com colunas verticais, baseados na distância entre suas colunas. Para uma pequena distância, a força resultante crítica na flambagem é calculada a partir da teoria da casca no modelo ortotrópico. Para distâncias

maiores, a carga crítica é baseada na fórmula de flambagem para uma única coluna apoiada em uma fundação elástica (ANJOS, 2018).

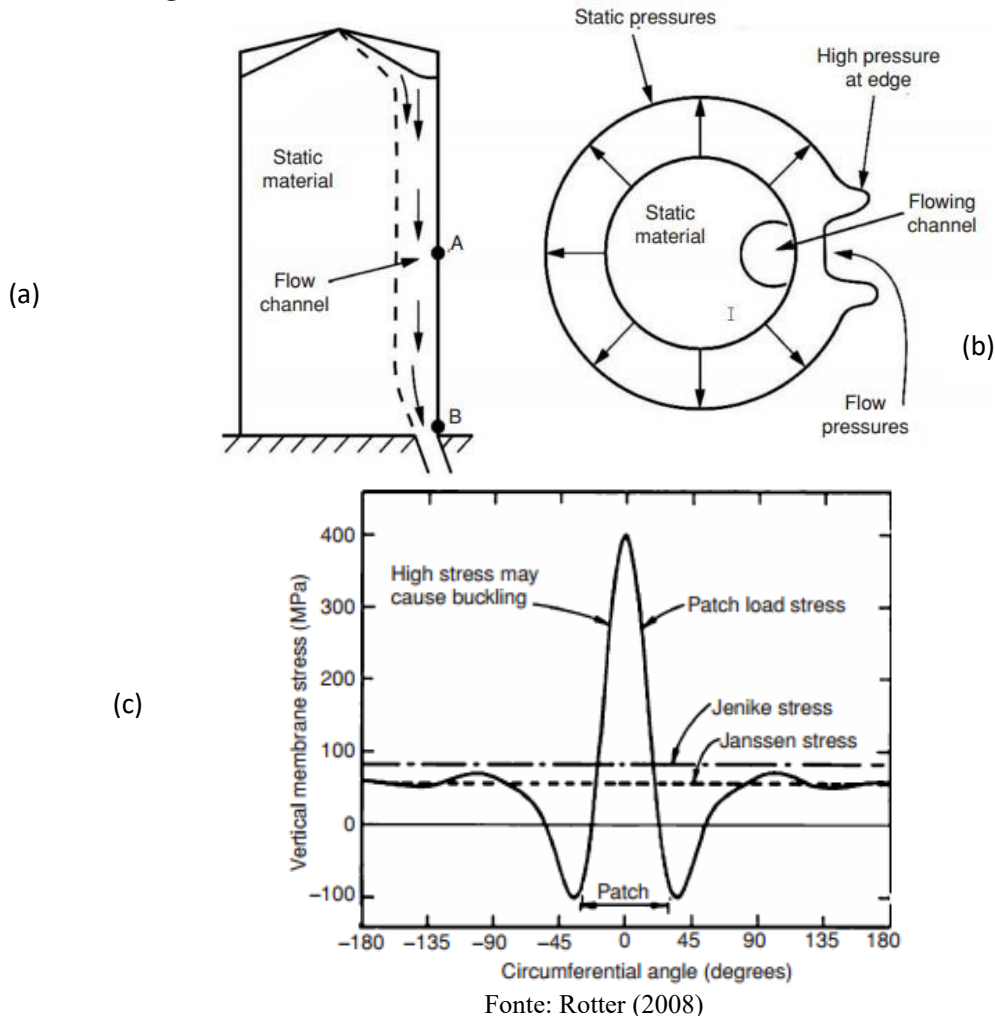
De acordo com o mesmo autor supracitado, em ambos os métodos a influência de pressão horizontal devido ao produto armazenado no silo em relação à flambagem não é considerada. A distribuição não-uniforme das cargas verticais ao longo do silo com descarga excêntrica causadas pelo atrito com a parede são desprezadas e, em relação aos métodos propostos, verifica-se que para um mesmo silo os resultados obtidos para a capacidade de carga variam de 3 a 5 vezes entre si.

Rotter (2008) cita alguns fatores relacionados à flambagem no silo, dentre eles;

- Compressão axial desenvolvida a partir do atrito do contato dos grãos com a parede do silo é proveniente do resultado de depressões assimétricas exercidas sobre a parede do silo, causando flexão da casca.
- Pressão externa sobre a parede vertical: quando o silo está vazio, a parede é bastante suscetível à flambagem em caso de ocorrência de ventos extremos. A flambagem associada a esse efeito tende a ser bem maior do que quando é decorrente de compressão axial;
- Cisalhamento na parede vertical: quando um silo baixo é carregado excêntrica ou submetido a um abalo sísmico, a parede do silo pode flambar por cisalhamento próximo à fundação.

Como exemplo, Rotter (2008) ilustra na Figura 12 um pequeno aumento de pressão na parede do silo induzindo a uma elevada compressão vertical (não devido ao atrito).

Figura 12 Tensões resultantes de um pico de pressão exercida sobre a parede do silo.



Anjos (2018) ainda remete outro efeito relevante no dimensionamento da estrutura de um silo metálico quanto à flambagem que é a combinação de pressão do vento sobre a parede externa do silo e a pressão na parede devida aos produtos armazenados.

A força normal de flambagem elástica de um perfil monossimétrico, cujo eixo x é o eixo de simetria, é o menor valor obtido entre:

a) Força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo y:

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 E I_y}{(K_y L_y)^2} \quad (7)$$

a) Força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo x:

$$N_{ex} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L_x)^2} \quad (8)$$

b) Força axial de flambagem global elástica por torção:

$$N_{ez} = \frac{\pi^2 E I_x}{(K_x L_x)^2} \quad (9)$$

Força normal de flambagem elástica para flexo-torção:

$$N_{exz} = \frac{N_{ex} + N_{ez}}{2[1 - (x_0/r_0)^2]} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4N_{ex}N_{ez}[1 - (x_0/r_0)^2]}{(N_{ex} + N_{ez})^2}} \right] \quad (10)$$

Onde:

N_{ex} e N_{ez} São as forças axiais de flambagem elástica (kN); r_0 e x_0 Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção, e distância do centro de torção ao centroide (cm).

As pesquisas em silos podem ser agrupadas segundo Calil Junior (1990) em três áreas de concentração distintas, que são:

- Estudo das ações e deformações em silos reais e/ou modelos reduzidos;
- Modelagem do comportamento dos produtos armazenados;
- Estudos do comportamento estáticos e dinâmicos das estruturas (experimental e/ou numérico).

Cheung (2007) descreve que, para se alcançar patamares mais altos na pesquisa com silos, algumas áreas têm que avançar tais como: Simulações em DEM (DiscreteElementMethod) e FEM ou MEF (FiniteElementMethod), experimentos para verificação dos programas de simulação de fluxo e pressões e modelos simplificados de carregamentos que sejam simples, realistas e pouco conservadores para utilização do dimensionamento e aplicação em normas.

Em decorrência da dificuldade na previsão dos esforços causados pelas pressões dinâmicas e esforços, essencialmente dos silos, o método aplicado pelas normas internacionais (EUROCODE 1, DIN 1055-6), tem como fundamento básico a aplicação de coeficiente sobre pressão. Estes coeficientes de segurança surgem de incertezas advindas do pouco conhecimento dos fatores que interagem na estrutura do silo, principalmente durante a execução de carga e descarga

Diante da dificuldade em se conhecer perfeitamente o comportamento das pressões exercidas pelos produtos armazenados, grande parte dos silos existentes no mundo não possui condições ideais de operação. Desde o século XIX, numerosas teorias têm sido desenvolvidas para avaliar as pressões exercidas sobre as paredes dos silos. Contudo, muitos parâmetros de cálculo ainda não foram corretamente determinados, principalmente quando se trata de pressões relacionadas com a descarga excêntrica (ANJOS, 2018).

Os métodos de cálculo apresentados para a determinação das pressões estão sujeitos a algumas limitações, com pequenas variações entre as normas, como: relação altura/diâmetro, dimensão máxima das partículas do produto armazenado, pequenas cargas de impacto no carregamento, excentricidade máxima da abertura da saída, produto de fluxo livre, entre outras (PALMA e CALIL JUNIOR, 2008).

Aliado ao avanço extraordinário da computação nos últimos anos incentiva-se a utilização dos métodos numéricos como uma nova forma de abordagem no estudo das pressões nos silos (ANJOS, 2018).

Segundo Cherri et al. (2012), o desenvolvimento e aplicação dos métodos numéricos estão vinculados ao desenvolvimento computacional, onde existem diversos softwares que podem ser utilizados, a exemplo do SAP 2000 e do ANSYS. O primeiro trabalha com uma interface, sofisticada, intuitiva e versátil proporcionada por um sistema de análise estrutural inigualável e ferramentas de auxílio ao projeto, para engenheiros que trabalham com diversas áreas, incluindo o dimensionamento de silos, permitindo a modelagem gráfica em 3D até a grande variedade de opções de análise e de projeto completamente integrados. O SAP2000 contém várias formulações de dimensionamento em estrutura metálica, como a EUROCODE (SAP, 2017).

No entanto, existem alguns fatores relevantes para a escolha de um algoritmo, tais quais: precisão desejada,

capacidade do método em conduzir aos resultados desejados (velocidade de convergência), esforço computacional desejado (tempo de processamento, economia de memória necessária para a resolução) (CHERRI et al., 2012).

Para resolver tais problemas, existe uma sequência lógica onde se identifica o problema real através do levantamento de dados, ou seja, se inicia a partir da descrição geométrica da região do espaço na qual ela será considerada, em seguida constrói-se um modelo matemático, faz-se uma implementação computacional, definindo as equações e condições de contorno que regem o problema para que o sistema algébrico resultante seja solucionado numericamente (CHERRI et al., 2012; FRANCO, 2018).

O cálculo das pressões adicionais é de difícil determinação e normalmente é necessária uma análise numérica. O método mais empregado atualmente é o método por elementos finitos. Para simplificar o cálculo e facilitar o desenvolvimento do projeto, as normas DIN 1055-6 e EUROCODE 1 permitem a adoção de um método simplificado que consiste na adoção de um coeficiente de ponderação das ações (ANJOS, 2018).

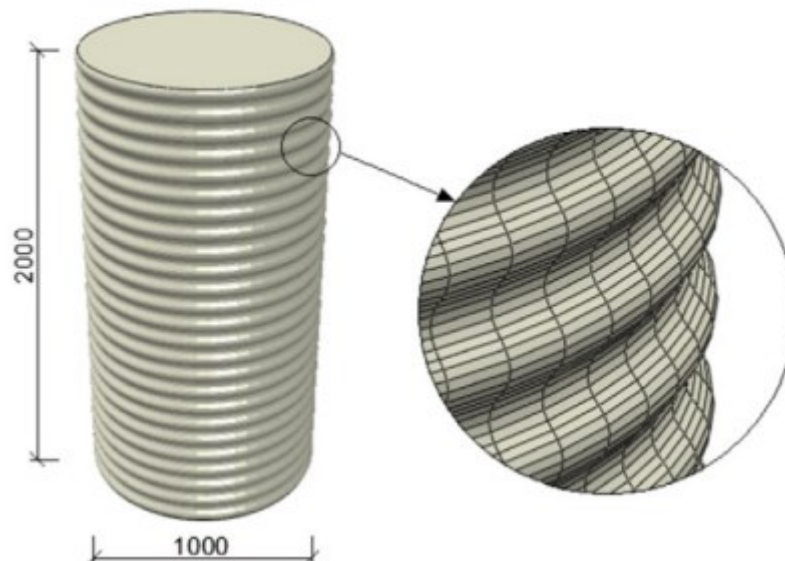
Método dos elementos finitos é um procedimento numérico em que a região ou o contínuo é discretizado (ou dividido) em pequenos elementos conectados por nós. A partir dessas conexões nodais compartilhadas entre os elementos finitos é possível a obtenção de um conjunto de equações algébricas que pode ser solucionado numericamente através de métodos de otimização e algoritmos matriciais. Portanto, o método de elementos finitos subdivide o domínio de um problema em partes menores, denominadas elementos finitos (FRANCO, 2018).

Os métodos numéricos apresentam diversas vantagens, como por exemplo, são capazes de permitir a análise das pressões nos silos com geometrias diferenciadas, como a descarga excêntrica ou silos com fundo inclinado (tremonhas). Além disso, têm a possibilidade de escolha de uma teoria de comportamento mais coerente com a realidade para o produto armazenado, incluindo comportamento plástico e não-linear (ANJOS, 2018).

Para a aplicação do Método dos Elementos Finitos é necessário o estabelecimento de um domínio de integração, no caso tridimensional, esse domínio precisar ser um sólido. A informação do sólido é transmitida ao gerador de malha que irá então decompor o sólido em elementos menores. Na etapa da criação do sólido também são definidas as diferentes regiões na superfície do domínio que terão diferentes condições de contorno (FAORO, 2014).

A etapa de criação da malha Figura 13, dos elementos e dos seus respectivos nós compreendem o processo de discretização do domínio do problema, sendo muito importante, uma vez que o desempenho da simulação é dependente da qualidade e das características da malha gerada para uma determinada complexidade geométrica (ERDEMIR et al., 2012).

Figura 13 Dimensões e malha para simulação



FONTE: Kuczynska et al., 2015

De acordo com Anjos (2018) os métodos de elementos finitos é uma ferramenta bastante eficiente na solução de problemas de engenharia, com a possibilidade de realizar uma grande discretização da estrutura, a simulação dos comportamentos lineares e inelásticos dos materiais, bem como o estudo da interação entre os materiais diferentes e a realização de análises dinâmicas ou a realização de problemas não estruturais. Portanto é muito valioso aplicá-lo, mas se for feito com segurança, pois assim será possível avaliar os resultados de maneiras crítica, estimando adequadamente a eficiência da análise realizada.

O mesmo autor supracitado ainda destaca a importância do engenheiro dominar a implicações das teorias e hipóteses empregadas no método dos elementos finitos. A hipótese fundamental na confecção do modelo matemático é a continuidade do meio, dado que esse método é baseado na Mecânica do Contínuo. Essa teoria é um ramo da ciência que trata a matéria como sendo um meio contínuo, sem vazios interiores, de forma que qualquer porção de volume, por menor que seja, é totalmente preenchida por certa quantidade de massa. Além disso, o meio inicialmente contínuo deve permanecer assim depois de aplicado o carregamento externo. Assim, na Mecânica do Contínuo, os princípios da física são escritos sob a forma de equações diferenciais. Os efeitos da constituição interna dos materiais são considerados de forma macroscópica através das equações constitutivas do material

Em uma simulação pelo método dos elementos finitos, devem-se considerar os seguintes passos: Fase do pré-processamento que tem os objetivos de: criar e discretizar o domínio da solução em elementos finitos, assumir uma função da forma que representa o comportamento de um elemento, desenvolver equações para um elemento, unir os elementos para representar o problema inteiro, construir a matriz de rigidez global e de aplicar as condições iniciais e

de carregamento; Fase de solução que tem o objetivo de resolver um conjunto de equações algébricas lineares ou não-lineares simultaneamente para obter resultados nodais, tais como valores de deslocamentos e de temperatura em diferentes nós para problema de transferência de calor; Fase de pós-processamento onde obtém-se outras informações importantes, como tensões principais, fluxo de calor e outras (MOAVENI, 2015).

MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa desenvolvida foi de caráter teórico-computacional para verificar as pressões de cisalhamento exercidas pelo contato de grãos de milho durante o descarregamento do mesmo.

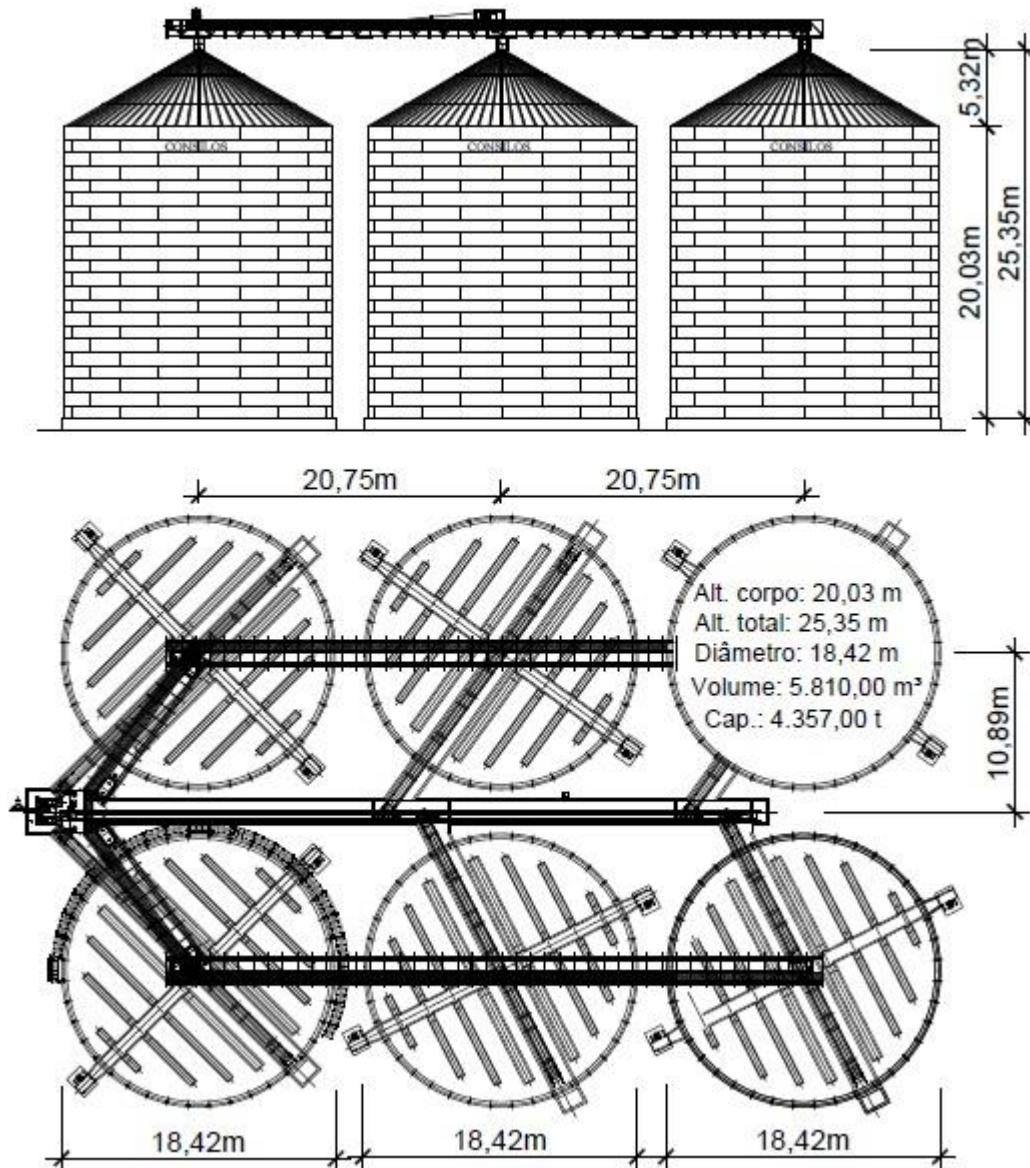
Foi utilizado como base de estudos iniciais o projeto existente de um silo metálico vertical instrumentado por Fank (2017), bem como as propriedades dos grãos ali armazenados, realizando também adaptações ao modelo desenvolvido por Anjos (2018) para adequar às necessidades da análise e limitações computacionais.

O silo experimental localiza-se no município de Entre Rio do Oeste (PR) e foi fabricado e instalado pela indústria CONSILOS, do município de Cascavel (PR). Utilizou-se o software SAP2000® para simular os esforços nos montantes. Para tanto, foram efetuadas as seguintes etapas: validação do modelo numérico de acordo com metodologia proposta por Anjos (2018), simulação numérica e análise estrutural seguindo os cálculos para de flambagem e deformação utilizados por Rodrigues (2019).

O silo analisado experimentalmente tem como dimensões 18,42m de diâmetro interno e altura total de 25,35m (20,03m de corpo e 5,32m de cobertura) sendo, portanto, caracterizado como medianamente esbelto pela norma EN 1991-4. Quanto ao volume total, trata-se de 5810

m³ e capacidade de armazenamento de 4357t de grãos de milho (Figura 14)

Figura 14 Silo experimental e suas dimensões geométricas



FONTE: Fank (2017)

E

m relação à carga e descarga, os processos foram executados concêntricamente pela parte superior e inferior do silo. Há um orifício de descarga principal no centro do fundo medindo 42x42 cm e 4 orifícios auxiliares de 30x30 cm distribuídos ao longo do diâmetro. O fundo é plano e de concreto armado e a parede lateral de chapas corrugadas produzidas com aço de alta resistência (ZAR 345).

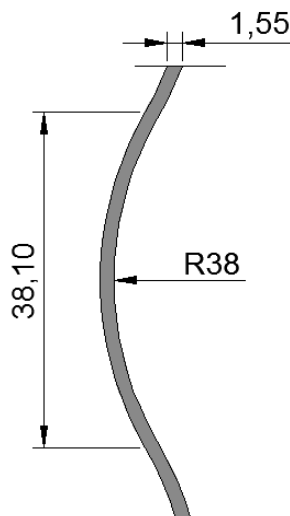
Quanto às propriedades mecânicas do aço constituinte, tem-se:

- Módulo de elasticidade longitudinal (E_s) = 210 GPa;
- Coeficiente de Poisson (ν) = 0,3
- Tensão limite de escoamento (f_y) = 345 MPa;

- Limite de resistência à tração (f_u) = 430 MPa.

As paredes verticais do silo são de chapa metálica corrugada, com onda de 1,5 de comprimento, espessura de 1,55 mm, conforme ilustra a Figura 15.

Figura 15 Geometria da chapa metálica constituinte do silo.

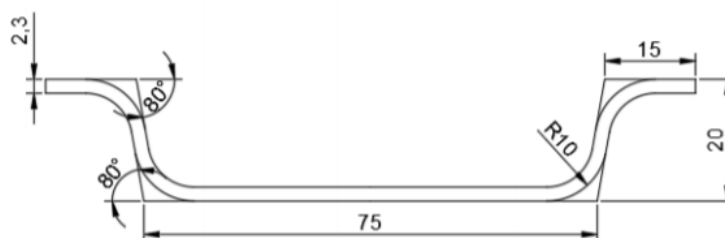


Fonte: Fank (2017)

O perfil do montante utilizado está representado pela Figura 16, e possui área de 292,5 mm²; espessura de 2,30mm e momento de inércia perpendicular ao eixo de simetria do perfil de 28980 mm⁴, considerando o eixo de

referência de análise passando pelo ponto de ligação entre montante e chapa.

Figura 16 Geometria do perfil metálico dos montantes



Fonte: Rodrigues (2019)

Em relação às propriedades dos grãos armazenados no silo proposto por Frank (2017), os valores das propriedades físicas e mecânicas dos grãos de milho armazenado nele estão dispostos na Tabela 3, como dados de entrada para a simulação da atual pesquisa. Além desses,

utilizou-se para a validação do modelo numérico do produto armazenado: Módulo de elasticidade longitudinal (Es) = 35733 kPa; Coeficiente de Poisson (ν) = 0,31; Ângulo de dilatação: 32,7°.

Tabela 3 Propriedades experimentais do grão de milho.

Produto	Coesão [kN.m ⁻²]	γ [kN.m ⁻³]		ϕ_i [°]		ϕ_c [°]		ϕ_r [°]		ϕ_w [°]	
		Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.
Milho	1,3	7,50	7,54	19	28	25	32,5	25,3	26,6	9,1	10,8

Fonte: Fank, 2017

Para análise numérica de um silo e seus montantes, utilizou-se o SAP2000®, programa computacional que tem como base o método dos elementos finitos - MEF. Inicialmente se definiu a malha ótima. Em seguida foi feita

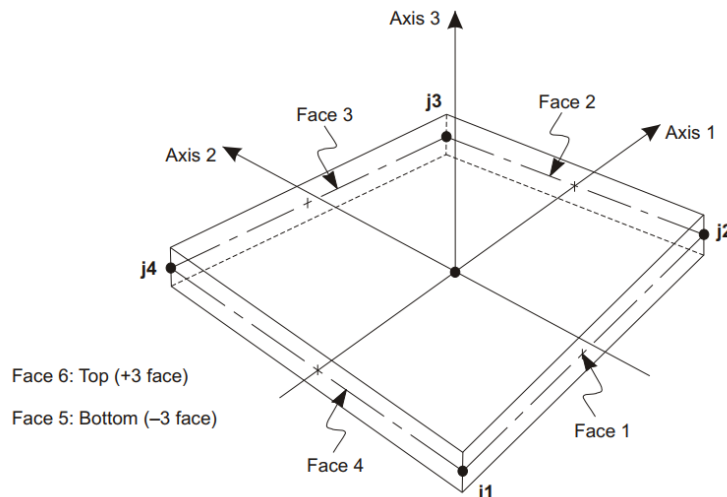
uma análise das tensões que surgem nas paredes e montantes, quando a estrutura é submetida ao carregamento e descarga de grãos (ARGENTA, 2010).

O silo foi desenvolvido através de um elemento de casca dividindo-a em elementos quadrilaterais de 4 nós, obedecendo ao modelo de análise descrito na EN 1993-1-6, com 25 cm de largura e 25 cm de altura (VASCONCELOS et al., 2018)

O elemento da estrutura casca possui capacidade de flexão e permite carregamento normal e paralelo ao plano. É

um elemento de 4 nós (Figura 17) com 6 graus de liberdade em cada nó: translações nas direções x, y e z e rotações em torno dos eixos x, y e z (ANJOS, 2018).

Figura 17 Elemento de estrutura quadrilateral de quatro nós

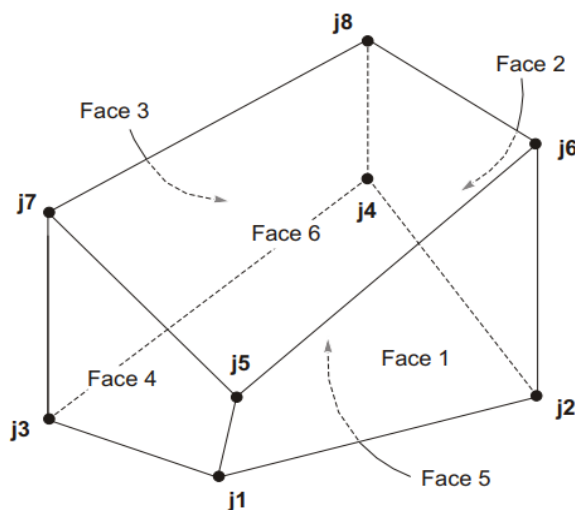


Fonte: SAP 2000 (2017)

O produto armazenado foi simulado por meio do elemento sólido. É um detalhamento 3D onde, cada elemento sólido tem seis faces quadrilaterais, com uma junta localizada em cada um dos oito cantos ou nós, conforme mostrado na Figura 18. É importante notar a relativa posição

das oito juntas: os caminhos j1-j2-j3 e j5-j6-j7 devem aparecer no sentido anti-horário quando vistos ao longo da direção de j5 a j1 (SAP 2000, 2017).

Figura 18 Elemento sólido



Fonte: SAP 2000(2017)

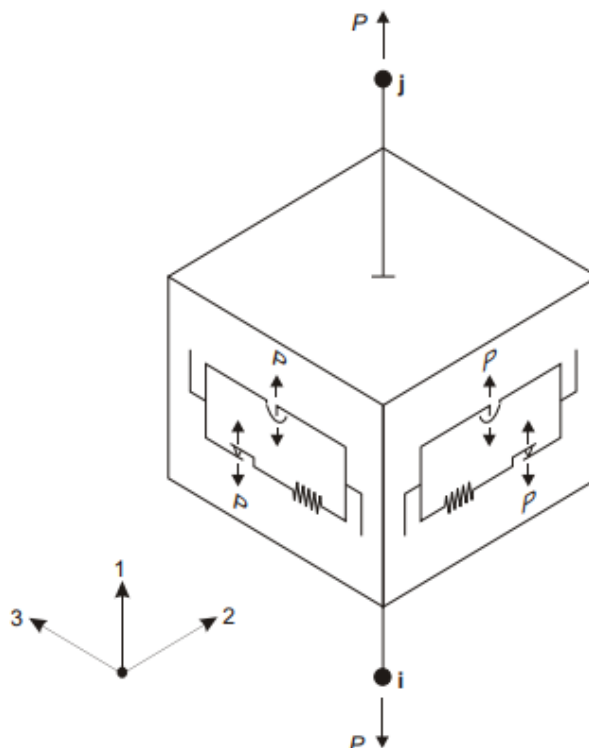
Para representação do contato entre o produto, a casca e os montantes, foi utilizado o pêndulo de atrito biaxial (Figura 19). Este elemento do SAP 2000 possui propriedades de atrito ao deslize, deformações devido ao cisalhamento e comportamento de deslize entre os sólidos. As forças de atrito e as forças do método são diretamente proporcionais a

força axial de compressão no elemento, onde, o mesmo transporta a tensão axial (SAP 2000, 2017).

Esse elemento também pode ser usado para modelar o comportamento de abertura e atrito entre as superfícies em contato definindo os raios como zero, indicando uma

superfície plana. O modelo de fricção é baseado no comportamento histerético proposto por Wen (1976)

Figura 19 Pêndulo isolador de atrito

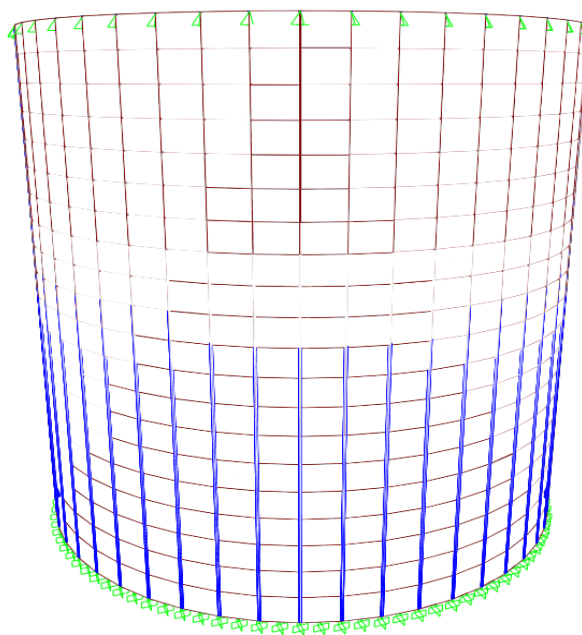


Fonte: SAP 2000(2017)

A malha dos elementos, portanto, pode ser visualizada na Figura 20 e 21 e o modelo simulado, permitindo o deslocamento dos nós na base pelo

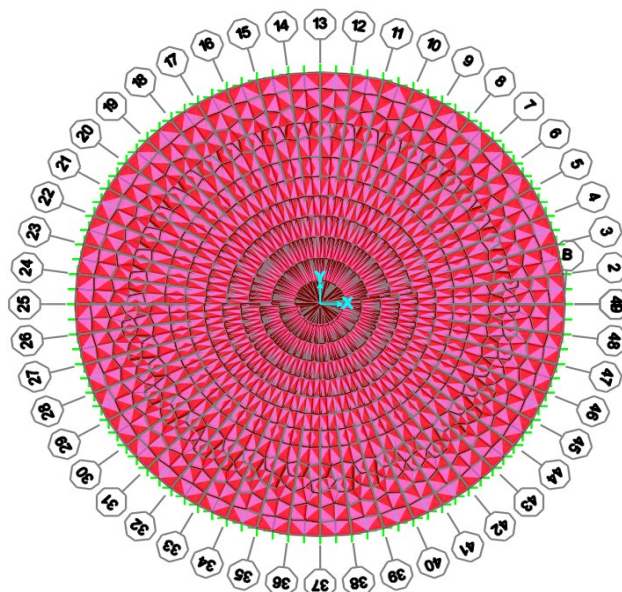
orifício de descarga e as restrições na horizontal, é representado na Figura 22.

Figura 20 Representação da malha



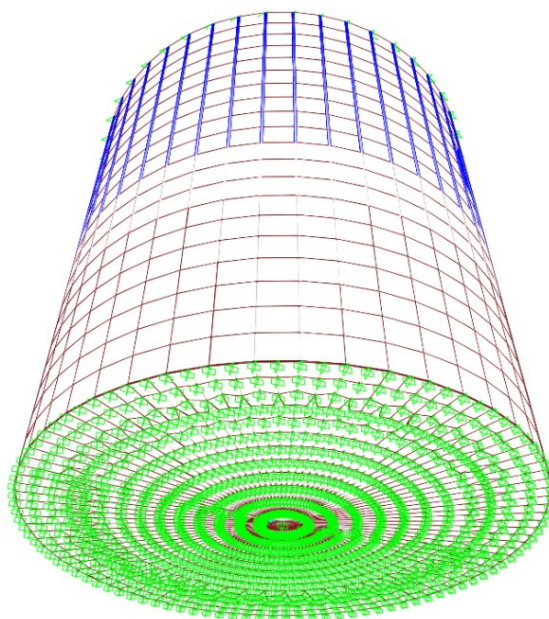
Fonte: SAP 2000 (2017)

Figura 21 Representação da malhado fundo



Fonte: SAP 2000 (2017)

Figura 22 Restrições do fundo do silo



Fonte: SAP 2000 (2017)

A Figura 22 demonstra quais as restrições utilizadas durante o cálculo. No caso para o fundo do silo, todos os nós foram restritos não permitindo movimentação. Na cobertura foram colocadas restrições no eixo x e y permitindo a movimentação em z.

As simulações foram geradas a partir do descarregamento do silo, analisando as tensões nos montantes, bem como a deformação e o processo de flambagem ao qual estão submetidas. O processo envolveu os demais esforços, uma vez que, o comportamento do silo

pode alterar de acordo com a combinação das ações solicitantes conforme indica Palma (2005).

Segundo Rodrigues (2019) poucas normas apresentam um modelo efetivo que expõe resultados com bom grau de aproximação para a definição de uma equação para o cálculo da carga crítica de flambagem dos montantes de um silo de chapas onduladas metálicas.

Para gerar força de cisalhamento não linear no elemento no SAP 2000 (2017), a rigidez k deve ser positiva e, portanto, a força P deve ser negativa (compressiva). Um

valor razoável para a rigidez k pode ser obtida como o produto da área e módulo de elasticidade dividido pelo comprimento de arco de um montante ao outro AE/L , além disso, deve incluir no sistema a flexibilidade das conexões ou suportes que não estão incluídos no modelo.

Logo, baseado no método dos esforços para estruturas hiperestáticas e na equação da linha elástica, resolveu analiticamente e desenhou as equações (11), (12) e (13). D_y é o produto do módulo de elasticidade pelo momento de inércia, n é o número de montantes no silo, H a reação horizontal nos apoios, K a rigidez em kN/mm^2 e R , raio do silo, usado em mm citadas por Rodrigues (2019).

$$\theta(\text{em graus}) = \frac{360^\circ}{n} \quad (11)$$

$$H = \frac{-1+4\cos\theta-3\cos(2\theta)-2\theta\text{sen}(2\theta)}{8\theta+4\theta\cos(2\theta)-6\text{sen}(2\theta)} \quad (12)$$

$$K = \frac{-4D_y}{R^3(-4H - 2\theta + 2H\theta^2 \cos(\theta) + \theta^2 \text{sen}(\theta) + 4H\cos(\theta) + 2\text{sen}(\theta))}$$

Ainda de acordo com a autora supracitada, para o cálculo da carga crítica do montante, a EN 1993-1-6 propunha usar o menor valor entre as Equações (14) e (15). A primeira, por sua vez, faz alusão ao processo de instabilidade, sendo a carga do ponto de bifurcação do equilíbrio. A segunda é a carga máxima para que não ocorra o esmagamento do perfil, logo, ela se mantém.

$$N_{b,Rd} = \frac{2\sqrt{E I_y K}}{\gamma_{m1}} \quad (14)$$

$$N_{b,Rd} = \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_{m1}} \quad (15)$$

Sua composição se deu baseada em um estudo de flambagem de barras com extremidades rotuladas e comprimento finito, l . A Equação (16) define a carga crítica de flambagem.

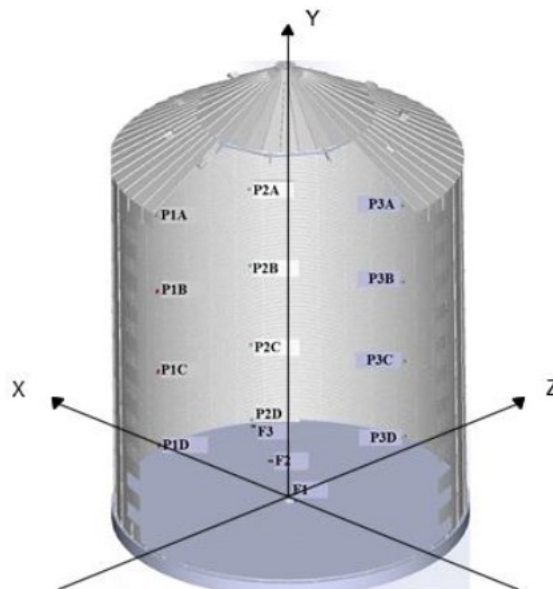
$$N_{cr} = n^2 \frac{\pi^2 EI}{l^2} + \frac{1}{n^2} \frac{k l^2}{\pi^2} \quad (16)$$

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 23 ilustra a validação do modelo numérico realizado por Anjos (2018) na determinação das pressões horizontais com a parede de um silo metálico vertical nas mesmas dimensões do silo instrumentado por Fank (2017), objeto do atual estudo.

Esta simulação no SAP 2000 possibilitou a determinação dos resultados das pressões nos eixos x e z , correspondentes aos resultados obtidos nas células de alinhamento P1 e P3, respectivamente, enquanto o eixo y representou a altura do silo (Figura 24).

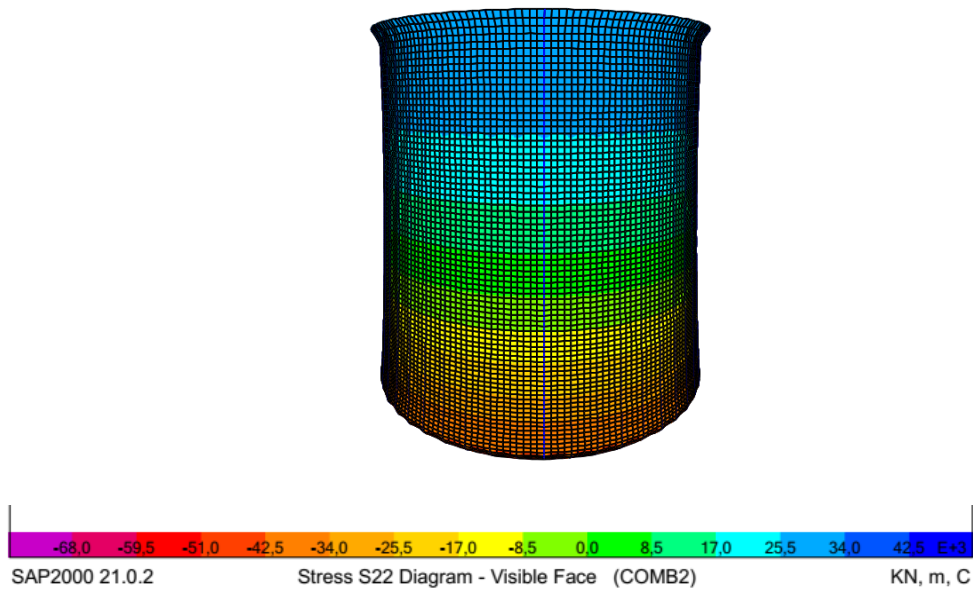
Figura 23 Eixos coordenados do silo e localização das células de pressão



Fonte: Anjos, 2018

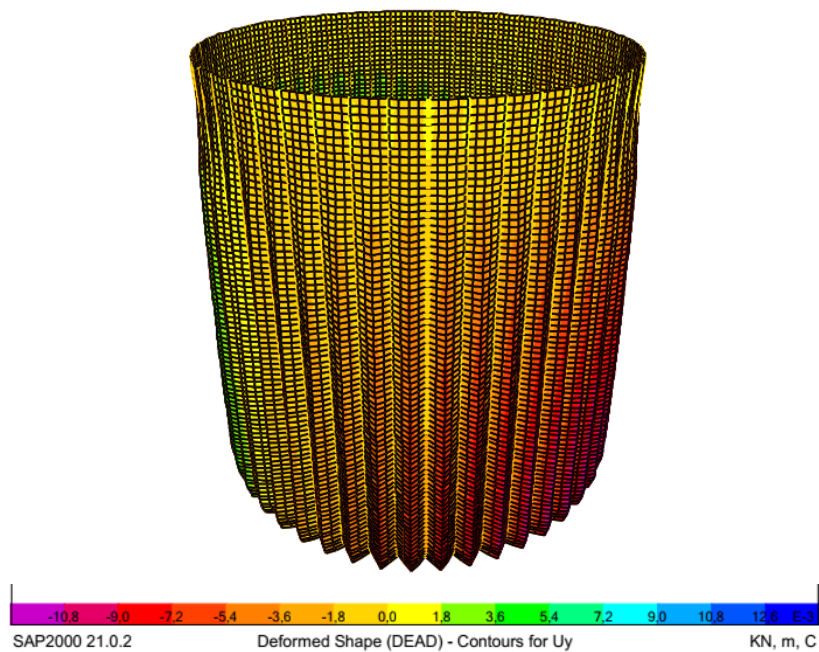
As Figuras 24 e 25 demonstram que houve equilíbrio entre as distribuições das pressões horizontais aplicadas na parede do silo. Assim como em Anjos (2018), a estrutura possui uma descarga concêntrica, isso faz com que exista o equilíbrio no plano horizontal XZ.

Figura 24 Pressões horizontais na validação do silo



Fonte: Dados da pesquisa, 2019

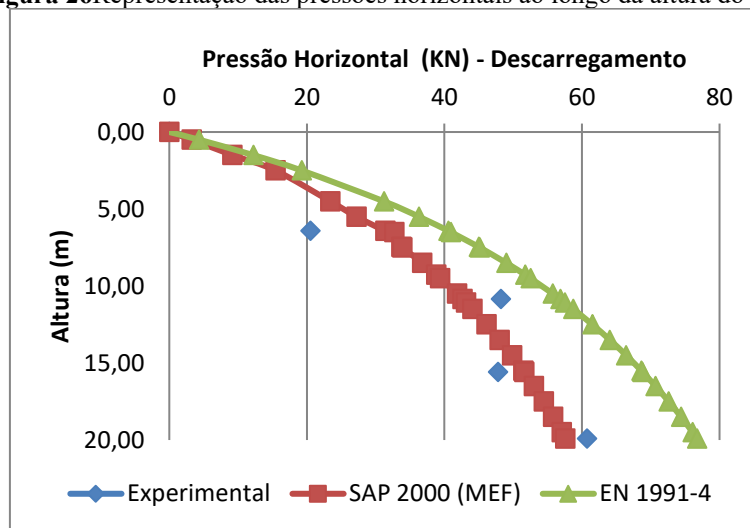
Figura 25 Pressões horizontais nas paredes ao longo da altura do silo



Fonte: Dados da pesquisa, 2019

Logo, foram comparados os resultados obtidos pelo SAP 2000, com os obtidos experimentalmente e as calculadas segundo as diretrizes da EN 1991-4-1 (2002) (Figura 26).

Figura 26 Representação das pressões horizontais ao longo da altura do silo



Legenda: MEF Método dos elementos finitos; EN Eurocode.

Fonte: Dados da pesquisa, 2019

Na Figura 26 observou-se que existe uma aproximação da curva obtida pelos resultados numéricos, SAP 2000, com a curva experimental com pequenas variações nos valores. No entanto, a curva referente aos cálculos da EN-1991-4 (2002) demonstrou total discrepância

da curva experimental que, se deve pelo fato da mesma conter coeficientes de segurança que elevam a carga, tornando-a bastante conservadora. O resultado encontrado concorda com o descrito por Anjos (2018) e Madrona (2008).

Figura 27 Ovalizações do silo

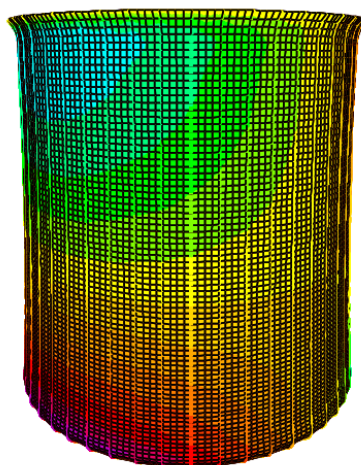
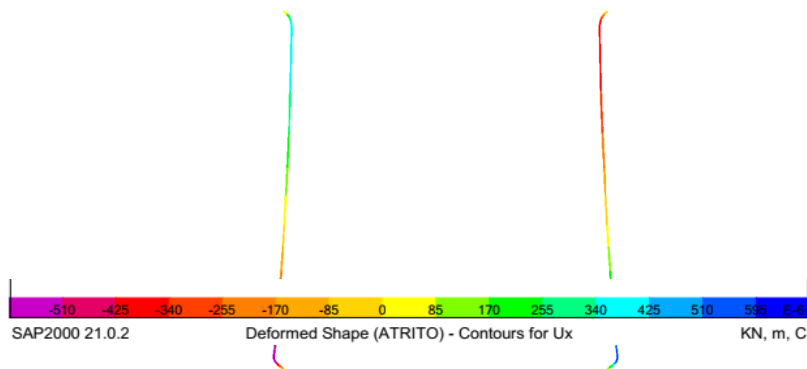


Figura 28 Corte lateral demonstrando a ovalização



Fonte: Dados da pesquisa, 2019

Analisando-se as tensões de atrito sob a parede do silo, notou-se uma compressão axial, conforme demonstrado nas Figuras 27 e 28. Esse comportamento é descrito por Sadowski e Rotter (2011), onde em silos cilíndricos submetidos à descarga concêntrica, uma tensão resultante é observada na membrana axial de maneira acumulativa com a profundidade. Dessa forma, o risco de flambagem é aumentado em direção à base do silo.

Os valores negativos de pressão obtidos em ensaio devem-se às deformações negativas, evidenciando o fenômeno da ovalização na parede do silo, conforme descreve Qing Liu (2019). A ovalização é um fenômeno geometricamente não linear elástico que reduz a resistência à flexão elástica em até metade em tubos longos ou cilindros.

As pressões obtidas pelo MEF na tremonha são inferiores em comparação com as normas analisadas. Isto se deve ao fato de que as pressões adotadas pelas normas não

satisfazem ao equilíbrio com as cargas aplicadas, enquanto o MEF satisfaz, conforme descrito por Madrona; Calil-Junior(2009).

Considerando a diferença entre os dados experimentais e obtidos no SAP 2000, observa-se no ponto A um desvio percentual de 34,59%, no ponto B houve acréscimo de 13,08%, decréscimo de 7,42% no ponto C e outro acréscimo de 5,51% no ponto C. Isso totaliza uma diferença percentual de 5,85% nos valores apresentados nas pressões horizontais, então, bem representativo em relação ao real.

Analisando a diferença entre os dados experimentais e os valores obtidos pelos cálculos da EN 1991-4 (Tabela 4), os pontos A, B, C e D tem um acréscimo de 49,33%, 15,19%, 30,56% e 20,87% respectivamente, totalizando uma diferença total de percentual de 29%.

Tabela 4 Pressões horizontais na parede

Ponto	Zreal [m]	P1	P2	P3	Média Experimental	SAP 2000 (MEF)	EN 1991-4
A	6,42	-	20,56	20,57	20,57	31,44	40,59
B	10,86	45,15	-	51,30	48,23	42,65	56,86
C	15,58	55,99	39,56	-	47,78	51,60	68,81
D	19,90	79,26	45,16	57,81	60,74	57,57	76,76

Legenda: (z = profundidade medida a partir do topo; h = altura em relação à base; Ponto = Nomeação da profundidade; P1, P2, P3 = localização das células de pressão)

Fonte: Dados da pesquisa, 2019

Segundo Anjos (2018), as pressões internas e tensões circunferenciais na membrana tendem a um valor assintótico a uma grande profundidade, logo, o risco de ruptura não aumenta além de certa profundidade. Além disso, o silo em questão conta com 48 montantes, alocados de forma equidistantes e simétricos. Estes elementos conferem rigidez a estrutura, mantendo o índice de deformação abaixo.

Vale salientar que se optou pela utilização de um montante único, sem a mudança característica de espessura e

também fora adotado o mesmo material do aço das paredes. Logo, as simulações aqui descritas têm como função, a determinação das tensões, flambagem e deformações nos montantes, esforços estes que garantem o equilíbrio e a resistência do silo.

Conforme Rodrigues (2019), os métodos que mais se assemelham ao modelo real são os apresentados pelo Eurocode 3, que considera o silo como uma casca ortotrópica ou o montante como uma viga apoiada em uma base elástica.

Baseado na norma europeia e nas equações (11) a (15) obteve-se o ângulo $\Theta = 7,5^\circ$ e a força horizontal $H=0,318N$. Utilizando-se os cálculos previstos na metodologia, tem-se que o valor do coeficiente de rigidez foi de $K= 0,603N/mm^2$.

Na sequenciado valor do coeficiente de rigidez (Equação 13),pode-se calcular a equação 14 que representa a carga de flambagem dos montantes em relação ao eixo de menor momento de inercia, $N_{b,Rd} = 185,23kN$.Para tanto, adotou-se o coeficiente de segurança $\gamma m1 = 1$, e o valor de $I_y = 148000mm^4$, conforme catálogo do perfil utilizado montante.

Logo, como a carga crítica é definida pelo menor valor entre as Equações (14) e (15), analiticamente, o valor encontrado através do modelo de cálculo proposto é $N_{cr}=171,58KN$, resultado da Equação (16).

A carga crítica é muito elevada em função dos valores descritos experimentalmente, e numericamente, provavelmente se deve ao fato do cálculo realizado estar diretamente ligado a norma europeia, dados observados na validação do modelo demonstram que a norma é conservadora, e portanto, não condiz com a realidade. Logo, os valores descritos aqui estão 4 ou 5 vezes maiores que as cargas solicitantes dos montantes.

A análise numérica foi realizada modelando, em elementos finitos, um silo de 18,42m de diâmetro, 48

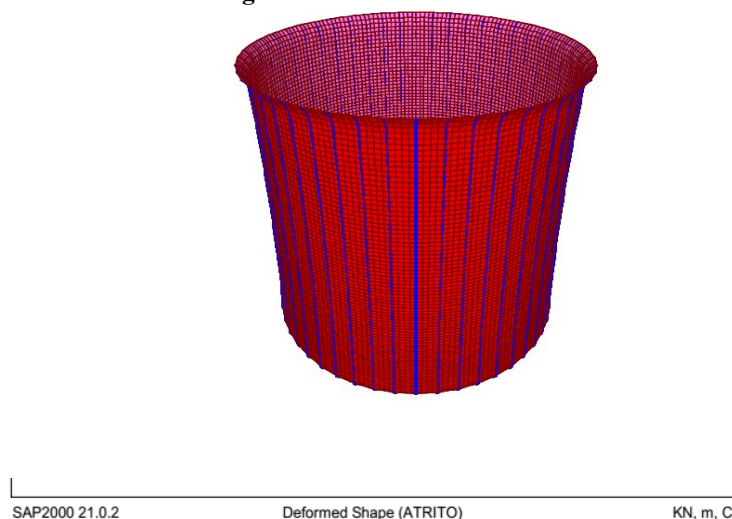
montantes e altura de 20,03m. Foram usados dois tipos de elementos: SHELL para a casca e SOLID para os montantes.

Os materiais utilizados foram baseados na pesquisa de Anjos (2018) e Fank (2017), já citados na metodologia. Quanto ao grau de refinamento necessário para a malha, foram utilizadas malhas espaçadas a cada 25 cm para as paredes laterais e fundo conforme Figura 29.

Portanto, para o estudo deste trabalho, a casca foi refinada em 16368 elementos SHELL e os montantes em 98 elementos SOLID, Figura 29. Optou-se por utilizar paredes planas pela facilidade de manuseio, e também por questões técnicas, mais precisamente quanto ao hardware que não suportou algo maior.

O silo foi vinculado de um dos lados impedindo deslocamentos em x, y e z (engastado), a fim de simular o lado da base do silo. Do outro lado, impediu-se os deslocamentos somente em x e y, simulando o lado do topo do silo, as cargas devido ao atrito foram calculadas conforme Figura 30 e depositadas em toda a superfície das paredes, por estar fixado na laje, através do pórtico de reação, impedindo o deslocamento do topo do montante.

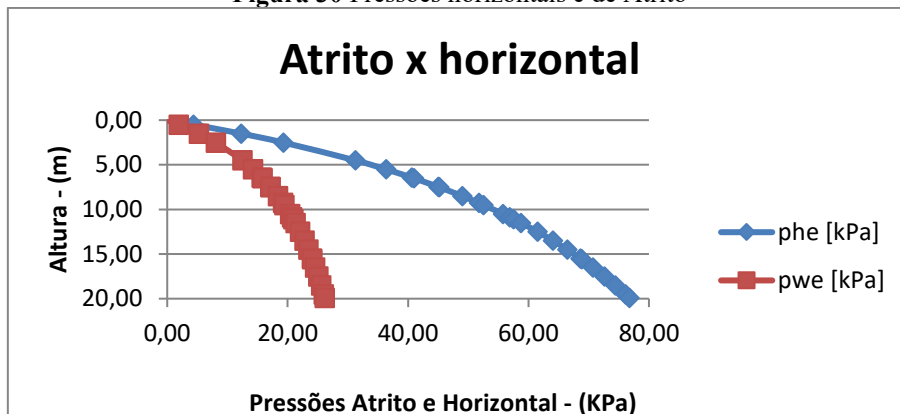
Figura 29 Malha refinada do silo



Fonte: Dados da pesquisa, 2019

Segundo Lopes Neto (2014) as cargas horizontais devem ser aplicadas nas paredes do silo,o atrito se deve ao contato do grão com a parede e funciona como uma força vertical (Figuras30 e 31), no sentido de repassar ao montante um efeito real ambas as cargas foram despejadas nas paredes, de maneira a simular o silo completamente cheio, conforme validado na metodologia.

Figura 30 Pressões horizontais e de Atrito

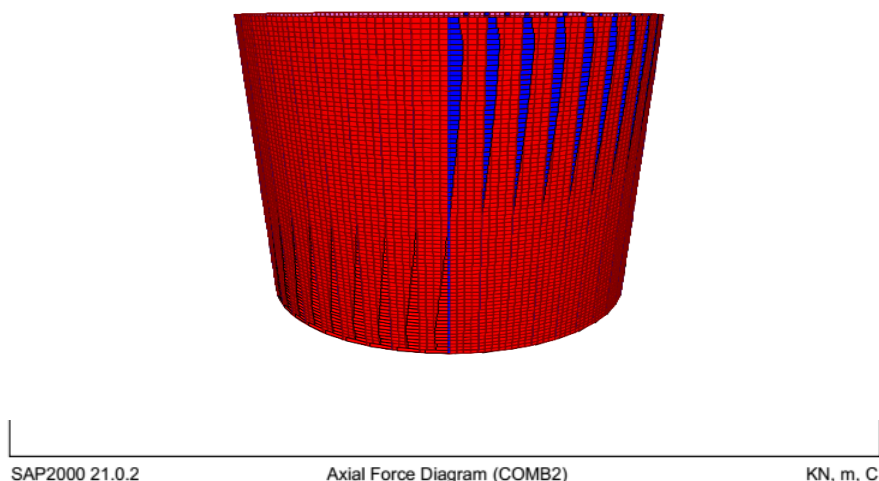


Fonte: Dados da pesquisa, 2019

Conforme Neto et al. (2013) explica, as ações em silos verticais se dividem em forças verticais em virtude da ação gravitacional sobre o produto armazenado as quais são direcionadas para o fundo da estrutura, forças horizontais suportadas pelas paredes laterais e forças verticais de atrito que são absorvidas pelas montantes laterais em razão do atrito grão-parede.

A Figura 31 demonstra o diagrama de força axial, ou seja o atrito, comportamento das tensões de atrito diretamente nos montantes gerado pelo SAP 2000. Como não houve nenhuma alteração de espessura, tanto da parede quanto dos montantes, a carga trabalhou regularmente e simetricamente. Dessa forma, dentro da representação de flambagem, o silo deformou por igual, em todos os 48 montantes.

Figura 31 Pressões verticais devido ao atrito.



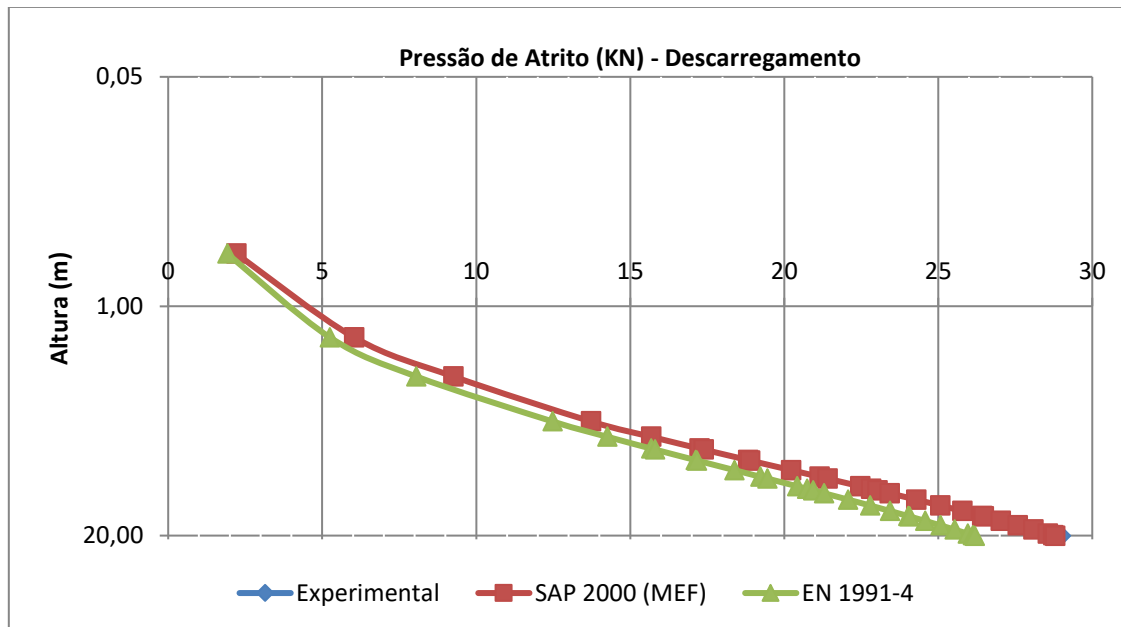
Fonte: Dados da pesquisa, 2019

A Figura 32 descreve o gráfico da pressão de atrito distribuída pela a altura do silo, pode-se observar que existe

uma discrepância entre os valores obtidos pela norma EN 1991-4 e os valores obtidos experimentalmente. Não existe curva do valor experimental realizado por Fank (2017), uma vez que as células de carga foram aplicadas apenas na base do mesmo, porém, tem-se os dados referente as maiores

cargas, e conforme a Figura 32 assemelha-se com os dados ofertados pela simulação em MEF.

Figura 32 Pressões devido ao Atrito

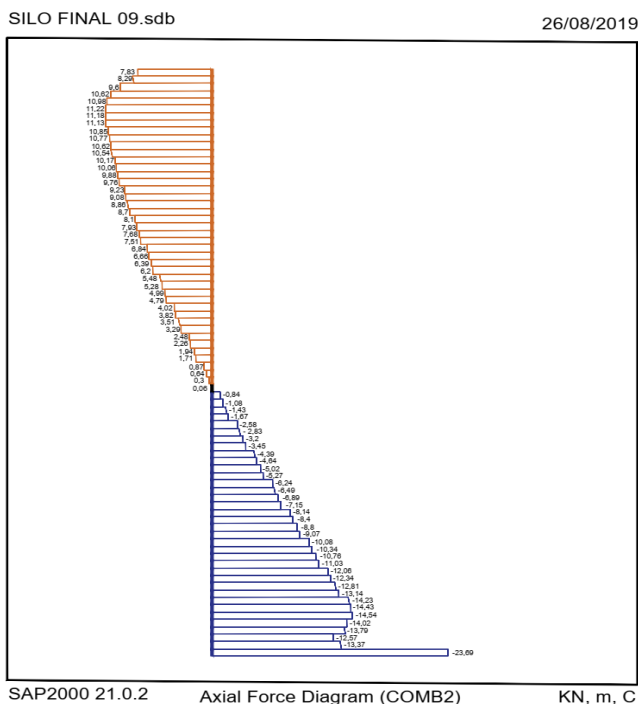


Fonte: Dados da pesquisa, 2019

Corroborando com Rodrigues (2019) os montantes apresentaram um comportamento de instabilidade. Pode-se notar a partir do gráfico dos deslocamentos na Figura 33 que todos os montantes, formam diagramas de duas meia ondas. Tal fenômeno indica que existe instabilidade, porém, ao analisar que o deslocamento real a grande quantidade de montantes limita essa

instabilidade percebe-se que para suporte dos esforços os valores foram super dimensionados, talvez um excesso de segurança foi adotado.

Figura 33 Diagrama de força axial

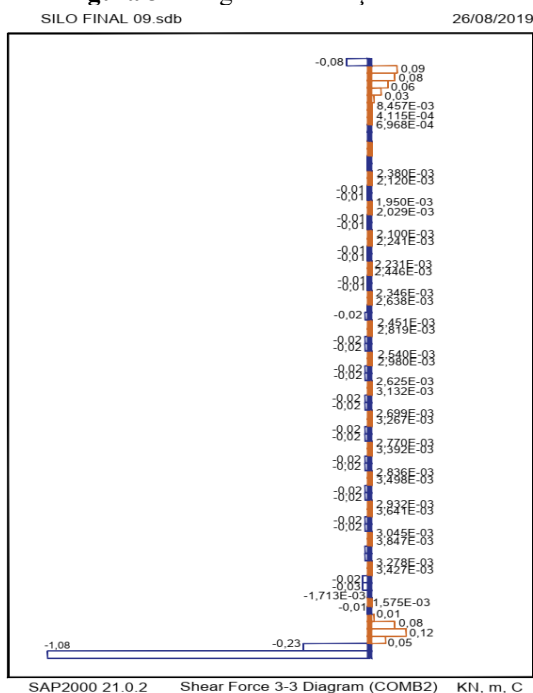


Fonte: Dados da pesquisa, 2019

Sadowski e Rotter (2011) afirmam que em silos cilíndricos com descarga concêntrica a compressão axial na parede do silo é originada pela fricção entre a parede e o produto armazenado cuja tensão de compressão axial resultante é acumulativa com a profundidade, de modo que,

o risco de deformação é substancialmente aumentado na direção da base do silo. Concordando com a afirmação, as Figuras 34 e 35 demonstram diagramas axiais e cisalhantes, onde, pode-se notar que a parte mais profunda sofre um maior esforço em ambos os casos.

Figura 34 Diagrama de força de atrito



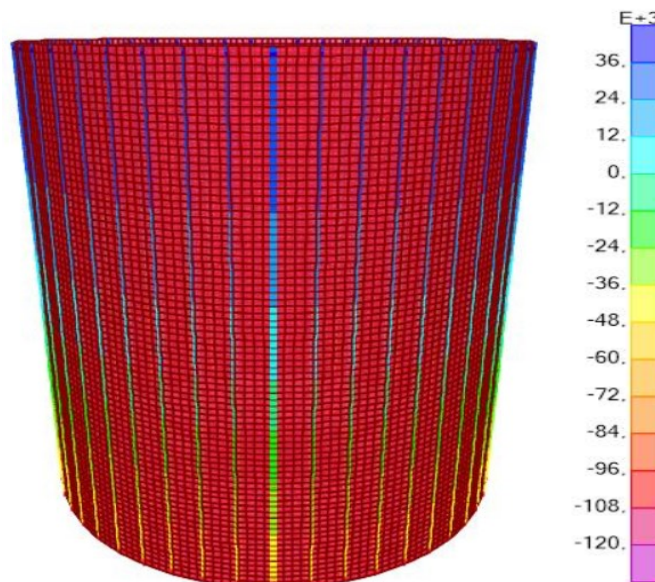
Fonte: Dados da pesquisa, 2019

A Figura 35 demonstra ainda, que todos os montantes simulam o mesmo comportamento, o que indica que não houve a correta transmissão de momento da parede para o montante, e a carga aplicada na parede foi transmitida

quase que nãointegra para o montante. Esse fenômeno observado ocorre devido ao número par dos montantes, em que o mesmo alinhamento anula o momento do lado contrário, tal fato é citado por Palma (2005), porém, o mesmo ainda afirma que mesmo com tal comportamento, os

montantes precisam ser calculados para carregamento assimétrico.

Figura 35 Diagrama de deslocamentos



Fonte: Dados da pesquisa, 2019

CONCLUSÃO

A partir da análise dos resultados obtidos nessa pesquisa pode-se concluir os seguintes aspectos:

- O modelo se apresentou satisfatório ao representar um silo de parede lisa com descarregamento concêntrico. Foi verificado que as pressões se assemelham aos dados experimentais, e que as curvas seguem as mesmas tendências das calculadas pela EN 1991-4 (2002), logo, o modelo foi validado;
- Os montantes apresentaram instabilidades quando analisados individualmente, porém, quando estão no conjunto de 48 montantes, os mesmos conseguem suportar a instabilidade;
- Como o esforço é cumulativo aumentando de acordo com a profundidade do silo, foi observado que na sua base o índice de deformação é maior, também devido ao apoio engastado que não permite a rotação;
- Como se trata de um silo simétrico e com número par de montantes, o mesmo demonstrou um comportamento de transmissão de carga direta sem esforço de momento pontual;
- Em comparação com estudos de outros autores, foi observado que as presenças dos montantes diminuíram o índice de ovalização do silo devido aos esforços horizontais;
- Esta pesquisa demonstrou o conservadorismo da norma em relação aos dados obtidos via análise por MEF.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, R. D., DANTA, J. S., MARACAJA, P. B., DE MEDEIROS, A. C., & DA SILVA, R. A. (2024). A apicultura no semiárido: Santa Luzia–PB–Brasil. *Revista Científica Integr@ção*, 5(1), 148-195.2024
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. **NBR 14762**, Rio de Janeiro, 2010.
- ANJOS C. M. dos. **Simulação numérica das pressões exercidas pelos grãos nas paredes dos silos verticais pelo método dos elementos Finitos**. Tese de Doutorado em Engenharia Agrícola (Construções rurais e ambiência)- Universidade Federal de Campina Grande, 2018.
- ARGENTA, A. L., D. P. **Análise do comportamento estático e dinâmico de silos**. Monografia Engenharia Civil – Universidade Federal de Goiás, 2010.
- CARVALHO, Antônio Alfredo Teles; SILVA, Clevisson José; MEDEIROS, Dhiego Antônio. O processo de industrialização brasileiro: Apontamentos sobre a produção

- científica na geografia (2000-2020). **GOT: Revista de Geografia e Ordenamento do Território**, n. 27, 2024.
- CALIL JUNIOR, C., CHEUNG, A. B. Silos: pressões, fluxo, recomendações para o projeto e exemplos de cálculo. **Escola de Engenharia de São Carlos**, São Carlos, 2007.
- CALIL JUNIOR, C.; PALMA, G. Pressões e fluxo em silos esbeltos ($h/d > 1,5$). **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 10, n. 42, p. 129-150, 2008.
- CALIL JUNIOR, C. **Sobrepresiones en las paredes de los silos para almacenamiento de productos pulverulentos cohesivos**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica de Barcelona, Espanha. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1984.
- CALIL JR., C. (1990). **Recomendações de Fluxo e de Cargas para o Projeto de Silos Verticais**. Tese (Livro Docência) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.
- CHEUNG, A. B. **Modelo estocástico de pressões de produtos armazenados para a estimativa da confiabilidade estrutural de silos esbeltos**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2007.
- CHERRI, A.; VIANNA, A.; BALBO, A.; BAPTISTA, E. **Métodos numéricos computacionais**. Bauru: Faculdade de Ciências, apostila, 2012.
- COELHO, L. C. **Software para cálculo de fluxo e pressões em silos cilíndricos metálicos para armazenamento de produtos agrícolas e industriais**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2016.
- COUTO, A.; RUIZ, A.; AGUADO, P.J. Design and instrumentation of a mid-size test station for measuring static and dynamic pressures in silos under different conditions – Part I: Description. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, v.85, p. 164-173, 2012.
- DA COSTA, C. A., et al. Propriedades mecânicas e de fluxo de produtos agroindustriais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n.7, p. 774-780, 2014.
- DECKERS, H. P. F. **Avaliação da aplicação da norma ACI-313:1997 no dimensionamento de silos multicelulares elevados de concreto armado para café**. Dissertação de Mestrado. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2010.
- DECKERS, H. P. F. Estudo teórico de pressões em silos esbeltos prismáticos com descarga excêntrica. Tese de Doutorado. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2014.
- DORNELAS, Karoline Carvalho et al. Análises numérica e experimental das pressões em silos verticais de fundo plano com diferentes relações altura/diâmetro (H/D). Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pósgraduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, 2022.
- ERDEMIR, A.; GESS, T. M.; HALLORAN, J.; TADEPALLI, S. C.; MORRISON, T. M. Considerations for Reporting Finite Element Analysis Studies in Biomechanics. **Journal of Biomechanical**, v. 45, n. 4, p. 625-33, 2012.
- EUROPEAN COMMITTEE OF STANDARDIZATION. **EN 1991-4**. Action on silos and tanks. European Standard: 2002.
- EUROPEAN COMMITTEE OF STANDARDIZATION. **EN 1991-1-4**. Actions on structures – part 1-4, wind actions. European Standard: 2005.
- EUROPEAN COMMITTEE OF STANDARDIZATION. **EN 1993-4-1**. Design of steel structures – Part 1-6: strength and stability of shell structures. European Standard: 2007.
- EUROPEAN COMMITTEE OF STANDARDIZATION. **EN 1993-1-6**. Design of steel structures – Part 1-6: strength and stability of shell structures. European Standard: 2007.
- FANK, M. Z. **Pressões em silos verticais: instrumentação de um protótipo e análise numérica pelo método dos elementos finitos**. Tese de doutorado. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2017.
- FREITAS, E. G. A. **Estudo teórico e experimental das pressões em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro de fundo plano**. Tese de doutorado. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2001.
- IWICKI, P.; SONDEJ, M.; TEJCHMAN, J. Application of linear buckling sensitivity analysis to economic design of cylindrical steel silos composed of corrugated sheets and columns. **Engineering failure Analysis**, v. 70, p.105-121, 2016.
- JANSSEN, H. A. Versuche Uber Getreidedruck in Silozellen. Zeitschrift, **Verein Deutscher Ingenieure**, v. 39, p.1045-1049, 1895.
- JENIKE, A. W. **Storage and flow of solids**. Salt Lake City: University of Utah, Bolletín 123, 1964.
- KOCK, M. A. **Dimensionamento de um silo metálico com fundo plano para armazenamento de soja**. Trabalho de Conclusão. Pato Branco: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.
- KUCZYNSKA, N.; WÓJCKI, M.; TEJCHMAN, J. Effect of bulk solid on strength of cylindrical corrugated silos during

- filling. **Journal of constructional steel research**, v. 115, p.1-17,2015.
- MA, R.; MENG, Y. Theoretical analysis and research of large diameter silos. **AppliedMechanicsandMaterials**, Switzerland, v.99-100, p.1203-1208, 2011.
- MADRONA, F. S. **Pressões em silos esbeltos com descarga excêntrica**. Tese de doutorado em Engenharia de Estruturas. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2008.
- MADRONA, F. S.; CALIL JUNIOR. Análise das pressões em silo esbeltos com descarga excêntrica. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, v. 11, n. 49, p. 37-56, 2009.
- MEDEIROS, I. F.de. **Características de fluxos e vazão de descarga em silos verticais**. 2012. 98f. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Agrícola), Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Centro de Tecnologias e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande – Paraíba – Brasil, 2012.
- MOAVENI, S. Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS. Pearson:4 ed., 2015.
- NASCIMENTO, F. C. A relação entre as pressões horizontais e verticais em silos elevados: o parâmetro K. 2008. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
- NASCIMENTO, F. C; Calil Júnior, C. A relação entre as pressões horizontais e verticais em silos elevados: o parâmetro k. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, v.11, p.17-37, 2009.
- NETO, J. P. L., et al. Forças verticais e de atrito em silos cilíndricos com fundo plano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 6, p. 652-657, 2014.
- PALMA, G. Pressões e fluxo em silos esbeltos ($h/d > 1,5$). Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 2005.
- QING LIU, et al. Ovalization restraint in four-point bending tests of tubes, **Journal of Engineering Mechanics**, v. 145, n. 3, 2019.
- REIS, M. A. S. **Dimensionamento de silos em concreto armado para armazenagem de grãos**. Trabalho de Conclusão. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2016.
- RODRIGUES, A. C. A. **Estudo da instabilidade das colunas (montantes) de silos metálicos cilíndricos de chapas onduladas**. Dissertação de Mestrado. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2019.
- ROTTER, J. M. Buckling of cylindrical shells under axial compression. **Buckling of Thin Metal Shells**. London, p.42-87, 2004.
- ROTTER, J. M. Properties of the stored granular material. In: Brown, C. J. e Nelsen, J. **Silos – Fundamentals of Theory, Behaviour and Design**, p. 650-664, 1998.
- RUIZ, A.; COUTO, A.; AGUADO, P.J. Design and instrumentation of a mid-size test station for measuring static and dynamic pressures in silos under different conditions – Part II: Construction and validation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.85, p.174-187, 2012.
- SADOWSKI, A. J.; ROTTER, J. M. Steel silos with different aspect ratios: I – Behavior under concentric discharge, **Journal of Constructional Steel Research**, v. 67, n. 10, p. 1537-1544, 2011.
- SAP 2000, Computers & Structures, INC. Structural and Earthquake Engineering Software, **CSI Analysis Reference Manual**. United States of America, 2017.
- SCALABRIN, L. A. **Dimensionamento de silos metálicos para armazenamento de grãos**. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.
- WENDLAND, F. R. **Riscos do trabalho em espaço confinado na operação de silos armazenadores de cereais**. Trabalho de Conclusão. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2018.
- TORIONE, Vinicius Oliveira; NETO, Joaquim MF Antunes; GERMEK, Hermas Amaral. Logística e Transportes no Brasil: Uma Discussão Sobre os Modais de Transporte e o Panorama na Região Nordeste. **Prospectus (ISSN: 2674-8576)**, v. 6, n. 1, p. 22-67, 2024.
- WEN, Y.K. Method for Random Vibration of Hysteretic Systems. **Journal of the Engineering Mechanics Division**, ASCE, Vol. 28, Nº. 4, pp 133-188.
- WÓJCIK, M; IWICKI, P; TEJCHMAN, J. 3D buckling analysis of a cylindrical metal bin composed of corrugated sheets strengthened by vertical stiffeners. **Thin-Walled Structures**, v. 49, n. 8, p.947-963, 2011.