



BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FRANCO WILLIAN DA COSTA SOARES

ANÁLISE DE RESISTÊNCIA MECÂNICA PARA UM SILO DE ARROZ

Estudo de caso em fabricante de Palmares do Sul – RS

Canoas – RS

2022

FRANCO WILLIAN DA COSTA SOARES

ANÁLISE DE RESISTÊNCIA MECÂNICA PARA UM SILO DE ARROZ

Estudo de caso em fabricante de Palmares do Sul – RS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Universitário Ritter dos Reis, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel

Orientador: Me. Manoel Henrique Alves

Canoas – RS

2022

RESUMO

Análise em objeto não linear em uma estrutura metálica, silo de arroz. Foi realizada para avaliar o comportamento relacionado a ação do vento, tensão e deformação na estrutura com presença de cargas dinâmicas, relacionando ao peso de alguns objetos do silo. Foram analisados os materiais empregados e aplicado simulação computacional em toda estrutura. Primeiro avaliando o modelo antigo sem reforço estrutural para chegar a conclusão se há necessidade de melhoria. Assim debatido a necessidade de implementação de um novo modelo, melhorando o produto anterior. Seguindo as normas nacionais utilizadas para dimensionamento de estruturas expostas ao vento, (NBR6123) chegou-se ao resultado da pressão aplicada ao objeto. Para o desenvolvimento das simulações utilizou-se o Solidworks ferramenta utilizada com o objetivo de testar as melhorias aplicadas. O silo foi submetido a esforços considerando totalmente vazio, pelo método de elementos, levando em consideração a ondulação da chapa e rigidez conforme material utilizado.

Palavras-chave: Silo; Dimensionamento; Solidworks; Vento

ABSTRACT

It is an analysis on a non-linear object in a metallic structure, a rice silo. It was carried out to evaluate the related behaviour of the wind's action, tension and deformation in the structure with the presence of dynamic loads, relating weight of some objects in the silo. The materials used were analysed and computer simulation was applied to the entire structure. Firstly, the old model was evaluating without structural reinforcement to reach the conclusion if there was a need for improvement. Then became clear the need of implementing a new model and improving the previous product. The result of the pressure applied to the object was reached following the national standards used for dimensioning structures exposed to the wind, NBR6123. The Solidworks software was used for the simulations with the objective to test the improvements applied. The silo was subjected to efforts considering it completely empty and by the method of elements, taking the undulation and stiffness of the plate according to the material used.

Keywords: Silo; Sizing; Solidworks; Wind

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Chapas finas de aço especificadas por Normas Brasileiras para aço estrutural	17
Tabela 2 - Distribuição das pressões externas em edificações cilíndricas de seção circular	24
Tabela 3 - Distribuição de pressão no silo	30

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - As fases de projeto, identificando as diversas realimentações e repetições.	18
Figura 2 - Rotação relativa por flexão de um elemento infinitesimal de barra	19
Figura 3 - Deslocamento transversal relativo de um elemento infinitesimal de barra provocado por esforço cortante.....	21
Figura 4 - Isopletas da velocidade básica V (m/s).....	22
Figura 5 - Comportamento estrutural e ações em silos.....	25
Figura 6 - Vista frontal do modelo a ser simulado	29
Figura 7 - Distribuição de pressão em objetos cilíndricos	31
Figura 8 - Telhado em tamanho real	31
Figura 9 - Demonstração ação vento em objeto cilíndrico	32
Figura 10 - Demonstração ação vento em vista lateral	33
Figura 11 - Cantoneira	35
Figura 12 - Tubo.....	35
Figura 13 - Abraçadeira.....	36
Figura 14 - Modelo de reforço aplicado na estrutura.....	36
Figura 15 - Modelo de reforço aplicado na estrutura.....	37
Figura 16 - Modelo de reforço aplicado na estrutura.....	38
Figura 17 - Silo sem reforço estrutural resultado da tensão exercida	40
Figura 18 - Silo sem reforço estrutural resultado do deslocamento em mm	41
Figura 19 - Silo com reforço estrutural resultado da tensão exercida	42
Figura 20 - Silo com reforço estrutural resultado do deslocamento em mm.	43
Figura 21 - Silo com anéis adicional, tensão.	44
Figura 22 - Silo com anéis adicional, deslocamento.	45

LISTA DE IMAGENS

Imagem 1 - Acidentes ocasionados pela ação do vento	23
Imagem 2 - Pressão exercida por rajadas do vento em silo.....	27
Imagem 3 - Silos localizados na região de Capivari do Sul/RS.....	33

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. PROBLEMA DE PESQUISA	14
1.2. DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	14
1.3. OBJETIVOS DA PESQUISA	14
1.3.1. Objetivo geral.....	14
1.3.2. Objetivos específicos.....	15
1.4. JUSTIFICATIVA	15
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1. SILO DE GRÃOS.....	16
2.2. AÇOS GALVANIZADOS PARA MONTAGEM.....	16
2.3. PROJETO MECÂNICO	17
2.4. PROJETO CONCEITUAL	17
2.5. COMPRESSÃO EM PEÇAS DA ESTRUTURA	18
2.6. FLEXÃO EM PEÇAS DA ESTRUTURA.....	18
2.7. POSICIONAMENTO E MONTAGEM DE ELEMENTOS MECÂNICOS.....	19
2.8. FIXAÇÃO NÃO PERMANENTE DE PEÇAS NA ESTRUTURA.....	19
2.9. ELEMENTOS FINITOS	20
2.10. TORÇÃO EM PEÇAS DA ESTRUTURA.....	20
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	26
3.1. CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA.....	26
3.2. CONCEITO DO REFORÇO	26
3.3. MÉTODO DE FIXAÇÃO	27
3.4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA ESTRUTURA.....	27
3.4.1. Definição operacional das variáveis	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
4.1. CARACTERÍSTICAS DO SILO.....	29
4.2. PRESSÃO DO VENTO NA ESTRUTURA.....	30
4.3. PESO DO TELHADO DA ESTRUTURA.....	31
4.4. FLUXO DE VENTO NA ESTRUTURA	32
4.5. MODELO DE REFORÇO ESTRUTURAL	34
4.6. COMPOSIÇÃO DO REFORÇO ESTRUTURAL.....	34

4.7.	RESISTÊNCIA DO REFORÇO ESTRUTURAL.....	37
4.8.	COMPARATIVO ENTRE SIMULAÇÕES	38
5.	CONCLUSÃO.....	46
5.1.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	46

1. INTRODUÇÃO

Os dados atuais não deixam dúvidas quanto à crise econômica vivida na indústria brasileira. Segundo especialistas e economistas (ÉPOCA, 2019), os países continuam avançando sua indústria, e o Brasil no ano de 2018, a indústria respondeu por apenas 11,3% do Produto Interno Bruto (PIB), o patamar mais baixo em mais de 70 anos. Dentro deste contexto, novas tecnologias e estratégias podem ser implementadas para que o Brasil possa retomar um espaço dentro do mercado de venda de máquinas com a indústria desempenhando um forte papel de protagonista.

Para o Instituto de Estudos para o Desenvolvimento Industrial (PORTAL INDÚSTRIA, 2018), existem alguns entraves dentro do sistema, como a falta de mecanismos para aquisição de bens, como financiamentos, o sistema tributário e um apoio ineficiente à ciência e tecnologia têm comprometido a produtividade industrial. Diante deste cenário, a engenharia deve desempenhar um papel de implementação de novas estratégias, tecnologias com base na melhoria dos produtos, redução de tempos de produção, preço do produto final e design.

Com seus estudos, a engenharia pode focar em desempenhar um papel onde o projeto tenha um custo reduzido atendendo as mais complexas necessidades que envolvem um projeto, essa ideia para Budynas e Nisbett (2011, p.30) “[...] é formular um plano para atender a uma necessidade específica ou resolver um problema.”.

Com a valorização das commodities, conseqüentemente intensifica-se a capitalização do produtor rural efetivando o crescimento da produção de grãos no Brasil de forma que diversas áreas conduzem o seu crescimento, porém, com a produção crescente necessita-se de armazenamento para os produtos, fazendo com que fabricantes de silos avoluma o tamanho de suas estruturas, necessitando de melhorias em sua forma estrutural.

Com base nisto, o capítulo um vai abordar o problema de pesquisa os objetivos e justificativa, logo após o capítulo dois será feito um levantamento sobre as principais obras deste assunto, já o capítulo três será contextualizado o tipo de pesquisa que será apresentado, no quatro será apresentado o resultados da pesquisa e portando o capítulo cinco vai abordar as conclusões da pesquisa realizada.

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

Com a ação do vento cada vez maior, certas estruturas metálicas são mais atingidas do que outras, por este motivo, é preciso implementar melhorias para que estes certos desastres não aconteçam facilmente.

Como projetar e implementar um reforço estrutural para um silo de arroz de base metálica, onde a variação da velocidade do vento causa estragos em sua integridade, gerando prejuízo tanto para o fabricante quanto para o cliente.

Em vista do acima exposto, este Trabalho se propõe a buscar por respostas para a seguinte questão de pesquisa: Como otimizar essa estrutura metálica.

1.2. DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

O estudo será limitado à empresa “A”, no período anual de 2022, situada em Palmares do Sul/RS, a empresa é líder e referência regional no mercado de fabricação de silos, onde este trabalho irá visar a modelagem da estrutural, análise de dados e dimensionamento das estruturas metálicas, sendo elas, responsáveis por suportar os esforços mecânicos causados pela ação do vento.

1.3. OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos do presente trabalho foram divididos em objetivo geral e objetivos específicos, os quais são apresentados a seguir.

1.3.1. Objetivo geral

Elaborar uma otimização para os silos de arroz de bases metálicas para fim de reduzir os prejuízos causados pela ação do vento.

1.3.2. Objetivos específicos

- Analisar os materiais empregados;
- Analisar os anéis de reforço estrutural;
- Apresentar uma otimização para a estrutura;
- Simular a estrutura com e sem reforço;

1.4. JUSTIFICATIVA

A importância da resistência mecânica se torna fundamental para a engenharia, uma vez que para que algumas empresas continuem sendo referências nos seus respectivos segmentos, elas precisam estar em constante evolução ou inovando os seus produtos, mantendo-se assim seu foco na liderança do segmento em que atuam.

Usando um fenômeno, temos as empresas do ramo de telefones móveis, no qual em um período de tempo curto, lançam atualizações, contando com uma tecnologia melhor um produto mais barato e a renovação de sua linha (EXAME 2022), assim descontinuando os modelos anteriores e lançando novos para a substituição. Este tipo de posicionamento fazem as empresas permanecer no topo do mercado de seu segmento.

Por outro lado, temos empresas que possuem produtos mecânicos, com pouca tecnologia envolvida, sendo um produto único comercializado por um grande período de tempo, a diferença é, este mesmo produto vem sofrendo atualizações de acordo com a necessidade, com a única finalidade de ir resolvendo os problemas que vem surgindo, com as atualizações de software de simulação é possível resolver os problemas causados pela ação do vento, levando em consideração o aquecimento global que vem trazendo tempestades com rajadas de ventos mais fortes.

A necessidade de evolução e implementação de uma solução também se aplicam as empresas que projetam e fabricam silos de arroz, como a empresa deste estudo, que é líder regional em seu segmento de mercado, e o que diferencia essas empresas de seus concorrentes é a atenção a necessidade de seus clientes.

Com base nesta necessidade, a implementação de um reforço estrutural, passa a ser uma necessidade. Para que este estudo seja concebido, deve ser realizado um estudo mecânico do modelo por completo, tal como uma ferramenta de

simulação computacional, que será analisado o eixo x, localizando seus pontos frágeis. As alterações no projeto devem ser adequadamente coordenadas por todos os setores que interagem diretamente com a mudança. Passando a ser compreendida a necessidade, podemos apresentar soluções para solucionar o problema a ação do vento em bases de silo metálicas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo serão abordados os temas do projeto de reforço de um silo de arroz de estrutura metálica, processo de fixação dos elementos da estrutura, assim como os materiais utilizados para a fabricação e montagem do mesmo.

2.1. SILO DE GRÃOS

O silo de grãos é um objeto cilindro construído especificamente para armazenamento, estes objetos precisam estar devidamente assentados e alinhados para que não haja deformações, caso contrário podem ocasionar em grandes prejuízos, e também a perda parcial ou total do silo.

2.2. AÇOS GALVANIZADOS PARA MONTAGEM

O aço que envolve praticamente todo o silo é aço galvanizado, a sua resistência a corrosão e oxidação é maior que um aço carbono, como o material fica exposto com os grãos, necessita de um material resistente, então as chapas utilizadas são do modelo ZAR 345 (NBR 14762 2010), onde sua resistência de escoamento é de 345Mpa, conforme mostra a tabela 1.

Tabela 1 - Chapas finas de aço especificadas por Normas Brasileiras para aço estrutural

Chapas finas e bobinas finas com revestimento metálico	Grau	Resistência escoamento Fy (Mpa)	Resistência ruptura Fu (Mpa)
	ZAR 340	320	390
	ZAR 345	345	430

Fonte: Adaptado pelo autor (NBR 14762, 2010).

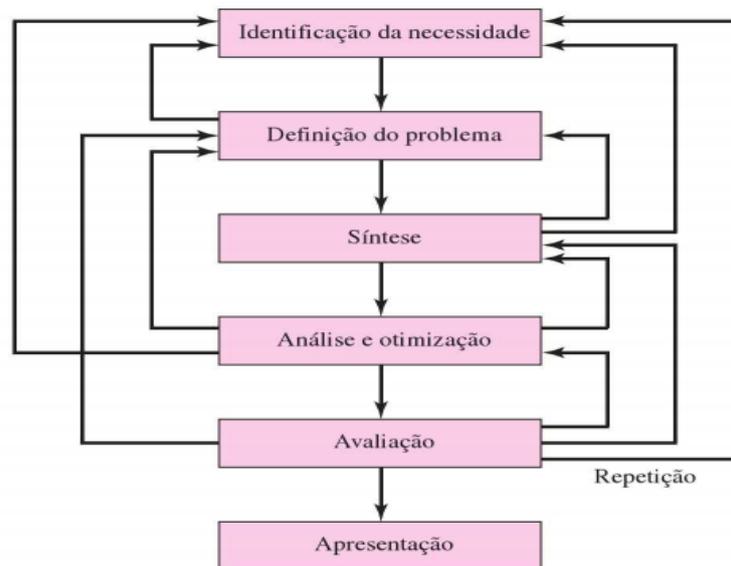
2.3. PROJETO MECÂNICO

O ato de projetar, para o projeto mecânico, é uma tarefa que exige diversas habilidades, técnicas e conhecimento interdisciplinares - além da criatividade, sendo esta última, essencial para o projeto Budynas e Nisbett, (2011, p.30) corroboram com tal opinião, complementando que o projeto mecânico “[...] é um empreendimento complexo que exige várias habilidades.”. Ashby, (2011, p.10) complementa citando “Todo objeto fabricado, desde o mais lírico chapéu feminino até a mais engraxada das caixas de câmbio, se qualifica, em um sentido ou outro, como um projeto.”.

2.4. PROJETO CONCEITUAL

Para que as melhorias fossem implementadas, foi adotada uma metodologia baseada na ideia de Budynas e Nisbett (2011, p.33), onde dizem que à “[...] medida que o esquema vai ganhando corpo, devem ser realizadas análises para avaliar se o desempenho do sistema é satisfatório ou melhor que o obtido anteriormente [...]”, assim exemplificado na figura 1.

Figura 1 - As fases de projeto, identificando as diversas realimentações e repetições.



Fonte: Budynas e Nisbett, 2011, p.32.

2.5. COMPRESSÃO EM PEÇAS DA ESTRUTURA

A compressão é a força aplicada sobre uma peça ou corpo na direção contrária a face da superfície, ou seja, uma força que empurra um objeto para uma determinada direção. Basicamente, definida como o movimento antagonista ao de tração.

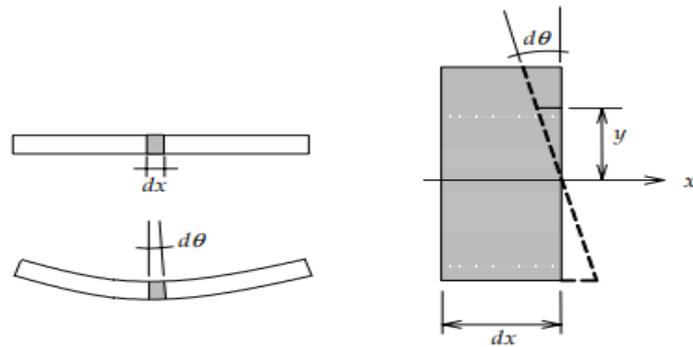
O corpo de prova dúctil podendo definir o corpo de prova como também uma peça da estrutura desta pesquisa] não quebra na compressão. Se houver força suficiente na máquina, ele será esmagado no formato de uma panqueca. A maior parte dos materiais dúcteis tem resistência à compressão semelhante à resistência à tração, e o diagrama tensão-deformação na tração é utilizado para representar também seu comportamento sob compressão. Um material que tenha resistências essencialmente iguais à tração e à compressão é chamado de **material uniforme**. (NORTON, 2013, p.34).

2.6. FLEXÃO EM PEÇAS DA ESTRUTURA

A flexão é um esforço ou solicitação em uma peça que ocorre uma deformação perpendicular ao eixo do corpo e paralelo a solicitação atuante. Em outras palavras, as cargas aplicadas tendem a curvar o corpo ao longo de um eixo longitudinal, produzindo o que chamamos de momento fletor como mostra a figura 2. Martha (2017,

p.52) ainda comenta que “[...] as seções transversais de uma viga que se deforma à flexão permanecem planas e normais ao eixo deformado da viga.”.

Figura 2 - Rotação relativa por flexão de um elemento infinitesimal de barra



Fonte: Martha, 2017, p.52.

2.7. POSICIONAMENTO E MONTAGEM DE ELEMENTOS MECÂNICOS

A montagem dos elementos de uma estrutura é uma das partes mais importantes dentro de um projeto. A montagem deve atender: as necessidades essenciais de operação, montagem e manutenção.

Para a montagem, existem dois grandes grupos relacionados à junção dos elementos: as junções permanentes e não permanentes, caracterizadas neste trabalho como a parte parafusada da base metálica. Budynas e Nisbett (2011, p.422,) citam que “Um dos objetivos-chave do desenho para manufatura é reduzir o número de fixadores. Contudo, sempre haverá necessidade de fixadores para facilitar a desmontagem [...]”.

2.8. FIXAÇÃO NÃO PERMANENTE DE PEÇAS NA ESTRUTURA

A fixação não permanente de alguns componentes da base metálica é realizada por parafusos roscados com porca. O propósito desta utilização é permitir o travamento das peças, contudo, que elas sejam móveis ou reposicionáveis, diferente de um elemento fixado com o processo de soldagem com eletrodo revestido. Para

Budynas e Nisbett (2011, p.446) “Parafusos de porca são dimensionados examinando-se o carregamento no plano da base da arruela da porca.”.

2.9. ELEMENTOS FINITOS

Elementos finitos são todo e qualquer componente com geometria definida, ou seja, corpos rígidos com dimensões. Este sistema é de caráter contínuo de infinitos graus de liberdade por um limite matemático finito na definição de derivadas. As análises destes elementos requerem uma aplicação computacional, assim, reduzindo o custo operacional do projeto.

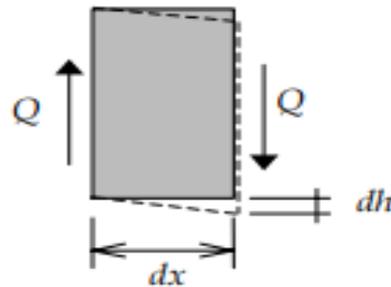
O processo de desratização, pelo cálculo numérico baseado no método dos elementos finitos, transforma problemas matemáticos complexos em equações algébricas de baixa dificuldade. Serafim, (p.1, 1998), comenta que este processo atua “[...] em três disciplinas fundamentais na engenharia: física contínua, análise numérica e programação computacional.”. A análise computacional nos traz um custo mais acessível, liberdade de projeções devido ao número ilimitado de simulações, isto tudo associado a uma resposta próxima do modelo real.

Norton (2013, p.9) cita que para o “[...] sucesso de qualquer projeto depende muito da validade e adequação dos modelos de engenharia utilizados para prever e analisar seu comportamento antes da construção de qualquer máquina.”.

2.10. TORÇÃO EM PEÇAS DA ESTRUTURA

A torção ou momento torsor, é o deslocamento, ou deformação relativa provocada por um esforço cortante – sendo esse esforço, que atua paralelamente a face normal como mostra a figura 3. Para Budynas e Nisbett, (2011, p.121), a torção é o “[...] vetor de momento que seja colinear com um eixo de um elemento mecânico é chamado de vetor de torque, pois o momento faz que o elemento seja torcido em torno desse eixo.”.

Figura 3 - Deslocamento transversal relativo de um elemento infinitesimal de barra provocado por esforço cortante



Fonte: Martha, 2017, p.61.

A torção pode ser modelada matematicamente, para uma barra circular, conforme a equação.

$$\tau = \frac{T.R}{J}$$

Onde,

τ = Momento torsor [N/m²];

T= Torque [N.m];

R = raio [m];

J = Momento de inércia polar [m⁴].

2.2.3 CARGA DO VENTO

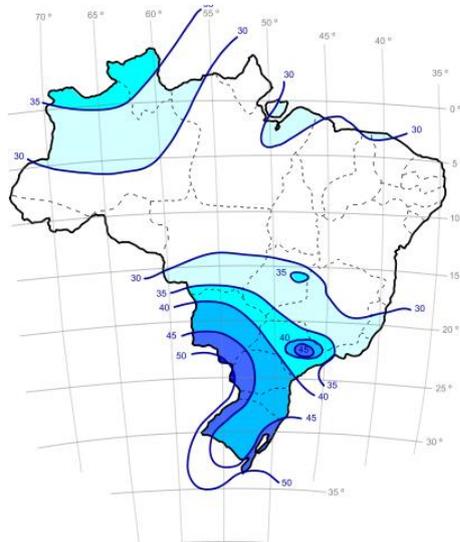
A ação do vento é de extrema importância para dimensionar ou melhorar o silo, principalmente se o mesmo estiver vazio, a influência de pressão na estrutura pode ocasionar o efeito de flambagem, como demonstra a imagem 1, ocorrendo a deformação da estrutura. Para o cálculo de carga que estará atuando diretamente no objeto utiliza-se a norma brasileira NBR6123, onde a velocidade é dada de acordo com a região, sendo listada em m/s, conforme mostra a figura 4.

O coeficiente de pressão interna conforme NBR6123 (C_{pi}) é dado por:

$$H / D \geq 3,0 \quad (C_{pi}) = - 0,8$$

$$H / D < 3,0 (C_{pi}) = -0,5$$

Figura 4 - Isopletas da velocidade básica V (m/s)



Fonte: NBR6123 1988

$$\Delta p = (C_{pe} - C_{pi}) \times q$$

Onde

$$q = 0,613 \times V^2 K$$

$$V_k = V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_3$$

$$\Delta p = \Delta C_p \times 0,613 \times V^2 k$$

A pressão dinâmica será dada por (N/m^2)

Imagem 1 - Acidentes ocasionados pela ação do vento



Fonte: (SCALABRIN,2008)

Sendo

$S1$ = Fator de topografia.

$S2$ = Fator de rugosidade do terreno e altura onde atua o vento.

$S3$ = Fator estático de segurança e vida útil da edificação.

V_0 = Velocidade basida do vento em m/s;

V_k = Velocidade característica do vento em m/s.

Q = Pressão dinâmica em N/m^2 .

C_{pi} = Coeficiente de pressão interna.

C_{pe} = Coeficiente de pressão externa.

Δp = Diferença de pressão nas faces opostas.

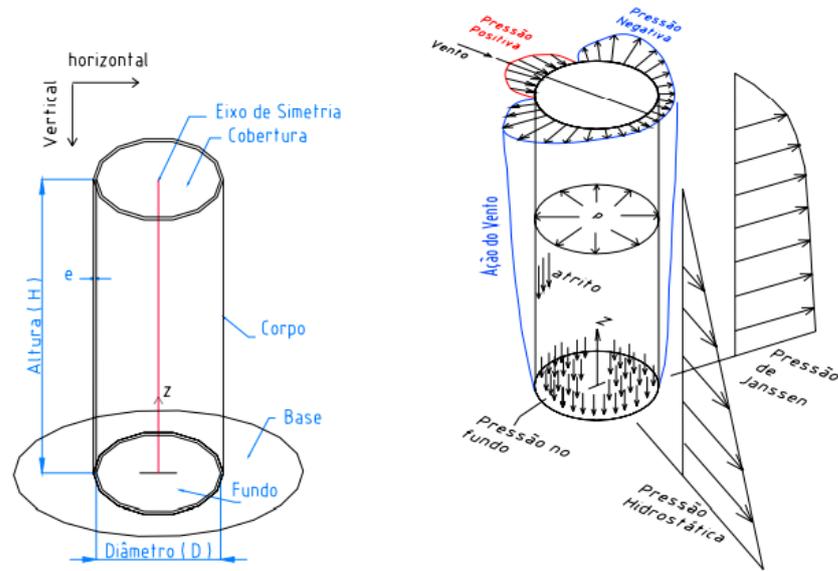
Para aplicar a pressão externa em objetos cilíndricos utiliza-se a norma NBR6123 conforme mostra a tabela 2. As pressões simuladas serão pressões positivas, como demonstra a figura 5.

Tabela 2 - Distribuição das pressões externas em edificações cilíndricas de seção circular

β	Coeficiente de Pressão Externa c_{pe}			
	Superfície rugosa ou com saliência		Superfície lisa	
	$h/d=10$	$h/d \leq 2,5$	$h/d=10$	$h/d \leq 2,5$
0°	+1,0	+1,0	+1,0	+1,0
10°	+0,9	+0,9	+0,9	+0,9
20°	+0,7	+0,7	+0,7	+0,7
30°	+0,4	+0,4	+0,35	+0,35
40°	0	0	0	0
50°	-0,5	-0,4	-0,7	-0,5
60°	-0,95	-0,8	-1,2	-1,05
70°	-1,25	-1,1	-1,4	-1,25
80°	-1,2	-1,05	-1,45	-1,3
90°	-1,0	-0,85	-1,4	-1,2
100°	-0,8	-0,65	-0,1	-0,85
120°	-0,5	-0,35	-0,6	-0,4
140°	-0,4	-0,3	-0,35	-0,25
160°	-0,4	-0,3	-0,35	-0,25
180°	-0,4	-0,3	-0,35	-0,25

Fonte: NBR6123 (1988).

Figura 5 - Comportamento estrutural e ações em silos



Fonte: (ANDRADE jr, 1998)

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo será apresentado as ferramentas, etapas necessárias e estratégias adotadas para otimização dos silos metálicos através do desenvolvimento de novas formas de reforços estruturais.

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

Segundo Norton, (2013, p.5) “A metodologia de projetos é essencialmente um exercício de criatividade aplicada”. Tal que os projetos explicados e mostrados ao longo deste trabalho foram desenvolvidos, discutidos e todos os conceitos de linhas elaborados envolveram muita análise e os resultados apresentados serão focados apenas em avaliações com base no trabalho elaborado pelo próprio autor, selecionando algumas simulações e projetos elaborados, além de mostrar o contexto geral como também seus resultados.

3.2. CONCEITO DO REFORÇO

Para utilizar o reforço estrutural foi optado por aplicar um modelo já existente, porém, não há indícios concretos de que a utilização de anéis de reforços realmente garante uma estabilidade estrutural, quando aplicado a ação do vento. Sua fabricação será feita com aço galvanizado, devido sua resistência a corrosão, portanto, aumentando a vida útil de toda estrutura metálica. Com base em problemas antigos, seu posicionamento é estratégico, sendo fixados em pontos frágeis do silo, conforme demonstra a imagem 2, tendo em vista diminuir a deformação causada pela pressão do vento.

Imagem 2 - Pressão exercida por rajadas do vento em silo



Fonte: (NETO; 2018).

3.3. MÉTODO DE FIXAÇÃO

Para facilitar na montagem da estrutura metálica foi utilizado fixadores não permanentes nas seguintes peças, abraçadeiras, e, fixadores, permitindo fácil posicionamento junto ao silo, os parafusos estabelecidos no projeto obedecem a norma DIN, sendo da classe 8.8, produzido em aço temperado e revenido, com acabamento oxidado preto, sendo resistente a corrosão.

3.4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA ESTRUTURA

Como uma das principais ferramentas primárias de desenho e projeto em três dimensões na engenharia mecânica (UNG, 2017), o solidworks foi utilizado como a principal ferramenta para ajustar a melhoria da estrutura, o método utilizado será por elementos finitos, pois assim é capaz de analisar vários fatores. A escolha do software foi com base na sua confiabilidade na geração de resultados.

A simulação por elementos finitos apresenta uma série de métodos que são capazes de obter soluções aproximadas, podendo assim verificar a estrutura por completo, analisar seus pontos críticos e projetar respectivas otimizações. A estrutura deve sofrer carregamento externo, sem translado, já que todos os cálculos do silo

serão feitos o considerando totalmente vazio, sendo necessário adicional o peso do teto, gerando uma simulação mais realista.

Aplicando o material, aço galvanizado, controle de malha fina, deve ser utilizado análise avançada estática e não linear com base na curvatura da estrutura considerando a pressão do vento na horizontal e o peso do teto na vertical, invertendo a direção para ficar sobreposta a estrutura.

Utilizando a ferramenta paralela ao solidworks, flowsimulation será utilizado um estudo de deslocamento do ar, gerando uma análise aerodinâmica da estrutura, com o objetivo de saber em quais silos posicionar os reforços estruturais, pois quando posicionados no campo, ficam próximos de outros silos. A pressão positiva do vento após contato com a estrutura vai perder intensidade, o objetivo desta simulação é definir em quais silos será necessário posicionar os reforços.

3.4.1. Definição operacional das variáveis

Analisar os materiais empregados;

A decisão do material utilizado, foi escolhido por sua resistência a corrosão, mesmo um aço 1020, apresentando um limite de escoamento maior, ele é suscetível a corrosão, a estrutura metálica já utiliza o aço galvanizado, portanto, se mantém o mesmo material para o reforço.

Analisar os anéis de reforço estrutural;

A possível solução será analisada por simulações, utilizando uma análise estática não linear, o reforço é um modelo externo, conhecido como anéis de reforço.

Apresentar uma otimização para a estrutura;

Para otimizar a estrutura foi utilizado o software solidworks, onde toda estrutura foi implementada, para chegar em uma possível solução.

Simular a estrutura com e sem reforço;

Será analisado a estrutura por completo, com e sem reforço, gerando duas estruturas com as mesmas dimensões para validar, a sua utilização

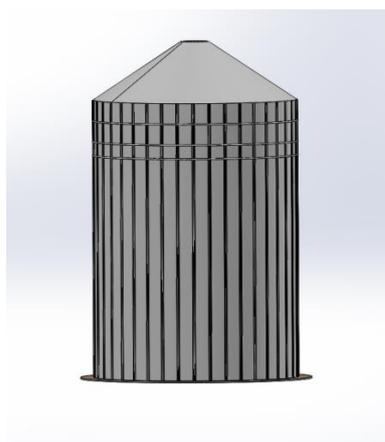
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo apresento os resultados das análises efetuadas e procedimentos adotados para otimização da estrutura metálica.

4.1. CARACTERÍSTICAS DO SILO

Para obter simulação com boa precisão, o modelo simulado possui as dimensões de um tamanho real, o mesmo produzido pela fabricante de Palmares do sul/RS, espaçamento de colunas e anéis de reforço estão localizados em sua posição real, como demonstra a figura 6.

Figura 6 - Vista frontal do modelo a ser simulado



Fonte: autor

Características do silo

- Diâmetro (ϕ) = 12m
- Altura do telhado = 3,45m
- Altura do corpo (H) = 15m
- Inclinação do telhado = 30
- Perímetro (U) = 37,69M
- Área (A) = 113,09m²
- Espessura da chapa ondulada = 3mm

4.2. PRESSÃO DO VENTO NA ESTRUTURA

A velocidade básica utilizada para o cálculo de pressão do vento na estrutura é de 45m/s, verifica-se a figura 18, pagina 16, considerando que a estrutura está localizada no interior do Rio Grande do Sul. De acordo com a (NBR6123).

- Fator topográfico s_1 , considerando o terreno plano. $S_1=1,0$.
- Fator S_2 , considerando o terreno de categoria III. $S_2= 0,99$.
- Fator S_3 , instalações e edificações com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais). $S_3=0,95$.

$$V_k = 45 \text{ m/s} \times 1,0 \times 0,99 \times 0,95 = 42,323 \text{ m/s}$$

$$q = V_k^2 \times 0,613 = 1,098 \text{ kN/m}^2$$

$$\Delta p = (C_{pe} - C_{pi}) \times 1,098 \text{ kN/m}^2$$

O coeficiente de pressão interna utilizado $C_{pi} = -0,8$, para coeficiente de pressão externa C_{pe} foi utilizado o formato de superfície rugosa, conforme mostra a tabela abaixo.

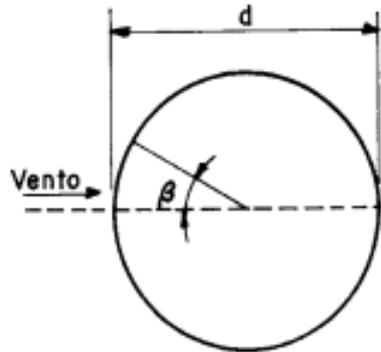
Conforme mostra a figura 7 a inclinação crescente no cilindro, resulta na perda de pressão externa no cilindro, até chegar o momento de ser negativa ou nula na estrutura, como demonstra a tabela 3, as pressões exercidas varia de acordo com a dimensão da estrutura, a maior pressão que o silo recebe acontece no ângulo 0, a simulação recebeu pressões simultâneas de 0 a 30°.

Tabela 3 - Distribuição de pressão no silo

β	C_{pe}	C_{pi}	q (kN/m ²)	Δp (kN/m ²)
0°	+1,00	-0,80	1,098	1,97
10°	+0,90	-0,80	1,098	1,86
20°	+0,70	-0,80	1,098	1,64
30°	+0,40	-0,80	1,098	1,31
40°	+0,00	-0,80	1,098	0,87
50°	-0,40	-0,80	1,098	0,43
60°	-0,80	-0,80	1,098	0,00

Fonte: o autor

Figura 7 - Distribuição de pressão em objetos cilíndricos

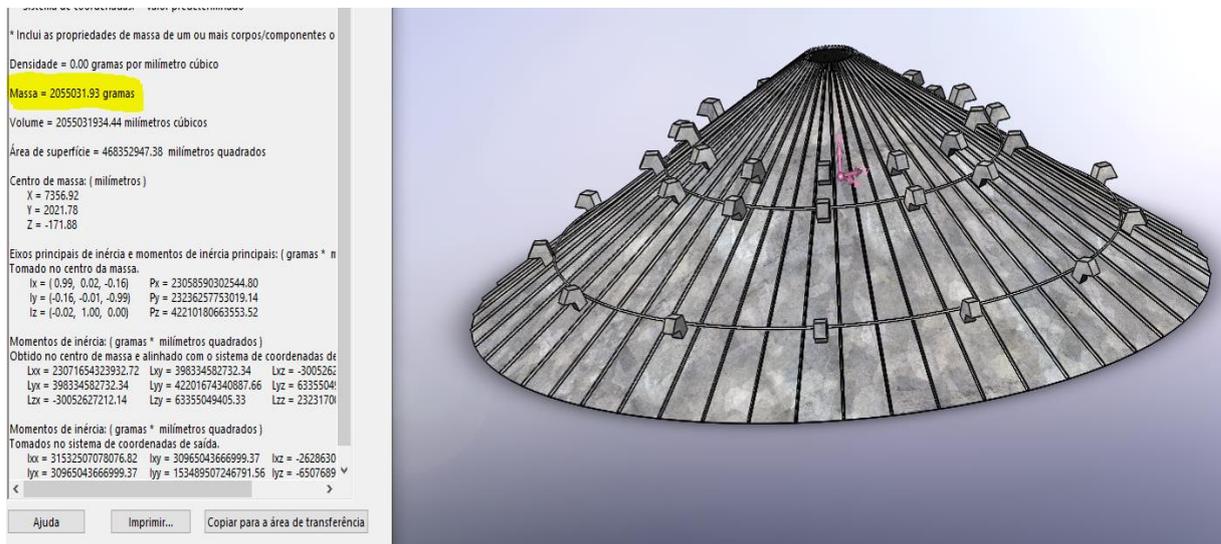


Fonte: NBR6123

4.3. PESO DO TELHADO DA ESTRUTURA

Para obter uma simulação precisa, foi utilizado o peso real do telhado da estrutura.

Figura 8 - Telhado em tamanho real



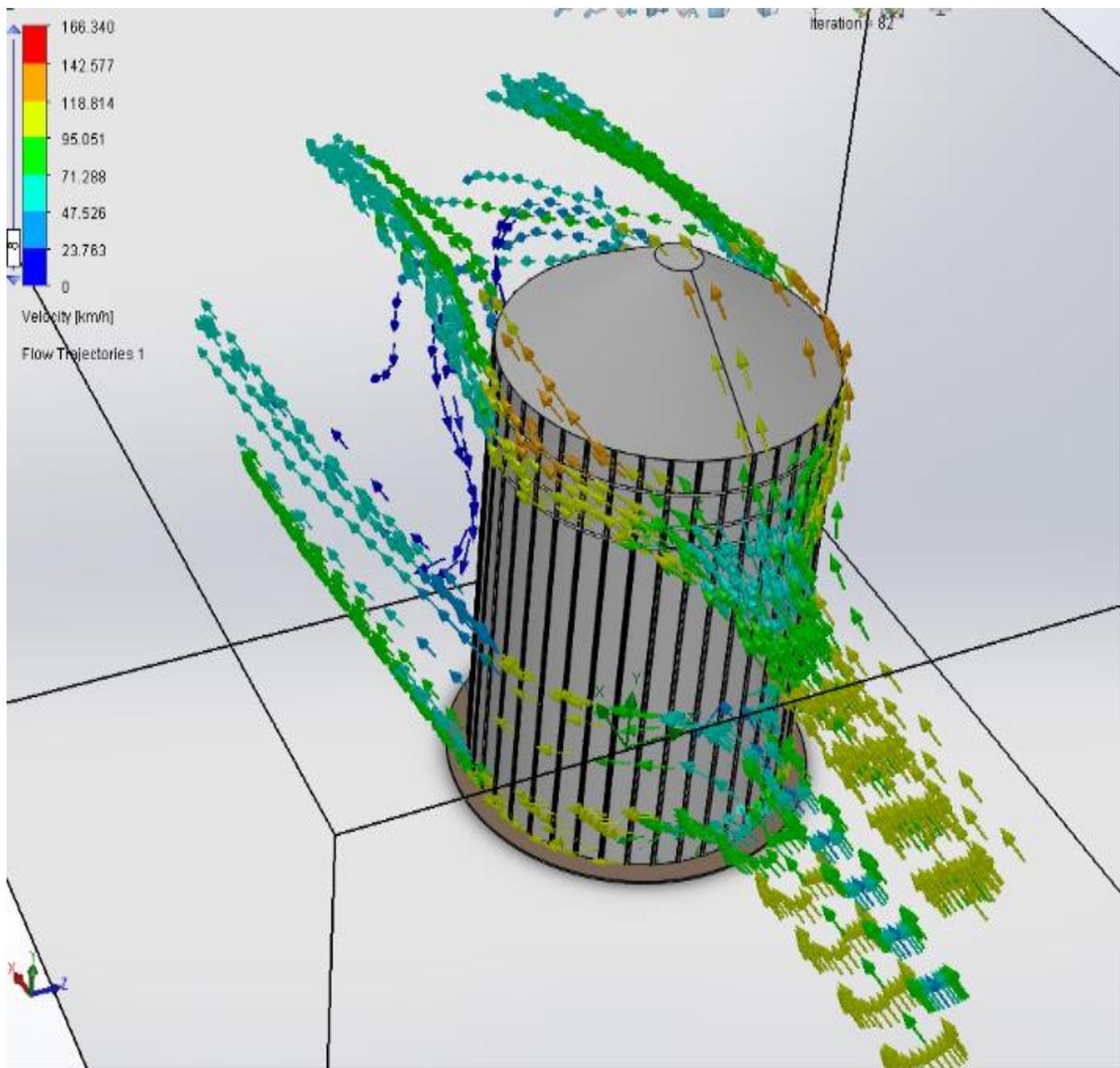
Fonte: O autor

O telhado possui aproximadamente 2000kg.

4.4. FLUXO DE VENTO NA ESTRUTURA

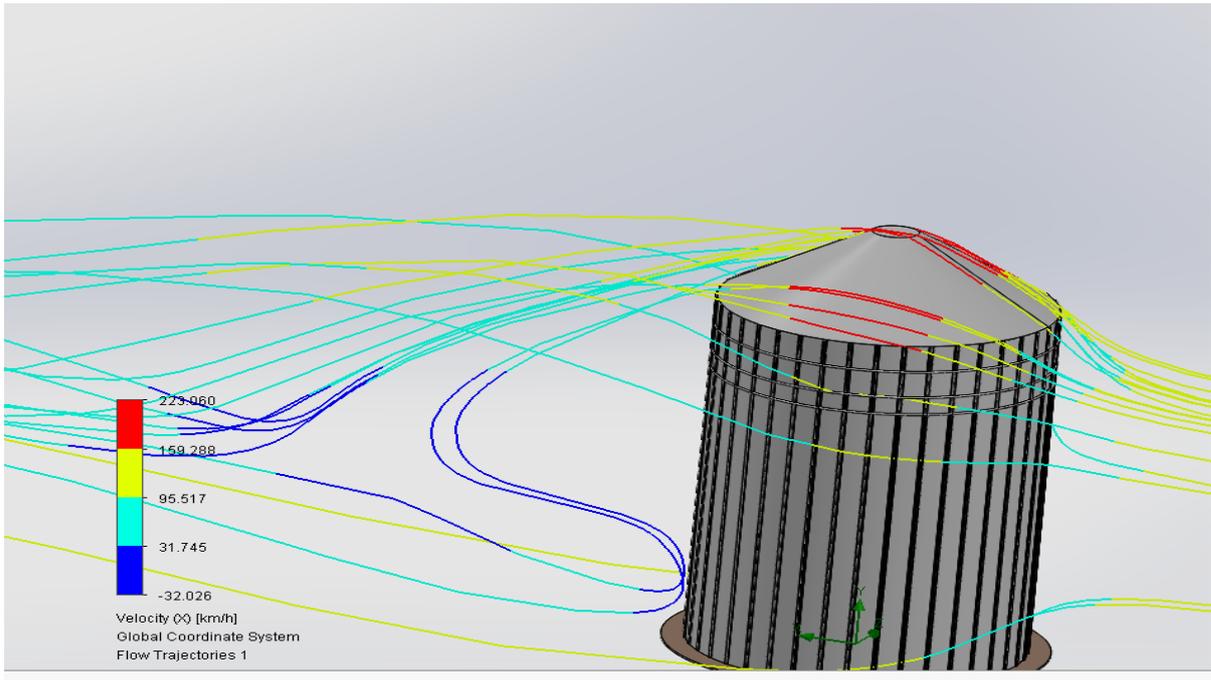
Com o auxílio do flowsimulation, ferramenta paralela ao solidworks, foi analisei o fluxo de ar na estrutura cilíndrica conforme mostra a figura 9 e 10, pois o posicionamento de silos se comporta em linhas horizontais e verticais e conforme o deslocamento de ar sobre a estrutura, sendo possível analisar a necessidade do reforço estrutural. Então foi projetado um ambiente onde a velocidade do vento está a 162km/h, direcionando no eixo x da estrutura. Para obter este resultado o ambiente simulado possui uma área de 27,000m³, sem haver obstáculos.

Figura 9 – Demonstração ação vento em objeto cilíndrico



Fonte. O autor

Figura 10 - Demonstração ação vento em vista lateral



Fonte: O Autor

Conforme analisar os resultados gerados pelo software chega-se à conclusão que o reforço estrutural não é necessário em todas as estruturas, como mostra a imagem 3, é necessário reforçar somente as extremidades, chegou-se à conclusão que a velocidade do vento de 45 m/s (162km/h) após o contato com a estrutura se reduz pela metade, ficando na média de 30km/h a 90km/h, dispensando o uso em todas as unidades.

Imagem 3 - Silos localizados na região de Capivari do Sul/RS



Fonte: Elipal.com.br

4.5. MODELO DE REFORÇO ESTRUTURAL

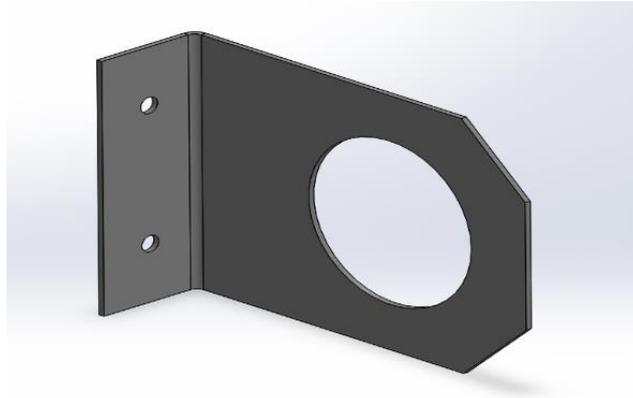
O reforço estrutural externo, se torna de fácil fixação, vejamos que algumas empresas já adotaram modelos semelhantes para resolver o problema, a empresa de Palmares do sul, está adotando a medida onde anéis de aço galvanizado envolvem a estrutura, fazendo com que evitem o efeito de deformação e flambagem no silo, quando o mesmo está vazio, a finalidade do estudo é ter a consciência se é funcional. O reforço é composto de três partes principais. Cantoneira, com o objetivo de ser fixada no silo e no tubo, tubo com o mesmo ângulo do silo envolvendo toda a estrutura, podendo ser ajustado de acordo com o seu diâmetro, e por fim, a emenda, com o objetivo de aplicar a união entre eles.

Por possuir 37,68 metros em seu perímetro é necessário a utilização de dez unidades de tubo, vinte unidades da cantoneira, e onze unidades da emenda, por anel, posicionados em locais estratégicos, onde ocorre o maior índice de deformações. No modelo selecionado requer três anéis de reforço, o primeiro reforço está posicionado a 1,50 metros do chapéu, o segundo a 3.00 metros e o terceiro a 4,00 metros, o posicionamento e quantidade do reforço pode variar de acordo com a altura da estrutura.

4.6. COMPOSIÇÃO DO REFORÇO ESTRUTURAL

Os itens compostos no reforço estrutural estão compostos nas figuras 11,12 e 13, O material de fabricação utilizado é o mesmo metal estrutural do silo, aço galvanizado, com limite de escoamento de 2,078,642Kgf/cm².

Figura 11 - Cantoneira



Fonte: O Autor

- O item tem seu objetivo de ser fixado a cantoneira externa do silo, gerando a união entre o tubo e estrutura.
- Espessura de 6mm, fabricação em aço galvanizado.

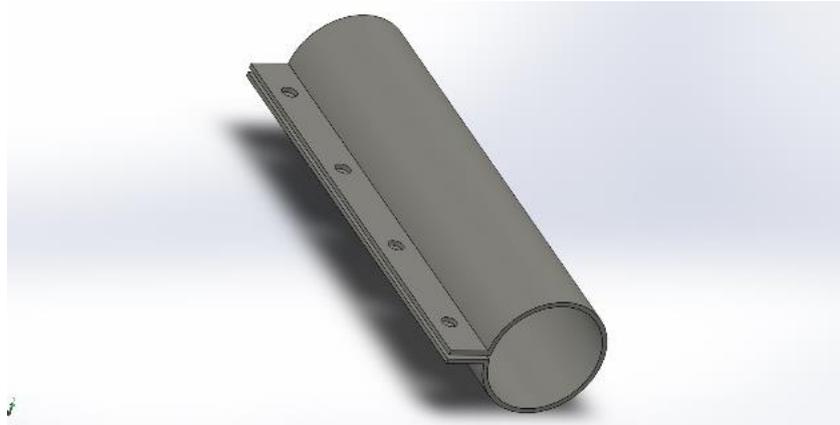
Figura 13 - Tubo



Fonte: O autor

- Finalidade de envolver todo o silo, podendo variar com o ângulo de inclinação, para servir a qualquer diâmetro.
- Espessura de 3mm, fabricação em aço galvanizado.

Figura 12 - Abraçadeira

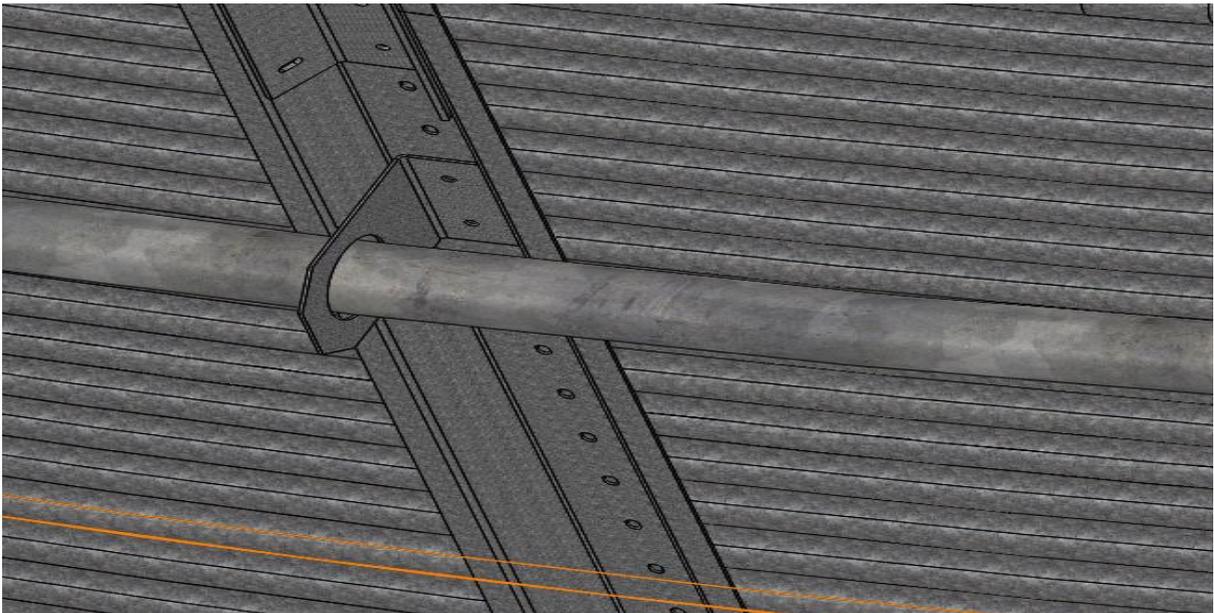


Fonte. Autor

- Peça principal para completar a união dos tubos.
- Espessura de 2mm, fabricação em aço galvanizado

Conforme mostra a figura 14, foi utilizado a união parafusada para obter a montagem do reforço, facilitando a montagem da estrutura.

Figura 14 - Modelo de reforço aplicado na estrutura.

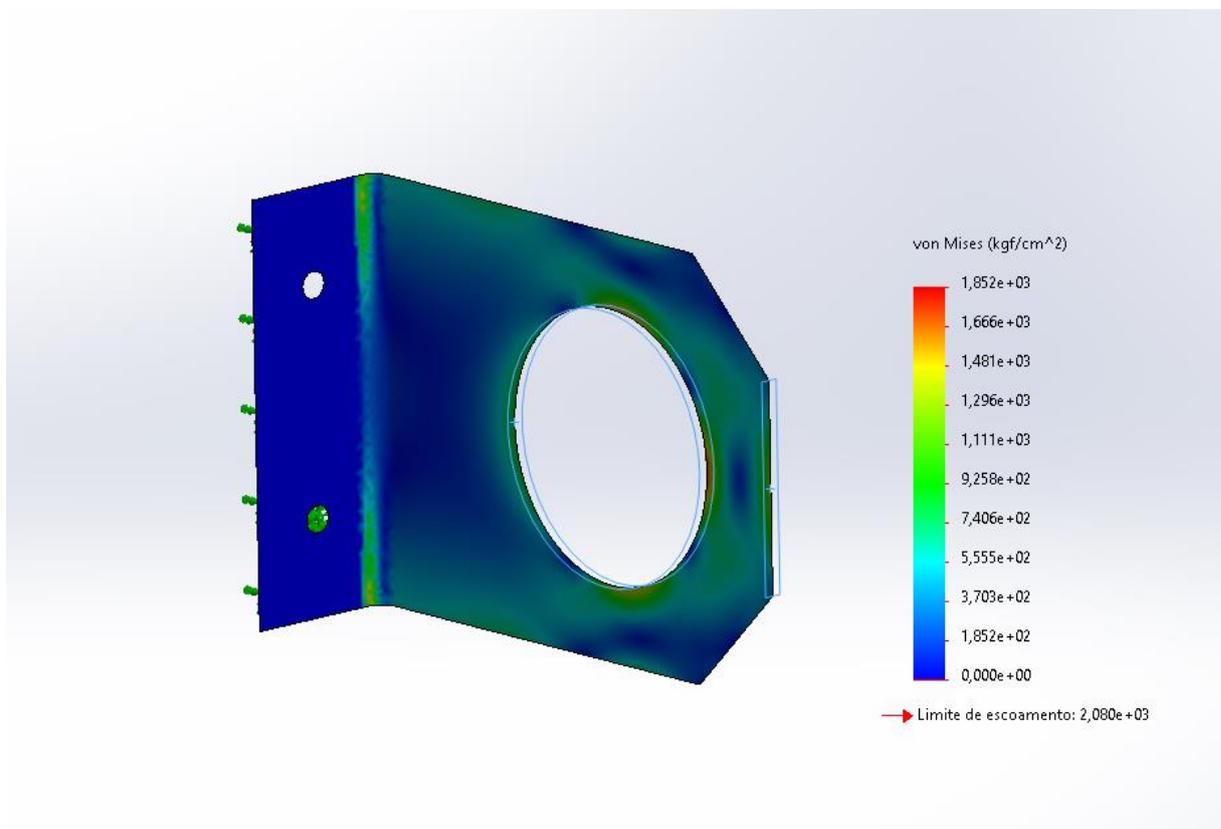


Fonte: Autor

4.7. RESISTÊNCIA DO REFORÇO ESTRUTURAL

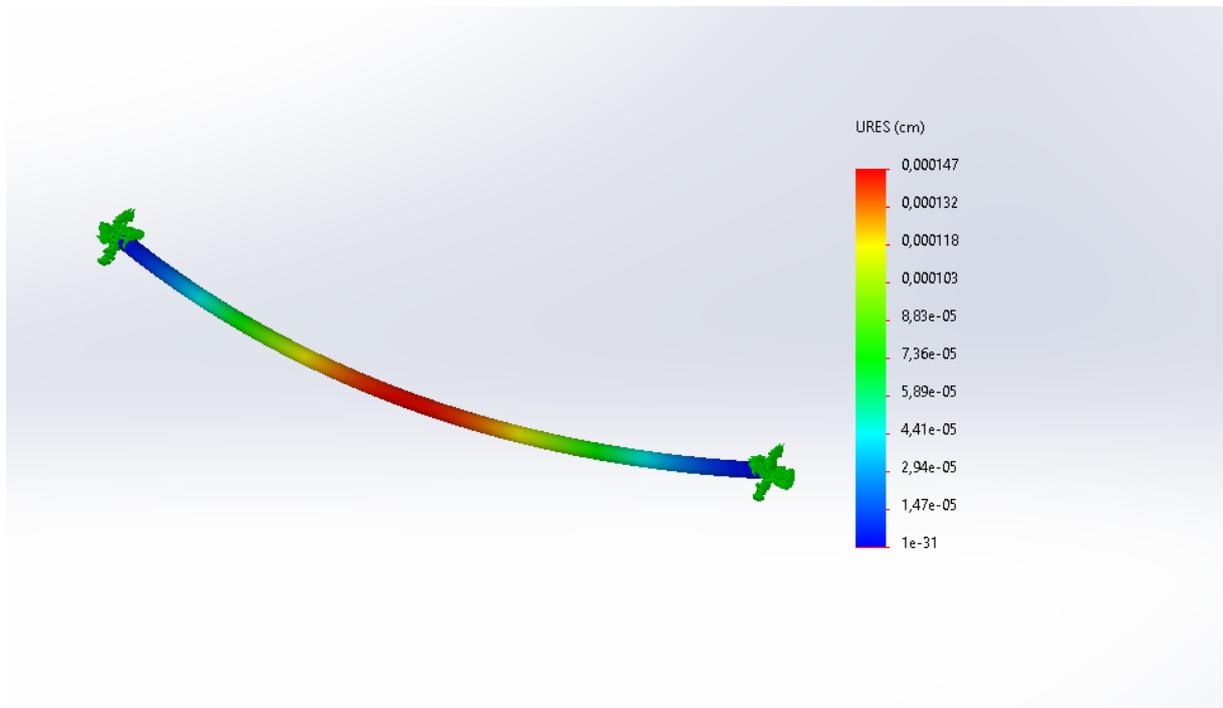
O reforço estrutural resiste até 800kgf antes de seu ponto de ruptura, conforme mostra a figura 15 e 16, a consideração utilizada foi aplicada por unidade, na figura 16, o tubo está baseado com 4 metros de comprimento, supondo o apoio em suas extremidades, na simulação da estrutura, cada abraçadeira está posicionada a 2 metros de distância.

Figura 15 - Modelo de reforço aplicado na estrutura



Fonte: Autor

Figura 16 - Modelo de reforço aplicado na estrutura

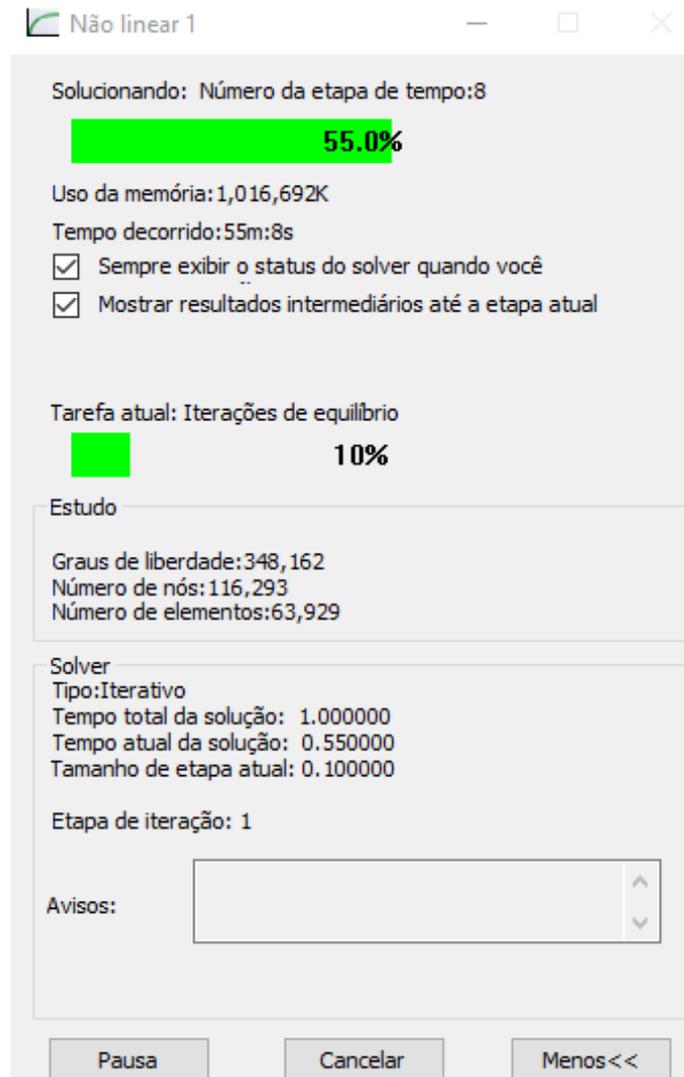


Fonte: Autor

4.8. COMPARATIVO ENTRE SIMULAÇÕES

As simulações apresentadas a seguir utilizaram a pressão distribuída, conforme figura 10 página 24, as pressões utilizadas na estrutura foram de 0° a 30°, sendo elas (1,97, 1,86, 1,64, 1,31Kn/m²), sendo suficiente para obter um resultado com boa precisão. Em todos os processos aplicou-se análise estática não linear, com malha em base a curvatura do silo, sendo necessário o controle de malha em alguns pontos. Cada simulação durou em média duas horas para ser finalizada, como demonstra a imagem 4, sendo analisados um vasto número de elementos.

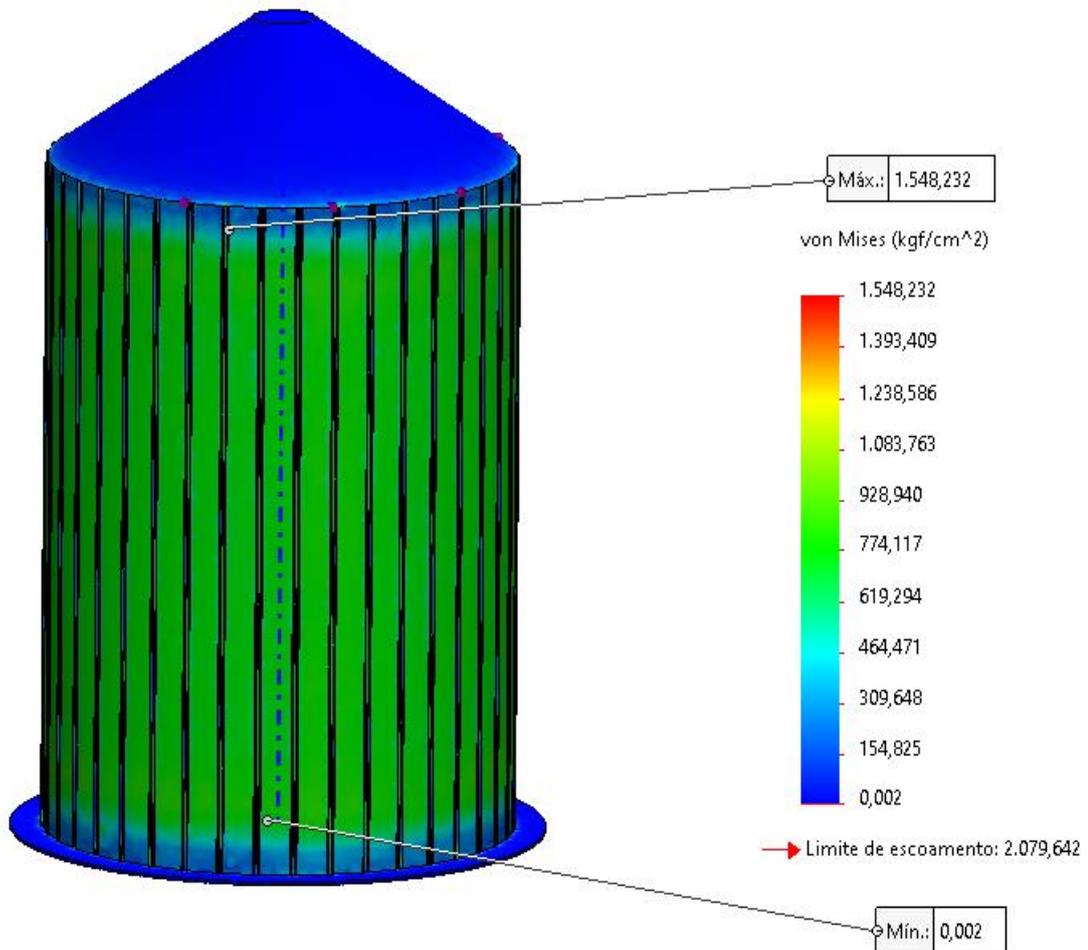
Imagem 4 – Elementos de simulação.



Fonte: Autor

Nota-se que o limite de escoamento do aço galvanizado é de 2,078,642Kgf/cm², a figura 15 demonstra que grande parte da estrutura está sendo comprometida, se tornando uma estrutura frágil, apresentando um fator de segurança baixo.

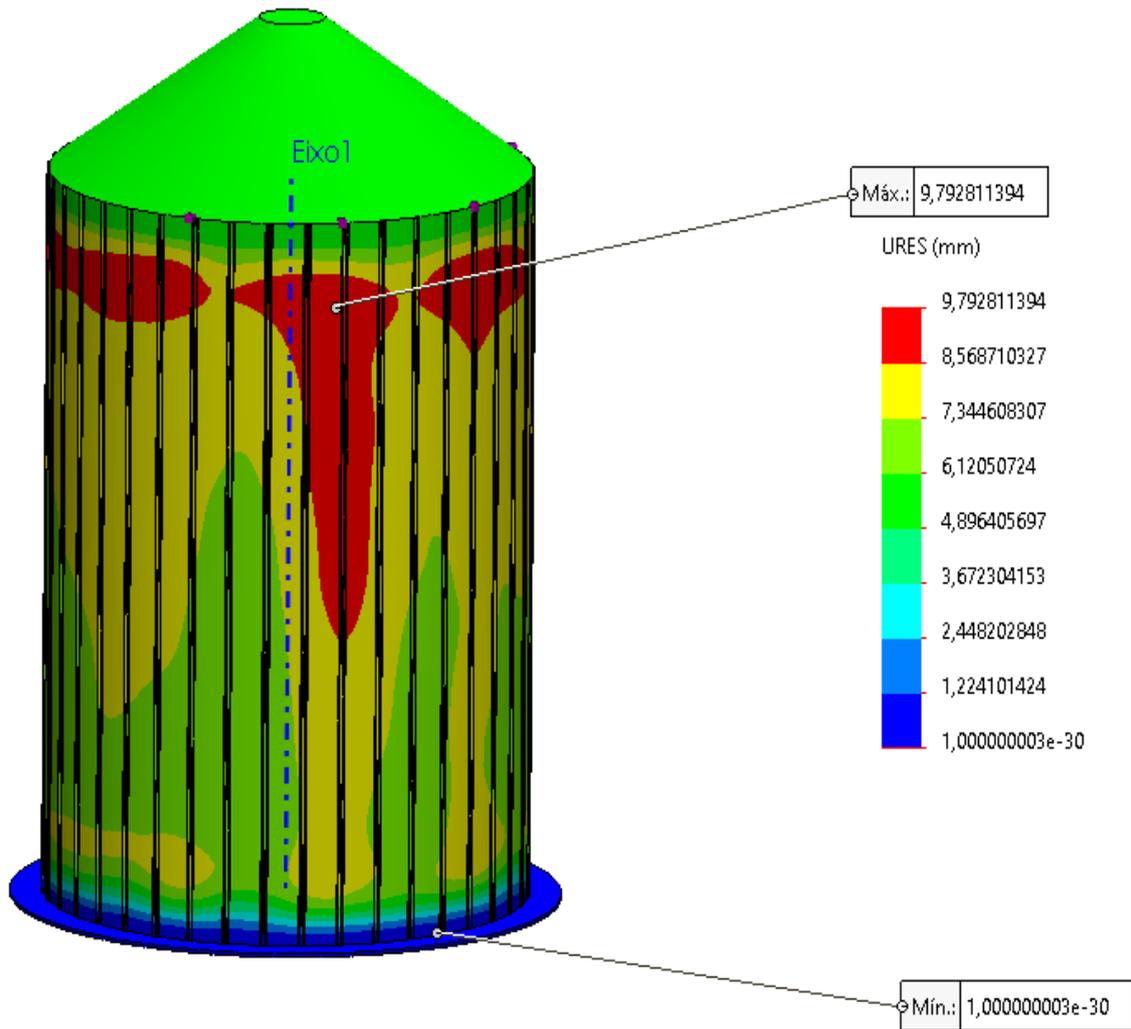
Figura 17 - Silo sem reforço estrutural resultado da tensão exercida



Fonte: Autor

A Figura 16 está se baseada com o deslocamento do silo em mm, sem reforço estrutural, chega próximo a 1cm, o que pode ser aceitável, considerando que a estrutura tem 15 metros de altura, identifica-se que a parte superior é a mais frágil da estrutura, mesmo com a pressão do vento perdendo sua intensidade ao decorrer da estrutura, a região acaba sofrendo deformação.

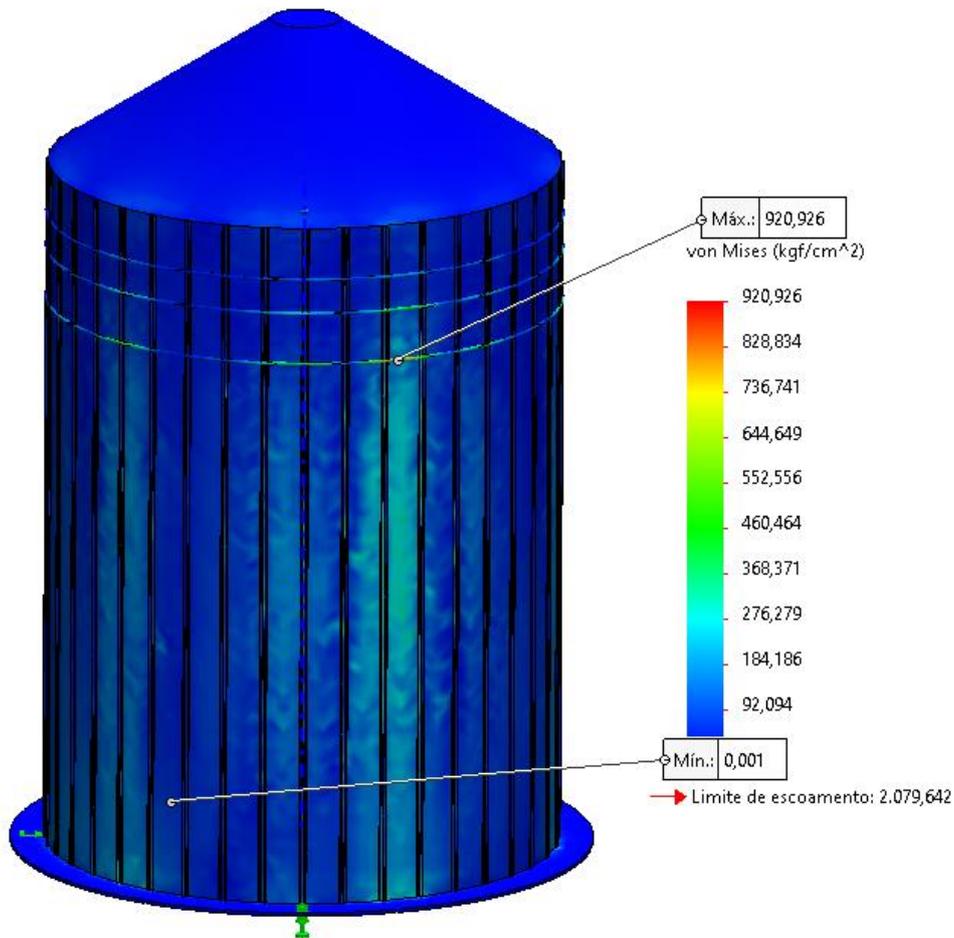
Figura 18 - Silo sem reforço estrutural resultado do deslocamento em mm



Fonte: Autor

Com os anéis de reforços posicionados conseguimos identificar sua eficiência, a região mais afetada pela ação do vento conseguiu ser controlada, analisando a tensão média posicionado no centro da figura 17 ficou em 550kgf/cm² gerando um fator de segurança melhor.

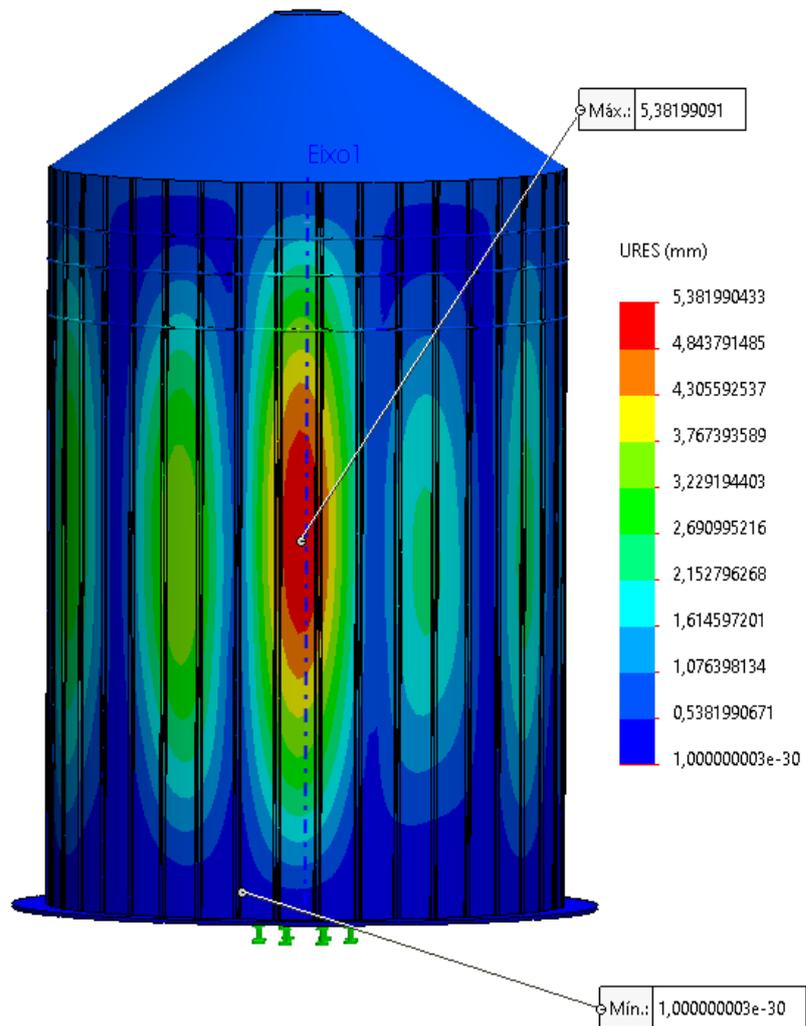
Figura 19 - Silo com reforço estrutural resultado da tensão exercida



Fonte: Autor

Podemos identificar na figura 18 o deslocamento máximo de 5,38mm, considero um deslocamento baixo em relação à grandeza da estrutura, este deslocamento ocorre, pois, a maior pressão dinâmica está posicionada no eixo x sendo de 1,97Kn/m², junto ao ângulo de 0°. Para amenizar o deslocamento, é possível adicionar mais anéis de reforço

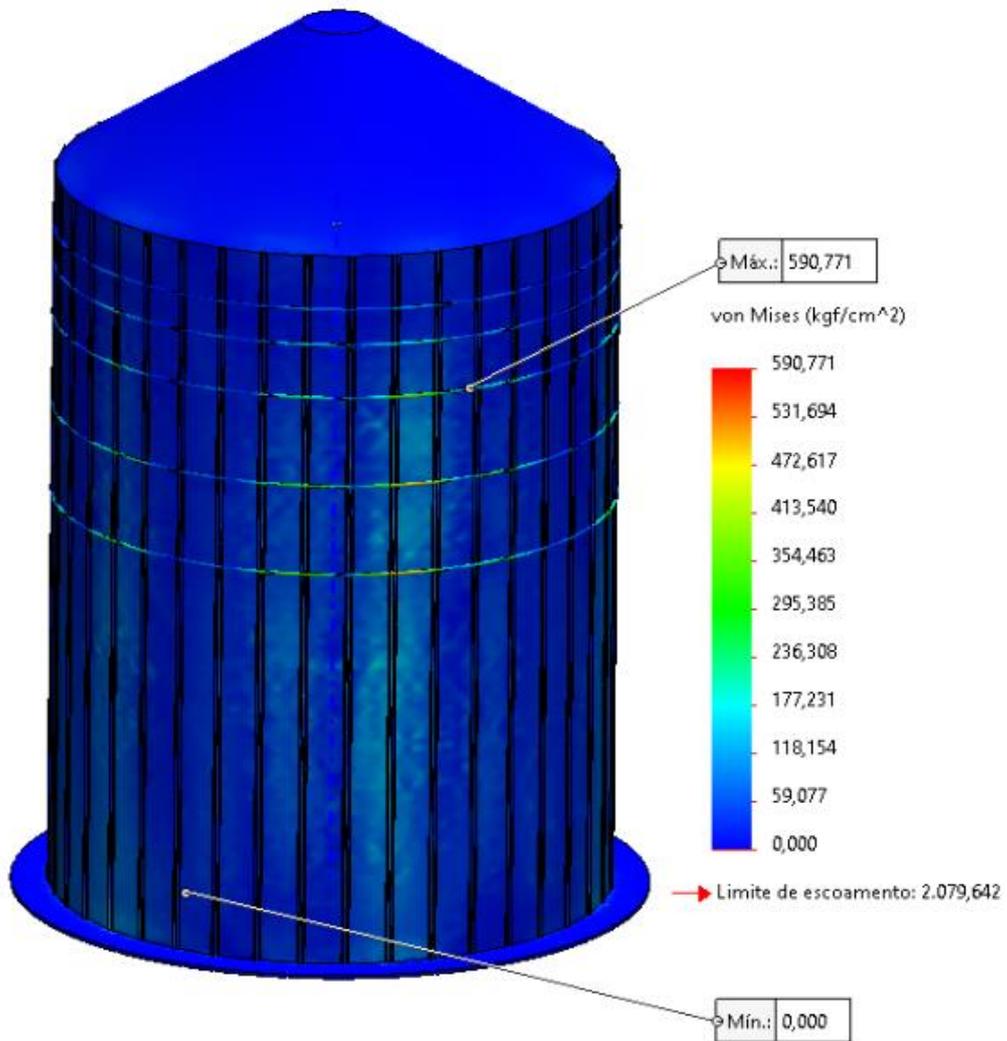
Figura 20 - Silo com reforço estrutural resultado do deslocamento em mm.



Fonte: Autor

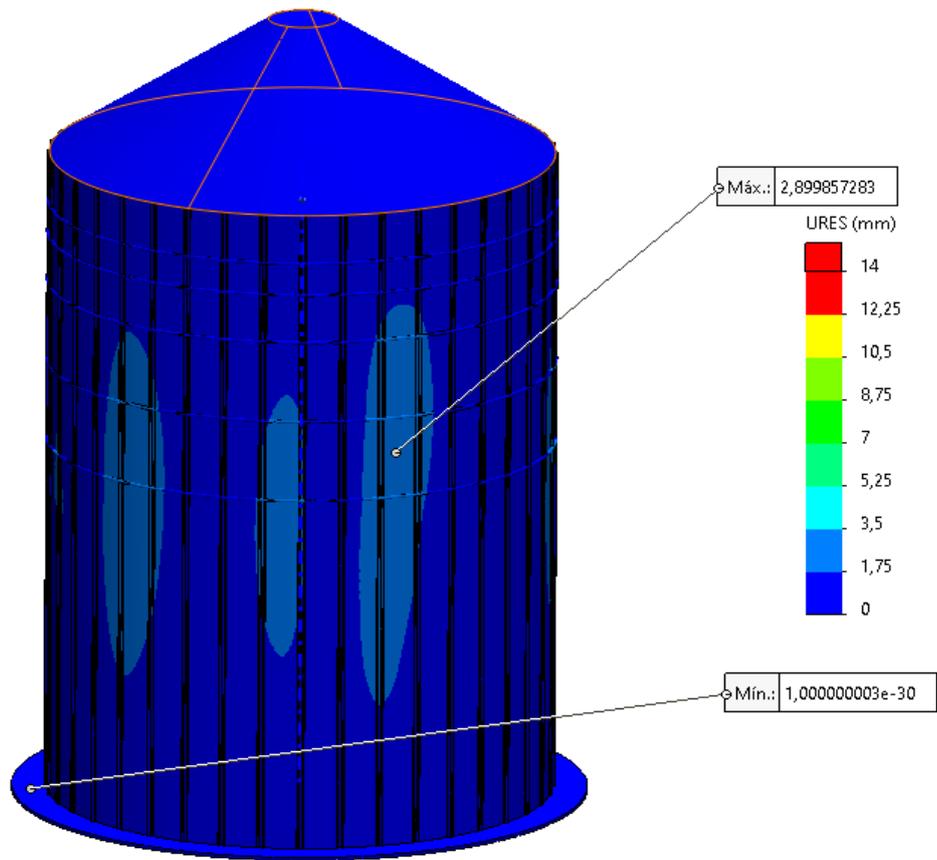
Foram adicionados duas unidades de arcos de metal, totalizando cinco reforços, a simulação foi gerada para reduzir o máximo de deslocamento da estrutura, gerando em seu ponto crítico 2,88mm de deslocamento como demonstra a figura 20 e uma tensão média de 295kgf/cm² como demonstra a figura 19, tendo em vista que o limite de escoamento do aço galvanizado é de 2,079,642kgf/cm², a estrutura com os anéis de reforço obtém um grau de segurança relativamente alto, quando relacionados a ventos de 45m/s.

Figura 21 - Silo com anéis adicional, tensão.



Fonte: Autor

Figura 22 - Silo com anéis adicional, deslocamento.



Fonte: Autor

5. CONCLUSÃO

Com estudo, tive a possibilidade de praticar e aplicar conceitos e habilidades adquiridos ao longo da graduação. Tratou-se da implementação de um modelo de reforço estrutural, considerando um projeto de estrutura metálica de fundo plano, com finalidade de armazenar grãos, o objetivo foi reduzir a ação do vento na estrutura, quando se encontra vazia. Durante o trabalho ficou visível a segurança da implementação, podendo reduzir os danos causados pelo vento, os anéis de reforço se mostraram eficaz em seu propósito quando analisados por elementos finitos, os resultados gerados dentro do software são coerentes, a análise estática não linear se tornou a melhor opção, pois a malha gerada pelo software, envolve a estrutura circular, liberando pequenos controles de malha, assim, não houve nenhum resultado fora de contexto, a norma utilizada NBR6123 se mostrou válida pela região, entendendo que a mesma aplica uma velocidade máxima variando com sua localização e topografia no Brasil.

Quanto aos silos metálicos sem reforços estruturais seu grau de segurança é baixo, considerando rajadas de vento de 45m/s, se torna uma estrutura vulnerável, mas como a fixação dos anéis é aplicada por união parafusada, há possibilidade de ajustar em qualquer estrutura. Ao longo do trabalho foi visto a complexidade do assunto, liberando um campo vasto para pesquisas e testes, no entanto, o país é um grande exportador de grãos, possui uma vasta produção agrícola, mas a literatura sobre o assunto é escassa, visto que, foi realizado poucos estudos sobre o assunto.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante, verificou-se que existem poucos estudos relacionados a área, pois a pressão do vento, não interfere somente no silo, acaba danificando passarelas e outros componentes instalados na região superior do silo, o estudo visou somente a área externa do estrutura, pode-se calcular pressões de carregamento e descarregamento, este modelo de estudo, visa objetos com grande fluxo de carga e descarga, como regiões portuárias. No entanto não existem normas brasileiras para aplicar os cálculos, o recurso utilizado teria que partir para normas internacionais.

REFERÊNCIAS

ANDRADE Jr, L. J. de. **Análise Estrutural das Chapas Metálicas de Silos e de Reservatórios Cilíndricos**. 160 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) — Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6123**: Forças devida ao vento em edificações. Rio de Janeiro - RJ, 1988. 66 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14762**: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro - RJ, 2010. 93 p.

ASHBY, M. F.; JOHNSON, Kara. **Materiais e design: arte e ciência da seleção de materiais no design de produto**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

BUDYNAS E NISBETT, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **Elementos de máquinas de shygley: projeto de engenharia mecânica**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011

ÉPOCA (Brasil). Estagnada, indústria tem a menor fatia do PIB desde o final dos anos 40. *In: Estagnada, indústria tem a menor fatia do PIB desde o final dos anos 40*. Brasil: ÉPOCA, 8 abr. 2019. Disponível em: <https://epocanegocios.globo.com/Brasil/noticia/2019/04/epoca-negocios-estagnada-industria-tem-a-menor-fatia-do-pib-desde-o-final-dos-anos-40.html>.

EXAME (Brasil). A Samsung em seu pico histórico. *In: A Samsung em seu pico histórico*. Brasil: EXAME, 2017. Disponível em: <https://exame.abril.com.br/negocios/a-samsung-cresce-e-briga/>.

EXAME (Brasil). A Samsung em seu pico histórico. *In: A Samsung em seu pico histórico*. Brasil: EXAME, 2017. Disponível em: <https://exame.abril.com.br/negocios/a-samsung-cresce-e-briga/>.

JOSÉ PINHEIRO LOPES NETO E JOSÉ WALLACE BARBOSA DO NASCIMENTO. **DESASTRES COM SILOS VERTICAIS NO BRASIL. UMA BREVE COLETÂNEA DE ACONTECIMENTOS E SUAS CAUSAS,**

MARTHA, Luiz Fernando. **Análise de Estruturas: Conceitos Básicos e Métodos.** 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017. Maceió, 2018

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada.** 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

SERAFIM, Emerson Silveira. **IMPLEMENTAÇÃO DE UMA BIBLIOTECA INFORMÁTICA PARA DIVERSOS TIPOS DE ELEMENTOS FINITOS EM 2D E 3D.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Escola de Engenharia, Florianópolis, 1998.

SCALABRIN, L. A. **Dimensionamento de silos metálicos para armazenamento de grãos.** 160 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

PORTAL INDÚSTRIA (Brasil). Participação da indústria na economia brasileira sobe para 22%, diz CNI. *In: Participação da indústria na economia brasileira sobe para 22%, diz CNI.* Brasil: PORTAL INDÚSTRIA, 19 mar. 2019. Disponível em: <https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/economia/participacao-da-industria-na-economia-brasileira-sobe-para-22-diz-cni/>.

UNG (São Paulo). Conheça 4 softwares utilizados na Engenharia Mecânica. *In: UNIVERSIDADE GUARULHOS (Brasil). Conheça 4 softwares utilizados na Engenharia Mecânica.* Brasil, 17 nov. 2017. Disponível em: [http://www.ung.br/noticias/conheca-4-sofwarees-utilizados-na-engenharia-mecanica-](http://www.ung.br/noticias/conheca-4-sofwarees-utilizados-na-engenharia-mecanica-0)