



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA**  
**CENTRO DAS CIÊNCIAS EXATAS E DAS TECNOLOGIAS**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ABEL COSTA ALVES**

**ANÁLISE ESTRUTURAL DO CORPO METÁLICO DO SILO KEPLER WEBER DA**  
**REGIÃO DO OESTE DA BAHIA UTILIZANDO A TEORIA DAS PLACAS COM**  
**MÉTODO COMPUTACIONAL ANSYS**

**BARREIRAS-BA**

**2025**

**ABEL COSTA ALVES**

**ANÁLISE ESTRUTURAL DO CORPO METÁLICO DO SILO KEPLER WEBER DA  
REGIÃO DO OESTE DA BAHIA UTILIZANDO A TEORIA DAS PLACAS COM  
MÉTODO COMPUTACIONAL ANSYS**

Trabalho de conclusão de curso II apresentado ao  
Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal  
do Oeste da Bahia, como requisito parcial à obtenção  
do grau de engenheiro civil.

Orientador: Dr. Kuelson Randello Dantas Maciel.  
Coorientador: Dr. Pedro Cláudio dos Santos Vieira.

**BARREIRAS-BA**

**2025**

## FICHA CATALOGRÁFICA

---

A474 Alves, Abel Costa.

Análise estrutural do corpo metálico do silo kepler weber da região do Oeste da Bahia utilizando a teoria das placas com método computacional Ansys. / Abel Costa Alves. – 2025.

124f.

Orientador: Dr. Kuelson Rândello Dantas Maciel

Coorientador: Dr. Pedro Cláudio dos Santos Vieira

Monografia (Graduação) – Bacharelado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. Barreiras, BA, 2025.

1. Silos. 2. MEF. 3. ANSYS. 4. Chapas metálicas. 5. Teoria das placas. I. Maciel, Kuelson Rândello Dantas. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia - Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. III. Título.

CDD 624

---

**Biblioteca Universitária de Barreiras - UFOB**

**ABEL COSTA ALVES**

**ANÁLISE ESTRUTURAL DO CORPO METÁLICO DO SILO KEPLER WEBER DA  
REGIÃO DO OESTE DA BAHIA UTILIZANDO A TEORIA DAS PLACAS COM  
MÉTODO COMPUTACIONAL ANSYS**

Trabalho de conclusão de curso II apresentado ao  
Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal  
do Oeste da Bahia, como requisito parcial à obtenção  
do grau de engenheiro civil.

Orientador: Dr. Kuelson Randello Dantas Maciel.  
Coorientador: Dr. Pedro Cláudio dos Santos Vieira.

Aprovado em: 16 de julho de 2025

**Banca examinadora**

---

Dr. Kuelson Randello Dantas Maciel (Orientador)  
Dr. Pedro Cláudio dos Santos Vieira (Coorientador)  
Universidade Federal do Oeste da Bahia – UFOB

---

Dr. Pedro Paulo Martins de Carvalho (Banca)  
Universidade Federal do Oeste da Bahia – UFOB

---

Dr. Kleymlson do Nascimento Souza (Banca)  
Universidade Federal do Oeste da Bahia – UFOB

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho. Agradeço primeiramente ao meu orientador Dr. Kuelson Randello Dantas Maciel e coorientador e Dr. Pedro Cláudio dos Santos Vieira, por sua orientação, paciência e dedicação durante todo o desenvolvimento da monografia. Seu apoio foi fundamental para que eu alcançasse os objetivos propostos.

Agradeço também aos professores do CCET em especial o Weriskiney Almeida, que com suas críticas construtivas e sugestões, tornaram o processo de pesquisa mais enriquecedor.

Ao Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias (CCET) da Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB), por ter proporcionado condições de desenvolver este trabalho.

A minha família, em especial aos meus pais Irani Sousa Costa Ribeiro e Isaias Alves Ribeiro, que sempre acreditaram em mim, merece um agradecimento especial. O apoio incondicional de vocês foi essencial para que eu pudesse seguir em frente e concluir este projeto, agradeço pelo apoio de Tercio e Álefe meus queridos irmãos.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho: Meus amigos Gervásio Alves, Beatriz Alves, Luiza Sá Teles, Vildson saimon, Yan Aquino, Geyza Pires, Andrea Pletsch. Este resultado é fruto do esforço conjunto e da colaboração de cada um de vocês.

Ao meu amor Beatriz Oliveira, agora tenho a honra de expressar minha mais profunda gratidão e amor por você. Sua crença inabalável em mim, suas ideias brilhantes e seu encorajamento constante foram a força motriz por trás deste trabalho. Você tem sido meu porto seguro, minha musa e minha maior apoiadora, acreditando mesmo nos momentos em que o caminho parecia incerto.

Suas perspectivas únicas e sua paciência infinita me ajudaram a moldar este trabalho, transformando desafios em oportunidades de crescimento. Sem você, este projeto não teria a profundidade e o significado que agora possui.

Enquanto viramos a página para o próximo capítulo de nossas vidas, sou imensamente grato por ter você ao meu lado, minha companheira, minha inspiração, meu tudo. Eu te amo hoje, e desejo que todos os dias se tornem hoje. Que nosso amor continue a florescer, assim como o conhecimento que construímos juntos.

## RESUMO

Os silos metálicos são estruturas essenciais para o armazenamento de grãos no agronegócio, especialmente em regiões de alta produtividade como o Oeste da Bahia. A segurança e a eficiência dessas estruturas dependem de um dimensionamento preciso, que considere as complexas tensões geradas pelos grãos armazenados e pelas ações externas. Este estudo teve como objetivo principal analisar as tensões e os deslocamentos no corpo metálico de um silo Kepler Weber modelo 6024, submetido a carregamentos de grãos e vento, utilizando a teoria das placas por meio do Método de Elementos Finitos (MEF) no software ANSYS. Para isso, foi desenvolvido um modelo computacional do silo, aplicando-se as cargas de acordo com a teoria de Janssen e as normas técnicas vigentes. Os resultados da simulação numérica demonstraram que a tensão máxima equivalente de von Mises (366,91 MPa) concentrou-se na base dos montantes, permanecendo abaixo da resistência de cálculo do aço (436,36 MPa), o que valida a segurança da estrutura no Estado Limite Último (ELU). A deformação máxima de 11,316 mm mostrou-se compatível com os limites de serviço normativos. A análise confirmou o papel crucial dos montantes na absorção e distribuição das tensões, reduzindo a solicitação nas chapas de vedação. Conclui-se que o método computacional é uma ferramenta eficaz para a verificação estrutural de silos por meio das tensões e deslocamento, fornecendo subsídios para um dimensionamento mais otimizado e seguro, o que resulta em estruturas mais eficientes e econômicas.

**Palavras-chave:** Silos, MEF, ANSYS, Chapas metálicas, Teoria das placas.

## LISTA DE QUADROS

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Classificação dos silos quanto á esbeltez .....                         | 22 |
| Tabela 2 - Classificação do índice de fluxo de produtos sólidos .....              | 27 |
| Tabela 3 - Classificação da fluidez dos produtos segundo Jenike.....               | 27 |
| Tabela 4 - Valores médios característica de grãos armazenados em silos .....       | 29 |
| Tabela 5 - Propriedades Mecânicas dos Aços.....                                    | 33 |
| Tabela 6 - Fatores que influenciam na variabilidade dos produtos armazenados. .... | 40 |
| Tabela 7 - Espessuras padronizadoras de chapas de aço pela NBR 11888:2018 .....    | 41 |
| Tabela 8 - Características do modelo 6024 (Kepler Weber) .....                     | 58 |
| Tabela 9 - propriedades físicas do ARC 600 .....                                   | 60 |
| Tabela 10 - Características construtivas do silo metálico 6024 .....               | 60 |
| Tabela 11 - Coeficientes e parâmetros das cargas e combinações .....               | 70 |

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIações

$V_0$  – Velocidade básica do vento

$V_k$  – Velocidade característica do vento

$S_1$  – Fator topográfico do terreno

$S_2$  – Fator de rugosidade do terreno e dimensões da edificação

$S_3$  – Fator estatístico

$q$  – Pressão hidrodinâmica

$\Delta p$  – Diferença de pressão nas faces opostas

$C_{pe}$  – Coeficiente de pressão externo

$C_{pi}$  – Coeficiente de pressão interno

$\Delta C_p$  – Coeficiente de pressão total

$\gamma$  – Valor característico do peso volumétrico;

$\mu$  – Valor característico do coeficiente de atrito da parede quando o sólido desliza pela parede vertical;

$K$  – Valor característico da razão da pressão lateral;

$z$  – Profundidade abaixo da superfície equivalente do sólido;

$U$  – Perímetro interno da secção do silo.

$N_x, N_y$  – Forças normais nas direções  $x$  e  $y$ .

$N_{\{xy\}}, N_{\{yx\}}$  – Forças de cisalhamento nas direções  $xy$  e  $yx$ .

$M_x, M_y$  – Momentos fletores nas direções  $x$  e  $y$ .

$M_{\{xy\}}, M_{\{yx\}}$  – Momentos torcedores nas direções  $xy$  e  $yx$ .

$Q_x, Q_y$  – Forças de cisalhamento transversal nas direções  $x$  e  $y$ .

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Mecanismo de elevação de cereais para silos .....                               | 17 |
| Figura 2 – Silo tombado durante a montagem devido a erros durante a execução .....         | 19 |
| Figura 3 – Acidente de silo devido a elevação da estrutura com objetivo de ampliação ..... | 19 |
| Figura 4 – Colapso em galeria de silos devido a ação de ventos superiores ao dimensionado  | 20 |
| Figura 5 – falha estrutural devido falha no dimensionamento da estrutura .....             | 20 |
| Figura 6 - Tipos básicos de fluxo durante o descarregamento .....                          | 23 |
| Figura 7 - Exemplos de silos quanto ao trajeto do fluxo .....                              | 23 |
| Figura 8 - Silos de fundo plano .....                                                      | 24 |
| Figura 9 - Formas mais comuns de silos com fundo tremonhado .....                          | 24 |
| Figura 10 - Ensaio de atrito do grão com a parede do silo .....                            | 26 |
| Figura 11 - Representação da determinação do ângulo de repouso .....                       | 26 |
| Figura 12 - Variação do comportamento do coeficiente K devido à movimentação relativa ..   | 28 |
| Figura 13- Normas e suas respectivas formulações para o parâmetro K .....                  | 28 |
| Figura 14 - Componentes de um silo metálico .....                                          | 30 |
| Figura 15 - Estrutura metálica para telhados de silos.....                                 | 31 |
| Figura 16 - Modelo de Chapa corrugada e seus métodos de furação .....                      | 32 |
| Figura 17 - Montantes de silo metálico KeplerWeber.....                                    | 33 |
| Figura 18 - Anéis de reforço em um silo KeplerWeber .....                                  | 34 |
| Figura 19 – Principais ações em um silo de fundo plano .....                               | 36 |

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 20 - Falha por arrancamento da cobertura e ovalização da seção .....                               | 37 |
| Figura 21 - Falha por tombamento do silo, devido à força de arrasto .....                                 | 37 |
| Figura 22 - Coeficientes de arrasto $C_a$ para corpos de seção constante segundo NBR 6123 (2023) .....    | 37 |
| Figura 23 - Resultado da $C_{pe}$ encontrado para silos baixos e medianamente esbeltos.....               | 38 |
| Figura 24 - Coeficientes de pressão ( $C_{pe}$ ) e de arrasto ( $C_a$ ) em edificações cilíndricas .....  | 39 |
| Figura 25 - Padrão de pressões na parede do silo para um ciclo de carregamento .....                      | 40 |
| Figura 26 - Telhados autoportantes de silo.....                                                           | 41 |
| Figura 27 - Telhados com estrutura de suporte de silo.....                                                | 41 |
| Figura 28 - Pressões atuantes no corpo e fundo do silo.....                                               | 42 |
| Figura 29 - relação das pressões na teoria Janssen.....                                                   | 43 |
| Figura 30 - Elemento de casca e resultado de tensões no elemento de casca.....                            | 44 |
| Figura 31 - Tensão resultante em elemento de casca cilíndrica circular carregada axissimetricamente. .... | 45 |
| Figura 32 – Resultantes de tensão em caixa d’água cilíndrica com base fixada .....                        | 46 |
| Figura 33 - Método geral para análise de sistemas discretos padrão de Elementos Finitos.....              | 50 |
| Figura 34 - Exemplo de discretização em uma placa com furo. ....                                          | 51 |
| Figura 35 - Conjunto de peças discretizadas. ....                                                         | 51 |
| Figura 36 - Elementos de primeira ordem, bidimensionais e tridimensionais respectivamente .....           | 51 |
| Figura 37 - Similaridade entre um objeto e uma mola carregados axialmente .....                           | 52 |

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 38 - Mola com rigidez e forças diferentes.....                                                                     | 53 |
| Figura 39 - Dois elementos ou molas em série com rigidez, deslocamentos e forças diferentes.<br>.....                     | 53 |
| Figura 40 - Tensões em chapa sob flexão no seu próprio plano.....                                                         | 55 |
| Figura 41 - Tensões em chapa sob flexão devido á carga lateral .....                                                      | 55 |
| Figura 42 - Convergência da tensão em função do número de nós.....                                                        | 56 |
| Figura 43 - Representação de um elemento representativo da chapa corrugada por uma casca<br>ortotrópica equivalente. .... | 57 |
| Figura 44 - Vista lateral dos silos metálicos da Fazenda Boiadeiro .....                                                  | 58 |
| Figura 45 – Vista do silo e a visão de satélite do silo.....                                                              | 59 |
| Figura 46 – Estrutura do montante e chapas utilizadas no silo objeto do estudo .....                                      | 60 |
| Figura 47 - Aplicação das pressões no silo modelo .....                                                                   | 62 |
| Figura 48 - Interface de projetos iniciais Ansys Workbench .....                                                          | 63 |
| Figura 49 - Etapa de Engineering Data no Ansys .....                                                                      | 64 |
| Figura 50 - Característica do SHELL209 no Ansys .....                                                                     | 64 |
| Figura 51 - Geometria do silo no Ansys.....                                                                               | 65 |
| Figura 52 - Modelo utilizado para aneis de reforço e montantes .....                                                      | 65 |
| Figura 53 - Mesh para o modelo silo no Ansys.....                                                                         | 66 |
| Figura 54 - Posições de contorno do silo no Ansys.....                                                                    | 66 |
| Figura 55 - Pressão horizontal aplicado as paredes do silo .....                                                          | 66 |
| Figura 56 - Pressão de Vento aplicada na lateral do silo.....                                                             | 67 |

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 57 - Definição de Métodos de solução da estrutura no Ansys .....          | 68 |
| Figura 58 - Dimensões do silo 6024 modelado no Ansys .....                       | 69 |
| Figura 59 - Modelo do silo 6024 .....                                            | 70 |
| Figura 60 - Curva da altura do silo pelas pressões de grãos.....                 | 71 |
| Figura 61 - Altura do silo pela Pressão de vento aplicado ao silo.....           | 73 |
| Figura 62 - Diagrama de deformação resultante no silo completo.....              | 74 |
| Figura 63 - Diagrama de deformação resultante nos anéis e telhado .....          | 75 |
| Figura 64 - Diagrama de tensão resultante no silo completo .....                 | 76 |
| Figura 65 - Ampliação na base do diagrama de tensões resultantes do silo.....    | 77 |
| Figura 66 - Ampliação no telhado do diagrama de tensões resultantes do silo..... | 78 |
| Figura 67 - Tensão resultante por um caminho na parede do silo pelas chapas..... | 79 |

## SUMÁRIO

|        |                                                             |    |
|--------|-------------------------------------------------------------|----|
| 1.     | <b>INTRODUÇÃO</b>                                           | 14 |
| 1.1    | CONTEXTUALIZAÇÃO                                            | 14 |
| 1.2    | JUSTIFICATIVA                                               | 15 |
| 1.3    | OBJETIVOS                                                   | 15 |
| 1.3.1  | Objetivos específicos                                       | 15 |
| 2.     | <b>REVISÃO DA LITERATURA</b>                                | 16 |
| 2.1.   | HISTÓRICO DO SILOS                                          | 16 |
| 2.1.1. | Origem dos silos                                            | 16 |
| 2.2.   | SILOS                                                       | 20 |
| 2.2.1. | Classificação de silos                                      | 21 |
| 2.2.2. | Características dos grãos em silos                          | 24 |
| 2.3.   | CONSTRUÇÃO DE SILOS METÁLICOS                               | 30 |
| 2.3.1. | Estrutura metálica                                          | 30 |
| 2.4.   | FUNDAMENTOS DAS FORÇAS ATUANTES EM SILOS                    | 34 |
| 2.4.1. | Ação do vento                                               | 36 |
| 2.4.2. | Pressão dos grãos                                           | 39 |
| 2.4.3. | Peso próprio                                                | 41 |
| 2.5.   | CÁLCULO DAS PRESSÕES EM SILOS                               | 41 |
| 2.5.1. | Teorema de Janssen                                          | 42 |
| 2.6.   | CÁLCULO DE TENSÕES – TEÓRIA DAS PLACAS                      | 44 |
| 2.7.   | MÉTODO COMPUTACIONAL - ELEMENTOS FINITOS                    | 49 |
| 2.8.   | APLICAÇÕES DA ANÁLISE DE TENSÕES DE SILOS                   | 57 |
| 3.     | <b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>                                  | 58 |
| 3.1.   | CONCEPÇÃO DO SILO                                           | 59 |
| 3.2.   | CARACTERIZAÇÃO DAS CARGAS NO SILO                           | 61 |
| 3.3.   | MÉTODO DA TEORIA DAS PLACAS                                 | 62 |
| 3.4.   | MÉTODO COMPUTACIONAL - MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (ANSYS) | 63 |
| 4.     | <b>ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS</b>               | 69 |

|                                                            |                                                      |    |
|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|----|
| 4.1.                                                       | MODELAGEM DO SILO E CARGAS APLICADAS .....           | 69 |
| 4.2.                                                       | RESULTADO DO DESLOCAMENTO RESULTANTE .....           | 74 |
| 4.3.                                                       | RESULTADO DAS TENSÕES DE VON MISES RESULTANTES ..... | 76 |
| 5.                                                         | CONCLUSÃO.....                                       | 80 |
| REFERÊNCIAS .....                                          |                                                      | 82 |
| APÊNDICE A – TABELA DE CÁLCULO DAS PRESSÕES DE GRÃOS ..... |                                                      | 87 |
| APÊNDICE B – TABELA DE CÁLCULO DAS PRESSÕES DE VENTO ..... |                                                      | 88 |
| APÊNDICE C – PROJETO DA UNIDADE DE ARMAZENAMENTO.....      |                                                      | 89 |
| APÊNDICE D – RELATORIO DE CALCÚLO ANSYS .....              |                                                      | 90 |

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O agronegócio, segundo o Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada – CEPEA (2023), representa 23,8% do PIB, equivalente a R\$ 2,58 trilhões, isso é resultante da grande produção de insumos. Devido a essa grande produção, há um aumento constante na demanda por armazenagem e beneficiamento de grãos. Nesse contexto, o armazenamento da produção passou a ser um critério essencial no agronegócio, sendo a intermediação entre a produção e o escoamento dos grãos. A estocagem dos grãos é realizada em estruturas confinadas, como silos metálicos, com o objetivo de manter as propriedades dos grãos através da conservação das condições ideais, que são determinadas para cada tipo de matéria prima, podendo assim, ficar confinada por um longo período (Associação de Agricultores e Irrigantes da Bahia–AIBA, 2023).

Apesar da grande produção do agronegócio brasileiro, de acordo a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil – CNA (2023), o atual aumento da capacidade de armazenamento não tem conseguido acompanhar a taxa de crescimento da produção de produtos agrícolas, resultando em déficits crescentes a cada nova safra. No que se refere ao oeste baiano a maior parte da produção vai para moinhos em Salvador, Brasília, Sergipe e Alagoas. Com a chegada da empresa Moinho Centro Norte no município de Luís Eduardo Magalhães, com quatro silos capazes de armazenar 2.000 toneladas, acredita-se que pelo menos um terço da produção ficará na região (AIBA, 2023).

O armazenamento dos grãos pode ser realizado em diferentes tipos de estruturas (silos metálicos, silos de concreto, armazéns graneleiros, entre outros). Em relação aos silos metálicos, são uma excelente alternativa (Serviço Nacional de Aprendizagem Rural /Paraná - SENAR-PR, 2023).

Atualmente, o cálculo das pressões devido aos grãos e o dimensionamento dos silos metálicos devem ser realizados de acordo com a NBR 17066 – Silos metálicos de chapas corrugadas (ABNT, 2022), que se baseia em normas internacionais para o cálculo das pressões ANSI/ASAE S433.1 - Loads Exerted by Free-Flowing Grain on Bins (ANSI,2019), ISO 11697 - Bases for design of structures - Loads due to bulk materials (ISO,1995), EN 1991-4 - Actions on structures - Part 4: Silos and tanks (EN, 2006) e na NBR 14762:2010 - Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio para o cálculo das ligações (ABNT, 2010). Porém o estudo das pressões geradas pelos grãos no silo metálico vem sendo abordado

desde antes a criação dessa norma, como por exemplo: Gallego, Ruiz e Aguado (2015) que aplicaram o método computacional, ANSYS (software de cálculo estrutural), que utilizando o método de elementos finitos, no qual compara as pressões internas nas paredes do silo com valores obtidos experimentalmente, e Scalabrin (2008) em sua dissertação realizou, no silo metálico, uma segunda verificação da estrutura por meio do método das placas, com o objetivo de certificar o dimensionamento correto.

Em resumo, os silos metálicos são uma das principais estruturas de armazenagem de grãos no Brasil. Dentro desse cenário, o trabalho visa estudar as tensões internas em silos, buscando contribuir para dimensionamento dessa estrutura metálica, por meio verificação das tensões nas chapas pela Teoria das Placas pelo método computacional por meio de elementos finitos.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Os silos metálicos para armazenagem de grãos são amplamente utilizados no agronegócio, especialmente no oeste da Bahia, sendo uma estrutura padronizada e essencial para o setor. Diante disso, este estudo busca contribuir com a pesquisa e aprimoramento do cálculo estrutural desses silos, focando na análise das tensões no corpo da estrutura. O objetivo é correlacionar diferentes métodos de cálculo das tensões, com ênfase no uso do Método dos Elementos Finitos (MEF), que se mostra adequado para avaliar as variações nas tensões devido às mudanças nas combinações de ações aplicadas. Acredita-se que o MEF, além de proporcionar uma visão detalhada do comportamento da estrutura, seja um método de custo-benefício vantajoso para a identificação precisa das tensões, o que é essencial para o adequado dimensionamento dos silos metálicos.

## 1.3 OBJETIVOS

O trabalho tem como objetivo analisar as tensões resultantes no corpo do silo utilizando a teoria das placas no método computacional.

### 1.3.1 Objetivos específicos

- Estudar as resultantes de tensões no corpo do silo metálicos na Fazenda Boiadeiro em Luís Eduardo Magalhães região do Oeste da Bahia;
- Aplicar MEF utilizando o (ANSYS) para investigação das tensões no silo no corpo do silo;

## 2. REVISÃO LITERATURA

### 2.1. HISTÓRICO DO SILOS

Ao longo dos séculos, diversas técnicas foram empregadas para guardar grãos. Há registros de que, há mais de 3 mil anos, no Egito, já existiam sistemas para estocar trigo. Esses métodos evoluíram, passando de depósitos simples para estruturas mais avançadas, como paióis, celeiros e silos metálicos verticais (Heming, 2016).

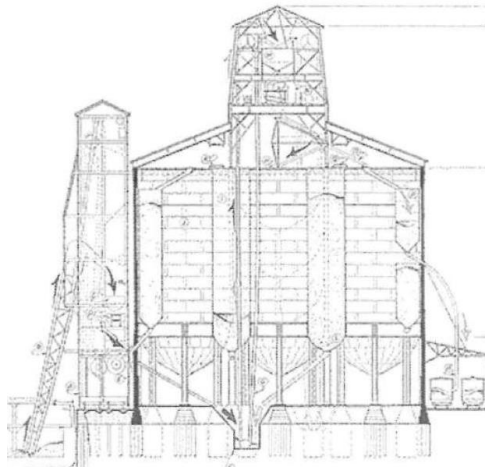
#### 2.1.1. Origem dos silos

Os povos que cultivavam alimentos buscaram proteger e armazenar suas colheitas, garantindo as quantidades essenciais para enfrentar as estações mais difíceis. No Egito, utilizavam grandes jarras de cerâmica, enquanto os Árabes recorriam a poços e os Chineses, há 2700 anos antes da nossa Era, também adotavam métodos semelhantes (Queimado, 2010). O termo “silo” aparece na literatura grega a partir do século VIII a.C., derivado de σιρός (siros), que significa “cova para guardar grãos”. No entanto, etimologistas modernos defendem que sua difusão comercial ocorreu muito mais tarde, na rota árabe de cereais e especiarias, atribuída à vila de Selun, ao norte de Jerusalém (Geisler; Grauwe, 2021).

Segundo Queimado (2010), para suprir as dificuldades de armazenamento e transporte de cereais vindos sobretudo das grandes pradarias do Estados Unidos e do Canadá, foi inventado em Buffalo nos Estados Unidos, entre 1842 e 1843, o mecanismo essencial que permitiu o desenvolvimento dos silos que hoje conhecemos. A principal característica do invento movido primeiramente a vapor era a de levar os cereais diretamente do local de armazenagem para o contentor que faria o seu transporte, por barco e mais tarde comboio, sem recurso à mão-de-obra que antes fazia essa tarefa, conforme Figura 1.

A consolidação dos silos metálicos corrugados ocorreu somente após 1950, acompanhada da padronização de chapas galvanizadas e da adoção de normas internacionais de cargas granulares (zhao; lv; li, 2023).

Figura 1: Mecanismo de elevação de cereais para silos



Fonte: Scalabrin (2008)

#### 2.1.2. Importância econômica de silos

Segundo Ayuga (1995) e Calil Júnior; Cheung (2007). No Brasil, o armazenamento de produtos em silos é considerado uma solução de grande viabilidade devido à economia de espaço físico, mão-de-obra e custo de transporte, assim como a possibilidade de conservação do produto ensilado. Uma unidade armazenadora, tecnicamente projetada e bem conduzida, apresenta três razões principais, conforme descrito abaixo:

- Interesse econômico: O armazenamento de produtos a granel é fundamental no mundo industrial e são realizados grandes investimentos públicos e privados em estruturas de armazenamento em todos os países do mundo.
  - O armazenamento a granel protege o produto contra insetos e roedores, mantendo-o em melhores condições.
  - Armazenar a granel economiza gastos com sacarias e mão de obra, pois o produtor comercializa também a granel.
  - Durante a safra, os preços dos fretes aumentam; armazenar a granel ajuda a reduzir esses custos.
  - A secagem elimina impurezas e excesso de água, tornando o transporte mais eficiente.
  - O armazenamento a granel permite regular os preços no mercado.
  - Áreas pequenas podem armazenar grandes volumes de produtos.

- O estoque a granel ajuda a indústria a lidar com variações nos preços das matérias-primas.

- Interesse científico. Os silos são estruturas complexas onde se combinam comportamentos estruturais de produtos diferentes e com situações muito diversas. É por isso que, ainda hoje, depois de um século de pesquisa, existem grandes lacunas de conhecimento que encorajam numerosos pesquisadores do mundo todo.

- Interesse social. Durante muitos anos os silos foram personagens principais de muitas ruínas, afundamentos, explosões, combustão etc. Seguramente é o tipo de estrutura com mais porcentagem de sinistros.

### 2.1.3. Segurança em silos

A alta frequência de colapsos em silos evidencia a complexidade de modelar o comportamento dessas estruturas. A multiplicidade de variáveis envolvidas e a falta de conhecimento sobre suas interações dificultam a elaboração de modelos matemáticos precisos e seguros, resultando em perdas materiais e humanas (Fank, 2017).

Segundo Scalabrin (2008), os principais acidentes na estrutura de silo são durante a fase de montagem, aumento da capacidade da estrutura metálica, acontece principalmente em galerias e devido à erros em projetos.

A fase de montagem de silos expõe a estrutura a riscos significativos. Rajadas de vento podem provocar o tombamento do silo, especialmente quando este se encontra elevado para a instalação de um novo anel. Além disso, o desnivelamento da base durante a elevação pode gerar sobrecarga nos sistemas de sustentação, comprometendo a estabilidade da estrutura, conforme exemplo na Figura 2.

Figura 2 – Silo tombado durante a montagem devido a erros durante a execução



Fonte: Scalabrin (2008)

Durante o momento de aumentar a capacidade de armazenamento de silos metálicos por meio da elevação da estrutura, embora comum, pode resultar em acidentes graves. Devido a erros de concepção de projeto. Ao desconectar o silo da base e adicionar novos elementos, os chumbadores existentes podem se tornar insuficientes para suportar o peso adicional, levando à ruptura da estrutura. Conforme exemplo na Figura 3.

Figura 3 – Acidente de silo devido a elevação da estrutura com objetivo de ampliação



Fonte: Scalabrin (2008)

A ocorrência de acidentes em galerias que abrigam correias transportadoras é frequente, causando danos significativos a silos. Estudos indicam que falhas no dimensionamento dessas estruturas e a influência dos ventos sobre elas são fatores que contribuem para esses incidentes. Conforme exemplo na Figura 4.

Figura 4 – Colapso em galeria de silos devido a ação de ventos superiores ao dimensionado



Fonte: Scalabrin (2008)

A padronização de projetos de silos pode mascarar erros de dimensionamento, resultando em falhas estruturais. A utilização das mesmas envoltórias de esforços para diferentes tipos de grãos, com características físicas e químicas distintas, aumenta o risco de acidentes, uma vez que as pressões internas podem variar significativamente. Conforme exemplo na Figura 5.

Figura 5 – Falha estrutural devido falha no dimensionamento da estrutura



Fonte: Scalabrin (2008)

## 2.2. SILOS

Silo é o termo genérico para estruturas projetadas para armazenar produtos a granel, como cereais ou cimentos. Essas estruturas podem ser compostas por uma única célula ou

múltiplas células, e são equipadas com mecanismos para a descarga do material, que pode ocorrer por ação da gravidade ou por meio de sistemas mecânicos ou pneumáticos (Freitas, 2001).

Conforme a norma europeia EN 1991-4 (EN, 2006), silos são estruturas utilizadas para o armazenamento e a conservação de produtos sólidos particulados, a granel ou pulverulentos, sendo largamente utilizados na agricultura, indústria e mineração.

Um silo é projetado para armazenar um determinado tipo de material a granel, considerando suas características físicas e químicas específicas. A utilização de um silo para armazenar um produto com propriedades diferentes pode comprometer a segurança e a eficiência do sistema de armazenamento (Fank, 2017).

Segundo Fank (2017), para dimensionar corretamente um silo, é fundamental conhecer as propriedades do material a ser armazenado, já que elas determinam o tipo de fluxo e as tensões na estrutura.

#### 2.2.1. Classificação de silos

Existe uma grande variedade na tipologia dos silos existentes, tanto por sua forma que pode ser circular, quadrada, retangular ou poligonal, como pelo tipo do material empregado em sua construção, que pode ser madeira, alvenaria, concreto e aço (Garbazza, 2011).

Segundo Cheung (2007) os silos, além de serem classificados de acordo com o tipo do material empregado em sua construção, tipo de fundo e da forma geométrica da célula, também são enquadrados de acordo com a vedação, instalação em relação ao solo e suas dimensões conforme os detalhes a seguir:

Os silos são construídos com os mais diversos materiais, como concreto armado, concreto protendido, chapas metálicas (lisas, corrugadas e trapezoidais), madeira, alvenaria, argamassa armada, fibras, plásticos e outros.

Quanto à construção em relação ao solo, pode-se dividir em 3 grupos:

- Silos elevados ou aéreos: são caracterizados por serem construídos acima do nível do solo;
- Silos subterrâneos: são aqueles em que os compartimentos para a estocagem se localizam abaixo do nível do solo. São construções mais simples que os silos elevados, porém são mais suscetíveis à infiltração de água e têm um esvaziamento mais difícil;
- Silos semi-subterrâneos: são um tipo intermediário entre os dois tipos anteriores.

A geometria é outro fator de classificação dos silos, podendo ser divididos em:

- Silos esbeltos: são aqueles que possuem uma relação entre a altura (H) e o diâmetro (D) maior ou igual a 1,5.
- Silos baixos: são aqueles que possuem uma relação entre a altura e o diâmetro D menor que 1,5.
- Silos horizontais: são aqueles cuja dimensão longitudinal é preponderante sobre as outras dimensões.

Algumas normas apresentam as relações de classificação de silos quanto à esbeltez, e que estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação dos silos quanto á esbeltez

| <b>Norma</b>                                          | <b>BAIXOS</b>           | <b>MEDIANAMENTE<br/>ESBELTOS</b> | <b>ESBELTOS</b> |
|-------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|-----------------|
| Australiana<br>AS3774:1996                            | $H/D < 1,0$             | $1,0 \leq H/D \leq 3,0$          | $3,0 \leq H/D$  |
| Europeias<br>PrEN 1991-4:2003<br>DIN 1055-03:2005     | $0,4 \leq H/D \leq 1,0$ | $1,0 \leq H/D \leq 2,0$          | $2,0 \leq H/D$  |
| Americanas<br>ACI-313:1991<br>ANSI/ASAE<br>EP433:2001 | $H/D \leq 2,0$          | -                                | $2,0 \leq H/D$  |
| Canadense<br>CFBC:1983                                | $H/D \leq 1,0$          | -                                | $2,0 \leq H/D$  |

Fonte: Calil Júnior e Cheung (2007)

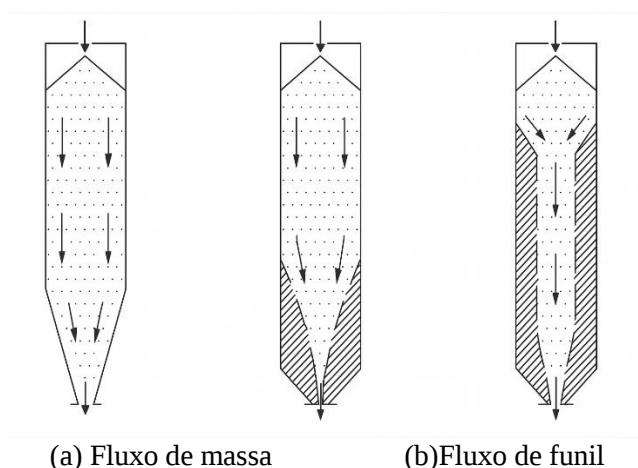
Quanto à entrada de ar os silos podem ser classificados:

- Silos herméticos: silos que possuem um impedimento entre a troca de ar do interior da célula com o exterior.
  - Silos não-herméticos: silos que permitem a troca de ar com o exterior.
- Geometria do silo, conforme a

Figura 6, apresenta os seguintes tipos de fluxo durante o descarregamento:

- Fluxo de massa: fluxo no qual todas as partículas armazenadas estão em movimento do começo até o fim do descarregamento.
- Fluxo de funil: caracterizado pela formação de um canal de partículas em movimento dentro de uma zona limitada, enquanto o produto adjacente à parede permanece estacionário.

Figura 6 - Tipos básicos de fluxo durante o descarregamento



(a) Fluxo de massa

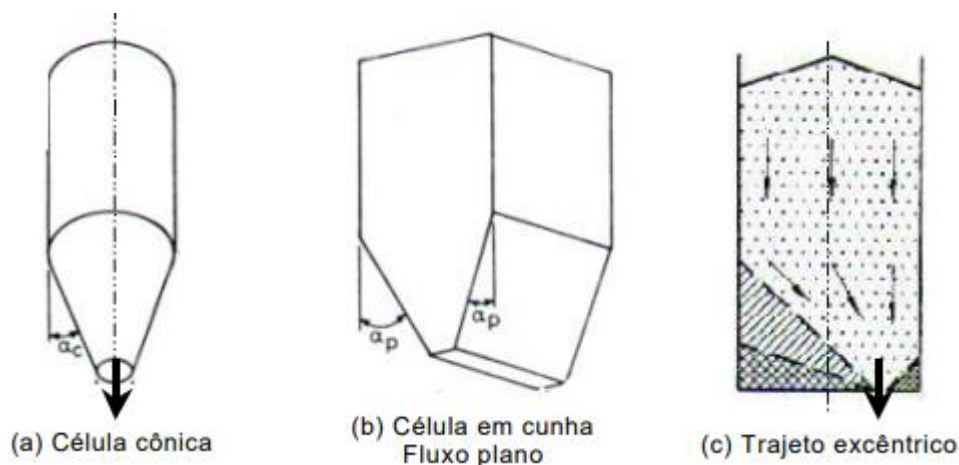
(b) Fluxo de funil

Fonte: Freitas (2001)

Geometria do fluxo durante a expedição, conforme a Figura 7, apresentam os seguintes trajetos:

- Trajeto axissimétrico (Figura 7.a): O centro de gravidade do produto fluindo coincide aproximadamente com o eixo vertical do silo, por exemplo, silo circular com abertura de descarga concêntrica.
- Trajeto planar (Figura 7.b): É um fluxo uniforme que ocorre em silos de seção transversal retangular ou quadrada, com tremonhas em forma de cunha, onde uma das dimensões da boca de saída é paralela e de igual comprimento às paredes do silo. Neste caso, o canal do fluxo é simétrico em relação ao plano que passa pelo eixo longitudinal da abertura de saída.
- Trajeto excêntrico (Figura 7.c): o canal do fluxo não é simétrico em relação ao eixo vertical do silo, ou em relação ao plano vertical que passa pelo eixo longitudinal do silo.

Figura 7 - Exemplos de silos quanto ao trajeto do fluxo



(a) Célula cônica

(b) Célula em cunha  
Fluxo plano

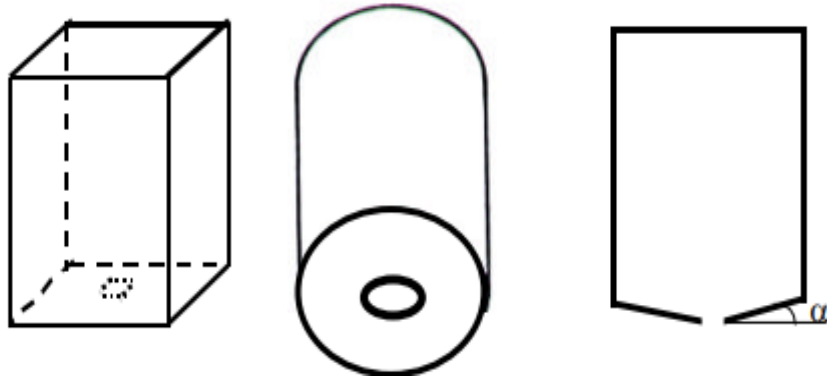
(c) Trajeto excêntrico

Fonte: Freitas (2001)

O fundo pode apresentar os seguintes tipos:

- Fundo plano: silo de fundo horizontal ou um fundo com paredes inclinadas de um ângulo a  $\alpha \leq 20^\circ$  com relação a horizontal. Conforme Figura 8.

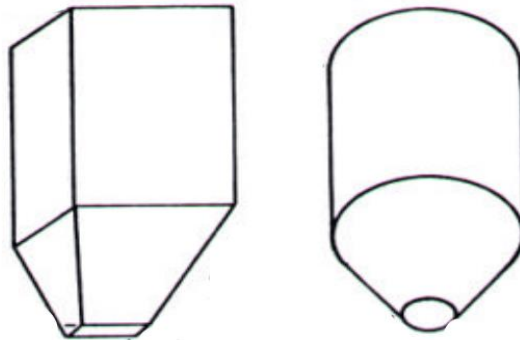
Figura 8 – Tipos de fundos para silos



Fonte: Freitas (2001)

- Fundo com tremonha: fundo em forma de funil, cujas formas mais comuns são as tronco-piramidais e as tronco-cônicas, conforme Figura 9.

Figura 9 - Formas mais comuns de silos com fundo tremonhado



(a) Tremonha piramidal (b) Tremonha cônica

Fonte: Freitas (2001)

#### 2.2.2. Características dos grãos em silos

É importante lembrar que um silo é concebido para armazenar uma gama diversificada de sólidos a granel e estes por sua vez, variam muito em suas propriedades, fazendo com que um

silo projetado para armazenar adequadamente um determinado material se torne ineficiente e perigoso para armazenar outro (Fank, 2017).

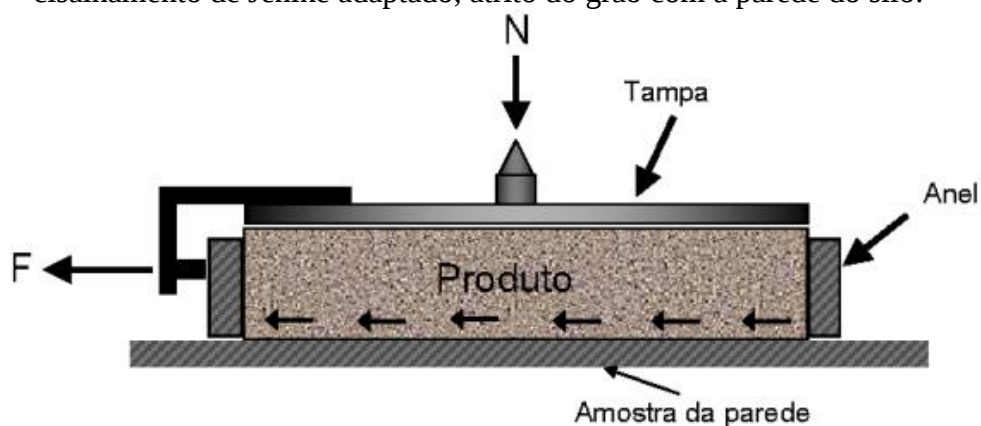
De acordo com as formulações propostas por diversos pesquisadores como Calil Júnior; Cheung (2007), Lopes Neto (2009), Madrona (2008) as principais propriedades a serem determinadas são:

- Peso específico ( $\text{kN/m}^3$ ) ( $\gamma$ );
- Granulometria (mm) ( $d_{max}$  e ( $d_{min}$ );
- Ângulo de repouso do produto ( $^\circ$ ) ( $\varphi_r$ );
- Ângulo estático de atrito de interno ( $^\circ$ ) ( $\varphi_i$ );
- Efetivo Ângulo de atrito interno ( $^\circ$ ) ( $\varphi_e$ );
- Ângulo cinemático de atrito entre o produto e materiais da parede ( $^\circ$ ) ( $\varphi_w$ );
- Função Fluxo instantânea (FF);
- Fator fluxo tremonha (ff);
- Teor de umidade (%);
- Coeficiente K.

O teor de umidade presente nos grãos exerce um papel crucial na determinação de suas características físicas e, conseqüentemente, na qualidade do produto armazenado. Para garantir a durabilidade dos grãos e preservar a integridade da estrutura de armazenamento, é fundamental que o teor de umidade esteja dentro dos limites adequados. No caso do milho, por exemplo, o nível ideal de umidade para armazenamento é de aproximadamente 13%, valor alcançado por meio de processos de secagem e mantido por sistemas de ventilação (Fank, 2017).

A determinação do ângulo de atrito entre as partículas e a parede do silo, conhecido como ângulo de atrito grão-parede ( $\varphi_w$ ), é crucial para a análise do comportamento do material armazenado. Influenciado pela rugosidade das partículas e da parede, o ângulo  $\varphi_w$  é quantificado por meio de ensaios em um aparelho de cisalhamento de Jenike adaptado. Nesses ensaios, a base da célula de cisalhamento é substituída por uma amostra do material da parede, permitindo a determinação do lugar geométrico da parede para diferentes níveis de pressão de confinamento, conforme ilustrado na Figura 10 (Fank, 2017).

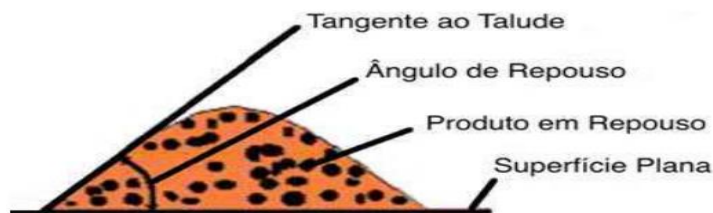
Figura 10 - Ensaio de atrito do grão com a parede do silo com ilustração do aparelho de cisalhamento de Jenike adaptado, atrito do grão com a parede do silo.



Fonte: Fank (2017)

O ângulo de repouso, conforme a Figura 11, é a inclinação máxima que uma pilha de partículas pode atingir sem se desfazer. Essa inclinação é determinada pela interação entre as partículas, sendo influenciada pelo ângulo de atrito interno. Em condições de baixa pressão, esses dois ângulos tendem a ser semelhantes, mas à medida que a pressão aumenta, o ângulo de repouso pode variar (Calil Júnior; Cheung, 2007).

Figura 11 - Representação da determinação do ângulo de repouso



Fonte: Fank (2017)

A função fluxo e o índice de fluxo, propriedades fundamentais para caracterizar a escoabilidade de um material, são cruciais para o projeto de silos. Esses parâmetros permitem estimar a facilidade com que um sólido escoar sob a ação da gravidade e, consequentemente, otimizar processos como descarga, transferência e dosagem. A negligência dessas propriedades pode resultar em problemas como formação de arcos, comprometendo a eficiência e a segurança do sistema de armazenamento (Calil Júnior; Cheung, 2007; Lopes Neto, 2009). A Tabela 2 mostra os valores de características do índice de fluxo para grãos.

Tabela 2 - Classificação do índice de fluxo de produtos sólidos

| <b>ff</b>     | <b>Tipo de fluxo</b> |
|---------------|----------------------|
| $ff < 1$      | Sem fluxo            |
| $1 < ff < 2$  | Muito coesivo        |
| $2 < ff < 4$  | Coesivo              |
| $4 < ff < 10$ | Fácil                |

Fonte: Lopes Neto; Nascimento; Fank (2014)

A Tabela 3 mostra os valores de característicos da função de fluxo para grãos.

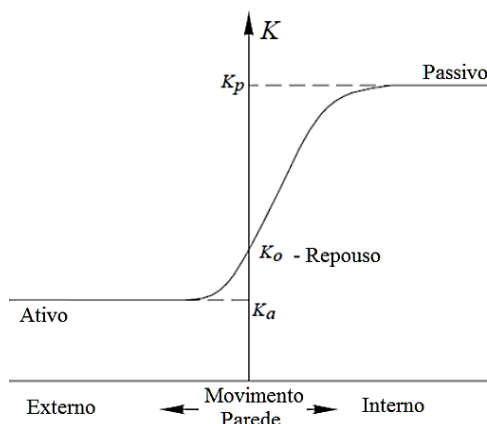
Tabela 3 - Classificação da fluidez dos produtos segundo Jenike

| <b>Função Fluxo</b> | <b>Tipo de fluxo</b> |
|---------------------|----------------------|
| $FF < 2$            | Muito coesivo        |
| $2 < FF < 4$        | Coesivo              |
| $4 < FF < 10$       | Flui facilmente      |
| $FF > 10$           | Fluxo livre          |

Fonte: Calil Junior e Cheung (2007)

A relação entre as pressões verticais e horizontais em silos, representada pelo coeficiente  $K$ , é fundamental para determinar as cargas exercidas nas paredes e no fundo da estrutura. A variação desse parâmetro, influenciada pelo movimento relativo entre o material armazenado e a parede, é objeto de diversos estudos na área, uma vez que sua correta determinação é crucial para garantir a segurança e a durabilidade dos silos (Nascimento, 2009). Conforme ilustrado na Figura 12, os estados tensão associados a  $K$ : estado ativo ( $K_a$ ), estado passivo ( $K_p$ ) e estado em repouso ( $K_o$ ).

Figura 12 - Variação do comportamento do coeficiente K devido à movimentação relativa



Fonte: Calil Junior e Cheung (2007)

Códigos normativos são encontradas diferentes recomendações para a determinação do parâmetro K, como pode ser observado na Figura 13.

Figura 13- Normas e suas respectivas formulações para o parâmetro K

| Norma                            | Equação adotada                                                                                                                     |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Americana ACI 313 (1991)         | $K = \frac{\{1 - \sin \phi_i\}}{\{1 + \sin \phi_i\}}$                                                                               |
| Americana ANSI/ASAE EP433 (2002) | $K = 0,5$                                                                                                                           |
| Australiana AS 3774 (1997)       | $K = \frac{\left(1 + (\sin^2 \phi_e) - 2\sqrt{\sin^2 \phi_e - \mu_w^2 \cos^2 \phi_e}\right)}{(4\mu_w^2 + \cos^2 \phi_e)} \geq 0,35$ |
| Alemã DIN 1055 (2005)            | $K = 1,2 \times \{1 - \sin \phi_i\}$                                                                                                |
| Europeia EN 1991-4 (2006)        | $K = 1,1 \times \{1 - \sin \phi_i\}$                                                                                                |
| Internacional ISO 11697 (1997)   | $K = 1,1 \times \{1 - \sin \phi_i\}$                                                                                                |
| Francesa SNBATI (1975)           | $m = \sqrt{1 - \left(\frac{\tan \phi_w}{\tan \phi_i}\right)^2}$                                                                     |

Fonte: Lopes Neto (2009)

A caracterização precisa das propriedades dos produtos armazenados em silos é fundamental para o dimensionamento adequado da estrutura. A norma BS EN 1991-4:2006

recomenda a realização de ensaios específicos para cada produto. No entanto, para uma análise preliminar, a norma também fornece valores médios para diversos produtos, como o grão de soja. Conforme Tabela 4, esses valores podem servir como referência inicial, mas os ensaios específicos garantem maior precisão e segurança no projeto (Kock, 2018).

Tabela 4 - Valores médios característica de grãos armazenados em silos

| Produto     | Peso específico<br>$\gamma$   |                               | Ângulo de repouso<br>$\phi_r$ | Ângulo de atrito interno<br>$\phi_i$ |         | Relação de pressões laterais<br>$K$ |       | $C_{op}$ |
|-------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|---------|-------------------------------------|-------|----------|
|             | $\gamma_l$                    | $\gamma_u$                    | $\phi_r$                      | $\phi_i$                             | $a\phi$ | $K_i n$                             | $a_K$ |          |
|             | Inferior                      | Superior                      | Graus °                       | Médio                                | Fator   | Médio                               | Fator |          |
|             | $\left(\frac{kN}{m^3}\right)$ | $\left(\frac{kN}{m^3}\right)$ |                               | Graus °                              |         |                                     |       |          |
| Areia       | 14,0                          | 16,0                          | 39                            | 36                                   | 1,09    | 0,45                                | 1,11  | 0,4      |
| Cimento     | 13,0                          | 16,0                          | 36                            | 30                                   | 1,22    | 0,54                                | 1,20  | 0,5      |
| Milho       | 7,0                           | 8,0                           | 35                            | 31                                   | 1,14    | 0,53                                | 1,14  | 0,9      |
| <b>Soja</b> | 7,0                           | 8,0                           | 29                            | 25                                   | 1,16    | 0,63                                | 1,11  | 0,5      |
| Trigo       | 7,5                           | 9,0                           | 34                            | 30                                   | 1,12    | 0,54                                | 1,11  | 0,5      |
| Farinha     | 6,5                           | 7,0                           | 45                            | 42                                   | 1,06    | 0,36                                | 1,11  | 0,6      |

Fonte: Kock (2018)

$\gamma_l$ : Peso específico inferior do grão, em kN/m<sup>3</sup> (peso por unidade de volume do grão, considerando o limite inferior).

$\gamma_u$ : Peso específico superior do grão, em kN/m<sup>3</sup> (peso por unidade de volume do grão, considerando o limite superior).

$\phi_r$ : Ângulo de repouso, em graus (ângulo máximo em que o material pode se manter sem escorregar, relacionado à sua estabilidade).

$\phi_i$ : Ângulo de atrito interno, em graus (ângulo que descreve a resistência ao deslizamento entre as partículas do material dentro do silo).

**K**: Relação de pressões laterais (fator que descreve a relação entre a pressão lateral e a pressão vertical do material armazenado).

**a<sub>x</sub>**: Fatores de correção para o ângulo de repouso ( $a\phi$ ) e para as pressões laterais ( $aK$ ).

$C_{op}$ : Coeficiente de atrito com a parede do silo, adimensional (representa a interação do material com a superfície interna do silo).

### 2.3. CONSTRUÇÃO DE SILOS METÁLICOS

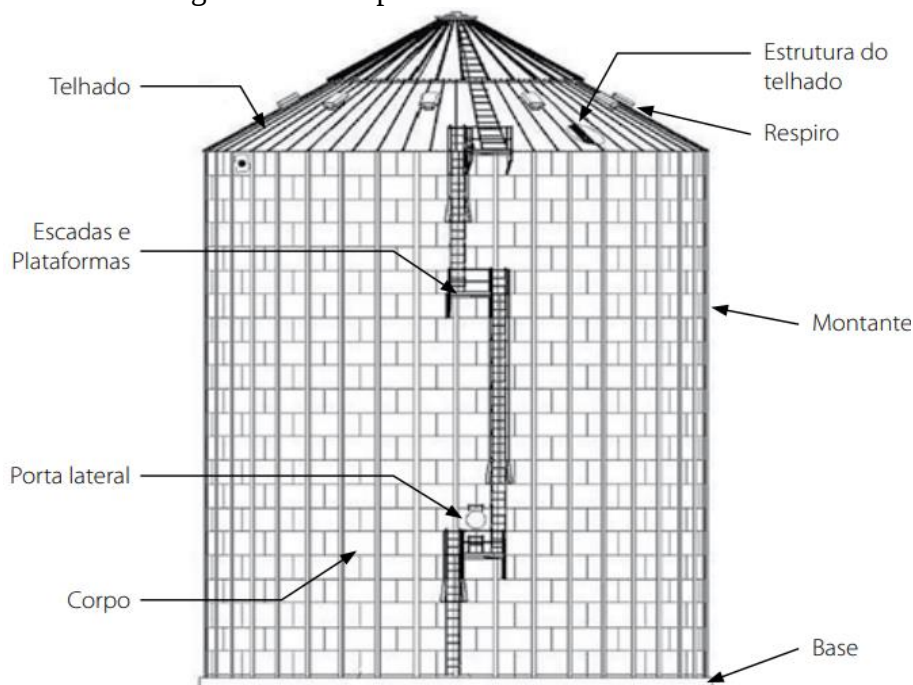
Silos cilíndricos confeccionados com chapas metálicas corrugadas constituem a principal escolha para o armazenamento de produtos granulares tanto no Brasil quanto em diversos países industrializados. Sua ampla utilização pode ser atribuída, em grande parte, aos custos de construção relativamente baixos e à facilidade de montagem (Fank, 2017).

A concepção de um silo envolve tanto a análise estrutural quanto a análise do fluxo de material. A análise estrutural tem como objetivo dimensionar a estrutura para que ela resista aos esforços atuantes, evitando o atingimento dos estados limites últimos e de serviço. A análise do fluxo, por sua vez, busca otimizar a geometria do silo e as condições de descarga para garantir a fluidez do material e evitar problemas de obstrução (Madrone, 2008).

#### 2.3.1. Estrutura metálica

Segundo Scalabrin (2008), os silos metálicos são divididos em partes: telhado e corpo. Conforme ilustra a Figura 14.

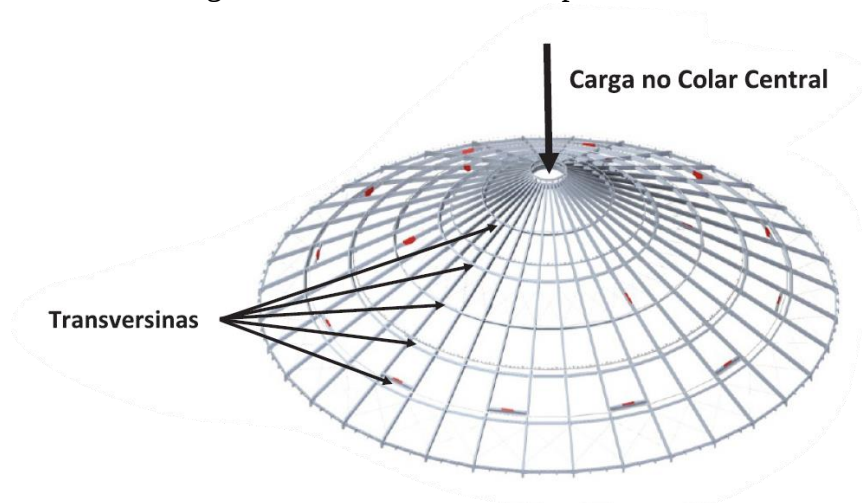
Figura 14 - Componentes de um silo metálico



Fonte: Heming (2016)

A cobertura dos silos é composta por telhas, que podem ser autoportantes ou apoiadas na estrutura, conforme a figura 15. A padronização da quantidade de telhas por chapa lateral é comum na indústria, com a maioria das empresas optando por 3 ou 4 telhas por chapa. As chapas do telhado são revestidas em Galvalume, este revestimento segue a norma ASTM A792 (KeplerWeber, 2024).

Figura 15: Estrutura metálica para telhados de silos.



Fonte: Informativo Técnico KeplerWeber (2024)

O corpo do silo possui como componentes principais três elementos estruturais chapas metálicas, montantes e anéis de reforço.

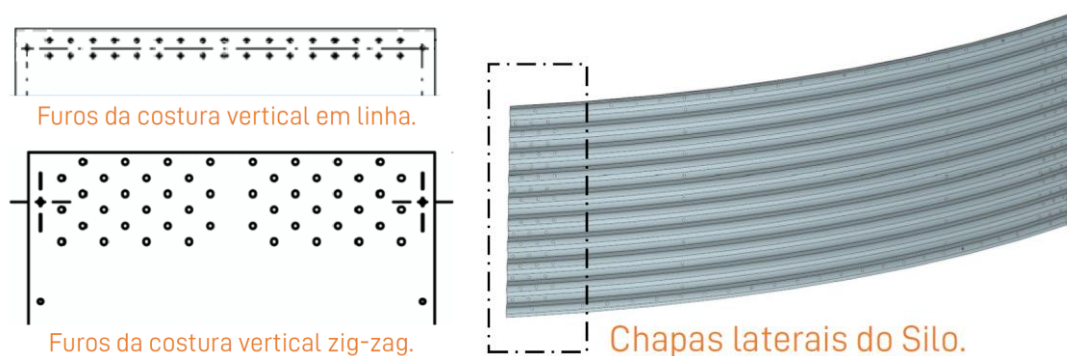
A escolha dos materiais para a construção de silos metálicos é crucial para garantir a durabilidade e a segurança da estrutura. As chapas laterais, por exemplo, são comumente fabricadas em aço galvanizado ZAR, conforme a NBR 7008-1 - Chapas e bobinas de aço revestidas com zinco ou liga de zinco-ferro pelo processo contínuo de imersão a quente - Parte 1: Requisitos (ABNT, 2021), com revestimentos de zinco Z-275 ou Z-350. Essa escolha se justifica pela alta resistência e durabilidade do material, proporcionando proteção contra a corrosão (Scalabrin, 2008).

As chapas laterais dos silos, geralmente perfiladas com ondas de 101,6 mm de comprimento e 12 mm de altura, são unidas para formar anéis que compõem a estrutura principal. Para otimizar a produção, a maioria das empresas adota um comprimento padrão para as chapas, influenciando diretamente os diâmetros dos silos, conforme Figura 16.

A influência de padrões construtivos norte-americanos é evidente no setor de silos brasileiro. O comprimento padrão das chapas, comumente utilizado, é de 2,873 metros, uma medida diretamente relacionada à adoção de normas americanas.

A altura útil das chapas, determinada pela largura da bobina e pelo perfil da ondulação, influencia diretamente a altura total dos silos. Para otimizar a produção, as alturas dos silos são geralmente múltiplas da altura útil das chapas.

Figura 16: Modelo de Chapa corrugada e seus métodos de furação



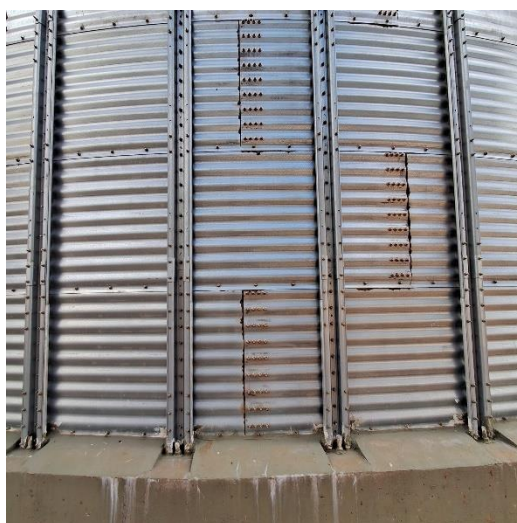
Fonte: Informativo Técnico KeplerWeber (2024)

A espessura das chapas varia de acordo com as exigências de cada projeto, sendo comum o uso de chapas com espessuras entre 0,80 mm e 3,00 mm. Para atender a projetos que demandam maior espessura, as chapas podem ser sobrepostas, alcançando até 6,00 mm (Scalabrin, 2008).

Segundo Scalabrin (2008), os montantes, ou colunas, são elementos estruturais fundamentais dos silos. A quantidade de montantes por chapa lateral varia de acordo com o projeto, sendo comum a utilização de dois montantes por chapa. A padronização dos perfis e da quantidade de montantes contribui para a otimização da produção e a redução de custos.

Diferentemente de montantes não enrijecidos, os perfis dos montantes Kepler Weber possuem sua seção totalmente efetiva, conferindo-lhes assim maior leveza e maior rigidez estrutural. A sua produção é feita pelo processo de perfilação, o que garante uniformidade dimensional às peças. Esta uniformidade reflete na facilidade de montagem e na segurança estrutural do silo como um todo (KeplerWeber, 2024). Conforme a Figura 17.

Figura 17: Montantes de silo metálico KeplerWeber



Fonte: Autor (2024)

Os montantes dos silos são comumente fabricados em aço ARC-600, devido ao seu bom custo-benefício. No entanto, outros aços, como o SAE-1008, também podem ser utilizados. A Tabela 5 apresenta as propriedades mecânicas dos aços ZAR e ARC-600, que são os mais utilizados na construção de silos (Scalabrin, 2008).

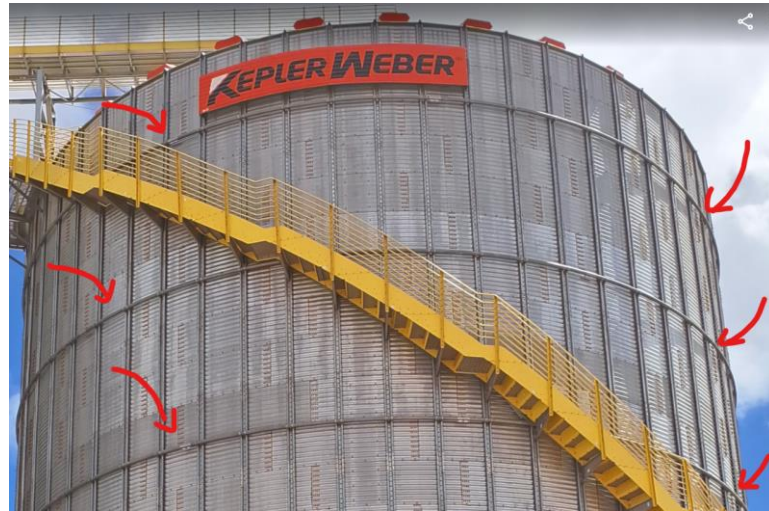
Tabela 5 - Propriedades Mecânicas dos Aços

| Aço     | Resistência ao escoamento $f_y$ (MPa) | Resistência à ruptura $f_u$ (MPa) |
|---------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| ZAR 230 | 230                                   | 310                               |
| ZAR 250 | 250                                   | 360                               |
| ZAR 280 | 280                                   | 380                               |
| ZAR 320 | 320                                   | 390                               |
| ZAR 345 | 345                                   | 430                               |
| ZAR 400 | 400                                   | 450                               |
| ZAR 550 | 550                                   | 570                               |
| ARC 600 | 480                                   | 600                               |

Fonte: adaptação da NBR 7008 (2021)

Anéis de reforço são elementos usados para enrijecer o silo quando ele está sujeito a pressões de vento que não podem ser absorvidas somente pelo conjunto chapa lateral e montante. Ademais, são projetados para conferir ao silo uma resistência à flambagem, quando há ocorrências de rajadas de ventos com velocidades de até 144 km/h (KeplerWeber, 2024). Na Figura 18 está representado um exemplo de anel de reforço.

Figura 18: Anéis de reforço em um silo KeplerWeber



Fonte: Autor (2024)

A união das peças que compõem o silo é realizada por meio de parafusos com acabamento galvanizado ou bicromatizado, garantindo maior resistência à corrosão. O parafuso ISO 7411 – grau 8.8 é o mais utilizado, devido à sua alta resistência e disponibilidade no mercado (Scalabrin, 2008).

#### 2.4. FUNDAMENTOS DAS FORÇAS ATUANTES EM SILOS

A norma brasileira NBR 8800 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios (ABNT, 2008) estabelece as diretrizes para o projeto de estruturas de aço. Um aspecto crucial nesse processo é a consideração das diversas combinações de ações que podem atuar sobre a estrutura, garantindo sua segurança e desempenho adequado ao longo de sua vida útil. Assim, a NBR 8800/2008 determina as variáveis de ponderação e essas combinações representam o carregamento que a estrutura estará sujeita. Portanto, para combinações últimas normais, é utilizada a Equação 1 a seguir.

$$F_d = \sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{k1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \phi_{0j} F_{Qj,k}) \quad (1)$$

Em que:

$F_d$  – combinações de forças ultimas normais;

$F_{Gi,k}$  – valores característicos das ações permanentes;

$F_{Q1,k}$  - valor característico da ação variável, considerada principal da combinação;

$F_{Qj,k}$  – valores característicos das ações variáveis que podem atuar concomitante com a ação variável principal;

$\gamma_{gi}, \gamma_{k1}, \gamma_{qj}$  – valores de coeficientes de ponderação das ações;

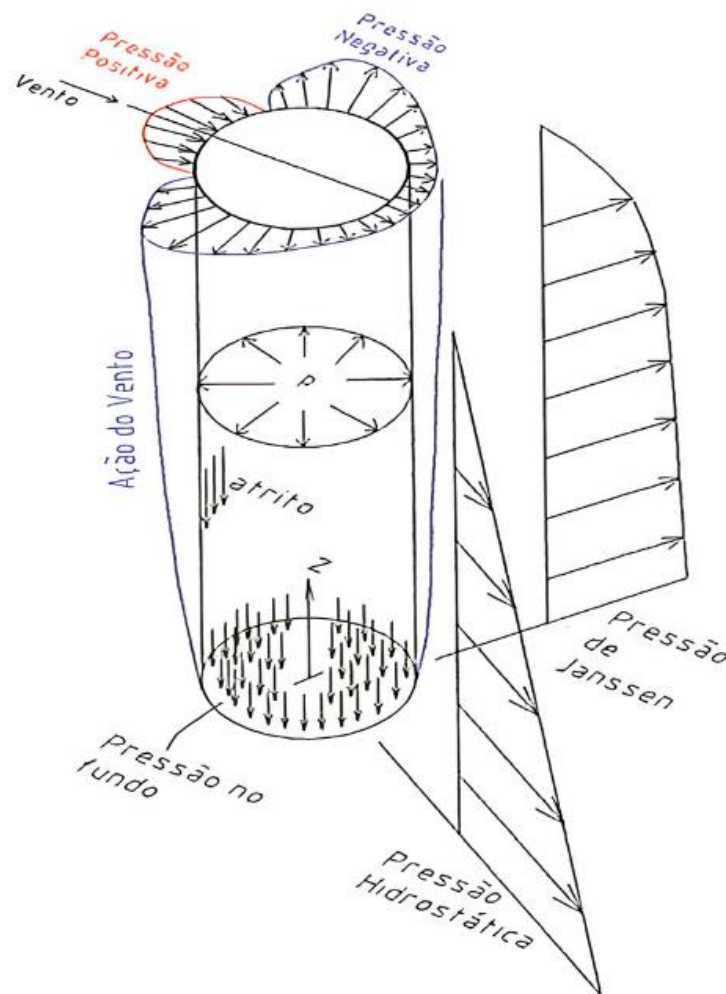
$\phi_{0j}$  – fator de combinação das ações.

A NBR 8800/2008 prescreve que cada uma das combinações deve estar incluída as principais cargas permanentes e variáveis, com seus coeficientes característicos e as ações secundárias e seus valores reduzidos de combinação, como também coeficientes de ponderação e os fatores de combinação para cargas permanentes e variáveis, considerando a variabilidade e simultaneidade das ações.

Calil Júnior e Cheung (2007), NBR 14762 (2010) e Kock (2018) classificaram as ações para silos nos seguintes três grupos:

- Ações permanentes: são constituídas pelo peso próprio da estrutura, da plataforma e dos equipamentos mecânicos instalados na cobertura e suspensos pela tremonha.
- Ações variáveis devem ser consideradas, pelo menos, as três ações variáveis de naturezas diferentes, conforme ilustra Figura 19:
  - Pressões devidas ao produto armazenado: essas pressões são consideradas como cargas de longa duração. Exemplo: pressões estáticas, dinâmicas, insuflação de ar, dilatação térmica do produto etc.;
  - Ações térmicas: as ações térmicas são consideradas como cargas de média duração e incluem os efeitos climáticos e os efeitos do armazenamento de produtos quentes,
  - Ações do vento: é uma carga de longa duração, devendo ser considerada de acordo com a NBR 6123 - Forças devidas ao vento em edificações (ABNT, 2023).
- Ações excepcionais:
  - Impacto de veículos: quando não for prevista proteção adequada de colisão de veículos com a estrutura de suporte ou com o silo, forças de impacto apropriadas devem ser aplicadas à estrutura
  - Pressão de explosão de pós: os silos podem ser usados para armazenar produtos que podem causar explosões. Essas devem ser evitadas ou limitadas pela incorporação de aberturas de ventilação de ar e pelo cálculo da estrutura para resistir a alguma sobrepressão de explosão quando isto for julgado necessário. Essa pressão pode ser maior que 1 MPa.

Figura 19 – Principais ações em um silo de fundo plano



Fonte: Kock (2018)

#### 2.4.1. Ação do vento

A variabilidade do vento ao longo do tempo e do espaço torna a previsão de suas ações sobre as estruturas uma tarefa complexa. Silos cilíndricos de metal, devido à sua geometria, são particularmente suscetíveis aos efeitos do vento, especialmente quando estão vazios. Essa vulnerabilidade tem sido responsável por numerosos acidentes, evidenciando a necessidade de estudos mais aprofundados sobre o comportamento desses equipamentos sob a ação de cargas eólicas (Calil Júnior; Cheung, 2007).

Em silos, deve-se garantir que o vento não causará os modos de ruptura mostrados nas Figuras 21 e 22.

Figura 20 - Falha por arrancamento da cobertura e ovalização da seção

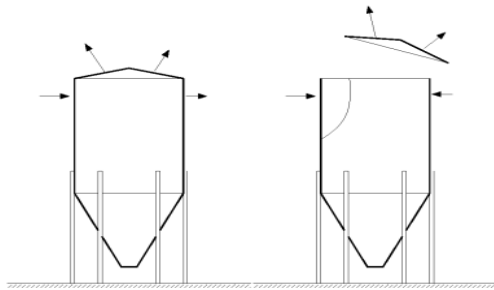
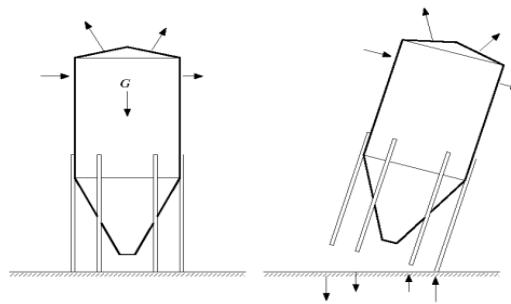


Figura 21 - Falha por tombamento do silo, devido à força de arrasto



Fonte: Calil Junior e Cheung (2007)

Conforme a norma brasileira NBR 6123 (2023) a magnitude da força do vento que atua sobre uma construção está diretamente relacionada à diferença de pressão entre as faces opostas da edificação, conforme Equação 02, esta é formada pelas equações (3) e (4) todas segundo a NBR 6123. A Força de arrasto para silos é obtida pela Figura 22.

$$F_a = C_a q A_e \quad (2)$$

Sendo:

$$q = 0,613 \times V_k^2 \quad (3)$$

$$V_k = V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_3 \quad (4)$$

Figura 22 - Coeficientes de arrasto  $C_a$  para corpos de seção constante segundo NBR 6123 (2023)

Vento perpendicular ao plano da figura

Seção transversal

$Re \times 10^{-5} a$

$h / \ell_1$

1/2

1

2

5

10

20

$\infty$

Liso (metal,  
concreto, alvenaria  
rebocada)

$\leq 3,5$

0,7

0,7

0,7

0,8

0,9

1,0

1,2

$\geq 4,2$

0,5

0,5

0,5

0,5

0,5

0,6

0,6

Com rugosidades  
ou saliências  
 $= 0,02 \ell_1$

Todos  
valores

0,7

0,7

0,8

0,8

0,9

1,0

1,2

Com rugosidades  
ou saliências  
 $= 0,08 \ell_1$

Todos  
valores

0,8

0,8

0,9

1,0

1,1

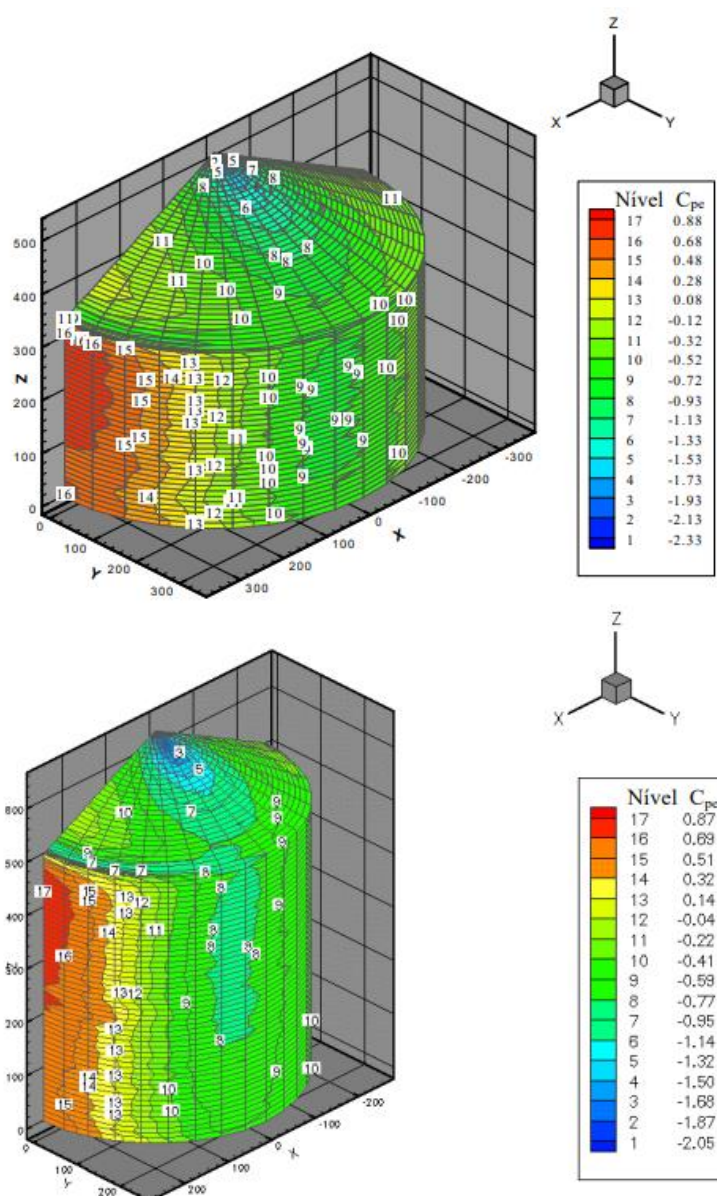
1,2

1,4

Fonte: NBR 6123 (2023)

Andrade Junior (2002), após realização de ensaios em túnel de vento, recomendou os coeficientes de pressão externos para silos lisos e com colunas externas. Concluiu também que é vantajoso o posicionamento das colunas externamente, porque reduz pela metade as pressões nas laterais do corpo cilíndrico. Um ônus seria o acréscimo da força de arrasto, mas isso não aumenta a ancoragem do silo significativamente em relação ao benefício de se ter um alívio das pressões nas laterais do silo. Na Figura 23 está exemplificado como foi obtidos os resultados.

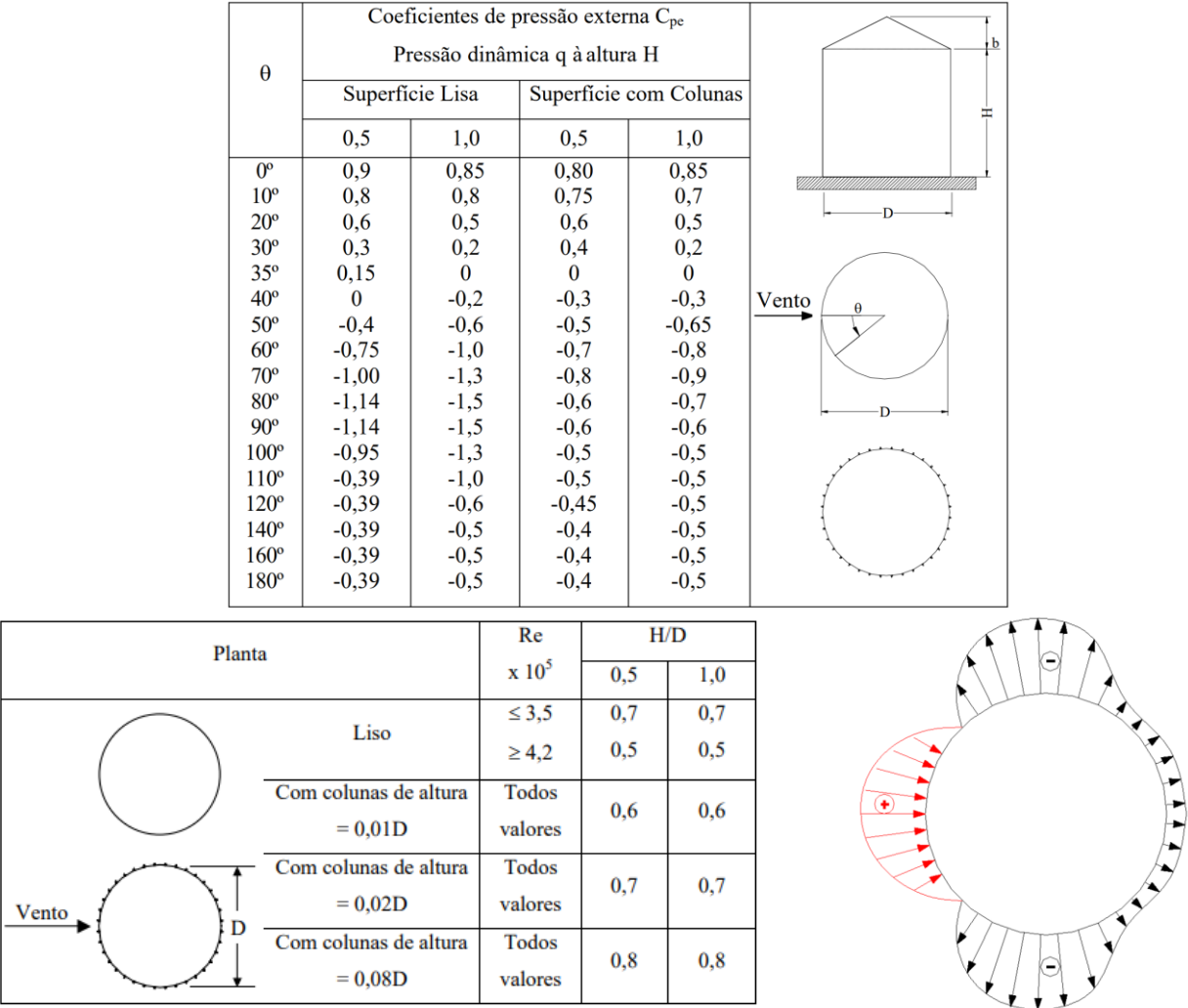
Figura 23 - Resultado da  $C_{pe}$  encontrado para silos baixos e medianamente esbeltos



Fonte: Andrade Junior (2002)

Andrade Junior (2002) discute os coeficientes de arrasto em silos, comparando os valores propostos pela NBR 6123 (ABNT, 2023) com os resultados obtidos em sua pesquisa. O autor sugere ajustes nos coeficientes para silos com colunas externas, com base em suas análises em tuneis de vento. Na Figura 24 estão os coeficientes com as majorações proposta por Andrade Junior (2002).

Figura 24 - Coeficientes de pressão ( $C_{pe}$ ) e de arrasto ( $C_a$ ) em edificações cilíndricas



Fonte: Andrade Junior (2002)

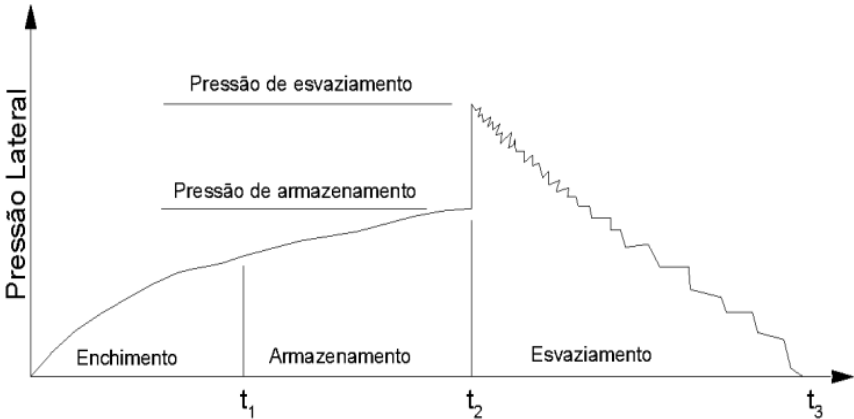
#### 2.4.2. Pressão dos grãos

A distribuição de pressões em estruturas de armazenamento, especialmente silos, tem sido objeto de intensas pesquisas. No entanto, a diversidade de propriedades dos produtos

armazenados dificulta a previsão precisa das tensões exercidas sobre as paredes e o fundo, particularmente durante o processo de descarga (Fank, 2017).

Segundo Calil Júnior e Cheung (2007), as pressões exercidas pelos produtos armazenados sobre as paredes dos silos variam tanto no espaço quanto no tempo. Ao longo da vida útil de um silo, a distribuição dessas pressões é influenciada pelos ciclos de enchimento, armazenamento e descarga. A pressão em um ponto específico do silo é determinada por diversos fatores, incluindo as propriedades físicas do produto armazenado, a geometria do silo e as condições de operação, conforme Figura 25.

Figura 25 - Padrão de pressões na parede do silo para um ciclo de carregamento



Fonte: Calil Junior e Cheung (2007)

Segundo Calil Júnior e Cheung (2007), a Tabela 6 apresenta um compilado de fatores que, segundo a literatura, exercem influência sobre a distribuição de pressões em silos. A interação desses fatores gera padrões de fluxo específicos, evidenciando a complexidade do fenômeno e a importância de uma análise detalhada das variáveis envolvidas.

Tabela 6 - Fatores que influenciam na variabilidade dos produtos armazenados.

| Propriedades dos Produtos           | Propriedades dos Silos     | Operação                       |
|-------------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| Densidade do produto                | Altura do enchimento       | Velocidade de enchimento       |
| Ângulo de atrito Interno            | Forma da seção transversal | Velocidade de esvaziamento     |
| Ângulo de atrito com a parede       | Geometria do esvaziamento  | Método de intervenção no fluxo |
| Tamanho da partícula e distribuição | Obstrução interna          | Método de enchimento           |
| Propriedades elásticas              | Rigidez das paredes        | Método de esvaziamento         |
| Resistência ao cisalhamento         | Rugosidade da parede       | Excentricidade do enchimento   |
| Coesão e Consolidação               |                            | Excentricidade do esvaziamento |
| Umidade e Temperatura               |                            |                                |

Fonte: Calil Junior e Cheung (2007)

### 2.4.3. Peso próprio

A norma NBR11888 - Bobinas e chapas finas a frio e a quente de aço carbono e de aço de alta resistência e baixa liga - Requisitos gerais (ABNT, 2018) estabelece os critérios para determinar as propriedades das chapas de aço, como espessura e densidade, informações essenciais para calcular o peso próprio de componentes estruturais como silos. Conforme mostra Tabela 7.

Tabela 7 - Espessuras padronizadoras de chapas de aço pela NBR 11888:2018

| Espessura (mm) | Massa por m <sup>2</sup> (kg) | Espessura (mm) | Massa por m <sup>2</sup> (kg) | Espessura (mm) | Massa por m <sup>2</sup> (kg) |
|----------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|
| 0,30           | 2,36                          | 1,00           | 7,85                          | 2,25           | 17,66                         |
| 0,38           | 2,98                          | 1,06           | 8,32                          | 2,65           | 20,80                         |
| 0,40           | 3,14                          | 1,20           | 9,42                          | 2,80           | 23,55                         |
| 0,45           | 3,53                          | 1,35           | 10,60                         | 3,00           | 26,30                         |
| 0,60           | 4,71                          | 1,50           | 11,78                         | 3,25           | 29,44                         |
| 0,75           | 5,89                          | 1,70           | 12,94                         | 3,50           | 33,36                         |
| 0,80           | 6,28                          | 1,80           | 14,13                         | 3,75           | 35,32                         |
| 0,85           | 6,67                          | 1,90           | 14,53                         | 4,00           | 37,29                         |
| 0,90           | 7,06                          | 2,00           | 15,70                         | 4,25           | 39,25                         |

Fonte: NBR 11888 (2018)

A escolha da carga distribuída para o cálculo do peso próprio do telhado varia de acordo com o tipo de estrutura. Para telhados autoportantes conforme Figura 26 e Figura 27, comuns em silos menores, uma carga de 0,25 kN/m<sup>2</sup> é recomendada. Já para telhados com estrutura de suporte conforme Figura 27, como aqueles encontrados em silos de maior diâmetro, a carga recomendada é de 0,35 kN/m<sup>2</sup> (Scalabrin, 2008).

Figura 26 - Telhados autoportantes de silo



Fonte: Scalabrin, (2008)

Figura 27 - Telhados com estrutura de suporte de silo



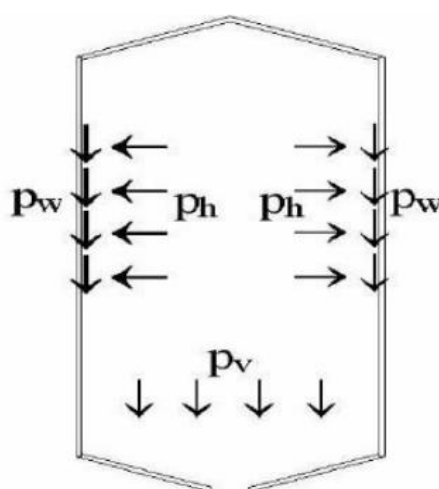
Fonte: Scalabrin, (2008)

## 2.5. CÁLCULO DAS PRESSÕES EM SILOS

A distribuição de pressões em silos é um fenômeno complexo, influenciado por diversos fatores, como as propriedades do material armazenado, as dimensões do silo e as condições de carregamento e descarregamento. A determinação precisa dessas pressões é essencial para garantir a segurança e durabilidade da estrutura (Palma e Calil Junior, 2008).

O material armazenado em um silo exerce sobre as paredes verticais forças perpendiculares à superfície  $P_h$  (pressões horizontais) e forças tangenciais devido ao atrito  $P_w$ , (pressões de atrito). No fundo do silo, a força atuante é  $P_v$  (pressão vertical), conforme mostrado na figura 28. A intensidade e distribuição dessas forças variam durante as fases de carregamento, armazenamento e descarga, exigindo análises específicas para cada etapa (Fank, 2017).

Figura 28 - Pressões atuantes no corpo e fundo do silo



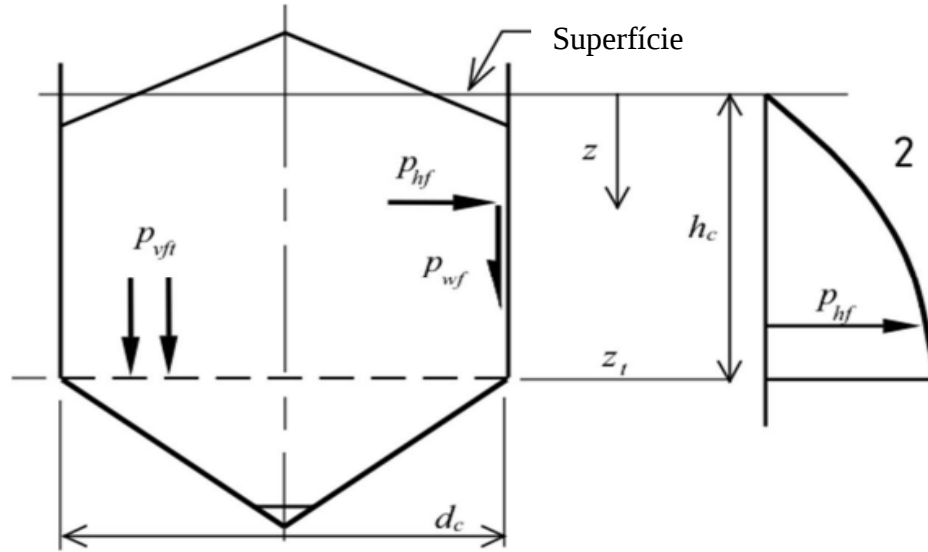
Fonte: Palma e Calil Junior (2008)

A teoria de Janssen (1895) é um marco fundamental na análise de pressões em silos. Apesar das simplificações, ela continua sendo amplamente utilizada na prática. Neste estudo, revisamos as bases dessa teoria e discutimos sua importância no projeto de silos (Fank, 2017).

#### 2.5.1. Teorema de Janssen

A maioria das normas utilizadas para o cálculo das pressões estática e dinâmica em silos verticais baseia-se na teoria de Janssen (Maciel, 2002). O modelo de Janssen (1895) assume que o atrito em silos é constante e que o material armazenado não se comprime, hipóteses que são frequentemente contestadas (Calil Júnior; Cheung, 2007). A Figura 29 mostra a relação das pressões.

Figura 29 - relação das pressões na teoria Janssen



Fonte: Madrona (2008)

Os valores da pressão horizontal  $P_{hf}$ , conforme equação (5), pressão de atrito na parede  $P_{wft}$ , conforme equação (6), e pressão vertical  $P_{vft}$ , conforme equação (7), a qualquer profundidade após o enchimento e durante o armazenamento, são:

$$P_{hf}(z) = P_{ho} \times Y_j(z) \quad (5)$$

$$P_{wft}(z) = \mu \times P_{ho} \times Y_j(z) \quad (6)$$

$$P_{vft}(z) = \frac{P_{ho}}{K} \times Y_j(z) \quad (7)$$

Em que:

$$P_{ho} = \gamma \times K \times z_0 \quad (8)$$

$$z_0 = \frac{1}{K \times \mu} \times \frac{A}{U} \quad (9)$$

$$Y_j(z) = 1 - e^{-\frac{z}{z_0}} \quad (10)$$

Segundo Madrona (2008), considerações da teoria são:

- Pressão vertical é constante no plano horizontal;
- Relação entre as pressões horizontais e verticais, conhecidos como parâmetro constante;
- Ângulo de atrito entre produto armazenado e parede vertical constante;
- Paredes verticais do corpo do silo totalmente rígidas;

- Peso específico do produto armazenado uniforme;

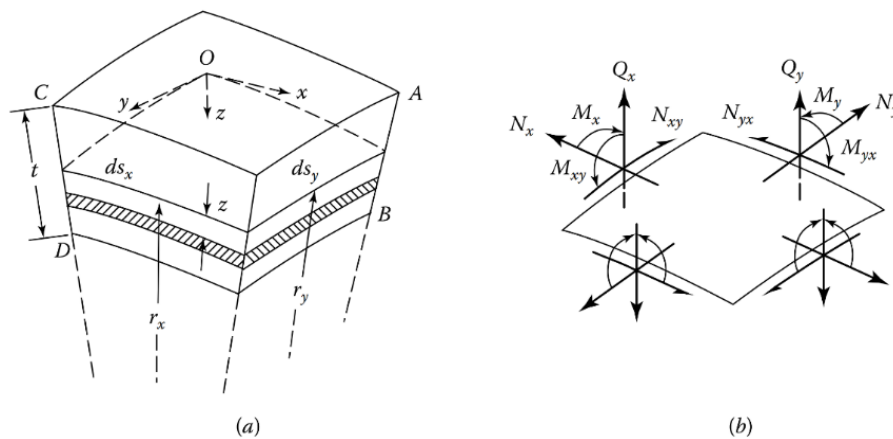
Ao contrário da pressão hidrostática, que aumenta linearmente com a profundidade, a pressão de atrito exercida por um produto armazenado em um recipiente cresce de forma exponencial até atingir um valor máximo, comprimindo as paredes do recipiente, conforme descrito por Madrona (2008).

## 2.6. CÁLCULO DE TENSÕES – TEÓRIA DAS PLACAS

As equações e metodologias de cálculos são baseados nos trabalhos de Timoshenko e Woinowsky-Krieger (1989) e Ugural (2010). Nesses trabalhos são abordados o fenômeno das tensões em cascas conforme a Figura 30.

Figura 30 - Elemento de casca e resultado de tensões no elemento de casca

(a) Elemento de casca; (b) resultantes de tensão no elemento da casca



Fonte: Ugural (2010)

Para relacionar as tensões resultantes com a deformação da casca  $\sigma_y$ ,  $\sigma_x$ , e  $\tau_{xy}$  devem ser avaliados em termos de deformações. De acordo com nossa suposição, a tensão direcionada z é negligenciada,  $\sigma_z = 0$ . A lei de Hooke é então escrita como:

$$\sigma_x = \frac{E}{1 - \nu^2} (\epsilon_x + \nu \epsilon_y) \quad (11)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1 - \nu^2} (\epsilon_y + \nu \epsilon_x) \quad (12)$$

$$\tau_{xy} = \gamma_{xy} G \quad (13)$$

Estamos agora em condições de expressar as tensões compostas numa casca produzidas pelas forças e momentos. Para este propósito o resultado é:

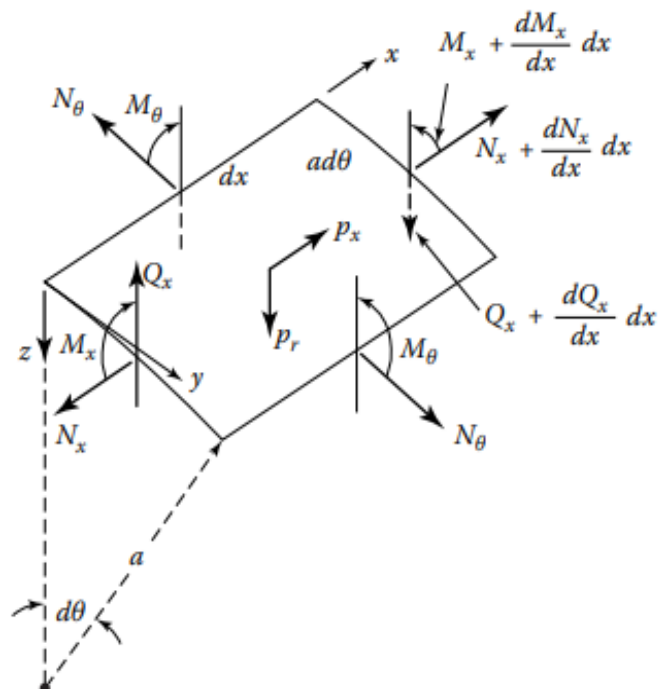
$$\sigma_x = \frac{N_x}{t} + \frac{12M_x z}{t^3} \quad (14)$$

$$\sigma_y = \frac{N_y}{t} + \frac{12M_y z}{t^3} \quad (15)$$

$$\tau_{xy} = \frac{N_{xy}}{t} + \frac{12M_{xy} z}{t^3} \quad (16)$$

Abordando cascas cilíndricas circulares carregadas axissimetricamente como tubulações, tanques, caldeiras e vários outros vasos sob pressão interna. Por causa da simetria, um elemento cortado de um cilindro ou raio  $a$  terá atuado sobre ele apenas as resultante de tensões mostradas na Figura 30:  $N_\theta$ ,  $M_\theta$ ,  $N_x$  e  $Q_x$ . Além disso, a força circunferencial e o momento,  $N_\theta$  e  $M_\theta$ , não varia com  $\theta$ . O deslocamento circunferencial  $v$  portanto desaparece, e precisamos considerar apenas os deslocamentos  $x$  e  $z$ ,  $u$  e  $w$ . Sujeito às simplificações anteriores, apenas três das seis equações e equilíbrio do elemento de casca permanecem por satisfazer. Suponha também que o carregamento externo seja conforme mostrado na Figura 32. O equilíbrio das forças nas direções  $x$  (axial) e  $z$  (radial) agora exige como solução as equações 17, 18 e 19.

Figura 31 - Tensão resultante em elemento de casca cilíndrica circular carregada axissimetricamente.



Fonte: Ugural (2010)

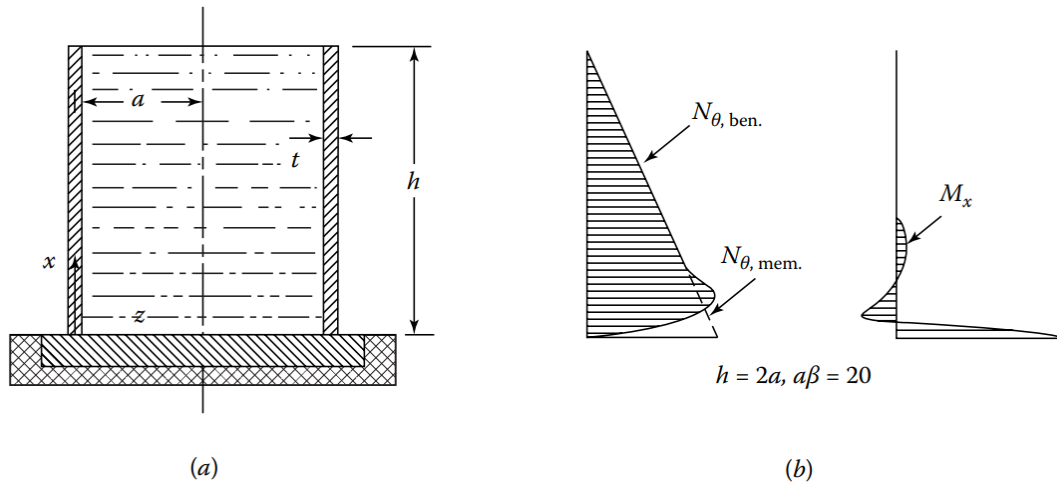
$$\frac{dN_x}{dx} + p_x = 0 \quad (17)$$

$$\frac{dQ_x}{dx} + \frac{1}{a}N_\theta + p_r = 0 \quad (18)$$

$$\frac{dM_x}{dx} - Q_x = 0 \quad (19)$$

Estruturas cilíndricas como Silos podem ser tratados por um procedimento semelhante ao descrito nas seções anteriores. Estes tanques com placas de fundo rígidas ou não rígidas apoiadas no solo, tanques com teto e fundo elásticos e tanques construídos com placas de diversas espessuras constantes diferentes Conforme Figura 31. No caso de tanques com espessura de parede variável, a solução do problema requer a integração da equação de condições de deslocamento. A rigidez flexural  $D$  e a espessura  $t$  devem ser consideradas não mais como constante, mas como funções da distância axial  $x$ . Assim, devemos lidar com a Equação 21 que é diferencial linear de quarta ordem e coeficiente variável, exigindo manipulação demorada.

Figura 32 – Resultantes de tensão em caixa d'água cilíndrica com base fixada



(a) Caixa d'água cilíndrica com base fixada; (b) resultantes de tensão

Fonte: Ugural (2010)

Porém, em silos metálicos costuma ser comum a escolha de uma variação linear de espessura aumentando de cima para baixo. A solução torna-se assim mais gerenciável. Consideramos aqui um tanque cilíndrico de espessura uniforme inteiramente preenchido com líquido de peso específico  $\gamma$  conforme a Figura 32. Supõe-se que o fundo do tanque esteja

embutido e o topo esteja aberto. As condições físicas indicam que a borda superior está livre para se deformar e que não existe força ali ( $N_x = 0$ ). Na borda inferior, localizando as coordenadas na figura, temos:

$$\frac{dw}{dx} = 0 \quad w = 0 \quad (x = 0) \quad (20)$$

A equação diferencial é da Equação 22:

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 4\beta^4 w = \frac{P_r}{D} \quad (21)$$

Onde a pressão externa atuando em qualquer ponto da parede,  $P_r$ , é substituída por  $-\gamma(h - x)$ . A solução particular da Equação 21 é  $-\gamma(h - x)a^2/Et$ . A solução geral é assim:

$$w = e^{-\beta x}(C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x) + e^{\beta x}(C_3 \cos \beta x + C_4 \sin \beta x) - \frac{\gamma(h - x)a^2}{Et} \quad (22)$$

Se (t) for pequeno em relação à (a) e (h), como geralmente é o caso, uma fatia longitudinal de largura unitária do cilindro pode ser considerada infinitamente longa. Já foi observado que como  $w$  deve ser finito para todo  $x$ ,  $C_3 = C_4 = 0$  na expressão acima. Satisfazemos agora as condições restantes. Na substituição das Equações 22 pelas equações 23, 24 e 25.

$$w = C_1 - \frac{\gamma a^2 h}{Et} = 0 \quad (23)$$

$$\frac{dw}{dx} = \beta(C_2 - C_1) + \frac{\gamma a^2}{Et} = 0 \quad (24)$$

Do qual:

$$C_1 = \frac{\gamma d^2 h}{Et} \quad C_2 = \frac{\gamma a^2}{Et} \left( h - \frac{1}{\beta} \right) \quad (25)$$

A deflexão radial do tanque é então definida por:

$$w = -\frac{\gamma a^2 h}{Et} \left\{ 1 - \frac{x}{h} - e^{-\beta x} \left[ \cos(\beta x) + \left( 1 - \frac{1}{\beta h} \right) \sin(\beta x) \right] \right\} \quad (26)$$

A deflexão em qualquer ponto é facilmente determinada a partir da equação acima. A Equação 21, após integração, fornece o deslocamento axial onde a constante, de  $u(0) = 0$ , é  $u = 0$ .

$$u = \int_0^h v \frac{w}{a} dx + u_0 \quad (27)$$

Segundo Ugural (2010), a seguir estão as tensões resultantes para tanques cilíndricos e podem ser aplicados para silos de chapas lisas e sem montantes.

$$N_{\theta} = -\frac{Etw}{a} = \gamma ah \left[ 1 - \frac{x}{h} - f_4(\beta x) - \left( 1 - \frac{1}{\beta h} \right) f_2(\beta x) \right] \quad (28)$$

$$M_x = -D \frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{2\beta^2 \gamma a^2 Dh}{Et} \left[ -f_2(\beta x) + \left( 1 - \frac{1}{\beta h} \right) f_4(\beta x) \right] \quad (29)$$

$$M_{\theta} = \nu M_x \quad (30)$$

O momento fletor máximo ocorre no fundo do tanque, em  $x = 0$ , conforme Equação 32:

$$M_{x,max} = \left( 1 - \frac{1}{\beta h} \right) \frac{2\beta^2 \gamma a^2 Dh}{Et} \quad (31)$$

A tensão resultante  $N_{\theta}$ , de acordo com a teoria da membrana é:

$$N_{\theta} = \gamma(h - x)a \quad (32)$$

Em  $x = 0$ ,  $N_{\theta}$  assume seu valor máximo  $N_{\theta,max} = \gamma ha$ . Da teoria da membrana, a tensão máxima é, portanto:

$$\sigma_{\theta,max} = \frac{\gamma ha}{t} \quad (33)$$

Observamos que a força resultante correspondente à solução particular,  $w_p = -\gamma(h - x)a^2/Et$ , da Equação 28, 29 e 30, é:

$$N_{\theta} = -\frac{Etw_p}{a} = \gamma(h - x)a \quad (34)$$

O acima está de acordo com a Equação 32, que foi derivada pela aplicação da teoria da membrana. De acordo com a teoria da flexão, porque  $N_{\theta} = 0$  e  $M_x$  é máximo em  $x = 0$ .

$$\sigma_{x,max} = \frac{6M_{x,max}}{t^2} = \frac{12\beta^2 \gamma a^2 Dh}{Et^3} \left( 1 - \frac{1}{\beta h} \right) \quad (35)$$

Introduzindo  $D = Et^3/12(1 - \nu^2)$  e  $\beta^2 = \sqrt{3(1 - \nu^2)}/at$  acima e tratando os termos  $1/\beta h$  e  $\nu^2$  como pequenos em comparação com a unidade, temos:

$$\sigma_{x,max} = \frac{\sqrt{3}}{t} \gamma ha \quad (36)$$

Comparando as Equações 34 e 37, observa-se que a verdadeira tensão máxima é de fato  $\sqrt{3}$  vezes maior do que aquela predicada pela teoria da membrana.

Um gráfico das Equações 28, 29, 30 e 32 é apresentado na Figura 32, onde as linhas tracejadas e sólidas denotam a distribuição da tensão resultante de acordo com as teorias de membrana e flexão, respectivamente. A figura mostra que a teoria da membrana é válida em

seções afastadas da extremidade fixa de um cilindro longo e fino. Para um cilindro comparativamente curto e de paredes espessas, entretanto, as diferenças nos resultados dados pelas teorias são pronunciadas na metade inferior da casca. Em qualquer caso, a teoria da membrana aplica-se razoavelmente bem à parte superior do tanque.

## 2.7. MÉTODO COMPUTACIONAL - ELEMENTOS FINITOS

O conceito de "elemento finito" foi introduzido pela primeira vez na literatura científica em 1960 por Ray W. Clough, um pesquisador da Universidade da Califórnia. A partir dessa seminal contribuição, a metodologia dos elementos finitos (MEF) ganhou crescente reconhecimento e aplicação. Inicialmente concebido para análise estrutural, o MEF rapidamente demonstrou sua versatilidade, expandindo-se para diversas áreas do conhecimento, como transferência de calor, fluxo de fluidos em meios porosos e análise de campos eletromagnéticos (Barkanov, 2001).

A popularização do MEF esteve intrinsecamente ligada ao desenvolvimento de computadores de alta performance. A partir do final da década de 1960, softwares especializados para análise por elementos finitos, como ANSYS, ASKA e NASTRAN, tornaram-se disponíveis comercialmente. A evolução tecnológica permitiu, nas últimas décadas do século XX, a execução de análises complexas em microcomputadores, com interfaces gráficas intuitivas que facilitavam a modelagem e a visualização dos resultados (Azevedo, 2015).

Segundo Azevedo (2015), o método de elementos finitos os programas de análises se utilizam das informações existentes nos arquivos dos desenhos feitos em programas de auxílio ao desenho com o computador (CAD) para definir os domínios da geometria, entre outras coisas, mas principalmente, simular a utilização peças ou conjuntos nas condições de utilização.

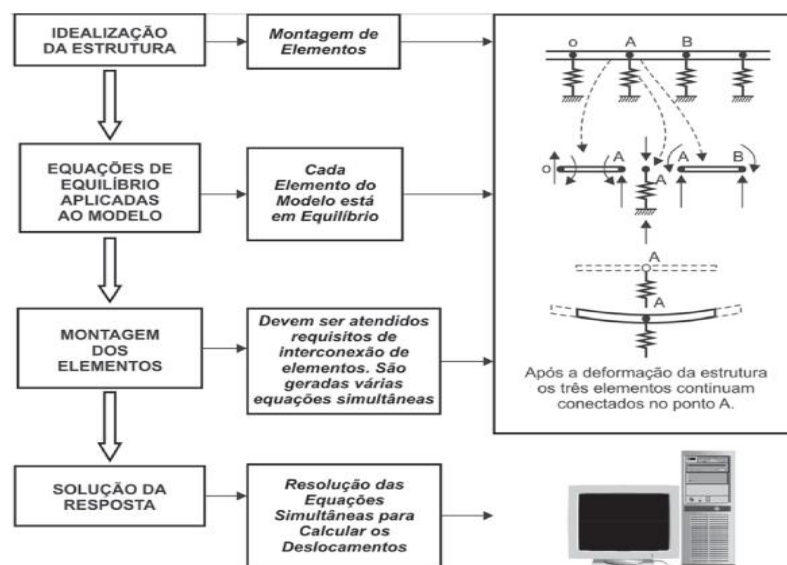
Segundo Alves Filho (2009), Azevedo (2015) e Fish; Belytschko (2009), as vantagens de utilizar o método dos elementos finitos.

- Geometrias podem ser analisadas independente de sua complexidade;
  - Componentes de diferentes formas e tamanhos podem ser associados e serem analisados considerando-se também o comportamento pelo contato entre os componentes;
  - análise de componentes sobrepostos que possuam propriedades físicas diferentes;
  - Diminuição dos custos associados aos protótipos, por meio da simulação de modelos
- Exemplo.: implantes cirúrgicos;

- Otimização de formas geométricas de componentes reduzindo a quantidade de material e peso, reduzindo assim, o custo final.

A abordagem do equilíbrio da estrutura pode ser efetuada considerando-a um Sistema Discreto. A ideia da discretização de um sistema contínuo considera a divisão da estrutura em partes separadas distintas, conectadas entre si nos pontos discretos (Alves Filho, 2009), conforme apresentado na Figura 33.

Figura 33 - Método geral para análise de sistemas discretos padrão de Elementos Finitos



Fonte: Alves Filho (2009)

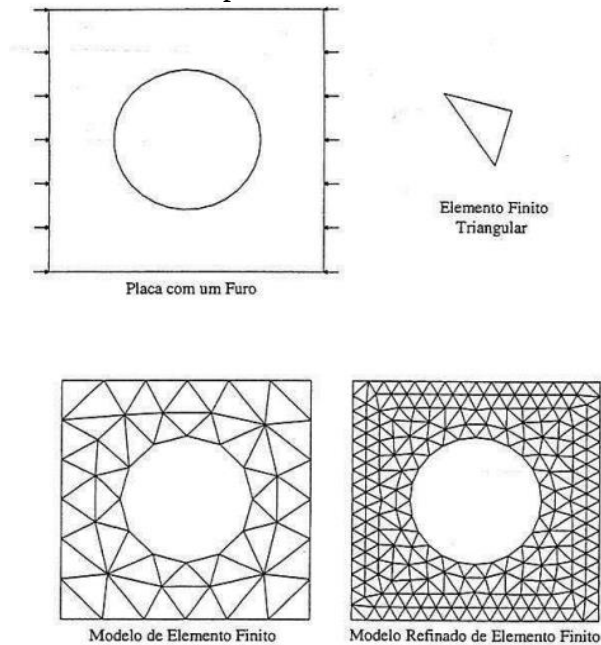
Uma das principais características do Método dos Elementos Finitos é a representação aproximada de estruturas contínuas através de modelos discretos. Embora a solução obtida não seja exata, ela oferece uma precisão satisfatória para a maioria dos problemas de engenharia, sem a necessidade de uma discretização excessivamente refinada (Alves Filho, 2009).

Tanto no modelo numérico quanto na estrutura real, as forças que atuam entre os elementos de uma treliça são concentradas nos nós. No caso de um pórtico, por exemplo, essas forças incluem esforços axiais, cortantes e fletores, transferidos de um elemento para outro através das conexões nodais. Essa discretização das forças, juntamente com as condições de equilíbrio e compatibilidade nos nós, garante a análise precisa do comportamento da estrutura (Alves Filho, 2009; Fish; Belytschko, 2009).

A discretização, processo fundamental no Método dos Elementos Finitos, consiste na subdivisão da geometria contínua da peça em um conjunto finito de elementos menores, interconectados por nós. Essa malha de elementos finitos é gerada pelo software de análise e

serve como base para a obtenção da solução numérica (Azevedo, 2015). Como observado no exemplo das Figuras 34 e Figura 35.

Figura 34 - Exemplo de discretização em uma placa com furo.



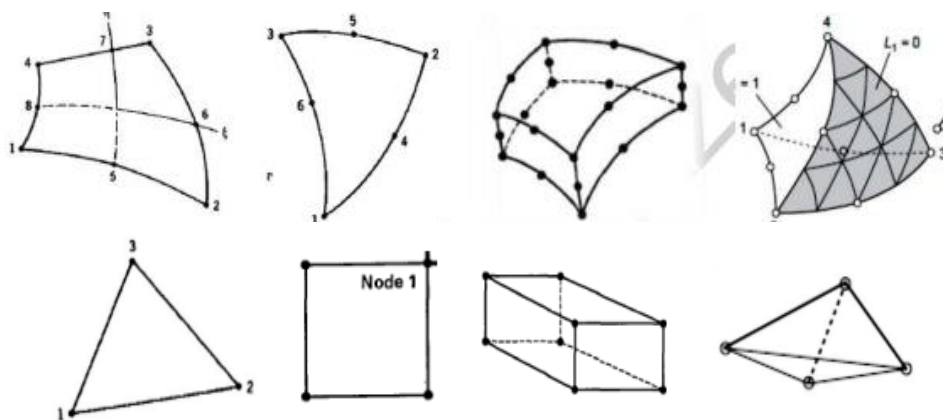
Fonte: Fish e Belytschko (2009)

Figura 35 - Conjunto de peças discretizadas.

Fonte: Azevedo (2015)

Os nós desempenham um papel crucial na análise por elementos finitos. Eles representam os pontos de interconexão entre os elementos finitos e são fundamentais para a definição da geometria discretizada. A localização dos nós, geralmente nos vértices, arestas ou faces dos elementos, influencia diretamente a precisão dos resultados da análise. A definição da malha, que inclui a quantidade e a distribuição dos nós, é uma etapa crucial no processo de modelagem (Azevedo, 2015). A figura 36 exemplifica os modelos de nós.

Figura 36 - Elementos de primeira ordem, bidimensionais e tridimensionais respectivamente

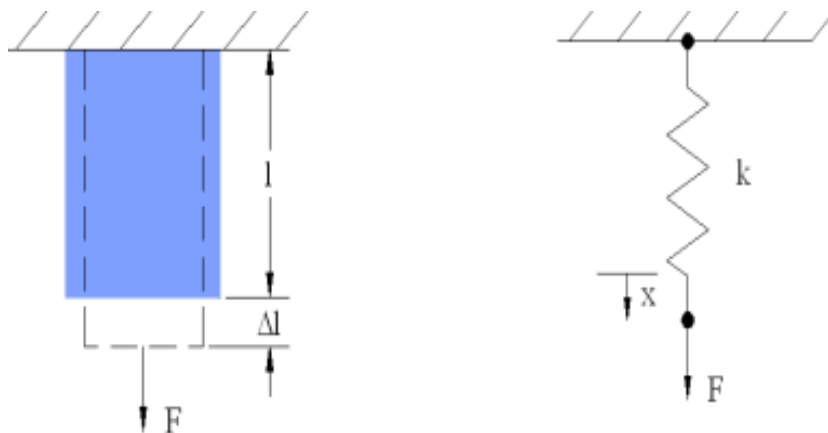


Fonte: Azevedo (2015)

A malha é composta por elementos que se conectam através de nós. A complexidade da geometria a ser modelada influencia a escolha do tipo de elemento e a definição dos graus de liberdade. Elementos de ordem superior são mais adequados para representar formas curvas, enquanto o número de graus de liberdade por nó varia de acordo com a dimensionalidade do elemento: um grau para elementos unidimensionais, até seis graus para elementos tridimensionais. A interação entre elementos e a definição dos graus de liberdade são aspectos essenciais para a análise numérica precisa de estruturas (Azevedo, 2015).

No contexto do Método dos Elementos Finitos, cada elemento estrutural é idealizado como uma mola virtual com rigidez e dimensões definidas. Essa simplificação permite representar o comportamento da estrutura através de matrizes, nas quais as propriedades de cada mola contribuem para a definição dos carregamentos, deslocamentos e rigidez global. A rigidez de cada mola virtual é determinada pelas propriedades do material e pela geometria do elemento correspondente (Azevedo, 2015), conforme exemplifica a Figura 37.

Figura 37 - Similaridade entre um objeto e uma mola carregados axialmente



Fonte: Azevedo (2015)

Similaridade entre as equações que determinam a força de um objeto e uma mola carregada axialmente, essa consideração poder ser utilizada para o momento fletor e torsor.

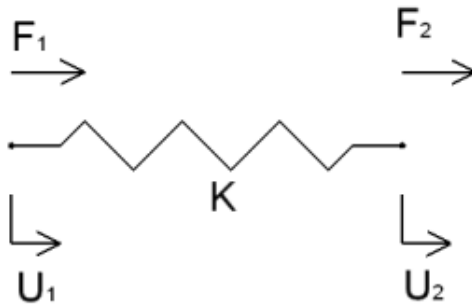
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \epsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad \sigma = E\epsilon \quad (37)$$

$$F = \frac{EA}{l} \Delta l \quad \text{é similar a } F = kx \quad (38)$$

As propriedades intrínsecas do material, como o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, combinadas com a geometria de cada elemento finito, definem a rigidez individual de cada componente. Conforme Figura 38 e 39. Essa rigidez, que representa a resistência do elemento à deformação, é fundamental para a montagem da matriz de rigidez global da estrutura.

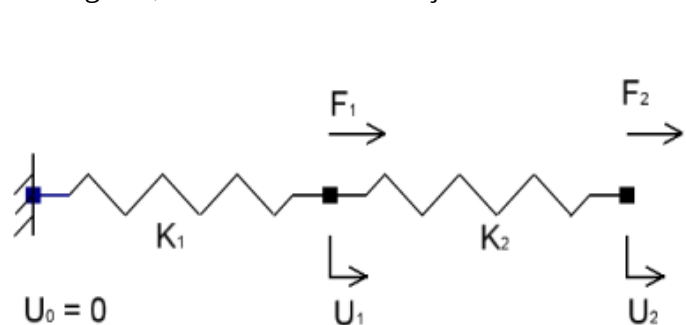
A interconexão dos elementos através dos nós comuns permite a transferência de forças e a determinação dos deslocamentos nodais (Azevedo, 2015).

Figura 38 - Mola com rigidez e forças diferentes.



Fonte: Azevedo (2015)

Figura 39 - Dois elementos ou molas em série com rigidez, deslocamentos e forças diferentes.



Fonte: Azevedo (2015)

Segundo Azevedo (2015), após discretizar a geometria, o software durante a análise montar a equação matricial com os vetores e matriz de rigidez para calcular o deslocamento de cada um dos nós e as tensões naqueles pontos conforme a Equação 39. As condições de contorno globais (carga e apoios) são aplicadas aos nós.

$$\begin{bmatrix} F_0 \\ F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 & -K_1 & 0 \\ -K_1 & K_1 + K_2 & -K_2 \\ 0 & -K_2 & K_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_0 \\ U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} \quad (39)$$

Quando um nó de elemento tiver mais de um grau de liberdade torna-se necessário o cálculo para cada grau de liberdade. A forma dos elementos dependerá da geometria e das configurações estabelecidas pelo usuário no software (Azevedo, 2015).

De acordo com Alves Filho (2009) e Fish & Belytschko (2009), a análise pelo Método de Elementos Finitos (MEF) divide-se em três etapas distintas, sendo elas:

**Pré-processamento:** Nesta fase, definem-se a geometria do problema, o tipo de análise a ser realizada, as propriedades dos materiais e as condições de contorno (cargas e restrições). Além disso, é nesta etapa que se cria a malha de elementos finitos, que consiste na discretização do domínio contínuo em um número finito de elementos, montando assim o modelo discretizado da estrutura.

**Processamento (ou Análise):** Nesta etapa, o software de elementos finitos resolve um sistema de equações (lineares ou não lineares, dependendo da natureza do problema) para

determinar os deslocamentos nodais, as reações de apoio e as forças internas nos elementos. Essencialmente, são efetuados os cálculos matriciais que representam o comportamento físico da estrutura sob as condições definidas no pré-processamento.

Pós-processamento: Após a solução do sistema de equações, os resultados são analisados e interpretados nesta fase. É no pós-processamento que se obtêm e se visualizam grandezas de interesse para a engenharia, como tensões, deformações, distribuição de temperaturas, fluxo de calor, fatores de segurança, entre outros. O objetivo é verificar a coerência dos resultados numéricos com o comportamento esperado do problema físico ou material estudado (Alves Filho, 2009).

Segundo Fish e Belytschko (2009), os cálculos estruturais podem ser feitos por métodos numéricos, como é o caso do método dos elementos finitos ou por métodos analíticos. Sabe-se que com o método analítico se obtêm resultados exatos de tensão ou deformação, por exemplo, mas é inviável quando se tem geometrias complexas, interação de materiais diferentes etc., pois o seu cálculo é demais complexo e demorado quando é possível executá-lo. Os cálculos feitos com o método dos elementos finitos serão realizados pelo software para cada nó do modelo, portanto, quanto maior a quantidade de nós, maior a quantidade de cálculos a serem feitos, ou seja, maior quantidade de processamentos a serem feitos pelo computador e consequentemente, maior tempo para que software apresente os resultados da análise.

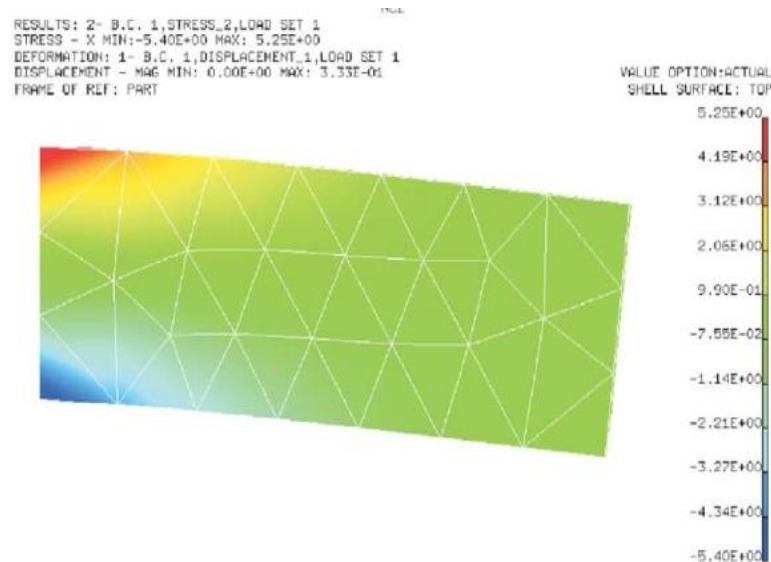
Conforme Fish e Belytschko (2009), a análise estrutural pode ser realizada por meio de métodos numéricos, como o Método dos Elementos Finitos (MEF), ou por métodos analíticos. Embora os métodos analíticos proporcionem soluções exatas, sua aplicação é restrita a problemas com geometrias simples e condições de contorno ideais. Diante da complexidade de muitas estruturas reais, o MEF emerge como uma ferramenta mais versátil e eficiente.

Segundo Alves Filho (2003), a precisão dos resultados obtidos pelo MEF está diretamente relacionada à discretização da estrutura, ou seja, à quantidade de elementos finitos que compõem a malha. Quanto maior o número de elementos, mais refinada será a malha e, consequentemente, mais precisas serão as soluções. No entanto, um aumento no número de elementos implica em um aumento no tempo de cálculo, uma vez que o software precisa resolver um sistema de equações maior e mais complexo.

As Figuras 40 e 41 apresentam os resultados da análise de tensão em uma chapa de aço submetida a uma carga. A escala de cores varia do azul (menor tensão) ao vermelho (maior tensão). Observa-se que as maiores tensões se concentram nas proximidades da carga aplicada,

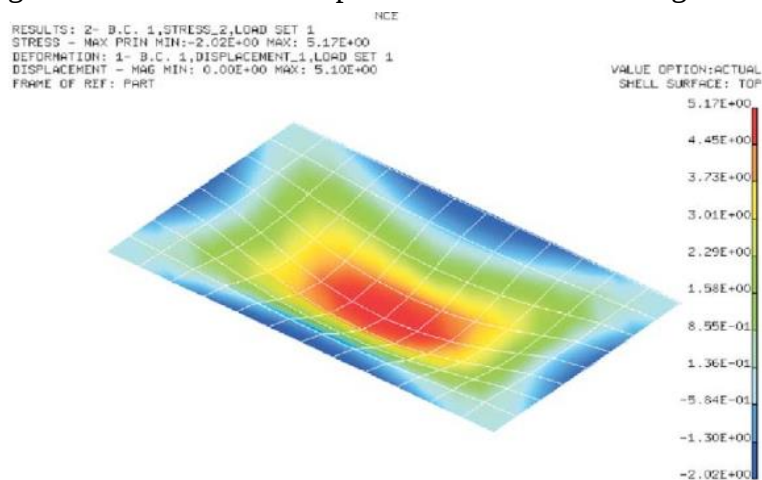
indicando a presença de uma singularidade de tensão. A análise por elementos finitos permitiu identificar as regiões críticas da placa, auxiliando no dimensionamento e na otimização do projeto.

Figura 40 - Tensões em chapa sob flexão no seu próprio plano



Fonte: Alves Filho (2009)

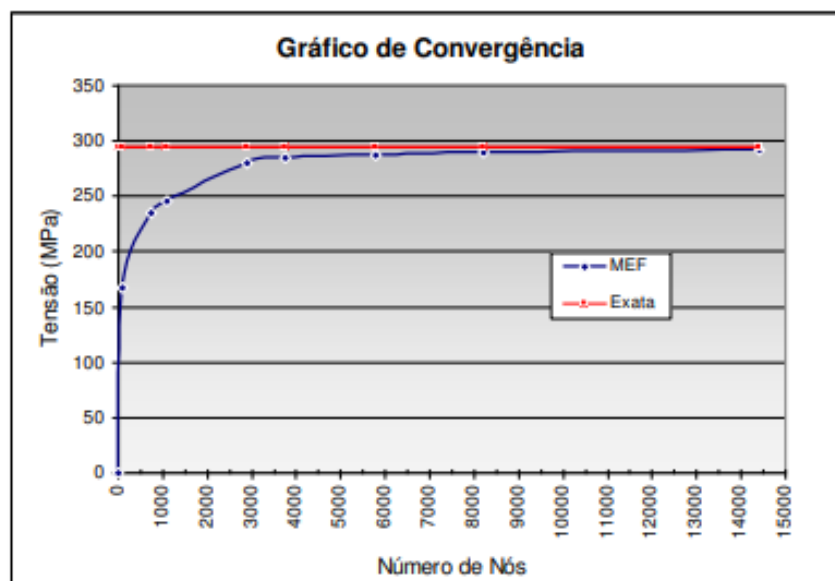
Figura 41 - Tensões em chapa sob flexão devido á carga lateral



Fonte: Alves Filho (2009)

Segundo Alves Filho (2009), A correlação entre a quantidade de nós em um modelo numérico e a precisão dos resultados é direta: quanto maior o número de nós, maior a aproximação com os valores obtidos por métodos analíticos. Essa relação, porém, deve ser avaliada em conjunto com outros fatores, como a complexidade do modelo e os recursos computacionais disponíveis. A concentração de nós em áreas críticas é fundamental para garantir a confiabilidade dos resultados. Conforme a Figura 42.

Figura 42 - Convergência da tensão em função do número de nós



Fonte: Alves Filho (2003)

Ao escolher a melhor estratégia de simulação por elementos finitos (MEF), é fundamental considerar as características específicas de cada modelo. Modelos com elementos maiores, embora reduzam a quantidade de nós e o tempo de cálculo, podem comprometer a precisão, especialmente em regiões críticas onde as tensões são elevadas e há poucos nós. Embora os resultados do MEF possam se aproximar muito da solução analítica exata, tanto a solução analítica quanto a numérica podem divergir da realidade. Isso ocorre porque as propriedades dos materiais, a geometria e os carregamentos reais podem diferir das hipóteses simplificadoras adotadas nos modelos. Por exemplo, os materiais reais apresentam heterogeneidades e podem sofrer alterações em suas propriedades devido a processos de fabricação como fundição, forjamento e tratamentos térmicos, o que impacta diretamente no comportamento do componente (Azevedo, 2015).

Além das incertezas relacionadas aos materiais, a definição precisa da intensidade, orientação e posição dos carregamentos também é um desafio. Carregamentos reais podem variar ao longo do tempo e diferir daqueles considerados na análise, levando a resultados de simulação que não refletem o comportamento real do componente (Alves Filho, 2009).

No contexto da globalização, a tecnologia CAE (Engenharia Assistida por Computador do inglês Computer-Aided Engineering) se torna cada vez mais essencial para a competitividade das empresas. Ao permitir a criação de modelos virtuais que simulam as condições reais de uso do produto, a CAE elimina a necessidade de protótipos físicos, reduzindo custos e prazos de desenvolvimento. Essa tecnologia possibilita a identificação de problemas e a otimização do

projeto de forma mais rápida e eficiente, contribuindo para a inovação e a melhoria da qualidade dos produtos (Alves Filho, 2009).

## 2.8. APLICAÇÕES DA ANÁLISE DE TENSÕES DE SILOS

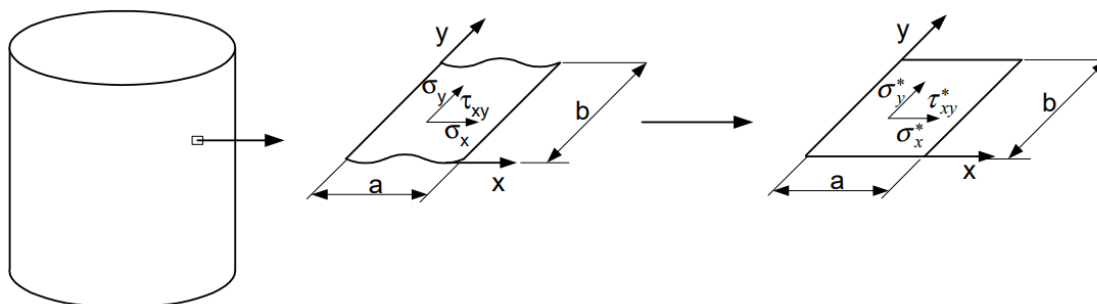
A imprevisibilidade do comportamento dos grãos dentro de silos limita a eficácia dos critérios de dimensionamento estabelecidos nas normas atuais. A complexidade das interações entre os grãos e a estrutura, além da influência de efeitos de escala, dificulta a criação de modelos estruturais completamente precisos (Fank, 2017).

A determinação precisa das forças exercidas pelos grãos sobre as paredes de um silo representa um desafio significativo no projeto dessas estruturas. A variabilidade do comportamento dos grãos, a interação entre o produto e a estrutura e as características do processo de carregamento e descarregamento influenciam diretamente a intensidade e a distribuição das cargas atuantes (Lopes Neto; Nascimento; Fank, 2014).

A modelagem simplificada da estrutura do silo, desconsiderando os detalhes das ligações parafusadas, é justificada pela alta resistência e pelo grande número de parafusos utilizados, o que minimiza o risco de falha nessas conexões (Briassoulis, 1986).

A análise da chapa corrugada é simplificada pela sua idealização como uma casca ortotrópica de espessura constante. Essa aproximação é justificada pela geometria do silo, que possui um raio de curvatura muito maior que o raio de curvatura do corrugado. Dessa forma, as propriedades elásticas da chapa são representadas por valores médios, permitindo a determinação das tensões globais atuantes (Briassoulis, 1986), conforme a Figura 43.

Figura 43 - Representação de um elemento representativo da chapa corrugada por uma casca ortotrópica equivalente.



Fonte: Scalabrin (2008)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia desta pesquisa será fundamentada em trazer uma análise das tensões nas paredes de silos metálicos, combinando as ações e pressões o qual ele está submetido e utilizando métodos computacionais para uma compreensão abrangente do fenômeno. O ponto de partida será definição de um silo, cujas dimensões e características construtivas são típicas da região Oeste da Bahia.

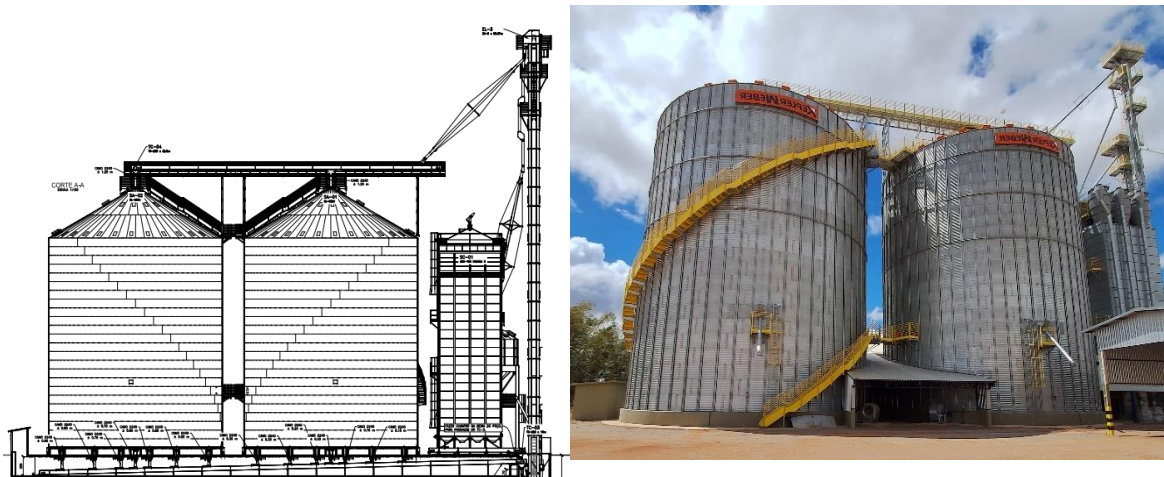
A Kepler Weber, empresa líder em soluções de armazenagem, será parceira neste estudo de TCC, fornecendo o silo que será objeto de estudo da parede metálica. A colaboração com a Kepler Weber garantirá acesso a projetos e tecnologias, fundamental para a realização de uma análise precisa e aprofundada das características e desempenho da parede metálica do silo. Assim, o silo objeto desse estudo será o modelo 6024, localizado na Fazenda Boiadeiro em Luís Eduardo Magalhães na ROD 242, KM 15. A características desse modelo estão na Tabela 8, as figuras 44 e 45 mostram o projeto desse silo.

Tabela 8 - Características do modelo 6024 (Kepler Weber)

| Modelo | Anel | Volume (m³) | Toneladas Soja (t) | Altura (m) | Diâmetro Nominal (m) | Nº Montantes |
|--------|------|-------------|--------------------|------------|----------------------|--------------|
| 60     | 24   | 6.139       | 4881               | 27,27      | 18,189               | 40           |

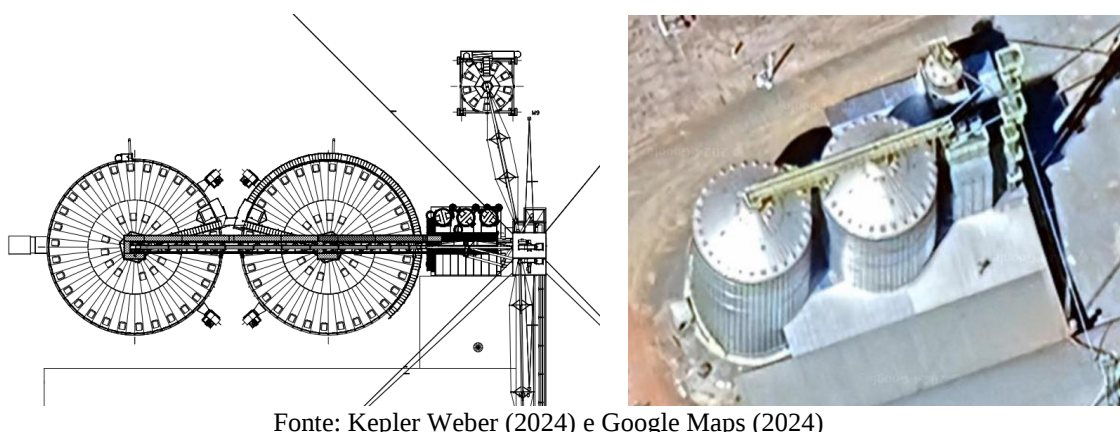
Fonte: Kepler Weber (2024)

Figura 44 - Vista lateral dos silos metálicos da Fazenda Boiadeiro



Fonte: Kepler Weber (2024)

Figura 45 – Vista do silo e a visão de satélite do silo



Fonte: Kepler Weber (2024) e Google Maps (2024)

A abordagem metodológica desse trabalho será dividida nas seguintes etapas, descritas em detalhes nos itens seguir.

### 3.1. CONCEPÇÃO DO SILO

Os montantes e as chapas do silo metálico são fabricados com ARC 600, um material de alta resistência estrutural conhecido por sua durabilidade e capacidade de suportar cargas elevadas, suas propriedades físicas estão na Tabela 9. Esse aço, caracterizado por uma resistência ao escoamento de 480 MPa e um revestimento de zinco Z350 (350 g/m<sup>2</sup> com 99% de pureza), oferece excelente proteção contra corrosão, tornando-o ideal para ambientes agressivos. Os montantes, que são os elementos verticais responsáveis por formar o esqueleto da estrutura, beneficiam-se da alta rigidez proporcionada pelo ARC 600, garantindo a estabilidade necessária para suportar o peso do silo e do material armazenado. Outras Informações importantes sobre as estruturas internas do silo estão na tabela

Para definição do modelo será elaborado um modelo representativo de silo metálico, levando em consideração as dimensões e características construtivas. O modelo será projetado no software de desenho assistido por SpaceClaim (Compatibilidade alta com o Ansys), incorporando detalhes como chapas corrugadas, montantes, anéis de reforço e variação da espessura da chapa pela altura do silo, conforme Tabela 10. O objetivo é criar uma representação próxima a estruturas reais, possibilitando uma análise precisa das tensões.

Tabela 9: propriedades físicas do ARC 600

| Propriedade               | Valor      | Unidade           |
|---------------------------|------------|-------------------|
| Limite de Escoamento (LE) | 480        | MPa               |
| Resistência à Tração (RT) | 600        | MPa               |
| Alongamento               | $\geq 10$  | %                 |
| Densidade                 | 7,85       | g/cm <sup>3</sup> |
| Módulo de Elasticidade    | $\sim 200$ | GPa               |
| Condutividade Térmica     | $\sim 50$  | W/m·K             |

Fonte: Kepler Weber (2025)

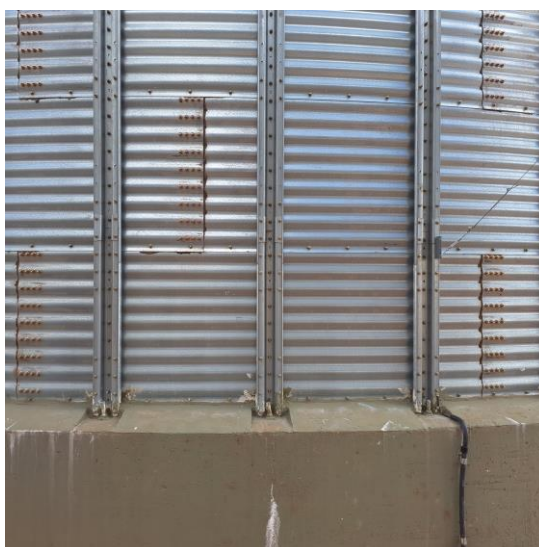
Tabela 10: Características construtivas do silo metálico 6024

| N.º Montantes | N.º Chapas p/ anel | N.º Anéis | N.º de Anéis e suas respectivas espessuras laterais |         |         |         |        |        |      | Altura de chapa (mm) | N.º Anel de Reforço |
|---------------|--------------------|-----------|-----------------------------------------------------|---------|---------|---------|--------|--------|------|----------------------|---------------------|
|               |                    |           | 3                                                   | 3       | 2       | 3       | 4      | 5      | 4    |                      |                     |
| 40            | 20                 | 24        | 0,95 mm                                             | 1,25 mm | 1,55 mm | 1,95 mm | 2,3 mm | 2,7 mm | 3 mm | 914,4                | 3                   |

Fonte: Kepler Weber (2025)

As condições de apoio e carregamento do silo serão definidas, simulando o cenário real de operação. A base do silo será considerada engastada, representando sua fixação ao solo (base de concreto), conforme. Figura 46, enquanto a extremidade superior será considerada livre, permitindo a deformação sob carga.

Figura 46 – Estrutura do montante e chapas utilizadas no silo objeto do estudo



Fonte: Autor (2024)

### 3.2. CARACTERIZAÇÃO DAS CARGAS NO SILO

Primeiramente serão definidas algumas propriedades relevantes do grão a serem armazenado, o peso específico (para calcular o atrito vertical e a pressão horizontais exercidas pelo produto), o ângulo de repouso (para determinar a inclinação natural do grão e sua influência na distribuição de pressões, coeficientes de atrito (o atrito interno entre o grão e a parede do silo serão considerados, pois influenciam as pressões laterais).

Cargas atuantes na estrutura metálica do silo:

- **Peso Próprio:** O peso próprio da estrutura metálica baseado nas dimensões do modelo e nas NBR 11888 (2018), o ANSYS automaticamente já considera essa carga ao modelar o silo com as dimensões reais.

- **Pressões do Grão:** As pressões exercidas pelo grão armazenado serão determinadas utilizando a teoria de Janssen, considerando as propriedades do grão e a geometria do silo. Serão consideradas apenas as pressões estáticas presentes durante o armazenamento. Nas pressões laterais serão consideradas as variações de pressão ao longo da altura do silo e a influência do atrito entre o grão e a parede Conforme a Figura 47.

- **Ações do Vento:** As cargas de vento serão calculadas de acordo com a norma brasileira NBR 6123:2023, considerando a localização geográfica, a altura do silo e os coeficientes de arrasto. A norma estabelece que a pressão de obstrução do vento  $q_z$  em uma altura  $z$  acima do terreno é calculada em função da velocidade característica do vento  $V_k$ . A variação dessa velocidade com a altura é modelada pelo fator topográfico  $S_2$ , cuja equação foi corretamente identificada:

$$S_2 = b_m F_r (z/10)^p \quad (50)$$

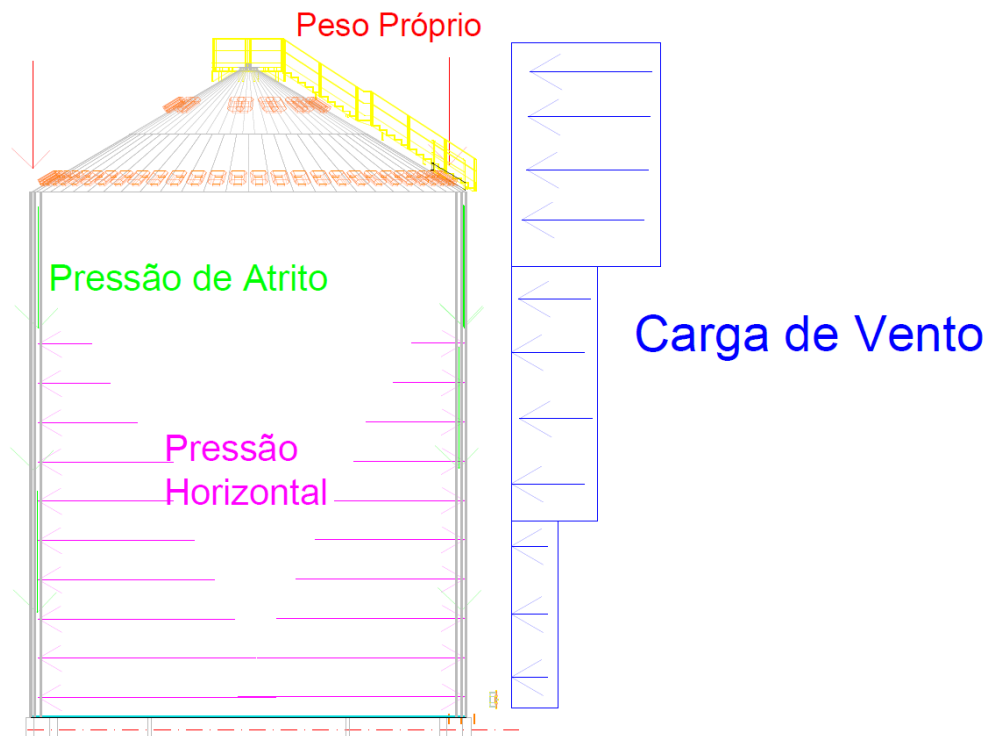
Os parâmetros utilizados no cálculo, são essenciais para a contextualização e validação da análise:

- **Categoria I de Rugosidade do Terreno:** A escolha da Categoria I ("superfícies lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão") representa o cenário mais severo para a ação do vento.

- **Classe B da Edificação:** A classificação da estrutura na Classe B (maior dimensão entre 20 m e 50 m) considera o porte do silo. Conforme a NBR 6123:2023, esta classe leva à adoção do parâmetro  $b_m=1,11$ . Este parâmetro ajusta o perfil de velocidades para edificações de dimensões intermediárias.

- Parâmetros  $p$  e  $F_r$ : O expoente  $p=0,065$  é diretamente associado à Categoria I e Classe B, definindo a "curvatura" do perfil de pressões. O fator de rugosidade  $F_r=0,98$  é um ajuste fino para as características específicas do terreno, sendo um valor próximo a 1,0 indicativo de pouca variação em relação ao perfil padrão da categoria.
- Fator Estatístico  $s_3$  : O valor  $s_3=0,95$  é um fator estatístico que considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação, cuja ruína acarreta consequências moderadas para a segurança humana.

Figura 47 - Aplicação das pressões no silo modelo



Fonte: Autor (2025)

### 3.3. MÉTODO DA TEORIA DAS PLACAS

Com base nas pressões Janssen calculadas pelas Equações 40, 41 e 42, serão determinadas as tensões atuantes nas paredes do silo, utilizando as equações da teoria de cascas cilíndricas. Serão consideradas as tensões circunferenciais e longitudinais, que são as principais responsáveis pela estabilidade da estrutura. A seguir estão as tensões resultantes para silos segundo Ugural (2010).

$$N_{\theta} = -\frac{Etw}{a} = \gamma ah \left[ 1 - \frac{x}{h} - f_4(\beta x) - \left( 1 - \frac{1}{\beta h} \right) f_2(\beta x) \right] \quad (40)$$

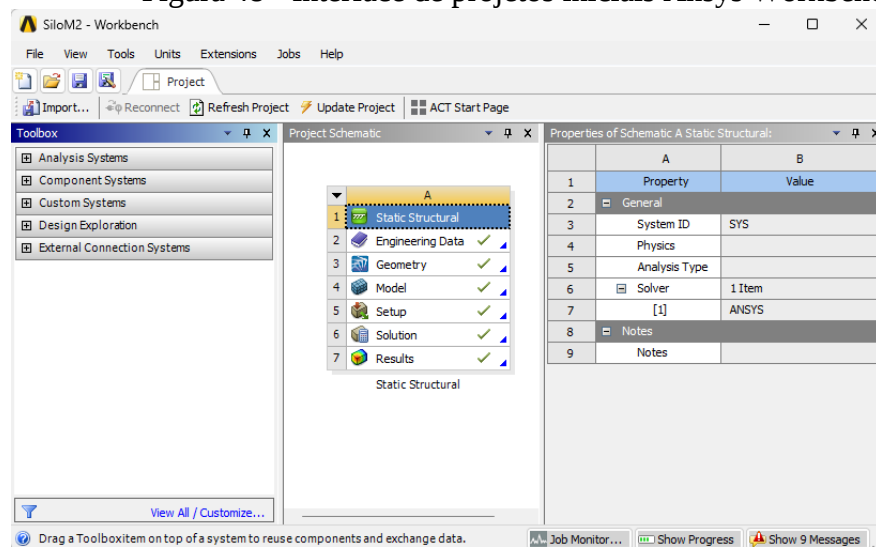
$$M_x = -D \frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{2\beta^2 \gamma a^2 D h}{Et} \left[ -f_2(\beta x) + \left( 1 - \frac{1}{\beta h} \right) f_4(\beta x) \right] \quad (41)$$

$$M_\theta = \nu M_x \quad (42)$$

### 3.4. MÉTODO COMPUTACIONAL - MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (ANSYS)

Para verificar as tensões será utilizado o software ANSYS Workbench, o qual é uma plataforma de simulação multifísica baseada em projeto que integra uma variedade de ferramentas de análise de engenharia em um ambiente unificado. Como mostra a Figura 48.

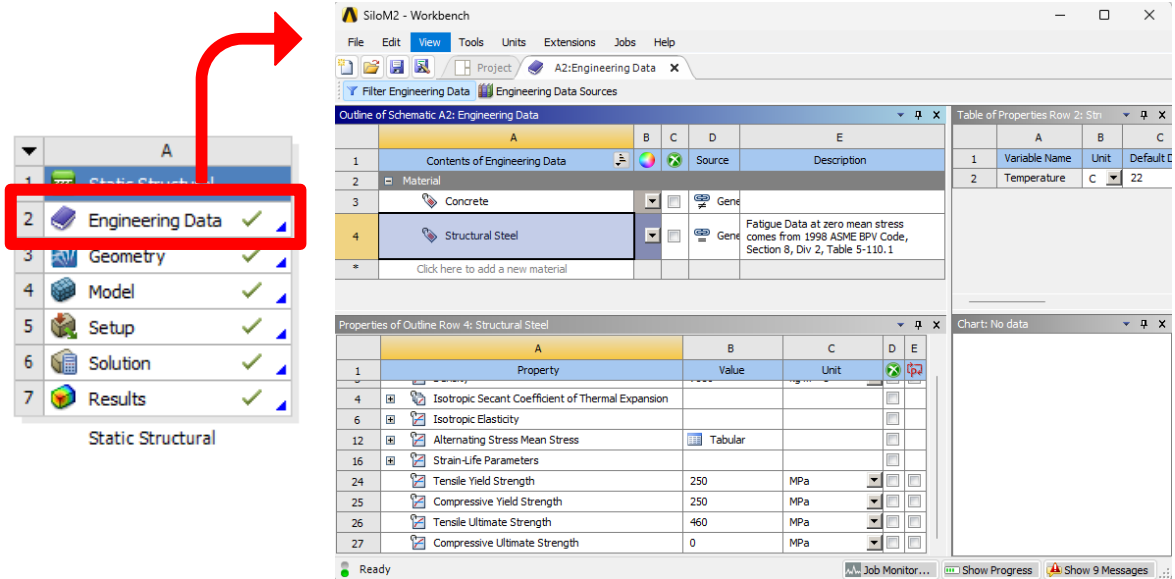
Figura 48 - Interface de projetos iniciais Ansys Workbench



Fonte: Autor (2025)

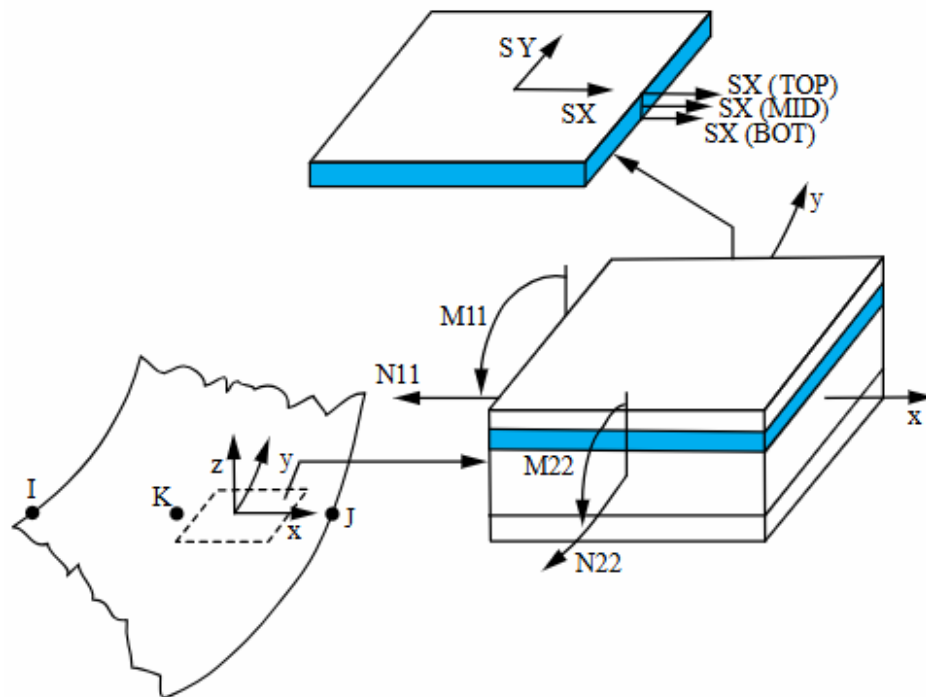
Os parâmetros de iniciais para definição das propriedades de materiais usadas nos sistemas de análise, exibindo modelos e propriedades de materiais relevantes para o silo metálico. Conforme Figura 49. Esses materiais por característica do silo metálico serão descritos computacionalmente como SHELL209, apresentado na Figura 50.

Figura 49 - Etapa de Engineering Data no Ansys



Fonte: Autor (2025)

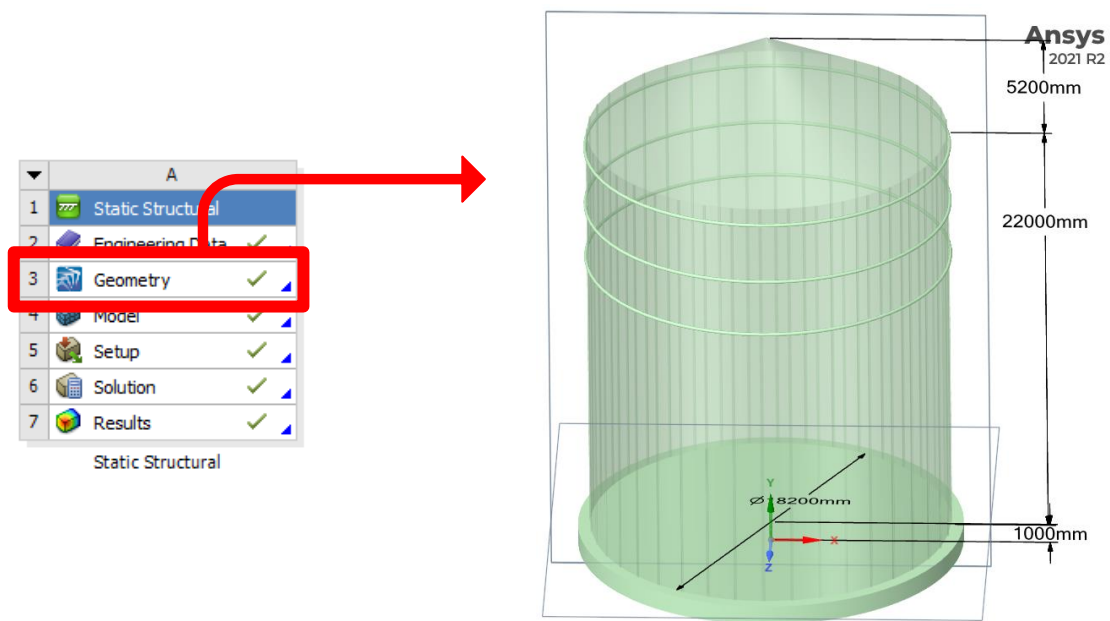
Figura 50 - Característica do SHELL209 no Ansys



Fonte: AnsysHelp (2025)

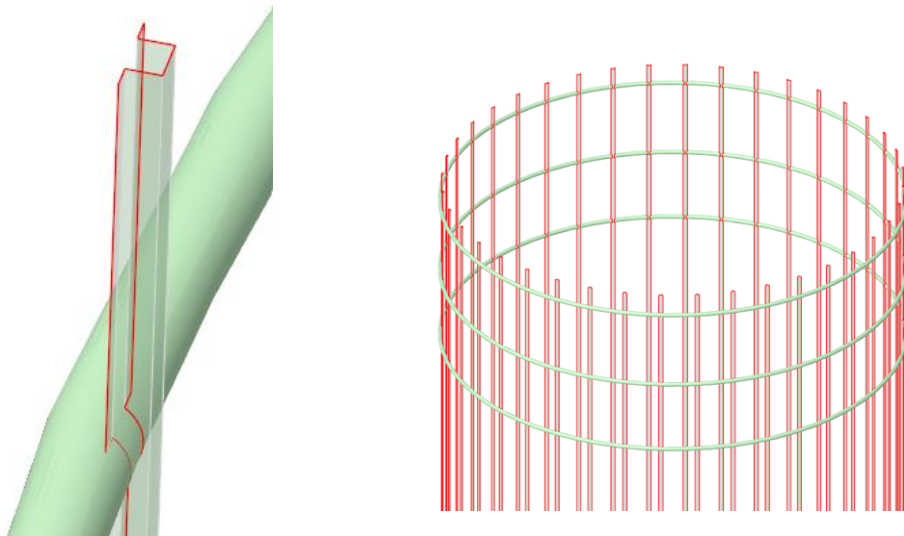
A modelagem do silo será previamente criada no SpaceClaim, o qual será importado para o ANSYS. Na Figura 51 e 52 está a representação do modelo do silo importado no soft.

Figura 51 - Geometria do silo no Ansys



Fonte: Autor (2025)

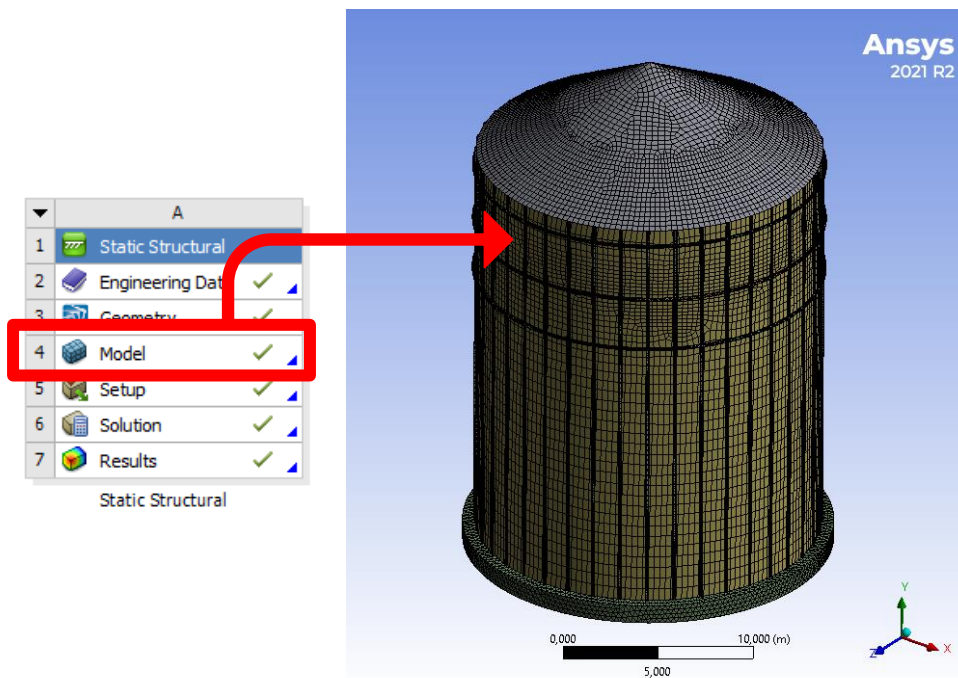
Figura 52: Modelo utilizado para anéis de reforço e montantes



Fonte: Autor (2025)

Para definição da malha (mesh) de elementos finitos será gerada, dividindo a geometria do silo em elementos menores e interconectados. A densidade da malha será definida, buscando um equilíbrio entre a precisão dos resultados e o tempo de processamento computacional. Como mostra a Figura 54 o modelo de silo está dividido por uma malha.

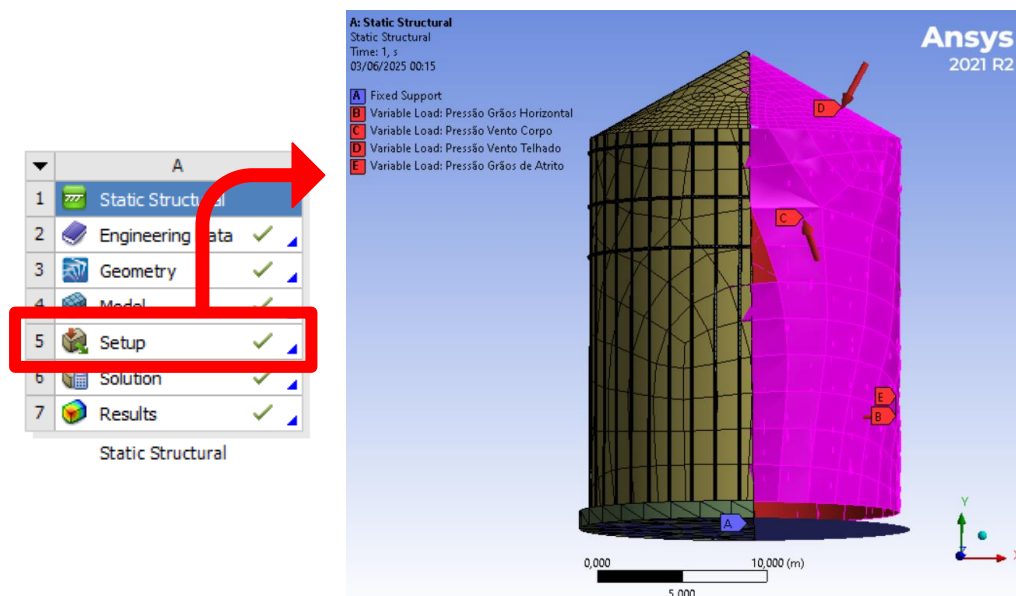
Figura 53 - Mesh para o modelo silo no Ansys



Fonte: Autor (2025)

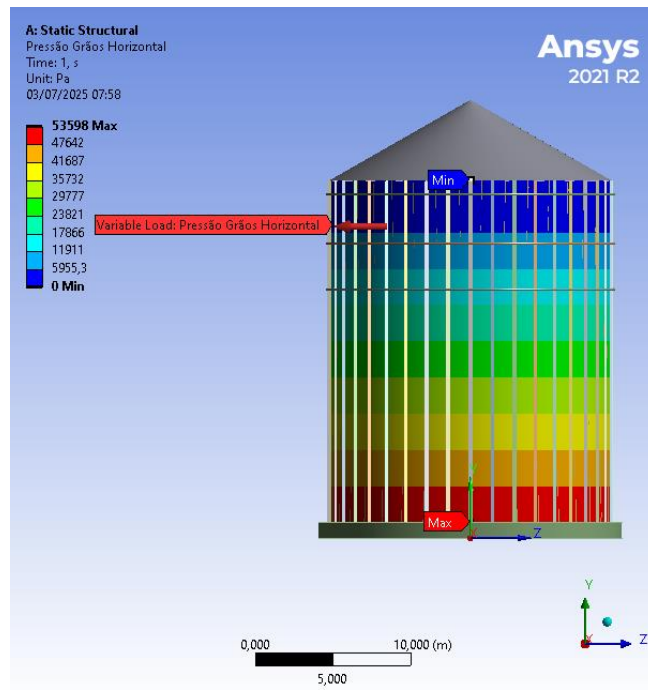
A aplicação das cargas e condições de contorno previamente calculadas (peso próprio, pressões do grão e vento) serão aplicadas ao modelo, juntamente com as condições de contorno (base engastada e topo livre). Como mostra a Figura 54. A cargas serão aplicadas conforma as Figuras 55 e 56.

Figura 54: Posições de contorno do silo no Ansys



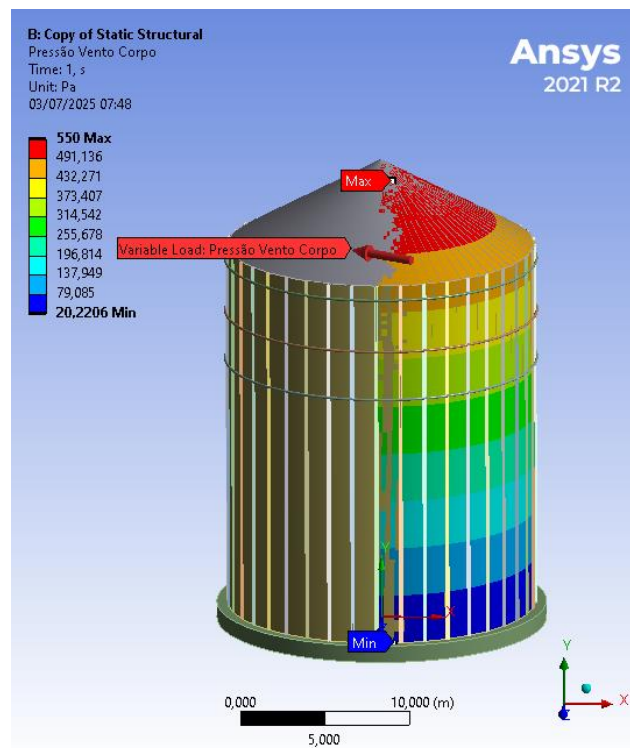
Fonte: Autor (2024)

Figura 55: Pressão horizontal aplicado as paredes do silo



Fonte: Autor (2025)

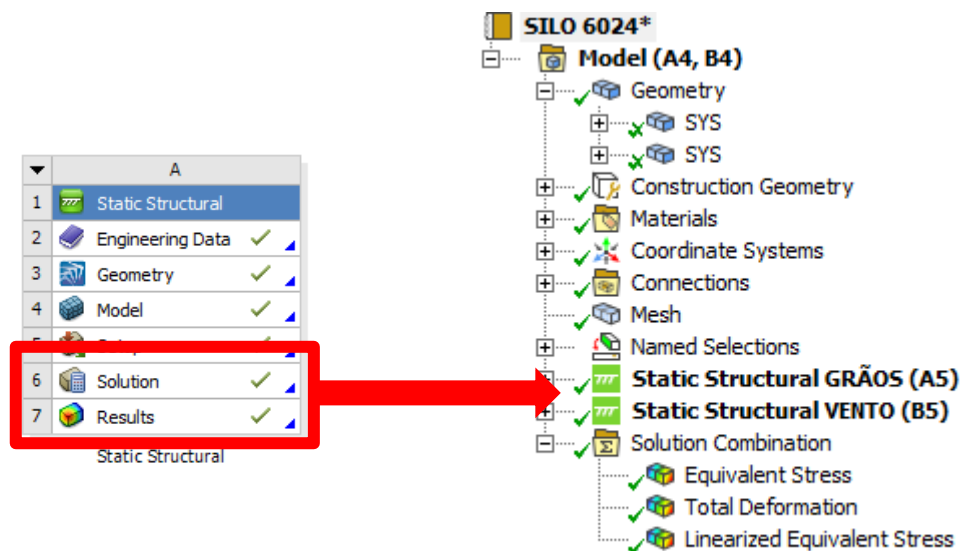
Figura 56: Pressão de Vento aplicada na lateral do silo



Fonte: Autor (2025)

Na análise estática, o ANSYS realizará a análise estática do modelo, resolvendo o sistema de equações que representa o equilíbrio da estrutura. Na Figura 57 mostra o menu do programa para soluções.

Figura 57 - Definição de Métodos de solução da estrutura no Ansys



Fonte: Autor (2024)

Assim os resultados serão extraídos, com foco nas tensões atuantes nas paredes do silo. O ANSYS fornecerá mapas de cores e gráficos que permitirão visualizar a distribuição das tensões ao longo das estruturas e a sua deformação.

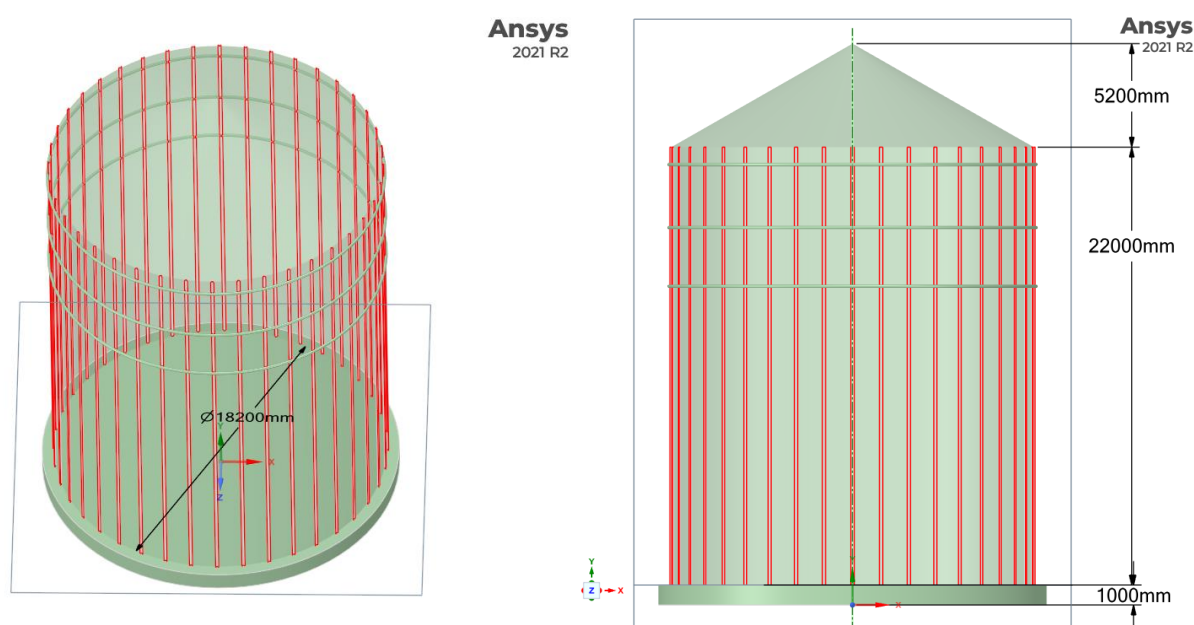
Os resultados das análises de tensões obtidas pelos ANSYS serão comparados a resistência do aço utilizado, buscando convergências e identificando possíveis discrepâncias. Uma análise crítica avaliará as vantagens as tensões em cada combinação de ações, considerando fatores como precisão, complexidade da modelagem e tempo de cálculo. Com base nessa avaliação, serão discutidas as implicações práticas dos resultados para o dimensionamento e projeto de silos metálicos, visando aprimorar a segurança e a eficiência dessas estruturas no contexto da indústria.

## 4. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

### 4.1. MODELAGEM DO SILO E CARGAS APLICADAS

Para investigar as tensões nas paredes metálicas do silo, o Ansys utilizou o método computacional que é coerente com a teoria das placas. Portanto foi construído o silo modelo 6024 simplificado com placas (chapas) sem rugosidade e sem variação da espessura das chapas ao longo da sua altura. Este modelo foi submetido as cargas de vento e grãos, com o objetivo de analisar estruturalmente o comportamento do silo. Sendo assim, foi modelado um silo cujas medidas estão dispostas na Figura 58.

Figura 58 - Dimensões do silo 6024 modelado no Ansys

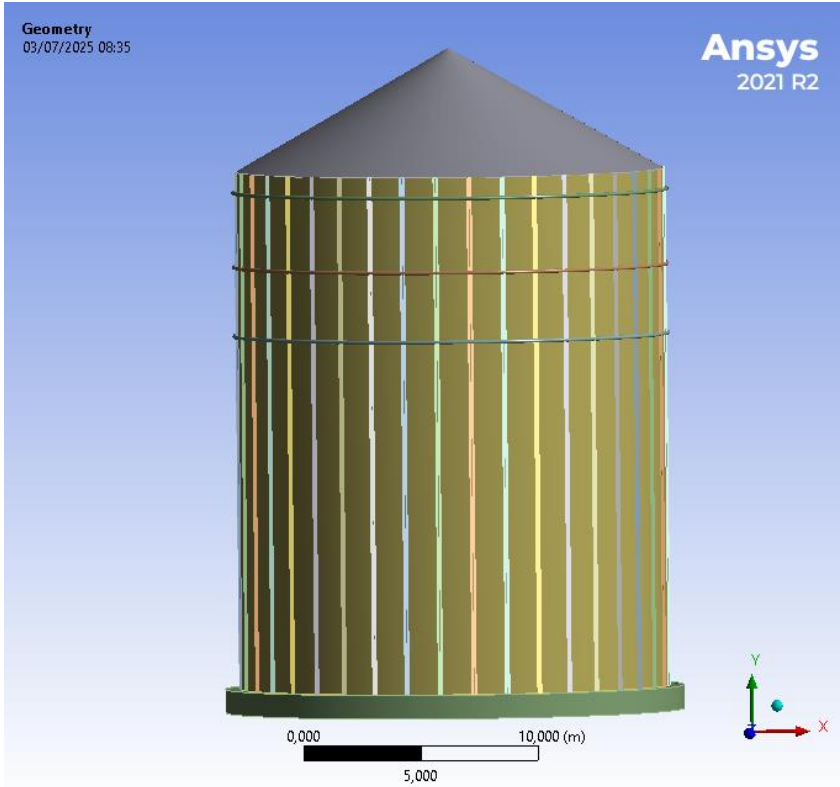


Fonte: Autor (2025)

A modelagem numérica de silos metálicos no software ANSYS por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF) envolve elevado grau de complexidade, principalmente devido à necessidade de representar com precisão as condições reais de contorno e as interações estruturais não lineares. A correta definição das condições de contorno, como vínculos nas bases, ligações semi-rígidas e contatos entre superfícies estruturais, é crítica para a estabilidade numérica e fidelidade dos resultados, tornando o processo de modelagem e simulação altamente desafiador tanto do ponto de vista computacional quanto da engenharia estrutural aplicada. A geometria do silo, composta por chapas curvas onduladas, montantes como reforços longitudinais, soldas e conexões parafusadas, demanda a discretização em malhas refinadas e compatibilizadas, o que aumenta o número de graus de liberdade do modelo e, consequentemente, o tempo

computacional, por isso para viabilidade do trabalho foi simplificado algumas geometrias. Na Figura 59 mostra o modelo utilizado nas simulações computacionais.

Figura 59: Modelo do silo 6024



Fonte: Autor (2025)

A robustez de uma análise por elementos finitos é intrinsecamente dependente da acurada definição de seus parâmetros de entrada, os quais devem ser rigorosamente justificados por referências normativas (ABNT NBR 8800:2008) (ABNT NBR 6123:2023) (EN 1991-4 (Eurocode 1: Part 4) e pela literatura consagrada conforme a tabela 11.

Tabela 11: Coeficientes e parâmetros das cargas e combinações

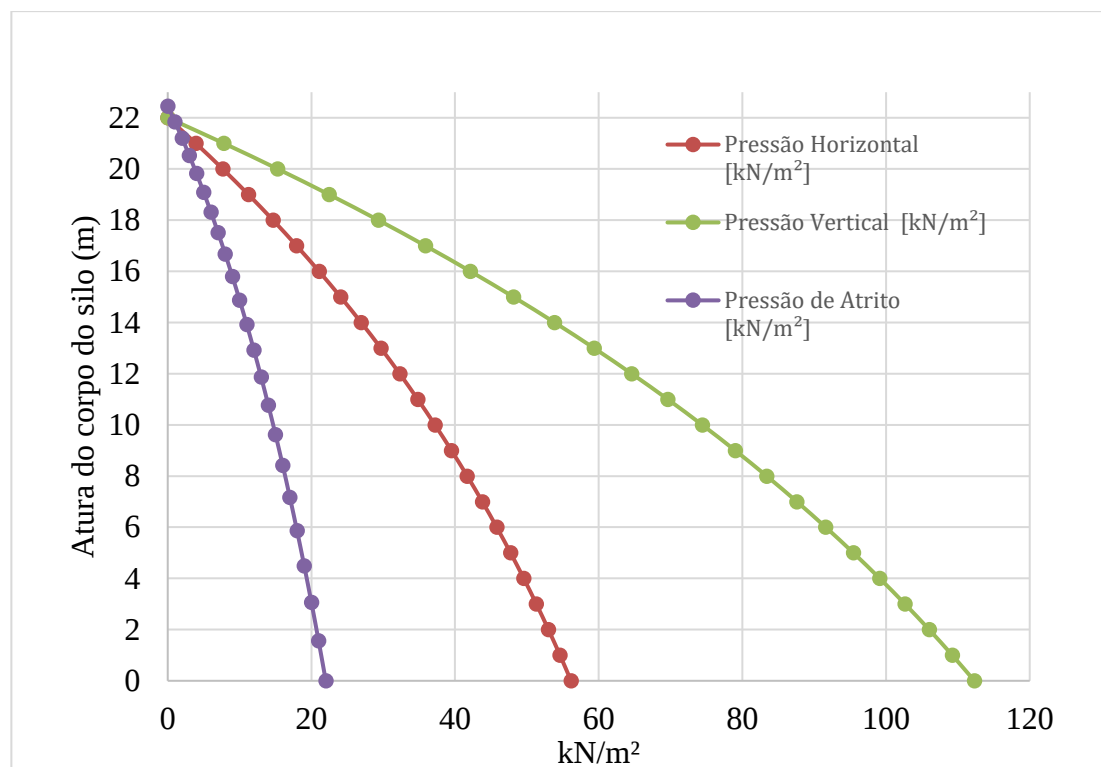
| Parâmetro                      | Valor | Símbolo  | Unidade | Observação                   |
|--------------------------------|-------|----------|---------|------------------------------|
| Peso específico do grão        | 8,0   | $\gamma$ | kN/m³   | Soja                         |
| Altura do silo                 | 22,0  | h        | m       | Altura de armazenamento      |
| Coeficiente lateral de pressão | 0,5   | K        | -       | Valor típico para grãos      |
| Coeficiente de atrito          | 0,4   | $\mu$    | -       | Entre grão e parede metálica |
| Velocidade do vento            | 40,0  | Vk       | m/s     | Região do oeste da Bahia     |

|                             |      |    |    |                                 |
|-----------------------------|------|----|----|---------------------------------|
| Diâmetro do silo            | 18,0 | r  | m  | Diâmetro da estrutura           |
| Espessura da chapa          | 3,0  | t  | mm | Chapa de aço A36                |
| Fator de ponderação (G)     | 1,35 | FG | -  | Combinação ELU (NBR 8800)       |
| Fator de ponderação (Q)     | 1,35 | FQ | -  | Combinação ELU                  |
| Fator de ponderação (Vento) | 1,50 | FV | -  | Combinação ELU                  |
| Peso próprio                | 99,5 |    | kN | Peso próprio total da estrutura |

Fonte: Autor (2025)

A pressão de grãos calculada e aplicada como carga no silo, Assume-se, como hipótese simplificadora validada pela norma e pela teoria clássica de Janssen, um comportamento de meio contínuo, isotrópico e homogêneo para o grão, reconhecendo que variações de compactação e umidade, embora existentes na prática, representam uma complexidade de modelagem para além do escopo deste trabalho. A distribuição de pressões exercidas pelo material granular (soja) na parede do silo constitui o carregamento predominante e foi obtida com a solução analítica da Teoria de Janssen. Conforme ilustrado na Figura 60.

Figura 60: Curva da altura do silo pelas pressões de grãos.



Fonte: Autor (2025)

As pressões ao longo da altura do corpo de um silo, Pressão Vertical (pv), a Pressão Horizontal (ph) e a Pressão de Atrito (pw) na parede. Estas representam a base fundamental para

análise estrutural de silos, pois quantifica os carregamentos que a estrutura deverá suportar em condição estática.

O comportamento não linear das pressões, evidente na Figura 61, é descrito pela Teoria de Janssen (1895). A teoria de Janssen postula que, diferentemente de um fluido, um material granular forma "arcos" internos (arching effect). Esses arcos transferem uma parcela significativa do peso do material para as paredes do silo através do atrito, aliviando a pressão vertical no fundo.

Pressão vertical (curva verde): Cresce rapidamente nas camadas inferiores e depois tendendo a se estabilizar, aproximando-se de um valor assintótico. Isso demonstra que, à medida que a profundidade aumenta, uma fração cada vez maior do peso das camadas superiores é suportada pelo atrito nas paredes, e não pela massa de grãos abaixo. A pressão máxima, em torno de 114 kN/m<sup>2</sup> na base (altura 0), é o carregamento que atuará diretamente no fundo plano do silo e, conseqüentemente, em sua fundação.

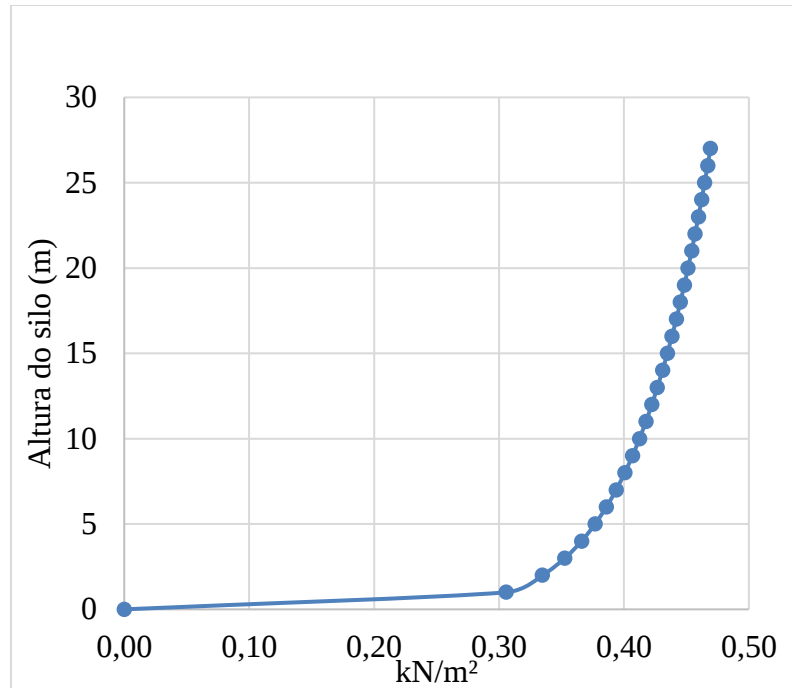
Pressão horizontal (curva laranja): Esta é a pressão que atua radialmente, "empurrando" as paredes para fora. Esta é a carga mais crítica para o dimensionamento do corpo cilíndrico do silo, pois gera tensões de tração circunferenciais (tensões de anel ou hoop stress) na chapa metálica. O valor máximo de aproximadamente 55 kN/m<sup>2</sup> na base é o ponto de maior solicitação para a parede.

Pressão de atrito (curva azul): Esta é, uma tensão de cisalhamento vertical ( $\tau_w$ ) que atua para baixo, na superfície interna da parede. Ela é gerada pelo atrito entre o material armazenado e a parede. Este carregamento representa uma força vertical acumulada ao longo da altura da parede que deve ser resistida pela própria chapa (gerando tensões de compressão axiais) e transferida para a fundação. O gráfico mostra seu aumento com a profundidade, atingindo um máximo de cerca de 25 kN/m<sup>2</sup> na base.

A análise utilizará estes perfis de pressão como carregamentos aplicados ao modelo geométrico do silo. A correta aplicação dessas cargas é crucial para a obtenção de resultados realistas de tensões e deformações.

A Figura 61 ilustra a distribuição da pressão estática do vento ao longo da altura de um silo metálico de fundo plano demonstra claramente a distribuição de pressão do vento na face de barlavento. Esta curva de pressão é um dado de entrada fundamental para a análise estrutural no Ansys. A sua correta determinação é crucial, pois governa a magnitude e a distribuição das tensões e deformações que a estrutura sofrerá sob a ação do vento, um dos carregamentos mais significativos para estruturas de grande esbeltez como os silos.

Figura 61: Altura do silo pela Pressão de vento aplicado ao silo



Fonte: Autor (2025)

A curva exibe um comportamento de potência, com um gradiente suave nas alturas mais baixas e um aumento acentuado nas seções superiores do silo. A pressão é praticamente nula na base e atinge seu valor máximo, próximo a 0,48 kN/m², no topo do silo (a uma altura de aproximadamente 27 metros).

A Fenômeno de Flambagem: A combinação de compressão axial (devido ao peso próprio e ao produto armazenado) com a flexão e a pressão externa devidas ao vento é um gatilho para a instabilidade por flambagem da casca cilíndrica. A análise de flambagem não-linear no ANSYS, utilizando este perfil de carregamento, é um passo indispensável para garantir a segurança do projeto.

Embora a pressão do vento na base seja mínima, o efeito global da força do vento ao longo de toda a altura gera um momento fletor e uma força de cisalhamento máximos na base do silo. Estes esforços são os que governam o dimensionamento da chumbeação (ancoragem) do silo na sua fundação de concreto.

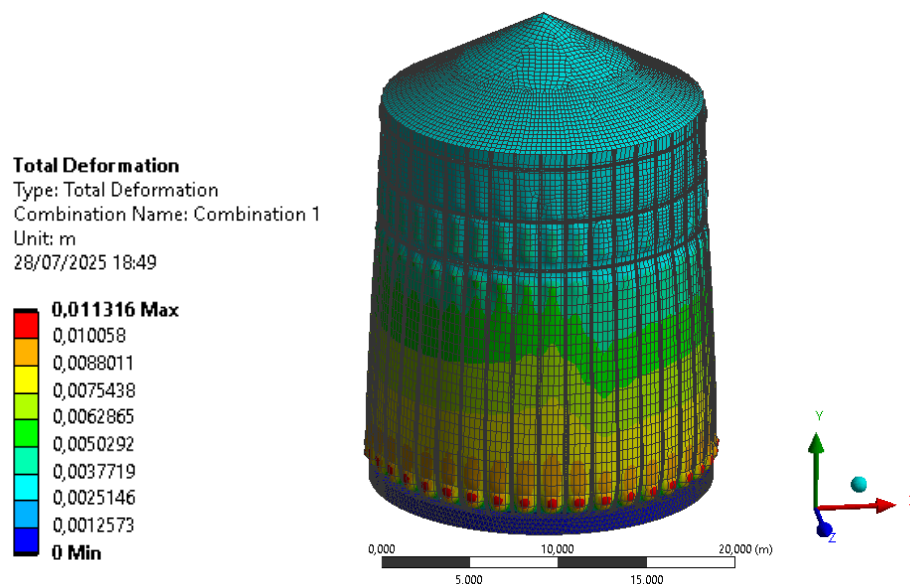
Para a avaliação do comportamento estrutural sob as condições de carregamento mais críticas, procedeu-se à combinação das ações permanentes e variáveis por meio de simulações numéricas em regime estático. Dessa forma, foi definida uma combinação linear de

carregamentos para a verificação da estrutura no Estado Limite Último (ELU). Esta combinação considera a atuação simultânea da carga proveniente do material armazenado e da pressão exercida pelo vento. Em conformidade com as prescrições normativas para a segurança das estruturas, aplicou-se um coeficiente de ponderação de  $\gamma_g=1,35$  para a ação permanente dos grãos e um coeficiente de  $\gamma_q=1,50$  para a ação variável do vento. A configuração adotada permite a obtenção dos esforços e deslocamentos máximos na estrutura, cujos resultados serão analisados e discutidos detalhadamente nas seções subsequentes deste trabalho.

#### 4.2. RESULTADO DO DESLOCAMENTO RESULTANTE

A análise de estruturas de casca, como o silo metálico em questão, representa um desafio significativo na engenharia devido à sua elevada esbelteza, caracterizada por uma alta relação entre diâmetro e espessura da chapa. A Figura 62 ilustra os padrões de deformação identificados por meio de simulações no Ansys. Os montantes desempenham um papel crucial na resistência à deformação, que se manifesta principalmente na base do silo, onde as tensões são mais intensas. Além disso, os anéis de reforço, projetados para garantir estabilidade contra flambagem, contribuem significativamente para a minimização da deformação na parte superior da estrutura.

Figura 62: Diagrama de deformação resultante no silo completo



Fonte: Autor (2025)

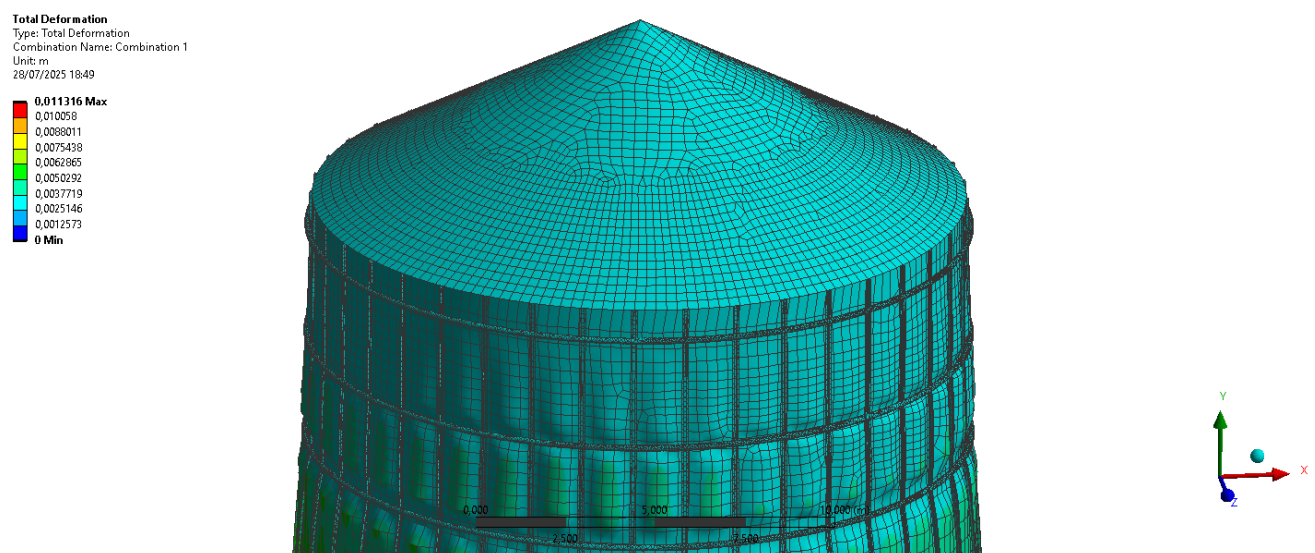
A simulação numérica revelou uma deformação máxima de 11,316 mm na estrutura do silo. Considerando que o diâmetro do silo é de 18.000 mm, a deformação relativa corresponde a aproximadamente 1/1590 do diâmetro. Para silos, os limites de deformação relativa sob ELS

geralmente estão na faixa de  $D/1000$  a  $D/2000$ , como mencionado anteriormente. O valor de  $D/1590$  se encaixa nesse intervalo, o que indicativo conformidade com EN 1993-1-6:2007. Esse deslocamento global é considerado aceitável, pois não compromete o funcionamento dos equipamentos instalados no silo e está dentro dos limites de aparência visual estabelecidos pelas normas aplicáveis.

É importante esclarecer que o valor de 11,316 mm não reflete um deslocamento de corpo rígido ou uma flexão global da estrutura, mas sim a amplitude máxima de uma imperfeição geométrica decorrente do modo de flambagem local das chapas que compõem o silo. A simulação conseguiu capturar os padrões característicos de flambagem associados ao uso da estrutura, indicando que as chapas atingiram um regime de pós-flambagem. Nesse estado, observa-se uma redução significativa da rigidez axial das chapas, com as tensões sendo redistribuídas para os montantes adjacentes — elementos verticais que funcionam como reforços estruturais.

Fica evidente na Figura 63, a função essencial dos enrijecedores em silos metálicos, governar a natureza da deformação da estrutura, evitando a ovalização (causada pelo vento) e o enrugamento por flambagem (causado por cargas axiais). Os anéis e montantes atuam para restringir esses padrões de deformação catastróficos. Ao fornecerem rigidez circunferencial e axial, eles forçam a estrutura a se deformar de uma maneira controlada e previsível (predominantemente elástica) sob cargas de serviço. Portanto, o sistema de reforço não elimina a deformação, mas a gerência.

Figura 63: Diagrama de deformação resultante nos anéis e telhado



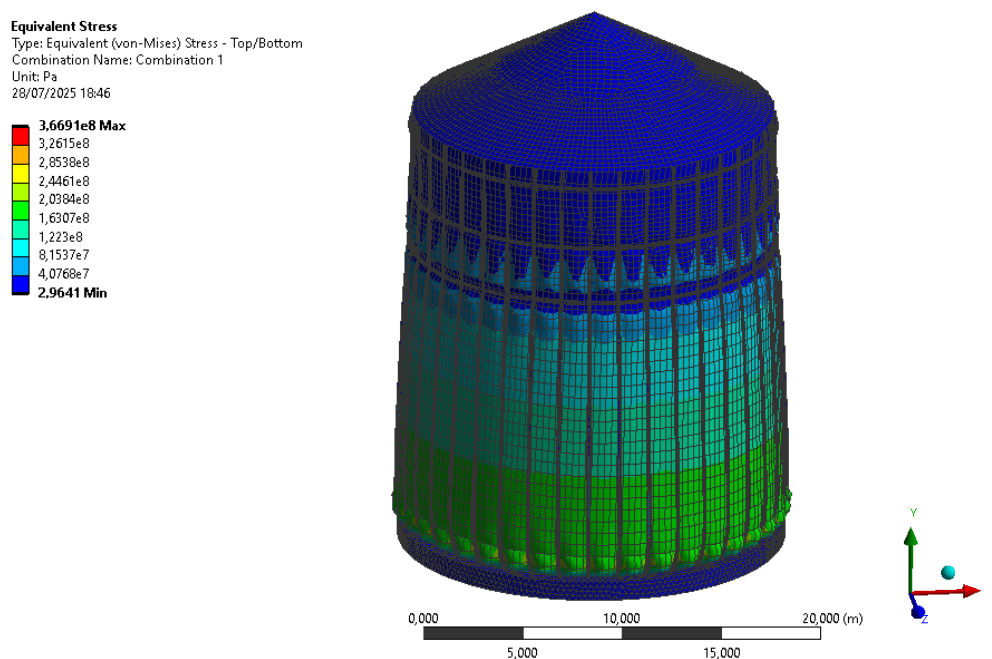
Fonte: Autor (2025)

Caso a estrutura seja submetida a umas cargas adicionais, as amplitudes dessas deformações podem aumentar de forma súbita e não linear, o que exige cautela na avaliação de cenários de carregamento futuro.

#### 4.3. RESULTADO DAS TENSÕES DE VON MISES RESULTANTES

A Figura 64 análises apresenta a distribuição das tensões equivalentes de von Mises ( $\sigma_v$ ), um critério fundamental para prever o início do escoamento em materiais dúcteis como o aço. Este critério combina as componentes de tensão normal e de cisalhamento em um único valor escalar que, quando comparado à tensão de escoamento do material, indica a sollicitação estrutural. No silo, essas tensões foram geradas pela combinação de carregamentos, como o peso próprio, a pressão dos grãos e ações ambientais como o vento.

Figura 64: Diagrama de tensão resultante no silo completo



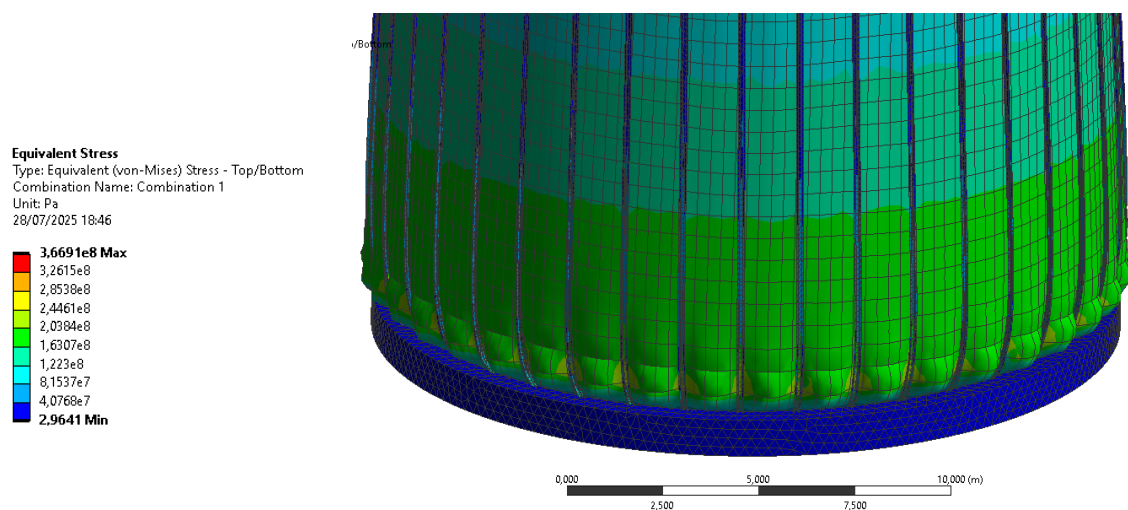
Fonte: Autor (2025)

O diagrama de tensões revela um comportamento estrutural complexo: a maior parte da estrutura, especialmente a seção inferior do silo, apresenta tensões moderadas (representadas pelas cores azul e verde). Contudo, observa-se uma concentração crítica de tensões na junção entre dos montantes e chapas na parte inferior, conforme a Figura 65, com o valor máximo atingindo  $\sigma_{v\_max}=3,6691 \times 10^8$  Pa, ou seja, 366,91 MPa. Esta região, demarcada em vermelho,

exibe um padrão de enrugamento característico de flambagem local da chapa e montante, um modo de falha típico para cascas de parede fina sob compressão axial.

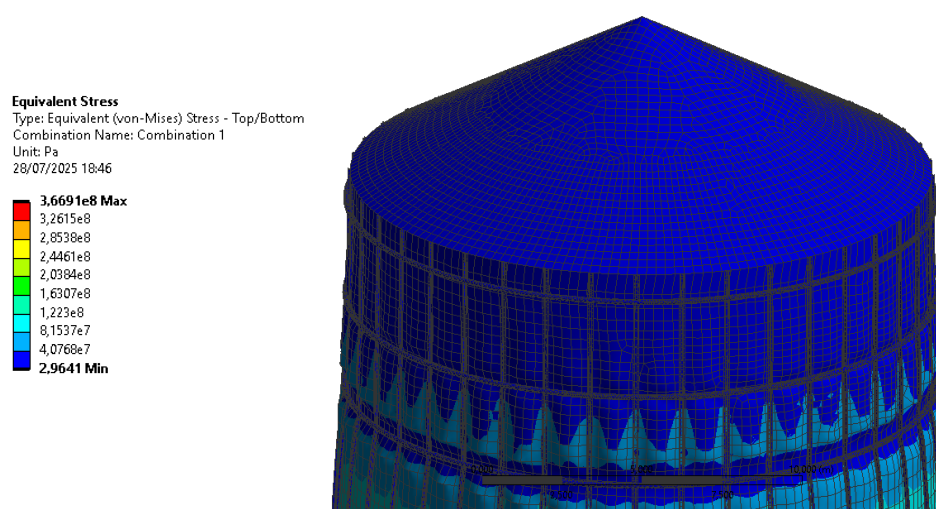
Os montantes absorvem uma parcela majoritária das tensões no sistema composto de chapa-montante, conforme Figuras 65 e 66. A chapa, ao receber uma carga perpendicular ao seu plano ou mesmo uma força de cisalhamento em seu plano, atua primordialmente como um diafragma, cuja função é distribuir o carregamento aos elementos de maior rigidez axial e à flexão, que são os montantes. Estes, por sua vez, funcionam como enrijecedores que não apenas estabilizam a chapa contra fenômenos de flambagem local, mas também concentram o fluxo de tensões, canalizando as cargas para os pontos de apoio ou para o restante do sistema estrutural. A consequência direta é a manifestação de um campo de tensões não uniforme, com picos de solicitação nos montantes. Portanto, o dimensionamento destes elementos exige que a sua tensão resistente de projeto  $\sigma_{Rd,montante}$  seja substancialmente superior à tensão resistente da chapa  $\sigma_{Rd,chapa}$ , garantindo que o escoamento ou a instabilidade não ocorram prematuramente nos elementos de reforço.

Figura 65: Ampliação na base do diagrama de tensões resultantes do silo



Fonte: Autor (2025)

Figura 66: Ampliação no telhado do diagrama de tensões resultantes do silo

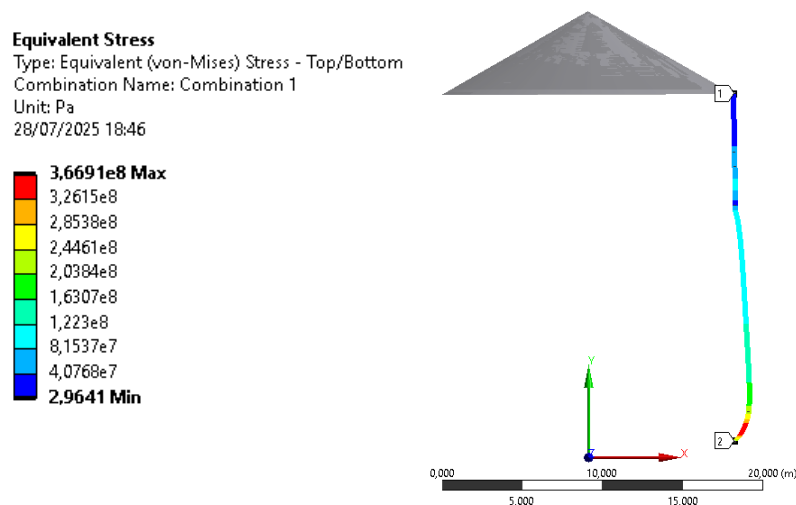


Fonte: Autor (2025)

Para a verificação da segurança no Estado Limite Último (ELU), considera-se o aço ARC 600, cuja tensão de escoamento característica é  $f_{yk} = 400$  MPa. De acordo com a norma brasileira ABNT NBR 8800:2008, a resistência de cálculo ao escoamento  $f_{yd}$  é obtida pela divisão da tensão característica pelo coeficiente de ponderação da resistência do aço,  $\gamma_{a1} = 1,10$ . Portanto, a tensão de escoamento de cálculo é  $f_{yd} = 480 \text{ MPa} / 1,10 \approx 436,36$  MPa. Ao comparar a tensão máxima obtida na análise com a resistência de cálculo, temos que  $\sigma_{v\_max}(366,91 \text{ Mpa}) < f_{yd}(436,36 \text{ MPa})$ . Isso demonstra que a estrutura, nos pontos de máxima solicitação, atende ao critério de resistência do ELU, indicando que a estrutura está em regime elástico escoamento plástico localizado.

A Figura 67 detalha das tensões ao longo de uma linha vertical na parede do silo, iniciando pelo ponto (1) e finalizando (2), evidenciando uma diferença clara entre a chapa de vedação e os montantes. Ao examinar os resultados numéricos apenas no caminho da chapa, as tensões de von Mises foram consistentemente menores do que se a trajetória incluísse a seção transversal dos montantes.

Figura 67: Tensão resultante por um caminho na parede do silo pelas chapas



Fonte: Autor (2025)

Esse resultado confirma o princípio do comportamento de sistemas de chapas e montantes. Os montantes, com maior rigidez e inércia, absorvem e direcionam o fluxo de tensões, reduzindo a solicitação na chapa. Assim, em toda a altura do silo, as tensões na chapa ficaram bem mais baixas, alcançando um valor máximo de 111 MPa. Isso destaca a função principal da chapa como um diafragma que distribui as cargas, enquanto os montantes suportam as solicitações mais intensas.

## 5. CONCLUSÃO

Este estudo realizou uma análise estrutural detalhada do corpo metálico de um silo Kepler Weber, modelo 6024, localizado na Fazenda Boiadeiro, no Oeste da Bahia. O objetivo central foi investigar as tensões e os deslocamentos resultantes da combinação de carregamentos de grãos e vento, utilizando a teoria das placas por meio do Método de Elementos Finitos (MEF) no software ANSYS. A metodologia cumpriu com os objetivos propostos, validando o uso da simulação computacional como uma ferramenta eficiente para a verificação da segurança em estruturas de casca de parede fina.

A análise dos resultados demonstrou que, para a combinação de carregamentos de Estado Limite Último (ELU) — considerando a pressão dos grãos e a ação do vento com seus respectivos coeficientes de ponderação —, o silo apresentou um comportamento estrutural seguro e coerente com os princípios de engenharia. Os principais resultados foram:

**Deslocamento Estrutural:** A deformação máxima resultante foi de 11,316 mm. Este valor, correspondente a aproximadamente 1/1590 do diâmetro do silo, está em conformidade com os limites normativos de serviço, como os da EN 1993-1-6:2007, garantindo a operacionalidade e a integridade visual da estrutura. A simulação capturou com sucesso o padrão de flambagem local das chapas, evidenciando a redistribuição de esforços para os montantes.

**Análise de Tensões:** A tensão máxima equivalente de von Mises atingiu 366,91 MPa, concentrada na junção entre os montantes e as chapas na base do silo. Este valor é inferior à resistência de cálculo do aço ARC 600 utilizado, que é de aproximadamente 436,36 MPa. Dessa forma, a estrutura atende ao critério de resistência no ELU, operando majoritariamente em regime elástico.

**Função dos Elementos de Reforço:** A investigação demonstrou o papel fundamental dos montantes, que atuam como os principais elementos de rigidez, absorvendo a maior parte das tensões e canalizando as cargas para a fundação. A análise linearizada das tensões ao longo da parede do silo revelou que, enquanto as chapas apresentam tensões máximas de 111 MPa, os montantes suportam as solicitações mais críticas, validando o comportamento do sistema compósito chapa-montante.

Conclui-se, portanto, que o dimensionamento do silo é seguro para as condições estáticas de carregamento analisadas. O estudo valida que uma análise simplificada, baseada na teoria de membrana. A metodologia de MEF mostrou-se essencial para uma avaliação precisa e segura do comportamento estrutural.

Para a trabalhos futuros, recomenda-se aprofundar a análise de estudos específicos de instabilidade por flambagem e análises de fadiga, considerando os ciclos de carga e descarga. Tais investigações permitirão uma avaliação ainda mais completa e fidedigna da segurança e da vida útil do silo.

## REFERÊNCIAS

ALVES FILHO, A. **Elementos Finitos—A base da tecnologia CAE**. São Paulo – SP: Saraiva Educação SA, 2018.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE – ANSI. **Loads Exerted by Free-Flowing Grain on Bins**. Estado Unidos da America, jun. 2019.

ANDRADE JÚNIOR, L. J. **A ação do vento em silos cilíndricos de baixa relação altura/diâmetro**. Tese (Doutorado em Engenharias de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123 – Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2023.

\_\_\_\_\_. **NBR 7008-1 - Chapas e bobinas de aço revestidas com zinco ou liga de zinco-ferro pelo processo contínuo de imersão a quente - Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2021.

\_\_\_\_\_. **NBR 8800 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 11888 - Bobinas e chapas finas a frio e a quente de aço carbono e de aço de alta resistência e baixa liga — Requisitos gerais**. Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 14762 - Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio**. Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 17066 - Silos metálicos de chapas corrugadas**. Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2022.

ASSOCIAÇÃO DE AGRICULTORES E IRRIGADORES DA BAHIA – AIBA. **O agro que sustenta. Rural**. 25. ed. Luís Eduardo Magalhães – BA, 2023.

AYUGA, F. Los empujes del material almacenado en silos. **Informes de la Construcción**, España, v. 46, n. 436, p. 27-34, marzo/abril 1995.

AZEVEDO, D. F. DE O. **Análise estrutural com Ansys Workbench: Static Structural**. Notas de Aula, Universidade de Mogi Cruzes, Mogi da Cruzes – SP, 2015.

BARKANOV, E. Introduction to the finite element method. Riga – Latvia: **Riga Technical University**, 2001.

BRIASSOULIS, D. Equivalent orthotropic Properties of corrugated sheets. **Computers and Structures**, Illinois – USA. v. 23, n. 2, p. 129-138, 1986.

CALIL JUNIOR, C.; CHEUNG, A. B. **Silos: pressões, fluxo, recomendações para o projeto e exemplos de cálculo**. São Carlos – SP: Escola de Engenharia de São Carlos, 2007.

CHEUNG, A. B. **Modelo estocástico de pressões de produtos armazenados para a estimativa da confiabilidade estrutural de silos esbeltos**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL – CNA; CENTRO DE ESTUDOS EM ECONOMIA APLICADA – CEPEA. **Sumário executivo – PIB agronegócio CEPEA/CNA: PIB do agronegócio sofre queda no primeiro trimestre devido à pressão dos preços mais baixos**. Piracicaba – SP, 2023. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>. Acesso em: 04 jul. 2024.

EUROPEAN STANDARD. EN 1991-4:2006 - **Actions on structures - Part 4: Silos and tanks**, 1995.

FANK, M. Z. **Pressões em silos verticais cilíndricos metálicos: determinação experimental e cálculos teóricos por normas estrangeira**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 2017.

FISH, J.; BELYTSCHKO, T. **Um Primeiro Curso em Elementos Finitos**. Rio de Janeiro - RJ: LTC, 2009.

FREITAS, E. das G. A.; CALIL JÚNIOR, C. **Estudo Teórico e Experimental das Pressões em Silos de Baixa Relação Altura/Diâmetro e Fundo Plano**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo – SP, 2001.

FREITAS, E. G. A. **Estudo Teórico e Experimental das Pressões em Silos de Baixa Relação Altura/Diâmetro e Fundo Plano**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos – SP, 2001.

GALLEGO, E.; RUIZ, A.; AGUADO, P. J. Simulation of silo filling and discharge using ANSYS and comparison with experimental data. **Computers and Electronics in Agriculture**, Madrid – Spain. v. 118, p. 281–289, 2015.

GARBAZZA, E. I. **Programa computacional para cálculo de pressões em silos verticais de acordo com a norma australiana**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG, 2011.

GEISLER, M.; DE GRAUWE, D. **Evolution of grain storage structures: from earthen pits to automated bins**. **Journal of Agricultural Engineering**, v. 54, n. 1, p. 1-18, 2021.

GOOGLE. **Google Maps**. 2024. Disponível em: <https://www.google.com/maps?q=-12.1058209,-45.9535203>. Acesso em: 05 ago. 2024.

HEMING, F. L. B. **Armazenagem de grãos: armazenamento e conservação**. Curitiba – PR: SENAR, 2016.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 11697:1995 -Bases for design of structures – Loads due to bulk materials**, 1995.

JENIKE, A. W. Steady gravity flow of frictional-cohesive solids in converging channels. **ASME. J. Appl. Mech.** Massachusetts – USA, 1964.

KOCK, M. A. **Dimensionamento de um silo metálico com fundo plano para armazenamento de soja.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco-PR, 2018.

LOPES NETO, J. P. **Análise Teórico-Experimental das Forças Verticais e de Atrito em silos cilíndricos.** Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 2009.

LOPES NETO, J. P.; NASCIMENTO, J. W. B. DO; FANK, M. Z. Forças verticais e de atrito em silos cilíndricos com fundo plano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande – PB, v. 18, n. 6, p. 652–657, 2014.

MACIEL, K. R. D. **Desenvolvimento de blocos de concreto para construção de silos circulares de alvenaria sem função estrutural.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Campina Grande – PB, 2002.

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

NASCIMENTO, F. C. **A relação entre as pressões horizontais e verticais em silos elevados: parâmetro K.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2009.

PALMA, G.; CALIL JUNIOR, C. Pressões e fluxo em silos esbeltos ( $H/D' > OU = 1.5$ ). **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos – SP, v. 10, n. 42, p. 129-150, 2008.

QUEIMADO, C. F. **Silos industriais uma história de fascínio e decadência.** Dissertação - Universidade De Lisboa, Lisboa, 2010.

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

TIMOSHENKO E WOINOWSKY-KRIEGER. **Theory of plates and shells.** United States of America: McGraw-Hill Book Company, 1989.

UGURAL, A.C. **Stresses in beams, plates, and shells.** New York – USA: CRC Press, 2010

ZHAO, Y.; LV, H.; LI, Y. **Grain storage: theory, technology and equipment.** *Foods*, Basel, v. 12, n. 20, art. 3792, 2023. DOI: 10.3390/foods12203792.

## APÊNDICE A – TABELA DE CÁLCULO DAS PRESSÕES DE GRÃOS

Quadro 1 - Dados referente à cálculo das pressões exercida pelos grãos da parede no silo

| <b>Profundidade<br/>(z) [m]</b> | <b>Termo<br/>Exponencial</b> | <b>Pressão<br/>Horizontal<br/>[kN/m²]</b> | <b>Pressão<br/>Vertical<br/>[kN/m²]</b> | <b>Pressão de Atrito<br/>[kN/m²]</b> |
|---------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|
| 0                               | 1,00                         | 0,00                                      | 0,00                                    | 0,00                                 |
| 1                               | 0,96                         | 3,91                                      | 7,82                                    | 1,56                                 |
| 2                               | 0,91                         | 7,65                                      | 15,31                                   | 3,06                                 |
| 3                               | 0,88                         | 11,23                                     | 22,47                                   | 4,49                                 |
| 4                               | 0,84                         | 14,66                                     | 29,32                                   | 5,86                                 |
| 5                               | 0,80                         | 17,93                                     | 35,87                                   | 7,17                                 |
| 6                               | 0,77                         | 21,07                                     | 42,13                                   | 8,43                                 |
| 7                               | 0,73                         | 24,06                                     | 48,13                                   | 9,63                                 |
| 8                               | 0,70                         | 26,93                                     | 53,86                                   | 10,77                                |
| 9                               | 0,67                         | 29,67                                     | 59,34                                   | 11,87                                |
| 10                              | 0,64                         | 32,29                                     | 64,59                                   | 12,92                                |
| 11                              | 0,61                         | 34,80                                     | 69,60                                   | 13,92                                |
| 12                              | 0,59                         | 37,20                                     | 74,40                                   | 14,88                                |
| 13                              | 0,56                         | 39,50                                     | 78,99                                   | 15,80                                |
| 14                              | 0,54                         | 41,69                                     | 83,38                                   | 16,68                                |
| 15                              | 0,51                         | 43,79                                     | 87,58                                   | 17,52                                |
| 16                              | 0,49                         | 45,80                                     | 91,60                                   | 18,32                                |
| 17                              | 0,47                         | 47,72                                     | 95,45                                   | 19,09                                |
| 18                              | 0,45                         | 49,56                                     | 99,12                                   | 19,82                                |
| 19                              | 0,43                         | 51,32                                     | 102,64                                  | 20,53                                |
| 20                              | 0,41                         | 53,00                                     | 106,00                                  | 21,20                                |
| 21                              | 0,39                         | 54,61                                     | 109,22                                  | 21,84                                |
| 22                              | 0,38                         | 56,15                                     | 112,29                                  | 22,46                                |

Fonte: Autor (2025)

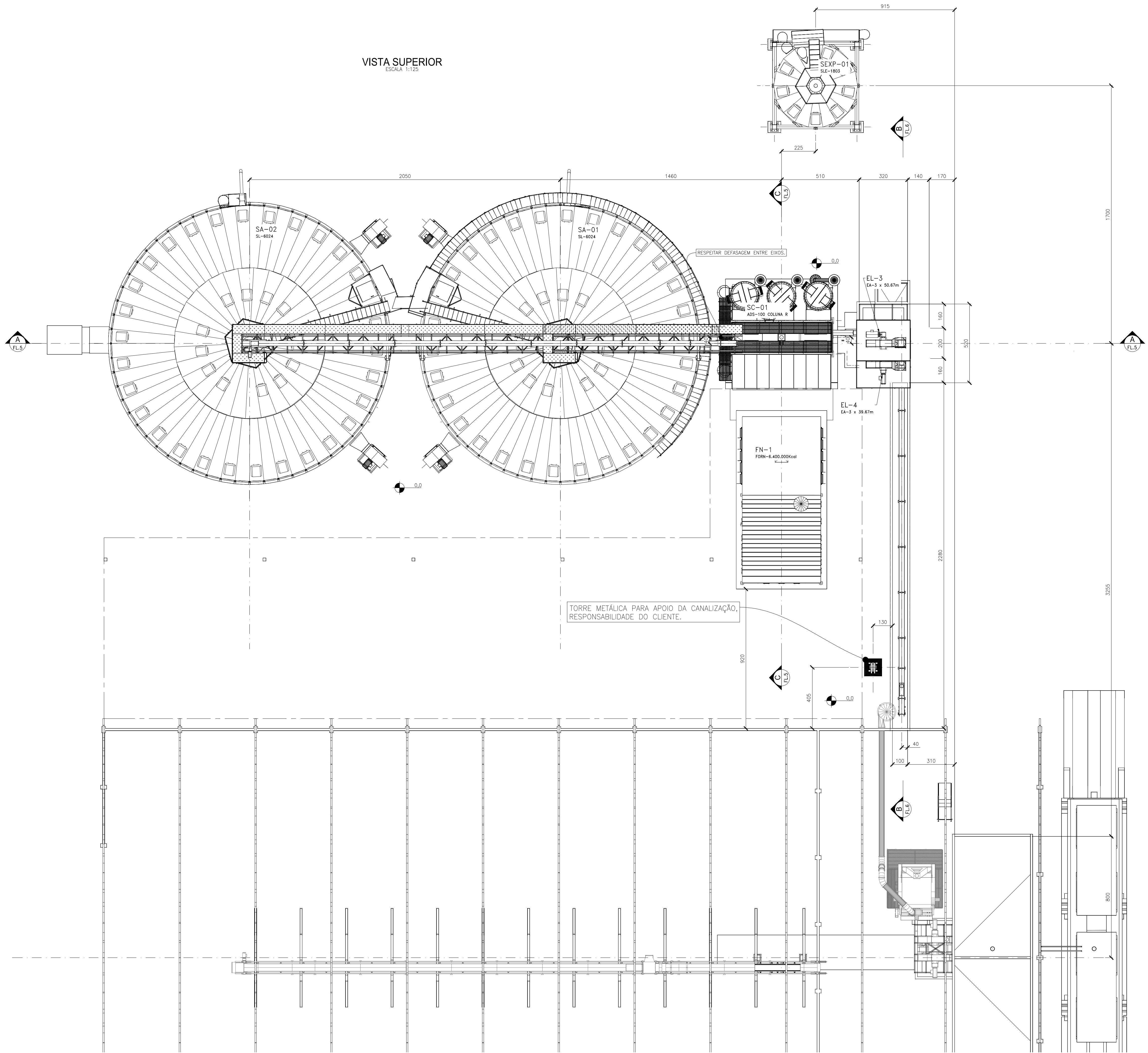
## APÊNDICE B – TABELA DE CÁLCULO DAS PRESSÕES DE VENTO

Quadro 2 - Dados referente à cálculo das pressões exercida pelos vento da parede no silo

| Altura (z) [m] | S2(z) | Vz [m/s] | q [kN/m²] | P [kN/m²] |
|----------------|-------|----------|-----------|-----------|
| 0              | 0,00  | 0,00     | 0,00      | 0,00      |
| 1              | 0,94  | 26,69    | 0,44      | 0,31      |
| 2              | 0,98  | 27,92    | 0,48      | 0,33      |
| 3              | 1,01  | 28,67    | 0,50      | 0,35      |
| 4              | 1,02  | 29,21    | 0,52      | 0,37      |
| 5              | 1,04  | 29,64    | 0,54      | 0,38      |
| 6              | 1,05  | 29,99    | 0,55      | 0,39      |
| 7              | 1,06  | 30,29    | 0,56      | 0,39      |
| 8              | 1,07  | 30,56    | 0,57      | 0,40      |
| 9              | 1,08  | 30,79    | 0,58      | 0,41      |
| 10             | 1,09  | 31,00    | 0,59      | 0,41      |
| 11             | 1,09  | 31,19    | 0,60      | 0,42      |
| 12             | 1,10  | 31,37    | 0,60      | 0,42      |
| 13             | 1,11  | 31,54    | 0,61      | 0,43      |
| 14             | 1,11  | 31,69    | 0,62      | 0,43      |
| 15             | 1,12  | 31,83    | 0,62      | 0,43      |
| 16             | 1,12  | 31,96    | 0,63      | 0,44      |
| 17             | 1,13  | 32,09    | 0,63      | 0,44      |
| 18             | 1,13  | 32,21    | 0,64      | 0,45      |
| 19             | 1,13  | 32,32    | 0,64      | 0,45      |
| 20             | 1,14  | 32,43    | 0,64      | 0,45      |
| 21             | 1,14  | 32,53    | 0,65      | 0,45      |
| 22             | 1,15  | 32,63    | 0,65      | 0,46      |
| 23             | 1,15  | 32,73    | 0,66      | 0,46      |
| 24             | 1,15  | 32,82    | 0,66      | 0,46      |
| 25             | 1,15  | 32,90    | 0,66      | 0,46      |
| 26             | 1,16  | 32,99    | 0,67      | 0,47      |
| 27             | 1,16  | 33,07    | 0,67      | 0,47      |

Fonte: Autor (2025)

## APÊNDICE C – PROJETO DA UNIDADE DE ARMAZENAMENTO



VISTA SUPERIOR  
ESCALA 1:125

TORRE METÁLICA PARA APOIO DA CANALIZAÇÃO,  
RESPONSABILIDADE DO CLIENTE.

| C    | 26/07/2022 | LYON PEIXOTO | INSERÇÃO SA-02 / ALTERADA POSIÇÃO MOEGA LADRAO |
|------|------------|--------------|------------------------------------------------|
| B    | 22/06/2022 | LYON PEIXOTO | PROJETO FINAL                                  |
| A    | 15/06/2022 | LYON PEIXOTO | LOCAÇÃO CIVIL                                  |
| REV. | DATA       | RESPONSÁVEL  | DESCRIÇÃO                                      |

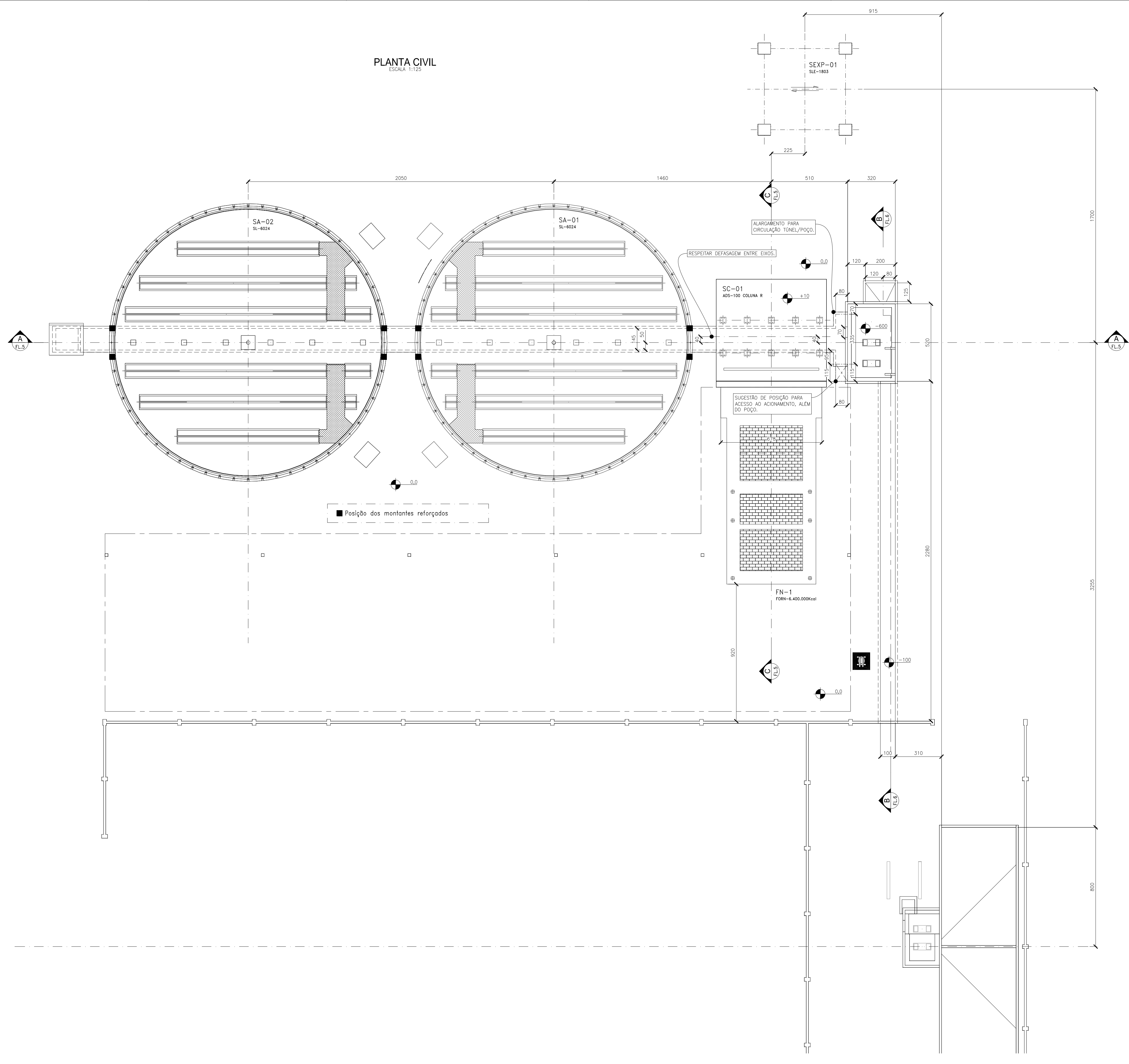
-Todos os direitos estão reservados e protegidos por lei. Nenhuma parte deste desenho deve ser apropriada, copiada, reproduzida por qualquer meio ou repassada a terceiros sem prévia autorização, por escrito, da Kepler Weber.  
-No caso de divergência entre a escala do desenho e as medidas representadas, prevalecem as últimas.  
-Todas as dimensões indicadas neste desenho, sem a devida unidade de medida, estão representadas no sistema métrico e em centímetro[cm].  
-Nenhuma folha deste projeto deve ser analisada separadamente. Obrigatoriamente deve-se analisar o projeto dispondo de todas as folhas.

|                                     |              |                     |
|-------------------------------------|--------------|---------------------|
| DESENHOS FORNECIDOS PARA:           |              |                     |
| <input type="checkbox"/>            | CONHECIMENTO |                     |
| <input type="checkbox"/>            | ORÇAMENTO    |                     |
| <input type="checkbox"/>            | APROVAÇÃO    |                     |
| <input checked="" type="checkbox"/> | EXECUÇÃO     |                     |
| DATA: 15/06/2022                    |              | RESP.: LYON PEIXOTO |

www.kepler.com.br - 0800 512 104 - atendimento@kepler.com.br

CLIENTE: DERCIO BOSA  
LOCAL: LUIS EDUARDO MAGALHÃES - BA  
DESCRIÇÃO:  
AMPLIAÇÃO DE UNIDADE DE RECEBIMENTO DE GRÃOS  
VISTA SUPERIOR

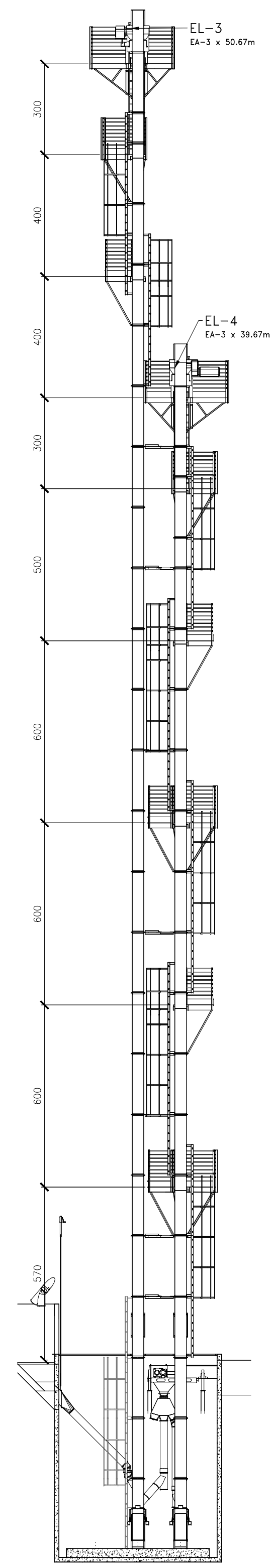
|                    |            |                  |
|--------------------|------------|------------------|
| A1                 | DATA       | NOME             |
| PROJ.              | 15/06/2022 | LYON PEIXOTO     |
| REV.               | 15/06/2022 | FILIPPE KERSTING |
| APR.               | 15/06/2022 | LEONARDO DONATTI |
| ESCALA: INDICADA   |            | FOLHA            |
| ORDEM DE VENDA:    |            | 03-08            |
| PEDIDO: 112-116480 |            |                  |
| CÓDIGO             |            | 7900498834-C     |



| LISTA DE BASES E / OU DESENHOS AUXILIARES |                                                   |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| SILOS                                     |                                                   |
| 9500000001                                | BASE ANEL 'SILO 60' - PADRÃO KMAT SL_22           |
| 9500000043                                | BASE SL60, C.MAIOR, 02 VENT, TN                   |
| 9500000053                                | A - BASE SL18E EXP ESTR MET E45G BALANÇA DE FLUXO |
| SECADOR                                   |                                                   |
| 9138288546                                | BASE KW 80 100 ADS COMERCIAL R 2000 2300 ARROZ    |
| FORNALHA                                  |                                                   |
| 9139956011                                | FORNALHA 6400000                                  |
| 9139956143                                | B - CIVIL I                                       |
| 9139956240                                | FORNALHA 6.400.000 CIVIL II                       |
| 9139956348                                | FORNALHA 6.400.000 FERRAGEM                       |
| 9139917040                                | DETALHES TÍPICOS FORNALHAS                        |
| 9140131314                                | REDEMUNHADOR                                      |
| 9140108746                                | BASE FORNALHA ALVENARIA 6.400.000 -4M-Layout1     |
| 9140109343                                | ARRANJO SECADOR                                   |
| 9139995319                                | ESTRUTURA REDEMUNHADOR                            |

| C                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 26/07/2022 | LYON PEIXOTO | INSERÇÃO SA-02 / ALTERADA POSIÇÃO MOEGA LADRAO |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|--------------|------------------------------------------------|
| B                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 22/06/2022 | LYON PEIXOTO | PROJETO FINAL                                  |
| A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 15/06/2022 | LYON PEIXOTO | LOCAÇÃO CIVIL                                  |
| REV.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | DATA       | RESPONSÁVEL  | DESCRIÇÃO                                      |
| -Todos os direitos estão reservados e protegidos por lei. Nenhuma parte deste desenho deve ser apropriada, copiada, reproduzida por qualquer meio ou repassada a terceiros sem prévia autorização, por escrito, da Kepler Weber.<br>-No caso de divergência entre a escala do desenho e as medidas representadas, prevalecem as últimas.<br>-Todas as dimensões indicadas neste desenho, sem a devida unidade de medida, estão representadas no sistema métrico e em centímetro[cm].<br>-Nenhuma folha deste projeto deve ser analisada separadamente. Obrigatoriamente deve-se analisar o projeto dispondo de todas as folhas. |            |              |                                                |
| DESENHOS FORNECIDOS PARA:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |            |              |                                                |
| <input type="checkbox"/> CONHECIMENTO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |            |              |                                                |
| <input type="checkbox"/> ORÇAMENTO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |            |              |                                                |
| <input type="checkbox"/> APROVAÇÃO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |            |              |                                                |
| <input checked="" type="checkbox"/> EXECUÇÃO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |            |              |                                                |
| DATA: 15/06/2022                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |            |              |                                                |
| RESP.: LYON PEIXOTO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |            |              |                                                |
| KEPLERWEBER®<br>www.kepler.com.br - 0800 512 104 - atendimento@kepler.com.br                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |            |              |                                                |
| CLIENTE: DERCIO BOSA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |            | A1           | DATA                                           |
| LOCAL: LUIS EDUARDO MAGALHÃES - BA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |            | PROJ.        | 15/06/2022                                     |
| DESCRIÇÃO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |            | REV.         | 15/06/2022                                     |
| AMPLIAÇÃO DE UNIDADE DE RECEBIMENTO DE GRÃOS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |            | APR.         | 15/06/2022                                     |
| PLANTA CIVIL                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |            | FOLHA        |                                                |
| ORDEN DE VENDA:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |            | 04-08        |                                                |
| PEDIDO: 112-116480                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |            | CÓDIGO       |                                                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |            | 7900498834-C |                                                |





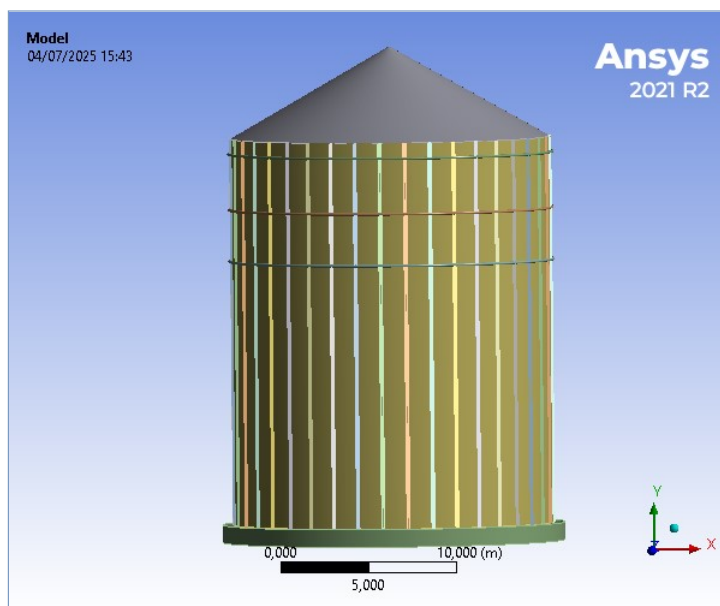
| C                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 26/07/2022 | LYON PEIXOTO | INSERÇÃO SA-02 / ALTERAÇÃO POSIÇÃO MOEGA LADRAO                                                                                                                                                                                                                                              |  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| B                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 22/06/2022 | LYON PEIXOTO | PROJETO FINAL                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
| A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 15/06/2022 | LYON PEIXOTO | LOCAÇÃO CIVIL                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
| REV.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | DATA       | RESPONSÁVEL  | DESCRIÇÃO                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |
| <p>- Todos os direitos estão reservados e protegidos por lei. Nenhuma parte deste desenho deve ser apropriada, copiada, reproduzida por qualquer meio ou repassada a terceiros sem prévia autorização, por escrito, do Kepler Weber.</p> <p>- Não caso de divergência entre a escala do desenho e as medidas representadas, prevalecem as últimas.</p> <p>- Todas as dimensões indicadas neste desenho, sem a devida unidade de medida, estão representadas no sistema métrico e em centímetro[cm].</p> <p>- Nenhuma folha deste projeto deve ser analisado separadamente. Obrigatoriamente deve-se analisar o projeto disposto de todas as folhas.</p> |            |              | <p><b>DENSOENHOS FORNECIDOS PARA:</b></p> <p><input type="checkbox"/> CONHECIMENTO</p> <p><input type="checkbox"/> ORÇAMENTO</p> <p><input type="checkbox"/> APROVAÇÃO</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> EXECUÇÃO</p> <p><b>DATA: 15/06/2022</b><br/> <b>RESP: LYON PEIXOTO</b></p> |  |

## APÊNDICE D – RELATORIO DE CÁLCULO ANSYS



## SILO 6024

|                              |                         |
|------------------------------|-------------------------|
| First Saved                  | Wednesday, May 14, 2025 |
| Last Saved                   | Thursday, July 3, 2025  |
| Product Version              | 2021 R2                 |
| Save Project Before Solution | No                      |
| Save Project After Solution  | No                      |



## Contents

- [Units](#)
- [Model \(A4, B4\)](#)
  - [Geometry](#)
    - [Body Groups](#)
      - [Parts](#)
      - [Parts](#)
  - [Construction Geometry](#)
    - [Path](#)
  - [Materials](#)
  - [Coordinate Systems](#)
  - [Connections](#)
    - [Contacts](#)
      - [Contact Regions](#)
  - [Mesh](#)
  - [Named Selections](#)
  - [Static Structural GRÃOS \(A5\)](#)
    - [Analysis Settings](#)
    - [Loads](#)
    - [Solution \(A6\)](#)
      - [Solution Information](#)
      - [Results](#)
  - [Static Structural VENTO \(B5\)](#)
    - [Analysis Settings](#)
    - [Loads](#)
    - [Solution \(B6\)](#)
      - [Solution Information](#)
      - [Results](#)
  - [Solution Combination](#)
    - [Results](#)
- [Material Data](#)
  - [Concrete](#)
  - [Structural Steel](#)

## Units

TABLE 1

| Unit System         | Metric (m, kg, N, s, V, A) Degrees rad/s Celsius |
|---------------------|--------------------------------------------------|
| Angle               | Degrees                                          |
| Rotational Velocity | rad/s                                            |
| Temperature         | Celsius                                          |

## Model (A4, B4)

### Geometry

TABLE 2  
Model (A4, B4) > Geometry

|                                  |                                                                           |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Object Name                      | Geometry                                                                  |
| State                            | Fully Defined                                                             |
| <b>Definition</b>                |                                                                           |
| Source                           | C:\Users\Tercio\Documents\laNSYS\Modelo 31.05_files\dp0\lSYS\DM\SYS.scdoc |
| Type                             | SpaceClaim                                                                |
| Length Unit                      | Meters                                                                    |
| Element Control                  | Program Controlled                                                        |
| Display Style                    | Body Color                                                                |
| <b>Bounding Box</b>              |                                                                           |
| Length X                         | 19,5 m                                                                    |
| Length Y                         | 28,2 m                                                                    |
| Length Z                         | 19,5 m                                                                    |
| <b>Properties</b>                |                                                                           |
| Volume                           | 396,72 m³                                                                 |
| Mass                             | 1,4568e+006 kg                                                            |
| Scale Factor Value               | 1,                                                                        |
| 2D Tolerance                     | Default (1,e-005)                                                         |
| <b>Statistics</b>                |                                                                           |
| Bodies                           | 46                                                                        |
| Active Bodies                    | 46                                                                        |
| Nodes                            | 352312                                                                    |
| Elements                         | 173928                                                                    |
| Mesh Metric                      | None                                                                      |
| <b>Update Options</b>            |                                                                           |
| Assign Default Material          | No                                                                        |
| <b>Basic Geometry Options</b>    |                                                                           |
| Solid Bodies                     | Yes                                                                       |
| Surface Bodies                   | Yes                                                                       |
| Line Bodies                      | Yes                                                                       |
| Parameters                       | Independent                                                               |
| Parameter Key                    |                                                                           |
| Attributes                       | Yes                                                                       |
| Attribute Key                    |                                                                           |
| Named Selections                 | Yes                                                                       |
| Named Selection Key              |                                                                           |
| Material Properties              | Yes                                                                       |
| <b>Advanced Geometry Options</b> |                                                                           |
| Use Associativity                | Yes                                                                       |
| Coordinate Systems               | Yes                                                                       |
| Coordinate System Key            |                                                                           |

|                                   |        |
|-----------------------------------|--------|
| Reader Mode Saves Updated File    | No     |
| Use Instances                     | Yes    |
| Smart CAD Update                  | Yes    |
| Compare Parts On Update           | No     |
| Analysis Type                     | 3-D    |
| Mixed Import Resolution           | None   |
| Import Facet Quality              | Source |
| Clean Bodies On Import            | No     |
| Stitch Surfaces On Import         | None   |
| Decompose Disjoint Geometry       | Yes    |
| Enclosure and Symmetry Processing | Yes    |

| TABLE 3                                 |                           |                   |
|-----------------------------------------|---------------------------|-------------------|
| Model (A4, B4) > Geometry > Body Groups |                           |                   |
| Object Name                             | SYS                       | SYS               |
| State                                   | Meshed                    |                   |
| Graphics Properties                     |                           |                   |
| Visible                                 | Yes                       |                   |
| Definition                              |                           |                   |
| Suppressed                              | No                        |                   |
| Assignment                              | Multiple Materials        | Structural Steel  |
| Coordinate System                       | Default Coordinate System |                   |
| Bounding Box                            |                           |                   |
| Length X                                | 19,5 m                    | 18,334 m          |
| Length Y                                | 28,2 m                    | 22, m             |
| Length Z                                | 19,5 m                    | 18,334 m          |
| Properties                              |                           |                   |
| Volume                                  | 395,66 m³                 | 1,0646 m³         |
| Mass                                    | 1,4484e+006 kg            | 8357,4 kg         |
| Centroid X                              | -3,3794e-005 m            | -5,5511e-017 m    |
| Centroid Y                              | 12,83 m                   | 11,941 m          |
| Centroid Z                              | 1,057e-006 m              | 3,1225e-016 m     |
| Moment of Inertia Ip1                   | 2,4166e+008 kg·m²         | 6,8463e+005 kg·m² |
| Moment of Inertia Ip2                   | 6,7546e+007 kg·m²         | 6,9731e+005 kg·m² |
| Moment of Inertia Ip3                   | 2,4166e+008 kg·m²         | 6,8463e+005 kg·m² |
| Surface Area(approx.)                   | 266,16 m²                 |                   |
| Statistics                              |                           |                   |
| Nodes                                   | 242294                    | 110018            |
| Elements                                | 138732                    | 35196             |
| Mesh Metric                             | None                      |                   |
| CAD Attributes                          |                           |                   |
| PartTolerance:                          | 0,00000001                |                   |
| Color:143.175.143                       |                           |                   |

| TABLE 4<br>Model (A4, B4) > Geometry > SYS > Parts |                           |                      |                   |                   |                   |                      |
|----------------------------------------------------|---------------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| Object Name                                        | Solid                     | Solid                | Surface           | Solid             | Solid             | Surface              |
| State                                              | Meshed                    |                      |                   |                   |                   |                      |
| Graphics Properties                                |                           |                      |                   |                   |                   |                      |
| Visible                                            | Yes                       |                      |                   |                   |                   |                      |
| Transparency                                       | 1                         |                      |                   |                   |                   |                      |
| Definition                                         |                           |                      |                   |                   |                   |                      |
| Suppressed                                         | No                        |                      |                   |                   |                   |                      |
| Stiffness Behavior                                 | Flexible                  |                      |                   |                   |                   |                      |
| Coordinate System                                  | Default Coordinate System |                      |                   |                   |                   |                      |
| Reference Temperature                              | By Environment            |                      |                   |                   |                   |                      |
| Treatment                                          | None                      |                      |                   |                   |                   |                      |
| Dimension                                          |                           | 3D                   |                   |                   |                   | 3D                   |
| Model Type                                         |                           | Shell                |                   |                   |                   | Shell                |
| Stiffness Option                                   |                           | Membrane and Bending |                   |                   |                   | Membrane and Bending |
| Thickness                                          |                           | 4,e-003 m            |                   |                   |                   | 0,3 m                |
| Thickness Mode                                     |                           | Manual               |                   |                   |                   | Manual               |
| Offset Type                                        |                           | Middle               |                   |                   |                   | Middle               |
| Material                                           |                           |                      |                   |                   |                   |                      |
| Assignment                                         | Concrete                  |                      | Structural Steel  |                   |                   |                      |
| Nonlinear Effects                                  | Yes                       |                      |                   |                   |                   |                      |
| Thermal Strain Effects                             | Yes                       |                      |                   |                   |                   |                      |
| Bounding Box                                       |                           |                      |                   |                   |                   |                      |
| Length X                                           | 19,5 m                    | 18,604 m             | 18,2 m            | 18,604 m          | 18,202 m          |                      |
| Length Y                                           | 1, m                      | 0,1693 m             | 22, m             | 0,1693 m          | 5,2 m             |                      |
| Length Z                                           | 19,5 m                    | 18,604 m             | 18,2 m            | 18,604 m          | 18,202 m          |                      |
| Properties                                         |                           |                      |                   |                   |                   |                      |
| Volume                                             | 298,64 m³                 | 0,69134 m³           | 5,0316 m³         | 0,69134 m³        | 89,909 m³         |                      |
| Mass                                               | 6,8688e+005 kg            | 5427, kg             | 39498 kg          | 5427, kg          | 7,0578e+005 kg    |                      |
| Centroid X                                         | -6,6569e-017 m            | -3,2482e-006 m       | -6,3279e-006 m    | -3,2486e-006 m    | -3,2497e-006 m    | -6,8924e-005 m       |
| Centroid Y                                         | 0,5 m                     | 22,128 m             | 12, m             | 18,958 m          | 16,01 m           | 24,733 m             |
| Centroid Z                                         | 2,7244e-016 m             | 8,9282e-005 m        | 1,9025e-006 m     | 8,9366e-005 m     | 8,9607e-005 m     | -6,4063e-016 m       |
| Moment of Inertia Ip1                              | 1,6351e+007 kg·m²         | 4,2065e+005 kg·m²    | 3,2187e+006 kg·m² | 4,2065e+005 kg·m² | 1,5649e+007 kg·m² |                      |
| Moment of Inertia Ip2                              | 3,2588e+007 kg·m²         | 8,4126e+005 kg·m²    | 3,2551e+006 kg·m² | 8,4126e+005 kg·m² | 2,918e+007 kg·m²  |                      |
| Moment of Inertia Ip3                              | 1,6351e+007 kg·m²         | 4,2064e+005 kg·m²    | 3,2187e+006 kg·m² | 4,2064e+005 kg·m² | 1,5649e+007 kg·m² |                      |
| Surface Area(approx.)                              |                           |                      |                   | 1257,9 m²         | 299,7 m²          |                      |
| Statistics                                         |                           |                      |                   |                   |                   |                      |
| Nodes                                              | 145731                    | 19994                | 26796             | 19108             | 19336             | 12097                |
| Elements                                           | 97313                     | 9791                 | 8804              | 9343              | 9501              | 3980                 |
| Mesh Metric                                        | None                      |                      |                   |                   |                   |                      |

**TABLE 5**  
**Model (A4, B4) > Geometry > SYS > Parts**

|              |                                                |                                                |                                                |                                                |                           |
|--------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------|
| Object Name  | Pattern\Pattern\Pattern\Component1<br>\Surface | Pattern\Pattern\Pattern\Component1<br>\Surface | Pattern\Pattern\Pattern\Component1<br>\Surface | Pattern\Pattern\Pattern\Component1<br>\Surface | Pattern\Patte<br>\Surface |
| State        |                                                |                                                |                                                |                                                |                           |
| Visible      |                                                |                                                |                                                |                                                |                           |
| Transparency |                                                |                                                |                                                |                                                |                           |

|                        |               |               |               |              |          |
|------------------------|---------------|---------------|---------------|--------------|----------|
| Suppressed             |               |               |               |              |          |
| Dimension              |               |               |               |              |          |
| Model Type             |               |               |               |              |          |
| Stiffness Behavior     |               |               |               |              |          |
| Stiffness Option       |               |               |               |              |          |
| Coordinate System      |               |               |               |              |          |
| Reference Temperature  |               |               |               |              |          |
| Thickness              |               |               |               |              |          |
| Thickness Mode         |               |               |               |              |          |
| Offset Type            |               |               |               |              |          |
| Treatment              |               |               |               |              |          |
| Assignment             |               |               |               |              |          |
| Nonlinear Effects      |               |               |               |              |          |
| Thermal Strain Effects |               |               |               |              |          |
| Length X               | 6,6e-002 m    | 8,5367e-002 m | 0,10263 m     | 0,11737 m    |          |
| Length Y               |               |               |               |              |          |
| Length Z               | 0,173 m       | 0,17087 m     | 0,16453 m     | 0,15414 m    |          |
| Volume                 |               |               |               |              |          |
| Mass                   |               |               |               |              |          |
| Centroid X             | 9,1342 m      | 9,0217 m      | 8,6872 m      | 8,1387 m     |          |
| Centroid Y             |               |               |               |              |          |
| Centroid Z             | 2,6998e-004 m | -1,4286 m     | -2,8224 m     | -4,1466 m    |          |
| Moment of Inertia Ip1  |               |               |               | 8399,9 kg·m² |          |
| Moment of Inertia Ip2  |               |               | 0,61846 kg·m² |              |          |
| Moment of Inertia Ip3  |               | 8399,6 kg·m²  |               |              | 8,1387 m |
| Surface Area (approx.) |               |               |               |              |          |
| Nodes                  | 2847          | 2673          | 2637          | 2727         |          |
| Elements               | 882           | 832           | 822           | 866          |          |
| Mesh Metric            |               |               |               |              |          |

**TABLE 6**  
**Model (A4, B4) > Geometry > SYS > Parts**

| Object Name            | Pattern\Pattern\Pattern\Component1<br>\Surface | Pattern\Pattern\Pattern\Component1<br>\Surface | Pattern\Pattern\Pattern\Component1<br>\Surface | Pattern\Pattern\Pattern\Component1<br>\Surface | Pattern\Pattern\Pattern\Component1<br>\Surface |
|------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| State                  |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Visible                |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Transparency           |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Suppressed             |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Dimension              |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Model Type             |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Stiffness Behavior     |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Stiffness Option       |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Coordinate System      |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Reference Temperature  |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Thickness              |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Thickness Mode         |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Offset Type            |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Treatment              |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Assignment             |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Nonlinear Effects      |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Thermal Strain Effects |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Length X               | 0,17087 m                                      | 0,16453 m                                      | 0,15414 m                                      | 0,14316 m                                      |                                                |
| Length Y               |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Length Z               | 8,5367e-002 m                                  | 0,10263 m                                      | 0,11737 m                                      | 0,12922 m                                      |                                                |
| Volume                 |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Mass                   |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Centroid X             | -1,4286 m                                      | -2,8224 m                                      | -4,1466 m                                      | -5,3687 m                                      |                                                |
| Centroid Y             |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Centroid Z             | -9,0217 m                                      | -8,6872 m                                      | -8,1387 m                                      | -7,3898 m                                      |                                                |
| Moment of Inertia Ip1  |                                                | 8399,6 kg·m²                                   |                                                | 8399,7 kg·m²                                   | 8,1387 m                                       |
| Moment of Inertia Ip2  |                                                |                                                | 0,61846 kg·m²                                  |                                                | 0,12922 m                                      |
| Moment of Inertia Ip3  |                                                |                                                | 8399,9 kg·m²                                   |                                                |                                                |
| Surface Area (approx.) |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Nodes                  | 2674                                           | 2633                                           | 2731                                           | 2707                                           |                                                |
| Elements               | 833                                            | 820                                            | 870                                            | 850                                            |                                                |

Mesh Metric

**TABLE 7**  
**Model (A4, B4) > Geometry > SYS > Parts**

| Object Name            | Pattern\Pattern\Pattern\Component1<br>\Surface | Pattern\Pattern\Pattern\Component1<br>\Surface | Pattern\Pattern\Pattern\Component1<br>\Surface | Pattern\Pattern\Pattern\Component1<br>\Surface | Pattern\Pattern\Pattern\Component1<br>\Surface |
|------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| State                  |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Visible                |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Transparency           |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Suppressed             |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Dimension              |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Model Type             |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Stiffness Behavior     |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Stiffness Option       |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Coordinate System      |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Reference Temperature  |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Thickness              |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Thickness Mode         |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Offset Type            |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Treatment              |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Assignment             |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Nonlinear Effects      |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Thermal Strain Effects |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Length X               | 0,10263 m                                      | 0,11737 m                                      | 0,12922 m                                      | 0,13789 m                                      |                                                |
| Length Y               |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Length Z               | 0,16453 m                                      | 0,15414 m                                      | 0,14316 m                                      | 0,13789 m                                      |                                                |
| Volume                 |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Mass                   |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Centroid X             | -8,6872 m                                      | -8,1387 m                                      | -7,3898 m                                      | -6,459 m                                       |                                                |
| Centroid Y             |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Centroid Z             | 2,8224 m                                       | 4,1466 m                                       | 5,3687 m                                       | 6,4586 m                                       |                                                |
| Moment of Inertia Ip1  | 8399,9 kg·m <sup>2</sup>                       |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Moment of Inertia Ip2  | 0,61846 kg·m <sup>2</sup>                      |                                                |                                                | 0,61847 kg·m <sup>2</sup>                      |                                                |
| Moment of Inertia Ip3  | 8399,6 kg·m <sup>2</sup>                       |                                                | 8399,7 kg·m <sup>2</sup>                       | 8399,6 kg·m <sup>2</sup>                       |                                                |
| Surface Area (approx.) |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Nodes                  | 2637                                           | 2731                                           | 2709                                           | 2983                                           |                                                |
| Elements               | 822                                            | 870                                            | 850                                            | 1024                                           |                                                |
| Mesh Metric            |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |

**TABLE 8**  
**Model (A4, B4) > Geometry > SYS > Parts**

| Object Name            | Pattern\Pattern\Pattern\Component1<br>\Surface | Pattern\Pattern\Pattern\Component1<br>\Surface | Pattern\Pattern\Pattern\Component1<br>\Surface | Pattern\Pattern\Pattern\Component1<br>\Surface | Pattern\Pattern\Pattern\Component1<br>\Surface |
|------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| State                  |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Visible                |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Transparency           |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Suppressed             |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Dimension              |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Model Type             |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Stiffness Behavior     |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Stiffness Option       |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Coordinate System      |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Reference Temperature  |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Thickness              |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Thickness Mode         |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Offset Type            |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Treatment              |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Assignment             |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Nonlinear Effects      |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Thermal Strain Effects |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Length X               | 0,15414 m                                      | 0,14316 m                                      | 0,13789 m                                      | 0,12922 m                                      |                                                |
| Length Y               |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Length Z               | 0,11737 m                                      | 0,12922 m                                      | 0,13789 m                                      | 0,14316 m                                      |                                                |
| Volume                 |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Mass                   |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Centroid X             | 4,1466 m                                       | 5,3687 m                                       | 6,4586 m                                       | 7,3895 m                                       |                                                |
| Centroid Y             |                                                |                                                |                                                |                                                |                                                |
| Centroid Z             | 8,1387 m                                       | 7,3898 m                                       | 6,459 m                                        | 5,3691 m                                       |                                                |

|                        |               |              |               |      |  |
|------------------------|---------------|--------------|---------------|------|--|
| Moment of Inertia Ip1  | 8399,6 kg·m²  | 8399,7 kg·m² | 8399,6 kg·m²  |      |  |
| Moment of Inertia Ip2  | 0,61846 kg·m² |              | 0,61847 kg·m² |      |  |
| Moment of Inertia Ip3  | 8399,9 kg·m²  |              |               |      |  |
| Surface Area (approx.) | 6,654 m²      |              |               |      |  |
| Statistics             |               |              |               |      |  |
| Nodes                  | 2728          | 2707         | 2983          | 2706 |  |
| Elements               | 867           | 850          | 1024          | 851  |  |
| Mesh Metric            | None          |              |               |      |  |

**TABLE 9**  
**Model (A4, B4) > Construction Geometry**

|                |                              |
|----------------|------------------------------|
| Object Name    | <i>Construction Geometry</i> |
| State          | Fully Defined                |
| <b>Display</b> |                              |
| Show Mesh      | No                           |

**TABLE 10**  
**Model (A4, B4) > Construction Geometry > Paths**

|                           |                          |
|---------------------------|--------------------------|
| Object Name               | <i>Path</i>              |
| State                     | Fully Defined            |
| <b>Definition</b>         |                          |
| Path Type                 | Two Points               |
| Path Coordinate System    | Global Coordinate System |
| Number of Sampling Points | 47,                      |
| Suppressed                | No                       |
| <b>Start</b>              |                          |
| Coordinate System         | Global Coordinate System |
| Start X Coordinate        | 9,1 m                    |
| Start Y Coordinate        | 23, m                    |
| Start Z Coordinate        | 0, m                     |
| Location                  | Defined                  |
| <b>End</b>                |                          |
| Coordinate System         | Global Coordinate System |
| End X Coordinate          | 9,1011 m                 |
| End Y Coordinate          | 1, m                     |
| End Z Coordinate          | 0, m                     |
| Location                  | Defined                  |

**TABLE 11**  
**Model (A4, B4) > Materials**

|                      |                  |
|----------------------|------------------|
| Object Name          | <i>Materials</i> |
| State                | Fully Defined    |
| <b>Statistics</b>    |                  |
| Materials            | 2                |
| Material Assignments | 0                |

## Coordinate Systems

**TABLE 12**  
**Model (A4, B4) > Coordinate Systems > Coordinate System**

|                            |                                 |
|----------------------------|---------------------------------|
| Object Name                | <i>Global Coordinate System</i> |
| State                      | Fully Defined                   |
| <b>Definition</b>          |                                 |
| Type                       | Cartesian                       |
| Coordinate System ID       | 0,                              |
| <b>Origin</b>              |                                 |
| Origin X                   | 0, m                            |
| Origin Y                   | 0, m                            |
| Origin Z                   | 0, m                            |
| <b>Directional Vectors</b> |                                 |
| X Axis Data                | [ 1, 0, 0, ]                    |
| Y Axis Data                | [ 0, 1, 0, ]                    |
| Z Axis Data                | [ 0, 0, 1, ]                    |

## Connections

**TABLE 13**  
**Model (A4, B4) > Connections**

|                                          |                    |
|------------------------------------------|--------------------|
| Object Name                              | <i>Connections</i> |
| State                                    | Fully Defined      |
| <b>Auto Detection</b>                    |                    |
| Generate Automatic Connection On Refresh | Yes                |
| <b>Transparency</b>                      |                    |
| Enabled                                  | Yes                |

**TABLE 14**  
**Model (A4, B4) > Connections > Contacts**

|                           |                    |
|---------------------------|--------------------|
| Object Name               | <i>Contacts</i>    |
| State                     | Fully Defined      |
| <b>Definition</b>         |                    |
| Connection Type           | Contact            |
| <b>Scope</b>              |                    |
| Scoping Method            | Geometry Selection |
| Geometry                  | All Bodies         |
| <b>Auto Detection</b>     |                    |
| Tolerance Type            | Slider             |
| Tolerance Slider          | 0,                 |
| Tolerance Value           | 9,8607e-002 m      |
| Use Range                 | No                 |
| Face/Face                 | Yes                |
| Face-Face Angle Tolerance | 75, °              |

|                        |             |
|------------------------|-------------|
| Face Overlap Tolerance | Off         |
| Cylindrical Faces      | Include     |
| Face/Edge              | No          |
| Edge/Edge              | No          |
| Priority               | Include All |
| Group By               | Bodies      |
| Search Across          | Bodies      |
| <b>Statistics</b>      |             |
| Connections            | 163         |
| Active Connections     | 163         |

**TABLE 15**  
**Model (A4, B4) > Connections > Contacts > Contact Regions**

| Object Name                 | Contact Region 2                           | Contact Region 3 | Contact Region 4 | Contact Region 5 | Contact Region 6 | Contact Region 7 | Contact Region 8 | Contact Region 9 | Contact Region 10 | Contact Region 11 | Contact Region 12 |
|-----------------------------|--------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| State                       | Fully Defined                              |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |
| Scope                       |                                            |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |
| Scoping Method              | Geometry Selection                         |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |
| Contact                     | 1 Face                                     |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |
| Target                      | 1 Face                                     |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |
| Contact Bodies              | Solid                                      |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |
| Target Bodies               | Pattern\Pattern\Pattern\Component1\Surface |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |
| Target Shell Face           | Program Controlled                         |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |
| Shell Thickness Effect      | Yes                                        |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |
| Protected                   | No                                         |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |
| Definition                  |                                            |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |
| Type                        | Bonded                                     |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |
| Scope Mode                  | Automatic                                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |
| Behavior                    | Program Controlled                         |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |
| Trim Contact                | Program Controlled                         |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |
| Trim Tolerance              | 9,8607e-002 m                              |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |
| Suppressed                  | No                                         |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |
| Advanced                    |                                            |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |
| Formulation                 | Program Controlled                         |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |
| Small Sliding               | Program Controlled                         |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |
| Detection Method            | Program Controlled                         |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |
| Penetration Tolerance       | Program Controlled                         |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |
| Elastic Slip Tolerance      | Program Controlled                         |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |
| Normal Stiffness            | Program Controlled                         |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |
| Update Stiffness            | Program Controlled                         |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |
| Pinball Region              | Program Controlled                         |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |
| Geometric Modification      |                                            |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |
| Contact Geometry Correction | None                                       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |
| Target Geometry Correction  | None                                       |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                   |                   |                   |

**TABLE 16**  
**Model (A4, B4) > Connections > Contacts > Contact Regions**

| Object Name                 | Contact Region 13                          | Contact Region 14 | Contact Region 15 | Contact Region 16 | Contact Region 17 | Contact Region 18 | Contact Region 19 | Contact Region 20 | Contact Region 21 | Contact Region 22 | Contact Region 23 |
|-----------------------------|--------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| State                       | Fully Defined                              |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Scope                       |                                            |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Scoping Method              | Geometry Selection                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Contact                     | 1 Face                                     |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Target                      | 1 Face                                     |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Contact Bodies              | Solid                                      |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Target Bodies               | Pattern\Pattern\Pattern\Component1\Surface |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Target Shell Face           | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Shell Thickness Effect      | Yes                                        |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Protected                   | No                                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Definition                  |                                            |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Type                        | Bonded                                     |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Scope Mode                  | Automatic                                  |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Behavior                    | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Trim Contact                | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Trim Tolerance              | 9.8607e-002 m                              |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Suppressed                  | No                                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Advanced                    |                                            |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Formulation                 | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Small Sliding               | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Detection Method            | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Penetration Tolerance       | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Elastic Slip Tolerance      | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Normal Stiffness            | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Update Stiffness            | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Pinball Region              | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Geometric Modification      |                                            |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Contact Geometry Correction | None                                       |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Target Geometry Correction  | None                                       |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |

**TABLE 17**  
**Model (A4, B4) > Connections > Contacts > Contact Regions**

| Model (A4, B4) > Connections > Contacts > Contact Regions |                    |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
|-----------------------------------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Object Name                                               | Contact Region 24  | Contact Region 25 | Contact Region 26 | Contact Region 27 | Contact Region 28 | Contact Region 29 | Contact Region 30 | Contact Region 31 | Contact Region 32 | Contact Region 33 | Contact Region 34 |
| State                                                     | Fully Defined      |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Scope                                                     |                    |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Scoping Method                                            | Geometry Selection |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |

|                               |                                            |
|-------------------------------|--------------------------------------------|
| Contact                       | 1 Face                                     |
| Target                        | 1 Face                                     |
| Contact Bodies                | Solid                                      |
| Target Bodies                 | Pattern\Pattern\Pattern\Component1\Surface |
| Target Shell Face             | Program Controlled                         |
| Shell Thickness Effect        | Yes                                        |
| Protected                     | No                                         |
| <b>Definition</b>             |                                            |
| Type                          | Bonded                                     |
| Scope Mode                    | Automatic                                  |
| Behavior                      | Program Controlled                         |
| Trim Contact                  | Program Controlled                         |
| Trim Tolerance                | 9.8607e-002 m                              |
| Suppressed                    | No                                         |
| <b>Advanced</b>               |                                            |
| Formulation                   | Program Controlled                         |
| Small Sliding                 | Program Controlled                         |
| Detection Method              | Program Controlled                         |
| Penetration Tolerance         | Program Controlled                         |
| Elastic Slip Tolerance        | Program Controlled                         |
| Normal Stiffness              | Program Controlled                         |
| Update Stiffness              | Program Controlled                         |
| Pinball Region                | Program Controlled                         |
| <b>Geometric Modification</b> |                                            |
| Contact Geometry Correction   | None                                       |
| Target Geometry Correction    | None                                       |

**TABLE 18**  
**Model (A4, B4) > Connections > Contacts > Contact Regions**

| Object Name                 | Contact Region 35                          | Contact Region 36 | Contact Region 37 | Contact Region 38 | Contact Region 39 | Contact Region 40 | Contact Region 41 | Contact Region 43 | Contact Region 44 | Contact Region 45 | Contact Region 46 |
|-----------------------------|--------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| State                       | Fully Defined                              |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Scope                       |                                            |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Scoping Method              | Geometry Selection                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Contact                     | 1 Face                                     |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Target                      | 1 Face                                     |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Contact Bodies              | Solid                                      |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Target Bodies               | Pattern\Pattern\Pattern\Component1\Surface |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Target Shell Face           | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Shell Thickness Effect      | Yes                                        |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Protected                   | No                                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Definition                  |                                            |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Type                        | Bonded                                     |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Scope Mode                  | Automatic                                  |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Behavior                    | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Trim Contact                | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Trim Tolerance              | 9.8607e-002 m                              |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Suppressed                  | No                                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Advanced                    |                                            |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Formulation                 | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Small Sliding               | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Detection Method            | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Penetration Tolerance       | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Elastic Slip Tolerance      | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Normal Stiffness            | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Update Stiffness            | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Pinball Region              | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Geometric Modification      |                                            |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Contact Geometry Correction | None                                       |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Target Geometry Correction  | None                                       |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |

**TABLE 19**  
**Model (A4, B4) > Connections > Contacts > Contact Regions**

| Model (A4, B4) > Connections > Contacts > Contact Regions |                                            |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Object Name                                               | Contact Region 47                          | Contact Region 48 | Contact Region 49 | Contact Region 50 | Contact Region 51 | Contact Region 52 | Contact Region 53 | Contact Region 54 | Contact Region 55 | Contact Region 56 | Contact Region 57 |
| State                                                     | Fully Defined                              |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Scope                                                     |                                            |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Scoping Method                                            | Geometry Selection                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Contact                                                   | 1 Face                                     |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Target                                                    | 1 Face                                     |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Contact Bodies                                            | Solid                                      |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Target Bodies                                             | Pattern\Pattern\Pattern\Component1\Surface |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Target Shell Face                                         | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Shell Thickness Effect                                    | Yes                                        |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Protected                                                 | No                                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Definition                                                |                                            |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Type                                                      | Bonded                                     |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Scope Mode                                                | Automatic                                  |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Behavior                                                  | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Trim Contact                                              | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Trim Tolerance                                            | 9.8607e-002 m                              |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Suppressed                                                | No                                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Advanced                                                  |                                            |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Formulation                                               | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Small Sliding                                             | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |

|                               |                    |
|-------------------------------|--------------------|
| Detection Method              | Program Controlled |
| Penetration Tolerance         | Program Controlled |
| Elastic Slip Tolerance        | Program Controlled |
| Normal Stiffness              | Program Controlled |
| Update Stiffness              | Program Controlled |
| Pinball Region                | Program Controlled |
| <b>Geometric Modification</b> |                    |
| Contact Geometry Correction   | None               |
| Target Geometry Correction    | None               |

**TABLE 20**  
**Model (A4, B4) > Connections > Contacts > Contact Regions**

| Object Name                 | Contact Region 58                          | Contact Region 59 | Contact Region 60 | Contact Region 61 | Contact Region 62 | Contact Region 63 | Contact Region 64 | Contact Region 65 | Contact Region 66 | Contact Region 67 | Contact Region 68 |
|-----------------------------|--------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| State                       | Fully Defined                              |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Scope                       |                                            |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Scoping Method              | Geometry Selection                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Contact                     | 1 Face                                     |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Target                      | 1 Face                                     |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Contact Bodies              | Solid                                      |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Target Bodies               | Pattern\Pattern\Pattern\Component1\Surface |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Target Shell Face           | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Shell Thickness Effect      | Yes                                        |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Protected                   | No                                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Definition                  |                                            |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Type                        | Bonded                                     |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Scope Mode                  | Automatic                                  |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Behavior                    | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Trim Contact                | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Trim Tolerance              | 9.8607e-002 m                              |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Suppressed                  | No                                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Advanced                    |                                            |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Formulation                 | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Small Sliding               | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Detection Method            | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Penetration Tolerance       | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Elastic Slip Tolerance      | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Normal Stiffness            | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Update Stiffness            | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Pinball Region              | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Geometric Modification      |                                            |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Contact Geometry Correction | None                                       |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Target Geometry Correction  | None                                       |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |

**TABLE 21**  
**Model (A4, B4) > Connections > Contacts > Contact Regions**

| Object Name                 | Contact Region 69                          | Contact Region 70 | Contact Region 71 | Contact Region 72 | Contact Region 73 | Contact Region 74 | Contact Region 75 | Contact Region 76 | Contact Region 77 | Contact Region 78 | Contact Region 79 |
|-----------------------------|--------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| State                       | Fully Defined                              |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Scope                       |                                            |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Scoping Method              | Geometry Selection                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Contact                     | 1 Face                                     |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Target                      | 1 Face                                     |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Contact Bodies              | Solid                                      |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Target Bodies               | Pattern\Pattern\Pattern\Component1\Surface |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Target Shell Face           | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Shell Thickness Effect      | Yes                                        |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Protected                   | No                                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Definition                  |                                            |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Type                        | Bonded                                     |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Scope Mode                  | Automatic                                  |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Behavior                    | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Trim Contact                | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Trim Tolerance              | 9.8607e-002 m                              |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Suppressed                  | No                                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Advanced                    |                                            |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Formulation                 | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Small Sliding               | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Detection Method            | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Penetration Tolerance       | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Elastic Slip Tolerance      | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Normal Stiffness            | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Update Stiffness            | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Pinball Region              | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Geometric Modification      |                                            |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Contact Geometry Correction | None                                       |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
| Target Geometry Correction  | None                                       |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |

**TABLE 22**  
**Model (A4, B4) > Connections > Contacts > Contact Regions**

| Object Name | Contact Region 80 | Contact Region 81 | Contact Region 82 | Contact Region 84 | Contact Region 85 | Contact Region 86 | Contact Region 87 | Contact Region 88 | Contact Region 89 | Contact Region 90 | Contact Region 91 |
|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| State       | Fully Defined     |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |

|                               |                                            |
|-------------------------------|--------------------------------------------|
| <b>Scope</b>                  |                                            |
| Scoping Method                | Geometry Selection                         |
| Contact                       | 1 Face                                     |
| Target                        | 1 Face                                     |
| Contact Bodies                | Solid                                      |
| Target Bodies                 | Pattern\Pattern\Pattern\Component1\Surface |
| Target Shell Face             | Program Controlled                         |
| Shell Thickness Effect        | Yes                                        |
| Protected                     | No                                         |
| <b>Definition</b>             |                                            |
| Type                          | Bonded                                     |
| Scope Mode                    | Automatic                                  |
| Behavior                      | Program Controlled                         |
| Trim Contact                  | Program Controlled                         |
| Trim Tolerance                | 9,8607e-002 m                              |
| Suppressed                    | No                                         |
| <b>Advanced</b>               |                                            |
| Formulation                   | Program Controlled                         |
| Small Sliding                 | Program Controlled                         |
| Detection Method              | Program Controlled                         |
| Penetration Tolerance         | Program Controlled                         |
| Elastic Slip Tolerance        | Program Controlled                         |
| Normal Stiffness              | Program Controlled                         |
| Update Stiffness              | Program Controlled                         |
| Pinball Region                | Program Controlled                         |
| <b>Geometric Modification</b> |                                            |
| Contact Geometry Correction   | None                                       |
| Target Geometry Correction    | None                                       |

**TABLE 23**  
**Model (A4, B4) > Connections > Contacts > Contact Regions**

| Object Name                 | Contact Region 92                          | Contact Region 93 | Contact Region 94 | Contact Region 95 | Contact Region 96 | Contact Region 97 | Contact Region 98 | Contact Region 99 | Contact Region 100 | Contact Region 101 | Contact Region 102 |
|-----------------------------|--------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| State                       | Fully Defined                              |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                    |                    |                    |
| Scope                       |                                            |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                    |                    |                    |
| Scoping Method              | Geometry Selection                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                    |                    |                    |
| Contact                     | 1 Face                                     |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                    |                    |                    |
| Target                      | 1 Face                                     |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                    |                    |                    |
| Contact Bodies              | Solid                                      |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                    |                    |                    |
| Target Bodies               | Pattern\Pattern\Pattern\Component1\Surface |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                    |                    |                    |
| Target Shell Face           | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                    |                    |                    |
| Shell Thickness Effect      | Yes                                        |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                    |                    |                    |
| Protected                   | No                                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                    |                    |                    |
| Definition                  |                                            |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                    |                    |                    |
| Type                        | Bonded                                     |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                    |                    |                    |
| Scope Mode                  | Automatic                                  |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                    |                    |                    |
| Behavior                    | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                    |                    |                    |
| Trim Contact                | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                    |                    |                    |
| Trim Tolerance              | 9,8607e-002 m                              |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                    |                    |                    |
| Suppressed                  | No                                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                    |                    |                    |
| Advanced                    |                                            |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                    |                    |                    |
| Formulation                 | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                    |                    |                    |
| Small Sliding               | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                    |                    |                    |
| Detection Method            | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                    |                    |                    |
| Penetration Tolerance       | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                    |                    |                    |
| Elastic Slip Tolerance      | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                    |                    |                    |
| Normal Stiffness            | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                    |                    |                    |
| Update Stiffness            | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                    |                    |                    |
| Pinball Region              | Program Controlled                         |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                    |                    |                    |
| Geometric Modification      |                                            |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                    |                    |                    |
| Contact Geometry Correction | None                                       |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                    |                    |                    |
| Target Geometry Correction  | None                                       |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                    |                    |                    |

**TABLE 24**  
**Model (A4, B4) > Connections > Contacts > Contact Regions**

| Model (A4, B4) > Connections > Contacts > Contact Regions |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Object Name                                               | Contact Region 103                         | Contact Region 104 | Contact Region 105 | Contact Region 106 | Contact Region 107 | Contact Region 108 | Contact Region 109 | Contact Region 110 | Contact Region 111 | Contact Region 112 | Contact Region 113 |
| State                                                     | Fully Defined                              |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Scope                                                     |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Scoping Method                                            | Geometry Selection                         |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Contact                                                   | 1 Face                                     |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Target                                                    | 1 Face                                     |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Contact Bodies                                            | Solid                                      |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Target Bodies                                             | Pattern\Pattern\Pattern\Component1\Surface |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Target Shell Face                                         | Program Controlled                         |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Shell Thickness Effect                                    | Yes                                        |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Protected                                                 | No                                         |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Definition                                                |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Type                                                      | Bonded                                     |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Scope Mode                                                | Automatic                                  |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Behavior                                                  | Program Controlled                         |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Trim Contact                                              | Program Controlled                         |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Trim Tolerance                                            | 9,8607e-002 m                              |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Suppressed                                                | No                                         |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Advanced                                                  |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |

|                               |                    |
|-------------------------------|--------------------|
| Formulation                   | Program Controlled |
| Small Sliding                 | Program Controlled |
| Detection Method              | Program Controlled |
| Penetration Tolerance         | Program Controlled |
| Elastic Slip Tolerance        | Program Controlled |
| Normal Stiffness              | Program Controlled |
| Update Stiffness              | Program Controlled |
| Pinball Region                | Program Controlled |
| <b>Geometric Modification</b> |                    |
| Contact Geometry Correction   | None               |
| Target Geometry Correction    | None               |

**TABLE 25**  
**Model (A4, B4) > Connections > Contacts > Contact Regions**

| Object Name                 | Contact Region 114                         | Contact Region 115 | Contact Region 116 | Contact Region 117 | Contact Region 118 | Contact Region 119 | Contact Region 120 | Contact Region 121 | Contact Region 122 | Contact Region 123 | Contact Region 124 |
|-----------------------------|--------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| State                       | Fully Defined                              |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Scope                       |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Scoping Method              | Geometry Selection                         |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Contact                     | 1 Face                                     |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Target                      | 1 Face                                     |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Contact Bodies              | Solid                                      |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Target Bodies               | Pattern\Pattern\Pattern\Component1\Surface |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    | Surface            |
| Target Shell Face           | Program Controlled                         |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Shell Thickness Effect      | Yes                                        |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    | No                 |
| Protected                   | No                                         |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Definition                  |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Type                        | Bonded                                     |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Scope Mode                  | Automatic                                  |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Behavior                    | Program Controlled                         |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Trim Contact                | Program Controlled                         |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Trim Tolerance              | 9.8607e-002 m                              |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Suppressed                  | No                                         |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Advanced                    |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Formulation                 | Program Controlled                         |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Small Sliding               | Program Controlled                         |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Detection Method            | Program Controlled                         |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Penetration Tolerance       | Program Controlled                         |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Elastic Slip Tolerance      | Program Controlled                         |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Normal Stiffness            | Program Controlled                         |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Update Stiffness            | Program Controlled                         |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Pinball Region              | Program Controlled                         |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Geometric Modification      |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Contact Geometry Correction | None                                       |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Target Geometry Correction  | None                                       |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |

**TABLE 26**  
**Model (A4, B4) > Connections > Contacts > Contact Regions**

| Object Name                 | Contact Region 125 | Contact Region 126                         | Contact Region 127 | Contact Region 128 | Contact Region 129 | Contact Region 130 | Contact Region 131 | Contact Region 132 | Contact Region 133 | Contact Region 134 | Contact Region 135 |
|-----------------------------|--------------------|--------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| State                       | Fully Defined      |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Scope                       |                    |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Scoping Method              | Geometry Selection |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Contact                     | 1 Face             |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Target                      | 1 Face             | 9 Faces                                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    | 8 Faces            |                    | 9 Faces            |
| Contact Bodies              | Solid              | Surface                                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Target Bodies               | Surface            | Pattern\Pattern\Pattern\Component1\Surface |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Target Shell Face           | Program Controlled |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Shell Thickness Effect      | No                 |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Protected                   | No                 |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Contact Shell Face          | Program Controlled |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Definition                  |                    |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Type                        | Bonded             |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Scope Mode                  | Automatic          |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Behavior                    | Program Controlled |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Trim Contact                | Program Controlled |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Trim Tolerance              | 9.8607e-002 m      |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Suppressed                  | No                 |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Advanced                    |                    |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Formulation                 | Program Controlled |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Small Sliding               | Program Controlled |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Detection Method            | Program Controlled |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Penetration Tolerance       | Program Controlled |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Elastic Slip Tolerance      | Program Controlled |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Normal Stiffness            | Program Controlled |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Update Stiffness            | Program Controlled |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Pinball Region              | Program Controlled |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Geometric Modification      |                    |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Contact Geometry Correction | None               |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| Target Geometry Correction  | None               |                                            |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |

**TABLE 27**  
**Model (A4, B4) > Connections > Contacts > Contact Regions**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|

| Object Name                    | Contact<br>Region 136                      | Contact<br>Region 137 | Contact<br>Region 138 | Contact<br>Region 139 | Contact<br>Region 140 | Contact<br>Region 141 | Contact<br>Region 142 | Contact<br>Region 143 | Contact<br>Region 144 | Contact<br>Region 145 | Contact<br>Region 146 |
|--------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| State                          | Fully Defined                              |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Scope                          |                                            |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Scoping Method                 | Geometry Selection                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Contact                        | 1 Face                                     |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Target                         | 9 Faces                                    |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Contact Bodies                 | Surface                                    |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Target Bodies                  | Pattern\Pattern\Pattern\Component1\Surface |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Contact Shell Face             | Program Controlled                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Target Shell Face              | Program Controlled                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Shell Thickness<br>Effect      | No                                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Protected                      | No                                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Definition                     |                                            |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Type                           | Bonded                                     |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Scope Mode                     | Automatic                                  |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Behavior                       | Program Controlled                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Trim Contact                   | Program Controlled                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Trim Tolerance                 | 9,8607e-002 m                              |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Suppressed                     | No                                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Advanced                       |                                            |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Formulation                    | Program Controlled                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Small Sliding                  | Program Controlled                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Detection Method               | Program Controlled                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Penetration<br>Tolerance       | Program Controlled                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Elastic Slip<br>Tolerance      | Program Controlled                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Normal Stiffness               | Program Controlled                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Update Stiffness               | Program Controlled                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Pinball Region                 | Program Controlled                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Geometric Modification         |                                            |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Contact Geometry<br>Correction | None                                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Target Geometry<br>Correction  | None                                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |

**TABLE 28**  
**Model (A4, B4) > Connections > Contacts > Contact Regions**

| Object Name                    | Contact<br>Region 147                      | Contact<br>Region 148 | Contact<br>Region 149 | Contact<br>Region 150 | Contact<br>Region 151 | Contact<br>Region 152 | Contact<br>Region 153 | Contact<br>Region 154 | Contact<br>Region 155 | Contact<br>Region 156 | Contact<br>Region 157 |
|--------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| State                          | Fully Defined                              |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Scope                          |                                            |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Scoping Method                 | Geometry Selection                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Contact                        | 1 Face                                     |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Target                         | 7 Faces                                    | 9 Faces               |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Contact Bodies                 | Surface                                    |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Target Bodies                  | Pattern\Pattern\Pattern\Component1\Surface |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Contact Shell Face             | Program Controlled                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Target Shell Face              | Program Controlled                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Shell Thickness<br>Effect      | No                                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Protected                      | No                                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Definition                     |                                            |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Type                           | Bonded                                     |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Scope Mode                     | Automatic                                  |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Behavior                       | Program Controlled                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Trim Contact                   | Program Controlled                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Trim Tolerance                 | 9,8607e-002 m                              |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Suppressed                     | No                                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Advanced                       |                                            |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Formulation                    | Program Controlled                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Small Sliding                  | Program Controlled                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Detection Method               | Program Controlled                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Penetration<br>Tolerance       | Program Controlled                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Elastic Slip<br>Tolerance      | Program Controlled                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Normal Stiffness               | Program Controlled                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Update Stiffness               | Program Controlled                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Pinball Region                 | Program Controlled                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Geometric Modification         |                                            |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Contact Geometry<br>Correction | None                                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Target Geometry<br>Correction  | None                                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |

**TABLE 29**  
**Model (A4, B4) > Connections > Contacts > Contact Regions**

| Object Name            | Contact Region<br>158                      | Contact Region<br>159 | Contact Region<br>160 | Contact Region<br>161 | Contact Region<br>162 | Contact Region<br>163 | Contact Region<br>164 | Contact Region<br>165 | Contact Region<br>166 |
|------------------------|--------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| State                  | Fully Defined                              |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Scope                  |                                            |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Scoping Method         | Geometry Selection                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Contact                | 1 Face                                     |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Target                 | 9 Faces                                    |                       | 8 Faces               |                       |                       | 9 Faces               |                       |                       |                       |
| Contact Bodies         | Surface                                    |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Target Bodies          | Pattern\Pattern\Pattern\Component1\Surface |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Contact Shell Face     | Program Controlled                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Target Shell Face      | Program Controlled                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Shell Thickness Effect | No                                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Protected              | No                                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Definition             |                                            |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Type                   | Bonded                                     |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| Scope Mode             | Automatic                                  |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |

|                               |                    |
|-------------------------------|--------------------|
| Behavior                      | Program Controlled |
| Trim Contact                  | Program Controlled |
| Trim Tolerance                | 9,8607e-002 m      |
| Suppressed                    | No                 |
| <b>Advanced</b>               |                    |
| Formulation                   | Program Controlled |
| Small Sliding                 | Program Controlled |
| Detection Method              | Program Controlled |
| Penetration Tolerance         | Program Controlled |
| Elastic Slip Tolerance        | Program Controlled |
| Normal Stiffness              | Program Controlled |
| Update Stiffness              | Program Controlled |
| Pinball Region                | Program Controlled |
| <b>Geometric Modification</b> |                    |
| Contact Geometry Correction   | None               |
| Target Geometry Correction    | None               |

## Mesh

**TABLE 30**  
**Model (A4, B4) > Mesh**

|                                          |                         |
|------------------------------------------|-------------------------|
| Object Name                              | <i>Mesh</i>             |
| State                                    | Solved                  |
| <b>Display</b>                           |                         |
| Display Style                            | Use Geometry Setting    |
| <b>Defaults</b>                          |                         |
| Physics Preference                       | Nonlinear Mechanical    |
| Element Order                            | Quadratic               |
| Element Size                             | Default (0,29881 m)     |
| <b>Sizing</b>                            |                         |
| Use Uniform Size Function For Sheets     | No                      |
| Growth Rate                              | Default (1,5)           |
| Max Size                                 | Default (0,29881 m)     |
| Mesh Defeaturing                         | Yes                     |
| Defeature Size                           | Default (1,4941e-003 m) |
| Capture Curvature                        | Yes                     |
| Curvature Min Size                       | Default (2,9881e-003 m) |
| Curvature Normal Angle                   | Default (60,°)          |
| Capture Proximity                        | No                      |
| Bounding Box Diagonal                    | 39,443 m                |
| Average Surface Area                     | 5,7145 m²               |
| Minimum Edge Length                      | 3,6e-002 m              |
| <b>Quality</b>                           |                         |
| Check Mesh Quality                       | Yes, Errors             |
| Target Skewness                          | Default (0.900000)      |
| Target Jacobian Ratio (Corner Nodes)     | Default (0.040000)      |
| Mesh Metric                              | None                    |
| <b>Inflation</b>                         |                         |
| Use Automatic Inflation                  | None                    |
| Inflation Option                         | Smooth Transition       |
| Transition Ratio                         | 0,272                   |
| Maximum Layers                           | 5                       |
| Growth Rate                              | 1,2                     |
| Inflation Algorithm                      | Pre                     |
| View Advanced Options                    | No                      |
| <b>Batch Connections</b>                 |                         |
| Mesh Based Connection                    | No                      |
| <b>Advanced</b>                          |                         |
| Number of CPUs for Parallel Part Meshing | Program Controlled      |
| Straight Sided Elements                  | No                      |
| Rigid Body Behavior                      | Dimensionally Reduced   |
| Triangle Surface Mesher                  | Program Controlled      |
| Topology Checking                        | Yes                     |
| Pinch Tolerance                          | Default (2,6893e-003 m) |
| Generate Pinch on Refresh                | No                      |
| Sheet Loop Removal                       | No                      |
| <b>Statistics</b>                        |                         |
| Nodes                                    | 352312                  |
| Elements                                 | 173928                  |

## Named Selections

**TABLE 31**  
**Model (A4, B4) > Named Selections > Named Selections**

|                              |                          |
|------------------------------|--------------------------|
| Object Name                  | <i>Connect Topology1</i> |
| State                        | Fully Defined            |
| <b>Scope</b>                 |                          |
| Scoping Method               | Geometry Selection       |
| Geometry                     | 1 Face                   |
| <b>Definition</b>            |                          |
| Send to Solver               | Yes                      |
| Protected                    | Program Controlled       |
| Visible                      | Yes                      |
| Program Controlled Inflation | Exclude                  |
| <b>Statistics</b>            |                          |
| Type                         | Imported                 |
| Total Selection              | 1 Face                   |
| Surface Area                 | 259,89 m²                |
| Suppressed                   | 0                        |
| Used by Mesh Worksheet       | No                       |

## Static Structural GRÃOS (A5)

**TABLE 32**  
**Model (A4, B4) > Analysis**

|                         |                              |
|-------------------------|------------------------------|
| Object Name             | Static Structural GRÃOS (A5) |
| State                   | Solved                       |
| <b>Definition</b>       |                              |
| Physics Type            | Structural                   |
| Analysis Type           | Static Structural            |
| Solver Target           | Mechanical APDL              |
| <b>Options</b>          |                              |
| Environment Temperature | 22, °C                       |
| Generate Input Only     | No                           |

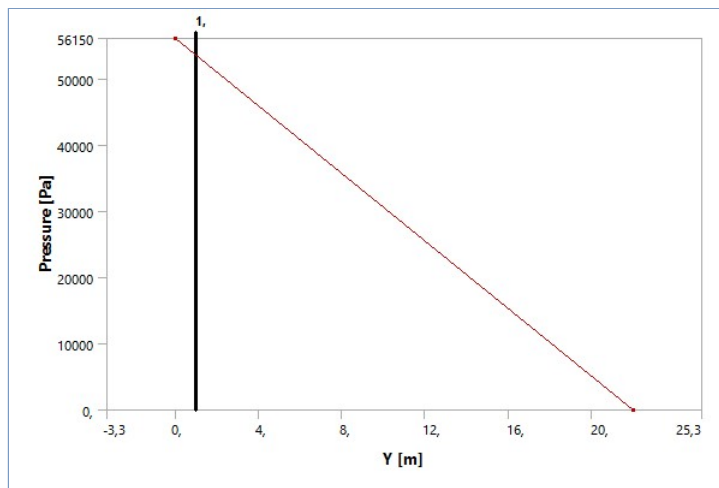
**TABLE 33**  
**Model (A4, B4) > Static Structural GRÃOS (A5) > Analysis Settings**

|                                 |                                                                  |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Object Name                     | Analysis Settings                                                |
| State                           | Fully Defined                                                    |
| <b>Step Controls</b>            |                                                                  |
| Number Of Steps                 | 1,                                                               |
| Current Step Number             | 1,                                                               |
| Step End Time                   | 1, s                                                             |
| Auto Time Stepping              | Program Controlled                                               |
| <b>Solver Controls</b>          |                                                                  |
| Solver Type                     | Iterative                                                        |
| Weak Springs                    | Off                                                              |
| Solver Pivot Checking           | Program Controlled                                               |
| Large Deflection                | On                                                               |
| Inertia Relief                  | Off                                                              |
| Quasi-Static Solution           | Off                                                              |
| <b>Rotordynamics Controls</b>   |                                                                  |
| Coriolis Effect                 | Off                                                              |
| <b>Restart Controls</b>         |                                                                  |
| Generate Restart Points         | Program Controlled                                               |
| Retain Files After Full Solve   | No                                                               |
| Combine Restart Files           | Program Controlled                                               |
| <b>Nonlinear Controls</b>       |                                                                  |
| Newton-Raphson Option           | Program Controlled                                               |
| Force Convergence               | Program Controlled                                               |
| Moment Convergence              | Program Controlled                                               |
| Displacement Convergence        | Program Controlled                                               |
| Rotation Convergence            | Program Controlled                                               |
| Line Search                     | Program Controlled                                               |
| Stabilization                   | Program Controlled                                               |
| <b>Advanced</b>                 |                                                                  |
| Inverse Option                  | No                                                               |
| Contact Split (DMP)             | Off                                                              |
| <b>Output Controls</b>          |                                                                  |
| Stress                          | Yes                                                              |
| Surface Stress                  | No                                                               |
| Back Stress                     | No                                                               |
| Strain                          | Yes                                                              |
| Contact Data                    | Yes                                                              |
| Nonlinear Data                  | No                                                               |
| Nodal Forces                    | No                                                               |
| Volume and Energy               | Yes                                                              |
| Euler Angles                    | Yes                                                              |
| General Miscellaneous           | No                                                               |
| Contact Miscellaneous           | No                                                               |
| Store Results At                | All Time Points                                                  |
| Result File Compression         | Program Controlled                                               |
| <b>Analysis Data Management</b> |                                                                  |
| Solver Files Directory          | C:\Users\Tercio\Documents\ANSYS\Modelo 31.05_files\dp0\SYS\MECH\ |
| Future Analysis                 | None                                                             |
| Scratch Solver Files Directory  |                                                                  |
| Save MAPDL db                   | No                                                               |
| Contact Summary                 | Program Controlled                                               |
| Delete Unneeded Files           | Yes                                                              |
| Nonlinear Solution              | Yes                                                              |
| Solver Units                    | Active System                                                    |
| Solver Unit System              | mks                                                              |

**TABLE 34**  
**Model (A4, B4) > Static Structural GRÃOS (A5) > Loads**

|                                                       |                          |                          |                      |
|-------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|
| Model [A4, B4] > Static Structural GRAOS (A3) > Loads |                          |                          |                      |
| Object Name                                           | Fixed Support            | Pressão Grãos Horizontal | Pressão Grãos Atrito |
| State                                                 | Fully Defined            |                          |                      |
| Scope                                                 |                          |                          |                      |
| Scoping Method                                        | Geometry Selection       |                          |                      |
| Geometry                                              | 1 Face                   |                          |                      |
| Definition                                            |                          |                          |                      |
| Type                                                  | Fixed Support            | Pressure                 |                      |
| Suppressed                                            | No                       |                          |                      |
| Define By                                             |                          | Normal To                |                      |
| Applied By                                            | Surface Effect           |                          |                      |
| Loaded Area                                           | Deformed                 |                          |                      |
| Magnitude                                             | Tabular Data             |                          |                      |
| Tabular Data                                          |                          |                          |                      |
| Independent Variable                                  | Y                        |                          |                      |
| Coordinate System                                     | Global Coordinate System |                          |                      |
| Graph Controls                                        |                          |                          |                      |
| X-Axis                                                | Y                        |                          |                      |

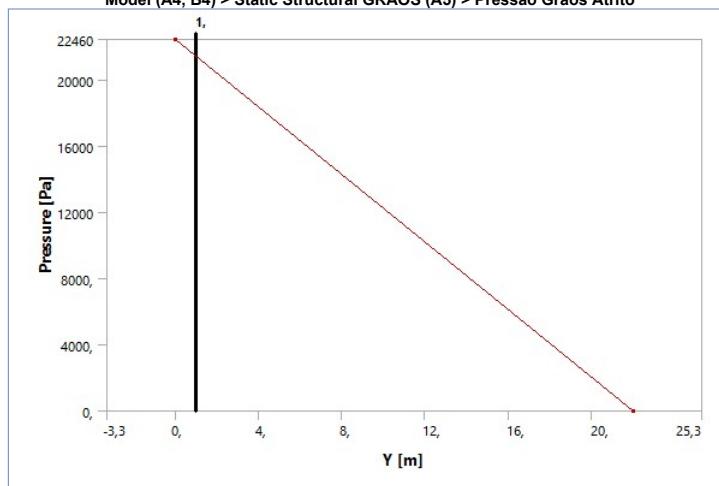
**FIGURE 1**  
**Model (A4, B4) > Static Structural GRÃOS (A5) > Pressão Grãos Horizontal**



**TABLE 35**  
Model (A4, B4) > Static Structural GRÃOS (A5) > Pressão Grãos Horizontal

| Y [m] | Pressure [Pa] |
|-------|---------------|
| 0,    | 56150         |
| 22,   | 0,            |

**FIGURE 2**  
Model (A4, B4) > Static Structural GRÃOS (A5) > Pressão Grãos Atrito



**TABLE 36**  
Model (A4, B4) > Static Structural GRÃOS (A5) > Pressão Grãos Atrito

| Y [m] | Pressure [Pa] |
|-------|---------------|
| 0,    | 22460         |
| 22,   | 0,            |

### Solution (A6)

**TABLE 37**  
Model (A4, B4) > Static Structural GRÃOS (A5) > Solution

|                                 |               |
|---------------------------------|---------------|
| Object Name                     | Solution (A6) |
| State                           | Solved        |
| <b>Adaptive Mesh Refinement</b> |               |
| Max Refinement Loops            | 0,            |
| Refinement Depth                | 0,            |
| <b>Information</b>              |               |
| Status                          | Done          |
| MAPDL Elapsed Time              | 7 m 55 s      |
| MAPDL Memory Used               | 10,538 GB     |
| MAPDL Result File Size          | 176,19 MB     |
| <b>Post Processing</b>          |               |
| Beam Section Results            | No            |
| On Demand Stress/Strain         | No            |

**TABLE 38**  
Model (A4, B4) > Static Structural GRÃOS (A5) > Solution (A6) > Solution Information

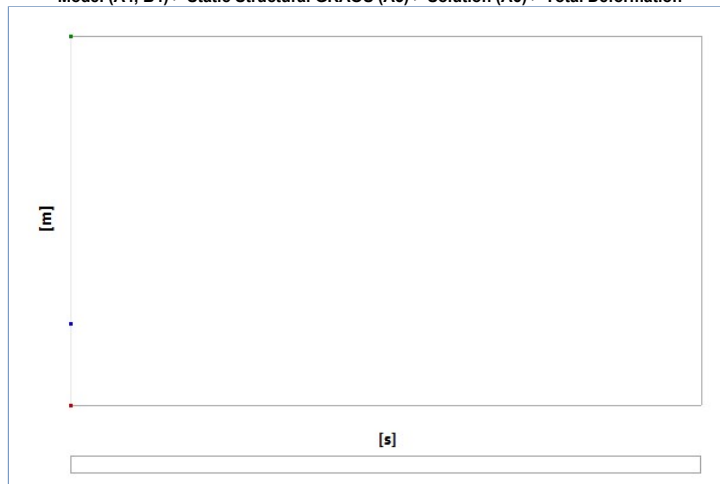
|                                 |                      |
|---------------------------------|----------------------|
| Object Name                     | Solution Information |
| State                           | Solved               |
| <b>Solution Information</b>     |                      |
| Solution Output                 | Solver Output        |
| Newton-Raphson Residuals        | 0                    |
| Identify Element Violations     | 0                    |
| Update Interval                 | 2,5 s                |
| Display Points                  | All                  |
| <b>FE Connection Visibility</b> |                      |
| Activate Visibility             | Yes                  |
| Display                         | All FE Connectors    |
| Draw Connections Attached To    | All Nodes            |

|                    |                 |
|--------------------|-----------------|
| Line Color         | Connection Type |
| Visible on Results | No              |
| Line Thickness     | Single          |
| Display Type       | Lines           |

**TABLE 39**  
**Model (A4, B4) > Static Structural GRÄOS (A5) > Solution (A6) > Results**

| Object Name                           | Total Deformation  | Equivalent Stress                          | Structural Error | Linearized Equivalent Stress |
|---------------------------------------|--------------------|--------------------------------------------|------------------|------------------------------|
| State                                 | Solved             |                                            |                  |                              |
| Scope                                 |                    |                                            |                  |                              |
| Scoping Method                        | Geometry Selection |                                            |                  | Path                         |
| Geometry                              | All Bodies         |                                            |                  |                              |
| Position                              |                    | Top/Bottom                                 |                  | Bottom                       |
| Path                                  |                    |                                            |                  | Path                         |
| Definition                            |                    |                                            |                  |                              |
| Type                                  | Total Deformation  | Equivalent (von-Mises) Stress              | Structural Error | Linearized Equivalent Stress |
| By                                    | Time               |                                            |                  |                              |
| Display Time                          | Last               |                                            |                  |                              |
| Calculate Time History                | Yes                |                                            |                  |                              |
| Identifier                            |                    |                                            |                  |                              |
| Suppressed                            | No                 |                                            |                  |                              |
| Subtype                               |                    |                                            |                  | All                          |
| Coordinate System                     |                    |                                            |                  | Global Coordinate System     |
| Zero Through-Thickness Bending Stress | No                 |                                            |                  |                              |
| Results                               |                    |                                            |                  |                              |
| Minimum                               | 0, m               | 2,0885 Pa                                  | 4,9079e-016 J    |                              |
| Maximum                               | 8,3503e-003 m      | 2,7118e+008 Pa                             | 2,3418 J         |                              |
| Average                               | 1,8486e-003 m      | 1,7014e+007 Pa                             |                  |                              |
| Minimum Occurs On                     | Solid              |                                            |                  |                              |
| Maximum Occurs On                     | Surface            | Pattern\Pattern\Pattern\Component1\Surface | Surface          |                              |
| Total                                 | 882,39 J           |                                            |                  |                              |
| Membrane                              |                    |                                            |                  | 2,0878e+007 Pa               |
| Bending (Inside)                      |                    |                                            |                  | 2,6343e+007 Pa               |
| Bending (Outside)                     |                    |                                            |                  | 2,6343e+007 Pa               |
| Membrane+Bending (Inside)             |                    |                                            |                  | 7,1807e+006 Pa               |
| Membrane+Bending (Center)             |                    |                                            |                  | 2,0878e+007 Pa               |
| Membrane+Bending (Outside)            |                    |                                            |                  | 4,6991e+007 Pa               |
| Peak (Inside)                         |                    |                                            |                  | 7,1827e+006 Pa               |
| Peak (Center)                         |                    |                                            |                  | 5,8799e+006 Pa               |
| Peak (Outside)                        |                    |                                            |                  | 5,436e+007 Pa                |
| Total (Inside)                        |                    |                                            |                  | 5382,6 Pa                    |
| Total (Center)                        |                    |                                            |                  | 2,0121e+007 Pa               |
| Total (Outside)                       |                    |                                            |                  | 6,5695e+007 Pa               |
| Information                           |                    |                                            |                  |                              |
| Time                                  | 1, s               |                                            |                  |                              |
| Load Step                             | 1                  |                                            |                  |                              |
| Substep                               | 1                  |                                            |                  |                              |
| Iteration Number                      | 5                  |                                            |                  |                              |
| Integration Point Results             |                    |                                            |                  |                              |
| Display Option                        |                    | Averaged                                   |                  |                              |
| Average Across Bodies                 |                    | No                                         |                  |                              |

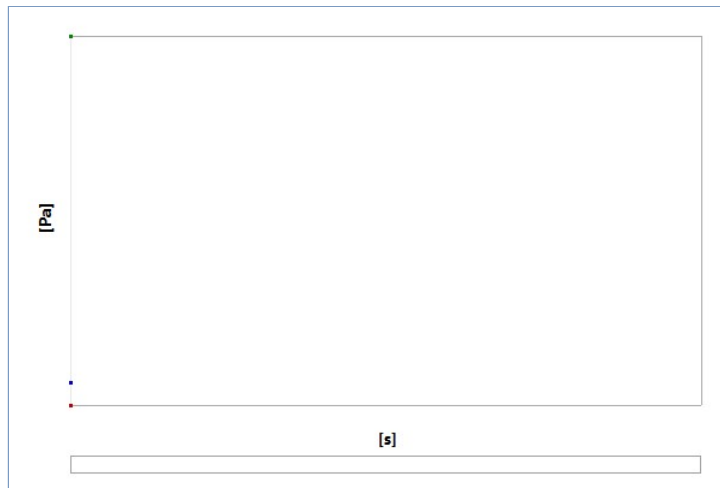
**FIGURE 3**  
**Model (A4, B4) > Static Structural GRÄOS (A5) > Solution (A6) > Total Deformation**



**TABLE 40**  
**Model (A4, B4) > Static Structural GRÄOS (A5) > Solution (A6) > Total Deformation**

| Time [s] | Minimum [m] | Maximum [m] | Average [m] |
|----------|-------------|-------------|-------------|
| 1,       | 0,          | 8,3503e-003 | 1,8486e-003 |

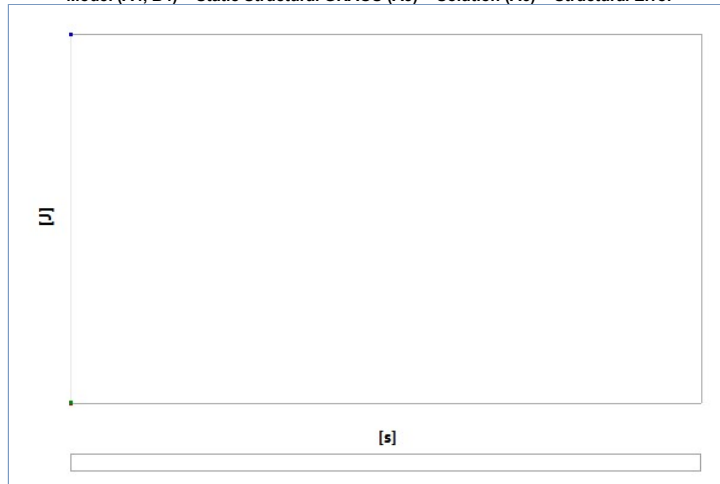
**FIGURE 4**  
**Model (A4, B4) > Static Structural GRÄOS (A5) > Solution (A6) > Equivalent Stress**



**TABLE 41**  
**Model (A4, B4) > Static Structural GRÃOS (A5) > Solution (A6) > Equivalent Stress**

| Time [s] | Minimum [Pa] | Maximum [Pa] | Average [Pa] |
|----------|--------------|--------------|--------------|
| 1,       | 2,0885       | 2,7118e+008  | 1,7014e+007  |

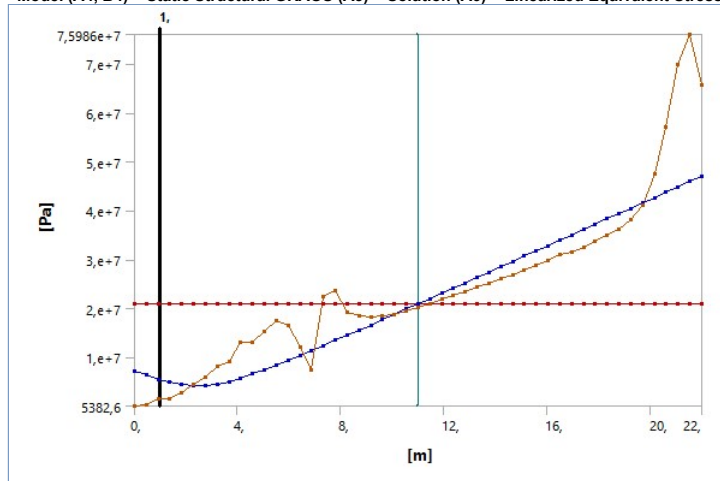
**FIGURE 5**  
**Model (A4, B4) > Static Structural GRÃOS (A5) > Solution (A6) > Structural Error**



**TABLE 42**  
**Model (A4, B4) > Static Structural GRÃOS (A5) > Solution (A6) > Structural Error**

| Time [s] | Minimum [J] | Maximum [J] | Total [J] |
|----------|-------------|-------------|-----------|
| 1,       | 4,9079e-016 | 2,3418      | 882,39    |

**FIGURE 6**  
**Model (A4, B4) > Static Structural GRÃOS (A5) > Solution (A6) > Linearized Equivalent Stress**



**TABLE 43**  
**Model (A4, B4) > Static Structural GRÃOS (A5) > Solution (A6) > Linearized Equivalent Stress**

| Length [m] | Membrane [Pa] | Bending [Pa] | Membrane+Bending [Pa] | Peak [Pa]   | Total [Pa]  |
|------------|---------------|--------------|-----------------------|-------------|-------------|
| 0,         |               | 2,6343e+007  | 7,1807e+006           | 7,1827e+006 | 5382,6      |
| 0,45833    |               | 2,5246e+007  | 6,3139e+006           | 6,1119e+006 | 2,345e+005  |
| 0,91667    |               | 2,4148e+007  | 5,5297e+006           | 4,5594e+006 | 1,4674e+006 |
| 1,375      |               | 2,305e+007   | 4,8683e+006           | 3,7284e+006 | 1,537e+006  |
| 1,8333     |               | 2,1953e+007  | 4,3854e+006           | 4,3185e+006 | 2,5948e+006 |

|        |             |             |             |             |             |
|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 2,2917 | 2,0878e+007 | 2,0855e+007 | 4,144e+006  | 4,5255e+006 | 4,3277e+006 |
| 2,75   |             | 1,9757e+007 | 4,1861e+006 | 5,1295e+006 | 6,019e+006  |
| 3,2083 |             | 1,866e+007  | 4,5037e+006 | 6,1329e+006 | 8,0704e+006 |
| 3,6667 |             | 1,7562e+007 | 5,0452e+006 | 7,0885e+006 | 9,0923e+006 |
| 4,125  |             | 1,6464e+007 | 5,7474e+006 | 1,449e+007  | 1,3083e+007 |
| 4,5833 |             | 1,5367e+007 | 6,5591e+006 | 7,7493e+006 | 1,3062e+007 |
| 5,0417 |             | 1,4269e+007 | 7,4445e+006 | 9,2909e+006 | 1,5302e+007 |
| 5,5    |             | 1,3172e+007 | 8,3803e+006 | 1,0923e+007 | 1,735e+007  |
| 5,9583 |             | 1,2074e+007 | 9,3513e+006 | 9,4291e+006 | 1,6503e+007 |
| 6,4167 |             | 1,0976e+007 | 1,0348e+007 | 6,5214e+006 | 1,2101e+007 |
| 6,875  |             | 9,8787e+006 | 1,1363e+007 | 1,7312e+007 | 7,317e+006  |
| 7,3333 |             | 8,7811e+006 | 1,2392e+007 | 2,8913e+007 | 2,2459e+007 |
| 7,7917 |             | 7,6834e+006 | 1,3432e+007 | 1,1991e+007 | 2,3516e+007 |
| 8,25   |             | 6,5858e+006 | 1,448e+007  | 7,0501e+006 | 1,9261e+007 |
| 8,7083 |             | 5,4882e+006 | 1,5536e+007 | 5,1401e+006 | 1,8394e+007 |
| 9,1667 |             | 4,3905e+006 | 1,6596e+007 | 3,658e+006  | 1,8176e+007 |
| 9,625  |             | 3,2929e+006 | 1,7662e+007 | 4,2118e+006 | 1,8439e+007 |
| 10,083 |             | 2,1953e+006 | 1,8731e+007 | 4,7344e+006 | 1,8773e+007 |
| 10,542 |             | 1,0976e+006 | 1,9803e+007 | 5,2649e+006 | 1,9354e+007 |
| 11,    |             | 8,5082e-009 | 2,0878e+007 | 5,8799e+006 | 2,0121e+007 |
| 11,458 |             | 1,0976e+006 | 2,1955e+007 | 6,2569e+006 | 2,0939e+007 |
| 11,917 |             | 2,1953e+006 | 2,3034e+007 | 6,4297e+006 | 2,1772e+007 |
| 12,375 |             | 3,2929e+006 | 2,4114e+007 | 6,821e+006  | 2,2507e+007 |
| 12,833 |             | 4,3905e+006 | 2,5197e+007 | 7,6561e+006 | 2,3304e+007 |
| 13,292 |             | 5,4882e+006 | 2,628e+007  | 8,3542e+006 | 2,4269e+007 |
| 13,75  |             | 6,5858e+006 | 2,7365e+007 | 9,0946e+006 | 2,5196e+007 |
| 14,208 |             | 7,6834e+006 | 2,845e+007  | 1,0164e+007 | 2,6084e+007 |
| 14,667 |             | 8,7811e+006 | 2,9537e+007 | 1,0397e+007 | 2,693e+007  |
| 15,125 |             | 9,8787e+006 | 3,0624e+007 | 9,8769e+006 | 2,7834e+007 |
| 15,583 |             | 1,0976e+007 | 3,1712e+007 | 9,7974e+006 | 2,8783e+007 |
| 16,042 |             | 1,2074e+007 | 3,28e+007   | 9,5048e+006 | 2,9803e+007 |
| 16,5   |             | 1,3172e+007 | 3,389e+007  | 9,1424e+006 | 3,0869e+007 |
| 16,958 |             | 1,4269e+007 | 3,4979e+007 | 9,0735e+006 | 3,1567e+007 |
| 17,417 |             | 1,5367e+007 | 3,607e+007  | 9,5018e+006 | 3,2519e+007 |
| 17,875 |             | 1,6464e+007 | 3,716e+007  | 9,4892e+006 | 3,3711e+007 |
| 18,333 |             | 1,7562e+007 | 3,8251e+007 | 8,6562e+006 | 3,482e+007  |
| 18,792 |             | 1,866e+007  | 3,9343e+007 | 7,2352e+006 | 3,6103e+007 |
| 19,25  |             | 1,9757e+007 | 4,0434e+007 | 4,8948e+006 | 3,8033e+007 |
| 19,708 |             | 2,0855e+007 | 4,1526e+007 | 1,484e+006  | 4,1106e+007 |
| 20,167 |             | 2,1953e+007 | 4,2619e+007 | 6,4784e+006 | 4,7517e+007 |
| 20,625 |             | 2,305e+007  | 4,3711e+007 | 2,1556e+007 | 5,7151e+007 |
| 21,083 |             | 2,4148e+007 | 4,4804e+007 | 3,778e+007  | 6,9925e+007 |
| 21,542 |             | 2,5246e+007 | 4,5897e+007 | 3,5303e+007 | 7,5986e+007 |
| 22,    |             | 2,6343e+007 | 4,6991e+007 | 5,436e+007  | 6,5695e+007 |

## Static Structural VENTO (B5)

**TABLE 44**  
**Model (A4, B4) > Analysis**

|                         |  |                              |
|-------------------------|--|------------------------------|
| Object Name             |  | Static Structural VENTO (B5) |
| State                   |  | Solved                       |
| Definition              |  |                              |
| Physics Type            |  | Structural                   |
| Analysis Type           |  | Static Structural            |
| Solver Target           |  | Mechanical APDL              |
| Options                 |  |                              |
| Environment Temperature |  | 22, °C                       |
| Generate Input Only     |  | No                           |

**TABLE 45**  
**Model (A4, B4) > Static Structural VENTO (B5) > Analysis Settings**

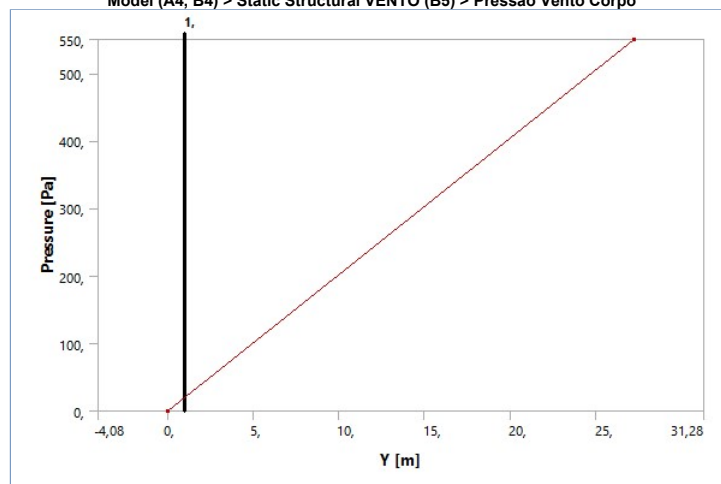
|                               |  |                    |
|-------------------------------|--|--------------------|
| Object Name                   |  | Analysis Settings  |
| State                         |  | Fully Defined      |
| Step Controls                 |  |                    |
| Number Of Steps               |  | 1,                 |
| Current Step Number           |  | 1,                 |
| Step End Time                 |  | 1, s               |
| Auto Time Stepping            |  | Program Controlled |
| Solver Controls               |  |                    |
| Solver Type                   |  | Iterative          |
| Weak Springs                  |  | Off                |
| Solver Pivot Checking         |  | Program Controlled |
| Large Deflection              |  | On                 |
| Inertia Relief                |  | Off                |
| Quasi-Static Solution         |  | Off                |
| Rotordynamics Controls        |  |                    |
| Coriolis Effect               |  | Off                |
| Restart Controls              |  |                    |
| Generate Restart Points       |  | Program Controlled |
| Retain Files After Full Solve |  | No                 |
| Combine Restart Files         |  | Program Controlled |
| Nonlinear Controls            |  |                    |
| Newton-Raphson Option         |  | Program Controlled |
| Force Convergence             |  | Program Controlled |
| Moment Convergence            |  | Program Controlled |
| Displacement Convergence      |  | Program Controlled |
| Rotation Convergence          |  | Program Controlled |
| Line Search                   |  | Program Controlled |
| Stabilization                 |  | Program Controlled |
| Advanced                      |  |                    |
| Inverse Option                |  | No                 |
| Contact Split (DMP)           |  | Off                |
| Output Controls               |  |                    |
| Stress                        |  | Yes                |

|                                 |                                                                     |
|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Surface Stress                  | No                                                                  |
| Back Stress                     | No                                                                  |
| Strain                          | Yes                                                                 |
| Contact Data                    | Yes                                                                 |
| Nonlinear Data                  | No                                                                  |
| Nodal Forces                    | No                                                                  |
| Volume and Energy               | Yes                                                                 |
| Euler Angles                    | Yes                                                                 |
| General Miscellaneous           | No                                                                  |
| Contact Miscellaneous           | No                                                                  |
| Store Results At                | All Time Points                                                     |
| Result File Compression         | Program Controlled                                                  |
| <b>Analysis Data Management</b> |                                                                     |
| Solver Files Directory          | C:\Users\Tercio\Documents\laNSYS\Modelo 31.05_files\dp0\SYS-1\MECH\ |
| Future Analysis                 | None                                                                |
| Scratch Solver Files Directory  |                                                                     |
| Save MAPDL db                   | No                                                                  |
| Contact Summary                 | Program Controlled                                                  |
| Delete Unneeded Files           | Yes                                                                 |
| Nonlinear Solution              | Yes                                                                 |
| Solver Units                    | Active System                                                       |
| Solver Unit System              | mks                                                                 |

**TABLE 46**  
**Model (A4, B4) > Static Structural VENTO (B5) > Loads**

|                                                        |                          |                     |
|--------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------|
| Model (A4, D4) - Static Structural - VENT (D3) - Loads |                          |                     |
| Object Name                                            | Fixed Support            | Pressão Vento Corpo |
| State                                                  | Fully Defined            |                     |
| Scope                                                  |                          |                     |
| Scoping Method                                         | Geometry Selection       |                     |
| Geometry                                               | 1 Face                   | 5971 Element Faces  |
| Definition                                             |                          |                     |
| Type                                                   | Fixed Support            | Pressure            |
| Suppressed                                             | No                       |                     |
| Define By                                              | Normal To                |                     |
| Applied By                                             | Surface Effect           |                     |
| Loaded Area                                            | Deformed                 |                     |
| Magnitude                                              | Tabular Data             |                     |
| Tabular Data                                           |                          |                     |
| Independent Variable                                   | Y                        |                     |
| Coordinate System                                      | Global Coordinate System |                     |
| Graph Controls                                         |                          |                     |
| X-Axis                                                 | Y                        |                     |

**FIGURE 7**  
**Model (A4, B4) > Static Structural VENTO (B5) > Pressão Vento Corpo**



**TABLE 47**  
**Model (A4, B4) > Static Structural VENTO (B5) > Pressão Vento Corpo**

| Y [m] | Pressure [Pa] |
|-------|---------------|
| 0,    | 0,            |
| 27,2  | 550,          |

### Solution (B6)

**TABLE 48**  
**Model (A4, B4) > Static Structural VENTO (B5) > Solution**

|                                 |               |
|---------------------------------|---------------|
| Object Name                     | Solution (B6) |
| State                           | Solved        |
| <b>Adaptive Mesh Refinement</b> |               |
| Max Refinement Loops            | 0,            |
| Refinement Depth                | 0,            |
| <b>Information</b>              |               |
| Status                          | Done          |
| MAPDL Elapsed Time              | 6 m 36 s      |
| MAPDL Memory Used               | 10,506 GB     |
| MAPDL Result File Size          | 172,38 MB     |
| <b>Post Processing</b>          |               |
| Beam Section Results            | No            |
| On Demand Stress/Strain         | No            |

**TABLE 49**

## Model (A4, B4) &gt; Static Structural VENTO (B5) &gt; Solution (B6) &gt; Solution Information

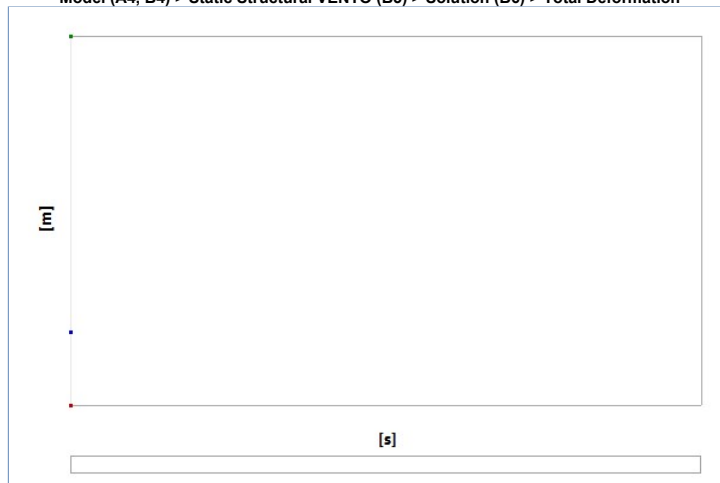
|                                 |                             |
|---------------------------------|-----------------------------|
| Object Name                     | <i>Solution Information</i> |
| State                           | Solved                      |
| <b>Solution Information</b>     |                             |
| Solution Output                 | Solver Output               |
| Newton-Raphson Residuals        | 0                           |
| Identify Element Violations     | 0                           |
| Update Interval                 | 2,5 s                       |
| Display Points                  | All                         |
| <b>FE Connection Visibility</b> |                             |
| Activate Visibility             | Yes                         |
| Display                         | All FE Connectors           |
| Draw Connections Attached To    | All Nodes                   |
| Line Color                      | Connection Type             |
| Visible on Results              | No                          |
| Line Thickness                  | Single                      |
| Display Type                    | Lines                       |

**TABLE 50**  
Model (A4, B4) > Static Structural VENTO (B5) > Solution (B6) > Results

|                                       |                    |                               |                  |                              |
|---------------------------------------|--------------------|-------------------------------|------------------|------------------------------|
| Object Name                           | Total Deformation  | Equivalent Stress             | Structural Error | Linearized Equivalent Stress |
| State                                 | Solved             |                               |                  |                              |
| Scope                                 |                    |                               |                  |                              |
| Scoping Method                        | Geometry Selection |                               |                  | Path                         |
| Geometry                              | All Bodies         |                               |                  |                              |
| Position                              | Top/Bottom         |                               | Bottom           |                              |
| Path                                  |                    |                               |                  | Path                         |
| Definition                            |                    |                               |                  |                              |
| Type                                  | Total Deformation  | Equivalent (von-Mises) Stress | Structural Error | Linearized Equivalent Stress |
| By                                    | Time               |                               |                  |                              |
| Display Time                          | Last               |                               |                  |                              |
| Calculate Time History                | Yes                |                               |                  |                              |
| Identifier                            |                    |                               |                  |                              |
| Suppressed                            | No                 |                               |                  |                              |
| Subtype                               |                    |                               |                  | All                          |
| Coordinate System                     |                    |                               |                  | Global Coordinate System     |
| Zero Through-Thickness Bending Stress |                    |                               |                  | No                           |
| Results                               |                    |                               |                  |                              |
| Minimum                               | 0, m               | 2,8337e-002 Pa                | 7,8421e-021 J    |                              |
| Maximum                               | 6,7359e-004 m      | 3,1504e+006 Pa                | 6,7147e-004 J    |                              |
| Average                               | 1,3445e-004 m      | 3,6366e+005 Pa                |                  |                              |
| Minimum Occurs On                     | Solid              |                               |                  |                              |
| Maximum Occurs On                     | Surface            |                               |                  |                              |
| Total                                 |                    |                               | 0,48693 J        |                              |
| Membrane                              |                    |                               |                  | 4,2928e+005 Pa               |
| Bending (Inside)                      |                    |                               |                  | 5,1422e+005 Pa               |
| Bending (Outside)                     |                    |                               |                  | 5,1422e+005 Pa               |
| Membrane+Bending (Inside)             |                    |                               |                  | 2,9084e+005 Pa               |
| Membrane+Bending (Center)             |                    |                               |                  | 4,2928e+005 Pa               |
| Membrane+Bending (Outside)            |                    |                               |                  | 9,0156e+005 Pa               |
| Peak (Inside)                         |                    |                               |                  | 3,3804e+005 Pa               |
| Peak (Center)                         |                    |                               |                  | 90280 Pa                     |
| Peak (Outside)                        |                    |                               |                  | 8,8026e+005 Pa               |
| Total (Inside)                        |                    |                               |                  | 69992 Pa                     |
| Total (Center)                        |                    |                               |                  | 4,7773e+005 Pa               |
| Total (Outside)                       |                    |                               |                  | 1,1876e+005 Pa               |
| Information                           |                    |                               |                  |                              |
| Time                                  | 1, s               |                               |                  |                              |
| Load Step                             | 1                  |                               |                  |                              |
| Substep                               | 1                  |                               |                  |                              |
| Iteration Number                      | 3                  |                               |                  |                              |
| Integration Point Results             |                    |                               |                  |                              |
| Display Option                        |                    | Averaged                      |                  |                              |
| Average Across Bodies                 |                    | No                            |                  |                              |

FIGURE 8

## Model (A4, B4) &gt; Static Structural VENTO (B5) &gt; Solution (B6) &gt; Total Deformation



**TABLE 51**  
Model (A4, B4) > Static Structural VENTO (B5) > Solution (B6) > Total Deformation

| Time [s] | Minimum [m] | Maximum [m] | Average [m] |
|----------|-------------|-------------|-------------|
|----------|-------------|-------------|-------------|

|    |    |             |             |
|----|----|-------------|-------------|
| 1, | 0, | 6,7359e-004 | 1,3445e-004 |
|----|----|-------------|-------------|

FIGURE 9

Model (A4, B4) &gt; Static Structural VENTO (B5) &gt; Solution (B6) &gt; Equivalent Stress

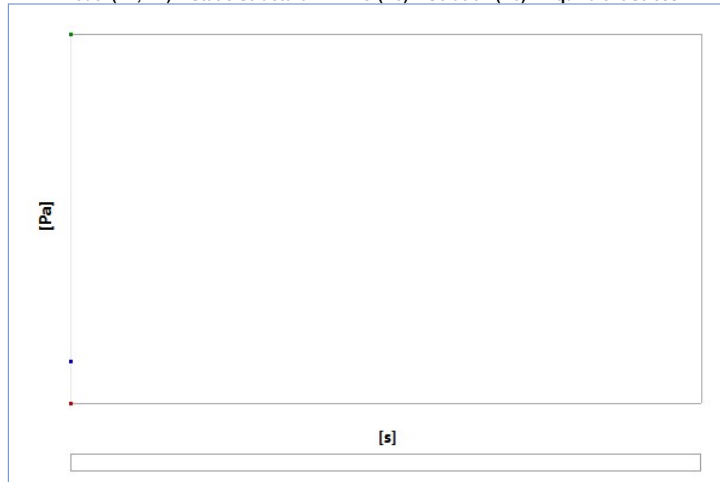


TABLE 52

Model (A4, B4) &gt; Static Structural VENTO (B5) &gt; Solution (B6) &gt; Equivalent Stress

| Time [s] | Minimum [Pa] | Maximum [Pa] | Average [Pa] |
|----------|--------------|--------------|--------------|
| 1,       | 2,8337e-002  | 3,1504e+006  | 3,6366e+005  |

FIGURE 10

Model (A4, B4) &gt; Static Structural VENTO (B5) &gt; Solution (B6) &gt; Structural Error

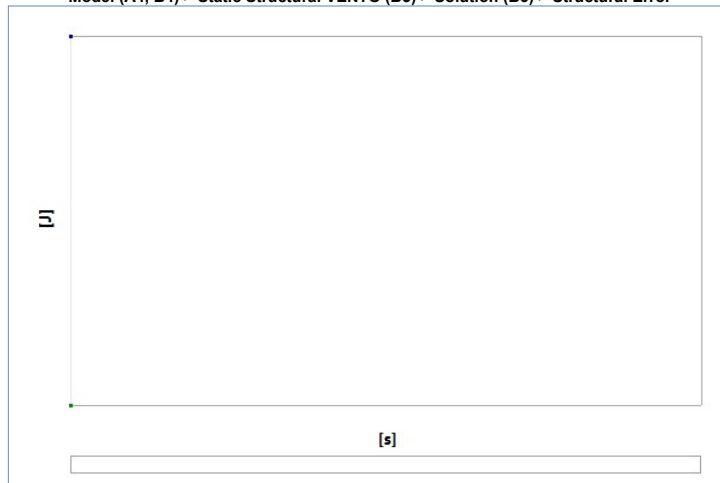


TABLE 53

Model (A4, B4) &gt; Static Structural VENTO (B5) &gt; Solution (B6) &gt; Structural Error

| Time [s] | Minimum [J] | Maximum [J] | Total [J] |
|----------|-------------|-------------|-----------|
| 1,       | 7,8421e-021 | 6,7147e-004 | 0,48693   |

FIGURE 11

Model (A4, B4) &gt; Static Structural VENTO (B5) &gt; Solution (B6) &gt; Linearized Equivalent Stress

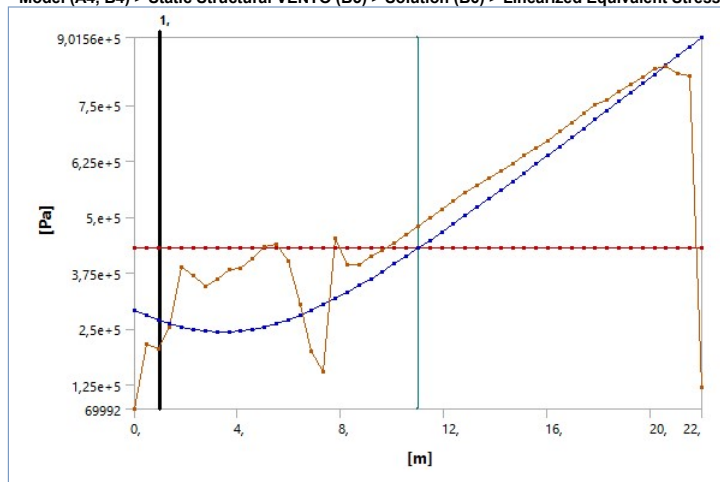


TABLE 54

Model (A4, B4) &gt; Static Structural VENTO (B5) &gt; Solution (B6) &gt; Linearized Equivalent Stress

| Length [m] | Membrane [Pa] | Bending [Pa] | Membrane+Bending [Pa] | Peak [Pa]   | Total [Pa] |
|------------|---------------|--------------|-----------------------|-------------|------------|
| 0,         |               | 5,1422e+005  | 2,9084e+005           | 3,3804e+005 | 69992      |

|         |             |             |             |             |             |
|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 0,45833 | 4,2928e+005 | 4,9279e+005 | 2,7961e+005 | 2,7198e+005 | 2,1568e+005 |
| 0,91667 |             | 4,7136e+005 | 2,6962e+005 | 98158       | 2,0386e+005 |
| 1,375   |             | 4,4994e+005 | 2,6101e+005 | 26476       | 2,5175e+005 |
| 1,8333  |             | 4,2851e+005 | 2,5392e+005 | 1,45e+005   | 3,8748e+005 |
| 2,2917  |             | 4,0709e+005 | 2,4849e+005 | 1,2802e+005 | 3,6796e+005 |
| 2,75    |             | 3,8566e+005 | 2,4481e+005 | 1,0149e+005 | 3,4448e+005 |
| 3,2083  |             | 3,6424e+005 | 2,4297e+005 | 1,1969e+005 | 3,6125e+005 |
| 3,6667  |             | 3,4281e+005 | 2,4302e+005 | 1,6843e+005 | 3,816e+005  |
| 4,125   |             | 3,2138e+005 | 2,4495e+005 | 4,2579e+005 | 3,8389e+005 |
| 4,5833  |             | 2,9996e+005 | 2,4871e+005 | 1,6744e+005 | 4,06e+005   |
| 5,0417  |             | 2,7853e+005 | 2,5423e+005 | 2,0114e+005 | 4,3206e+005 |
| 5,5     |             | 2,5711e+005 | 2,614e+005  | 2,0726e+005 | 4,3737e+005 |
| 5,9583  |             | 2,3568e+005 | 2,7008e+005 | 1,4644e+005 | 4,0175e+005 |
| 6,4167  |             | 2,1426e+005 | 2,8013e+005 | 1,2623e+005 | 3,0324e+005 |
| 6,875   |             | 1,9283e+005 | 2,9141e+005 | 4,2631e+005 | 1,9911e+005 |
| 7,3333  |             | 1,7141e+005 | 3,0379e+005 | 1,9291e+005 | 1,541e+005  |
| 7,7917  |             | 1,4998e+005 | 3,1714e+005 | 1,8123e+005 | 4,5081e+005 |
| 8,25    |             | 1,2855e+005 | 3,3133e+005 | 95279       | 3,9408e+005 |
| 8,7083  |             | 1,0713e+005 | 3,4627e+005 | 73836       | 3,9382e+005 |
| 9,1667  |             | 85703       | 3,6186e+005 | 72326       | 4,12e+005   |
| 9,625   |             | 64277       | 3,7802e+005 | 80147       | 4,2552e+005 |
| 10,083  |             | 42851       | 3,9468e+005 | 84264       | 4,4146e+005 |
| 10,542  |             | 21426       | 4,1179e+005 | 87006       | 4,5895e+005 |
| 11,     |             | 1,6608e-010 | 4,2928e+005 | 90280       | 4,7773e+005 |
| 11,458  |             | 21426       | 4,4711e+005 | 92118       | 4,9715e+005 |
| 11,917  |             | 42851       | 4,6525e+005 | 91892       | 5,1573e+005 |
| 12,375  |             | 64277       | 4,8366e+005 | 91925       | 5,3427e+005 |
| 12,833  |             | 85703       | 5,023e+005  | 91079       | 5,5344e+005 |
| 13,292  |             | 1,0713e+005 | 5,2116e+005 | 86690       | 5,6977e+005 |
| 13,75   |             | 1,2855e+005 | 5,4022e+005 | 79393       | 5,8556e+005 |
| 14,208  |             | 1,4998e+005 | 5,5944e+005 | 70451       | 6,0188e+005 |
| 14,667  |             | 1,7141e+005 | 5,7882e+005 | 62944       | 6,1928e+005 |
| 15,125  |             | 1,9283e+005 | 5,9834e+005 | 65853       | 6,3909e+005 |
| 15,583  |             | 2,1426e+005 | 6,1798e+005 | 60990       | 6,5485e+005 |
| 16,042  |             | 2,3568e+005 | 6,3774e+005 | 56731       | 6,6972e+005 |
| 16,5    |             | 2,5711e+005 | 6,576e+005  | 55162       | 6,9231e+005 |
| 16,958  |             | 2,7853e+005 | 6,7756e+005 | 46005       | 7,0969e+005 |
| 17,417  |             | 2,9996e+005 | 6,9761e+005 | 44987       | 7,3156e+005 |
| 17,875  |             | 3,2138e+005 | 7,1773e+005 | 41242       | 7,5126e+005 |
| 18,333  |             | 3,4281e+005 | 7,3793e+005 | 25347       | 7,6126e+005 |
| 18,792  |             | 3,6424e+005 | 7,582e+005  | 26935       | 7,7983e+005 |
| 19,25   |             | 3,8566e+005 | 7,7852e+005 | 30967       | 7,9651e+005 |
| 19,708  |             | 4,0709e+005 | 7,9891e+005 | 40351       | 8,118e+005  |
| 20,167  |             | 4,2851e+005 | 8,1935e+005 | 55104       | 8,3119e+005 |
| 20,625  |             | 4,4994e+005 | 8,3983e+005 | 87852       | 8,3625e+005 |
| 21,083  |             | 4,7136e+005 | 8,6037e+005 | 1,3026e+005 | 8,2047e+005 |
| 21,542  |             | 4,9279e+005 | 8,8094e+005 | 1,0186e+005 | 8,1498e+005 |
| 22,     |             | 5,1422e+005 | 9,0156e+005 | 8,8026e+005 | 1,1876e+005 |

## Solution Combination

| Model (A4, B4) > Solution Combination |                         |          |
|---------------------------------------|-------------------------|----------|
| Coefficient                           | Environment Name        | Time     |
| 1,5                                   | Static Structural VENTO | End Time |
| 1,35                                  | Static Structural GRÃOS |          |

**TABLE 55**  
**Model (A4, B4) > Solution Combination > Results**

| Object Name                           | Equivalent Stress                          | Total Deformation | Linearized Equivalent Stress |
|---------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------|------------------------------|
| State                                 | Solved                                     |                   |                              |
| Scope                                 |                                            |                   |                              |
| Scoping Method                        | Geometry Selection                         |                   | Path                         |
| Geometry                              | All Bodies                                 |                   |                              |
| Position                              | Top/Bottom                                 |                   | Top                          |
| Path                                  |                                            |                   | Path                         |
| Definition                            |                                            |                   |                              |
| Type                                  | Equivalent (von-Mises) Stress              | Total Deformation | Linearized Equivalent Stress |
| By                                    | Combination                                |                   |                              |
| Combination Number                    | Last                                       |                   |                              |
| Suppressed                            | No                                         |                   |                              |
| Subtype                               | All                                        |                   |                              |
| Coordinate System                     | Global Coordinate System                   |                   |                              |
| Zero Through-Thickness Bending Stress | No                                         |                   |                              |
| Integration Point Results             |                                            |                   |                              |
| Display Option                        | Averaged                                   |                   |                              |
| Average Across Bodies                 | No                                         |                   |                              |
| Results                               |                                            |                   |                              |
| Minimum                               | 2,9641 Pa                                  | 0, m              |                              |
| Maximum                               | 3,6691e+008 Pa                             | 1,1316e-002 m     |                              |
| Average                               | 2,3021e+007 Pa                             | 2,5141e-003 m     |                              |
| Minimum Occurs On                     | Solid                                      |                   |                              |
| Maximum Occurs On                     | Pattern\Pattern\Pattern\Component1\Surface | Surface           |                              |
| Membrane                              |                                            |                   | 3,0905e+007 Pa               |
| Bending (Inside)                      |                                            |                   | 3,7584e+007 Pa               |
| Bending (Outside)                     |                                            |                   | 3,7584e+007 Pa               |
| Membrane+Bending (Inside)             |                                            |                   | 1,0055e+007 Pa               |
| Membrane+Bending (Center)             |                                            |                   | 3,0905e+007 Pa               |
| Membrane+Bending (Outside)            |                                            |                   | 6,8075e+007 Pa               |
| Peak (Inside)                         |                                            |                   | 1,0119e+007 Pa               |
| Peak (Center)                         |                                            |                   | 7,3418e+006 Pa               |
| Peak (Outside)                        |                                            |                   | 7,5735e+007 Pa               |
| Total (Inside)                        |                                            |                   | 1,1437e+005 Pa               |
| Total (Center)                        |                                            |                   | 2,8687e+007 Pa               |
| Total (Outside)                       |                                            |                   | 6,4551e+007 Pa               |

## Material Data

### Concrete

**TABLE 56**  
**Concrete > Constants**

|                                  |                                         |
|----------------------------------|-----------------------------------------|
| Density                          | 2300, kg m <sup>-3</sup>                |
| Coefficient of Thermal Expansion | 1,4e-005 C <sup>-1</sup>                |
| Specific Heat                    | 780, J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> |
| Thermal Conductivity             | 0,72 W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>  |

**TABLE 57**  
**Concrete > Color**

|      |       |      |
|------|-------|------|
| Red  | Green | Blue |
| 180, | 173,  | 167, |

**TABLE 58**  
**Concrete > Compressive Ultimate Strength**

|                                  |
|----------------------------------|
| Compressive Ultimate Strength Pa |
| 4,1e+007                         |

**TABLE 59**  
**Concrete > Compressive Yield Strength**

|                               |
|-------------------------------|
| Compressive Yield Strength Pa |
| 0,                            |

**TABLE 60**  
**Concrete > Tensile Yield Strength**

|                           |
|---------------------------|
| Tensile Yield Strength Pa |
| 0,                        |

**TABLE 61**  
**Concrete > Tensile Ultimate Strength**

|                              |
|------------------------------|
| Tensile Ultimate Strength Pa |
| 5,e+006                      |

**TABLE 62**  
**Concrete > Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion**

|                                             |
|---------------------------------------------|
| Zero-Thermal-Strain Reference Temperature C |
| 22,                                         |

**TABLE 63**  
**Concrete > Isotropic Elasticity**

| Young's Modulus Pa | Poisson's Ratio | Bulk Modulus Pa | Shear Modulus Pa | Temperature C |
|--------------------|-----------------|-----------------|------------------|---------------|
| 3,e+010            | 0,18            | 1,5625e+010     | 1,2712e+010      |               |

### Structural Steel

**TABLE 64**  
**Structural Steel > Constants**

|                                  |                                         |
|----------------------------------|-----------------------------------------|
| Density                          | 7850, kg m <sup>-3</sup>                |
| Coefficient of Thermal Expansion | 1,2e-005 C <sup>-1</sup>                |
| Specific Heat                    | 434, J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> |
| Thermal Conductivity             | 60,5 W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>  |
| Resistivity                      | 1,7e-007 ohm m                          |

**TABLE 65**  
**Structural Steel > Color**

|      |       |      |
|------|-------|------|
| Red  | Green | Blue |
| 132, | 139,  | 179, |

**TABLE 66**  
**Structural Steel > Compressive Ultimate Strength**

|                                  |
|----------------------------------|
| Compressive Ultimate Strength Pa |
| 0,                               |

**TABLE 67**  
**Structural Steel > Compressive Yield Strength**

|                               |
|-------------------------------|
| Compressive Yield Strength Pa |
| 2,5e+008                      |

**TABLE 68**  
**Structural Steel > Tensile Yield Strength**

|                           |
|---------------------------|
| Tensile Yield Strength Pa |
| 2,5e+008                  |

**TABLE 69**  
**Structural Steel > Tensile Ultimate Strength**

|                              |
|------------------------------|
| Tensile Ultimate Strength Pa |
| 4,6e+008                     |

**TABLE 70**  
**Structural Steel > Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion**

|                                             |
|---------------------------------------------|
| Zero-Thermal-Strain Reference Temperature C |
| 22,                                         |

**TABLE 71**  
**Structural Steel > S-N Curve**

| Alternating Stress Pa | Cycles | Mean Stress Pa |
|-----------------------|--------|----------------|
| 3,999e+009            | 10,    | 0,             |
| 2,827e+009            | 20,    | 0,             |
| 1,896e+009            | 50,    | 0,             |
| 1,413e+009            | 100,   | 0,             |
| 1,069e+009            | 200,   | 0,             |
| 4,41e+008             | 2000,  | 0,             |

|           |         |    |
|-----------|---------|----|
| 2,62e+008 | 10000   | 0, |
| 2,14e+008 | 20000   | 0, |
| 1,38e+008 | 1,e+005 | 0, |
| 1,14e+008 | 2,e+005 | 0, |
| 8,62e+007 | 1,e+006 | 0, |

**TABLE 72**  
**Structural Steel > Strain-Life Parameters**

| Strength Coefficient Pa | Strength Exponent | Ductility Coefficient | Ductility Exponent | Cyclic Strength Coefficient Pa | Cyclic Strain Hardening Exponent |
|-------------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| 9,2e+008                | -0,106            | 0,213                 | -0,47              | 1,e+009                        | 0,2                              |

**TABLE 73**  
**Structural Steel > Isotropic Elasticity**

| Young's Modulus Pa | Poisson's Ratio | Bulk Modulus Pa | Shear Modulus Pa | Temperature C |
|--------------------|-----------------|-----------------|------------------|---------------|
| 2,e+011            | 0,3             | 1,6667e+011     | 7,6923e+010      |               |

**TABLE 74**  
**Structural Steel > Isotropic Relative Permeability**

| Relative Permeability |
|-----------------------|
| 10000                 |