

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

**ROBERTO GIOTTI**

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE TAMPAS TRASEIRA E FRONTAL DE CAMINHÃO**  
**BASCULANTE**

**CAXIAS DO SUL**

**2023**

**ROBERTO GIOTTI**

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE TAMPAS TRASEIRA E FRONTAL DE CAMINHÃO  
BASCULANTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador Prof. Dr. Alexandre Vieceli

**CAXIAS DO SUL**

**2023**

**ROBERTO GIOTTI**

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE TAMPAS TRASEIRA E FRONTAL DE CAMINHÃO  
BASCULANTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador Prof. Dr. Alexandre Vieceli

**Aprovado em 11/12/2023**

**Banca Examinadora**

---

Prof. Dr. Alexandre Vieceli  
Universidade de Caxias do Sul

---

Prof. Me. Paulo Roberto Linzmaier  
Universidade de Caxias do Sul

---

Prof. Me. Adelair Colombo  
Universidade de Caxias do Sul

## **AGRADECIMENTOS**

A minha esposa e filha, Iara e Luiza, por me incentivar e me motivar a me tornar uma pessoa melhor a cada dia.

A minha querida mãe, Inês, por formar meu caráter e estar sempre comigo me apoiando e acreditando em meu potencial, e me auxiliando em momentos de dificuldades.

A minha irmã, Simone, por ser um exemplo de dedicação e esforço, o que certamente ajudou a ser quem sou hoje.

Ao meu orientador, Alexandre Vieceli, pela constante ajuda e orientação neste trabalho, além de toda contribuição fundamental em minha formação.

A instituição de ensino, Universidade de Caxias do Sul, e a todos os professores que compartilharam seus conhecimentos ajudando em meu desenvolvimento.

E, por fim, a todos aqueles que de alguma forma contribuíram nesse processo de transformação acadêmica.

## RESUMO

Desenvolveu-se, no presente trabalho, o estudo de análise estrutural com proposta de melhoria em tampa frontal e traseira de um caminhão basculante, reduzindo a massa do implemento e aumentando a rigidez. Fez-se uma estimativa da pressão que a carga exerce nas tampas, considerando a teoria de Janssen, bem como o efeito dinâmico de aceleração ou desaceleração. Foi realizada a análise estrutural pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), por meio da ferramenta *SolidWorks*®, avaliando-se deslocamentos e tensões. Posteriormente, foi implementada uma proposta de melhoria, na qual foram inseridas chapas dobradas de reforço, visando uma melhor estruturação das tampas e obtendo redução de massa. Os resultados obtidos das tensões admissíveis aproximados foram de 170 MPa para a tampa frontal e de aproximadamente 152 MPa para a tampa traseira. Obteve-se também um valor de deslocamento de 11,8 mm para a tampa frontal e 4,91 mm para a tampa traseira, e os valores de fator de segurança foram de aproximados 2,02 para a tampa frontal e 2,26 para a tampa traseira, alcançando-se uma redução de massa de 1,57% e 5,88%, respectivamente, em relação ao projeto inicial.

**Palavras-chave:** Tampa Frontal; Tampa Traseira; Método dos Elementos Finitos; Implemento Rodoviário; Caminhão Basculante.

## ABSTRACT

The present work involves the development of a structural analysis, proposing improvements to the front and rear covers of a dump truck, reducing the mass of the implement and increasing rigidity. An estimation was made regarding the pressure that the load exerts on the covers, considering Janssen's theory, as well as the dynamic effect of acceleration or deceleration. Structural analysis was made using the Finite Element Method (FEM), by SolidWorks®, evaluating displacement and stresses. Subsequently, an improvement proposal was implemented, introducing reinforced bent plates, aiming to enhance the cover's structure and obtain a reduction in mass. The results achieved from the approximate allowable stresses were 170 MPa for the front cover and approximately 152 MPa for the rear cover. A displacement value of 11.8 mm was also obtained for the front cover and 4.91 mm for the rear cover, and the safety factor values were approximately 2.02 for the front cover and 2.26 for the rear cover, leading to a reduction in mass of 1.57% and 5.88%, respectively, in relation to the initial design.

**Keywords:** Front Cover; Back Cover; Finite Element Method; Road Implement; Dump Truck.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Imagem ilustrativa de uma basculante.....	14
Figura 2 - Tampa frontal soldada no implemento .....	16
Figura 3 - Tampa traseira de um caminhão basculante .....	16
Figura 4 - Tampa frontal de um caminhão basculante .....	17
Figura 5 - Tampa traseira de um caminhão basculante .....	17
Figura 6 - Distribuição de carga em um caminhão basculante.....	19
Figura 7 - Nomenclatura das pressões .....	21
Figura 8 - Estado de tensões em dois pontos.....	25
Figura 9 - Exemplo de malha de elementos triangulares .....	28
Figura 10 - Caminhos para a solução de problemas no cálculo estrutural .....	29
Figura 11 - Esquema de pré-processamento.....	29
Figura 12 - Exemplo de geometrias de elementos finitos .....	31
Figura 13 - Elemento de casca.....	32
Figura 14 - Elementos na distribuição de cargas sobre um elemento tridimensional .....	33
Figura 15 - Tensão equivalente de Von Mises na junta A.....	34
Figura 16 - Fluxograma das atividades pré-estabelecidas .....	36
Figura 17 - Conjunto rodo trem basculante graneleiro.....	37
Figura 18 - Detalhamento da tampa traseira.....	38
Figura 19 - Detalhamento da tampa frontal.....	39
Figura 20 - Detalhamento da tampa frontal.....	39
Figura 21 - Detalhamento da tampa traseira.....	40
Figura 22 - Gráfico da curva de pressão normal à parede vertical .....	40
Figura 23 - Modelo geométrico simplificado da tampa frontal e traseira .....	42
Figura 24 - Aplicação dos carregamentos na parede horizontal da tampa frontal .....	43
Figura 25 - Aplicação dos carregamentos na parede horizontal da tampa traseira .....	43
Figura 26 - Geração da malha na tampa frontal e traseira.....	44
Figura 27 - Dados da malha de MEF da tampa frontal .....	44
Figura 28 - Dados da malha de MEF da tampa traseira .....	45
Figura 29 - Valores de tensão de von Mises da tampa frontal .....	46
Figura 30 - Valores de tensão de von Mises nos da tampa traseira.....	47
Figura 31 - Proposta com reforços da tampa traseira .....	47
Figura 32 - Proposta com reforços da tampa frontal .....	48
Figura 33 - Valores de tensão de von Mises com os reforços da tampa frontal.....	48

Figura 34 - Valores de tensão de von Mises com os reforços da tampa traseira.....	49
Figura 35 - Refinamento da malha na região de maiores tensões da tampa frontal .....	49
Figura 36 - Refinamento da Malha na Região de Maiores Tensões da tampa traseira .....	50
Figura 37 - Valores afastados da região de cisalhamento máxima da tampa frontal .....	50
Figura 38 - Valores afastados da região de cisalhamento máxima da tampa traseira .....	51
Figura 39 - Região de deslocamento máximo da tampa frontal .....	51
Figura 40 - Região de deslocamento máximo da tampa traseira.....	52
Figura 41 – Fator de segurança da tampa frontal .....	52
Figura 42 – Fator de segurança da tampa traseira .....	53

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Relação de eixo/carga.....	20
Quadro 2 - Classificação do nível de fricção com a parede .....	21
Quadro 3 - Classificação estrutural .....	22
Quadro 4 - Classificação estrutural .....	24
Quadro 5 - Parâmetros de coeficientes estabelecidos para diferentes pressões .....	25
Quadro 6 - Propriedades mecânicas e composição química do aço ASTM A36.....	26
Quadro 7 - Propriedades mecânicas e composição química do material ASTM-A572 Grau 50 .....	26
Quadro 8 - Propriedades mecânicas e composição química do aço LNE - 380.....	27
Quadro 9 - Características do conjunto rodotrem basculante GUERRA 9351 X 9475 - 35m.	38
Quadro 10 - Validação dos cenários em função do tipo de aço estrutural .....	53
Quadro 11 - Cenários validados com material ASTM A572 Gr50.....	54
Quadro 12 - Melhor resultado referente a cada tipo de material .....	54

## LISTA DE SIGLAS

ANFIR	Associação Nacional de Fabricantes de Implementos Rodoviários
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
CVC	Combinação Veículo De Carga
DENATRAN	Departamento Nacional de Trânsito
FEA	<i>Finite Element Analysis</i>
MEF	Métodos de Elementos finitos
PBTC	Peso Bruto Total Combinado
UCS	Universidade de Caxias do Sul
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>

## LISTA DE SIMBOLOS

$A$	Área da seção transversal do silo
$a$	Aceleração ou desaceleração
$\mu$	Coefficiente de atrito com a parede
$n$	Exponencial da função que ocasiona a variação da pressão de Janssen
$Y_R$	Função que ocasiona a variação da pressão de Janssen
$S_y$	Limite de escoamento [MPa]
$S_{ut}$	Limite de Resistência a Tração [MPa]
$[K]^e$	Matriz de rigidez do elemento de casca
$E$	Módulo de Elasticidade ou Módulo de Young [MPa]
$U$	Perímetro da seção transversal da parede
$P_{ho}$	Pressão assintótica após o enchimento
$p_{dinâmica}$	Pressão dinâmica
$P_{hf}$	Pressão horizontal após o enchimento
$P_{wf}$	Pressão de fricção na parede após o enchimento
$h_o$	Profundidade abaixo da superfície equivalente para silos retangulares
$Z_o$	Profundidade característica de Janssen
$\sigma$	Tensão Normal [MPa]
$\sigma'$	Tensão Equivalente de von Mises [MPa]
$\sigma_1$	Tensão normal ao longo de x [MPa]
$\sigma_2$	Tensão normal ao longo de y [MPa]
$\sigma_3$	Tensão normal ao longo de z [MPa]
$\gamma$	Valor do peso específico do grão
$K$	Valor da razão das pressões laterais
$F$	Vetor de forças nodais
$\{\delta\}$	Vetor de deslocamentos nodais
$V_o$	Velocidade inicial
$V$	Velocidade final
$\Delta x$	Varição da distância final menos a distância inicial

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	15
1.2	OBJETIVOS .....	18
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>18</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>19</b>
2.1	TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGAS NO BRASIL.....	19
2.3	EFEITO DE MATERIAL PARTICULADO EM CAIXAS DE CARGA .....	20
<b>2.3.1</b>	<b>Dimensionamento Analítico da Caixa de Carga e classificação dos Silos .....</b>	<b>21</b>
<b>2.3.2</b>	<b>A norma EN. 1991-4 para silos e tanques.....</b>	<b>23</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Propriedade dos grãos segundo a EN. 1991 – 4.....</b>	<b>23</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Pressão estática normal a parede em silos baixos .....</b>	<b>24</b>
2.4	ESTADO DE TENSÃO DO PRODUTO DENTRO DE UM SILO .....	25
2.5	PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS ESTRUTURAIS .....	26
2.6	CRITÉRIO DE FALHAS DE VON MISES .....	27
2.7	METODO DOS ELEMENTOS FINITOS .....	28
<b>2.7.1</b>	<b>Pré-processamento.....</b>	<b>29</b>
<b>2.7.2</b>	<b>Discretização.....</b>	<b>30</b>
<b>2.7.3</b>	<b>Tipos de Elementos .....</b>	<b>30</b>
<b>2.7.4</b>	<b>Análise Linear .....</b>	<b>32</b>
<b>2.7.5</b>	<b>Processamento .....</b>	<b>33</b>
<b>2.7.6</b>	<b>Pós-Processamento.....</b>	<b>33</b>
<b>2.7.7</b>	<b>Análise dos resultados obtidos .....</b>	<b>34</b>
<b>3</b>	<b>PROPOSTA DE DESENVOLVIMENTO.....</b>	<b>36</b>
3.1	DESCRIÇÃO DAS ETAPAS.....	36
3.2	MATERIAIS E MÉTODOS .....	37
<b>3.2.1</b>	<b>Dimensões e capacidade da tampa frontal e traseira .....</b>	<b>37</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Pré processamento e processamento CAE.....</b>	<b>42</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Pós processamento CAE.....</b>	<b>45</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>46</b>

4.1	ANÁLISE PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	46
4.2	PROPOSTA DE MELHORIA DOS PRODUTOS .....	47
<b>4.2.1</b>	<b>Análise da proposta de melhoria .....</b>	<b>53</b>
4.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	54
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>55</b>
<b>6</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>56</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>57</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O segmento de implementos rodoviários é uma área de extrema importância, pois cada vez mais o transporte de mercadorias e produtos são requisitados com qualidade e segurança, trazendo muitos benefícios na vida das pessoas.

Tanto os reboques e semirreboques, como os implementos sobre o *chassi*, de uma maneira geral, são equipamentos que transportam cargas em vias rodoviárias, tracionadas por um caminhão do tipo cavalo mecânico ou simplesmente transportadas pelos mesmos.

De acordo com a combinação implemento e cavalo mecânico conforme ilustrado na Figura 1, com um semirreboque basculante é possível chegar a 53 toneladas de PBTC (Peso Bruto Total Combinado), e comprimento total inferior a 16 metros, transportando mais carga líquida. Tradicionalmente, o implemento com caixa de carga deslizante é priorizado no transporte de minério devido a sua carga líquida transportada. A operação de basculamento é executada diversas vezes ao dia, sendo que os implementos carregam vários tipos de materiais.

Com base nas tendências nacionais de transporte de carga, visando transportar mais materiais no menor tempo possível, indo em busca de novas tecnologias e consequentemente produtos inovadores, implementos com maior capacidade de carga, com robustez, seguros e de fácil manuseio, vêm impondo às empresas investimentos contínuos em novas tecnologias, com foco em preços competitivos, qualidade e custos reduzidos de manutenção, por motivo de falhas.

Figura 1 - Imagem ilustrativa de uma basculante



Fonte: Rodofortguerra (2023).

Atualmente, o mercado de implementos rodoviários, mais precisamente no segmento de basculantes, vem tendo uma queda de suas vendas, segundo dados da ANFIR (Associação Nacional Fabricantes de Implementos Rodoviários), (2023), na qual houve uma leve queda de veículos emplacados relacionado nos meses de janeiro de 2022 para 2023. Especificamente na linha de reboques e semirreboques, foram emplacados 6.724 veículos em janeiro de 2022 para 6.539 veículos em janeiro de 2023, tendo uma redução nas vendas de 2,75%.

Observou-se que também houve uma evolução nas exportações, passando de 376 veículos emplacados em janeiro de 2022 para 447 veículos emplacados em janeiro de 2023, tendo um acréscimo de 18,88% (ANFIR, 2023).

Também houve um aumento relevante nas vendas de basculantes mais especificamente na linha de carrocerias sobre *chassi*, passando de 645 veículos emplacados no mês de janeiro de 2022 para 807 veículos emplacados no mês de janeiro de 2023, tendo um aumento de 25,12%, mostrando uma perspectiva de crescimento sendo inferior apenas para a linha de tanques aonde houve um aumento de 46,84% (ANFIR, 2023).

Outro dado importante coletado foi durante o primeiro trimestre de 2022 e de 2023, com um leve aumento nas vendas de emplacamento de caminhões basculantes. Na linha de reboques e semirreboques, no primeiro trimestre de 2022, 5.999 veículos foram emplacados, enquanto 6.185 foram emplacados no primeiro trimestre de 2023, correspondendo um aumento de 3,10% (ANFIR, 2023).

Já na linha de carrocerias sobre *chassis*, se observou uma queda considerável de veículos emplacados, comparados nos anos de 2022 para 2023. Foram 65.391 veículos emplacados no ano de 2022, passando para 55.439 emplacados no ano de 2023, tendo um percentual de queda de 15,22% (ANFIR, 2023).

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A linha de implementos de basculantes, tanto de semirreboques com caixas de cargas fixas, como nos de deslizantes, possuem uma ampla aplicação no transporte a granel. Também, estão submetidas às normas de distribuição de carga no implemento e exige distribuição tanto na caixa de carga, como também no caminhão para a linha de deslizantes.

Nos projetos de tampas de basculantes, prever corretamente a durabilidade de componentes estruturais é essencial para a redução de tara e custos no produto final. No entanto, essa previsão é complicada e complexa, pois há parâmetros que não estão sob controle

do projetista, como por exemplo: as intempéries características de cada região, o excesso de carga e vibrações vindas de terrenos irregulares, acarretando a fadiga dos materiais.

Conforme descrito anteriormente, a tampa frontal da basculante, conforme a Figura 2, é composta por chapas estruturais, responsável pela sustentação da carga durante o transporte, seguindo as normas que regem a distribuição de carga do implemento. Já na tampa traseira do implemento, conforme a Figura 3, a mesma é composta por chapas estruturais e também por possuir dois sistemas de fixação com rotação devido ao acoplamento da tampa na caixa de carga, dando a sustentação necessária para a aplicação do produto durante a sua utilização.

Figura 2 - Tampa frontal soldada no implemento



Fonte: Rodofortguerra (2023).

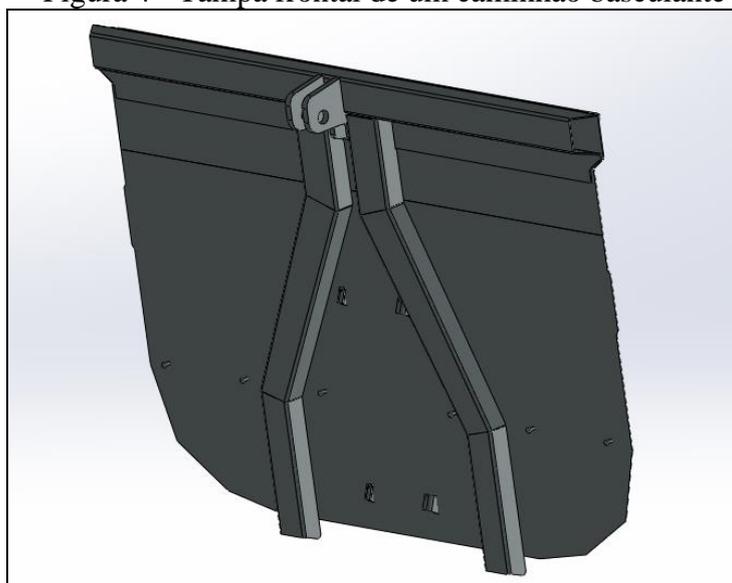
Figura 3 - Tampa traseira de um caminhão basculante



Fonte: Rodofortguerra (2023).

De acordo com a avaliação inicial, é possível supor, conforme a Figura 4, que a configuração de tampa frontal possui regiões críticas de concentração de tensões devido ao processo de fabricação, na região superior da tampa, na qual é acoplado o cilindro hidráulico e ao entorno dos reforços centrais.

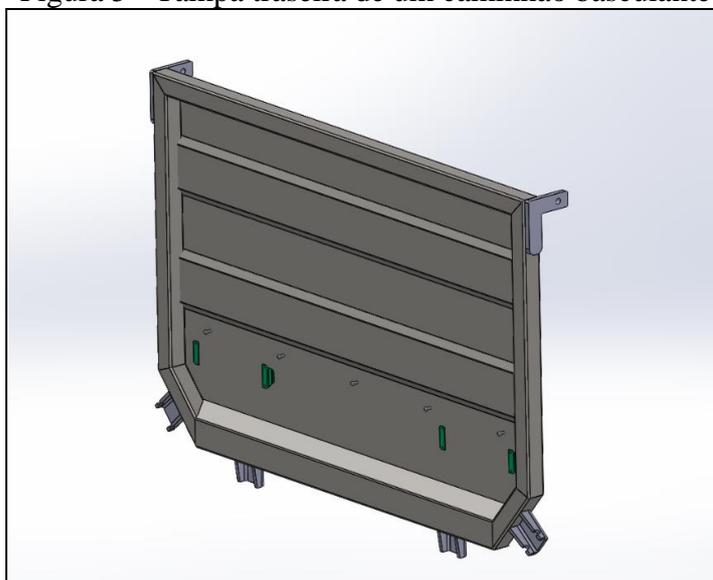
Figura 4 - Tampa frontal de um caminhão basculante



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Já na tampa traseira do implemento, como ilustrada na Figura 5, é possível supor que a região de fixação, nas extremidades, tem pontos críticos de tensão, possivelmente no processo de descarga, como também no transporte de cargas.

Figura 5 - Tampa traseira de um caminhão basculante



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Em vista ao projeto, o presente trabalho se justifica no sentido de obter uma redução de massa dos produtos das tampas frontal e traseira aplicados em um caminhão basculante, com o intuito de reduzir custos de matéria prima.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Realizar a análise estrutural das tampas frontal e traseira de um caminhão basculante e propor melhorias.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Os seguintes objetivos específicos fazem parte desse trabalho:

- definir os carregamentos aos quais as tampas frontal e traseira poderão ser submetidas;
- determinar regiões críticas de projeto pelo método dos elementos finitos;
- propor melhorias estruturais nas tampas frontal e traseira, com base na análise pelo método dos elementos finitos;
- obter redução de massa de matéria-prima das tampas frontal e traseira de um caminhão basculante;

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

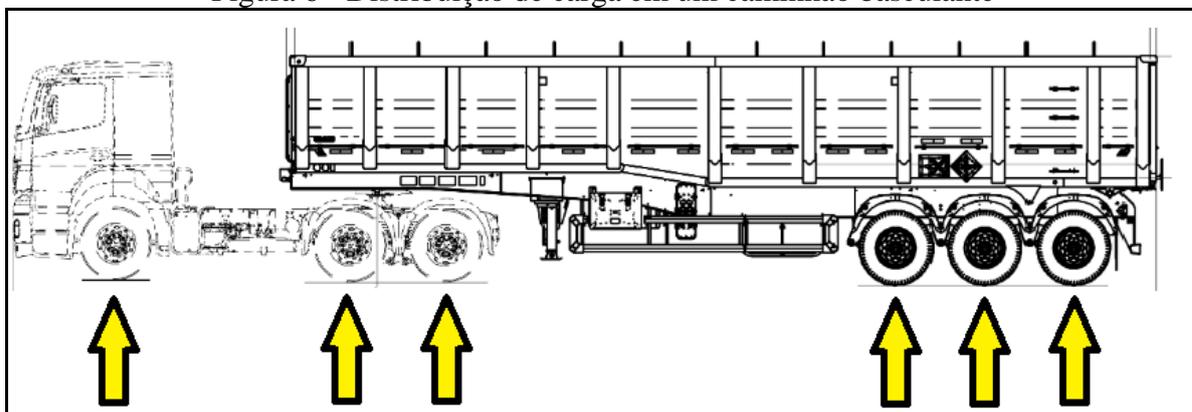
A revisão bibliográfica tem como objetivo abordar os principais conceitos para o desenvolvimento deste trabalho, comprovando assim através da literatura, a aplicabilidade do estudo proposto.

### 2.1 TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGAS NO BRASIL

A legislação direciona os modelos de CVC (Combinação Veículo de Carga), que predominam sobre determinadas épocas, na qual se experimenta cavalos tractor 4x2 com semirreboque de três eixos, bitrens tracionados por veículos 6x2, até bitrens e rodo trens acoplados a caminhão 6x4.

Um exemplo de combinação de veículo de carga, segundo a Figura 6, é constituído de cavalo tractor de três eixos mais semirreboque de três eixos, podendo atingir, segundo a Resolução 210/06 do CONTRAN (Conselho Nacional de Trânsito), no máximo 48,5 toneladas de PBTC. Isto gera uma carga líquida de aproximadamente 32 toneladas, sendo que o veículo de carga é quem recebe a maior parte da carga na distribuição legal.

Figura 6 - Distribuição de carga em um caminhão basculante

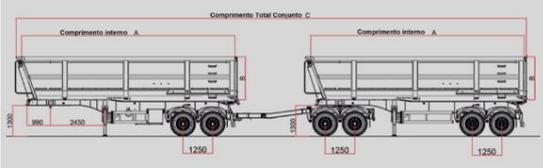
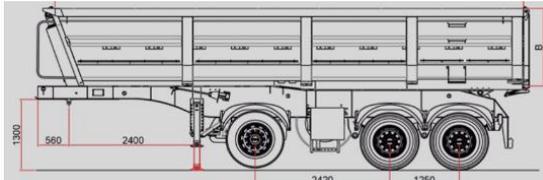


Fonte: Adaptado de Noma do Brasil (2022).

Quanto a suspensão do implemento e de acordo com a necessidade do cliente, este pode escolher por várias configurações diferentes, sendo que as principais são as quatro descritas conforme o Quadro 1. Podem ser três eixos juntos, dois eixos juntos e um distanciado, bem como três eixos distanciados, e a configuração rodotrem basculante de 6x4, sendo que esta última configuração possibilita alcançar 74 toneladas de PBTC, variando

também sua carga líquida transportada. A opção dos eixos 6x4 será avaliada no desenvolvimento deste trabalho.

Quadro 1 - Relação de eixo/carga

Descrição	Combinação de eixos	Carga líquida	PBTC
Rodotrem basculante GUERRA 2E + DL C/ 5ª RODA - (Graneleiro)		48300 kg	74000 kg
Semirreboque basculante graneleiro 3 eixos separados (Graneleiro)		35000 kg	50000 kg
Semirreboque basculante graneleiro 3 eixos SR BA GR - 3E - (Graneleiro)		31000 kg	50000 kg
Semirreboque basculante graneleiro SR BA AB - 3E (1+2)		25000 kg	43000 kg

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Segundo a Portaria 63/09 do DENATRAN (Departamento Nacional de Trânsito), atualmente estabelece à formação de PBTC (Peso bruto total combinado) distintos e conseqüentemente a capacidade de carga transportada proporcional de acordo com a escolha das mesmas CVC (Combinação Veículo de Carga). Essas variações são obtidas pela alteração de eixos, tanto da unidade tratora quanto da tracionada pelo número de unidades tracionadas, comprimentos, etc.

### 2.3 EFEITO DE MATERIAL PARTICULADO EM CAIXAS DE CARGA

Para Kock (2018), o cálculo das pressões, é necessário o conhecimento das propriedades dos grãos ou dos produtos que serão acomodados ou transportados, no caso de semirreboques, a norma fornece uma Tabela com valores médios. Porém, para uma maior assertividade, recomenda-se realizarem-se testes para os produtos, procedimentos estes descritos na norma.

No dimensionamento o valor do coeficiente de atrito relacionado com a parede de um determinado sólido particulado está relacionado com a superfície da parede na qual ele desliza. A classificação quanto ao tipo de parede aproximada com sua classificação pode ser observada no Quadro 2.

Quadro 2 - Classificação do nível de fricção com a parede

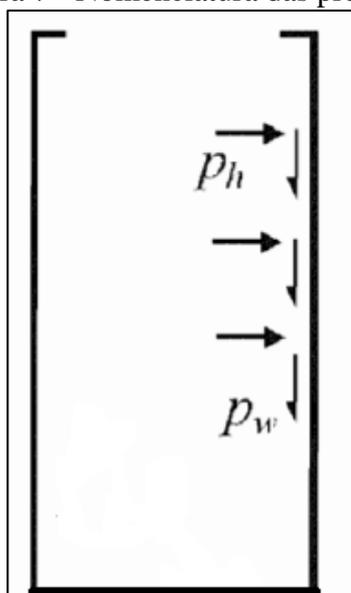
<b>Categoria</b>	<b>Descrição</b>	<b>Materiais típicos da parede</b>
D1	FRICÇÃO BAIXA	Aços inoxidáveis e laminados a frio, superfície projetada para baixa fricção, Alumínio polido de alto peso molecular
D2	FRICÇÃO MODERADA	Aço carbono liso (construção soldada ou aparafusada), aço inoxidável sem acabamento, alumínio oxidado.
D3	FRICÇÃO ALTA	Concreto, aço carbono (corroído), aço resistente à abrasão e cerâmica.

Fonte: Adaptado de BS EN 1991-4 (2006).

### 2.3.1 Dimensionamento Analítico da Caixa de Carga e classificação dos Silos

Para o dimensionamento de um silo ou semirreboque, necessita-se do conhecimento das pressões e de como elas se distribuem ao longo da parede conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - Nomenclatura das pressões



Fonte: Adaptado de BS EN 1991 – 4 (2006).

Os silos podem ser especificados de acordo com o Quadro 3, com a sua capacidade e características especiais que devem ser consideradas como a excentricidade onde a tremonha

que direciona o fluxo do material, pode ou não, ser excêntrica com o formato do silo. A classe 3, por exemplo, segundo Madrona (2008), exige que sejam feitos testes experimentais para a determinação das propriedades dos materiais, restringindo então o uso dos valores Tabelados na norma.

Como nenhum semirreboque pode ter capacidade maior que a Classe 1 e tendo que a excentricidade de carregamento não pode ser diretamente comparada, o mesmo se enquadra na Classe 1.

Quadro 3 - Classificação estrutural

Descrição	Classe
Silos com capacidade menor que 100 toneladas	1
Nenhuma outra classe	2
Silos com capacidade acima de 10000 toneladas. Silos com capacidade acima de 1000 e excentricidade de carregamento > 0,25 Silos baixos com excentricidade de carregamento >25	3

Fonte: Adaptado de BS EN 1991 – 4 (2006).

Em estruturas de Classe 1, para silos com capacidade menor que 100 toneladas e com seu nível de esbeltez classificando-o como silo baixo, de acordo com o projeto em estudo, utiliza-se as equações presentes na norma para o cálculo das pressões segundo teoria de Janssen.

A pressão horizontal ( $P_{hf}$ ) é dada, utilizando-se as Equações 01 a 07:

$$P_{hf} = P_{ho} \cdot Y_R \quad (01)$$

$$P_{ho} = \gamma \cdot K Z_0 \quad (02)$$

$$Y_R = \left( 1 - \left\{ \left( \frac{z-ho}{z_0-ho} \right) + 1 \right\}^n + 1 \right) \quad (03)$$

$$Z_0 = \frac{1}{K \cdot \mu} \cdot \frac{A}{U} \quad (04)$$

$$\frac{A}{U} = \frac{\binom{b}{2}}{(1+b/2)} \quad (05)$$

$$n = -(1 + \tan \phi_r) \cdot \left( 1 - ho/z_0 \right) \quad (06)$$

$$ho = \frac{dc}{4} \cdot \tan \phi_r \quad (07)$$

Onde:  $P_{hf}$  é a pressão horizontal após o enchimento;

$P_{ho}$  é a pressão assintótica após o enchimento;

$z_0$  é a profundidade característica de Janssen;

$A$  é a área da seção transversal do silo;

$U$  é o perímetro da seção transversal da parede;

$n$  é a exponencial da função  $Y_r$

$Y_R$  é a função que ocasiona a variação da pressão de Janssen;

$\gamma$  o valor do peso específico do grão;

$K$  o valor da razão das pressões laterais;

$h_o$  é a profundidade abaixo da superfície equivalente para silos retangulares;

$\mu$  o coeficiente de atrito com a parede;

O valor da pressão de fricção ( $P_{wf}$ ) na parede pode ser descrito conforme a Equação 08.

$$P_{wf} = \mu \cdot P_{hf} \quad (08)$$

onde:  $P_{wf}$  é a pressão de fricção na parede após o enchimento.

### 2.3.2 A norma EN. 1991-4 para silos e tanques

A norma EN 1991-4, 2006, criada em 2005 pelo Comitê Europeu de Normalização (CEN) é uma das mais utilizadas por Engenheiros no desenvolvimento de silos. A mesma dispõe de valores para pressões causados por grãos para carregamento e descarregamento de silos, valores estes maiores se comparados com outras normas, o que aumenta a segurança. A norma é baseada na teoria de Janssen publicada em 1895, estática e com valores de sobre pressão para o fluxo (KOCK, 2018).

### 2.3.3 Propriedade dos grãos segundo a EN. 1991 – 4

Durante a sua vida útil, um silo passa por uma série de etapas de enchimento, armazenamento e descarga, com conseqüente variação de pressões com o tempo. Para o projeto estrutural de um silo ou semirreboque, deve-se conhecer todas as informações necessárias sobre os produtos a serem armazenados. Quanto as especificações médias dos

produtos armazenados, segundo Madrona (2008), a norma recomenda sempre realizar testes com os produtos que serão utilizados para armazenamento, com finalidade de maior precisão na obtenção das particularidades do granel, os ensaios utilizados e um padrão são mencionados na seção 2.7, e maiores detalhes para a obtenção destes, são verificados na norma (BS EN 1991-4, 2006).

De acordo com a norma, ela apresenta valores médios para diversos produtos que são utilizados com frequência em silos. Para o cálculo das pressões, é necessário o conhecimento das propriedades dos grãos que serão armazenados ou transportados, no caso de semirreboques, a norma fornece uma Tabela com valores médios (KOCK, 2018). As propriedades dos produtos mais utilizados do transporte por semirreboque estão descritas no Quadro 4.

Quadro 4 - Classificação estrutural

PROPRIEDADE DOS MATERIAIS									
PRODUTO	PESO ESPECÍFICO $\gamma$		ÂNGULO DE REPOUSO $\phi_r$	ÂNGULO DE ATRITO INTERNO $\phi_i$		RELAÇÃO DAS PRESSÕES LATERAIS K		COEFICIENTE DE ATRITO COM A PAREDE $\mu$	
	INFERIOR	SUPERIOR		MÉDIO	FATOR	MÉDIO	FATOR	MÉDIO	FATOR
	kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>	GRAUS	Graus	-	-	-	D2	-
MILHO	7	8	35	31	1,14	0,53	1,14	0,36	1,24
SOJA	7	8	29	25	1,16	0,63	1,11	0,38	1,16
FARINHA	6,5	7	45	42	1,06	0,36	1,11	0,33	1,16

Fonte: Adaptado de BS EN 1991 – 4 (2006).

### 2.3.4 Pressão estática normal a parede em silos baixos

Durante a realização dos cálculos das pressões, segundo Madrona (2008), é sempre desejável prever as piores condições de pressão que o silo ou semirreboque esteja sujeito durante a sua vida útil. As condições de processo de armazenamento não conseguem ser controladas como nos ensaios de laboratório, desta forma a maioria das normas internacionais utilizam faixas de variação definindo limites superior e inferior das propriedades dos produtos em questão. Pré-estabelecer um limite superior e inferior é importante para que se possa encontrar as maiores solicitações sobre a estrutura. Para os cálculos da solicitação, deve ser utilizado o valor apropriado das propriedades físicas de acordo com o Quadro 5.

Quadro 5 - Parâmetros de coeficientes estabelecidos para diferentes pressões

OBJETIVO	COEFICIENTE DE ATRITO NA PAREDE ( $\mu$ )	PARAMETROS $K$ E $K'$	ÂNGULO DE ATRITO INTERIOR ( $\theta_i$ )
Máxima pressão horizontal na parede vertical	Inferior	Superior	Inferior
Máxima pressão de atrito na parede vertical	Superior	Superior	Inferior
Máxima pressão vertical	Inferior	Inferior	Superior

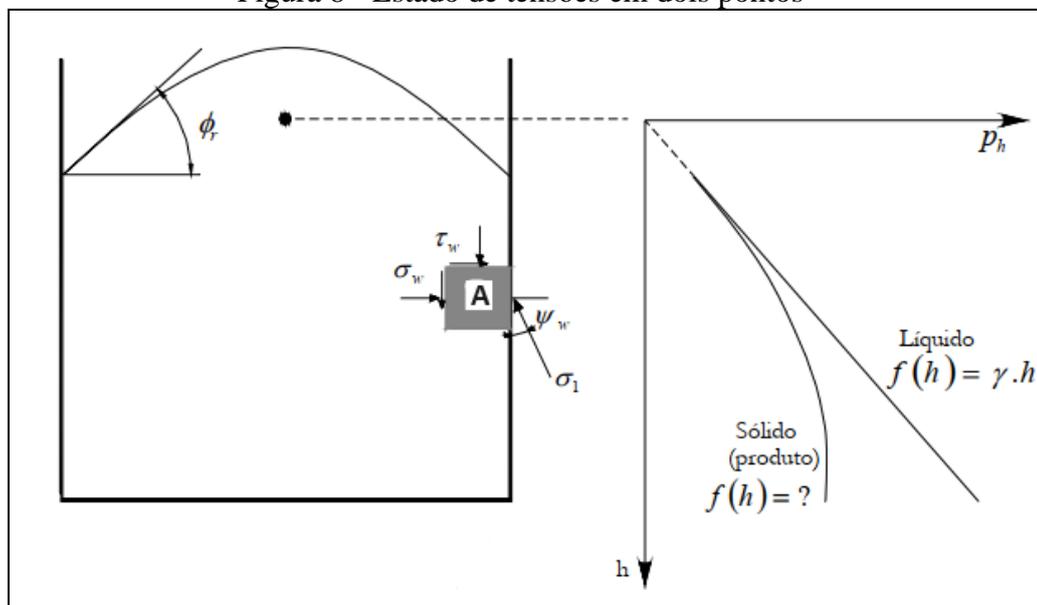
Fonte: Adaptado de BS EN 1991-4 (2006).

## 2.4 ESTADO DE TENSÃO DO PRODUTO DENTRO DE UM SILO

A transmissão de pressões criadas dentro de um silo depende do material do produto, fluidos e sólidos transmitem pressões de formas diferentes. Em fluidos, a pressão em qualquer ponto é igual em todas as direções, e não apresentam cisalhamento. Os materiais granulares são chamados de semifluidos, os quais não se comportam como sólidos e nem como fluidos, são compressíveis de acordo com as características do material a granel e outros fatores.

No ponto A (Figura 8), onde o produto está em contato com a parede do silo, existe um ângulo de atrito com a parede, onde uma força de atrito é exercida no produto, diferenciando as pressões atuantes (CHEUNG, 2007).

Figura 8 - Estado de tensões em dois pontos



Fonte: Adaptado de Cheung (2007).

## 2.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS ESTRUTURAIS

O aço ASTM A36 (ou MR 250), é classificado, segundo Pannoni (2002), como um aço carbono de média resistência mecânica. É um material largamente utilizado em diversos setores da indústria metalmeccânica e construção civil, o qual possui uma boa soldabilidade e uma média resistência mecânica.

Chapas e perfis estruturais são aplicados em componentes estruturais em vários setores, como: estruturas metálicas em geral, máquinas e equipamentos de indústrias, passarelas e implementos agrícolas, além de implementos rodoviários que sofrem vibrações. Através do Quadro 6 podem ser visualizadas as propriedades mecânicas e composição química do aço ASTM A36.

Quadro 6 - Propriedades mecânicas e composição química do aço ASTM A36

PROPRIEDADES MECÂNICAS		COMPOSIÇÃO QUÍMICA	
LIMITE DE RESIST. À TRAÇÃO	400-550 MPa	CARBONO (C)	0,25 - 0,29%
LIMITE DE ESCOAMENTO	250 MPa	COBRE (Cu)	0,2 %
ALONGAMENTO	20% (em 200 mm)	FERRO (Fe)	98 %
	23% (em 50 mm)	MANGANÊS (Mn)	1,03 %
MÓDULO DE ELASTICIDADE (E)	200 GPa	FÓSFORO (P)	≤0,04 %
COEFICIENTE DE POISSON	0,26	SILÍCIO (Si)	0,28 %
MÓDULO DE RIGIDEZ (G)	79,3 GPa	ENXOFRE (S)	≤ 0,05 %

Fonte: Adaptado de Matweb (2022).

Já para o ASTM A-572 Grau 50 (um aço-carbono microligado de alta resistência mecânica), de acordo com Pannoni (2002), apresenta maior resistência mecânica que os aços de mesmo teor de carbono, atendendo a ductilidade e a soldabilidade, e são aplicados em estruturas soldadas. O Quadro 7 ilustra propriedades mecânicas e composição química deste aço.

Quadro 7 - Propriedades mecânicas e composição química do material ASTM-A572 Grau 50

PROPRIEDADES MECÂNICAS		COMPOSIÇÃO QUÍMICA	
LIMITE DE RESIST. A TRAÇÃO	450 MPa	CARBONO (C)	≤ 0,23 %
LIMITE DE ESCOAMENTO	345 MPa	FERRO (Fe)	98 %
ALONGAMENTO	18% (em 200 mm)	MANGANÊS (Mn)	1,35 %
	21% (em 50 mm)	FÓSFORO (P)	≤ 0,04 %
MÓDULO DE ELASTICIDADE (E)	200 GPa	SILÍCIO (Si)	≤ 0,40 %
COEFICIENTE DE POISSON	0,29	ENXOFRE (S)	≤ 0,05 %

Fonte: Adaptado de Matweb (2022).

O material LNE 380, de acordo com Frees (2017), é um aço de qualidade estrutural com tensão mínima de escoamento superior a 200 MPa e com atributos bastante adequadas quanto a conformabilidade e soldabilidade. Também possui grande possibilidade de utilização em componentes automotivos, na qual os processos de dobramentos são necessários.

De acordo com suas características, são aços que apresentam boa resistência a fadiga e um excelente desempenho para conformação a frio, sendo submetido à estampagem moderada. As chapas laminadas a quente do aço LNE 380, conforme suas propriedades mecânicas ilustradas no Quadro 8, são utilizadas na fabricação de diversos produtos, como por exemplo: longarinas, equipamentos rodoviários, implementos e máquinas agrícolas, além de chassis, travessas, guindastes, entre outros.

Quadro 8 - Propriedades mecânicas e composição química do aço LNE - 380

PROPRIEDADES MECÂNICAS		COMPOSIÇÃO QUÍMICA	
LIMITE DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO	460 - 600 MPa	CARBONO (C)	0,12 %
LIMITE DE ESCOAMENTO	380 - 530 MPa	ALUMÍNIO (Al)	≥ 0,010%
ALONGAMENTO	20% (em 200mm)	NIÓBIO (Nb)	0,04 %
	23% (em 50 mm)	MANGANÊS (Mn)	1,10 %
MÓDULO DE ELASTICIDADE (E)	210 GPa	FÓSFORO (P)	0,015 %
		SILÍCIO (Si)	0,35 %
		ENXOFRE (S)	0,03 %
		TITÂNIO (Ti)	≥ 0,02 %

Fonte: Adaptado de Usiminas (2022).

## 2.6 CRITÉRIO DE FALHAS DE VON MISES

De acordo com Norton (2013) é apropriado, em situações envolvendo tensões combinadas normal e de cisalhamento no mesmo ponto, definir uma tensão equivalente que possa ser usada para representar a combinação de tensões.

A utilização da teoria da máxima energia de distorção é um bom meio para fazê-lo para materiais dúcteis. A tensão equivalente de von Mises  $\sigma'$  é definida como a tensão de tração uniaxial que criaria a mesma energia de distorção que é criada pela combinação atual das tensões aplicadas. Esse procedimento permite tratar casos de tensão multiaxial combinada a tensões de cisalhamento como se fossem devidos a um carregamento de tração pura. A tensão equivalente de von Mises é encontrada através da Equação (9), considerando as três tensões principais ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ).

$$\sigma' = \frac{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}}{2} \quad (09)$$

A condição de escoamento através da Teoria da Máxima Energia de Distorção, define que a tensão equivalente  $\sigma'$  tem que ser maior que o limite de escoamento do material  $S_y$ , sendo escrita de acordo com a Equação (10).

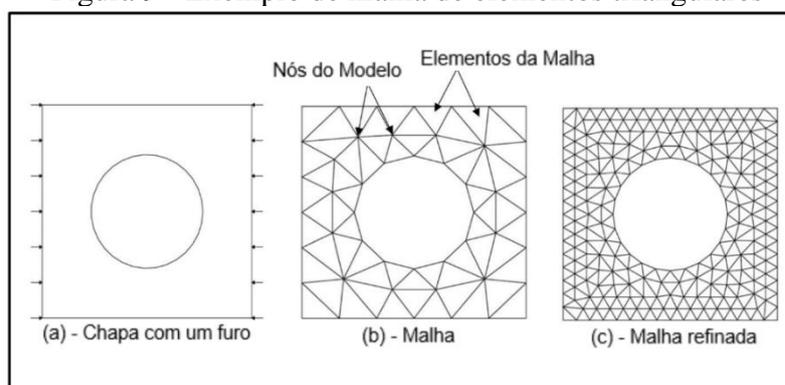
$$\sigma' \geq S_y \quad (10)$$

sendo que  $\sigma'$  é a tensão equivalente de von Mises e  $S_y$  é o limite de escoamento do material.

## 2.7 METODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O método de análise dos elementos finitos, segundo Fish e Belytschko (2009), basicamente é dividir o corpo em elementos conectados por nós, e obter uma solução aproximada. Conforme a Figura 9, observa-se a malha de elementos finitos e o processo para a sua construção é conhecido como geração da malha.

Figura 9 - Exemplo de malha de elementos triangulares



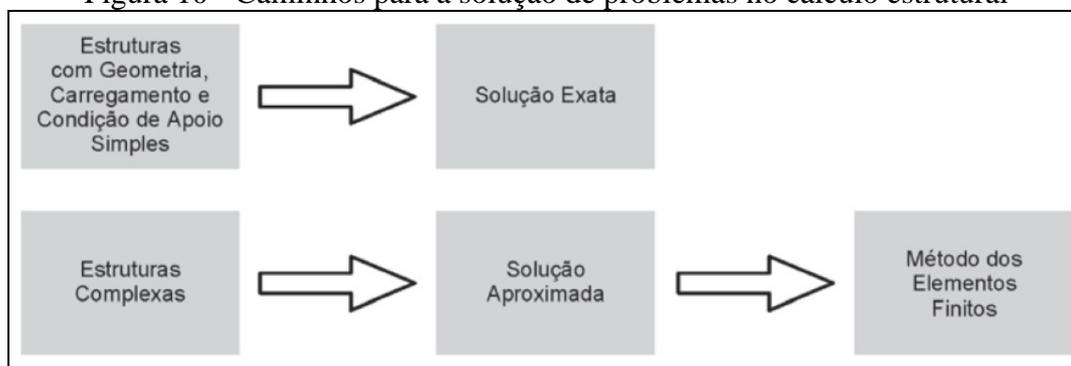
Fonte: Adaptado de Fish e Belytschko (2009).

Ao dar início a um processo de cálculo da estrutura, objeto de análise, o engenheiro deve formular um esquema para essa estrutura, ou seja, um modelo de cálculo, em que a estrutura é idealizada de tal maneira que se possa analisá-la. De acordo com os estudos realizados, Alves Filho (2009) explica que os métodos analíticos clássicos possibilitam o cálculo da resposta exata dos deslocamentos, deformações e tensões em uma estrutura por toda região de seus pontos, ou seja, nos seus infinitos pontos, porém essas soluções são desconhecidas para a maioria das aplicações usuais, em vista da complexidade geométrica.

Porém, através de procedimentos aproximados, que pudessem ser aplicados de uma maneira geral, indiferente da forma da estrutura e da condição de carregamento, dentro da

precisão aceitável do problema de engenharia, mostra que através do foco central do estudo dará origem ao método de elementos finitos, exemplificado na Figura 10.

Figura 10 - Caminhos para a solução de problemas no cálculo estrutural



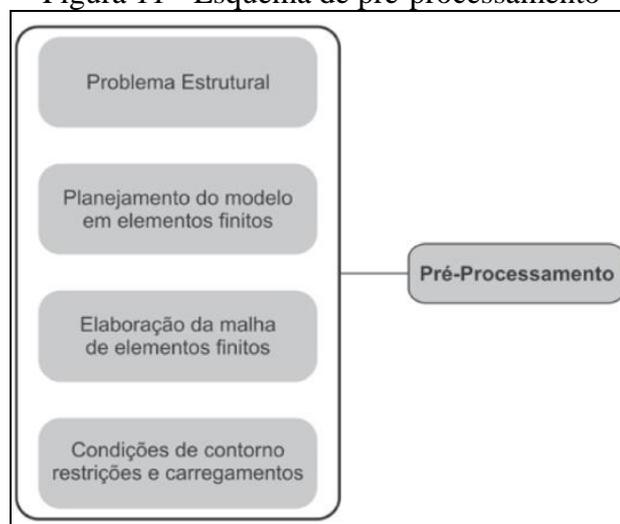
Fonte: Alves Filho (2009).

### 2.7.1 Pré-processamento

Como caracterizam Chandrupatla e Belegundu (2014), o pré-processamento abrange a preparação de dados como coordenadas nodais, conectividade, condições de contorno e informações de carregamento e material. O estágio de processamento, por sua vez, inclui geração de rigidez, modificação da rigidez e solução das equações, resultando na avaliação das variáveis nodais.

Também, de acordo com Alves Filho (2009), o pré-processamento consiste em montar o modelo discretizado da estrutura e, no mesmo, aplicar as condições de contorno, conforme exemplificado na Figura 11.

Figura 11 - Esquema de pré-processamento



Fonte: Alves Filho (2009).

### 2.7.2 Discretização

A ideia da discretização de um sistema contínuo, segundo Alves Filho (2009), considera-se a divisão da estrutura em partes separadas distintas, conectadas entre si nos pontos discretos. O modo como a estrutura se comporta entre os nós do modelo depende das propriedades atribuídas ao elemento escolhido, que representa aquele trecho da estrutura entre os nós.

Assim, a partir do conhecimento dos deslocamentos dos nós, pode-se calcular o comportamento interno de cada elemento. Quanto mais bem especificado for esse comportamento interno, mais a resposta do modelo se aproxima do comportamento real da estrutura. Ou seja, o elemento discreto que representa um dado trecho da estrutura entre os nós deve ser muito bem definido. Esta é a questão mais importante na definição dos elementos finitos (ALVES FILHO, 2009).

De acordo com Souza (2003), a precisão das soluções obtidas através da análise de elementos finitos está relacionada com a quantidade, tamanho e tipo dos elementos que compõem a malha, formada pela união dos nós do modelo. O autor ainda alega que, apesar de se tratar de um método com solução aproximada, quanto menor o tamanho dos elementos (tendendo a zero), e maior for a quantidade deles (tendendo ao infinito), o resultado aproxima-se de uma solução exata.

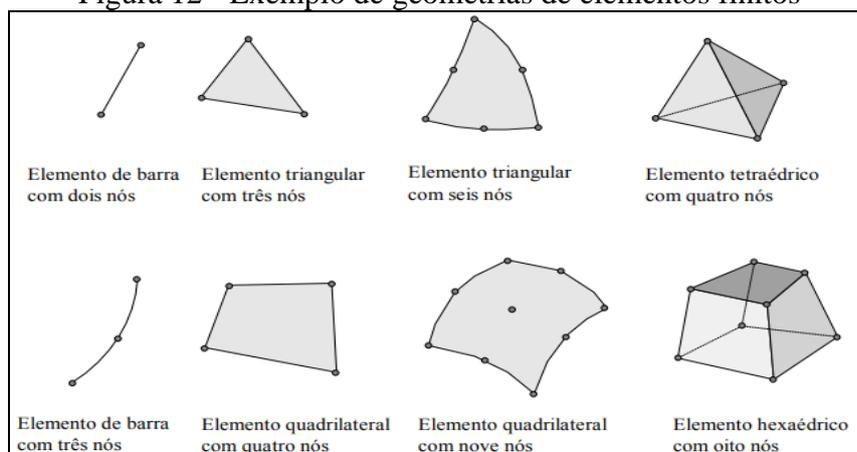
### 2.7.3 Tipos de Elementos

Diversos tipos de elementos finitos já foram desenvolvidos, segundo Souza (2003). Estes possuem diversas geometrias (por exemplo, triangular, quadrilateral, cúbico, etc.) devido ao tipo e da dimensão do problema (se uni, bi ou tridimensional). A Figura 12 apresenta a geometria de vários tipos de elementos finitos.

Também, segundo Brezolin (2013), os tipos de elementos normalmente usados para a discretização de um modelo são os elementos do tipo barra, o elemento do tipo casca e os modelos sólidos, na qual os principais softwares de elementos finitos utilizam hoje para realização de suas análises.

Em casos de estrutura metálica de espessura fina, o tipo de elemento finito usado é o de casca, que segundo Castilhos (2011), é aplicado quando há superposição de comportamentos físicos. Sendo assim, a força que age no plano médio da espessura só depende de seu correspondente deslocamento.

Figura 12 - Exemplo de geometrias de elementos finitos



Fonte: Souza (2003).

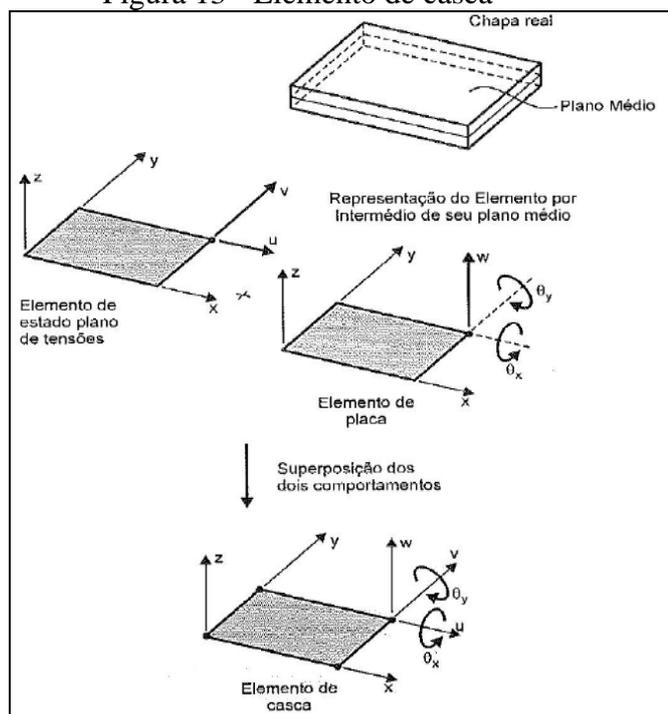
Portanto, segundo Alves Filho (2009), a definição da matriz de rigidez do elemento de casca segue a formulação da montagem do elemento de viga, ou seja, no caso da viga, contém os termos das matrizes da treliça, que apresentam apenas rigidez axial e o dela mesma que possui somente rigidez à flexão, considerada uma montagem de matrizes independentes conforme ilustrado na Figura 13.

A formulação do elemento, segundo Castilhos (2011), que simula o comportamento físico de flexão na chapa, associado à atuação das forças atuantes no plano médio da mesma, estão associados aos componentes de rigidez que este elemento apresenta. A matriz de rigidez deste elemento é definida pela rigidez à atuação de forças agindo paralelamente ao plano médio e a rigidez à ação das cargas laterais, podendo ser visualizada na Equação 11.

$$f = [K]^e \cdot \{\delta\} \quad (11)$$

Sendo  $f$  o vetor de forças nodais,  $[K]^e$  a matriz de rigidez do elemento de casca e  $\{\delta\}$  o vetor de deslocamentos nodais.

Figura 13 - Elemento de casca



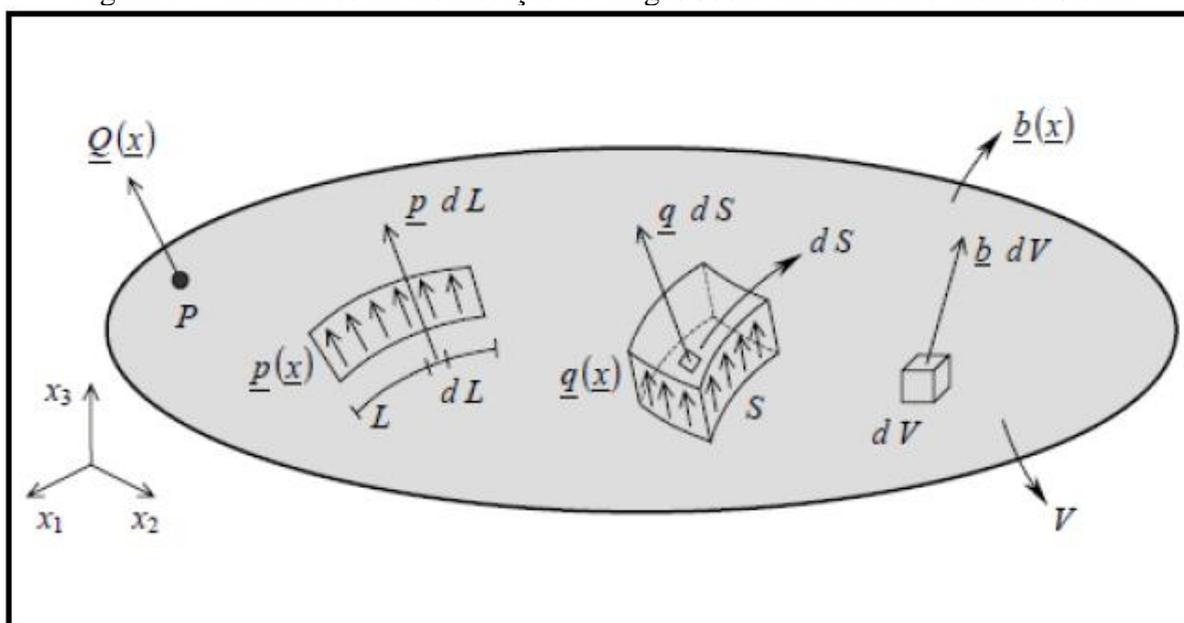
Fonte: Alves Filho (2009).

#### 2.7.4 Análise Linear

Segundo Budynas e Nisbett (2016), em uma simulação, é fundamental que as condições de contorno do problema sejam analisadas com cuidado. Com uma análise inicial de restrições não apropriadas, é possível que os resultados da simulação gerem deformações ou valores de tensões divergentes ao que se atenderia na realidade. Dessa forma, recomenda-se o teste de diferentes análises em relação às restrições do modelo e, em casos de maior complexidade, analisar diferentes condições, impondo limites de comportamento a partir delas.

De uma maneira geral, pode-se representar um corpo tridimensional submetido às mais variadas cargas, como mostrado na Figura 14. Nessa Figura,  $q(x)$  representa uma força distribuída numa superfície  $S$ , já  $Q(x)$  representa uma força genérica, no ponto  $P$ ; para  $p(x)$ , tem-se uma carga distribuída ao longo de uma linha  $L$ ; e por fim  $b(x)$ , que é uma carga que atua em um volume  $V$  (AZEVEDO, 2003). Quaisquer forças ou momentos são estabelecidos a partir de coordenadas de um plano cartesiano.

Figura 14 - Elementos na distribuição de cargas sobre um elemento tridimensional



Fonte: Azevedo (2003).

### 2.7.5 Processamento

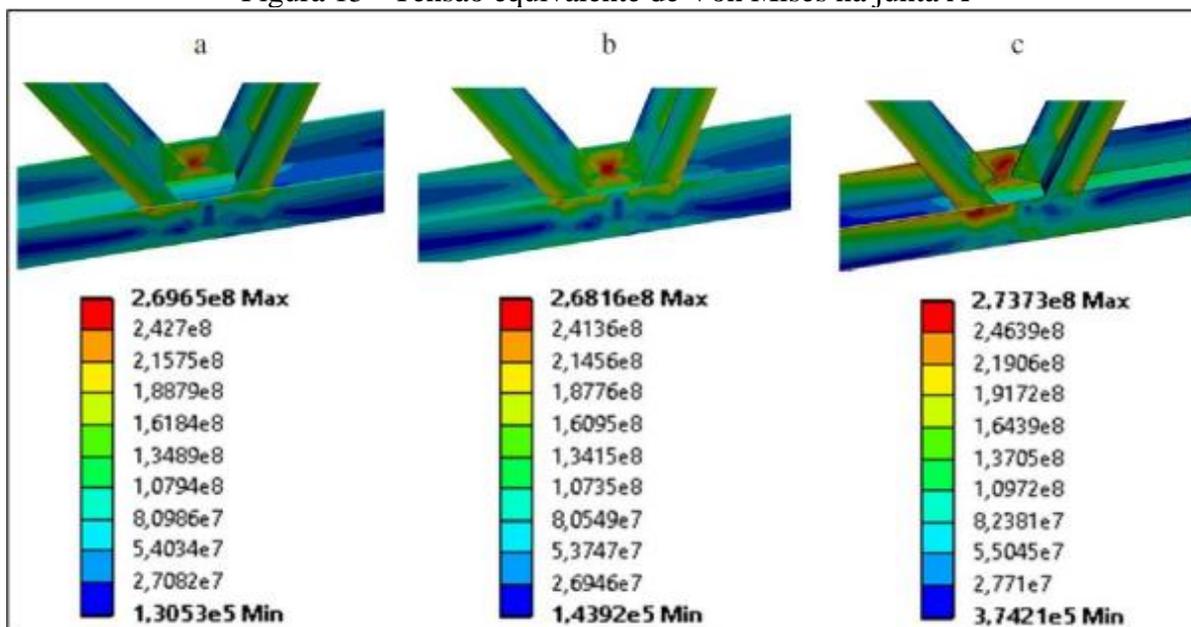
De acordo com Alves Filho (2009), é na parte de processamento em que são realizados os cálculos matriciais para a definição de deslocamentos, reações de apoio e forças internas nos elementos. São construídas as matrizes com os aspectos dos elementos baseado nas equações da estrutura. Conseqüentemente, os resultados das equações de equilíbrio do sistema, e as soluções das tensões e deslocamentos da análise são geradas pelos *softwares* CAE, responsáveis por todo o processamento.

Sendo assim, os campos de deslocamento são calculados de acordo com os campos de tensão de acordo com as relações tensão deformação (Lei de Hooke) e as junções de tensões e deslocamento.

### 2.7.6 Pós-Processamento

Nessa etapa, o engenheiro deve analisar e validar os resultados de tensões e deformações resultantes do processamento. A Figura 15, exibe os resultados das distribuições de tensões equivalentes de Von Mises obtidas do *software*, ao longo de uma estrutura metálica.

Figura 15 - Tensão equivalente de Von Mises na junta A



Fonte: Adaptado de Rancan (2015).

É também no pós-processamento que se obtém os valores de deslocamentos da estrutura, ocasionados pelas condições de contorno do problema de maneira similar. De acordo com Hearn (1997), apesar dos resultados tiverem algumas casas decimais de precisão, o Engenheiro deve estar ciente de que esses resultados encontrados são aproximados, e que existem muitas fontes de prováveis erros que tem potencial de ocorrer. Com isso, os seguintes cuidados devem ser tomados:

- checar se as direções das linhas de tensões estão em concordância com as condições de contorno;
- checar a suavidade das linhas de tensão, pois irregularidades podem indicar uma malha inadequada;
- checar as condições de equilíbrio se foram atendidas;
- verificar visualmente a geometria deformada, para garantir que o modelo tenha conduzido de maneira esperada;
- garantir de que nenhuma mensagem de erro seja informada pelo *software*.

### 2.7.7 Análise dos resultados obtidos

De acordo com Cury (2018), os critérios ideais para definir as tensões e deformações sempre devem ser realizadas de acordo com a função de certas propriedades do material. Entretanto os valores não devem ser apenas encontrados, mas sim analisá-los e confrontá-los

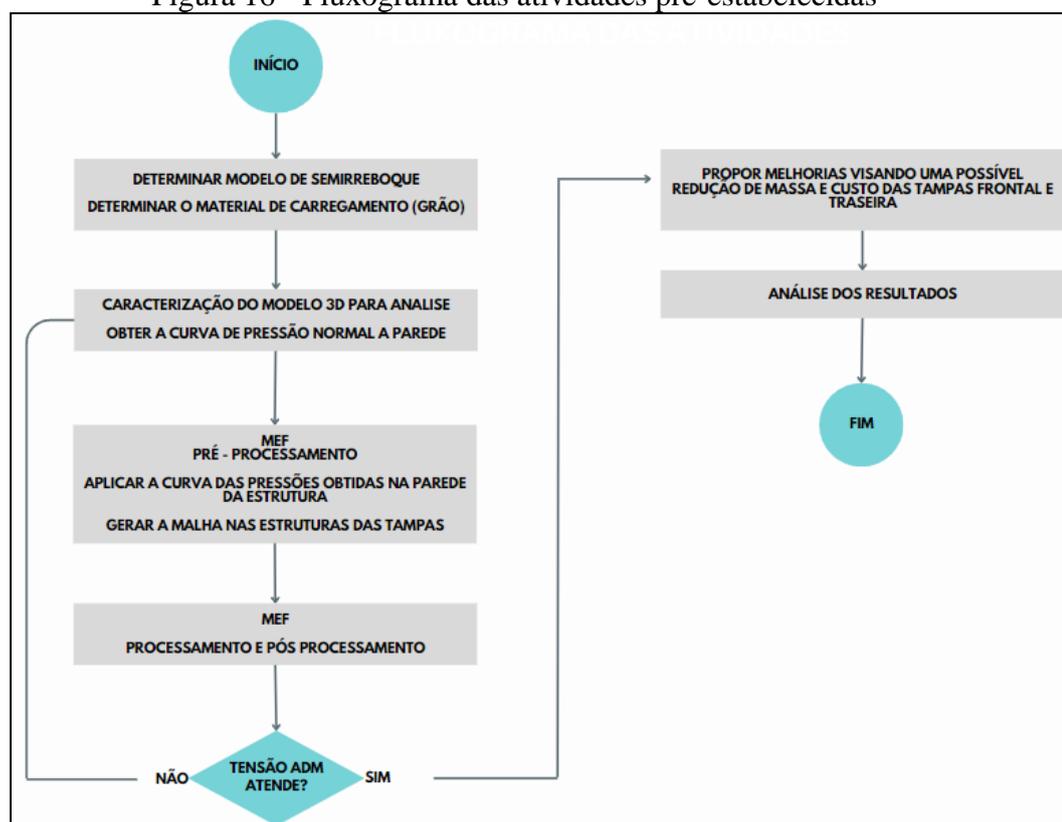
com tais limites pré-estabelecidos, e verificar o estado do material em que se encontra logo após as demandas que venham a sofrer.

Desta forma, para se obter uma análise correta, é necessário que se identifiquem os valores de tensão e deformação que levarão o material a falhar (romper ou escoar, por exemplo), em determinada situação e, além disso, determinar um critério de falha específico para cada situação.

### 3 PROPOSTA DE DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados para a análise das pressões exercidas pela carga na tampa frontal e traseira de um semirreboque basculante, bem como as etapas para o cumprimento dos objetivos propostos. A sequência de atividades pode ser visualizada na Figura 16.

Figura 16 - Fluxograma das atividades pré-estabelecidas



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

#### 3.1 DESCRIÇÃO DAS ETAPAS

As etapas para realização das atividades propostas no fluxograma estão descritas a seguir:

- a) Na primeira etapa foi definido o modelo de basculante (caixa de carga) utilizado nas análises, bem como sua geometria. Também foi selecionado o tipo de grão utilizado para o carregamento.
- b) Posteriormente, com o material granular definido, foi utilizada como base na Teoria de Janssen para se obter a curva normal de pressões ao longo da parede

interna juntamente com uma carga de pico, simulando aceleração e desaceleração na tampa frontal e traseira do semirreboque.

- c) Em seguida, foi aplicada na estrutura das tampas, a curva de pressões como carregamento, para uma análise de elementos finitos (FEA), utilizando o *software Solidworks®*. Da mesma forma, foram definidas regiões críticas de projeto, os tipos de elemento e também realizado a preparação da malha.
- d) Após os resultados obtidos pelo FEA, foram propostas melhorias, visando-se a redução de massa através da mudança das espessuras das chapas e da implementação de reforços nas tampas. Foi verificada a sua viabilidade, atendendo ao nível de tensões admissíveis do material.

## 3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir estão descritos os materiais e métodos que foram utilizados para realização deste trabalho, como modelos geométricos, parâmetros físicos e mecânicos bem como os recursos utilizados para as análises comparativas.

### 3.2.1 Dimensões e capacidade da tampa frontal e traseira

Para a análise, foi utilizada a caixa de carga basculante traseira do implemento rodotrem, Figura 17. Ela tem suas dimensões e capacidade apresentadas no Quadro 9.

Figura 17 - Conjunto rodo trem basculante graneleiro



Fonte: Rodofortguerra (2023).

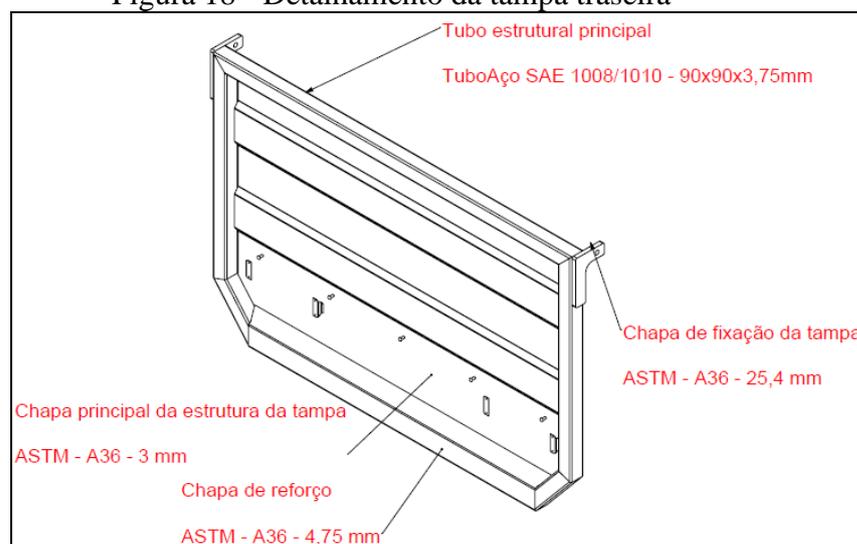
Quadro 9 - Características do conjunto rodotrem basculante GUERRA 9351 X 9475 - 35m

Características	Valores
PBTC	74000 kg
Carga líquida	48300 kg
Aplicação	Graneleiro
Capacidade	35 m <sup>3</sup> + 35 m <sup>3</sup>

Fonte: Rodofortguerra (2023).

A análise ficará restrita às tampas frontal e traseira do implemento basculante rodotrem. A tampa traseira do implemento (Figura 18) é composta por chapas de material ASTM A36 com espessuras de 3 mm e reforços em 4,75 mm e de um tubo estrutural Aço SAE 1008/1010 de 90 x 90 x 3,75 mm. Também, possui dois sistemas de fixação por chapas soldadas de 25,4 mm, sendo responsáveis pela sustentação da mesma em suas extremidades, que são montadas na caixa de carga do implemento, dando toda a sustentação necessária para a aplicação do produto durante a sua utilização.

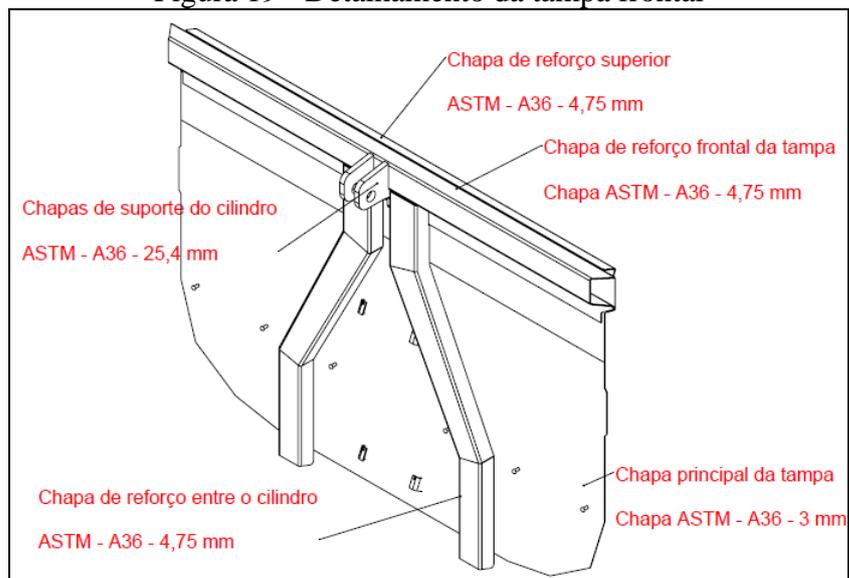
Figura 18 - Detalhamento da tampa traseira



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A tampa frontal da basculante (Figura 19) é similar à traseira, porém é soldada completamente na caixa de carga do semirreboque. Sua estrutura principal é composta por uma chapa de 3 mm e também tendo duas chapas de 25,4 mm, que são soldadas para realizar o acoplamento do cilindro hidráulico. A tampa frontal também possui duas chapas dobradas de reforço de 4,75 mm de espessura e soldadas em toda a parte frontal da tampa. Já na parte interna, a mesma possui uma chapa de reforço na parte superior em espessura de 4,75 mm, sendo importante na estruturação e reforço no momento do acionamento do cilindro.

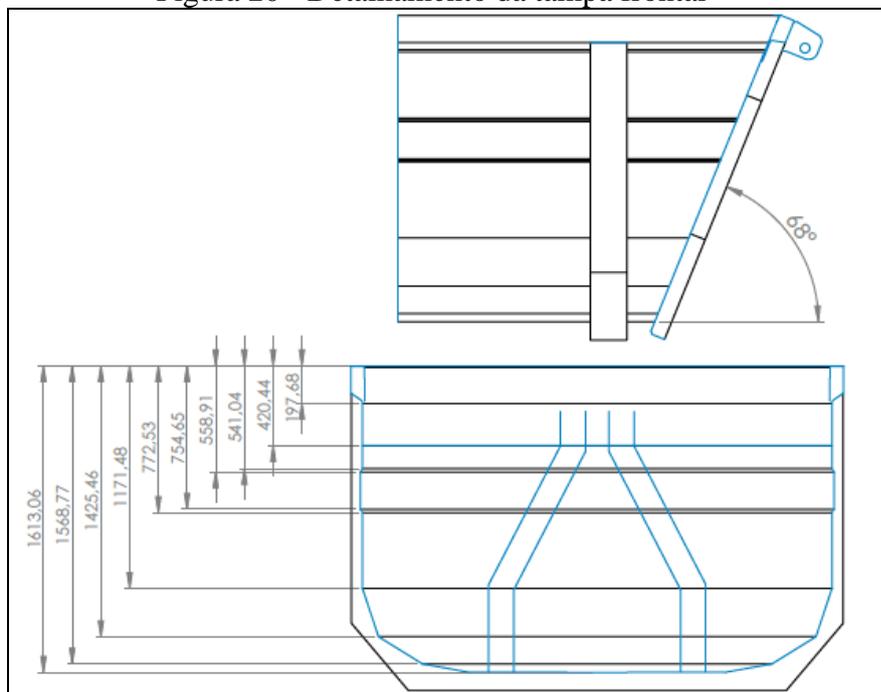
Figura 19 - Detalhamento da tampa frontal



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

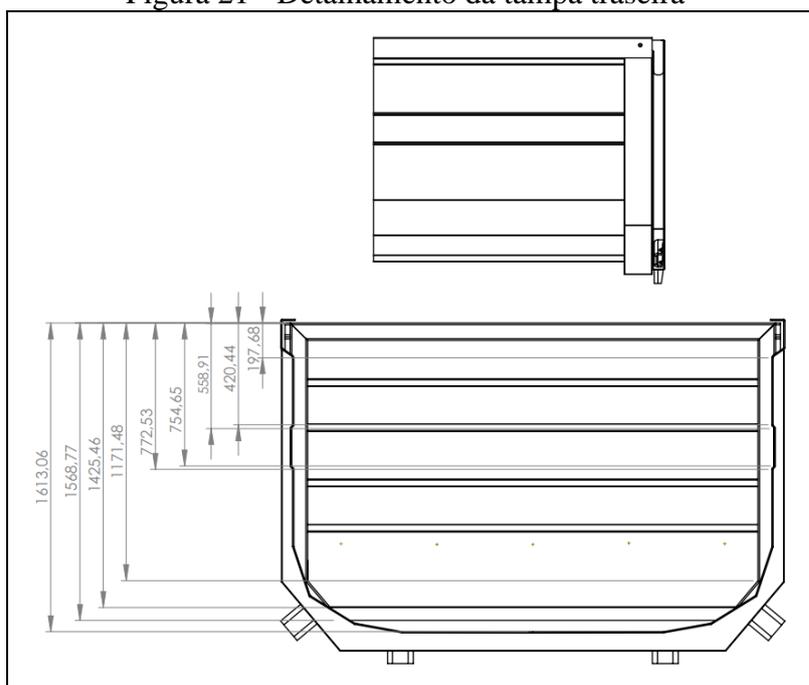
As dimensões das tampas frontal e traseira do semirreboque estão ilustradas nas Figuras 20 e 21, nas quais, ambas seguem vista frontal. A altura até onde foi aplicada a pressão horizontal calculada foi de 1612,68 mm. Para as laterais da caixa da basculante, considerou-se uma pressão vertical média de atrito entre as 10 alturas consideradas no projeto.

Figura 20 - Detalhamento da tampa frontal



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 21 - Detalhamento da tampa traseira

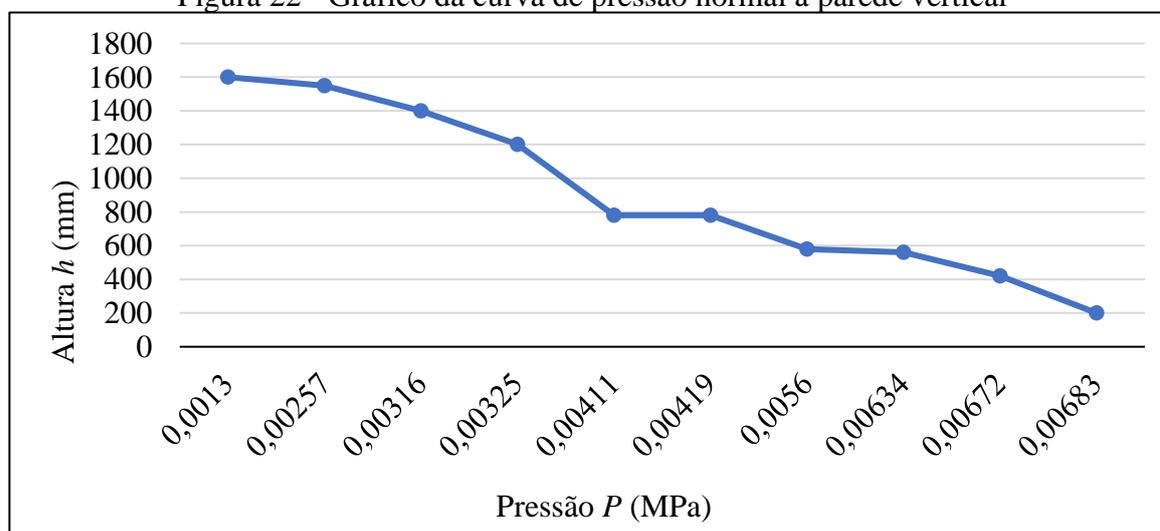


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A equação (12) do perfil de pressão horizontal para carga de milho foi obtida por Besutti (2019), mediante cálculos em diversas alturas, utilizando-se pontos que foram plotados em gráfico, e após aproximados por uma curva de tendência (polinomial de grau 3). O gráfico de pressão horizontal, em função da altura, pode ser visualizado na Figura 22.

$$P = h^3 \cdot 4,0556 \times 10^{-13} - h^2 \cdot 2,3708 \times 10^{-9} + h \cdot 6,9992 \times 10^{-6} + 6,6374 \times 10^{-6} \quad (12)$$

Figura 22 - Gráfico da curva de pressão normal à parede vertical



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Para representar da melhor forma possível através das ferramentas do software, utilizou-se também uma situação na qual foi aplicada uma carga estática de pico que simula uma frenagem ou uma aceleração no implemento. Para a tampa frontal utilizou-se uma situação em que o veículo estaria transitando a uma velocidade constante  $V_0 = 60$  km/h e percorreria uma distância  $\Delta x = 75$  metros até a sua parada total ( $V = 0$ ).

Já para a tampa traseira, foram estabelecidos os mesmos valores, porém foi considerado que o veículo estaria acelerando de  $V_0 = 0$  até uma velocidade de  $V = 60$  km/h, percorrendo  $\Delta x = 75$  metros.

Os valores utilizados para esta simulação tanto no deslocamento, na qual foi utilizado 75 metros como para a velocidade de 60 km/h, são possíveis de variação de acordo com cada simulação conforme as normas e padrões estabelecido de cada empresa, sendo assim, utilizou-se da Equação (13) de Torricelli para calcular o valor da aceleração e desaceleração aplicados na simulação.

$$V^2 = V_0^2 + 2 \cdot a \cdot \Delta x \quad (13)$$

Onde:  $V$  = Velocidade final;

$V_0$  = Velocidade inicial;

$\Delta x$  = Variação da distância final menos a distância inicial;

$a$  = Aceleração ou desaceleração;

Considerando a desaceleração, obteve-se o valor de  $-1,837$  m/s<sup>2</sup>

Também, de acordo com a Equação (14), foi calculada a pressão resultante do carregamento dinâmico aplicada na tampa frontal e traseira, utilizando a presença da força de atrito  $P_w$  levado em consideração.

$$p_{dinâmica} = \frac{Massa\ carga \times a}{Área\ da\ tampa} - P_{hf} \times \mu \quad (14)$$

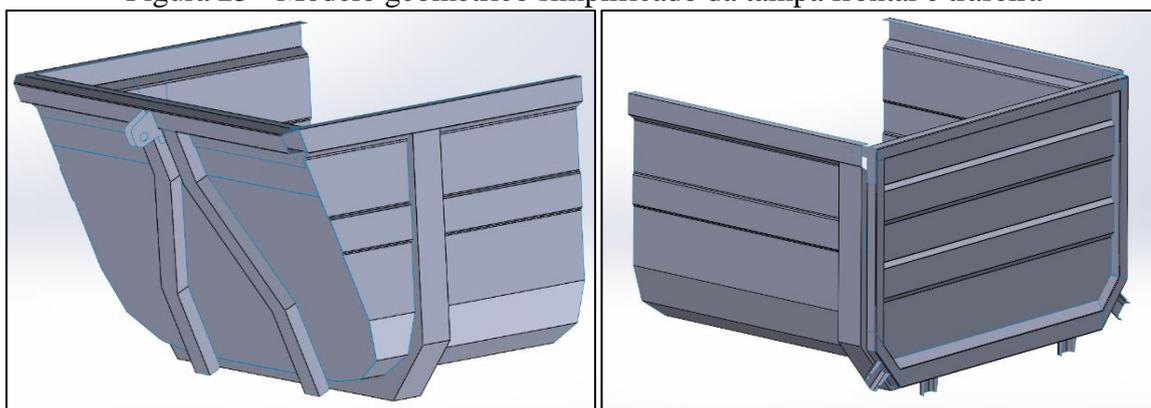
O valor utilizado para a massa da carga do semirreboque foi de 24150 kg, a desaceleração foi de  $-1,837$  m/s<sup>2</sup> e a área da superfície das tampas de  $8,3767 \times 10^6$  mm<sup>2</sup> e, posteriormente foi somado com a pressão horizontal média estipulada, conforme cada nível de altura da tampa, a qual foi de 0,00158 MPa. Sendo assim, o resultado obtido da pressão resultou em um valor de 0,0053 MPa.

### 3.2.2 Pré processamento e processamento CAE

Fez-se necessário, inicialmente, realizar uma simplificação da geometria para aplicação da ferramenta de simulação, compreendendo que o projeto foi preparado com o maior nível de detalhes voltados ao processo de manufatura. Itens que constituíam o sistema de basculamento, bem como escada frontal, cilindro hidráulico, rebites de fixação da lona e demais que não fazem parte da estrutura e da sustentação do implemento, dificultariam a aplicação do método, e não trariam melhores resultados.

Sendo assim, a primeira etapa realizada foi a elaboração do modelo geométrico simplificado, utilizando recursos de superfícies para a geração de um modelo geométrico em casca. Modelo este, elaborado por meio do software *Solidworks*®, como mostra a Figura 23.

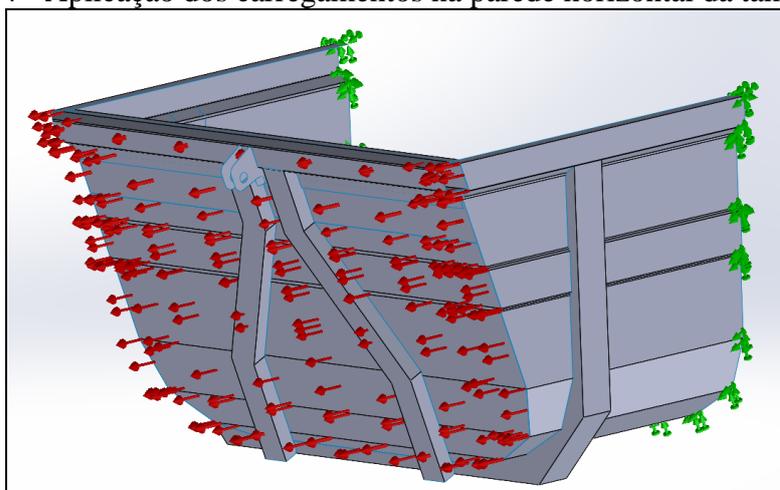
Figura 23 - Modelo geométrico simplificado da tampa frontal e traseira



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

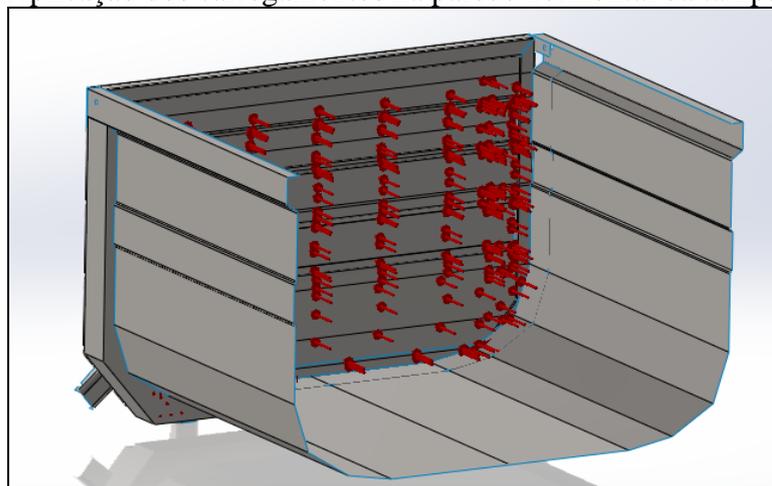
Inicialmente, foram criadas na geometria, 10 linhas de divisão conforme ilustrado nas Figuras 24 e 25, para se aplicar os carregamentos de acordo com suas respectivas áreas, utilizando as áreas entre as linhas de divisão como seleção, e para cada uma delas extraíram-se os valores das pressões. A geometria foi dividida nas regiões, conforme as Figuras 24 e 25 e, posteriormente, as mesmas divisões foram utilizadas para se aplicar o carregamento na análise de elementos finitos.

Figura 24 - Aplicação dos carregamentos na parede horizontal da tampa frontal



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

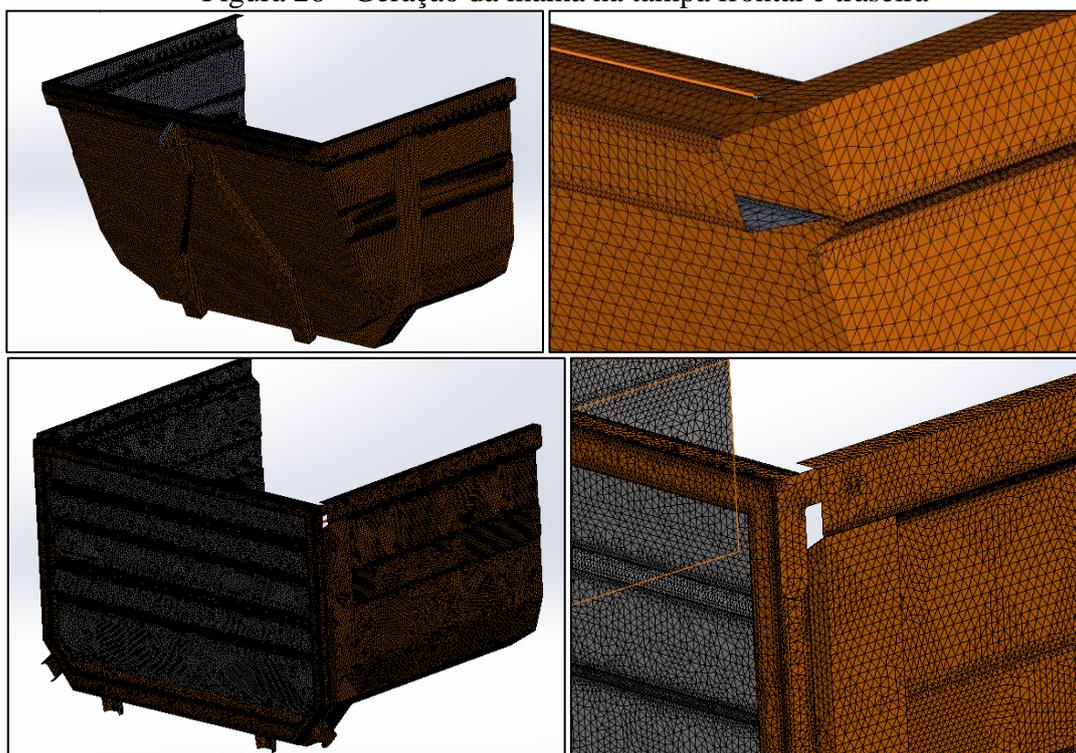
Figura 25 - Aplicação dos carregamentos na parede horizontal da tampa traseira



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Com os modelos 3D simplificados, dos conjuntos das tampas frontal e traseira, foram criadas as malhas. Foi utilizado o elemento do tipo casca, denominado triangular de segunda ordem, devido à dimensão do modelo e sua geometria e também por ser este o elemento de maior número de graus de liberdade disponível pelo *software*, totalizando um número de elementos igual a 126.461 para a tampa frontal e 192.124 para a tampa traseira. Na Figura 26 pode-se ver a malha composta por 255.189 nós da tampa frontal e 387.163 da tampa traseira.

Figura 26 - Geração da malha na tampa frontal e traseira



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Uma vez desenvolvido o modelo em superfície, para a geração da malha foram realizados os refinamentos necessários, de modo a tornar os resultados da simulação convergentes a um resultado aceitável, percebeu-se que utilizando elementos de tamanho entre 20 e 25 mm não havia mais variações consideráveis nos resultados obtidos. Desta forma, considerou-se a malha devidamente refinada para a aplicação. Após a finalização desta etapa, foi extraído um relatório de dados da malha de elementos finitos, como pode ser visto pelas Figuras 27 e 28.

Figura 27 - Dados da malha de MEF da tampa frontal

Malha Detalhes	
Nome do estudo	Análise estática 1 (-Valor predeterminado-)
Tipo de malha	Malha de casca usando superfícies
Gerador de malhas usado	Malha mesclada com base em curvatura
Verificação Jacobiana para cascas	Ativada
Tamanho máximo do elemento	20 mm
Tamanho mínimo do elemento	6,6666 mm
Qualidade da malha	Alta
Total de nós	255189
Total de elementos	126401
Tempo para conclusão da malha (hh:mm:ss)	00:00:22
Nome do computador	

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 28 - Dados da malha de MEF da tampa traseira

Malha Detalhes	
Nome do estudo	Análise estática 1 (-Valor predeterminado-)
Tipo de malha	Malha de casca usando superfícies
Gerador de malhas usado	Malha com base em curvatura
Verificação Jacobiana para cascas	Ativada
Tamanho máximo do elemento	20 mm
Tamanho mínimo do elemento	6,6666 mm
Qualidade da malha	Alta
Total de nós	387163
Total de elementos	192124
Tempo para conclusão da malha (hh:mm:ss)	00:00:22
Nome do computador	

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

### 3.2.3 Pós processamento CAE

Na etapa de processamento, o *solver* do software realizou a simulação obtendo as tensões e deslocamentos nodais da estrutura sob sua condição inicial, utilizando o MEF. Nesta etapa, foram encontrados os pontos máximos de tensões localizadas na estrutura, bem como os seus deslocamentos. Com esta etapa, pode-se conhecer o coeficiente de segurança atual, bem como onde ocorrem as maiores solicitações na estrutura das tampas.

Como método de validação, foi considerado o critério de falha de von Mises, determinando que tensões encontradas na análise estrutural superiores ao limite de escoamento do material resultariam em deformações plásticas ao componente, invalidando a proposta.

## 4 RESULTADOS

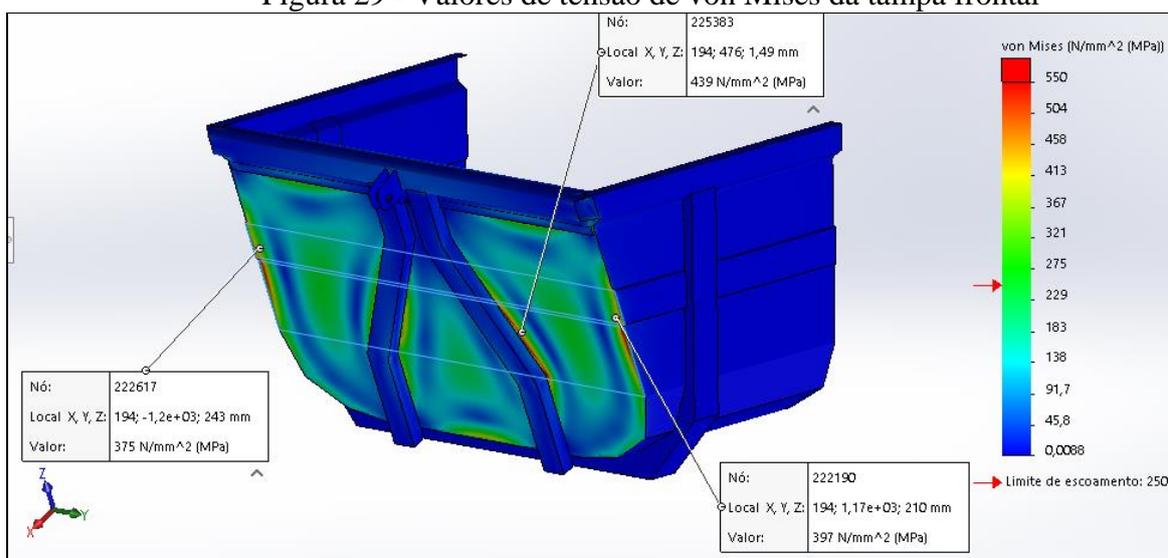
Desenvolvida a metodologia de análise do modelo, neste capítulo foram analisados os resultados obtidos das simulações, visando a validação estrutural, além da redução da massa do implemento.

### 4.1 ANÁLISE PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Realizando a análise estrutural do cenário após a alteração das espessuras das chapas das tampas de 3mm para 2 mm, e das espessuras dos reforços de 4,75 mm para 4,25 mm, foi possível verificar os pontos com maiores valores de tensão de von Mises encontrados. Na tampa frontal conforme a Figura 29, encontrou-se o valor de aproximadamente 397 MPa, localizado no ponto do elemento ao entorno da chapa principal e de 439 MPa nos reforços da tampa frontal.

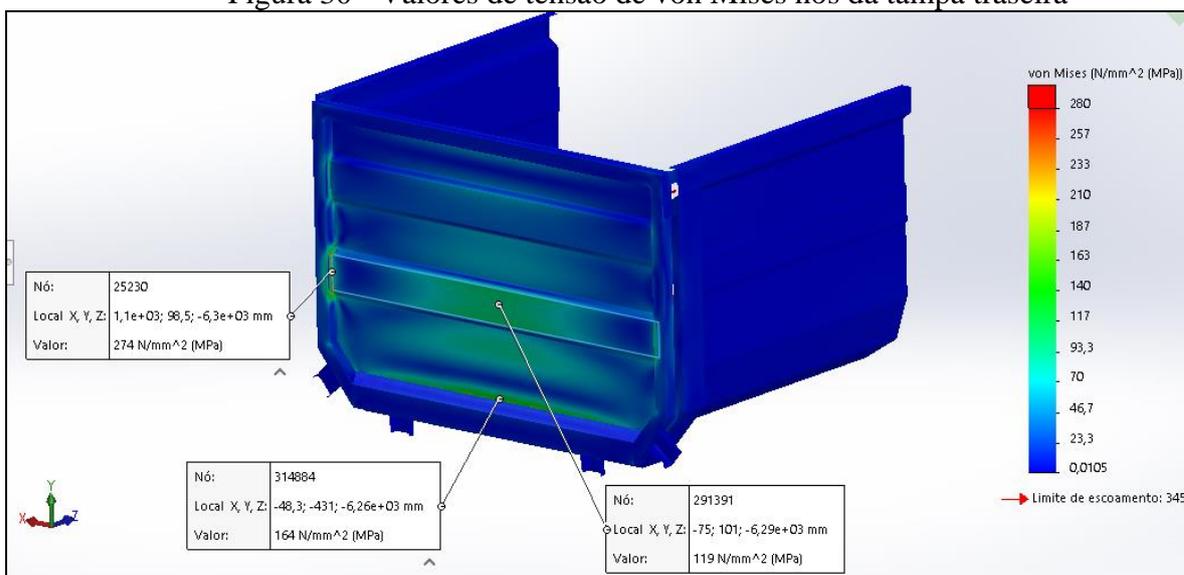
Já para a tampa traseira, foram encontrados valores estimados de aproximadamente 274 MPa ao entorno da estrutura tubular, na qual a chapa é soldada na tampa traseira e estimados 119 MPa na região central, demonstrando onde a estrutura é mais solicitada, como pode ser visto na Figura 30.

Figura 29 - Valores de tensão de von Mises da tampa frontal



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 30 - Valores de tensão de von Mises nos da tampa traseira



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

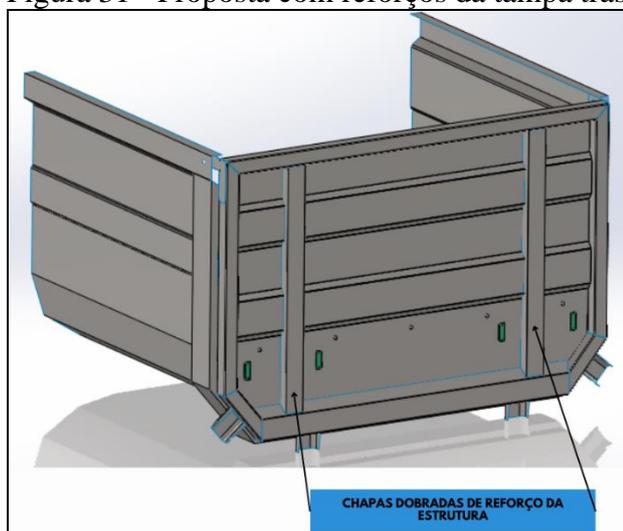
## 4.2 PROPOSTA DE MELHORIA DOS PRODUTOS

Tendo-se o modelo atual avaliado pela análise estrutural através do MEF, visando uma proposta de melhoria do produto, com objetivo de diminuição da massa das tampas frontal e traseira do implemento, foram realizadas alterações de espessuras de chapas.

Para a espessura das tampas, alterou-se de 3 mm para 2 mm, enquanto para o reforço, mudou-se de 4,75 mm para 4,25 mm.

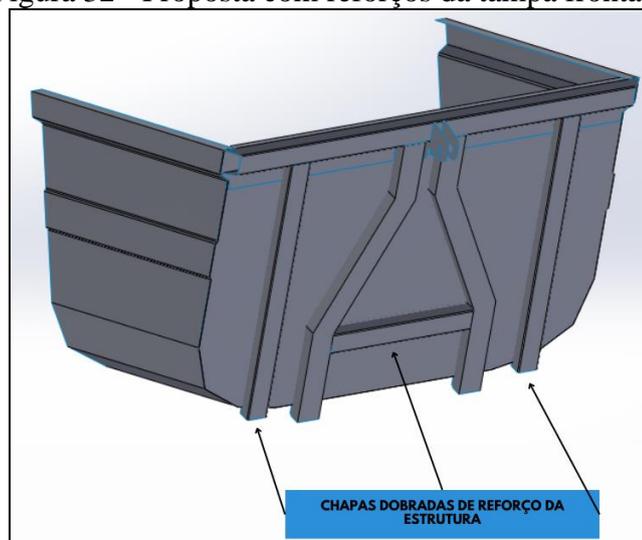
Foram incluídos reforços adicionais, nas tampas frontal e traseira com o objetivo de atender critérios de rigidez, conforme ilustrados nas Figuras 31 e 32.

Figura 31 - Proposta com reforços da tampa traseira



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

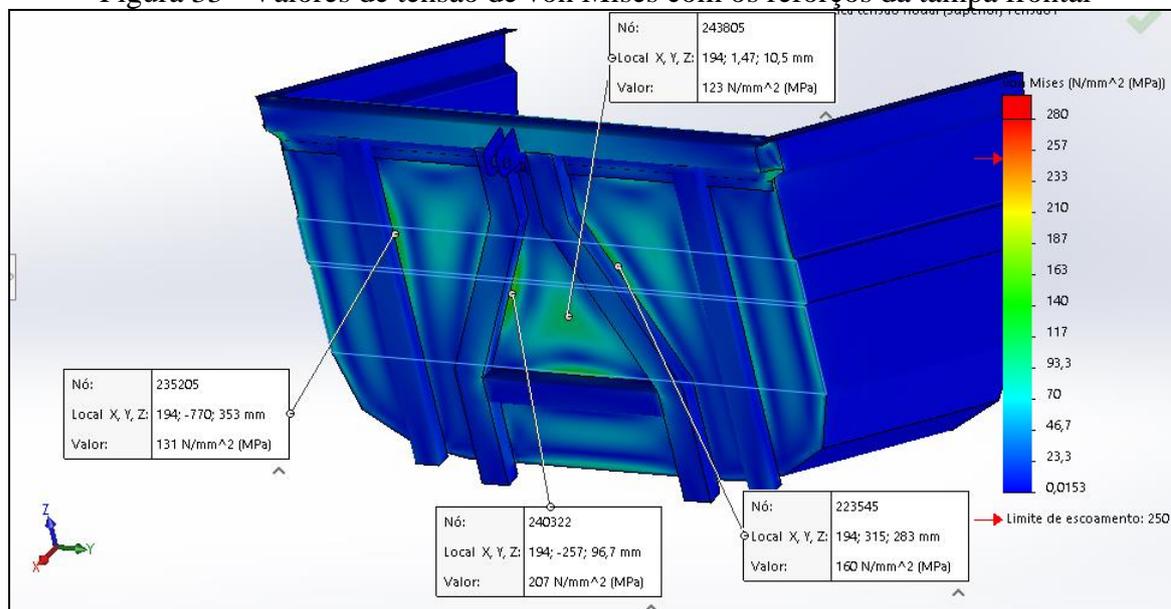
Figura 32 - Proposta com reforços da tampa frontal



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

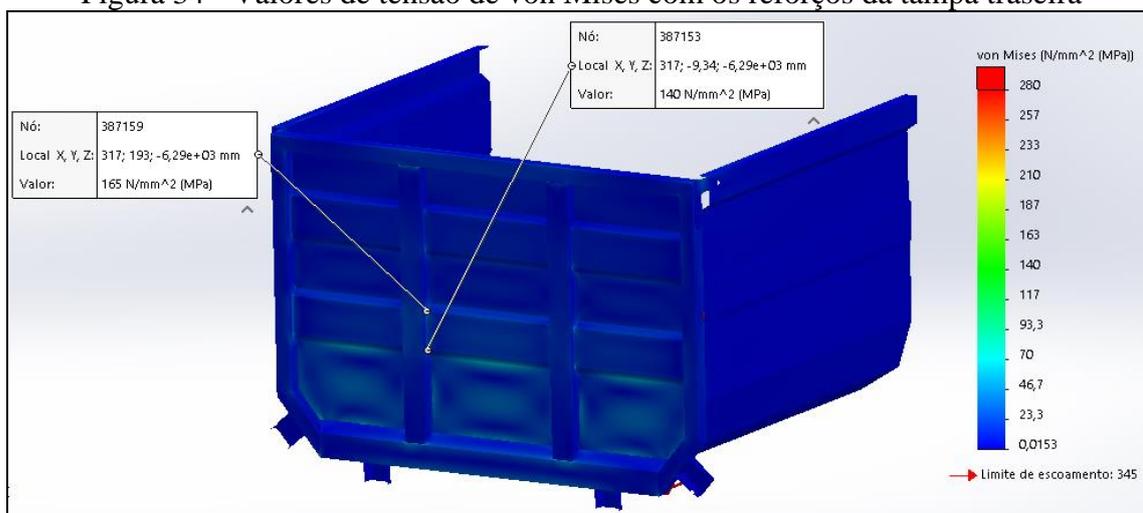
Com o intuito de reduzir o peso do implemento e, principalmente, as tensões admissíveis nas regiões de maiores resultados, as Figuras 33 e 34 mostram os resultados obtidos de aproximadamente 207 MPa para a tampa frontal e 165 MPa para a tampa traseira.

Figura 33 - Valores de tensão de von Mises com os reforços da tampa frontal



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 34 - Valores de tensão de von Mises com os reforços da tampa traseira

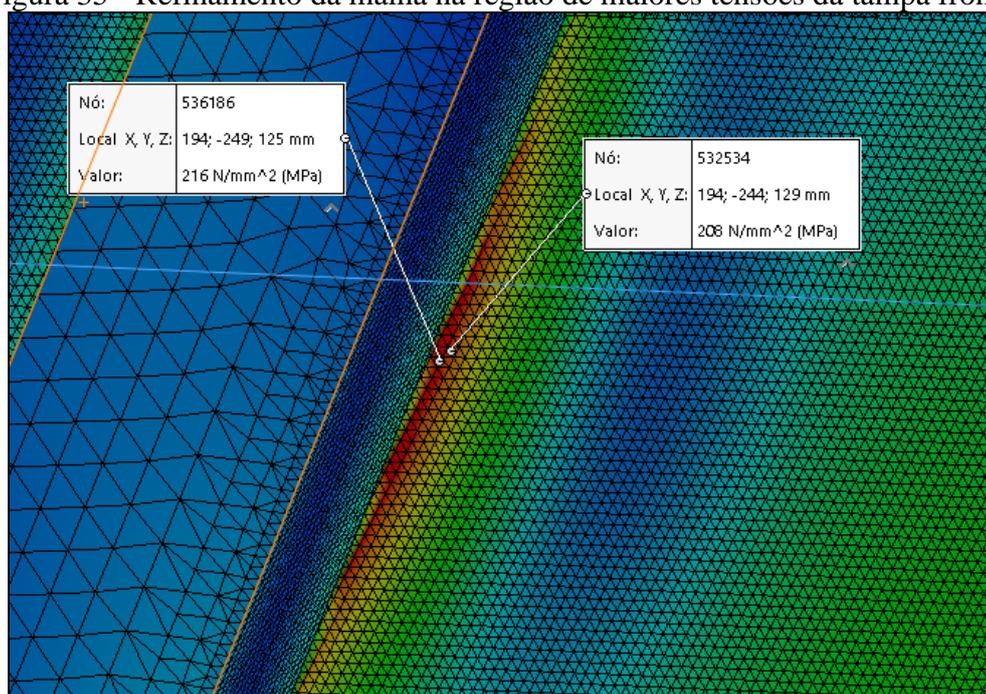


Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Verificando os elementos das regiões próximas dos pontos máximos de tensão encontrados em ambas as tampas, pode-se perceber uma diferença entre os valores, até mesmo de valores de tensão no mesmo elemento, que trouxe o valor da tensão máxima.

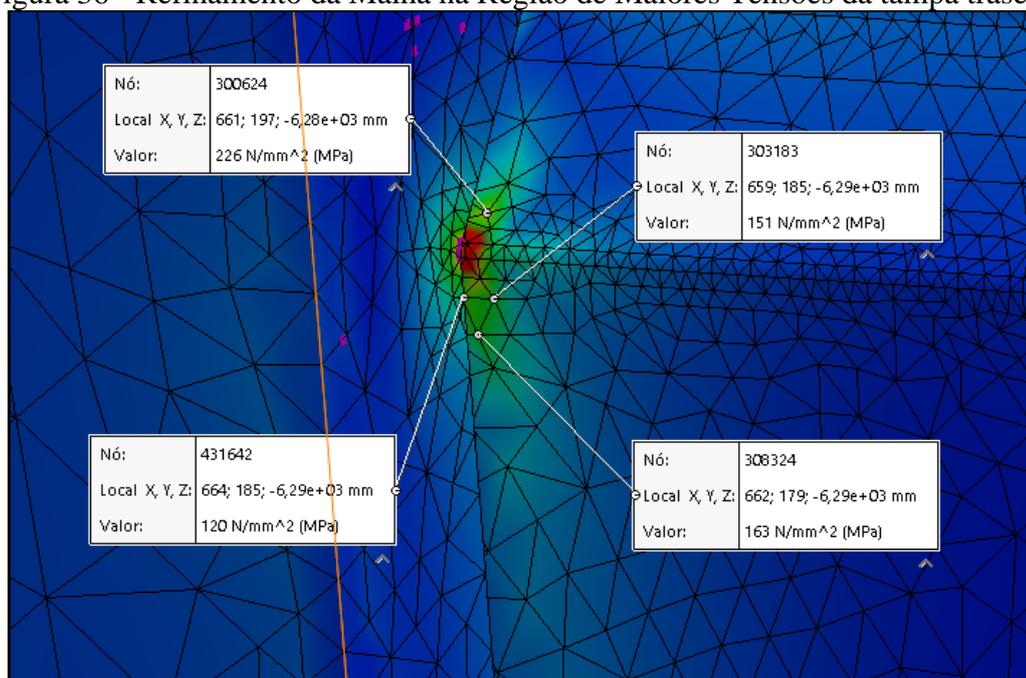
Realizando um refinamento na malha, pode-se perceber um comportamento de elevação da tensão máxima em cada ponto quando reduzido o tamanho dos elementos. Tal característica no valor máximo de tensão encontrado próximo a quina, sugere uma região de concentração de tensão (Figuras 35 e 36).

Figura 35 - Refinamento da malha na região de maiores tensões da tampa frontal



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

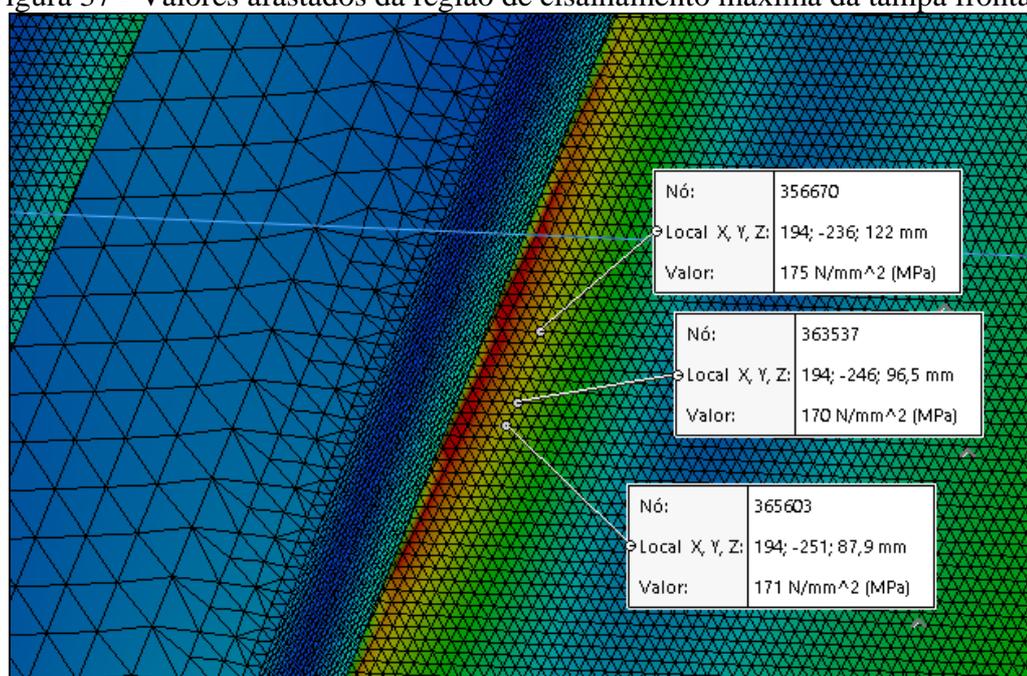
Figura 36 - Refinamento da Malha na Região de Maiores Tensões da tampa traseira



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

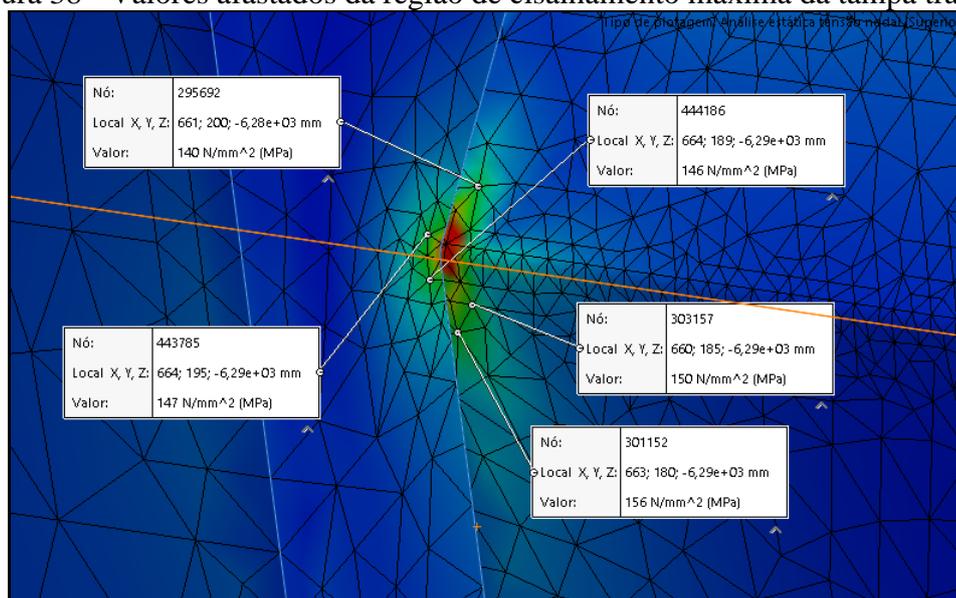
Os valores coletados para a análise foram em pontos localizados levemente afastados da região de cisalhamento máximo, onde a tensão se mostra estável frente ao refinamento da malha, conforme mostram as Figuras 37 e 38.

Figura 37 - Valores afastados da região de cisalhamento máxima da tampa frontal



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

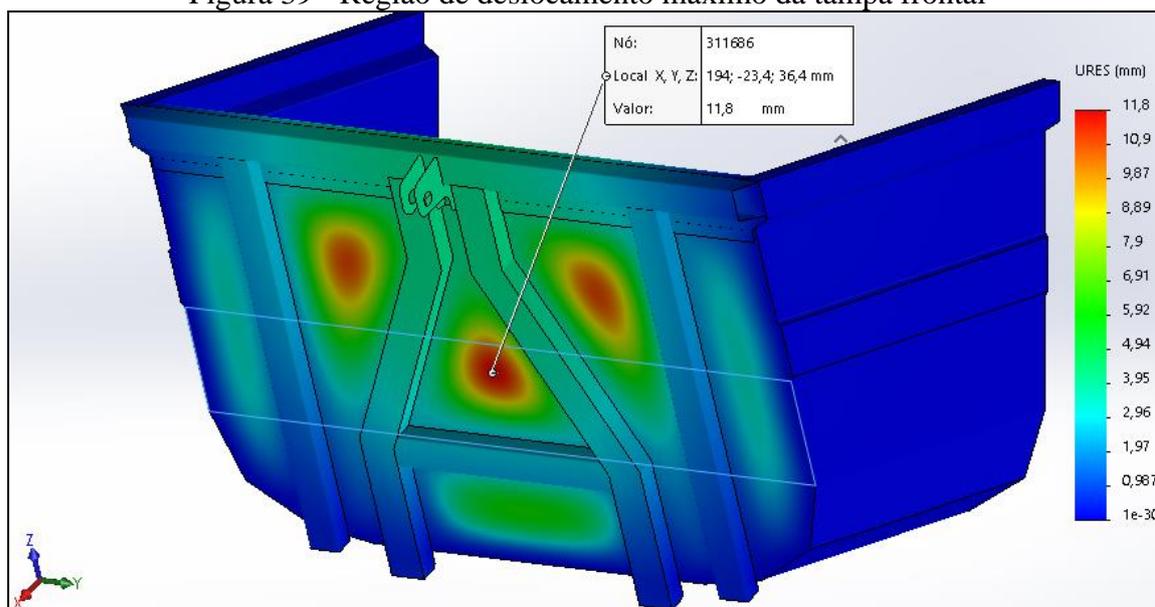
Figura 38 - Valores afastados da região de cisalhamento máxima da tampa traseira



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

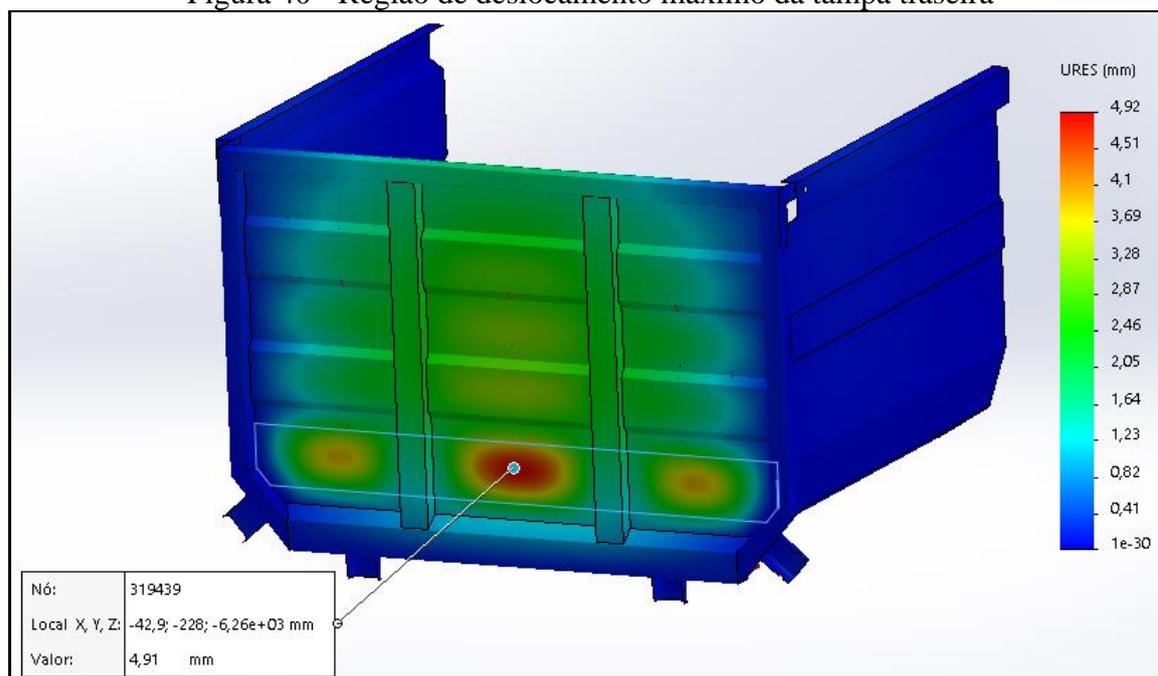
Além da análise de tensões equivalentes de von Mises, de acordo com as Figuras 39 e 40, pode-se verificar os deslocamentos originados nas tampas de um caminhão basculante. Pode-se perceber que os valores máximos encontrados foram aproximadamente de 11,8 mm para a tampa frontal e 4,91 mm para a tampa traseira, porém não onde as maiores tensões surgiram, mas sim em locais mais afastados dos reforços.

Figura 39 - Região de deslocamento máximo da tampa frontal



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

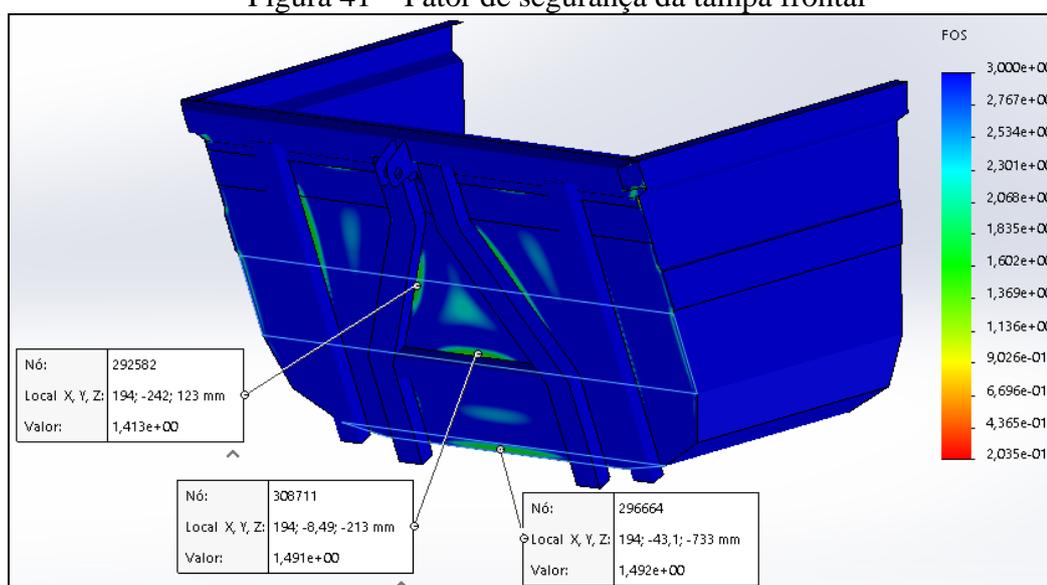
Figura 40 - Região de deslocamento máximo da tampa traseira



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

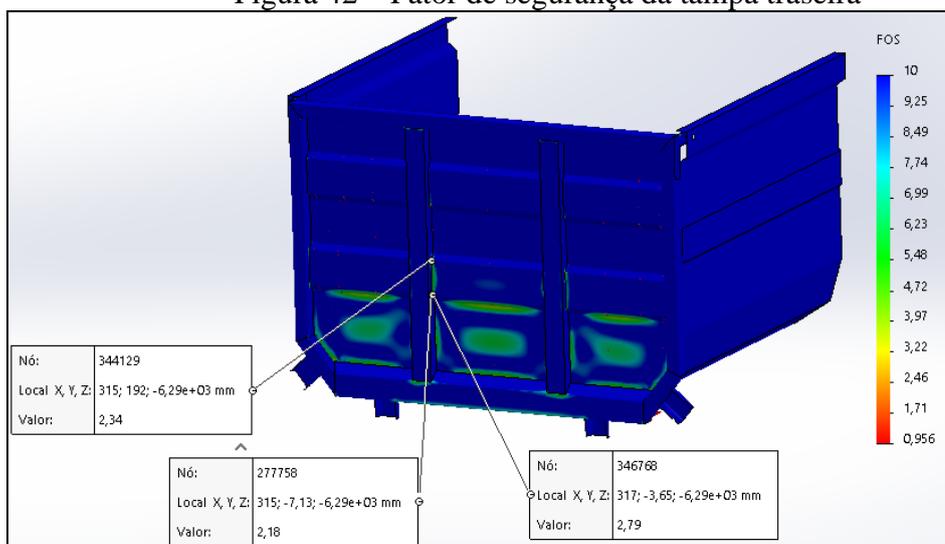
Através das Figuras 41 e 42, pode-se verificar o coeficiente de segurança atual das tampas frontal e traseira. Percebeu-se que os valores mínimos estavam demarcados nas regiões de singularidade. De forma geral, percebeu-se que a estrutura possuía valores mínimos de coeficiente de segurança próximo aos reforços em que os carregamentos são empregados de aproximadamente 1,49 para a tampa frontal e 2,79 para a tampa traseira.

Figura 41 – Fator de segurança da tampa frontal



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 42 – Fator de segurança da tampa traseira



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

#### 4.2.1 Análise da proposta de melhoria

Tendo-se os valores de tensão nos locais considerados críticos (regiões próximas aos reforços), pode-se fazer a validação de cada valor encontrado de tensão em função do tipo de aço estrutural aplicado. O Quadro 10 apresenta a validação de cenários em função do tipo de aço estrutural aplicado:

Quadro 10 - Validação dos cenários em função do tipo de aço estrutural

PRODUTO	Material	Limite de escoamento (MPa)	Deslocamento (mm)	Valores de tensão de von Mises encontrados (MPa)
TAMPA FRONTAL	ASTM A572 Gr50	345	11,8	170
TAMPA TRASEIRA	ASTM A572 Gr50	345	4,91	152

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Analisando-se os diferentes resultados obtidos para cada região das tampas, percebe-se que apesar da tentativa de redução de massa das chapas principais e através da implementação de reforços, os percentuais de massa apresentaram valores significativamente baixos, porém todos com possibilidade de validação. Através do Quadro 11 podem ser vistos os possíveis resultados aproximados de redução de massa obtidos com coeficiente de segurança da estrutura conforme abaixo.

Quadro 11 - Cenários validados com material ASTM A572 Gr50

<b>PRODUTO</b>	<b>Material</b>	<b>Coefficiente de segurança</b>	<b>Massa Atual (kg)</b>	<b>Massa da proposta de melhoria (kg)</b>	<b>Redução de Massa (%)</b>
TAMPA FRONTAL	ASTM A572 Gr50	1,41	213,34	210,04	1,57%
TAMPA TRASEIRA	ASTM A572 Gr50	2,18	188,66	178,18	5,88%

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

#### 4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir dos dados de análise pelo MEF, referente ao comportamento da estrutura frente aos deslocamentos e tensões, se faz necessário definir um coeficiente de segurança mínimo para a validação das propostas.

Segundo (Norton 2013), explica que a escolha de um coeficiente de segurança para projetos pode ser definida com base na disponibilidade dos dados adequados referente as propriedades dos materiais e nas condições ambientais esperadas, comparados com os dados obtidos através dos testes do material na qual foi submetido. Desta maneira, definiu-se um valor de coeficiente de segurança com base em valores extraídos de testes reais na qual o material foi submetido. Sendo assim, utilizou-se para este projeto um valor mínimo aceitável de fator de segurança de 1,3.

Os dados apresentados mostram que todos os tipos de aços previamente escolhidos são passíveis de aprovação, como pode ser visto no Quadro 12. A aplicação com o Aço LNE 380 é o melhor resultado, que se enquadra como nova possibilidade de manufatura para a tampa frontal e para a tampa traseira, pois ambas apresentaram o maior valor de coeficiente de segurança.

Quadro 12 - Melhor resultado referente a cada tipo de material

<b>Produto</b>	<b>Matéria-prima</b>	<b>Fator de segurança</b>	<b>Massa atual (kg)</b>	<b>Massa pós implementação (kg)</b>
<b>Tampa frontal</b>	ASTM A36	1,47	213,34	210,04
	LNE 380	2,23		
	ASTM A572 Gr50	1,41		
<b>Tampa traseira</b>	ASTM A36	1,64	188,66	178,18
	LNE 380	2,5		
	ASTM A572 Gr50	2,18		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

## 5 CONCLUSÃO

Ao término deste estudo, foi possível compreender o comportamento estrutural (tensões e deslocamentos) das tampas frontal e traseira do implemento basculante, quando são submetidas a esforços provindos da ação da carga.

Tendo o tipo de material granular definido como o milho, de acordo com a teoria de Janssen e com o trabalho de Besutti (2019), os valores de pressão foram aplicados nas tampas. Com as pressões distribuídas em 10 faixas de altura da caixa de carga, posteriormente foi inserida uma carga horizontal estática de pico, simulando aceleração e desaceleração, nas tampas traseira e frontal, respectivamente, do semirreboque.

Através da discretização do sistema, inicialmente foi verificado que os pontos de maiores tensões de Von Mises encontraram-se próximos aos reforços. Da mesma forma que para os resultados de fator de segurança mínimos, foram localizados nas mesmas regiões. Já para os valores de deslocamento, os locais que apresentaram os maiores valores, estavam mais afastados dos reforços, ou seja, nas regiões centrais das tampas.

Tendo-se os resultados da análise, uma nova configuração de reforços nas tampas foi proposta, com o objetivo de obter-se uma redução de massa. Valores de espessuras de chapas comerciais foram utilizados para a estrutura principal das tampas, passando de 3 mm para 2 mm. Da mesma forma, as espessuras dos reforços nas laterais e em regiões centrais das tampas, foram alterados de 4,75 mm para 4,25 mm.

Considerando os resultados obtidos, todos os materiais elegíveis foram aprovados para a utilização. Contudo, o material que apresentou o melhor resultado no quesito fator de segurança, foi o aço LNE-380.

Conclui-se que o projeto proposto foi validado, tendo-se obtidos valores de tensão máxima de 170 MPa na tampa frontal e de 152 MPa na tampa traseira, além de uma deflexão máxima de 11,8 mm no centro da tampa frontal e de 4,91 mm para a tampa traseira. Também, o fator de segurança na região crítica foi de 2,23 na tampa frontal e de 2,5 na tampa traseira, embora a redução de massa tenha sido pouco significativa.

## **6 TRABALHOS FUTUROS**

De acordo com os resultados encontrados referente as tensões máximas logo após a implementação de uma proposta de melhoria, sugere-se realizar um refinamento da malha na região próxima aonde ocorreram as tensões máximas das tampas frontal e traseira e utilizar elementos do tipo sólido nas regiões para se obter uma melhor precisão nos resultados.

## REFERÊNCIAS

ALVES FILHO, Avelino. **Elementos Finitos - A Base da Tecnologia CAE - Análise Dinâmica. 2. ed.** São Paulo: Editora Saraiva, 2009. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788536519715/pageid/0>>. Acesso em: 15 set. 2022.

ALVES FILHO, Avelino. **Elementos Finitos - A Base da Tecnologia CAE. 6. ed.** São Paulo: Editora Saraiva, 2009. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788536519708/pageid/0>>. Acesso em: 15 set. 2022.

ANFIR. **Associação Nacional dos Fabricantes de Implementos Rodoviários.** Disponível em: <<https://anfir.org.br/>>. Acesso em: 12 dez. 2023.

AZEVEDO, Álvaro Ferreira Marques. **Método dos Elementos Finitos.** 1. ed. Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003. Disponível em: <[https://civil.fe.up.pt/pub/apoio/ano5/aae/pdf/apontamentos/Livro\\_MEF\\_AA.pdf](https://civil.fe.up.pt/pub/apoio/ano5/aae/pdf/apontamentos/Livro_MEF_AA.pdf)>. Acesso em: 14 set. 2022.

BESUTTI, Christian. **Análise do comportamento das pressões originadas por grãos em uma caixa de carga de um semirreboque por meio do método de elementos discretos em comparação à norma EN 1991-4.** Orientador: Prof. Dr. Alexandre Vieceli. 2019. 57 p. Trabalho de conclusão de curso (Área do Conhecimento de Ciências Exatas e Engenharias) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2019.

BREZOLIN, Andrey. **Análise estrutural de um veículo destinado à movimentação de cargas na construção civil em diferentes condições de carregamentos.** Trabalho de conclusão do curso (Engenharia Mecânica) - Universidade de Caxias do Sul, 2013. Disponível em: <<https://repositorio.ucs.br/xmlui/bitstream/handle/11338/1799/TCC%20Andrey%20Brezolin.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 15 set. 2022.

BUDYNAS, Richard; NISBETT, J. Keith. **Elementos de Máquinas de Shigley.** 10. ed. Porto Alegre: Grupo A, 2016. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788580555554/pageid/3>>. Acesso em: 21 out. 2022.

CASTILHOS, Lucinei Vergani. **Projeto e construção da tampa lateral inferior de um semirreboque destinado ao transporte de grãos.** Relatório de Estágio II (Bacharel no curso de Engenharia Mecânica.) - Universidade de Caxias do Sul, 2011.

CHANDRUPATLA, Tirupathi R.; BELEGUNDU, Ashok D. **Elementos Finitos.** 4. ed. São Paulo: Pearson Educativo do Brasil, 2014. Disponível em: <<https://plataforma.bvirtual.com.br/Leitor/Publicacao/10209/pdf/0?code=VmlFFvj0xtw4mp5hCOP7ky0FjC+B8s78LJjsD3R+Hs7QeTZnFFIwkPz7CiTyOd2mZ8zh6pP3aG2ET+0/dhRN8A==>>. Acesso em: 15 set. 2022.

CHEUNG, Andrés Batista. **Modelo estocástico de pressões de produtos armazenados para a estimativa da confiabilidade estrutural de silos esbeltos.** 2007. 305 f. Tese

(Doutorado) – escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-30102007-213438/pt-br.php/>>. Acesso em: 15 nov. 2023.

CONTRAN, **Conselho Nacional de Trânsito N° 210:2006**. Disponível em: <<https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/contran>>. Acesso em: 19 set. 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO - DENATRAN. **Portaria nº 63, de 31 de março de 2009**. Homologa os veículos e as combinações de veículos de transporte de carga e de passageiros, com seus respectivos limites de comprimento, Peso Bruto Total - PBT e Peso Bruto Total Combinado - PBTC. Disponível em: <[https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/arquivos-senatran/portarias/2009/portaria\\_denatran\\_63\\_09.pdf](https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/arquivos-senatran/portarias/2009/portaria_denatran_63_09.pdf)> Acesso em: 12 out. 2022.

CURY, Alexandre. **Critérios de falha**. Versão 2018. MAC, UFJF. Juiz de Fora, 2018.

EUROPEAN COMMITTEE OF STANDARIZATION. **BS EN 1991-4**: Eurocode 1: Actions on structures - part 4: Silos and tanks. Brussels, 2006. 109 p. Disponível em: <<https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1991.4.2006.pdf>>. Acesso em: 14 set. 2022.

FISH, Jacob; BELYTSCHKO, Ted. **Um Primeiro Curso em Elementos Finitos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2009. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/978-85-216-1941-3/pageid/0>>. Acesso em: 15 set. 2022.

FREES, Monique Valentim da Silva. **Avaliações sobre o Processo de Dobramento do Aço NBR 6656 LNE 380**. 2017. Dissertação (Mestre em Engenharia) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, [S. l.], 2017. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/163428>>. Acesso em: 26 nov. 2022.

HEARN, E. J. **Mechanics of Materials 2: the mechanics of elastic and plastic deformation of solids and structural materials**. 3. ed. Johannesburg: Elsevier, 1997. Disponível em: <<http://www4.hcmut.edu.vn/~vinhbd/Documents/Mechanic%20of%20Materials%202.pdf>>. Acesso em: 14 set. 2022.

KOCK, Maikol Anderson. **Dimensionamento de um silo metálico com fundo plano para armazenamento de soja**. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2018. Disponível em: <[http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/15248/1/PB\\_DAMEC\\_2018\\_1\\_11.pdf](http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/15248/1/PB_DAMEC_2018_1_11.pdf)>. Acesso em: 14 set. 2022.

MADRONA, Fernanda Scaramal. **Pressões em silos esbeltos com descarga excêntrica**. 2008. Dissertação (Mestre em Engenharia de Estruturas.) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. Disponível em: <[http://web.set.eesc.usp.br/static/media/producao/2008ME\\_FernandaScaramalMadrona.pdf](http://web.set.eesc.usp.br/static/media/producao/2008ME_FernandaScaramalMadrona.pdf)>. Acesso em: 14 set. 2022.

MATWEB. **Aço ASTM A36, chapa**. 2022. Versão on-line. Disponível em: <<https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=afc003f4fb40465fa3df05129f0e88e6&ckck=1>>. Acesso em: 29 nov. 2022.

MATWEB. **Aço ASTM A572, grau 50**. 2022. Versão on-line. Disponível em: <<https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=9ced5dc901c54bd1aef19403d0385d7f>>. Acesso em: 29 nov. 2022.

NOMA DO BRASIL. **Produtos**. Disponível em: <<https://www.nomadobrasil.com.br/produtos/>>. Acesso em: 22 out. 2022.

NORTON, Robert L. **Projeto De Máquinas: Uma Abordagem Integrada**. 4º. ed. Porto Alegre: Bookman Editora Ltda, 2013. 1055 p. Disponível em: <[https://www.academia.edu/47686835/Projeto\\_de\\_M%C3%A1quinas\\_robert\\_L\\_norton\\_uM\\_a\\_abordagem\\_integrada\\_4a\\_edi](https://www.academia.edu/47686835/Projeto_de_M%C3%A1quinas_robert_L_norton_uM_a_abordagem_integrada_4a_edi)>. Acesso em: 15 nov. 2023.

PANNONI, Fabio Domingos. Aços e Ferros Fundidos. **Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM**, São Paulo, ed. 7, 2002. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/17146411-Acos-estruturais-fabio-domingos-pannoni-m-sc-ph-d-1.html>>. Acesso em: 26 nov. 2022.

RANCAN, Maicon Manuel. **Influência do comportamento dinâmico em juntas do tipo “K” em estruturas reticuladas planas**. 2015. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ucs.br/xmlui/bitstream/handle/11338/1050/Dissertacao%20Maicon%20Manuel%20Rancan.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 14 set. 2022.

RODOFORTGUERRA. **Basculante**, 2022. Disponível em: <<https://www.rodofortguerra.com.br/produto/6/basculante.>> Acesso em: 14 set. 2022.

SOUZA, Remo Magalhães. **O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor**. Núcleo de Instrumentação e Computação Aplicada à Engenharia, Belém, 2003. Disponível em: <<http://www.inf.ufes.br/~luciac/fem/livros-fem/ApostilaElementosFinitosNiCAE.pdf>>. Acesso em: 16 set. 2022.

USIMINAS. Mercados e Produtos. **Catálogo Chapas Grossas**, 2021. Mercados e Produtos. Disponível em: <<https://www.usiminas.com/page/mercados-e-produtos/chapas-grossas/>>. Acesso em: 4 dez. 2022.