

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO  
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL  
Campus Ibirubá**

**JORDANO MARQUES PEDROSO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO  
Projeto de rolo faca para aplicações agrícolas**

**Ibirubá  
2024**

JORDANO MARQUES PEDROSO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Projeto de rolo faca para aplicações agrícolas

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Banca Examinadora designada pelo Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Ibirubá, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projeto, análise de elementos finitos e custo.

Orientador: Prof. Cristiano Kulman, Dr. Eng.

Ibirubá

2024

Pedroso, Jordano M

Desenvolvimento de um projeto de rolo faca para aplicações agrícolas /  
Jordano Marques Pedroso

Orientador: Prof. Cristiano Kulman, Dr. Eng.

Monografia (graduação) – Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia do Rio Grande do Sul, Campus Ibirubá, Curso de Graduação em  
Engenharia Mecânica, Ibirubá 2023.

*Projeto de rolo faca para aplicações agrícolas*

**Jordano Marques Pedroso**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Banca Examinadora designada pelo Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Ibirubá, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Ibirubá, 19 de Dezembro de 2024.

Banca Examinadora:

Prof. (Orientador) Dr. Cristiano Kulman

Instituto Federal do Rio Grande do sul, Campus Ibirubá.

Prof. Dr. Daniel Uhry

Instituto Federal do Rio Grande do sul, Campus Ibirubá.

Prof. Dr. Daniel Vieira Pinto

Instituto Federal do Rio Grande do sul, Campus Ibirubá.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar à Deus, que fez com que meus objetivos fossem alcançados durante todos os meus anos de estudos.

Aos meus pais e irmãos que me apoiaram em todas as decisões desde o início da minha escolha profissional, que me incentivaram nos momentos difíceis e compreenderam a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho.

Ao meu orientador por ter me guiado da melhor maneira possível, desempenhando sua função com dedicação e amizade.

Aos professores, em geral, por todos os conhecimentos passados da melhor forma possível, pelos conselhos na vida acadêmica, profissional e pessoal.

## RESUMO

A indústria metal mecânica desempenha um papel vital na economia global, fornecendo produtos essenciais para uma ampla gama de setores industriais. Entretanto a necessidade de se manter competitivo um ambiente de negócios em constante evolução exige a busca por aprimoramentos nos projetos e produtos disponíveis no mercado. Este trabalho de conclusão de curso (TCC) concentra-se no desenvolvimento de projeto desde sua fase inicial até o protótipo 3D (virtual) e uma estimativa de custo de materiais para produção. O objetivo central é o desenvolvimento de um protótipo 3D de um rolo faca para aplicações agrícolas que atenda as expectativas e exigências dos clientes mantendo um custo baixo. O rolo faca é um implemento agrícola utilizado principalmente para a amassamento e corte de culturas de cobertura e manejo de resíduos agrícolas. O estudo aborda a seleção de materiais, desenvolvimento do projeto, seleção de elementos de máquinas, estudos de casos que ilustram situações que podem acontecer tanto a campo quanto em transporte do implemento. A partir destes casos, realiza-se a análise de elementos finitos. Os resultados deste estudo fornecem percepções valiosas que podem ser utilizados para aprimorar a eficiência operacional, reduzir custos e elevar a qualidade do produto. Além disso, o TCC ressalta a importância do equilíbrio entre a resistência do implemento e o custo para fabricação para manter a competitividade em um mercado industrial dinâmico e desafiador.

**Palavras-chave:** Custo de fabricação. Implemento agrícola. Protótipo 3D.

## ABSTRACT

The metalworking industry plays a vital role in the global economy, providing essential products for a wide range of industrial sectors. However, the need to remain competitive in a constantly evolving business environment requires the search for improvements in the designs and products available on the market. This final course work (TCC) focuses on the development of a project from its initial phase to the 3D (virtual) prototype and an estimate of the cost of materials for production. The main objective is the development of a 3D prototype of a knife roller for agricultural applications that meets the expectations and requirements of customers while maintaining a low cost. The knife roller is an agricultural implement used mainly for crushing, cutting cover crops, and managing agricultural residues. The study addresses the selection of materials, project development, selection of machine elements, and case studies that illustrate situations that can occur both in the field and during transport of the implement. From these cases, finite element analysis is performed. The results of this study provide valuable insights that can be used to improve operational efficiency reduce costs and increase product quality. Furthermore, the TCC highlights the importance of balancing the implement's resistance and manufacturing costs to maintain competitiveness in a dynamic and challenging industrial market.

**Key words:** Manufacturing cost. Agricultural implement. 3D prototype.

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ASTM = *American Society for Testing and Materials*

$a$  = Aceleração

$\vec{a}$  = Aceleração

$B_1$  = Base externa do tubo

$B_2$  = Base interna do tubo

C.S = Coeficiente de Segurança

CAD = *Computer Aided Design*

$\cos\theta$  = Cosseno do ângulo

$Ca$  = Cateto adjacente

$F_t$  = Força de tração

$\vec{F}_{res}$  = Força resultante

HB = Dureza Brinell

$h_1$  = Altura externa do tubo

$h_2$  = Altura interna do tubo

$h$  = Hipotenusa.



$I$  = Momento de inércia

$J$  = Joule

MPa = Mega pascal

$m$  = Massa

SAE = *Society of Automotive Engineers*

SSAB = *Svenskt Stål AB*

STEP 3D = *Exchange of Product Data*

$V$  = Velocidade de deslocamento do trator

$v_f$  = Velocidade final

$v_i$  = Velocidade inicial

$P_n$  = Potência nominal do trator

$\eta$  = Rendimento do trator

$\Delta x$  = Deslocamento ou variação da posição

$\sum \int_{s_1}^{s_2} F_t ds = \text{Trabalho}$

$\frac{1}{2}mv_2^2 = \text{Energia cinética final}$

$\frac{1}{2}mv_1^2 = \text{Energia cinética inicial}$

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Relação de potência para tratores agrícolas. ....	24
Figura 2 — Fluxograma da estrutura funcional.....	41
Figura 3 — Montagem completa do rolo faca (MHRL0010). ....	44
Figura 4 — Submontagem do cabeçalho do rolo faca.....	45
Figura 5 — Conjunto montado do cabeçalho do rolo faca.....	45
Figura 6 — Conjunto montado do chassi traseiro. ....	46
Figura 7 — Conjunto montado do chassi central. ....	46
Figura 8 — Submontagem tirante cabeçalho (A) Vista isométrica.....	47
Figura 9 — Conjunto montado do rolo. ....	47
Figura 10 — Exemplos de pontos de reforços e soldas.....	48
Figura 11 — Esboço e diagrama do corpo livre implemento em operação. ....	50
Figura 12 — Esboço e diagrama do corpo livre implemento em transporte.....	50
Figura 13 — Esboço e diagrama do corpo livre implemento em transporte realizando manobra para direita. ....	51
Figura 14 — Esboço e diagrama do corpo livre implemento em operação realizando manobra para direita. ....	52
Figura 15 — Diagrama do corpo livre da simulação para o primeiro caso.....	53
Figura 16 — Diagrama do corpo livre da simulação para o segundo caso. ....	54
Figura 17 — Diagrama do corpo livre para o terceiro caso (A) Diagrama do cálculo (B) Diagrama da simulação. ....	55
Figura 18 — Diagrama do corpo livre da simulação para o quarto caso. Fonte: Autor (2024). ....	59
Figura 19 — Malha 06. ....	63
Figura 20 — Pontos de flexão e de tensões para o primeiro caso. ....	64
Figura 21 — Pontos de acúmulo de tensão do segundo caso.....	64
Figura 22 — Pontos de acúmulo de tensão do terceiro caso. ....	65
Figura 23 — Pontos de acúmulo de tensão do quarto caso. ....	66
Figura 24 — Pontos de aplicação de reforços para parte dianteira do implemento. ....	67
Figura 25 — Pontos de aplicação de reforços para parte traseira do implemento. ....	68
Figura 26 — Corte de seção do cabeçalho. ....	69

Figura 27 — Pontos de adição de reforços na estrutura central. ....	69
Figura 28 — Pontos de aplicação de reforços no cabeçalho. ....	70
Figura 29 — Pontos de aplicação de reforços na fixação do rolo. ....	70
Figura 30 — Protótipo virtual dois.....	71
Figura 31 — Pontos de flexão para o primeiro caso na proposta dois. (A) Ponto de tensão no cabeçalho, (B) Ponto de tensão no reforço dos tubos do cabeçalho, (C) Ponto de tensão no chassi do cabeçalho. ....	73
Figura 32 — Pontos de acúmulo de tensão no segundo caso na proposta dois.....	75
Figura 33 — Pontos de acúmulo de tensão no terceiro caso na proposta dois.....	76
Figura 34 — Ponto de acúmulo de tensão no quarto caso na proposta dois. ....	77

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1— Casa da qualidade. ....	38
Quadro 2— Tipo de malha com base nas características geométricas.....	60
Quadro 3— Parâmetros de malhas. ....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Especificações de chapa de aço SAE 1020.....	21
Tabela 2 — Especificações de chapa do aço SAE 1045. ....	22
Tabela 3 — Especificações da chapa do aço ASTM A36.....	22
Tabela 4 — Especificações da chapa do aço Hardox® 500.....	23
Tabela 5 — Comparativo de produtos de diferentes marcas.....	34
Tabela 6 — Especificações dos ciclos de vida e clientes. ....	36
Tabela 7 — Requisitos do cliente X requisitos do projeto. ....	36
Tabela 8 — Exigências do cliente e atributos. ....	37
Tabela 9— Resultados da casa da qualidade.....	38
Tabela 10 — Especificações do projeto. ....	38
Tabela 11 — Estrutura funcional e propostas de soluções.....	41
Tabela 12 — Estrutura funcional I e soluções.....	42
Tabela 13 — Estrutura funcional II e soluções. ....	42
Tabela 14 — Matriz conceito das Estruturas funcionais propostas.....	43
Tabela 15 — Parâmetros de malhas utilizados.....	61
Tabela 16 — Resultados das malhas. ....	62
Tabela 17 — Variação dos valores relativos das malhas. ....	62
Tabela 18 — Custo de materiais do projeto. ....	78
Tabela 19 — Especificações das propostas apresentadas. ....	79

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
1.1	JUSTIFICATIVA	18
1.2	OBJETIVOS	19
1.2.1	<b>Objetivos específicos</b>	<b>19</b>
1.3	DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	19
<b>2</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>20</b>
2.1	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1.1	<b>Soldagem em projetos</b>	<b>20</b>
2.1.2	<b>Materiais de engenharia</b>	<b>21</b>
2.1.3	<b>Parafusos</b>	<b>23</b>
2.1.4	<b>Força de tração de tratores</b>	<b>24</b>
2.1.5	<b>Princípio do trabalho e energia</b>	<b>25</b>
2.1.6	<b>Cinemática retilínea: movimento contínuo</b>	<b>26</b>
2.1.7	<b>Segunda lei de newton</b>	<b>26</b>
2.1.8	<b>Análise por elementos finitos</b>	<b>27</b>
2.1.9	<b>Momento de inércia de área</b>	<b>28</b>
2.1.10	<b>Informações adicionais</b>	<b>28</b>
2.1.10.1	Ciclo produtivo da agricultura no Brasil	28
2.1.10.2	Controle de plantas daninhas pré-semeadura e pós-semeadura	29
2.1.10.3	Compactação de solo	31
2.2	PROJETO	32
2.2.1	<b>Demanda do projeto</b>	<b>32</b>
2.2.2	<b>Projeto informacional</b>	<b>33</b>
2.2.2.1	Informações Técnicas	33

2.2.2.2	Ciclo de vida do produto .....	34
2.2.2.3	Ciclo de vida e respectivos clientes .....	35
2.2.2.4	Requisitos do projeto e do cliente .....	36
2.2.2.5	Especificações do projeto.....	37
<b>2.2.3</b>	<b>Projeto conceitual.....</b>	<b>40</b>
2.2.3.1	Escopo do problema.....	40
2.2.3.2	Estrutura funcional .....	40
<b>2.2.4</b>	<b>Projeto preliminar.....</b>	<b>44</b>
2.2.4.1	Leiaute.....	44
2.2.4.2	Lista de verificação .....	48
2.3	VALIDAÇÃO DA PROPOSTA .....	48
<b>2.3.1</b>	<b>Cálculos de Força .....</b>	<b>49</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Distribuição de esforços e tensões.....</b>	<b>49</b>
2.4	CASOS DE SIMULAÇÃO ESTÁTICA .....	52
<b>2.4.1</b>	<b>Primeiro caso - Manobra.....</b>	<b>52</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Segundo caso - Operação.....</b>	<b>54</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Terceiro caso - Queda .....</b>	<b>54</b>
<b>2.4.4</b>	<b>Quarto caso - Transporte .....</b>	<b>58</b>
2.5	ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DE MALHA .....	59
2.6	RESULTADO.....	63
<b>2.6.1</b>	<b>Protótipo virtual I .....</b>	<b>63</b>
2.6.1.1	Primeiro caso – Manobra – Modelo I .....	63
2.6.1.2	Segundo caso – Operação – Modelo I .....	64
2.6.1.3	Terceiro caso – Queda – Modelo I.....	65
2.6.1.4	Quarto caso – Transporte – Modelo I .....	65
<b>2.6.2</b>	<b>Proposta de solução.....</b>	<b>66</b>

<b>2.6.3</b>	<b>Protótipo virtual dois</b> .....	<b>71</b>
2.6.3.1	Atualização dos cálculos .....	71
2.6.3.2	Primeiro caso – Manobra – Modelo II .....	72
2.6.3.3	Segundo caso – Operação – Modelo II .....	74
2.6.3.4	Terceiro caso – Queda – Modelo II .....	75
2.6.3.5	Quarto caso – Transporte – Modelo II .....	76
2.7	SEVERIDADE DOS CASOS DE SIMULAÇÃO .....	77
2.8	CUSTO DE MATERIAIS PARA O PROTÓTIPO REAL .....	78
<b>3</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>80</b>
3.1	PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS .....	81
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>82</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A agricultura, como uma das atividades primárias para a humanidade, enfrenta desafios significativos no século XXI. À medida que a demanda por alimentos continua a crescer em resposta ao aumento da população global.

A expansão da agricultura para novas áreas tem diminuído constantemente, principalmente nos últimos 50 anos. O mais interessante é que, apesar dessa redução, nossas terras agrícolas continuam a fornecer alimentos e outros produtos para a população humana que continua crescendo. Nos últimos 40 anos, enquanto a produção de grãos aumentou aproximadamente 5 vezes. A de área de plantio para seu cultivo não chegou a dobrar no mesmo período (CROPLIFE, 2024).

Os agricultores se veem sob pressão para aumentar a produtividade e a eficiência, ao mesmo tempo em que enfrentam restrições ambientais cada vez mais rigorosas. Nesse cenário, a inovação tecnológica desempenha um papel importante na busca por soluções.

Neste trabalho de conclusão de curso, será realizado o projeto de um rolo faca, abordando os aspectos fundamentais da engenharia mecânica.

O objetivo principal é desenvolver as diferentes etapas do projeto, desde a concepção inicial até a finalização do protótipo virtual, com foco na otimização do desempenho e na maximização da eficiência operacional, juntamente com a otimização de recursos e custos.

Integrando os conceitos estudados ao longo do curso de Engenharia Mecânica, como mecânica dos sólidos, ciência dos materiais, elementos de máquinas, engenharia assistida por computador (CAE) e projeto mecânico, pretende-se aplicar os conhecimentos adquiridos para alcançar os objetivos necessários.

A agricultura desempenha um papel fundamental na alimentação global, enfrentando constantes desafios relacionados à produtividade e eficiência operacional. Com isso, a confiabilidade e durabilidade dos componentes das máquinas agrícolas são fatores essenciais para garantir a eficiência das operações no campo e reduzir os custos de manutenção.

O rolo-faca é usado para fazer o amassamento uniforme das plantas (ou o corte) de cobertura ou dos restos da cultura anterior, mantendo toda a palhada no solo. Esse é um dos pilares do plantio direto onde manter a palhada em cima do solo melhora as características físicas, químicas e biológicas (MALISZEWSKI, 2020).

O acamamento com rolo-faca deve ser realizado quando as plantas de cobertura estão no estágio máximo de acumulação de reservas, isto é, quando as sementes estão na fase de

grão leitoso. “Nesse momento, a planta concluiu o ciclo de crescimento radicular e da parte aérea, armazenando nutrientes em suas estruturas. Acamadas, em breve devolverão ao solo essas reservas (EPAGRI, 2020).

Também pode ser usado na picagem de resteva de milho, pois após a colheita ficam “tocos” da cultura (colmos), que devido a rigidez, que atrapalham a semeadura, podendo causar acúmulos de palhada na semeadora, para a destruição de soqueiras de algodão, manejo da vegetação, para acamar a palha do arroz, evitando o rebrote e a consequente disseminação do arroz vermelho, entre outras aplicações (MALISZEWSKI, 2020).

Dessa maneira o manejo eficiente das plantas de cobertura de solo, impacta em diferentes ocasiões do ciclo produtivo, como os níveis de infestações de plantas daninhas, habilidade de reter umidade, suporte a uma maior diversidade microbiológica no solo, entre outros.

De maneira geral o rolo faca pode ser utilizado de dois modos, a primeira com as facas do rolo com a parte cega das lâminas no sentido de saída do rolo. Deste modo ocorre o amassamento da cobertura e não o corte, tendo como consequência um tempo maior para decomposição da matéria orgânica. Com o solo coberto por um maior período causando economia para o produtor com herbicidas pré e pós-emergentes por conta da matéria orgânica presente no solo, dificultando o surgimento de plantas daninhas e aumentando a retenção de umidade por um período maior.

A outra maneira seria com a parte afiada das lâminas, causando o corte e, por consequência, o fracionamento dos resíduos vegetais, aumento a área de contato com o solo, que devido a maior umidade e presença de microrganismos, acelera o processo de decomposição. Esse processo facilita a operação de semeadura, ocasionando menores acúmulos na semeadora durante a semeadura, resultando em menor demanda de tração e menor número de paradas. Podendo ser utilizado ainda como incorporador de sementes miúdas no solo, após uma pré-semeadura a lançar antes da colheita e fazendo a operação com o rolo faca após a colheita.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A indústria de implementos agrícolas busca continuamente soluções para melhorar seus produtos, visando maior competitividade e rentabilidade. Dessa maneira se torna essencial o aprimoramento dos projetos.

Além da análise dos produtos já disponíveis no mercado, mas se torna necessário uma análise de custos para fabricação.

## 1.2 OBJETIVOS

Desenvolvimento de um Projeto de rolo faca para o setor agrícola visando atender os requisitos de projeto e de cliente, com foco na durabilidade aliado a análise de custo, para que o projeto não perca sua viabilidade. Com o intuito de ser fabricado e comercializado em larga escala.

### 1.2.1 Objetivos específicos

1. Investigar as tecnologias e materiais mais adequados para fabricação do rolo faca;
2. Projetar um protótipo virtual do rolo faca, utilizando programas de modelagem 3D e técnicas de engenharia assistida por computador;
3. Análise de custos.

## 1.3 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho limita-se no desenvolvimento de um projeto de rolo faca, com o objetivo de realizar um protótipo 3D, junto com a análise de elementos finitos, especificação de componentes e seleção de materiais.

## **2 DESENVOLVIMENTO**

### **2.1 REFERENCIAL TEÓRICO**

Este capítulo apresenta os conhecimentos básicos relacionados ao trabalho para facilitar o entendimento. São abordados os temas de soldagem, onde foi utilizado em toda estrutura por conta da facilidade da união dos componentes. Até mesmo por serem regiões fixas, ou seja, componentes que não são substituíveis e não necessitam de reposição.

Parafusos foram utilizados para união de peças que sejam necessárias realizar a substituição e em aplicações de cargas de tração e compressão.

Foi selecionado alguns materiais que pudessem ser utilizados para desenvolvimento, tratando principalmente de suas especificações técnicas, para auxiliar na decisão de qual utilizar.

Força de tração em tratores é importante para o trabalho, pois os métodos e cálculos presentes na norma SAE EP496.3 (2006) que irão determinar a força para ser utilizada em equações do princípio do trabalho, energia e a segunda lei de Newton.

Com estas equações foi determinado parâmetros a partir de fenômenos que acontecem na operação e uso do implemento, para que estes parâmetros possam ser utilizados na análise de elementos finitos.

A análise de elementos finitos é um dos pontos mais importantes do trabalho, sendo onde será determinado se a estrutura do implemento irá falhar de alguma maneira, evitando custos e aumentando as chances de sucesso com protótipos reais.

Conceitos sobre momento de inércia serão revisados a fim de embasar a adição de certos tipos de reforços, e modificações da estrutura do implemento em regiões ou pontos em que a análise de elementos finitos mostrar necessário.

E ainda informações adicionais, tratando principalmente dos ciclos produtivos do Brasil, controle de plantas daninhas e compactação do solo, por se tratar de um produto que está sendo desenvolvido para o meio agrícola.

#### **2.1.1 Soldagem em projetos**

A soldagem de metais por arco elétrico exige a aplicação de calor suficiente para fundir o material base, enquanto um material de adição compatível é incorporado para unir as duas partes. Quando a solda é adequadamente realizada, ela pode alcançar uma resistência

comparável ou maior do que a do material base. Porém se executada de forma inadequada, pode comprometer a integridade da estrutura (FELIZARDO, 2016).

Com o surgimento de trincas por excesso de carregamento, inclusões de escória, trincas por solidificação, trincas induzidas por hidrogênio, entre outros problemas que podem ser gerados pela realização de solda com parâmetros errados ou métodos incoerentes com a aplicação (RODRIGUES et al., 2022).

Se possível, não coloque soldas em flexão. Se existirem momentos fletores, tente colocar os cordões em posições de momento zero ou de valor baixo, ou distribua as soldas para receber tensões de cisalhamento ou axial (tração/compressão). Cargas de cisalhamento aplicadas à superfície através da solda são preferíveis (NORTON, 2013).

### 2.1.2 Materiais de engenharia

Há uma gama grande de materiais diferentes para serem utilizados em projetos de engenharia, mas um sistema muito utilizado é a classificação SAE (*Society of Automotive Engineers*).

Utilizado para categorizar a composição e as propriedades mecânicas dos aços, esse sistema de classificação ajuda engenheiros e fabricantes a identificar rapidamente os tipos de aço e suas características específicas, garantindo que o material adequado seja selecionado para uma aplicação particular. Como por exemplo o Aço SAE 1020 (Tabela 1), Aço SAE 1045 (Tabela 2).

Tabela 1 — Especificações de chapa de aço SAE 1020.

<b>Propriedades</b>	<b>Valores</b>
Teor de Carbono	0,2%
Resistência a Tração	420 MPa
Limite de Escoamento	350 MPa
Usinabilidade	Boa
Soldabilidade	Muito Boa

Fonte: Compraco (2024).

Tabela 2 — Especificações de chapa do aço SAE 1045.

<b>Propriedades</b>	<b>Valores</b>
Teor de Carbono	0,43 a 0,50%
Dureza	163 a 179 Brinell (HB)
Resistência a Tração	565 a 625 MPa
Limite de Escoamento	530 a 505 MPa
Usinabilidade	Boa
Soldabilidade	Boa, exige técnicas apropriadas

Fonte: Compraco (2024).

Outra Classificação de aços comumente utilizada em projetos é a ASTM (*American Society for Testing and Materials*), são semelhantes às normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) no Brasil. Ambas têm como objetivo principal orientar e estabelecer padrões para produtos, especialmente os fabricados em aço, abrangendo suas características, aplicações e especificações.

Essas normas garantem que os materiais atendam a critérios rigorosos de qualidade, resultando em produtos mais resistentes, confiáveis e seguros. Sendo o aço ASTM A36 (Tabela 3), comumente utilizado em projetos por conta de suas especificações.

Tabela 3 — Especificações da chapa do aço ASTM A36.

<b>Propriedades</b>	<b>Valores</b>
Teor de Carbono	0,26%
Dureza	119 a 162 Brinell (HB)
Resistência a Tração	450 a 550 MPa
Limite de Escoamento	220 a 250 MPa
Soldabilidade	Muito Boa

Fonte: Compraco (2024).

Mas há outras classificações de aços e siderúrgicas que trabalham com seus próprias classificações como a SSAB, é uma siderúrgica que desenvolve aços de alta resistência e aços temperados, bobinas, chapas, entre outros.

Como por exemplo o aço Hardox® 500 (Tabela 4), que é um aço resistente ao desgaste.

Tabela 4 — Especificações da chapa do aço Hardox® 500.

<b>Propriedades</b>	<b>Valores</b>
Teor de Carbono	0,3%
Dureza	500 Brinell (HBW)
Usinabilidade	Ruim
Soldabilidade	Boa (Exige cuidados)
Resistência a Tração	1400 MPa
Limite de Escoamento	1400 MPa
Alongamento	25% a 50%

Fonte: SSAB (2024).

### 2.1.3 Parafusos

Os parafusos não são apenas fixadores simples, mas componentes que afetam diretamente a segurança e a funcionalidade de máquinas e estruturas. Eles são projetados para resistir a forças axiais e de cisalhamento.

Um parafuso de fixação normalmente suportam melhor cargas axiais de tração. Para montagens carregadas de forma estática, uma pré-carga que gera uma tensão no parafuso de até 90% da resistência de prova. Para juntas carregadas dinamicamente (carga de fadiga), uma pré-carga de 75% ou mais da resistência de prova é comumente utilizada (NORTON, 2013).

Contudo, não são indicados para posicionamentos de peças, mas sim os pinos de fixação. Existem vários tipos diferentes de parafusos disponíveis variando conforme sua aplicação, podendo ser utilizado para manter componentes unidos.

Sendo classificados por:

- Uso;
- Tipo de rosca;
- Tipo de cabeça.

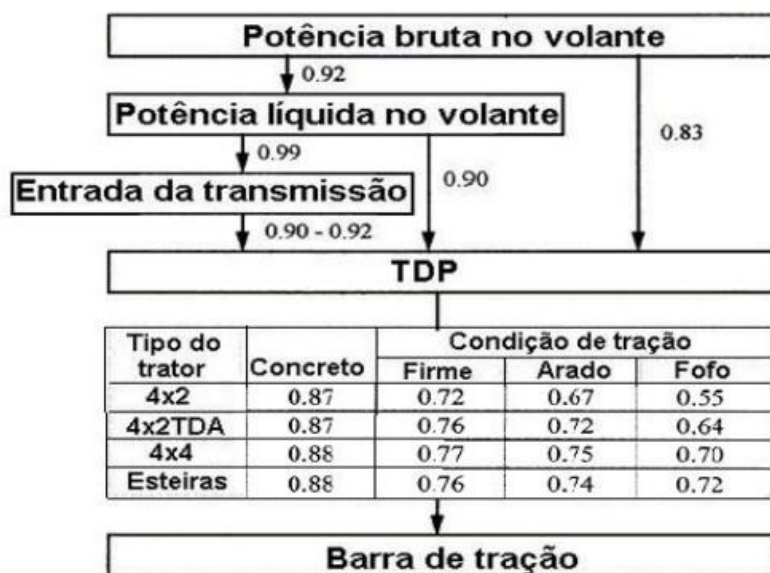
### 2.1.4 Força de tração de tratores

O trator tem como principal função transformar a energia química de um combustível através da queima em trabalho mecânico sob diferentes formas: tração através da barra de tração, tomada de potência e sistema hidráulico. Esses mecanismos permitem movimentar, tracionar máquinas e implementos utilizados durante a realização das atividades a campo (RUSSINI, 2012).

Quando o rodado de um trator se movimenta sobre solo agrícola, desenvolve-se uma força originária da resistência do solo ao cisalhamento, a qual é denominada força potencial do solo. Tanto no caso da esteira, como no do pneu, os espaços entre as garras tornam-se preenchidos com solo, de forma que quando o trator desenvolve esforço tratório máximo ocorre o cisalhamento (VARELLA, 2018).

Segundo a norma SAE EP496.3 (2006), a potência total gerada pelo trator não chega a barra de tração do trator por conta das perdas dos vários componentes e sistemas mecânicos utilizados como, embreagem, transmissão, diferencial, redução final, rodados. Tem-se uma variação de acordo com o tipo de solo em que está operando, tendo assim diferentes rendimentos (Figura 1).

Figura 1 — Relação de potência para tratores agrícolas.



Fonte: Adaptado de ASAE (2006, p. 3).



É possível determinar a força na barra de tração do trator segundo a (Equação 1), de Deters (2014). As unidades apresentadas são usuais no meio da agricultura, por conta utiliza-se nas equações. Porém os resultados serão apresentados no SI (Sistema Internacional de Unidades).

Equação 1 — Força na barra de tração do trator.

$$P_n \eta = \frac{F_t V}{270} \quad (1)$$

Sendo:

$P_n$  = Potência nominal do trator (cv);

$\eta$  = Rendimento do trator;

$F_t$  = Força de tração (N);

$V$  = Velocidade de deslocamento do trator (km/h).

Isolando o  $F_t$ , tem-se:

Equação 2 — Força na barra de tração do trator retrabalhada.

$$F_t = \frac{P_n \eta 270}{V} \quad (2)$$

### 2.1.5 Princípio do trabalho e energia

Trabalho é definido como a energia transferida para um objeto quando uma força aplicada a ele causa um deslocamento na direção da força. Em outras palavras, trabalho é realizado quando uma força exerce uma influência sobre um objeto, fazendo-o mover-se. Energia é a capacidade de realizar trabalho. Ela pode se manifestar de diversas formas, como energia cinética, energia potencial, energia térmica, energia elétrica, entre outras (BEER, 2012).

A equação que define o princípio de trabalho e energia é a (Equação 3), O termo no lado esquerdo é a soma do trabalho realizado por todas as forças atuando sobre a partícula quando ela se desloca do ponto 1 para o ponto 2. Os dois termos no lado direito definem a energia cinética final e inicial da partícula.

Entretanto, diferentemente do trabalho, que pode ser positivo ou negativo, a energia cinética é sempre positiva, independentemente da direção do movimento da partícula.

Equação 3 — Princípio do trabalho e energia para a partícula.

$$\left| \sum \int_{s_1}^{s_2} F_t ds \right| = \left| \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2 \right| \quad (3)$$

Sendo:

$$\sum \int_{s_1}^{s_2} F_t ds = \text{Trabalho (J)};$$

$$\frac{1}{2}mv_2^2 = \text{Energia cinética final(J)};$$

$$\frac{1}{2}mv_1^2 = \text{Energia cinética inicial(J)}.$$

### 2.1.6 Cinemática retilínea: movimento contínuo

A cinemática retilínea é o ramo da física que estuda o movimento de objetos ao longo de uma linha reta. O movimento contínuo se refere a trajetórias onde a posição do objeto varia de forma contínua ao longo do tempo.

Porém estas equações levam em consideração o tempo de percurso, já a (Equação 4) não se necessita desta informação. Sendo possível descobrir a velocidade final, inicial, variação de deslocamento e aceleração de um corpo que esteja em um movimento uniformemente variado.

Um exemplo típico de movimento com aceleração constante ocorre quando um corpo cai livremente em direção ao solo. Se a resistência do ar é desprezada e a distância da queda é curta, a aceleração direcionada para baixo quando o corpo está próximo do solo é constante e de aproximadamente  $9,81 \text{ m/s}^2$  (HIBBELER, 2017).

Equação 4 — Velocidade como uma função da posição.

$$v_f^2 = v_i^2 + 2a\Delta x \quad (4)$$

Sendo:

$$v_f = \text{Velocidade final (m/s)};$$

$$v_i = \text{Velocidade inicial (m/s)};$$

$$\Delta x = \text{Deslocamento ou variação da posição (m)};$$

$$a = \text{Aceleração(m/s}^2\text{)}.$$

### 2.1.7 Segunda lei de newton

Segunda Lei de Newton A força resultante que age sobre um corpo é igual ao produto da massa do corpo pela aceleração (HALLIDAY. 2012).

A Segunda Lei de Newton (Equação 5) explica como o movimento de um objeto muda quando forças são aplicadas. De acordo com essa lei, quanto maior a massa de um objeto, maior será a força necessária para gerar uma certa aceleração.

Da mesma forma, quanto maior for a força aplicada em um corpo, maior será a sua aceleração, desde que a massa permaneça constante.

Equação 5 — Segunda lei de Newton

$$\vec{F}_{res} = m\vec{a} \quad (5)$$

Sendo:

$\vec{F}_{res}$  = Força resultante (N);

$m$  = Massa(kg);

$\vec{a}$  = Aceleração (m/s<sup>2</sup>).

### 2.1.8 Análise por elementos finitos

A análise por elementos finitos é uma técnica de análise numérica que permite resolver problemas de engenharia. A ideia básica é dividir o domínio do problema em elementos finitos, que são pequenos pedaços do domínio que são aproximados por formas simples.

As tensões variam através do contínuo de qualquer componente. Dividindo esse componente em um número finito de elementos discretos conectados pelos seus nós (chamados de malha), pode-se obter uma aproximação das tensões e deformações, em qualquer parte do componente, para um dado conjunto de condições de contorno e de cargas aplicadas em alguns nós da estrutura (NORTON, 2013).

Os tipos de elementos finitos mais comuns são os elementos triangulares, quadrangulares, hexaedros e tetraédricos.

Quanto maior a densidade da malha, maior a precisão da solução. Em áreas com gradientes de tensão e/ou variações geométricas, é recomendado uma malha mais refinada e de maior densidade visando obter melhores resultados da análise (ESSS, 2019).

Como forma de verificar a convergência de uma malha, ou seja, realizar a análise de convergência, uma mesma região de interesse pode ser refinada várias vezes comparando a mudança de resultados entre elas. Se houver pouca variação no valor de tensão máxima entre

2 malhas de refinamentos distintos, então pode-se considerar tal densidade de malha adequada para a análise (BUDYNAS, 2011).

### 2.1.9 Momento de inércia de área

O momento de inércia de área é uma propriedade geométrica utilizada em resistência dos materiais e mecânica dos sólidos. Ele representa a resistência de uma seção transversal de um elemento estrutural à flexão.

Por exemplo uma viga sendo submetida a uma força que tende a curvÁ-la. A resistência da viga a essa flexão depende não apenas do material de que ela é feita, mas também da forma da sua seção transversal.

Se o momento de inércia de uma área em torno de um eixo centroide for conhecido, poderemos determinar o momento de inércia da área em torno de um eixo paralelo correspondente por meio do teorema dos eixos paralelos (HIBBELER, 2010).

Suas equações variam de acordo com a forma geométrica de cada componente estrutural, no caso do presente trabalho será utilizado a (Equação 6) para determinar o momento de inércia de tubos quadrados ocós segundo (BEER, 2011).

Equação 6 — Momento de inércia para tubos retangulares.

$$I = \frac{1}{12} B_1 h_1^3 - \frac{1}{12} B_2 h_2^3 \quad (6)$$

Sendo:

$I$  = Momento de inércia ( $mm^4$ );

$B_1$  = Base externa do tubo (mm);

$h_1$  = Altura externa do tubo (mm);

$B_2$  = Base interna do tubo (mm);

$h_2$  = Altura interna do tubo (mm).

### 2.1.10 Informações adicionais

#### 2.1.10.1 Ciclo produtivo da agricultura no Brasil

Segundo ARMAC (2024), O ciclo produtivo da agricultura brasileira pode ser dividido em diferentes etapas sendo:

- Preparação do solo: O preparo do solo ocorre antes da semeadura para proporcionar as melhores condições para a semeadura, favorecer o desenvolvimento das plantas e fazer com que a cobertura da superfície ofereça condições físicas adequadas. Nesta etapa, pode ser planejado o controle eficiente da infiltração de água, da erosão e o fornecimento de nutrientes antes de dar início à semeadura.
- Semeadura: A semeadura depende do tipo de cultura e exige um planejamento eficiente. As lavouras precisam ser semeadas em determinadas épocas do ano, conforme as necessidades específicas de cada cultura e cultivar, para obter o máximo potencial. Isso geralmente é realizado com a aplicação de produtos para combater pragas e o uso de máquinas pesadas.
- Irrigação: Após a semeadura, pode ser preciso fazer a irrigação de algumas culturas e a aplicação de fertilizantes.
- Colheita: A colheita não pode ser realizada antes nem depois do momento ideal para evitar a perda de grãos não amadurecidos ou em decomposição. Colher requer procedimentos certos para não perder a produção. Por isso, ela precisa ser feita quando a cultura estiver totalmente madura, na estação correta e após o período de maturação.
- Armazenamento: É preciso armazenar os grãos em um local adequado. Esse espaço de armazenamento requer condições favoráveis e o uso de métodos adequados para evitar perda de grãos. A colheita madura, cortada e colhida deve ser acondicionada em lugares onde não corra o risco de destruição pela existência de roedores ou de condições ambientais desfavoráveis.

O ciclo produtivo da agricultura brasileira pode variar de acordo com a cultura, clima, solo e outros fatores. Sendo que as práticas agrícolas utilizadas no Brasil estão em constante evolução.

#### 2.1.10.2 Controle de plantas daninhas pré-semeadura e pós-semeadura

O controle de plantas daninhas segundo EMBRAPA (2018), é de extrema importância para a agricultura, pois as plantas daninhas podem causar diversos prejuízos às culturas, como a competição por recursos, alojamento de pragas e doenças, aumento dos custos de produção e redução da qualidade do produto.

Pode ser realizado o controle pré-semeadura e pós-semeadura, mas preferencialmente no primeiro caso, pois ainda não temos a cultura de interesse instalada na área.

No manejo de plantas daninhas em pré-semeadura, podem ser realizados os seguintes manejos:

Controle cultural:

- Rotação de culturas: A rotação de culturas com diferentes tipos de plantas pode ajudar a reduzir a população de plantas daninhas;
- Cobertura morta: A cobertura morta é um material que é aplicado ao solo ou o material que ficou no solo após a colheita da cultura anterior para cobri-lo. A cobertura morta pode ajudar a reduzir a população de plantas daninhas bloqueando a luz solar e impedindo que as sementes de plantas daninhas germinem.

Controle mecânico:

- Mão de obra: O controle de plantas daninhas manual envolve a remoção das plantas daninhas à mão ou com ferramentas manuais;
- Máquinas: Pode ser feito com tratores, cultivadores e enxadas rotativas ou com o uso de rolo faca. Onde o mesmo pode realizar o corte de plantas daninhas, também o tombamento e corte de alguma cultura que estiver instalada na área ocasionando a morte das mesmas e a falta de luz solar para plantas daninhas emergentes.

Controle químico:

- Herbicidas: Os herbicidas são produtos químicos que são usados para controlar plantas daninhas.

Pós-semeadura:

Controle mecânico:

- Mão de obra: O controle de plantas daninhas manual envolve a remoção das plantas daninhas à mão ou com ferramentas manuais;
- Máquinas: O controle de plantas daninhas com máquinas envolve o uso de máquinas para remover as plantas daninhas.

Controle químico:

- Herbicidas: Os herbicidas são produtos químicos que são usados para controlar plantas daninhas. São utilizados principalmente antes da semeadura, mas em alguns casos são utilizados após semeadura, porém é necessário tomar cuidados para não afetar o potencial produtivo da cultura de interesse.

### 2.1.10.3 Compactação de solo

O estudo de produtividade de soja e propriedades físicas de um latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação, foi realizado na Universidades de Cruz Alta – UNICRUZ e a Universidade Federal de Santa Maria– UFSM, com o objetivo de avaliar os efeitos de diferentes sistemas de manejo e estados de compactação do solo em um Latossolo Vermelho distroférico na produtividade de seis cultivares de soja.

Os resultados mostraram que a compactação do solo afetou a densidade e a porosidade, mas não teve impacto significativo na produtividade das culturas. Concluiu-se que a compactação moderada não comprometeu o rendimento da soja, indicando que práticas de manejo podem ser ajustadas sem perdas significativas na produção.

São solos profundos e bem desenvolvidos, com elevado grau de intemperismo, por isso são pobres em fertilidade natural. São solos com elevado potencial agrícola, entretanto, demandam correção da fertilidade com a aplicação de adubos e calcário. Apresentam elevada retenção de água, boa densidade e drenagem. Também demandam práticas conservacionistas para evitar o processo erosivo (SANTOS, 2018).

Os maiores valores de densidade do solo (Ds) ocorreram no solo sob PD-C3 e PD-C5, nas profundidades de 0–0,05 e 0,05–0,10 m. Nessas camadas e estados de compactação, em virtude de o solo ter atingido valores de densidade do solo semelhantes e, ou, superiores a 1,45 Mg m<sup>-3</sup> e de resistência à penetração do solo (RP) superiores a 2,0 MPa, o solo pode ser considerado compactado (SECCO et al., 2004).

Tendo em vista que os valores de RP foram obtidos em condições de umidade do solo elevada (média de 0,27 kg kg<sup>-1</sup> na camada de 0–0,40 m), isso pôde restringir o pleno desenvolvimento da cultura à medida que o solo foi sofrendo redução em seu conteúdo de água (SECCO et al., 2004).

Esses resultados destacam a importância de estabelecer limites de compactação do solo para proteger a produtividade das culturas, como a soja, e ressaltam a necessidade de adotar práticas de manejo adequadas para minimizar os impactos negativos da compactação, garantindo um ambiente propício para o desenvolvimento das plantas e a maximização da produção agrícola.

O rolo faca é um cilindro com facas que irá passar por toda área, podendo ocasionar compactação do solo, dependendo de alguns fatores como a pressão exercida no solo, sendo dependente do peso e da distribuição de carga ao longo da superfície que estará em contato com

o solo.

Também os manejos com plantas de cobertura, evitando o chamado “vazio outonal” (evitando deixar o solo sem cobertura, de preferência viva) e que utilizam o rolo para manejar a cultura antes da semeadura, tendem a diminuir problemas de compactação. Ação das raízes (rotação) e da macro e micro fauna do solo.

Condição do solo, sendo a umidade um fator a ser levado em conta. Pois solos úmidos são mais suscetíveis a compactação do que solos mais secos e condições de projeto como o diâmetro do cilindro, formato das laminas irão influenciar na distribuição de forças.

## 2.2 PROJETO

Neste capítulo, será abordado a metodologia utilizada para o desenvolvimento do projeto 3D. o projeto foi dividido nas seguintes fases:

Demanda do projeto refere-se à necessidade ou solicitação que impulsiona a criação de um projeto específico. Ela abrange as razões, objetivos e requisitos que justificam a implementação do projeto;

Projeto informacional é uma fase do desenvolvimento de um produto que tem como objetivo estabelecer as especificações dos clientes e especificações de projeto. Para isso, é necessário analisar o problema do projeto de forma detalhada, de modo a obter todas as informações necessárias para entender o problema;

O projeto conceitual tem como objetivo validar uma ideia e confirmar uma solução para atender as necessidades relatadas;

Projeto preliminar é a execução da proposta apresentada, após se tem a validação da proposta sendo onde é verificado se foram atingidos os requisitos propostos.

### 2.2.1 Demanda do projeto

Este projeto visa o desenvolvimento de um rolo faca voltado para aplicações na agricultura, sendo utilizado para diversas operações como o amassamento de culturas, corte de culturas, preparo da área a ser realizada a semeadura.

O mercado agrícola expressa algumas necessidades e desejos para este tipo de implemento agrícola, que são eles:

- Eficiência na operação: É indispensável que o implemento desempenhe com eficiência as operações requisitadas;



- **Robustez:** Se torna necessário um implemento robusto capaz de resistir a esforços requisitados no campo, como variações bruscas de terreno, impactos contra pedras, tocos, torrões e raízes;
- **Versatilidade:**
  - Variação de peso total do implemento;
  - Possibilidade de inversão das “facas”.
- **Fácil manuseio e manutenção:** É essencial que o implemento seja de fácil manuseio e manutenção. Podendo ser operado por pessoas com diferentes níveis de experiência e capacitação, sendo possível realizarem as manutenções preventivas como a lubrificação periódica dos rolamentos.

## **2.2.2 Projeto informacional**

### **2.2.2.1 Informações Técnicas**

Foi definido o desenvolvimento do rolo faca de 4 m, com o objetivo de atender o público alvo de pequenos e médio produtores rurais no estado do Rio Grande do Sul, na região do Alto Jacuí.

Sendo necessário em torno de 80 cv, para conseguir realizar a operação. Informação foi obtida através a tabela do comparativo entre concorrentes que já produzem e comercializam o implemento agrícola.

As principais funções do rolo faca são:

- Corte de vegetação;
- Preparação da área;
- Amassamento de vegetação;
- Controle de plantas daninhas;
- Incorporação de sementes miúdas com plantas de cobertura pré-existent.

No mercado atual já existem empresas que realizam a fabricação e vendas deste produto, pode ser observado na (Tabela 5) uma relação dos principais dados sobre os equipamentos das concorrentes.

Tabela 5 — Comparativo de produtos de diferentes marcas.

<b>Especificações</b>	<b>Concorrente 1</b>	<b>Concorrente 2</b>	<b>Concorrente 3</b>	<b>Concorrente 4</b>
Largura de transporte(mm)	4300	2200	Não informa	4400
Largura de operação (mm)	3900	4300	4000	4000
Comprimento de transporte (mm)	3000	6000	Não informa	Não informa
Diâmetro do Rolo sem as facas (mm)	483	600	Não informa	600
Diâmetro do Rolo com as facas (mm)	690	830	Não informa	830
Quantidade de facas no rolo	40 Unidades	36 Unidades	60 unidades	44 unidades
Material das facas	Aço <i>Hardox</i> ® 450	Não informa	Não informa	Aço <i>Hardox</i> ® 500
Lastreamento do Rolo em Litros (l)	800	450	Não informa	970
Peso aproximado sem lastro (kg)	1200	2700	1750	1450
Peso aproximado com lastro (kg)	2000	Não informa	3250	Não informa
Velocidade máxima de operação (km/h)	12	17	12	12
Velocidade máxima de transporte (km/h)	10	8	15	12
Potência necessária (CV)	80-100	75-100	80	80

Fonte: Autor (2024).

#### 2.2.2.2 Ciclo de vida do produto

- **Concepção e Planejamento:** Nesta fase inicial, são identificadas as necessidades e requisitos para o implemento. Projeto informacional e Conceitual. Isso inclui a definição das especificações técnicas, análise de mercado, estudos de viabilidade e planejamento do projeto.
- **Desenvolvimento:** Após o planejamento, começa a fase de design e desenvolvimento. Engenheiros e designers trabalham para criar o conceito do mesmo até alcançar um produto funcional.

- **Produção e Fabricação:** Com o desenvolvimento finalizado, referenciado entra na fase de produção e fabricação. São realizadas aquisição de materiais, montagem dos componentes, controle de qualidade e produção.
- **Armazenagem:** Após a fabricação dos produtos, eles são armazenados até que seja realizado a compra dos mesmo e logo e dá início da distribuição. Porém alguns produtos já são vendidos antes mesmo de serem fabricados.
- **Implantação e Distribuição:** Após a produção, realizado a distribuição para os clientes finais. Isso pode envolver logística, transporte e instalação, dependendo das características e das necessidades dos clientes.
- **Pós-venda:** é a assistência necessária que o cliente precisa, como fornecimento de peças de reposição, bem como explicações de como o implemento funciona no caso de dúvidas. Junto com uma garantia do produto de terminada pela empresa, que geralmente é de um ano.
- **Uso e Manutenção:** É utilizado pelos operadores para realizar as suas funções. Durante esse período, são realizadas manutenções preventivas e corretivas para garantir o bom funcionamento e prolongar a vida útil do equipamento. Além da distribuição de peças pela fabricante durante um período determinado.
- **Atualização e melhorias:** Com o tempo, podem surgir novas tecnologias, demandas ou regulamentações do mercado que exigem atualizações ou melhorias no projeto.
- **Fim de Vida Útil e Descarte:** Eventualmente, o implemento chega ao fim de sua vida útil, seja devido à obsolescência, desgaste ou falta de suporte. Nesta fase, são tomadas decisões sobre o descarte adequado do equipamento.

A empresa que irá desenvolver o projeto bem como a fabricação vai ser a JG Strategie, sendo seus principais sócios o Jordano Marques Pedroso. Sendo o Jordano, responsável pelo desenvolvimento do projeto.

Já a produção de um protótipo físico será realizada em um futuro próximo, com ajuda de colaboradores e empresas terceirizadas.

### 2.2.2.3 Ciclo de vida e respectivos clientes

Foi realizado o levantamento do ciclo de vida e relacionado com seus respectivos clientes (Tabela 6). Com o objetivo de identificar quais clientes ficam responsáveis de cada ciclo de vida.

Tabela 6 — Especificações dos ciclos de vida e clientes.

<b>Ciclos de vida</b>	<b>Clientes</b>
Concepção e planejamento	O Autor
Design e desenvolvimento	O Autor
Produção e Fabricação	JG Strategie
Implantação e distribuição	JG Strategie
Pós-venda	JG Strategie
Uso e manutenção	Cliente final
Atualização e melhorias	JG Strategie
Fim da vida útil e descarte	Cliente Final

Fonte: Autor (2024).

#### 2.2.2.4 Requisitos do projeto e do cliente

Realizou-se o levantamento dos requisitos de projeto, requisitos de cliente, exigências e atributos (Tabela 7) e (Tabela 8). Com o intuito de verificar o que se deveria ser analisado durante a execução do projeto.

Tabela 7 — Requisitos do cliente X requisitos do projeto.

<b>Requisitos do cliente</b>	<b>Requisitos do projeto</b>	<b>Ciclos de vida</b>
Preparo de solo adequado	Largura de transporte	Uso e manutenção
Custo competitivo	Resistência	Implantação e distribuição
Fácil manuseio e manutenção	Largura de operação	Uso e manutenção
Compatibilidade com tratores	Peso adequado	Concepção e planejamento
Economia de combustível	Baixo custo	Concepção e planejamento
Demorar a se degradar	Comprimento de transporte	Concepção e planejamento
	Diâmetro do Rolo sem as facas	Concepção e planejamento
	Diâmetro do Rolo com as facas	Concepção e planejamento

<b>Requisitos do cliente</b>	<b>Requisitos do projeto</b>	<b>Ciclos de vida</b>
	Quantidade de facas no rolo	Concepção e planejamento
	Lastreamento do Rolo em Litros	Concepção e planejamento
	Peso aproximado sem lastro	Concepção e planejamento
	Peso aproximado com lastro	Concepção e planejamento

Fonte: Autor (2024).

Tabela 8 — Exigências do cliente e atributos.

#### **Exigências do cliente e Atributos**

---

Preparo de solo adequado

Robusto e Durabilidade

Fácil manuseio e manutenção

Compatibilidade com diferentes tratores

Desempenho em diferentes condições climáticas

Eficiência na operação

Ajuste de altura do cabeçalho

---

Fonte: Autor (2024).

#### 2.2.2.5 Especificações do projeto

Como não é possível atender os requisitos de projeto de maneira ideal, por conta de alguns serem opostos. Como por exemplo a resistência e baixo custo, é colocado os requisitos de cliente e de projeto em um quadro da casa da qualidade (Quadro 1). Com o objetivo de encontrar os requisitos de projeto com uma maior importância relativa (Tabela 9). Se torna necessário o levantamento das especificações do projeto e suas saídas desejadas (Tabela 10).

Quadro 1— Casa da qualidade.

Grau de relacionamento entre AC's e CE's  FORTE = 5 MODERADO = 3 FRACO = 1		Largura de transporte	Resistência	Largura de operação	Peso adequado	Baixo custo	Comprimento de transporte	Diâmetro do rolo sem as facas	Diâmetro do rolo com as facas	Quantidades de facas no rolo	Lastreamento do rolo em litros											GRAU DE IMPORTÂNCIA	PESO RELATIVO (%)		
		+	+	-	+	+	+	-	-	-	-	-	+	+											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14										
ATRIBUTOS DO CONSUMIDOR (AC's)		CARACTERÍSTICAS DE ENGENHARIA (CE'S)																							
Preparo do solo adequado	1	1	1	1	5	1	1	3	3	5	5												10	15,6	
Custo	2	1	5	5	5	5	1	2	1	5	5												8	12,5	
Fácil manuseio	3	5	1	2	1	1	5	1	1	1	1												6	9,4	
Fácil manutenção	4	1	1	1	1	1	1	3	1	5	1												6	9,4	
Compatibilidade com tratores	5	3	1	1	1	1	1	1	2	1	1												10	15,6	
Economia de combustível	6	1	1	4	5	1	1	2	3	3	5												10	15,6	
Demora a se degradar	7	1	5	1	2	1	1	1	1	1	1												8	12,5	
Facilidade de transporte	8	5	1	1	2	1	5	1	2	1	1												6	9,4	
	9																								
	10																								
	11																								
	12																								
	13																								
	14																								
PESO DE IMPORTÂNCIA		206,4	200,0	206,2	296,7	150,0	175,2	178,1	187,4	281,2	274,8												64	100,0	
IMPORTÂNCIA RELATIVA (%)		9,57	9,28	9,56	13,76	6,96	8,13	8,26	8,69	13,04	12,75														

Fonte: Autor (2024).

Tabela 9— Resultados da casa da qualidade.

<b>Requisitos de projeto</b>	<b>Importância relativa (%)</b>
Peso adequado	13,76
Quantidade de facas no rolo	13,04
Lastreamento dos rolos	12,75
Largura de transporte	9,57
Largura de operação	9,56
Resistência	9,28
Diâmetro do rolo com as facas	8,69
Comprimento de transporte	8,13
Baixo custo	6,96

Fonte: Autor (2024).

Tabela 10 — Especificações do projeto.

<b>Requisitos</b>	<b>Objetivos</b>	<b>Sensor</b>	<b>Saídas desejadas</b>
Peso aproximado sem lastro	Otimizar	Balança	Menor possível

<b>Requisitos</b>	<b>Objetivos</b>	<b>Sensor</b>	<b>Saídas desejadas</b>
Peso aproximado com lastro	Otimizar	Balança	Permitir o corte das plantas desejadas
Quantidade de facas no rolo	Otimizar	Software de Desenho e modelagem 3D	Tamanho dos vegetais após o uso do implemento
Lastreamento do Rolo em Litros	Otimizar	Balança	Permitir o corte das plantas desejadas
Largura de transporte	Minimizar	Software de Desenho e modelagem 3D	Menor Largura possível, que não afete a estabilidade.
Largura de operação	Maximizar	Software de Desenho e modelagem 3D	Máxima largura possível
Resistência	Maximizar	Simulação 3D e testes a campo	Minimizar Quebras a campos e surgimento de trincas na estrutura.
Diâmetro do Rolo sem as facas	Otimizar	Software de Desenho e modelagem 3D	Menor compactação do solo
Diâmetro do Rolo com as facas	Otimizar	Software de Desenho e modelagem 3D	Menor compactação do solo
Comprimento de transporte	Minimizar	Software de Desenho e modelagem 3D	Menor comprimento possível.
Custo	Minimizar	Análise de custos de produção	Baixo custo de produção

Fonte: Autor (2024).

### **2.2.3 Projeto conceitual**

O projeto conceitual é baseado no projeto informacional. Aqui será abordado as melhores formas e soluções para atender os desejos dos clientes e que darão continuidade para a próxima fase do projeto.

#### **2.2.3.1 Escopo do problema**

O problema a ser resolvido é o desenvolvimento de um rolo faca que atenda as demandas agrícolas, tendo um peso mínimo possível, mas que ainda mantenha sua funcionalidade, seja resistente aos esforços requisitados, possível de ser fabricado em larga escala, ter um custo de produção baixo.

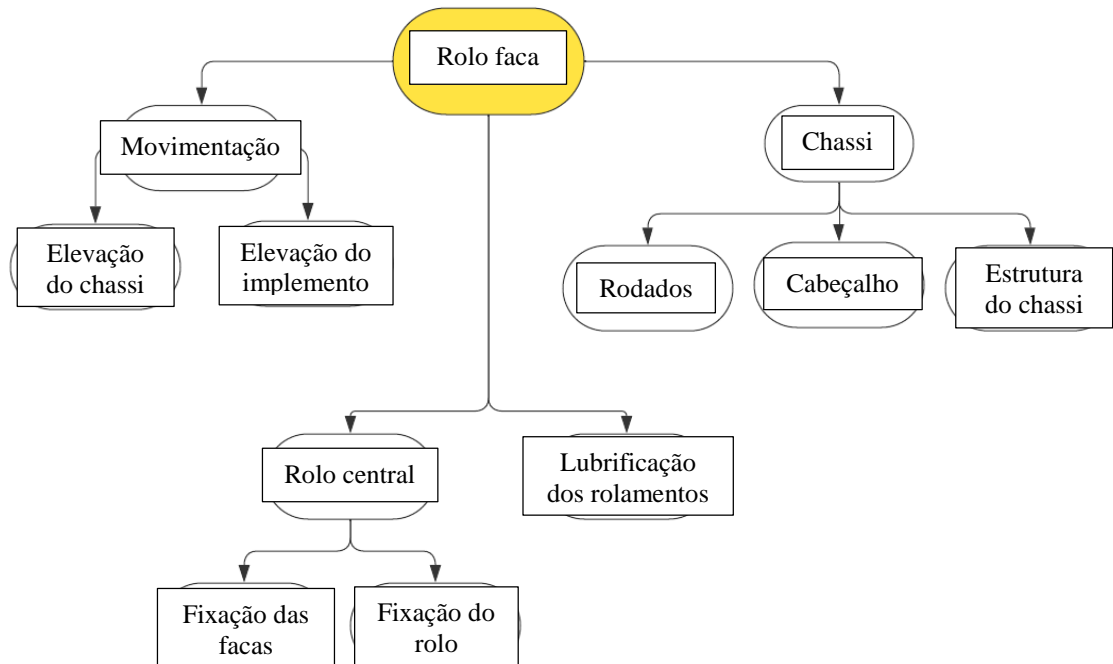
Sendo definido como um rolo único de quatro metros de comprimento, por conta deste atender os pequenos e médios agricultores, onde se encontra maior parte dos agricultores do Rio Grande Do Sul na região do alto do Jacuí, justamente onde o projeto está sendo desenvolvido.

#### **2.2.3.2 Estrutura funcional**

A estrutura funcional na área de projetos mecânicos refere-se, à organização lógica e sistemática das funções ou operações que o produto no caso, deva desempenhar para cumprir os objetivos. A estrutura descreve as funções e como essas funções estão interligadas (Figura 2).



Figura 2 — Fluxograma da estrutura funcional.



Fonte: Autor (2024).

Após a determinação da funcional, precisa-se encontrar soluções para cada uma das funções. Porém essas soluções precisam atender os requisitos determinados, sendo necessário uma matriz conceito para pontuar as soluções que mais se aproximam dos requisitos (Tabela 11).

Tabela 11 — Estrutura funcional e propostas de soluções.

Função elementar	Proposta de Soluções			
	Hidráulica	Pneumática	Elétrica	Eletro hidráulica
Elevação do chassi	Hidráulica	Pneumática	Elétrica	Eletro hidráulica
Movimentação do implemento	Cabeçalho	Cabo de aço	Sistema de engate de 3 pontos	-
Fixação das facas	Soldagem	Parafusada	Rebitada	Encaixe
Fixação do rolo	Cubo de roda	Rolamento com mancal quadrado	Rolamento com mancal UCP	Pino e bucha
Lubrificação dos rolamentos	Graxa	Óleo lubrificante	-	-
Cabeçalho	Chapa	Tubular	Viga I	Viga U
Estrutura do chassi	Chapa	Tubular	Viga I	Viga U
Material das Facas do rolo	Aço SAE 1045	Aço SAE A36	Aço Hardox® 500	-

Função elementar	Proposta de Soluções			
	Aço SAE A36	Aço SAE 1020	-	-
Material da estrutura	Aço SAE A36	Aço SAE 1020	-	-
Rodados	Cubo de roda	-	-	-

Fonte: Autor (2024).

Dessa maneira após levantamento das propostas de soluções, determina-se duas ou mais estruturas funcionais para que possa ser aplicado a matriz conceito (Tabela 12) e (Tabela 13).

Tabela 12 — Estrutura funcional I e soluções.

Função elementar	Soluções	Motivo
Elevação do chassi	Hidráulica	Capacidade de geração de força maior com menor custo
Movimentação do implemento	Cabeçalho	Facilidade na construção, menor risco de acidentes
Fixação das facas	Parafusada	Facilidade na montagem, possibilidade de troca
Fixação do rolo	Cubo de roda	Mais resistente nesta aplicação em comparação aos demais e facilidade de peças de reposição.
Lubrificação dos rolamentos	Graxa	Baixa velocidade de rotação dos rolamentos
Cabeçalho	Tubular	Mais econômico, de fácil montagem, Menor peso maior resistência, aparência em geral
Estrutura do chassi	Tubular	Mais econômico, de fácil montagem, Menor peso maior resistência, aparência em geral
Material das Facas do rolo	Aço Hardox® 500	Resistência a desgaste com aplicação de impacto
Material da estrutura	Aço SAE 1020	Custo e soldabilidade
Rodados	Cubo de roda	Mais resistente nesta aplicação em comparação aos demais e facilidade de peças de reposição.

Fonte: Autor (2024).

Tabela 13 — Estrutura funcional II e soluções.

Função elementar	Soluções	Motivo
Elevação do chassi	Eletro Hidráulica	Capacidade de geração de força sem o auxílio dos componentes hidráulicos do trator
Movimentação do implemento	Sistema de engate de 3	Facilidade de acoplamento

<b>Função elementar</b>	<b>Soluções</b>	<b>Motivo</b>
Fixação das facas	Encaixe	Facilidade na montagem, possibilidade de troca
Fixação do rolo	Rolamento com mancal	Menor custo com peças para fixação
Lubrificação dos rolamentos	Óleo lubrificante	Facilidade de substituição
Cabeçalho	Viga I	Maior resistência a esforços
Estrutura do chassi	Viga I	Maior resistência a esforços
Material das Facas do rolo	Aço SAE 1045	Custo
Material da estrutura	Aço SAE A36	Resistência
Rodados	Cubo de roda	Mais resistente nesta aplicação em comparação aos demais e facilidade de peças de reposição.

Fonte: Autor (2024).

Tabela 14 — Matriz conceito das Estruturas funcionais propostas.

Grau de relacionamento entre AC's e CE's FORTE = 5 MODERADO = 3 FRACO = 1	Largura de transporte	Resistência	Largura de operação	Peso adequado	Baixo custo	Comprimento de transporte	Diâmetro do rolo sem as facas	Diâmetro do rolo com as facas	Quantidades de facas no rolo	Lastreamento do rolo em litros	Média das pontuações	CARACTERÍSTICAS DE ENGENHARIA (CE'S)					
Estrutura funcional I	1	1	4	5	4	5	2	4	4	5	5	3,9					
Estrutura funcional II	2	1	5	5	5	3	1	2	1	5	5	3,3					

Fonte: Autor (2024).

É possível observar que após os resultados da matriz conceito (Tabela 14) a estrutura funcional com a maior pontuação foi a I, portanto ela será utilizada para o desenvolvimento do protótipo virtual 3D (Figura 3).

Figura 3 — Montagem completa do rolo faca (MHRL0010).



Fonte: Autor (2024).

#### 2.2.4 Projeto preliminar

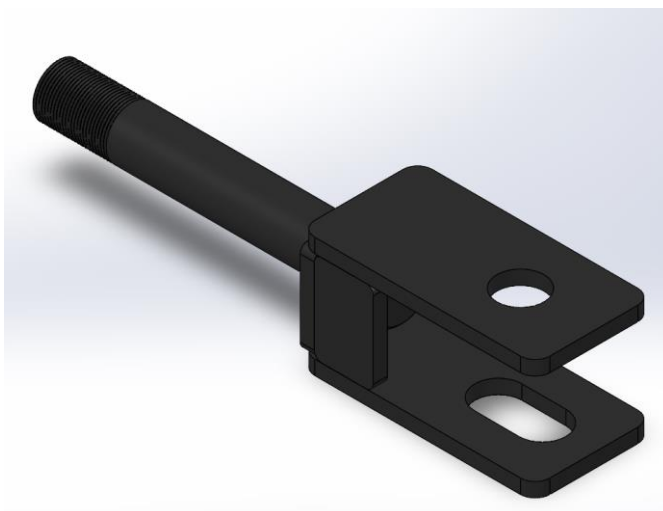
O emprego dos *softwares* de *Computer Aided Design* (Projeto assistido por computador) têm por objetivo principal auxiliar no desenho bidimensional (2D) e na modelagem tridimensional (3D) de peças e equipamentos pela interação com o computador. O CAD dá maior agilidade ao processo de desenvolvimento de produtos pois possui diversas funções que visam facilitar o trabalho do projetista, tornando possível a correção de erros antes mesmo de produzir um protótipo físico (ULBRICH, 2013).

O *software* empregado para realizar as modelagens e simulação 3D foi o SolidWorks, pertencente a Dassault Systemes. O SolidWorks é um software de CAD utilizado para modelamento de projetos em 3D que permite ao projetista criar, simular e animar (SOLIDWORKS, 2023).

##### 2.2.4.1 Leiaute

Serão apresentados imagens de submontagens que compõem o implemento, começando com o cabeçalho (Figura 5).

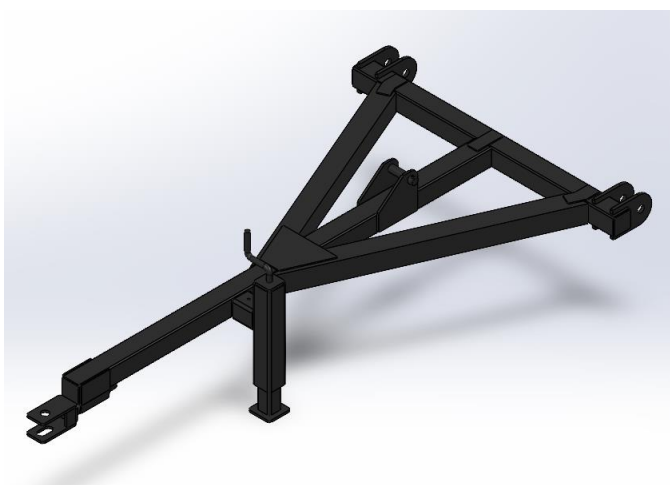
Figura 4 — Submontagem do cabeçalho do rolo faca.



Fonte: Autor (2024).

O implemento necessita de algo que faça a ligação da estrutura com o trator, para que possa ser operado desta maneira é necessário um cabeçalho (Figura 6) para realizar esta função.

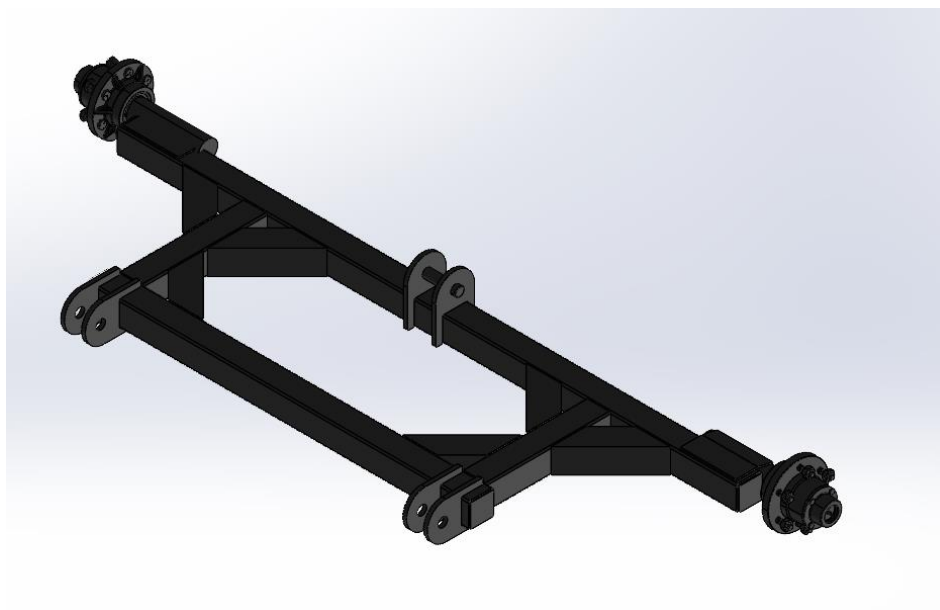
Figura 5 — Conjunto montado do cabeçalho do rolo faca.



Fonte: Autor (2024).

O rolo não pode ser transportado encostando na estrada, por conta do desgaste prematuro nas facas que seria causado, dessa maneira é preciso de um sistema de elevação para o chassi (Figura 7).

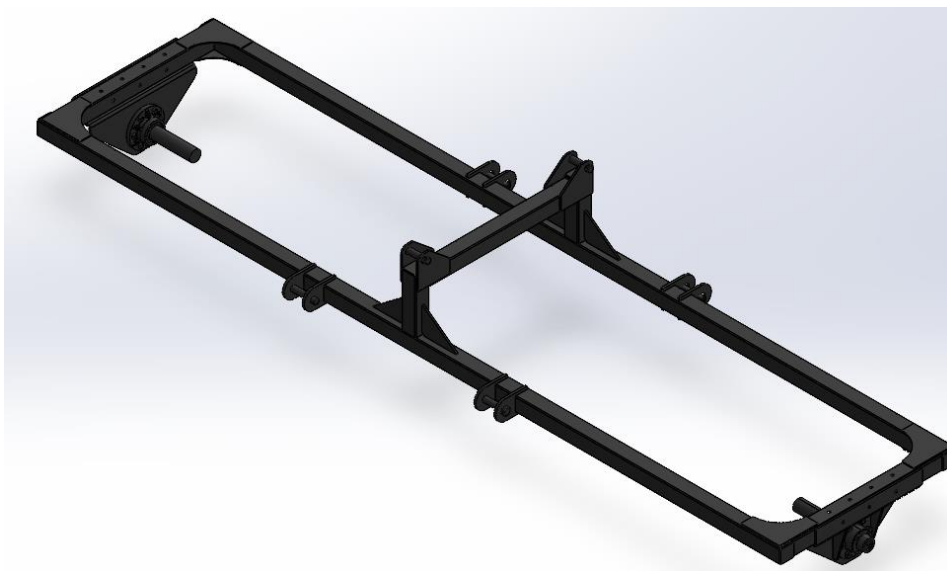
Figura 6 — Conjunto montado do chassi traseiro.



Fonte: Autor (2024).

É essencial que o implemento tenha um chassi central (Figura 8) para unir todos os outros conjuntos.

Figura 7 — Conjunto montado do chassi central.

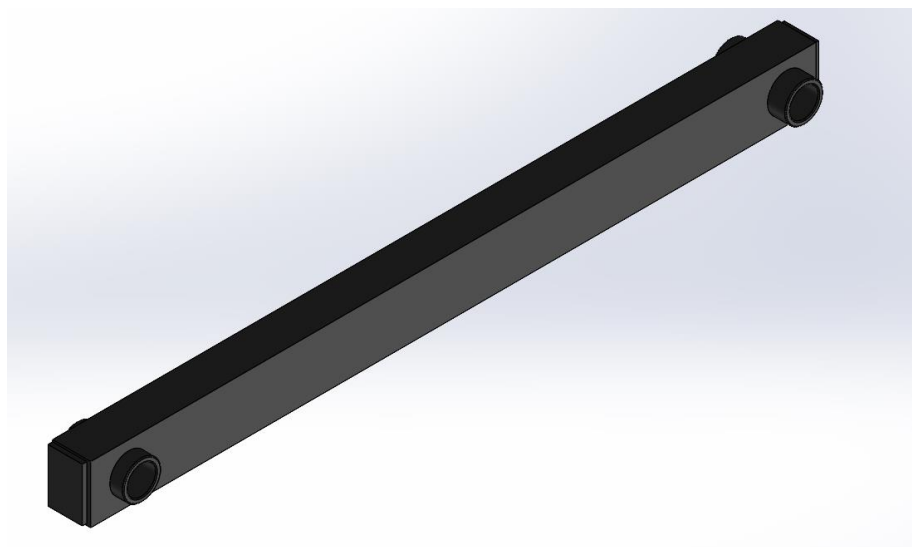


Fonte: Autor (2024).

Para que possa ser transportado e distribuído o implemento precisa caber em cima de caminhões. Logo o cabeçalho precisa ser removido ou alterar sua posição de horizontal para vertical, ou seja, ele não pode ser fixo. Mas quando estiver em operação o mesmo precisa

estar totalmente fixo, sendo necessário um tirante (Figura 9) para realizar esta função.

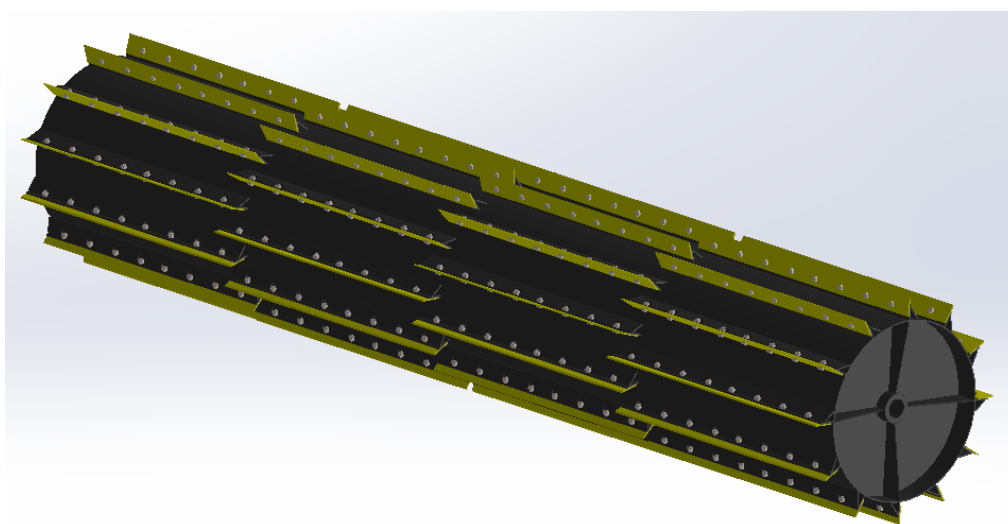
Figura 8 — Submontagem tirante cabeçalho (A) Vista isométrica.



Fonte: Autor (2024).

O rolo é o conjunto do implemento responsável por fazer o corte ou amassamento das plantas (Figura 10).

Figura 9 — Conjunto montado do rolo.



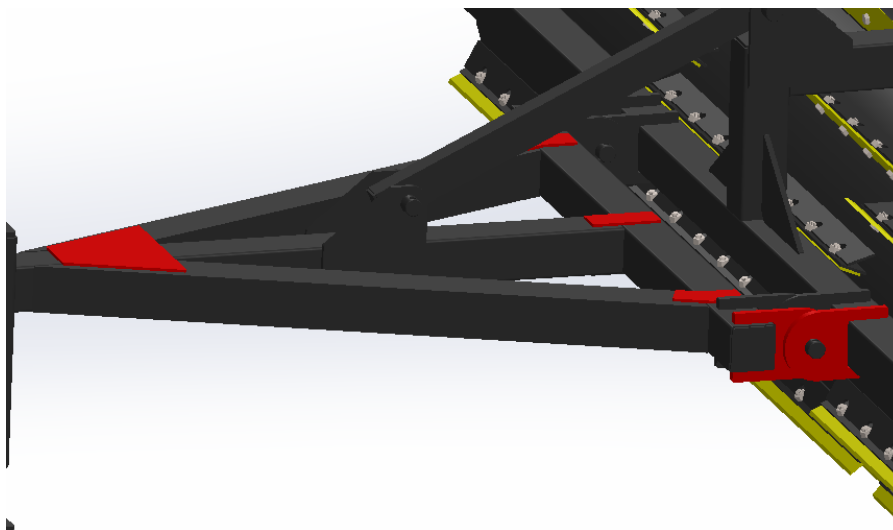
Fonte: Autor (2024).

#### 2.2.4.2 Lista de verificação

Durante a execução do modelo 3D, foram evitados pontos de acúmulos de tensões como “quinas vivas”, furos, soldas sofrendo esforços de tração, compressão e torção deixando preferencialmente esforços de cisalhamento.

Parafusos submetidos principalmente a esforços de tração e compressão, nos pontos onde não era possível fazer as alterações para que ficasse nas condições citadas. Foram adicionados reforços nas estruturas (Figura 11).

Figura 10 — Exemplos de pontos de reforços e soldas.



Fonte: Autor (2024).

### 2.3 VALIDAÇÃO DA PROPOSTA

As propostas serão validadas por meio de análise de elementos finitos, será utilizada a (Equação 1), para determinar a força realizada na barra de tração do implemento em operação para utilizada em alguns casos de simulação.

O primeiro caso irá simular uma manobra, obtendo o valor de força utilizando o resultado do primeiro caso e aplicando relações trigonométricas por conta do ângulo da manobra. Segundo caso será em condição de operação, o trator puxando o implemento em linha reta.

Terceiro caso simulará uma queda de 300 mm, obtendo os valores necessário por meio do princípio de trabalho e energia, segunda lei de newton e da cinemática retilínea. Já o quarto e último caso será simulado o implemento na posição de transporte, aplicando a força que o peso do implemento causará na estrutura, obtida através da segunda lei de newton.



### 2.3.1 Cálculos de Força

Pode-se observar na tabela (Tabela 5) que a potência necessária para realizar a operação com um rolo faca de quatro metros é de 80 cv, utilizando a potência mínima de 80cv e aplicando a (Equação 2) é possível determinar o esforço de tração que o trator faz.

Logo a potência utilizada foi de 80cv, o coeficiente para solo cultivado de tratores com tração 4x4 é de 0,75, e velocidade máxima média a partir da tabela (Tabela 5) de 13,25 km/h.

Com estes valores é possível aplicar a (Equação 2), para obter o resultado da força.

Equação 2— Força na barra de tração do trator retrabalhada.

$$F_t = \frac{P_n \eta 270}{V} \quad (2)$$

$$F_t = \frac{P_n \times n \times 270}{V}$$

$$F_t = \frac{0,75 \times 80 \times 270}{13,25}$$

$$F_t = 1.222,641 \text{ kgf}$$

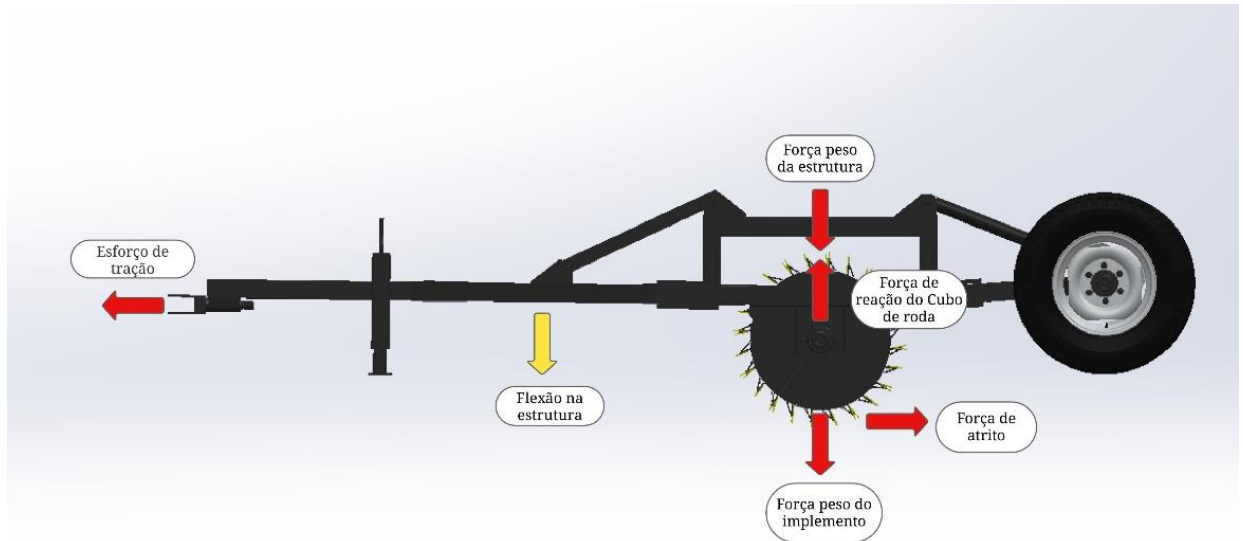
$$F_t = 11,990 \text{ kN}$$

Este resultado significa que essa é a força máxima que o trator consegue gerar nas condições citadas.

### 2.3.2 Distribuição de esforços e tensões

Serão apresentados os principais esforços e apoios presentes no implemento em condição de operação. Na Figura 12 há o diagrama do corpo livre do implemento em operação de uso do implemento na lavoura, e esforços presentes na estrutura.

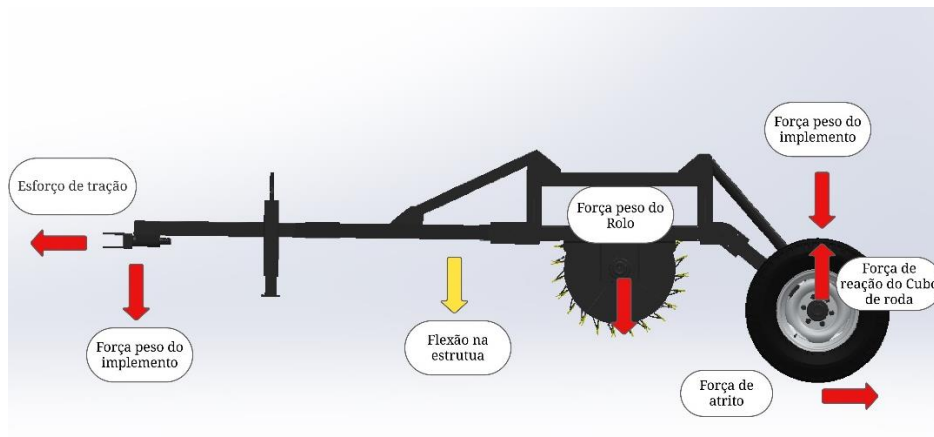
Figura 11 — Esboço e diagrama do corpo livre implemento em operação.



Fonte: Autor (2024).

Na Figura 13 se tem o diagrama de corpo livre do implemento em posição de transporte e esforços presentes, onde o operador utilizará para deslocar o implemento pela estrada.

Figura 12 — Esboço e diagrama do corpo livre implemento em transporte.

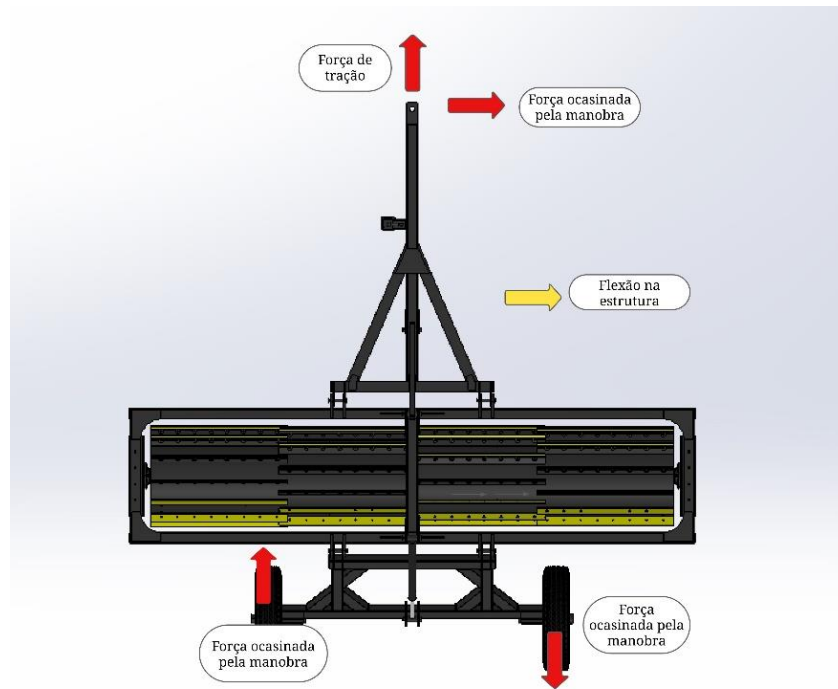


Fonte: Autor (2024).

Figura 14 se tem o diagrama de corpo livre do implemento e esforços presentes em posição de transporte realizando a manobra para a direita. Se o operado virar para a esquerda o módulo dos esforços continuam os mesmos, alterando o sentido dos esforços.

É possível observar que há uma força nos rodados que irá ser gerada a partir da força causada pela manobra, fazendo que um pneu gire para um lado e outro para o lado oposto.

Figura 13 — Esboço e diagrama do corpo livre implemento em transporte realizando manobra para direita.

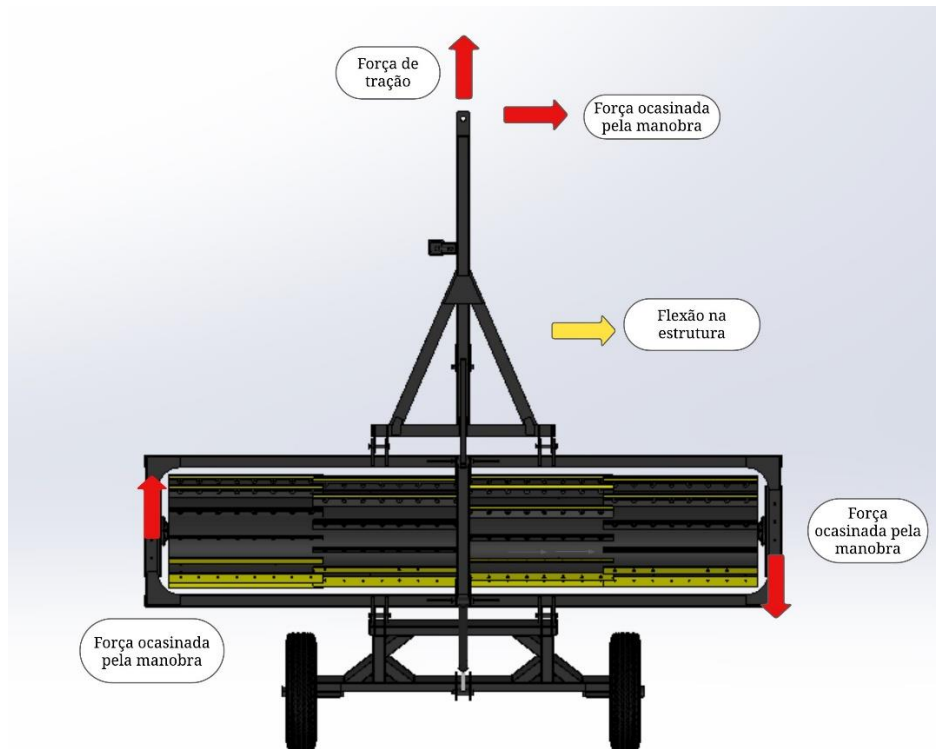


Fonte: Autor (2024).

Assim como na figura anterior a Figura 15 se tem o diagrama de corpo livre do implemento e esforços presentes em posição de operação realizando a manobra para a direita.

A força da manobra que antes agia sobre os pneus agora irá agir no rolo do implemento, porém como ele é uma peça única ele irá girar no mesmo lugar. Porém isso só acontecerá de maneira mais visível quando o ângulo de manobra for grande, quanto mais próximo de 90 graus, mais poderá ser observado.

Figura 14 — Esboço e diagrama do corpo livre implemento em operação realizando manobra para direita.



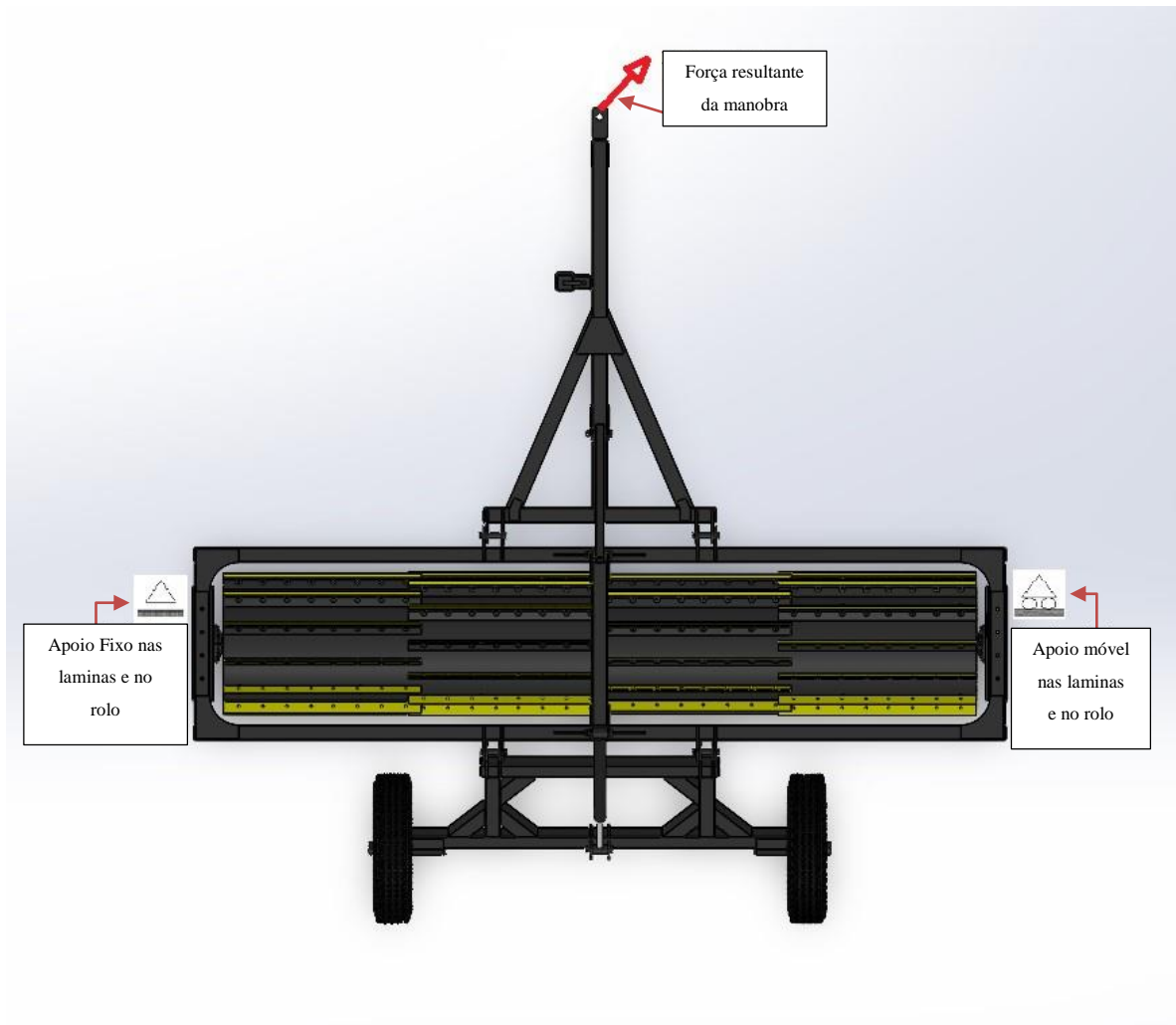
Fonte: Autor (2024).

## 2.4 CASOS DE SIMULAÇÃO ESTÁTICA

### 2.4.1 Primeiro caso - Manobra

No caso um será analisado os esforços presentes na estrutura durante a manobra para direita considerando que o trator esteja a uma posição de 45 graus da barra de tração (Figura 16). Sendo a fixação realizada no rolo e nas laminas inferiores do rolo e utilizado um carregamento concentrado nos furos do cabeçalho.

Figura 15 — Diagrama do corpo livre da simulação para o primeiro caso.



Fonte: Autor (2024).

Força na barra de tração foi obtida pela (Equação 2), utilizando a (Equação 7) é possível obter o valor da força resultante da manobra.

Equação 7 — Equação trigonométrica cosseno.

$$\cos\vartheta = \frac{Ca}{h} \quad (7)$$

Sendo:

$\cos\vartheta$  = Cosseno do ângulo;

$Ca$  = Cateto adjacente;

$h$  = Hipotenusa.

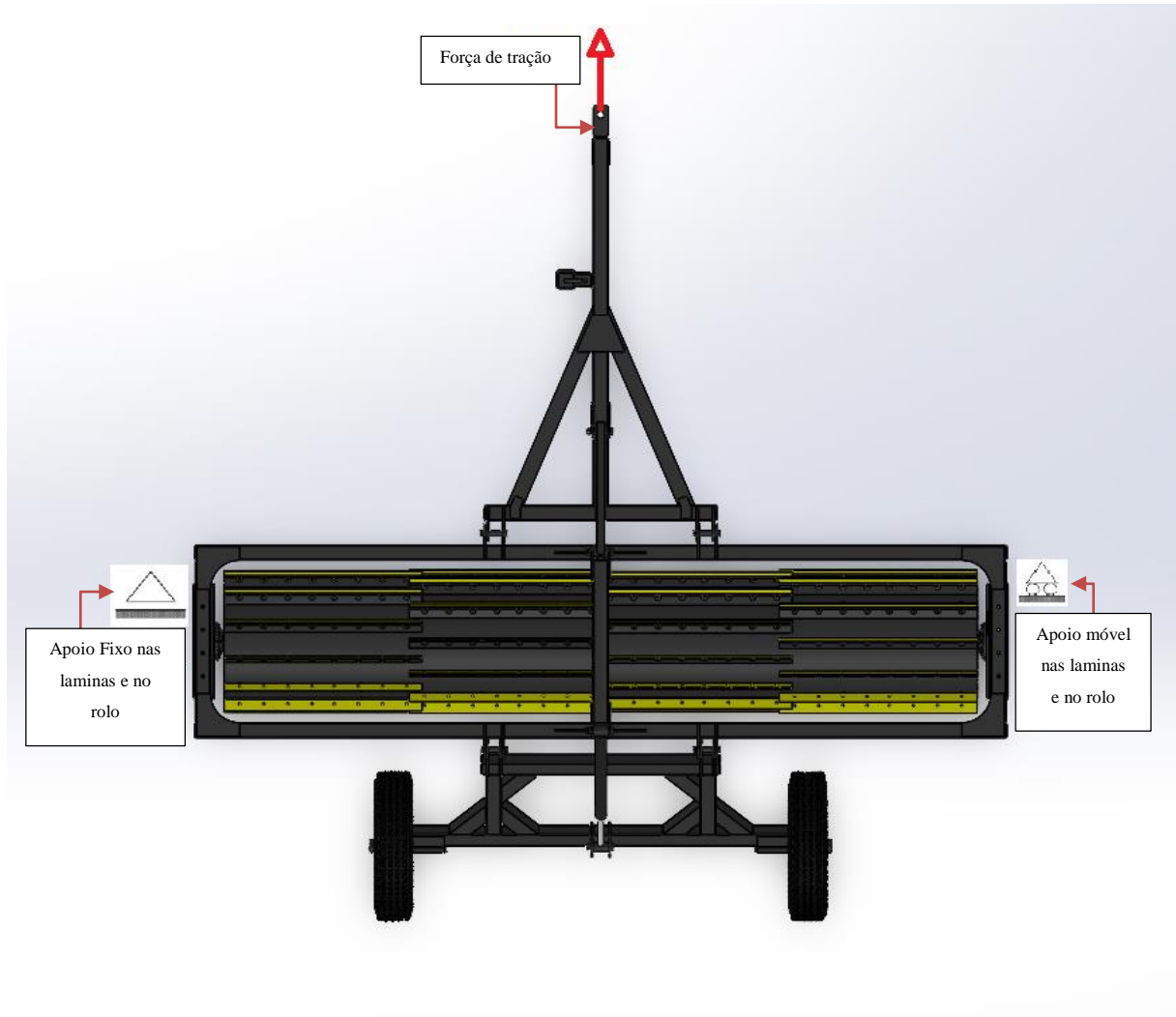
$$\cos 45 = \frac{11,990}{h}$$

$$h = 22,824 \text{ kN}$$

### 2.4.2 Segundo caso - Operação

Considerando um carregamento do esforço de tração de 11,990 kN concentrado nos furos do cabeçalho e fixação do rolo e nas lâminas inferiores do rolo (Figura 17).

Figura 16 — Diagrama do corpo livre da simulação para o segundo caso.



Fonte: Autor (2024).

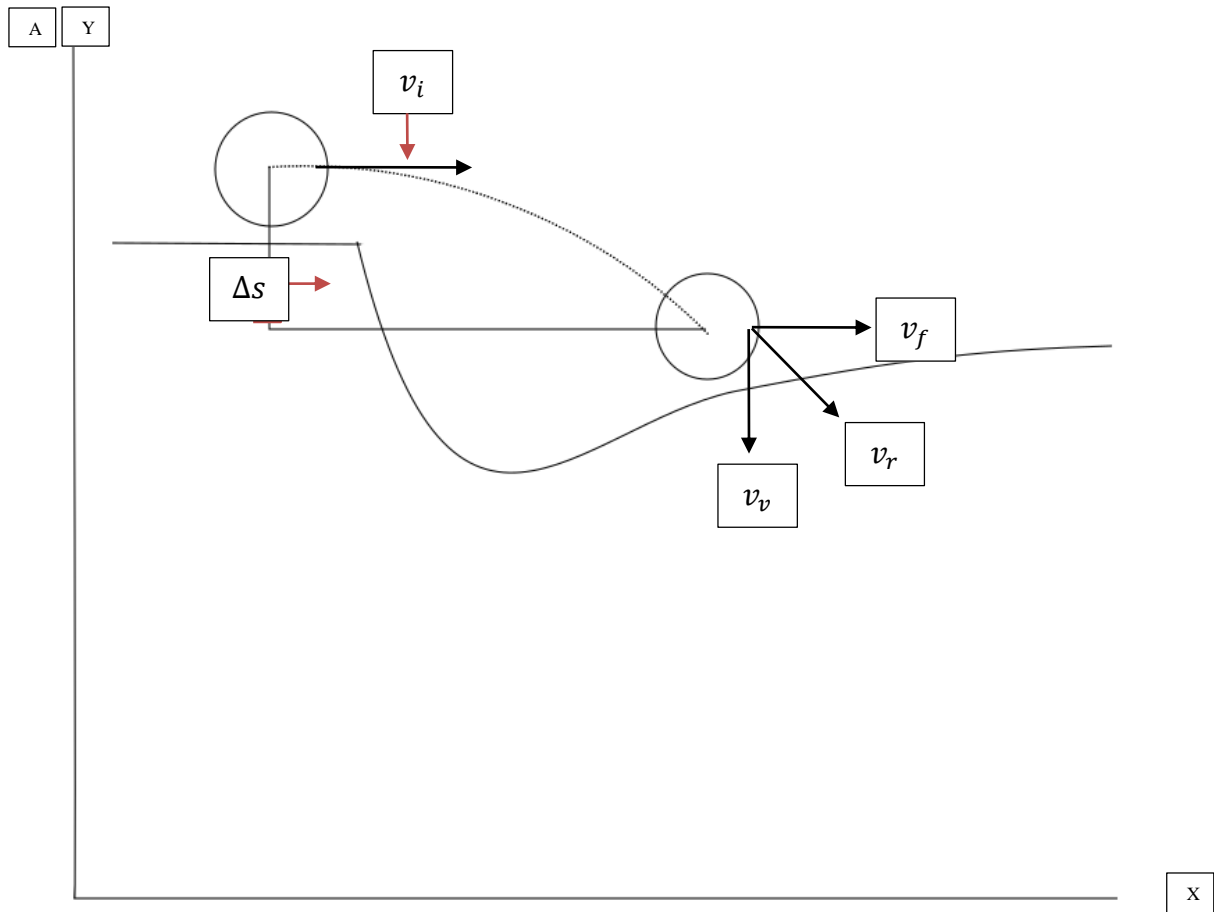
### 2.4.3 Terceiro caso - Queda

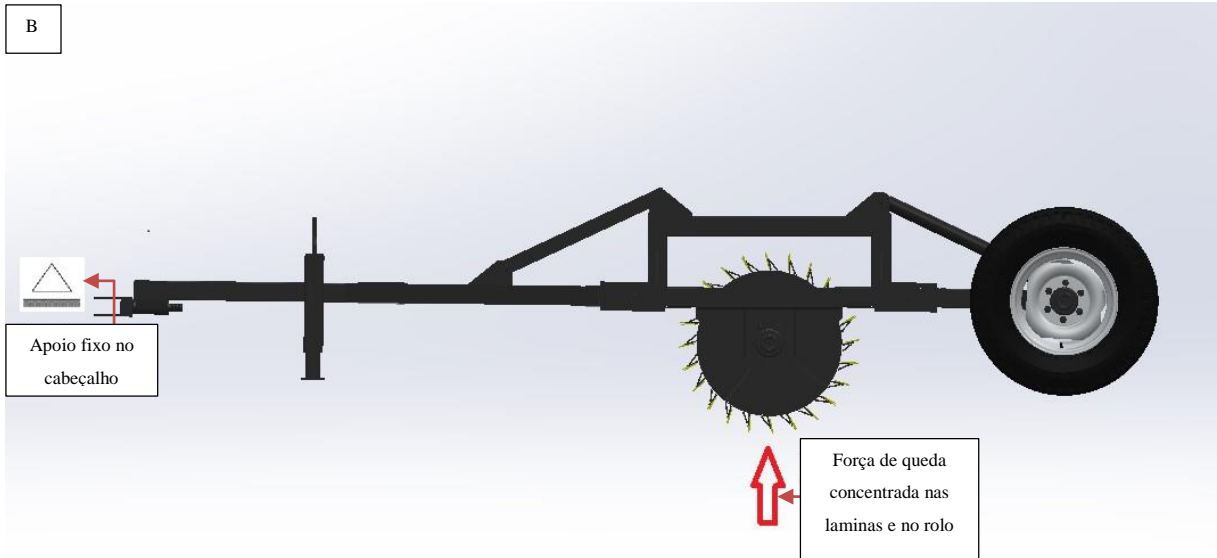
Análise simulando uma queda de 300 milímetros de altura, Fixação realizada no cabeçalho do implemento e esforço distribuído no rolo.

Consideração a ser realizada de 40% do esforço será distribuído nas facas que estarão na parte inferior e 60% do rolo.

Considerando um cenário em que o implemento sofra uma queda de 300 mm e deforme o solo em 25mm com a velocidade zero após deformar. É possível obter a velocidade de queda a partir da (Equação 4), considerando a velocidade inicial igual a zero e o diagrama do corpo livre da queda sendo a Figura 18 (A) e da simulação (B).

Figura 17 — Diagrama do corpo livre para o terceiro caso (A) Diagrama do cálculo (B) Diagrama da simulação.





Fonte: Autor (2024).

Porém para resolver desta maneira seriam necessário alguns dados, que só poderiam ser obtidos através de experimentos e testes, portanto foi considerado que o mesmo está em queda livre, considerando apenas o movimento vertical.

Sendo:

Equação 4 — Velocidade como uma função da posição.

$$v_f^2 = v_i^2 + 2a\Delta x \quad (4)$$

$$v_f^2 = v_i^2 + 2a\Delta x$$

$$v_f^2 = 0^2 + 2.9,81.0,3$$

$$\sqrt{v_f^2} = \sqrt{2.9,81.0,3}$$

$$v_f = 2,426 \text{ m/s}$$

Pode-se obter equação da força a partir da (Equação 3) do princípio de trabalho e energia e com a (Equação 5) da segunda lei de Newton.

Sendo:

Equação 3 — Princípio do trabalho e energia para a partícula.

$$\left| \sum \int_{s_1}^{s_2} F_t ds \right| = \left| \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 \right| \quad (3)$$



Equação 5 — Segunda lei de Newton

$$\vec{F}res = m\vec{a} \quad (5)$$

$$\left| \sum \int_{s_1}^{s_2} F_t ds \right| = \left| \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 \right|$$

$$F\Delta s = \frac{1}{2}mv_1^2$$

$$(\vec{F}res = m\vec{a}) \cdot \Delta s = \frac{1}{2}mv_1^2$$

$$m\vec{a} \cdot \Delta s = \frac{1}{2}mv_1^2$$

$$\vec{a} = \frac{\frac{1}{2}mv_1^2}{m \cdot \Delta s}$$

$$\vec{a} = \frac{v_1^2}{2 \cdot \Delta s}$$

$$\vec{F}res = m\vec{a}$$

$$\vec{F}res = m \frac{v_1^2}{2 \cdot \Delta s}$$

Obtendo assim a (Equação 8).

Equação 8 — Princípio do trabalho e energia adaptado.

$$\vec{F}res = m \frac{v_1^2}{2 \cdot \Delta s} \quad (8)$$

Porém o peso do rolo não irá ser considerado neste cálculo, pois a energia do mesmo será absorvida pela deformação do solo, restando o peso do restante da estrutura de 386,87 kg, tendo um peso total com lastro de 2077 kg.

Dessa maneira quando o rolo estiver em queda a energia do rolo será absorvida pelo solo, ou seja, sua força de ação e reação foram dissipadas. Agora a estrutura quando o rolo encostar no chão ela irá causar uma ação no rolo e o mesmo irá ter uma reação de mesma intensidade, mas com sentido oposto.

Esta força de reação do rolo é justamente a força de desaceleração da estrutura podendo ser calculada utilizando a velocidade encontrada anteriormente resolvendo a (Equação 3) e juntando com a equação determinada obtém-se o valor da força de:

$$\vec{F}_{res} = 386,87 \frac{2,426^2}{2,0,025}$$

$$\vec{F}_{res} = 45,538 \text{ kN}$$

Sendo:

$\vec{F}_{res}$  = Força resultante (N);

$m = 386,87$  (kg);

$v_f = 2,426$  (m/s);

$\Delta s = 0,025$  (m).

É possível calcular a força de ação que o rolo irá fazer no solo utilizando a mesma (Equação 3) e dados alterando somente a massa do rolo com lastro de água.

$$\vec{F}_{res} = 1.690,13 \frac{2,426^2}{2,0,025}$$

$$\vec{F}_{res} = 198,944 \text{ kN}$$

#### 2.4.4 Quarto caso - Transporte

Fixando os apoios do cubo de roda e cabeçalho como apoio fixo. Utilizando uma carga concentrada nos cubos de rodado rolo, por conta de que a maior parte do peso do implemento está no rolo (Figura 19).

Será considerado que está atuando apenas a força peso de todo o implemento que pode ser obtida pela (Equação 5), utilizando o peso total do mesmo com lastro de água sendo de 2.077 kg e aceleração da gravidade de 9,81 m/s<sup>2</sup>.

Equação 5 — Segunda lei de Newton

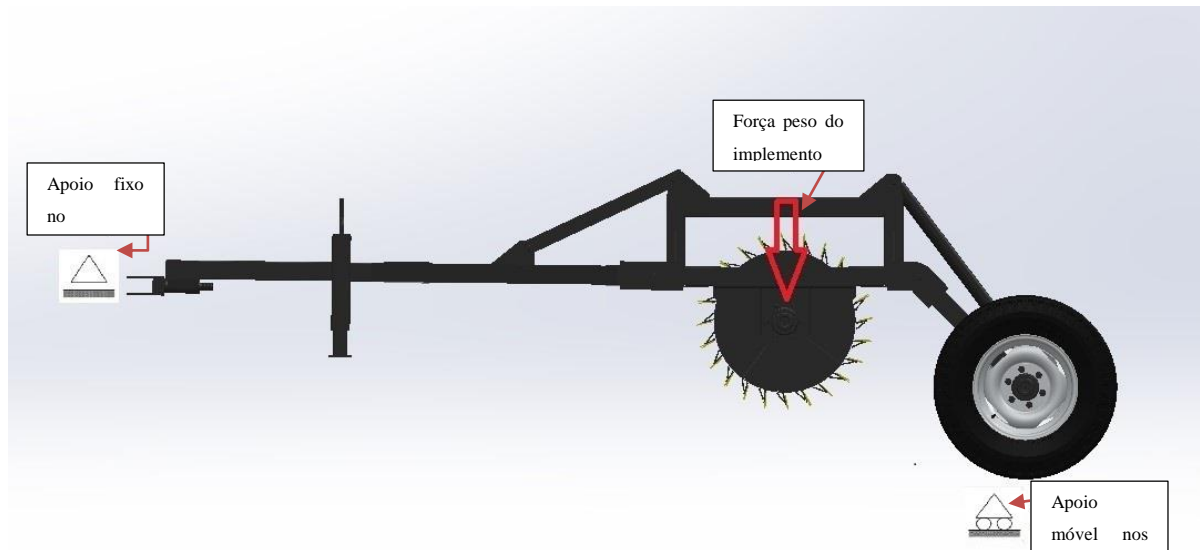
$$\vec{F}_{res} = m\vec{a} \quad (5)$$

$$\vec{F}_{res} = m\vec{a}$$

$$\vec{F}_{res} = 2.077 \times 9,81$$

$$\vec{F}_{res} = 20,375 \text{ kN}$$

Figura 18 — Diagrama do corpo livre da simulação para o quarto caso.



Fonte: Autor (2024).

## 2.5 ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DE MALHA

Para realizar a validação da análise de elementos finitos é necessário a análise de convergência de malhas, para verificar a coerência de tamanho de elementos. Sendo realizada pela execução da análise de elementos finitos com diferentes malhas e a comparação dos resultados.

Foram utilizadas sete malhas (Tabela 15), foram utilizados os parâmetros do caso dois para análise, como forças e fixações.

O tipo de malha varia conforme o tipo geométrico das peças (Quadro 1), como a simulação foi realizada na montagem de todo o projeto foi utilizado a malha mista por conta dos diferentes tipos geométricos.

Do mesmo modo foi utilizado a malha com base em curvatura combinada (Quadro 2), por conta da adaptação automática do tamanho do elemento conforme a posição do mesmo, por exemplo em curvaturas a malha é mais refinada, ou seja, tem tamanhos menores de elementos. Por conta disso são definidos tamanhos máximos e mínimos dos elementos na tabela (Tabela 15).

Elementos parabólicos podem mapear geometria curvada de maneira muito mais precisa do que elementos lineares de mesmo tamanho. Os nós intermediários das arestas de limite de um elemento são colocadas na geometria real do modelo. Em limites extremamente

pronunciados ou curvos, a colocação de nós intermediários pode resultar na geração de elementos distorcidos com arestas que invadem umas às outras (SOLIDWORKS, 2010).

Dessa maneira são definidos os pontos jacobianos para que o programa faça uma varredura na malha procurando elementos distorcidos na malha que podem afetar os resultados que segundo o é aceitável de quarenta pontos ou menos (SOLIDWORKS, 2010).

Quadro 2— Tipo de malha com base nas características geométricas.

Malha sólida	Todas as malhas de modelos sólidos com elementos sólidos (tetraédricos).
Malha de casca	Geometrias de superfície e chapas metálicas com malha de espessura uniforme com elementos de malha triangulares.
Malha de viga	Malha de componentes estruturais e soldagens com elementos de viga. Você pode tratar uma extrusão (malhas com elementos sólidos, por padrão) como uma viga.
Malha mista	Quando diferentes geometrias estão presentes no mesmo modelo, uma malha mista é gerada.

Fonte: Adaptado de Solidworks (2024).

Quadro 3— Parâmetros de malhas.

Malha padrão	Ativa o esquema de geração de malha de Voronoi-Delaunay para as operações subsequentes de geração de malha. O gerador de malha padrão só tem suporte à geração de malha de volume multissegmentadas.
Malha com base em curvatura	O gerador de malha cria automaticamente (sem necessidade do controle de malha) mais elementos em áreas com curvatura maior. O gerador de malha baseado em curvatura tem suporte à geração de malha de volume e superfícies multissegmentadas para documentos de montagens e peças multicorpos.
Malha com base em curvatura combinada	Esse gerador de malha adapta automaticamente o tamanho do elemento à curvatura local da geometria para criar um padrão de malha suave. Há casos em que o gerador de malha baseado em curvatura combinada pode superar a falha de malha, gerando uma malha sólida com elementos de qualidade mais alta (taxas jacobianas e razão de aspecto mais baixas) que os

	geradores de malha padrão ou baseados em curvatura.
--	---

Fonte: Adaptado de Solidworks (2024).

Tabela 15 — Parâmetros de malhas utilizados.

<b>Detalhes da malha</b>	<b>Malha 01</b>	<b>Malha 02</b>	<b>Malha 03</b>	<b>Malha 04</b>	<b>Malha 05</b>	<b>Malha 06</b>	<b>Malha 07</b>
Tipo de malha	Mista	Sem modificação	Sem modificação	Sem modificação	Sem modificação	Sem modificação	Sem modificação
Gerador de malhas usado	Malha mesclada com base em curvatura	Sem modificação	Sem modificação	Sem modificação	Sem modificação	Sem modificação	Sem modificação
Pontos Jacobianos para malha de alta qualidade	16 Pontos	Sem modificação	Sem modificação	Sem modificação	Sem modificação	Sem modificação	Sem modificação
Tamanho máximo do elemento	320mm	160mm	80mm	40mm	20mm	10mm	8mm
Tamanho mínimo do elemento	16mm	8mm	4mm	2mm	1mm	0,5mm	0,4mm
Qualidade da malha	Alta	Sem modificação	Sem modificação	Sem modificação	Sem modificação	Sem modificação	Sem modificação
Total de nós	551.630	1.202.413	2.959.296	3.297.016	4.055.842	6.555.171	8.390.279
Total de elementos	255.841	593.737	1.576.544	1.764.906	2.191.603	3.476.247	14.951.061
Tempo de geração de malha (hh:mm:ss)	00:05:18	00:05:29	00:05:57	00:06:04	00:06:18	00:08:28	00:08:49

Fonte: Autor (2024).

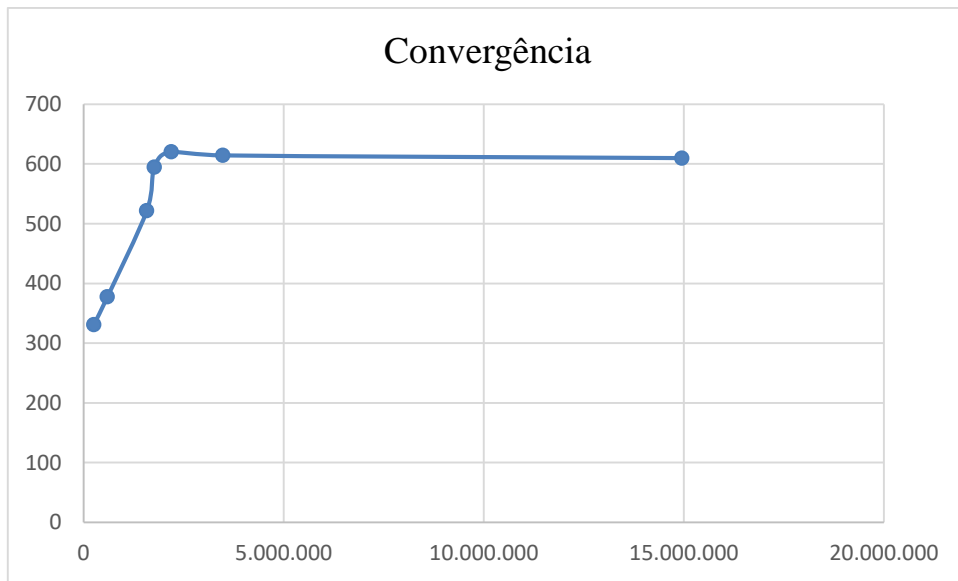
Após a execução da simulação de elementos finitos para as condições do primeiro caso, foi realizada a comparação dos resultados das diferentes malhas no ponto máximo de acúmulo de tensão.

Tabela 16 — Resultados das malhas.

Ponto	Resultados da Malha 01 (MPa)	Resultados da Malha 02 (MPa)	Resultados da Malha 03 (MPa)	Resultados da Malha 04 (MPa)	Resultados da Malha 05 (MPa)	Resultados da Malha 06 (MPa)	Resultados da Malha 07 (MPa)
Tensão máxima	331,3	377,8	522	595	620,6	614,5	610,3

Fonte: Autor (2024).

Gráfico 1 – Convergência das malhas.



Fonte: Autor (2024).

Tabela 17 — Variação dos valores relativos das malhas.

#### Variação percentual do resultado de tensão máxima em comparação a anterior

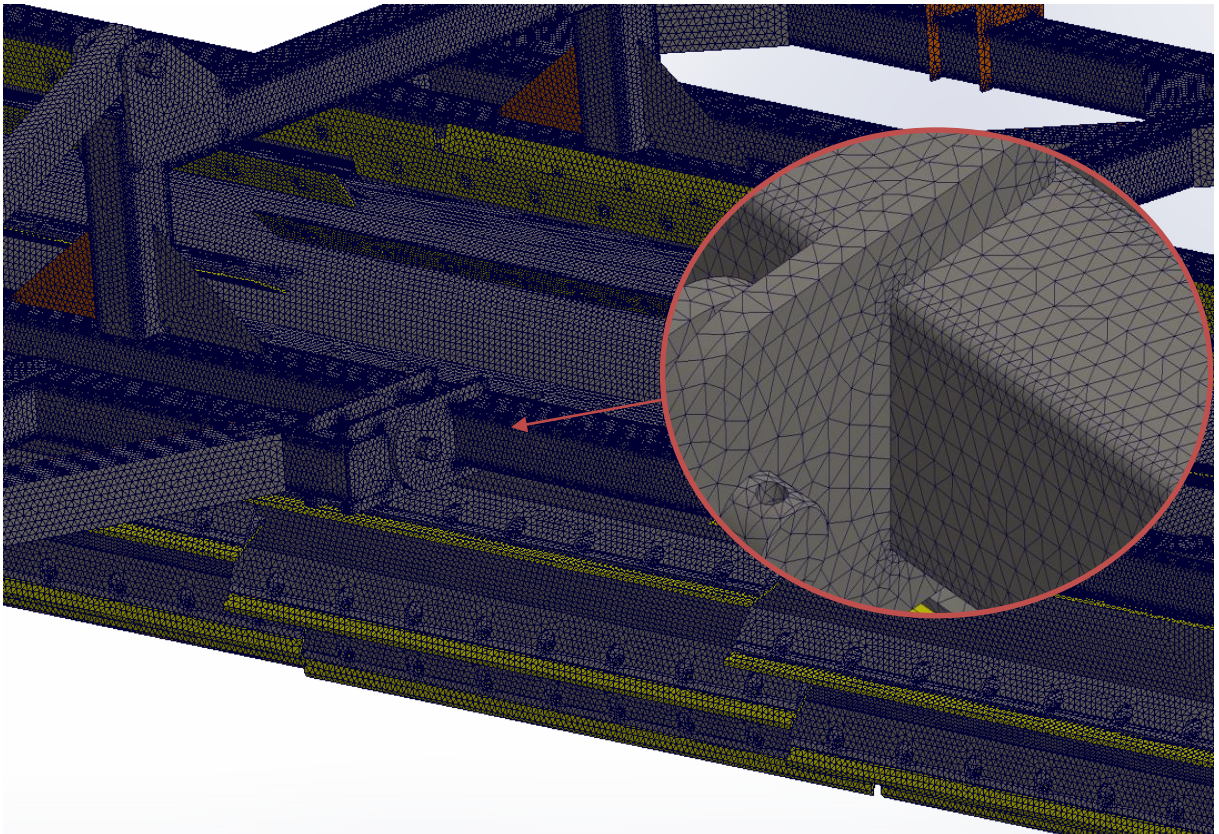
Malha 01	Malha 02	Malha 03	Malha 04	Malha 05	Malha 06	Malha 07
-45,689%	14,036%	38,168%	13,985%	4,303%	-0,983%	-0,732%

Fonte: Autor (2024).

Observando o Gráfico 1, Tabela 16 e a Tabela 17, é possível concluir que os resultados após a malha 4 convergiram, pois não houve alteração significativa nos valores de tensão conforme o aumento dos elementos das malhas.

Dessa maneira será utilizado a malha 6 (Figura 20) para fazer o restantes das simulações, por conta do esforço computacional maior necessário para as outras malhas.

Figura 19 — Malha 06.



Fonte: Autor (2024).

## 2.6 RESULTADO

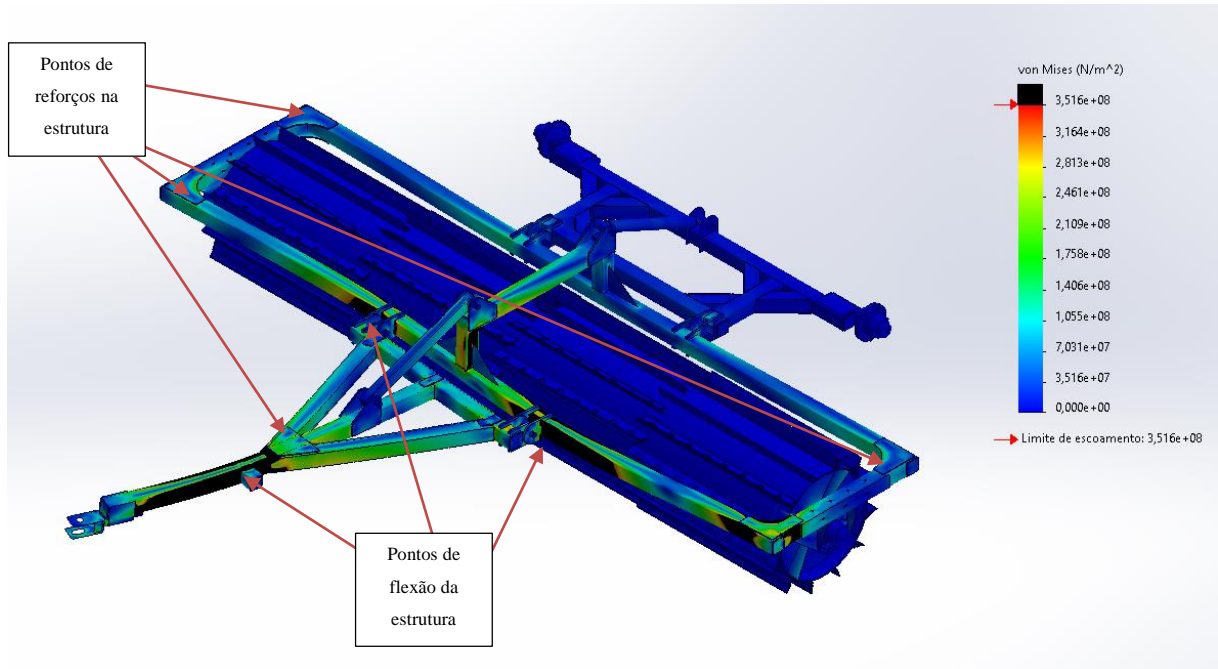
### 2.6.1 Protótipo virtual I

#### 2.6.1.1 Primeiro caso – Manobra – Modelo I

É possível observar na figura 21, no teste de simulação houveram pontos de falhas no implemento. Onde as regiões em preto são regiões que atingiram a tensão limite de escoamento do material.

Se concentrando principalmente no cabeçalho e no conjunto central do rolo, se teve principalmente uma flexão do cabeçalho e da estrutura por conta da força estar aplicada em 45 graus no cabeçalho.

Figura 20 — Pontos de flexão e de tensões para o primeiro caso.

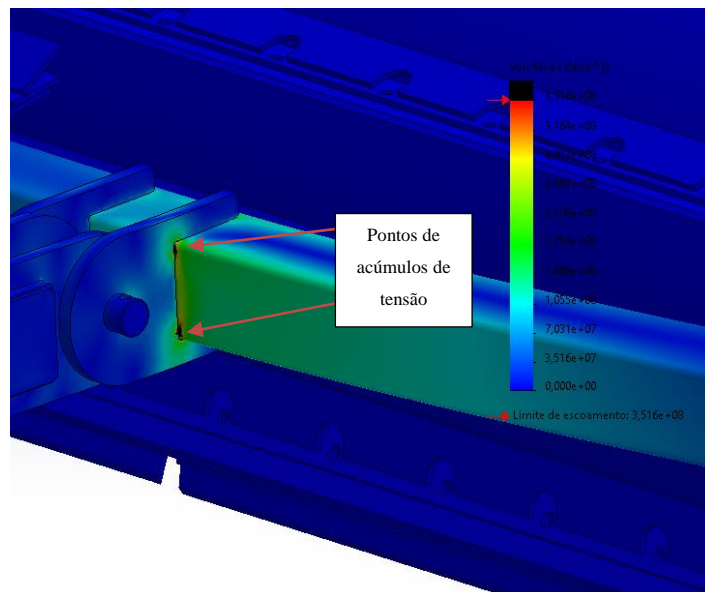


Fonte: Autor (2024).

#### 2.6.1.2 Segundo caso – Operação – Modelo I

No segundo caso também houve pontos de falha na estrutura, sendo as regiões em preto (Figura 22) que ultrapassou a tensão limite de escoamento. Porém estas regiões são pequenas se comparadas a do caso anterior.

Figura 21 — Pontos de acúmulo de tensão do segundo caso.



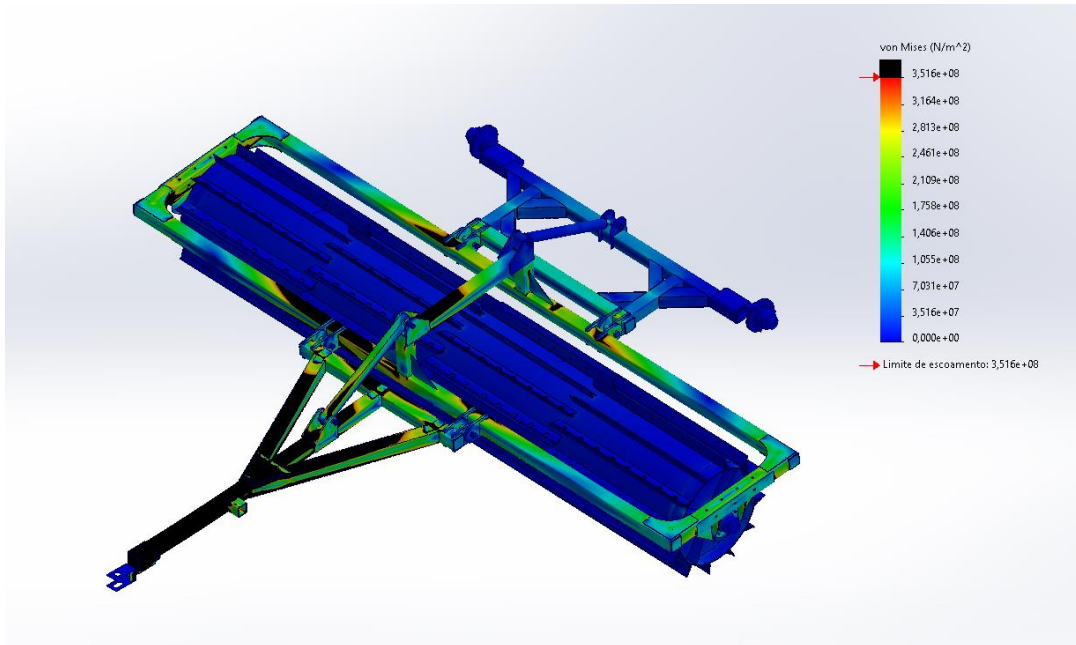
Fonte: Autor (2024).



### 2.6.1.3 Terceiro caso – Queda – Modelo I

Neste caso houve vários pontos de falhas na estrutura (Figura 23).

Figura 22 — Pontos de acúmulo de tensão do terceiro caso.

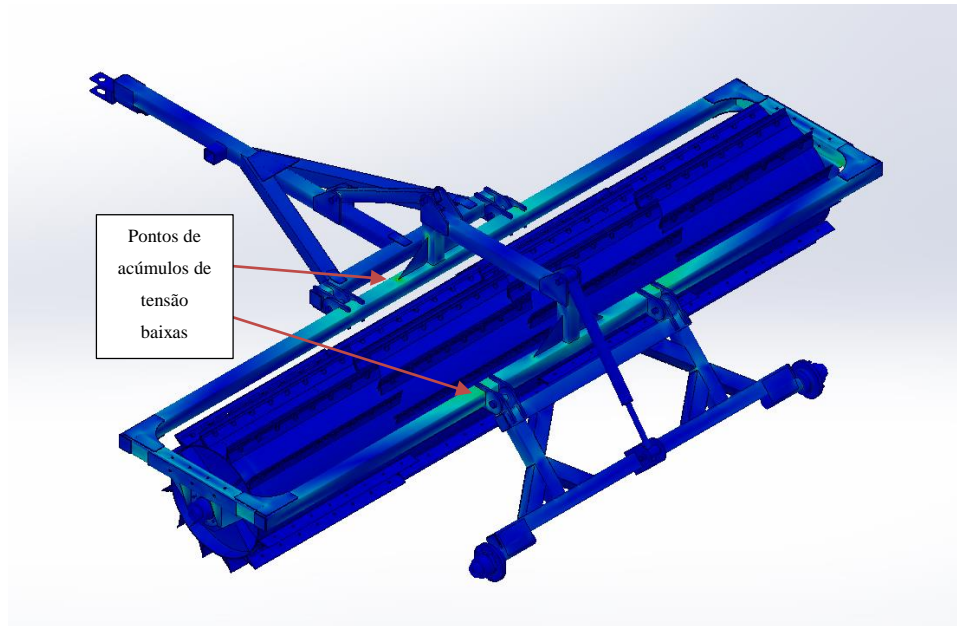


Fonte: Autor (2024).

### 2.6.1.4 Quarto caso – Transporte – Modelo I

Não houve falha da estrutura (Figura 24), somente alguns pontos onde se teve tensões maiores mais todas abaixo da tensão de limite de escoamento de 290 MPa a 150 MPa.

Figura 23 — Pontos de acúmulo de tensão do quarto caso.



Fonte: Autor (2024).

### 2.6.2 Proposta de solução

Para resolver o problema de flexão do primeiro caso (Figura 21), falha da estrutura em geral do implemento no terceiro caso (Figura 23), poderia ser utilizado um tubo com uma espessura de parede maior, sendo de 4,75 mm a medida atual e aumentando para 6,35 mm.

É possível calcular o momento de inércia dos tubos pela (Equação 6).

Equação 6 — Momento de inércia para tubos retangulares.

$$I = \frac{1}{12} B_1 h_1^3 - \frac{1}{12} B_2 h_2^3 \quad (6)$$

Sendo: Tubo 80 mm X 80 mm parede 4,75 mm:

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{12} B h^3 - \frac{1}{12} B h^3 \\ I &= \frac{1}{12} 80 \times 80^3 - \frac{1}{12} 70,5 \times 70,5^3 \\ I &= 1354747,911 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

Sendo: Tubo 80 mm X 80 mm parede 6,35 mm:

$$I = \frac{1}{12} B h^3 - \frac{1}{12} B h^3$$

$$I = \frac{1}{12} 80 \times 80^3 - \frac{1}{12} 67,3 \times 67,3^3$$

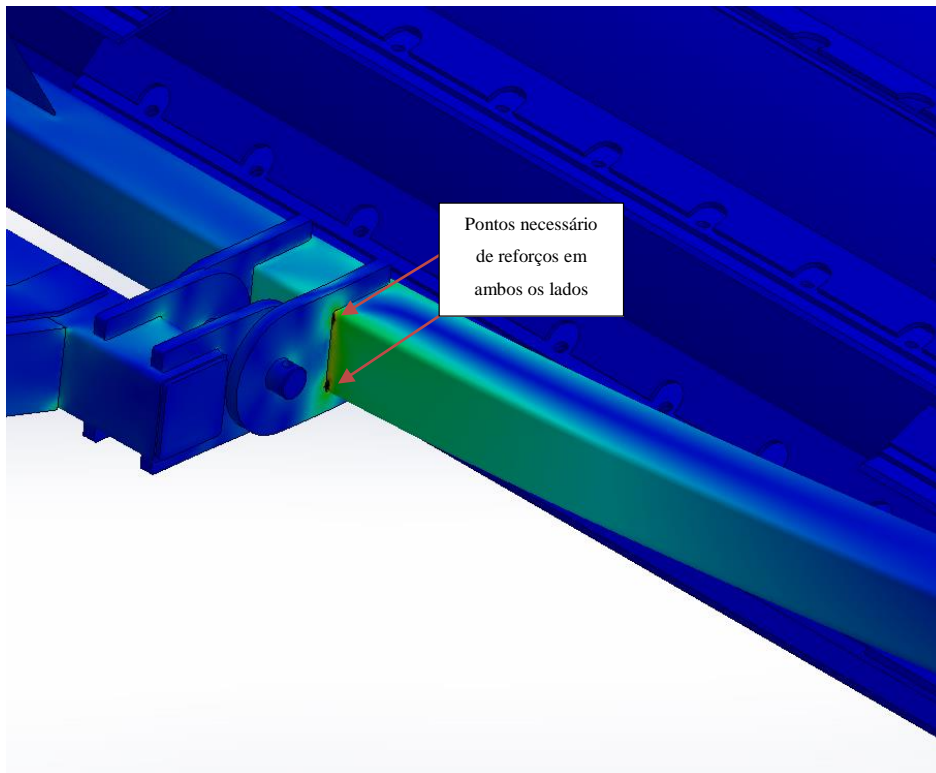
$$I = 1703794,341 \text{ mm}^4$$

Logo, é cerca de 33,68% a mais de espessura de material e 25,76% a mais de momento de inércia. Porém se tem como consequência o aumento do peso total do implemento e do custo.

Já nos pontos de fixação do cabeçalho com a estrutura (Figura 25) e no ponto de fixação dos eixos dos rodados (Figura 26) pode-se colocar chapas de reforço na parte superior e inferior do tubo, onde foram os um dos principais pontos de acúmulos de tensões do segundo caso e do quarto caso.

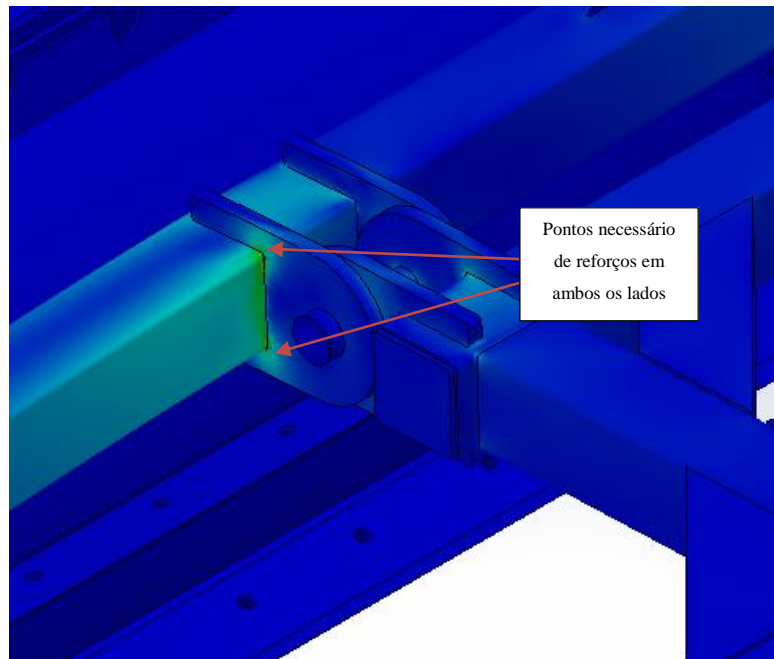
É possível observar que em alguns pontos não se teve falha (Figura 21) por conta dos reforços já presentes nas estrutura, não houve falha pois os mesmos acabam dissipando os esforços pelo implemento, porém isso se alterou dependendo do caso de simulação.

Figura 24 — Pontos de aplicação de reforços para parte dianteira do implemento.



Fonte: Autor (2024).

Figura 25 — Pontos de aplicação de reforços para parte traseira do implemento.

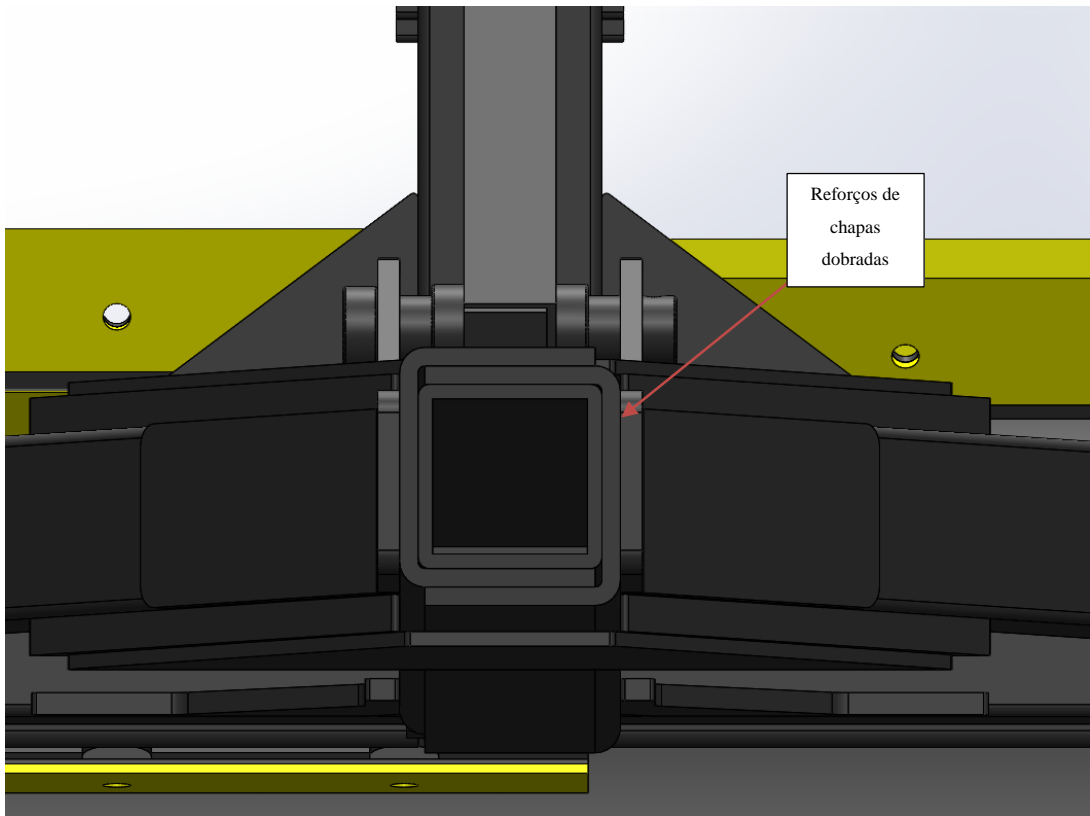


Fonte: Autor (2024).

Porém como há uma solicitação grande da estrutura no caso da manobra, ou seja, no primeiro caso, será aumentado a largura da base de fixação do cabeçalho com a estrutura para 2000 mm. No momento esse acoplamento está com 1200 mm.

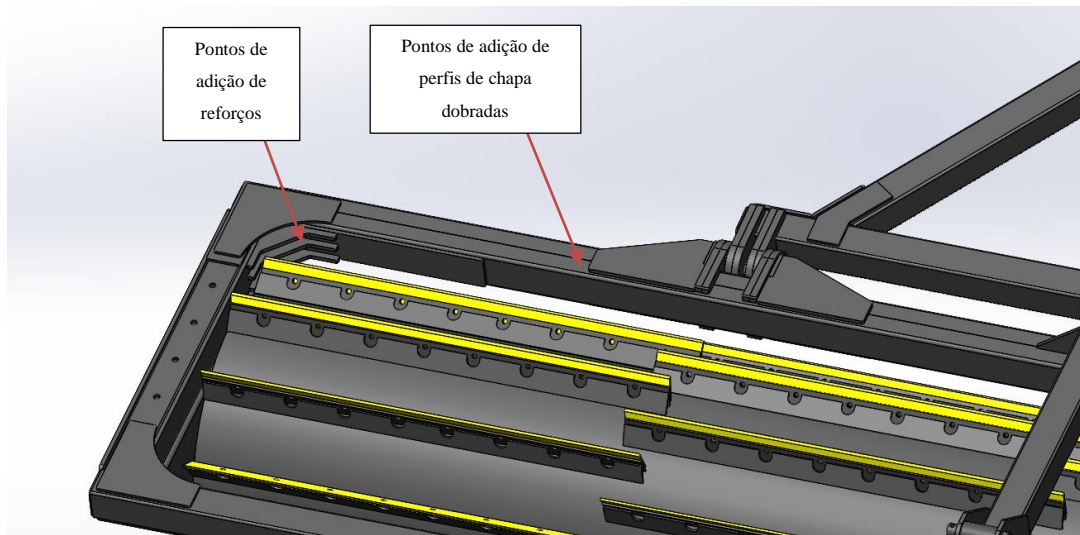
Dessa maneira foi redistribuído os tubos do cabeçalho. Além do aumento de espessura do tubo será utilizado um perfil de chapa dobrada no tubo central do cabeçalho e em alguns pontos (Figura 27), adição de reforços internos na estrutura central (Figura 28), adição de reforços no cabeçalho (Figura 29), aumento no suporte de fixação do rolo e adição de reforços (Figura 30).

Figura 26 — Corte de seção do cabeçalho.



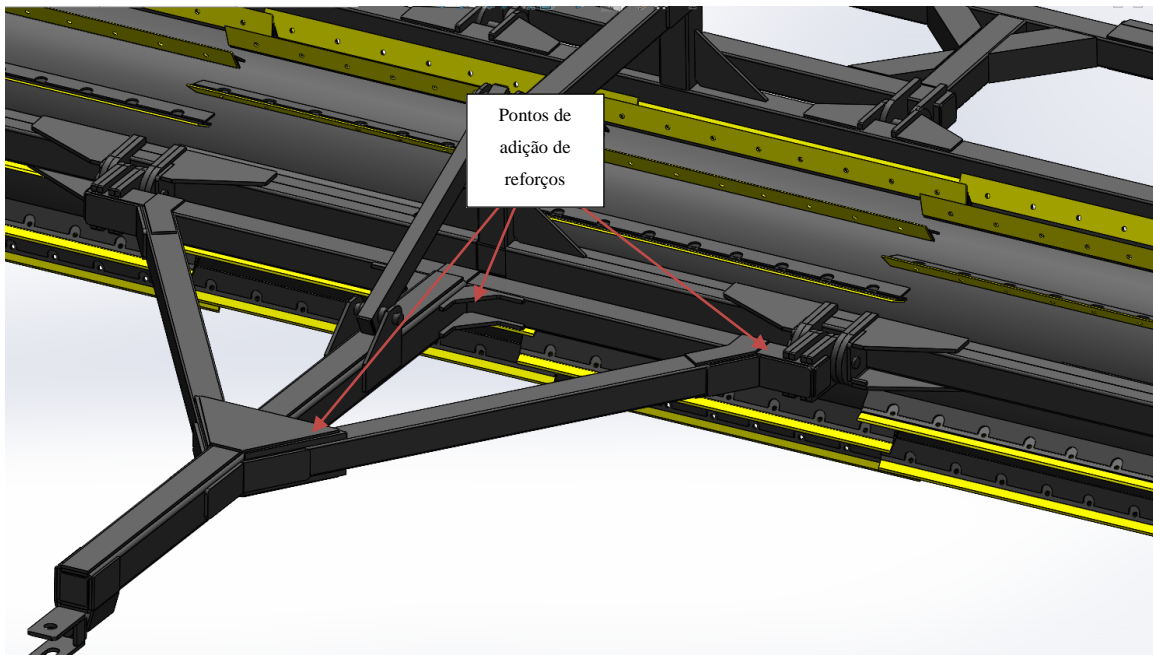
Fonte: Autor (2024).

Figura 27 — Pontos de adição de reforços na estrutura central.



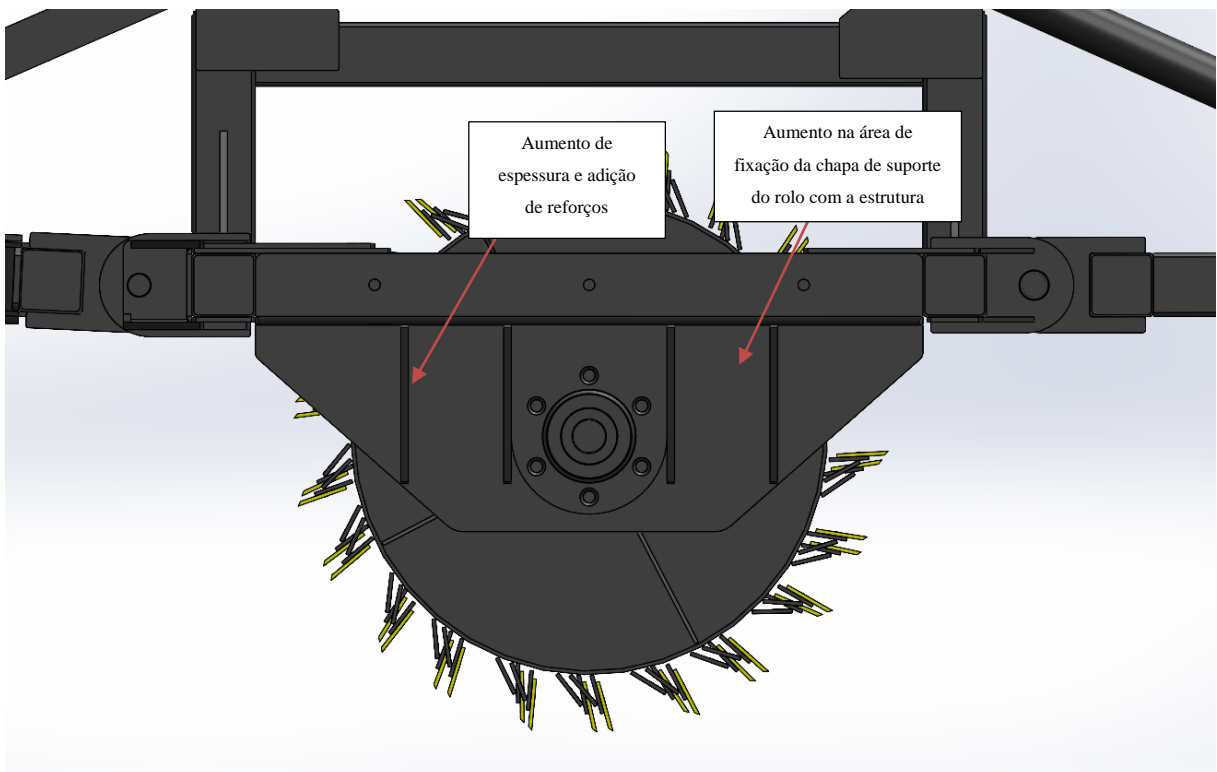
Fonte: Autor (2024).

Figura 28 — Pontos de aplicação de reforços no cabeçalho.



Fonte: Autor (2024).

Figura 29 — Pontos de aplicação de reforços na fixação do rolo.



Fonte: Autor (2024).

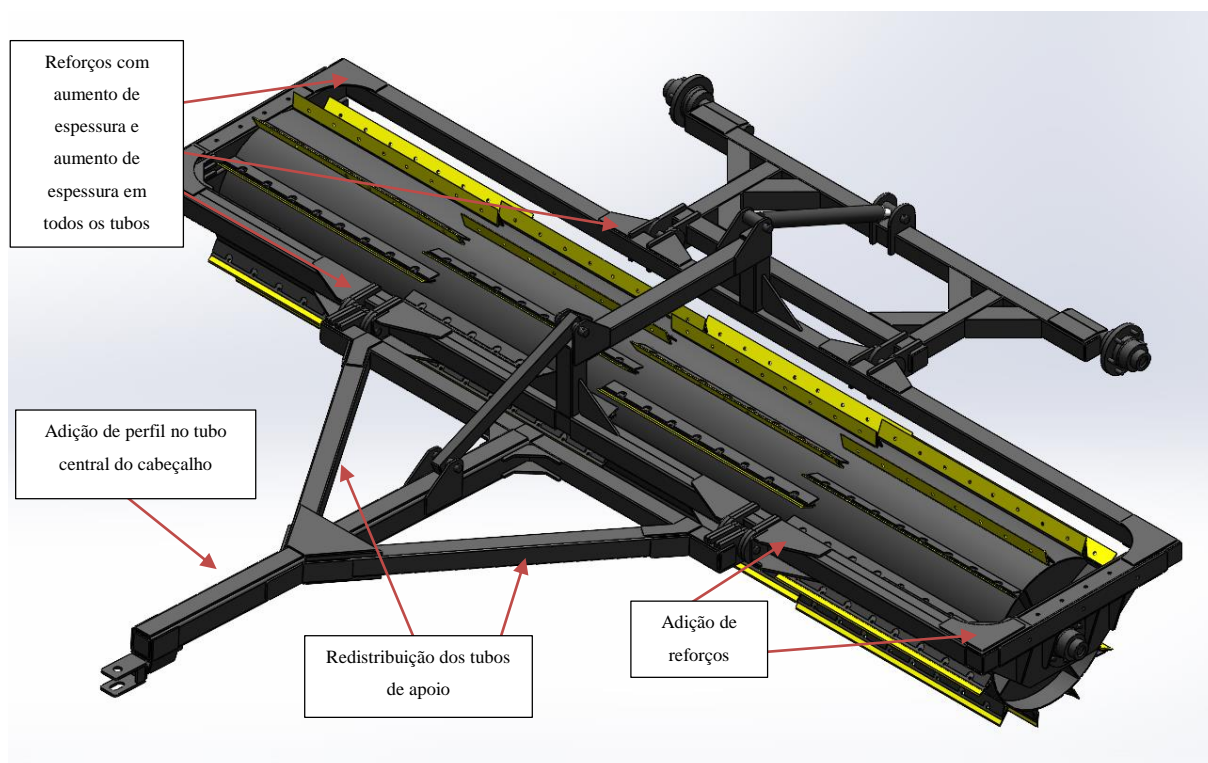
### 2.6.3 Protótipo virtual dois

Este protótipo virtual (Figura 31) foi desenvolvido utilizando a proposta de solução no tópico de propostas de solução.

Como resultado obteve-se um aumento de 406,86 kg de peso estrutural, se observarmos o peso da estrutura toda com lastro ficou de 2509,99 kg se diminuirmos o acréscimo de peso resultado do retrabalho na estrutura, observasse que fica com valor de 2103,13 kg mas o peso informado no primeiro protótipo foi de 2077 kg. Essa diferença se dá porque os cubos de roda foram feitos de forma maciça, e o projeto real se tem o STEP 3D da peça fornecida pelo fornecedor.

Foram feitos de forma maciça por conta de erros na simulação pelo fato de existir componentes presentes nos STEP, como rolamentos, vedações, roscas, entre outros.

Figura 30 — Protótipo virtual dois.



Fonte: Autor (2024).

#### 2.6.3.1 Atualização dos cálculos

Como foram adicionados reforços o peso do implemento se alterou ficando com lastro de água o peso de 2.509,99 kg e a estrutura sem o rolo com peso de 793,63 kg. Dessa maneira é necessário recalcular os valores de forças para o terceiro e quarto caso, utilizando a

(Equação 8) e (Equação 4). Como os outros casos não levam a massa em consideração, não se torna necessário a atualização.

Terceiro caso:

Equação 8 — Princípio do trabalho e energia adaptado.

$$\vec{F}_{res} = m \frac{v_1^2}{2 \cdot \Delta s} \quad (8)$$

Para todo o implemento no terceiro caso:

$$\begin{aligned} \vec{F}_{res} &= m \frac{v_1^2}{2 \cdot \Delta s} \\ \vec{F}_{res} &= 2.509,99 \frac{2,426^2}{2,0,025} \\ \vec{F}_{res} &= 295,449 \text{ kN} \end{aligned}$$

Para a estrutura do implemento no terceiro caso:

$$\begin{aligned} \vec{F}_{res} &= 793,63 \frac{2,426^2}{2,0,025} \\ \vec{F}_{res} &= 93,414 \text{ kN} \end{aligned}$$

Quarto caso:

Equação 4 — Segunda lei de Newton

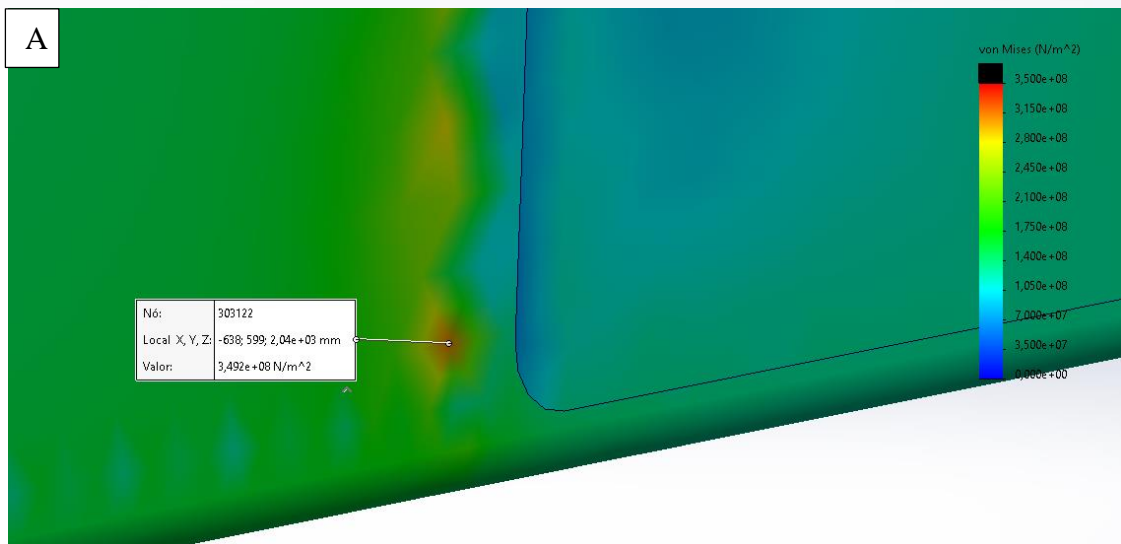
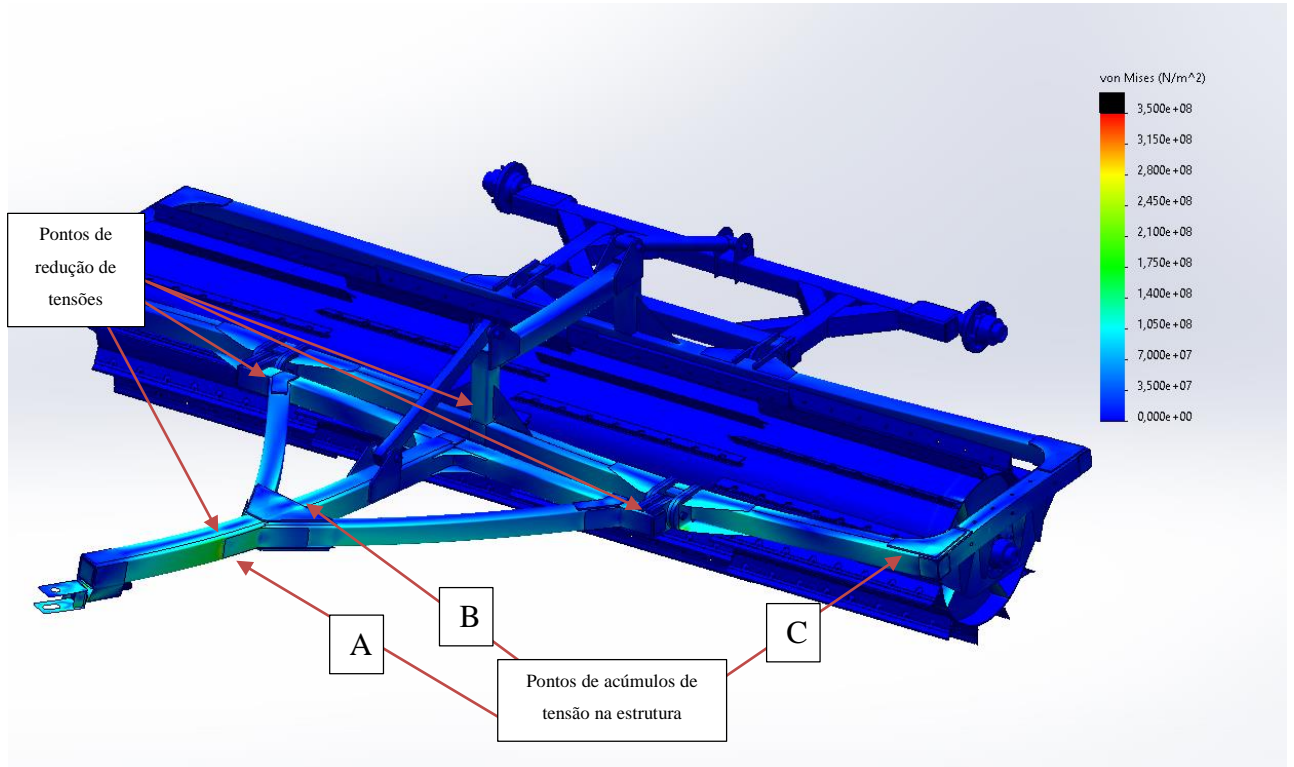
$$\begin{aligned} \vec{F}_{res} &= m \vec{a} \quad (4) \\ \vec{F}_{res} &= 2509,99 \times 9,81 \\ \vec{F}_{res} &= 24,623 \text{ kN} \end{aligned}$$

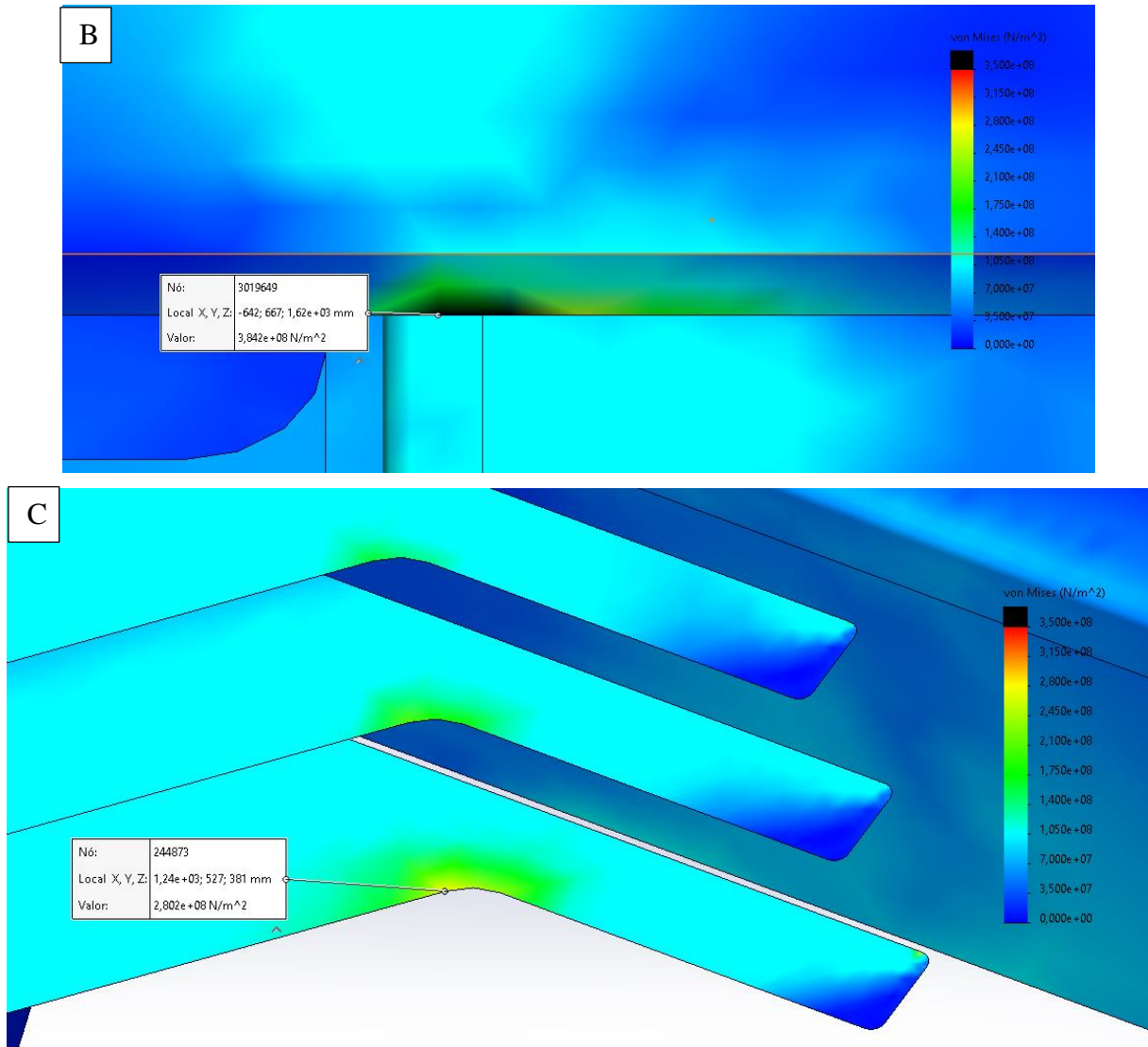
### 2.6.3.2 Primeiro caso – Manobra – Modelo II

É possível observar na figura 32 (A), que houve uma redução nos pontos de falha e de acúmulos de tensão. Porém ainda se tem pontos de tensões que excedem a tensão de escoamento, mas nenhum excede a tensão de ruptura se concentrando principalmente no cabeçalho, sendo nas figuras 32 (A), (B), (C). Restante da estrutura ficando em torno de 100 Mpa.



Figura 31 — Pontos de flexão para o primeiro caso na proposta dois. (A) Ponto de tensão no cabeçalho, (B) Ponto de tensão no reforço dos tubos do cabeçalho, (C) Ponto de tensão no chassi do cabeçalho.



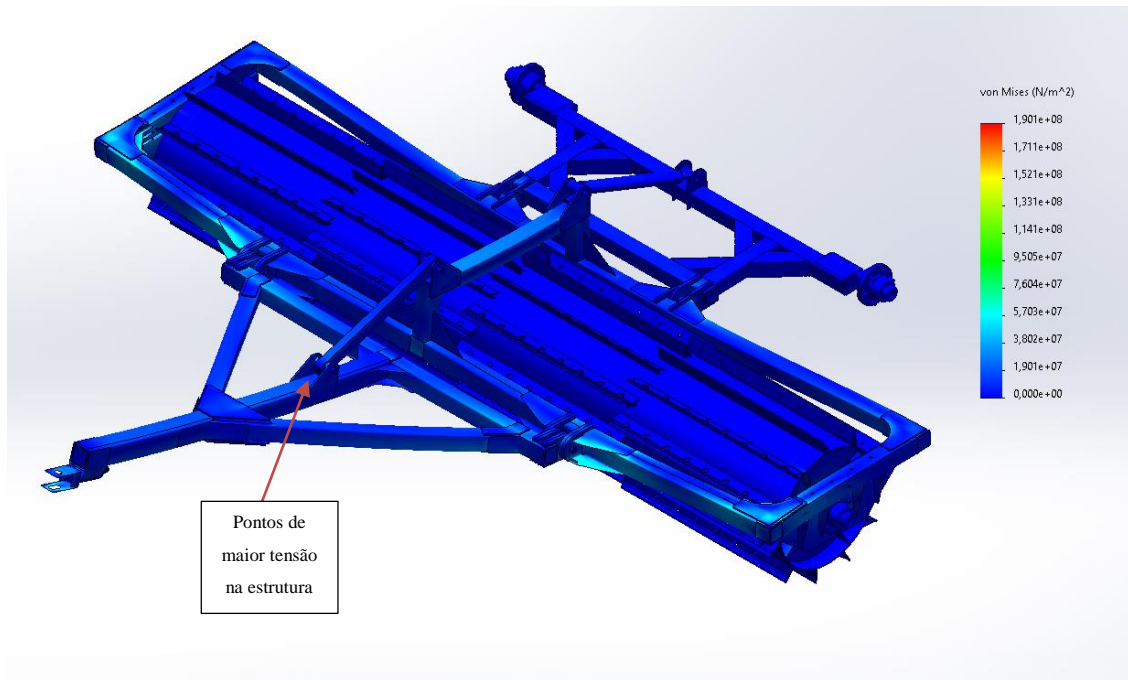


Fonte: Autor (2024).

### 2.6.3.3 Segundo caso – Operação – Modelo II

No segundo não houve pontos de falha na estrutura, sendo as regiões (Figura 33) a uma região com maior tensão no implemento, com valor de 190 MPa. E o restante da estrutura com 30-40 MPa. Tendo uma redução considerável nas tensões do implemento em comparação a primeira proposta.

Figura 32 — Pontos de acúmulo de tensão no segundo caso na proposta dois.

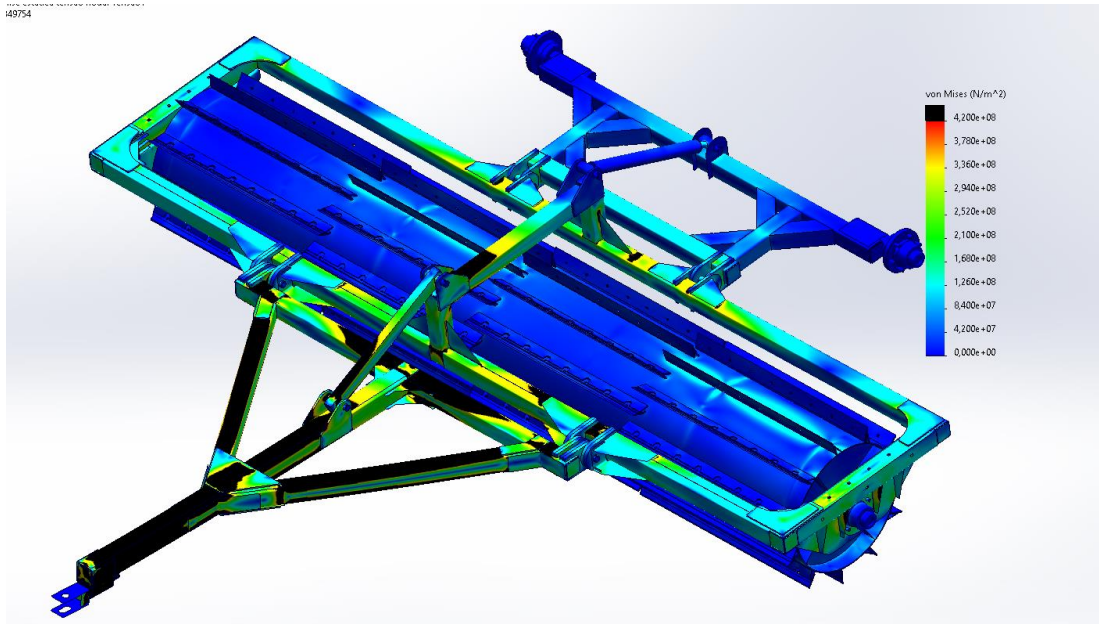


Fonte: Autor (2024).

#### 2.6.3.4 Terceiro caso – Queda – Modelo II

Neste caso houve vários pontos de falhas na estrutura (Figura 34), com vários pontos passando da tensão de ruptura do material, mesmo após as melhorias já destacadas na proposta de solução.

Figura 33 — Pontos de acúmulo de tensão no terceiro caso na proposta dois.

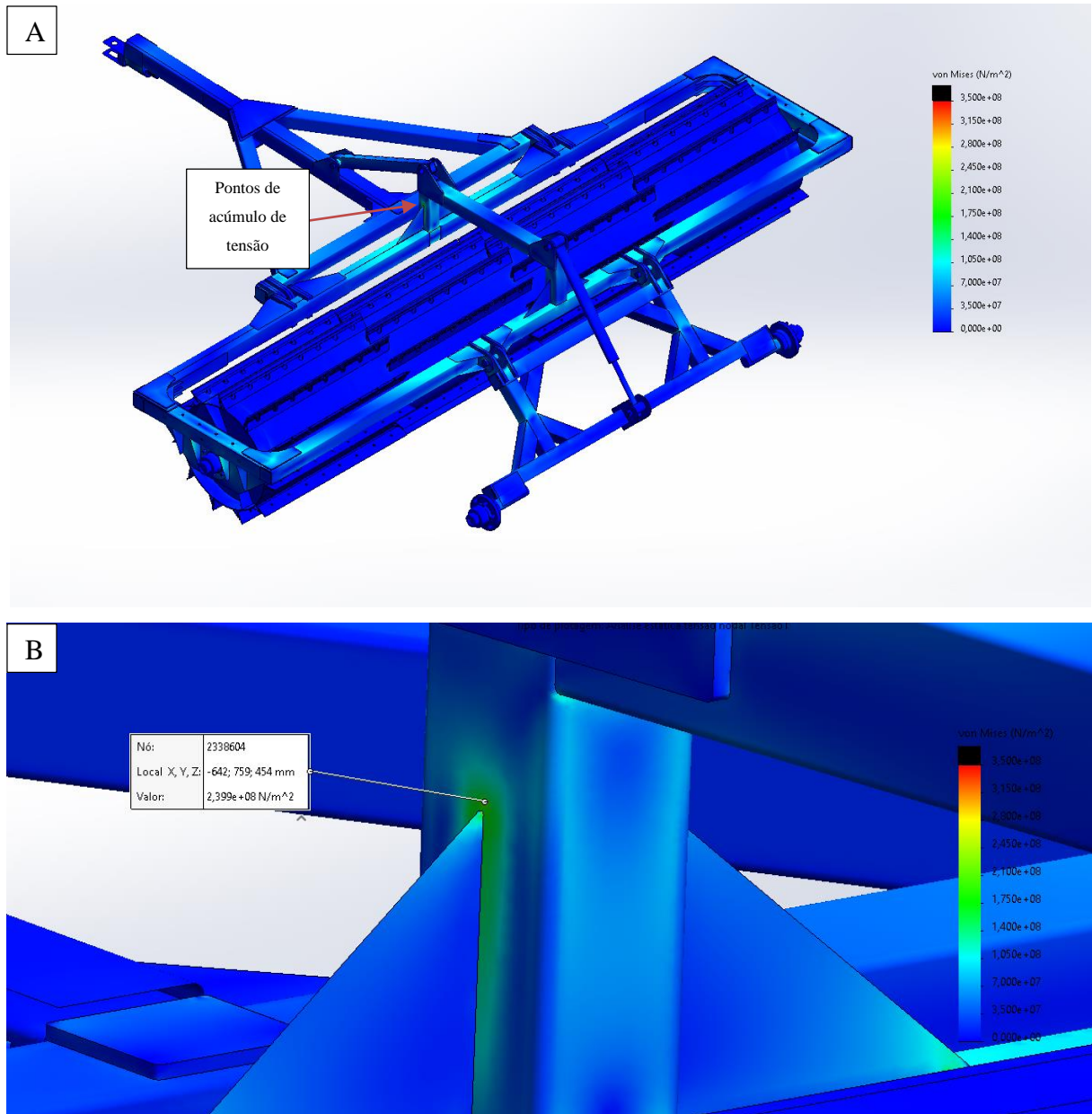


Fonte: Autor (2024).

#### 2.6.3.5 Quarto caso – Transporte – Modelo II

Não houve pontos que ultrapasse a tensão de escoamento Figura 35(A), o ponto maior tensão sendo de 239 MPa Figura 35 (B) e o restante da estrutura com tensões em torno de 40 A 80 MPa. Tendo um resultado de tensões parecidas e nos mesmos pontos comparação a primeira proposta.

Figura 34 — Ponto de acúmulo de tensão no quarto caso na proposta dois.



Fonte: Autor (2024).

## 2.7 SEVERIDADE DOS CASOS DE SIMULAÇÃO

A força na barra de tração do implemento utilizada no primeiro caso e segundo caso, foi determinada com a força máxima do trator e com as potências de tratores recomendadas por outros fabricantes de rolos facas.

Dessa maneira estes casos com a fixação completa do rolo e das facas inferiores, seriam como se o mesmo estivesse “Atolado” na lama ou com o rolo encostado em um toco e o trator fazendo a força máxima, sendo um esforço maior do que o necessário para operação.

Contudo, nesta situação não ilustra 100% da realidade, pois no caso desse implemento se tem a rotação do rolo. Para ter uma maior aproximação da realidade teria que se realizar uma simulação dinâmica e para uma avaliação ainda melhor seria a produção de um protótipo virtual 3D e avaliações a campo com extensômetros.

Mesmo com esse esforço maior do que o necessário para operação o primeiro, segundo caso e o quarto caso após a proposta de solução mostrou que a maior parte da estrutura fica com o coeficiente de segurança em torno de três, apenas um ponto do primeiro caso atingiu a tensão de escoamento.

No terceiro caso há uma certa dificuldade de aplicar equações que descrevem melhor a realidade como aplicação de equações de impacto por exemplo, por conta da falta de informações disponíveis para aplicação das mesmas.

Dessa maneira foram realizadas algumas simplificações e atribuições de valores para obter o resultado de força, como a altura de queda de 300 mm e a deformação do solo de 25 mm.

Os resultados obtidos mostram falha em grande parte da estrutura, porém como já descrito o valor da força pode estar superestimado e como no primeiro e segundo caso não está sendo levado em conta a rolagem do rolo.

## 2.8 CUSTO DE MATERIAIS PARA O PROTÓTIPO REAL

Será realizado dois levantamento de custos de materiais para as duas propostas, um com as laminas do rolo em aço Hardox® 500 e outro com aço SAE 1045 (Tabela 18).

Tabela 18 — Custo de materiais do projeto.

Custo	<b>Laminas de aço Hardox® 500</b>		<b>Laminas de aço SAE 1045</b>	
	Primeira proposta	Segunda proposta	Primeira proposta	Segunda proposta
	R\$ 26.129,60	R\$ 32.639,36	R\$ 22.437,60	R\$ 28.947,36

Fonte: Autor (2024).

Os custos foram estimados com base nos valores de custo real com fornecedores que a empresa já trabalha nos dias atuais.

Tendo uma diferença de R\$6.509,79 de aumento de custo em relação a segunda e primeira proposta. E com diferença de R\$3.692,00 das lâminas em aço SAE 1045 e aço Hardox® 500.

Porém esse custo das lâminas irão variar de acordo com a preferência do cliente, se há o desejo de maior durabilidade das lâminas, dependendo do solo que o implemento será aplicado.

Ao comparar a (Tabela 19) com a (Tabela 5), é possível observar que ambas as propostas ficaram com especificações semelhantes às concorrentes, mas com aspectos e soluções diferentes para cada subconjunto do implemento.

Tabela 19 — Especificações das propostas apresentadas.

<b>Especificações</b>	<b>Proposta 1</b>	<b>Proposta 2</b>
Largura de transporte(mm)	4219,26	4219,26
Largura de operação (mm)	3900	3900
Comprimento de transporte (mm)	3800	3800
Diâmetro do Rolo sem as facas (mm)	600	600
Diâmetro do Rolo com as facas (mm)	749	749
Quantidade de facas no rolo	48 Unidades	48 Unidades
Material das facas	Aço <i>Hardox</i> ® 500 SAE 1045	Aço <i>Hardox</i> ® 500 SAE 1045
Lastreamento do Rolo em Litros (kg)	1050	1050
Peso aproximado sem lastro (kg)	1027	1432,87
Peso aproximado com lastro (kg)	2077	2482,87
Velocidade máxima de operação (km/h)	12	12
Velocidade máxima de transporte (km/h)	10	10

Fonte: Autor (2024).

### 3 CONCLUSÃO

Os resultados do protótipo dois foram satisfatórios, pois o primeiro, segundo e quarto caso apresentaram resultados abaixo da tensão de escoamento, mesmo superestimando os valores de força para o primeiro, segundo caso e o quarto caso com a força concentrada no rolo.

Porém para o terceiro caso apresentou falhas na estrutura com pontos de tensões acima da tensão de escoamento, porém os valores de força para os mesmo foram superestimados por falta de parâmetros para determinação do esforço.

Logo se apresenta um problema de aumentar a resistência da estrutura em geral, mas não ser necessário pois o mesmo foi baseado como descrito no projeto conceitual e informacional em alguns modelos já presentes no mercado.

Se aumentar a resistência da estrutura o custo para produção irá cada vez subir mais, perdendo valor de competição no mercado, por se tratar de uma empresa nova, este é um fator importante e decisivo.

Houve uma diferença de valores da primeira proposta para a segunda de R\$6.509,79, onde para a produção em larga escala, com uma média de 10 produtos por mês durante o ano, há um aumento de custo de R\$65.097,90 por mês e R\$781.174,80 por ano.

Acaba sendo necessário a produção de um protótipo real da proposta um e submete-lo a testes a campo. Fazendo alterações no protótipo para os pontos em que se obtiver acúmulos de tensões ou pontos de falha.

Sendo instrumentado os pontos em que já observa-se acúmulos de tensões nos casos de simulações realizados.

Ajustando o custo com a resistência e durabilidade a campo. O projeto precisa ser viável para a empresa e competitivo no mercado, mas também precisa atender os requisitos do cliente e de projeto e evitar ao máximo falhas a campo.

Não sendo viável economizar na estrutura do implemento e aumentar o custo com assistências técnicas durante o período de garantia e também denegrir a imagem da empresa com falhas a campo.

O objetivo foi alcançado que é o desenvolvimento de um projeto virtual de rolo faca para o setor agrícola, com o objetivo de atender as demandas do mercado e que seja possível fabricar em larga escala.



Os objetivos específicos foram atingidos como Investigar as tecnologias e materiais mais adequados para fabricação do rolo faca, por exemplo aços especiais que se tem disponível no mercado. Como o aço Hardox® 500.

A análise de custo de materiais para fabricação e o protótipo virtual do rolo faca que possam resistir a esforços que são possíveis prever que estão presentes no campo, também foram atingidos.

### 3.1 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Poderia ser realizado a análises de elementos finitos de maneira dinâmica, mas da mesma maneira como foi para a estática, certas situações se tornam difíceis mensurar os parâmetros para a simulação, se torna necessário ensaios para determinar estes parâmetros para então partir para a análise de elementos finitos.

Outra proposta de trabalho futuro seria a construção de um protótipo físico e instrumentá-lo com extensômetros e submetê-lo a testes a campo.

Fazer uma análise da compactação do solo provocada pelo uso do rolo faca e tentar otimizá-lo ainda mais. Com o objetivo de encontrar a relação “ideal” de peso e eficiência do implemento.

## REFERÊNCIAS

ASAE. D497.4 – **Agricultural machinery management data**. In: Standards 2006. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, MI. 2006;

BEUTLER, A. N. et al. **Efeito da compactação na produtividade de cultivares de soja em latossolo vermelho**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 30, n. 5, p. 787–794, out. 2006.  
**Busca de Publicações - Portal Embrapa**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/567569/manejo-integrado-de-plantas-daninha>>. Acesso em: 6 out. 2024;

BUDYNAS, R. G. **Elementos de Máquinas de Shigley**. 10a edição ed. [s.l.] AMGH, 2016.  
 HIBBELER, Russel et al. **Resistencia-Dos-Materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson, 2010. 659 p;

**CHAPA DE AÇO SAE 1020**. Disponível em: <<https://compraco.com.br/blogs/industria/chapa-de-aco-sae-1020>>. Acesso em: 5 out. 2024;

**Controle de plantas daninhas: métodos físico, mecânico, cultural, biológico e alelopatia**. - Portal Embrapa. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1103281/controle-de-plantas-daninhas-metodos-fisico-mecanico-cultural-biologico-e-alelopatia>>. Acesso em: 6 out. 2024;

CROPLIFE. **Agricultura moderna: conheça as tecnologias que fazem parte do campo - Croplife**. Disponível em: <<https://croplifebrasil.org/agricultura-moderna-conheca-as-tecnologias-que-fazem-parte-do-campo-croplife-brasil/>>. Acesso em: 26 dez. 2024;

DETERS, A. **Projeto de Adaptação Plana Agrícola Frontal para Tratores Agrícolas**. 2014. Dissertação (Bacharelado Engenharia Mecânica) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo. 2014;

EPAGRI. **Para que serve o rolo-faca: conheça esse equipamento usado no plantio direto – Epagri**. Disponível em: <<https://www.epagri.sc.gov.br/index.php/2020/09/02/para-que-serve-o-rolo-faca-conheca-esse-equipamento-usado-no-sistema-de-plantio-direto/>>. Acesso em: 26 dez. 2024;

FELIZARDO, P. **CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS -CEFET-MG -APOSTILA - TECNOLOGIA DA SOLDAGEM DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DEM -CAMPUS II**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://dem.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/39/2017/09/Apostila-Tecnologia-da-Soldagem.pdf>>. Acesso em: 20 dez. 2024;

FERDINAND P. Beer; E. RUSSEL Johnston, Jr.; JOHN T. DeWolf; DAVID F. Mazurek. **Mecânica dos materiais**. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2011. 800 p;

FERDINAND PIERRE BEER; AL, E. **Mecânica vetorial para engenheiros**. São Paulo: Mcgraw-Hill, 2012;

**Gerar malhas - 2021 - Ajuda do SOLIDWORKS.** Disponível em: <[https://help.solidworks.com/2021/portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/c\\_Meshing.htm](https://help.solidworks.com/2021/portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/c_Meshing.htm)>. Acesso em: 5 out. 2024;

**Hardox® 500.** Disponível em: <<https://www.ssab.com/pt-br/marcas-e-produtos/hardox/programa-de-produto/500>>. Acesso em: 5 out. 2024;

HIBBELER, Russel et al. **Dinâmica mecânica para engenharia.** 14. ed. São Paulo: Pearson, 2017. 699 p;

LIMA, G. **Ciclo de produção agrícola: como gerenciar a safra?** Disponível em: <<https://armac.com.br/blog/agronegocio/ciclo-de-producao-agricola/>>. Acesso em: 24 out. 2024;

MALISZEWSKI, E. **Você sabe para que serve o rolo-faca?** Disponível em: <[https://www.agrolink.com.br/noticias/voce-sabe-para-que-serve-o-rolo-faca-\\_439097.html](https://www.agrolink.com.br/noticias/voce-sabe-para-que-serve-o-rolo-faca-_439097.html)>. Acesso em: 26 dez. 2024;

MIRLISENNA, GIUSEPPE. **Método dos Elementos Finitos: O que é? - ESSS, 2019.** Disponível em: <https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>, Acesso em: 05 de outubro de 2024;

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas, uma abordagem integrada.** Porto Alegre: Bookman. 2013;

**Propriedades do aço ASTM A36, elasticidade, resistência ao escoamento.** Disponível em: <<https://compraco.com.br/blogs/especificacoes-do-aco/propriedades-do-aco-astm-a36-modulo-de-elasticidade-resistencia-ao-escoamento-densidade-do-material-dureza-e-equivalente>>. Acesso em: 5 out. 2024;

**PropertyManager de Malha - 2023 - Ajuda do SOLIDWORKS.** Disponível em: <[https://help.solidworks.com/2023/Portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/IDC\\_HELP\\_MESHESOLID.htm](https://help.solidworks.com/2023/Portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/IDC_HELP_MESHESOLID.htm)>. Acesso em: 5 out. 2024;

RIBEIRO RODRIGUES, C. et al. **Soldagem na indústria do petróleo.** [s.l.] 2022, 2022.

RUSSINI, Alexandre. **Estimativa do desempenho de tratores agrícolas em campo e pista a partir do ensaio dinamométrico.** Orientador: José Fernando Schlosser. 2012. 142 f. Tese (Doutorado em engenharia agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/3599/RUSSINI%2c%20ALEXANDRE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 dez. 2024;

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Reinert & Reichert - **Propriedades físicas do solo.** Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/337498761\\_Reinert\\_Reichert\\_-\\_Propriedades\\_fisicas\\_do\\_solo](https://www.researchgate.net/publication/337498761_Reinert_Reichert_-_Propriedades_fisicas_do_solo)>. Acesso em: 26 dez. 2024;

SECCO, D. et al. **Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, n. 5, p. 797–804, out. 2004;

SECCO, Deonir. **Estados de compactação e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas em dois latossolos sob plantio direto.** Orientador: Dalvan José Reiner. 2003. 118 f. Tese (Doutorado em agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012. Disponível em: [https://www.fiscadosolo.ccr.ufsm.whoos.com.br/downloads/Deonir\\_Secco\\_Tese.pdf](https://www.fiscadosolo.ccr.ufsm.whoos.com.br/downloads/Deonir_Secco_Tese.pdf). Acesso em: 07 Jan. 2025;

SILVA, R. H. DA; ROSOLEM, C. A. **Crescimento radicular de soja em razão da sucessão de cultivos e da compactação do solo.** *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 37, n. 6, p. 855–860, jun. 2002;

**SolidWorks - Opções de geração de malha.** Disponível em: <[https://help.solidworks.com/2022/portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/c\\_meshing\\_options.htm?format=P&value=>](https://help.solidworks.com/2022/portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/c_meshing_options.htm?format=P&value=>)>. Acesso em: 5 out. 2024;

SOLIDWORKS. SOLIDWORKS CAD 3D: Disponível em: <https://www.solidworks.com/pt-br/product/solidworks-3d-cad>. Acesso em: 6 out. 2024.

SANTOS, H.G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 5ª ed. Brasília: EMBRAPA, 2018. 356p;

SolidWorks - **Verificações de qualidade da malha.** Disponível em: <[https://help.solidworks.com/2010/Portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/Meshing\\_topics/IDH\\_What\\_are\\_the\\_mesh\\_quality\\_checks\\_.html?format=P&value=>](https://help.solidworks.com/2010/Portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/Meshing_topics/IDH_What_are_the_mesh_quality_checks_.html?format=P&value=>)>. Acesso em: 12 out. 2024;

**Tratamento térmico de aço carbono ASTM SAE AISI 1045, composição química.** Disponível em: <[>https://compraco.com.br/blogs/especificacoes-do-aco/tratamento-termico-de-aco-carbono-astm-sae-aisi-1045-composicao-quimica-propriedades](https://compraco.com.br/blogs/especificacoes-do-aco/tratamento-termico-de-aco-carbono-astm-sae-aisi-1045-composicao-quimica-propriedades)>=>. Acesso em: 5 out. 2024;

TEJO, D. et al. **SOJA: Fenologia, morfologia e fatores que interferem na produtividade.** v. 35, 2019;

VARELLA, C. **Estimativa de capacidade de tração de tratores agrícolas.** Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica- RJ;