



**Wellerson Alan Eisermann**

**ALTERAÇÃO DE PROJETO DO CHASSI DE UMA CARRETA GRANELEIRA  
ATRAVÉS DE ANÁLISE ESTRUTURAL**

Horizontalina - RS

2020

**Wellerson Alan Eisermann**

**ALTERAÇÃO DE PROJETO DO CHASSI DE UMA CARRETA GRANELEIRA  
ATRAVÉS DE ANÁLISE ESTRUTURAL**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica na Faculdade Horizontina, sob a orientação do Dr. Geovane Webler

Horizontina - RS

2020

FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

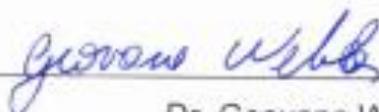
A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o trabalho final de curso

“Alteração de projeto do chassi de uma carreta graneleira através de análise  
estrutural”

Elaborada por:  
**Wellerson Alan Eisermann**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Mecânica

Aprovado em: 07/12/2020  
Pela Comissão Examinadora



---

Dr. Geovane Webler

Presidente da Comissão Examinadora - Orientador



---

Me. Luis Carlos Wachholz

FAHOR – Faculdade Horizontina



---

Me. Scheila Cristiane Angnes Willers Klein

FAHOR – Faculdade Horizontina

Dedico este trabalho à minha família, por sempre acreditar em mim, me entender e apoiar a evoluir para ter uma educação exemplar.

## AGRADECIMENTO

Primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, pela graça da vida e por proporcionar a realização deste sonho.

Meus sinceros agradecimentos também, a todos que influenciaram e auxiliaram de alguma forma o meu crescimento profissional e ético. Em especial à minha família por sempre me incentivar e apoiar a seguir em frente.

Agradecer também ao meu orientador Geovane Webler, que não mediu esforços em me auxiliar neste trabalho, e todos os professores que contribuíram ao longo de minha jornada universitária.

“Só se pode alcançar um grande êxito quando nos mantemos fiéis a nós mesmos”.

(Friderich Nietzsche)

## RESUMO

Levando em consideração a necessidade de redução de matéria prima do chassi de uma carreta graneleira com carga máxima de 10500 kg, em virtude da competitividade deste produto, este trabalho de pesquisa teve por objetivo a realização de análises estruturais estáticas lineares do componente através do método de elementos finitos. A partir dessa análise elaborou-se uma nova proposta de projeto com intuito de reduzir a matéria prima, que foi validada através de análise estrutural em diferentes situações, justamente para trazer a análise o mais próximo possível do real. A análise foi feita através do *software Ansys Student*, com auxílio de alguns recursos do mesmo, e levará em conta cinco casos de carga diferentes. Os objetivos foram alcançados e as hipóteses se comprovaram. Com a nova proposta teve-se um projeto com uma resistência ideal e que proporcionou uma redução de 15% de matéria prima do conjunto, onde efetuou-se alterações mais concentradas na parte traseira do chassi.

**Palavras-chave:** Carretas graneleiras. Análise estática estrutural linear. Ansys Workbench.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Carreta graneleira com sistema de gravidade .....	16
Figura 2 – Chassi de carreta graneleira .....	16
Figura 3 – Etapas de solução de um problema pelo MEF .....	23
Figura 4 – Refinamento .....	24
Figura 5 – Forças exercidas em roda de giro livre .....	26
Figura 6 – Casos de carga .....	29
Figura 7 – Componentes removidos .....	31
Figura 8 – Geometria simplificada .....	32
Figura 9 – Contatos entre corpos .....	33
Figura 10 – Malha chassi atual .....	34
Figura 11 – Restrição de eixo .....	35
Figura 12 – Tração frontal .....	36
Figura 13 – Deformações chassi atual .....	37
Figura 14 – Análise inicial do chassi atual .....	38
Figura 15 – Singularidade de tensão no chassi atual .....	39
Figura 16 – Análise longarinas chassi atual .....	39
Figura 17 – Análise reforço inferior .....	40
Figura 18 – Análise quadro traseiro atual .....	41
Figura 19 – Perfil dianteiro e traseiro .....	41
Figura 20 – Comparativo alteração longarina lateral .....	42
Figura 21 – Reforço interno união da lança .....	43
Figura 22 - Malha chassi proposto .....	44
Figura 23 – Deformações chassi proposto .....	45
Figura 24 – Análise inicial chassi proposto .....	46
Figura 25 – Singularidade de tensão lança .....	47
Figura 26 – Longarina lança chassi proposto .....	47
Figura 27 – Reforço inferior chassi proposto .....	48
Figura 28 – Reforço interno .....	49
Figura 29 – Longarina lateral chassi proposto .....	49
Figura 30 – Análise ângulo lateral de 12° .....	51
Figura 31 – Tração frontal à 30° .....	51
Figura 32 – Carga com acréscimo de 50% .....	52

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Fatores utilizados para determinar um coeficiente de segurança para materiais dúcteis .....	24
Quadro 2 – Coeficientes de rolamento .....	25

## **LISTA DE ABREVIATURAS E/OU SIGLAS**

g – Aceleração gravitacional

kN – kilo Newton

MEF – Método de Elementos Finitos

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1 TEMA .....	11
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA .....	12
1.3 PROBLEMA DE PESQUISA .....	12
1.4 HIPÓTESES .....	12
1.5 JUSTIFICATIVA .....	13
1.6 OBJETIVOS .....	14
<b>1.6.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>14</b>
<b>1.6.2 Objetivos Específicos</b> .....	<b>14</b>
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>15</b>
2.1 CARRETAS GRANELEIRAS .....	15
<b>2.1.1 Conceitos e funcionalidades</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1.2 Chassi</b> .....	<b>16</b>
2.2 CARGAS .....	17
2.3 ANÁLISE ESTRUTURAL .....	18
<b>2.3.1 Falhas de materiais dúcteis sob carregamentos estáticos</b> .....	<b>19</b>
<b>2.3.2 Teoria da energia da distorção de <i>Von Mises-Hencky</i></b> .....	<b>19</b>
<b>2.3.3 Limite da resistência para fadiga</b> .....	<b>20</b>
2.4 ELEMENTOS FINITOS .....	21
2.5 ANSYS .....	22
2.6 RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO .....	25
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>27</b>
3.1 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS .....	27
<b>3.1.1 Casos de carga</b> .....	<b>28</b>
3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS .....	30
<b>4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>31</b>
4.1 ANÁLISE CHASSI ATUAL .....	31
<b>4.1.1 Pré-processamento chassi atual</b> .....	<b>31</b>
<b>4.1.2 Processamento chassi atual</b> .....	<b>36</b>
<b>4.1.3 Pós-processamento chassi atual</b> .....	<b>36</b>
4.2 ALTERAÇÃO DE PROJETO .....	41
<b>4.2.1 Projeto chassi proposto</b> .....	<b>41</b>
4.3 ANÁLISE CHASSI PROPOSTO .....	43
<b>4.3.1 Pré-processamento chassi proposto</b> .....	<b>43</b>
<b>4.3.2 Processamento chassi proposto</b> .....	<b>44</b>
<b>4.3.3 Pós-processamento chassi proposto</b> .....	<b>45</b>
<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>53</b>
<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>54</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>55</b>
<b>ANEXO A – PROPRIEDADES DO MATERIAL UTILIZADO</b> .....	<b>57</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O grande avanço que o agronegócio vem tendo nos últimos anos fez com que o setor de produção de máquinas e equipamentos agrícolas tenha alta competitividade entre as fabricantes. Esse fato faz com que a busca por reduções de custo e conseqüente redução de preço de venda é constante e necessária para as empresas se manterem competitivas neste mercado.

Neste sentido, um dos produtos com aumento significativo no número de vendas e de competitividade são as carretas graneleiras. Isso se deve a dois principais fatores: a necessidade de otimizar sempre mais o tempo de colheita no menor tempo possível sem paradas de colheitadeiras e, também, pela liberação de financiamentos que facilitam a compra destes equipamentos. Desta maneira, este é um produto que a empresa em estudo enfoca muito e, ultimamente, está tendo um ótimo resultado no número de vendas.

O número alto de vendas e a alta competitividade oportuniza o estudo da melhoria deste projeto, objetivando a redução de custo do produto. Um componente muito trabalhado em simulações estruturais com esse intuito, é o chassi destes equipamentos. Isso se deve por este apresentar grandes possibilidades de alteração e, por muitas vezes, ser um item com coeficiente de segurança excessivamente alto.

Assim, o objetivo deste projeto é avaliar a possibilidade de alteração dos componentes do chassi de uma carreta graneleira 13000 litros através de uma análise estrutural. Desta forma, será avaliado quais componentes tem possibilidade de alteração sem prejudicar funcionalidade e estrutura.

Por fim, com os resultados encontrados, será possível indicar alguma proposta de alteração de projeto e abrindo possibilidade para uma redução de custo no equipamento. Assim, a empresa terá aumento nos ganhos financeiros e um aumento de competitividade frente ao mercado de vendas deste equipamento.

### 1.1 TEMA

No desenvolvimento deste trabalho o foco é a alteração de projeto do chassi de uma carreta graneleira a partir dos resultados da análise estrutural linear estática.

## 1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Este estudo delimita-se na análise estática estrutural linear de um chassi de uma carreta graneleira, pelo Método de Elementos Finitos (MEF), com auxílio de programas computacionais e com sua validação estrutural e de redução de matéria prima. O trabalho foi realizado tendo como base um produto fabricado por uma empresa metalomecânica da região noroeste do estado do Rio Grande do Sul.

## 1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

Analisando o mercado de carretas graneleiras a empresa se depara com dificuldades em conseguir formar um preço atraente e que a torne competitiva com empresas já consolidadas nesta linha de produtos. Assim surge a necessidade de, de alguma maneira, reduzir o custo de fabricação do produto, onde a alteração de projeto surge como uma das principais alternativas.

Levando em consideração que o chassi corresponde a 30% da matéria prima total da máquina, este surge como uma oportunidade para se realizar a análise estrutural com intuito de avaliar a possibilidade de redução de matéria prima.

Uma alteração de projeto sempre deve ser muito bem analisada, para que não se perca a essência da funcionalidade da máquina e, principalmente, sem perder a segurança do equipamento. Neste sentido, é necessário utilizar ferramentas de análise eficazes e seguras.

Ao encontro disso, o problema de pesquisa deste projeto consiste em: Quais são os componentes do chassi que podem ser alterados e como dimensionar os mesmos de forma que haja redução de matéria prima e que mesmo assim não se exceda os limites de tensão?

## 1.4 HIPÓTESES

Ao encontro do problema de pesquisa e analisando o objeto de estudo pode-se apontar algumas hipóteses. Para Lakatos e Marconi (2003), as hipóteses são suposições que podem ser as prováveis soluções do problema, e nos resultados poderá ser verificado se realmente são válidas. Assim nas hipóteses a seguir procura-se responder ao problema da pesquisa.

- a) Como o chassi do equipamento corresponde a 30% de matéria prima, sendo assim o componente de maior massa da máquina, esse está passível de alguma redução de material;
- b) Estima-se que as vigas frontais e traseiras são os itens submetidos a tensões mais baixas durante o ciclo de trabalho, proporcionando oportunidade para redução de matéria prima;
- c) Reduzindo a matéria prima do chassi, ter-se-á uma redução de custo;
- d) Os reforços internos podem ser colocados em pontos estratégicos, podendo, assim, sofrerem alguma redução de espessura;

A partir destas hipóteses irá se sustentar o caminho a ser seguido neste trabalho.

## 1.5 JUSTIFICATIVA

Utilizando como base o grande trabalho que há por trás de uma engenharia de produto, uma das principais atividades executadas neste setor atualmente é a redução de matéria prima de projetos, principalmente em projetos de implementos agrícolas. Neste trabalho optou-se por fazer uma análise em um produto com alto número de vendas, o que garante que qualquer redução feita tenha um retorno rápido.

Para este estudo, a principal ferramenta utilizada será a análise numérica pelo Método de Elementos Finitos, executando-se no complemento *Mechanical* do software de simulação *Ansys Workbench Student*, onde é possível calcular tensões, deformações e demais comportamentos mecânicos do objeto de estudo. Assim, neste trabalho, será possível através de aplicação de cargas estáticas, da análise de pontos críticos e de regiões de baixa tensão, verificar itens que podem ter redução de espessura, alteração de geometria ou até mesmo eliminação de algum componente.

Essas alterações de projeto, que visam redução de matéria prima, geram um retorno imediato, ou seja, são alterações que praticamente não necessitam investimento e a redução já impacta diretamente nos novos itens fabricados e no consumo de matéria prima. Mas, além da redução em matéria prima também será avaliado o processo produtivo do item que, de acordo com a geometria, pode ter seu processo de fabricação simplificado.

Neste sentido, o chassi do equipamento, por conter 30% da matéria do equipamento e ter uma estrutura reforçada por ser um item vital, possibilitará melhorias que trarão grandes resultados para a empresa, tanto de reduções de matéria prima como de processo, sem reduzir a segurança e a funcionalidade do produto.

## 1.6 OBJETIVOS

### 1.6.1 Objetivo Geral

O desenvolvimento deste trabalho tem por objetivo a alteração de projeto do chassi de uma carreta graneleira 13000 litros com finalidade de redução de matéria prima. A análise se dará a partir de simulação estrutural linear estática através de software e de dados da empresa.

### 1.6.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos para atender ao objetivo principal são:

- a) simular esforços estáticos atuantes no chassis em software *Ansys Student*;
- b) analisar pontos superdimensionados e frágeis;
- c) apresentar proposta de alteração de projeto;
- d) realizar nova análise de resultados do projeto alterado;

## **2 REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1 CARRETAS GRANELEIRAS**

#### **2.1.1 Conceitos e funcionalidades**

Carreta graneleira é um implemento agrícola de apoio para o transporte de grãos na lavoura. Sua principal função é estocar temporariamente e movimentar o grão, sendo tracionada por um trator, da colheitadeira até outro veículo de transporte, que geralmente não tem possibilidade de entrar na lavoura. Isso faz com que a colheitadeira praticamente não tenha paradas, aumentando sua eficiência na colheita, que atualmente é um grande problema por ter-se cada vez tempos mais curtos para a retirada do grão da lavoura (INDUTAR, 2020; AGRIMEC, 2020).

Uma carreta graneleira é composta basicamente por três componentes principais: depósito, chassi e tubo de movimentação de grãos. O cereal é inicialmente despejado pela colheitadeira no depósito que, por sua vez, está sobre um chassi com rodado e conectado ao trator. Para retirada do material do depósito é acionado um sem-fim que faz com que o grão seja elevado até a parte superior do depósito do outro veículo. O sem-fim, por sua vez, podem ser projetados para o melhor equilíbrio entre rendimento e atrito de grão (INDUTAR, 2020).

Hoje há basicamente dois modelos de carretas graneleiras no mercado. Uma com sistema por gravidade, onde o sem-fim elevador é alimentado somente pela gravidade do depósito, ou seja, o ângulo das superfícies do depósito permite que o grão deslize até a parte inferior do depósito. Por outro lado, tem-se um modelo em que o sem-fim de elevação é alimentado por um sem fim que fica em posição horizontal na parte mais inferior do depósito. Neste estudo será utilizado como base de estudo o chassi de uma carreta graneleira com sistema de gravidade, mostrado na figura 1.

Figura 1 - Carreta graneleira com sistema de gravidade

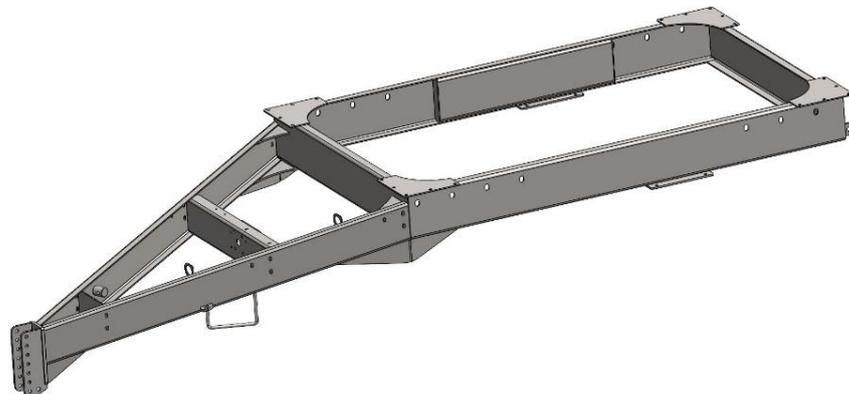


Fonte: Agrimec (2020)

### 2.1.2 Chassi

Costa (2014) cita que o chassi de um equipamento é responsável por suportar elevadas cargas que ficam sobre ele e transferir essa carga aos rodados e, caso houver, ao equipamento de tração. Dessa forma deve ter elevada rigidez flexional vertical, ou seja, o suficiente para suportar a carga que é transportada somando a carga da estrutura e, também, deve ser considerada uma certa rigidez à flexão lateral para oscilações em operação. Além disso deve ter o menor peso possível, mas sem comprometer a segurança de sua finalidade.

Figura 2 – Chassi de carreta graneleira



Fonte: Autor (2020)

Segundo Bennett (2009) apud Leandro (2019) o chassi deve estar passível de suportar vibrações em baixa frequência quando está em trabalho tendo, assim, certa flexibilidade que, por sua vez, é inversamente proporcional ao momento de inércia. Quanto maior o momento de inércia maior a rigidez do componente, que irá interferir diretamente na vibração que o chassi poderá aceitar, podendo resultar em falhas com amplitudes excessivas de oscilações.

De acordo com as características desejadas no componente se escolhe um tipo de material que atenda suas necessidades. De acordo com Juvinal (2013) a seleção do tipo de material e do processo utilizado para a fabricação de qualquer componente de máquina é parte integrante do projeto. Dentre os principais fatores considerados para esta tomada de decisões pode-se citar a resistência, rigidez, segurança e durabilidade.

Juvinal (2013) também ressalta que o custo do material e a sua disponibilidade no mercado são também de extrema importância. No custo deve ser considerado o custo de fabricação do componente, incluindo mão-de-obra e despesas adicionais. Porém, no mercado atual, esses dois fatores tem muita variação com o tempo e, em função disso, as vezes é necessário utilizar materiais alternativos de acordo com as condições do mercado mas sem comprometer sua funcionalidade. Resumindo, o material ideal para cada componente é aquele que oferece o melhor custo benefício, tomando como base suas características e o seu custo total.

Considerando isso, o material utilizado para a fabricação do chassi de carretas graneleiras na empresa em estudo é o aço ASTM A36. É usado este por motivos de custo e por conter boas características para esta aplicação. Suas propriedades mecânicas proporcionam boa flexibilidade perante a sua boa deformação elástica, porém, deve-se ter uma atenção especial quanto ao escoamento para evitar a plasticidade do material.

## 2.2 CARGAS

Para melhor entendimento, inicialmente será definido o que são cargas estáticas e quais as causas do seu esforço em um componente. Segundo Shigley (2005), cargas estáticas são forças ou momentos estacionários aplicados sobre um item, ou seja, elas não podem variar de maneira alguma em magnitude, em ponto de aplicação e direção. A resultante dessa carga pode ser uma força de tração,

cisalhamento, flexão ou torção. Sendo assim, de modo geral cargas são forças que atuam sobre o componente, e podem ser estáticas ou dinâmicas. Estas resultam em tensões no componente, que podem ser tensões normais ou tensões cisalhantes.

Norton (2013) define que tensões normais são as aplicadas perpendicularmente à face do cubo e tensões cisalhantes são as que atuam paralelas às faces dos cubos e em sentidos opostos. Para suportar essas tensões sem sofrer falhas é necessário que o componente tenha certa rigidez flexional, para resistir aos momentos fletores causados e, também, certa rigidez torcional para resistir aos deslocamentos laterais.

Para Timoshenko (1940) apud Leandro (2019), rigidez flexional ( $K_f$ ) é o produto entre o módulo de elasticidade do material e o momento de inércia neste mesmo ponto. A equação 1 define rigidez flexional pelo produto do carregamento  $P$  pelo deslocamento  $\Delta D$ .

$$K_f = \frac{P}{\Delta D} \quad (1)$$

Segundo Genta (2009) apud Leandro (2019) rigidez torcional ( $K_\phi$ ) é a razão entre o momento de rolagem (eixo traseiro) e seu deslocamento angular, utilizando como base o ponto de engate como ponto de fixação e referência. É definido pela divisão do torque  $T$  pelo deslocamento angular  $\phi$ . É importante para tornar possível o entendimento da interação entre o deslocamento lateral com os pontos de apoio do chassi e é definida pela equação 2.

$$K_\phi = \frac{T}{\phi} \quad (2)$$

Ainda sobre a rigidez torcional, de acordo com os estudos de Arant (2010) sobre os diferentes tipos de chassi, foi possível demonstrar que a rigidez torcional tem alta relação com a estabilidade veicular, ou seja, se o componente não tiver certa rigidez torcional ou em excesso o componente pode perder a estabilidade facilmente em condições que exigem trabalhos laterais.

### 2.3 ANÁLISE ESTRUTURAL

Ao realizar uma análise estrutural deve-se considerar quais são as condições que o modelo se encontra na realidade, seja nas restrições, nos carregamentos ou em outra condição mais específica como tipo de contato, pré-carregamento e entre outros. Ou seja, deve-se definir conforme a aplicação real, quais são e como são os apoios do modelo (quais os graus de liberdade, se o apoio é rígido ou deformável),

quais são os carregamentos aplicados (forças, acelerações, momentos), em situação de montagem qual tipo de contato aplicar entre componentes (colado, deslizante ou com fricção), se há pré-carregamento ou não (aperto de parafusos) e entre outros.

Geralmente os componentes de materiais diferentes devem ser analisados através de duas teorias de falha diferentes. Isso porque a análise de componentes compostos de materiais dúcteis sob ação de carregamentos estáticos, como na análise que será feita, estão limitados a tensão de cisalhamento. Já os compostos de matérias frágeis se limitam a tensão normal.

### **2.3.1 Falhas de materiais dúcteis sob carregamentos estáticos**

Norton (2013) cita que materiais dúcteis sob carregamentos estáticos se limitam pelas tensões de cisalhamento, enquanto materiais frágeis são limitados pela tensão normal. Isto requer que se tenha teoria de falhas para máxima tensão de cisalhamento e também teoria para máxima tensão normal. Também segundo Norton (2013), peças com carregamentos podem falhar se suas deformações e distorções forem excessivas que comprometam a função de sua aplicação. Podem falhar, também, sofrendo uma ruptura e separando a peça em duas partes. As deformações excessivas se referem aos materiais dúcteis, que podem se deformar significativamente antes de sua ruptura. Já as falhas por ruptura se referem aos materiais frágeis que, por suas propriedades, não têm possibilidade de deformações significativas em sua forma e já rompem.

Para um material ser considerado dúctil, segundo Callister (2012), ele tem mais de 5% de alongamento até sua ruptura. Sendo assim, os que se encontram com alongamentos abaixo de 5% são considerados frágeis.

Segundo Norton (2013) várias teorias foram criadas para explicar esses tipos de falhas, mas somente a teoria de *von Mises-Hencky* e a teoria da máxima tensão de cisalhamento concordam com dados experimentais e, das duas, a de *von Mises-Hencky* é a mais precisa.

### **2.3.2 Teoria da energia da distorção de *Von Mises-Hencky***

Juvinall (2012) ressalta que como em muitos casos se tem tensão combinadas em um mesmo ponto, ou seja, tensão normal e de cisalhamento

atuando em conjunto no mesmo ponto. Assim, faz-se necessário que seja calculada uma que corresponda à combinação das duas. A teoria da energia da distorção é uma boa forma de se fazer esta combinação.

Segundo Shigley (2005) a teoria da energia de distorção mostra que ocorre escoamento do material quando a energia de deformação por distorção em um uma unidade de volume definida na peça alcança ou excede a energia de deformação por distorção do mesmo volume correspondente ao escoamento sob tração ou compressão deste mesmo material.

Para Norton (2013), a tensão equivalente de von Mises  $\sigma'$  é definida como a tensão de tração uniaxial que criaria a mesma energia de distorção que é criada pela combinação atual das tensões aplicada, onde  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ , são as tensões normais nos planos x, y e z, respectivamente, e  $\tau$  é tensão de cisalhamento nos respectivos planos. Isto permite, através desta teoria, tratar casos com tensão multiaxial combinada a tensão de cisalhamento, simulando uma tração pura.

Assim, Von Mises, em termos das tensões aplicadas, é dado por:

$$\sigma' = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}{2}} \quad (3)$$

Para fins de projeto é aconselhado utilizar um fator de segurança para que o estado de tensões esteja seguramente o mais próximo possível das condições de trabalho do componente. Segundo Norton (2013), para que se tenha um projeto seguro, geralmente é definido um coeficiente de segurança que é definido pela equação 4.

$$N = \frac{S_y}{\sigma'} \quad (4)$$

Onde N é o coeficiente de segurança,  $\sigma'$  a tensão de von Mises-Hencky e  $S_y$  a tensão de escoamento do material.

### 2.3.3 Limite da resistência para fadiga

Segundo Shigley (2005) para projetos preliminares e de protótipo, bem como para alguma análise de falha, um método rápido de estimativa dos limites de resistência é necessário. Para falha por fadiga em baixos ciclos o limite de resistência pode ser relacionado com a resistência à tração. Para aços, a relação é mostrado na equação 5.

$$S'_e = 0,504 * S_{ut} \quad (5)$$

Onde  $S_{ut}$  é a resistência à tração mínima e  $S'_e$  é o limite de resistência à fadiga para operações em baixos ciclos, ou seja, até mil ciclos.

## 2.4 ELEMENTOS FINITOS

Para componentes de geometria simples, o método analítico satisfaz a resolução de problemas estruturais. Porém, quando se trata de componentes com certa complexidade geométrica, isso se torna muito trabalhoso e difícil pelo método analítico e, em certos casos, demandando muito tempo para ser concluído. Nesses casos se usa o método de cálculo por meio de elementos finitos.

Segundo Alves (2013) as teorias clássicas para cálculos estruturais apresentam valores reais e exatos quando se refere a deslocamentos e deformações, porém para alguns casos específicos surgiu a necessidade de ter-se uma análise que pudesse ser aplicada em caráter geral, independente da forma e da carga que estivesse submetido, mas que ficasse dentro da precisão aceitável do projeto.

Segundo Azevedo (2003) o método de elementos finitos (MEF) tem o objetivo de determinar as tensões e deformações de um sólido qualquer que sofre pela aplicação de forças externas. O MEF praticamente substituiu a utilização de métodos antigos, pois além de fazer análise de geometrias diversas também avalia componentes com diferentes tipos de materiais e com qualquer tipo de carregamento.

Para Norton (2013), a análise estrutural através de elementos finitos se dá pela aplicação de carga em locais específicos e pela separação do item em milhares de elementos conectados através de nós, chamados de malha. Com isso é possível ter uma aproximação das tensões e deformações em qualquer ponto. Para ter-se dados mais exatos é necessário refinar a malha, ou seja, dividir em mais elementos e menores, porém, isso exige maior capacidade de processamento.

Para Azevedo (2003) os primeiros passos a se definir para iniciar o estudo de uma análise estrutural é a classificação quanto a sua geometria, modelo de material e ações aplicadas. Deve-se definir neste momento se a análise é dinâmica ou estática, linear ou não-linear e se a estrutura é do tipo reticulada, laminar ou sólida.

Azevedo (2003) cita que o MEF pode ser baseado no método dos deslocamentos, em modelos de equilíbrio, ou em métodos híbridos e mistos. Destes, o que apresenta maior versatilidade e simplicidade é o método dos deslocamentos.

De acordo com Leandro (2019) por fim deve ser projetado da maneira mais clara o problema que será analisado. Neste componente se fazem alguns ajustes e simplificações para que torne o componente mais leve para minimizar os altos custos computacionais que este estudo exige. Assim, na hora de avaliar os resultados deve ser levado em consideração essas aproximações feitas antes de processar a análise no software.

## 2.5 ANSYS

De modo geral o software *Ansys* consiste em um conjunto de sistemas computacionais de análises diversas cujo procedimento de análise e cálculo se baseia no método de elementos finitos. Em sua gama de opções de análises, uma delas é análise estrutural que se refere às tensões e deformações de um componente (ANSYS, 2020).

O *Ansys* disponibiliza dois grandes benefícios ao cliente, usuário do software. Um deles é a customização de acordo com a sua necessidade, ou seja, ele tem pacotes de personalização que podem ser direcionados à específicos problemas estruturais. Além disso, o usuário pode, ainda, se conectar a outras ferramentas para garantir uma análise mais assertiva possível. O outro grande benefício é que ele trabalha com uma rede aberta, onde é possível a integração a projetos criados em outros softwares, como *Solidworks* e *Creo*, e realizar a partir deste a análise no *Ansys*. Isso faz com que se tenha uma otimização de projetos de produto e um custo de teste físico reduzido, o que representa grandes benefícios para uma engenharia e faz deste um dos softwares mais utilizados para este fim (ANSYS, 2020).

De acordo com Marinho (2002) o software *Ansys* utiliza o método mais simples para a determinação da variação das funções de acordo com as alterações das variáveis do projeto, que é o método das diferenças finitas. Neste software o processamento do cálculo se dá por derivadas parciais. Isto tudo demanda altas capacidades de processamento computacionais, mas é o mais prático e com uma grande facilidade de utilização.

Abreu (2016) define que qualquer solução através do MEF deve passar pelos passos representados na figura 3, respectivamente.

Figura 3 – Etapas de solução de um problema pelo MEF



**Fonte:** Abreu (2016)

Explicando, Abreu (2016) cita que no pré-processamento são definidos todas as variáveis de entrada, como definição da geometria, tipo de análise (modal/estrutural), malha de elementos finitos, propriedades dos materiais, condições de contorno e cargas atuantes no objeto. Já no processamento é necessário configurar o tipo de análise que se deseja realizar, como as cargas que serão realizadas e em que pontos e também as restrições do projeto. Por fim, no pós-processamento é possível verificar tensões, convergências, de acordo com o que foi especificado que se desejava no início da análise, além de poder analisar de diferentes formas e enfoques as tensões resultantes.

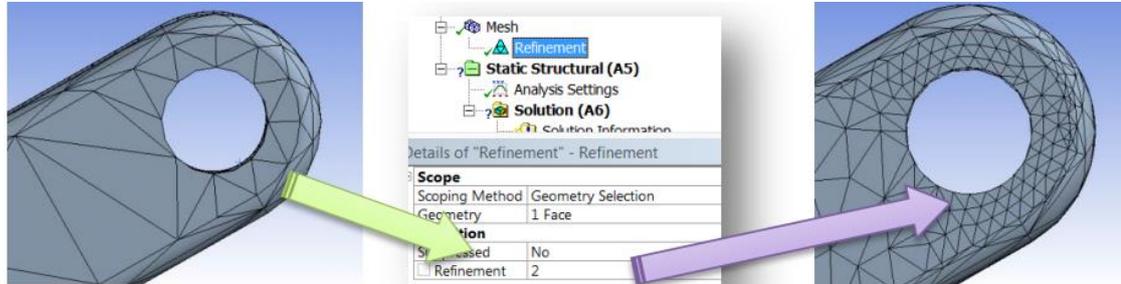
De acordo com Azevedo (2016) a análise pode não ocorrer de forma correta por alguns motivos principais: má formação dos elementos (devido geralmente aos erros geométricos do projeto), pouco espaço em disco ou memória RAM do dispositivo em que se faz a análise ou informações insuficientes para as condições de contorno ideal.

Por isso ao definir-se os requisitos de entrada deve-se estar ciente dos resultados que se deseja obter ou que sejam possíveis, pois, segundo Azevedo (2016) quanto mais refinada for a malha, mais estará próxima do contínuo e portanto, melhores serão os resultados. Porém, malhas refinadas possuem mais elementos e nós, maior quantidade de cálculos e conseqüentemente mais tempo para obter os resultados, além de uma maior capacidade de processamento necessária. Também que, elementos menores ou de ordem superior adaptam-se melhor a geometria da peça e com isso, fornecem melhores resultados.

Azevedo (2016) ressalta, ainda, que para obter-se bons resultados com capacidades limitadas existem estratégias de geração de malha que podem ser elaboradas. Ou seja, pode-se obter um equilíbrio entre a qualidade com bons resultados e o tempo de espera para obtê-los, que é limitado pela capacidade de processamento ou de memória. Uma das estratégias é realizar uma primeira análise do projeto com uma malha mais grosseira, com menos nós e conseqüentemente menos cálculos, para fazer o conhecimento do comportamento das tensões.

Conhecendo os locais de maior tensão é possível realizar o refinamento de malha e trabalhar em áreas específicas e menores, conforme a figura 4, reduzindo a necessidade de capacidade de processamento.

Figura 4 – Refinamento



Fonte: Azevedo (2016)

Segundo Norton (2013), porém, por mais definida e completa que seja a análise ainda existem variáveis que não são possíveis de prever na análise computacional, como as diferenças em lotes de matéria, rugosidades e desvios de processos de fabricação (como a solda por exemplo), condições ambientais diferentes na prática do definido na análise, pequenas variações de cargas e forças atuantes no objeto físico, entre outros. Assim faz-se necessário na análise utilizar coeficientes de segurança que estimam de maneira geral essas diferenças, reduzindo assim a possibilidade de obter análises distantes do real.

Quadro 1 – Fatores utilizados para determinar um coeficiente de segurança para materiais dúcteis

Informações	Qualidade das informações	Fator
Dados das propriedades dos materiais disponíveis a partir dos testes (F1)	O material realmente utilizado foi testado	1,3
	Dados representativos de testes do material estão disponíveis	2
	Dados razoavelmente represent. de testes do material estão disponíveis	3
	Dados insuficientemente represent. de testes do material estão disponíveis	5+
Condições ambientais nas quais será utilizado (F2)	São idênticas às condições dos testes de materiais	1,3
	Essencialmente igual ao ambiente de um laboratório comum	2
	Ambiente moderadamente desafiador	3
	Ambiente extremamente desafiador	5+
Modelos analíticos para forças e tensões (F3)	Os modelos foram testados em experimentos	1,3
	Os modelos representam precisamente o sistema	2
	Os modelos representam aproximadamente o sistema	3
	Os modelos são aproximações grosseiras	5+

Fonte: adaptado de Azevedo (2016)

## 2.6 RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO

Segundo Gali (2015), o fenômeno de resistência ao rolamento está associado com a dissipação de energia que se dá pela viscoelasticidade dos compostos de borracha com solo, quando submetido a deformações cíclicas durante a utilização do produto.

Gent (2006) apud LaClair (2006) cita que as pessoas, de modo geral, entendem melhor o conceito de resistência ao rolamento de pneus quando mencionada uma experiência que muitos já viveram, como, por exemplo, andar de bicicleta. Isso porque é possível perceber o aumento do esforço necessário para pedalar quando está com pneus mais vazios, pois nesta configuração é necessário fornecer maior energia ao sistema para manter o movimento. A razão para tal fenômeno é que a resistência ao rolamento aumenta com a diminuição da pressão do pneu.

Gali (2015) em seu estudo menciona que o consumo de energia do veículo causado pela resistência ao rolamento do pneu varia de acordo com a condição de uso, tais como: o tipo de pneu, pressão de inflação, carga aplicada, propriedade do material, temperatura, velocidade e superfície do pavimento.

Gillespie (1992) define que em casos de estudo onde não se conhece todas as variáveis e não se tem um comportamento constante em todas as situações de uso, é possível estimar o coeficiente de resistência ao rolamento de acordo com a superfície em que este trabalha. Ele cita três principais terrenos com seus respectivos valores.

Quadro 2 – Coeficientes de rolamento

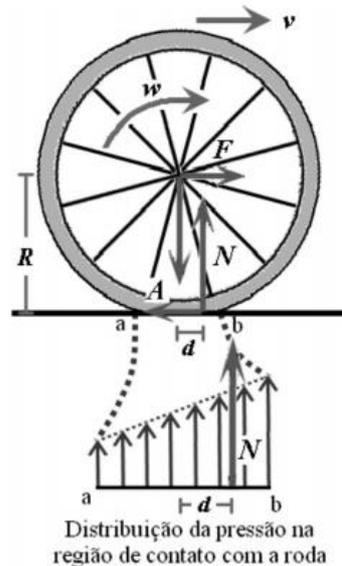
<u>Tipo de veículo</u>	<u>Superfícies</u>		
	<b>Concreto</b>	<b>Meio dura</b>	<b>Areia</b>
<b>Carro de passageiros</b>	0,015	0,08	0,3
<b>Caminhões pesados</b>	0,012	0,06	0,25
<b>Tratores</b>	0,02	0,04	0,2

Fonte: adaptado de Gillespie (1992)

Silveira (2011), em seu estudo, cita que como uma roda que gira livre tem sua velocidade angular em torno do seu eixo constante, tanto o somatório das forças

quanto dos torques devem ser nulos. A figura 5 apresenta todas as forças e torques presentes nessa situação.

Figura 5 – Forças exercidas em roda de giro livre



Fonte: Silveira (2011)

Assim ele define que:

$$F = A \quad (6)$$

onde  $F$  é a força necessária para vencer a resistência ao rolamento e  $A$  é a força de atrito estático.

Através da equação 7 chega-se a equação 8:

$$A = \frac{d}{R} * N \quad (7)$$

Onde  $d$  é a região de contato com a roda,  $R$  o raio do rodado e  $N$  a força normal à pista.

Silveira (2011) define, também, que o coeficiente de resistência ao rolamento ( $\alpha$ ) é a razão da divisão de  $d$  por  $R$ , portanto:

$$\alpha = \frac{d}{R} = \frac{A}{N} \quad (8)$$

### 3 METODOLOGIA

De acordo com Gil (2008), trata-se de um estudo de caso onde se tem um estudo aprofundado sobre o objeto e assim poder fazer uma análise dos resultados através de hipóteses pressupostas ou de verificar variáveis em condições que não possibilitam elaboração de experimentos. Sendo assim, a análise estrutural de um componente caracteriza-se como um estudo de caso, pois é necessário fazer um levantamento de materiais, da geometria do componente, da aplicação das forças externas e pode ser avaliado o comportamento nas mais variadas situações de trabalho

Para obter bons resultados e alcançar os objetivos, o desenvolvimento de um estudo deve conter um método pré-selecionado que permita que isso seja possível e que possibilite alcançar o que se deseja. Para Lakatos (2003), o método é o conjunto de atividades, das diversas formas, conceitos e premissas, que permitem que o objetivo possa ser alcançado. Assim para que o estudo seja válido e verdadeiro, de modo que mostre o que deve ser feito para que isso aconteça, deve-se pressupor tudo que possa acontecer, auxiliando na tomada de decisões.

Para Gil (2008) o método explicativo tem como objetivo principal a análise de fatores que influenciam para a ocorrência de certos fenômenos ou fatos, tentando responder o porquê e a razão desses fenômenos. Pode ser uma continuação de uma pesquisa descritiva, uma vez que os fatores do fenômeno estejam suficientemente descritos e detalhados. Assim, esta pesquisa define-se como uma pesquisa descritiva explicativa, pois nela foi necessário analisar as causas diversas que as forças externas causam em um determinado componente.

#### 3.1 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS

Este estudo será realizado em uma empresa metalúrgica do noroeste do estado do Rio Grande do Sul. Trata-se de uma empresa fabricante de uma vasta linha de implementos agrícolas que vem para atender o mercado nacional e internacional, todos relacionados a agricultura e a pecuária.

Partindo dos conceitos citados anteriormente, o estudo a ser realizado busca trazer uma nova proposta de projeto para possibilitar a redução de matéria prima do componente e tornar o mesmo mais competitivo. Trata-se do estudo estrutural de um

chassi de um implemento que deve suportar, dentro das condições normais de trabalho, uma massa de 10500 Kg.

Com a disponibilização do projeto 3D por parte da empresa, será feita uma simulação no software de análise estrutural *Ansys Workbench Student*, onde, a partir das forças aplicadas nos locais de apoio do chassi (depósito e eixo), serão avaliados todos os pontos com maior e também os com menor pontos de tensão e/ou deformação em todo o componente. Os locais onde o software indicar maiores valores de tensão com a carga aplicada serão locais que não se pode ter alguma redução de espessura ou geometria, considerando que atualmente esse componente não apresenta problemas estruturais. E, pressupondo que ao longo do item tem-se pontos altos de tensão e outros pontos com valores de tensão baixos, poderá ser possível a redução de matéria prima do item, mas com a inclusão de algum reforço especificamente no local com maior concentração de tensão, garantido que este ponto tenha a resistência equivalente ao projeto atual.

Ao fazer análise crítica dessas variáveis, será elaborado um novo projeto com auxílio do software de elaboração de projetos *Solidworks 2019*, que levará em conta todas as características analisadas, mas mantendo todos os pontos de fixação e dimensões funcionais importantes do projeto atual e com o objetivo final de reduzir o custo final do componente. O novo projeto irá se sustentar na análise de redução de espessura e/ou geometria em pontos ou itens estratégicos, que serão identificados a partir da análise da plotagem dos resultados calculados pelo software Ansys, onde será possível identificar pontos que tem concentração de tensão muito baixa, menos de 50% do critério de aceitação.

Com intuito de aprovar o novo projeto, será novamente feita uma simulação no software *Ansys Workbench Student*. Nesse momento será avaliado, através dos valores apresentados pelo mesmo, se não há nenhum ponto e/ou região com valores de tensão excedendo os pontos críticos do projeto antigo. Ou seja, se, atualmente, não se tem problemas estruturais, se o valor da tensão no projeto novo não exceder a máxima tensão encontrada no projeto antigo ter-se-á convicção de que o mesmo não irá falhar por causa estrutural.

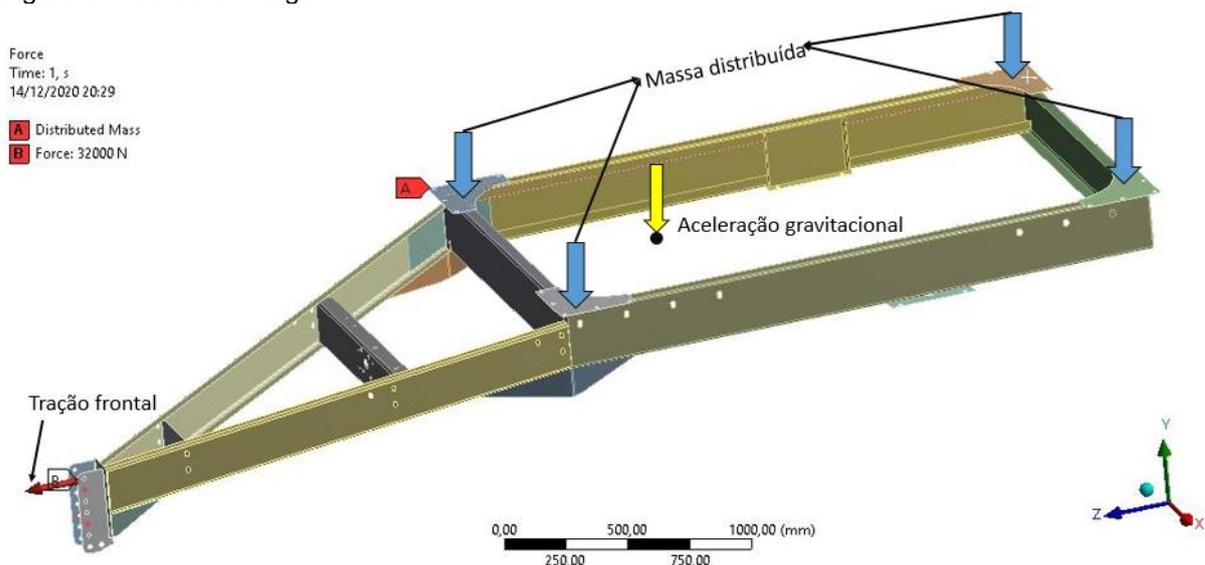
### **3.1.1 Casos de carga**

Ao todo, serão dois casos de carga aplicados no chassi atual e quatro casos serão aplicados sobre o chassi proposto para comparação. Em todos eles há em

comum uma massa distribuída de 10500 Kg sobre os quatro cantos do chassi e uma aceleração vertical, podendo variar de direção ou intensidade, mas não de sentido.

O primeiro caso de carga, simulado somente no chassi atual, se refere ao implemento parado, mas carregado. Sendo além da massa distribuída, a aceleração gravitacional puramente vertical de  $9,806 \text{ m/s}^2$  ( $1g$ ). O segundo caso, aplicado aos dois modelos de chassi, é relativo a situação de o implemento sendo tracionado, ou seja, o primeiro caso mais uma força longitudinal frontal (ao longo do eixo Z) de  $32000 \text{ N}$  ( $32 \text{ kN}$ ). O terceiro e os demais casos foram somente aplicados ao chassi proposto pelo motivo de o chassi atual já estar sendo utilizado hoje sem algum índice de falha. O terceiro caso é semelhante ao segundo caso, porém na condição de que o implemento estivesse em uma ladeira a  $12^\circ$  (limite para o implemento tombar lateralmente), ou seja, a aceleração gravitacional estaria defasada a  $12^\circ$ . O quarto caso de carga também é semelhante ao segundo, porém a força de tração de  $32 \text{ kN}$  agora estará sendo aplicada a  $30^\circ$  para a esquerda, na situação de o implemento realizando um retorno, porém sem danificar o cardan de transmissão, ou até mesmo um desatolamento. O quinto e último caso simula o implemento sofrendo um impacto ao passar por algum desnível, onde se usa a mesma condição do segundo caso, porém com a aceleração gravitacional de  $14,709 \text{ m/s}^2$  ( $1,5g$ ).

Figura 6 – Casos de carga



Fonte: Autor (2020)

### 3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Para a realização deste projeto serão necessários alguns recursos fundamentais:

- a) Software de simulação estrutural *Ansys Workbench Student*;
- b) Software de modelagem 3D *Solidworks 2019*;
- c) Notebook Dell Inspiron I15 5537-A10, com processador Intel core i7 4500U de 2,4 GHz, 8 GB de memória RAM, SSD de 120 GB, placa de vídeo dedicada de 2 GB AMD Radeon HD 8600M;

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Aqui serão apresentadas as etapas para a elaboração do estudo, bem como os resultados obtidos.

### 4.1 ANÁLISE CHASSI ATUAL

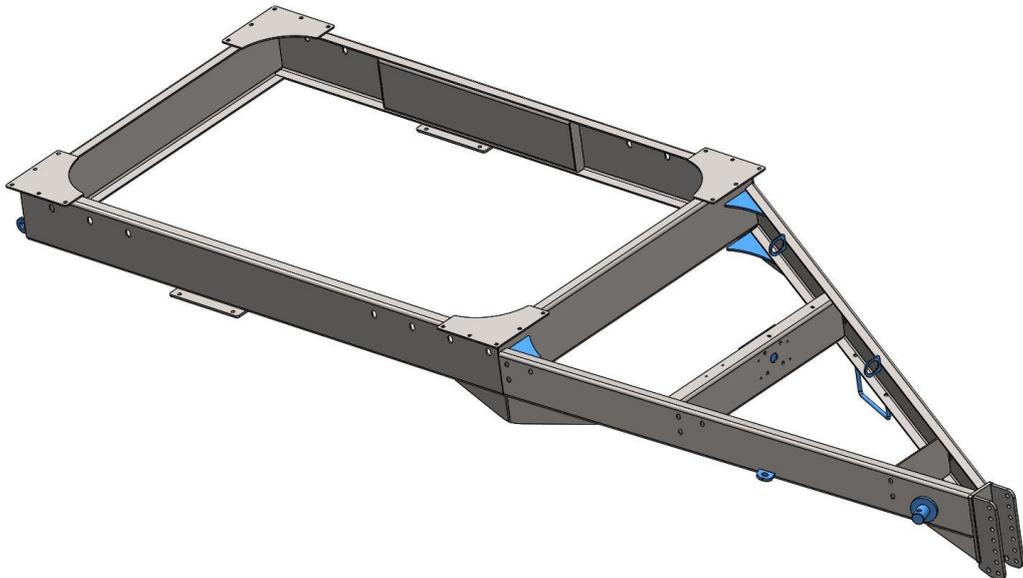
#### 4.1.1 Pré-processamento chassi atual

No pré-processamento, parte inicial e a mais importante da análise, foram ajustadas questões de projeto, definido o material das peças, os ajustes de geometria, as condições de contorno utilizadas na análise a definição da malha mais adequada e os carregamentos atuantes no conjunto.

##### 4.1.1.1 Geometria e materiais

Inicialmente, com o projeto 3D disponibilizado pela empresa, fez-se alguns ajustes de projeto com o objetivo de reduzir o número de nós da malha reduzindo, consequentemente, a capacidade de processamento requisitada. Nesses ajustes foram eliminados alguns componentes que não influenciam na resistência do conjunto, fazem parte apenas para questões produtivas ou algum acessório, como, içadores, degraus e suporte de macaco levante. Na figura 6 pode ser observada a seleção, em azul, dos componentes que serão removidos.

Figura 7 – Componentes removidos

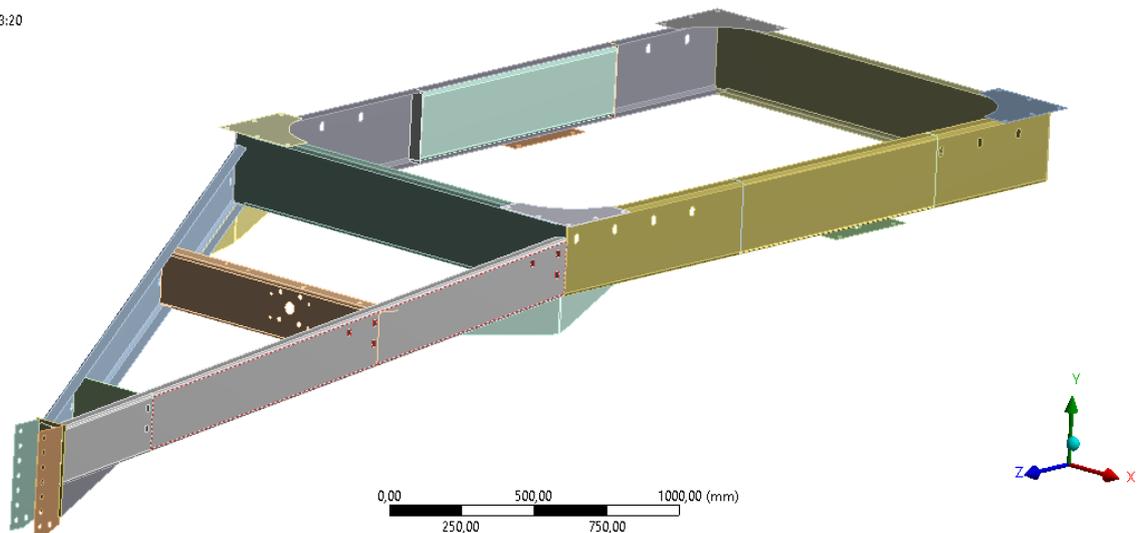


Observa-se que todos os componentes e elementos selecionados para remoção praticamente não tem nenhuma influência relevante na resistência do chassi podendo, assim, ser eliminados sem impactar significativamente nos resultados da análise. Desse modo a análise ficará mais leve para ser calculada e não será comprometida.

Com o projeto já delimitado, foram definidas simplificações de geometria do conjunto e definição de material para cada componente. As propriedades dos materiais definidos podem ser analisadas no anexo A. As simplificações de geometria como a remoção de cantos arredondados, aproximações de faces de componentes, remoção de linhas e pontos extras foram realizados com auxílio do complemento *SpaceClaim* disponibilizado pelo software *Ansys* e se devem ao fato de deixar a análise mais simples evitando erros de processamento do software e tendo assim uma análise mais assertiva. A simplificação das geometrias pode ser observada na figura 7.

Figura 8 – Geometria simplificada

Connections  
20/10/2020 23:20



Fonte: Autor (2020)

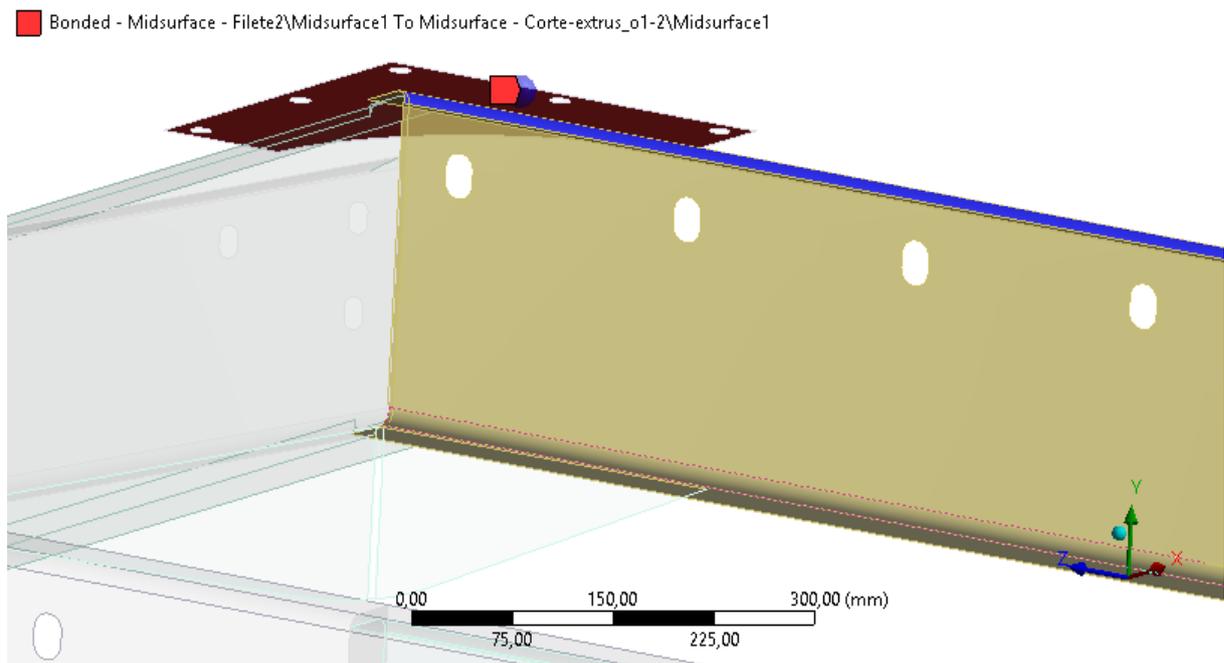
A simplificação de geometria também é caracterizada por definir o tipo de geometria que se tem, ou seja, que tipo de componente do software é utilizado para cada peça do conjunto. No caso, foram definidos como modelos de casca os componentes de chapa através do recurso *Midsurface* do *SpaceClaim*, como pode ser visto na figura 7, uma vez que esta definição reduz significativamente o número de elementos e nós gerados posteriormente. O *Midsurface* transforma todo e

qualquer componente, com espessura uniforme ao longo de todo o corpo (chapas), em uma superfície média com espessura definida.

#### 4.1.1.2 Contatos

Nesta etapa em diante a análise se sucede dentro do complemento *Mechanical* do software *Ansys*, sendo que os contatos são definidos dentro do tópico *Connections* (conexões, em Português). Neste estudo de caso os contatos foram definidos como *bonded*, que define-se como superfícies coladas, ou seja, uma fusão dos componentes equivalente ao que acontece na soldagem. Para definir um contato, seleciona-se uma face ou aresta de um corpo em *Contact* (contato, em Português) e uma face adjacente de corpo em *Target* (alvo, em Português). Por haver corpos em modelo de casca, deve-se determinar que os lados do *Contact* e do *Target* estejam do mesmo lado. A figura 8 mostra o tipo de contato configurado.

Figura 9 – Contatos entre corpos



Fonte: Autor (2020)

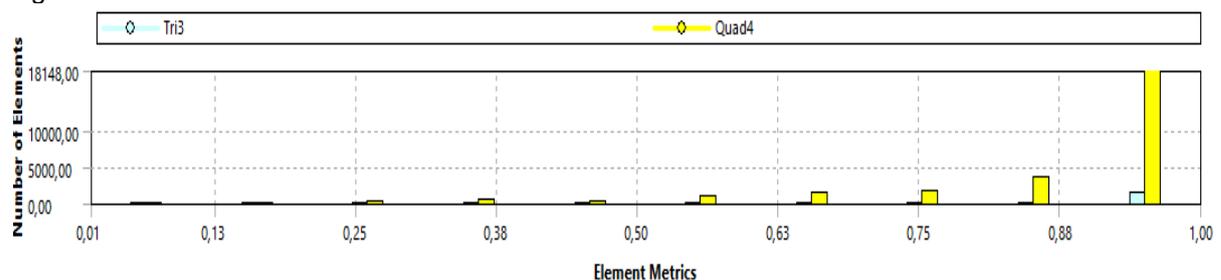
#### 4.1.1.3 Geração da malha

A malha nada mais é do que a discretização do modelo, ou seja, a divisão do modelo em um número finito de partes, denominados como elementos, aos quais são ligados pelos nós. Inicialmente gerada automaticamente pelo software, ela pode ser alterada e configurada de modo que se tenha uma malha mais homogênea.

Essa configuração foi feita determinando o tamanho do elemento, que é a distância compreendida entre os nós. Esse tamanho de malha é o que confere a resolução da simulação, ou seja, uma malha mais fina confere uma capacidade de interpretação mais acurada. Porém, quanto menor for o tamanho do elemento maior será o número de elementos e nós e, conseqüentemente, maior será a capacidade de processamento requisitada. Dessa forma a simulação fica, de certa forma, limitada a capacidade de processamento da máquina utilizada. Mas isso não pode ser levado como algo constante, pois elementos ideais são os que têm proporção equilateral entre suas arestas.

O recurso *Element Metrics*, apresenta um gráfico de barras com a distribuição dos tipos de elementos e sua respectiva qualidade. Um elemento de qualidade excelente tem proporção de distância igual entre os nós (proporção próxima ou igual a 1,0), ou seja, elemento equilateral. Já elementos de péssima qualidade tendem a serem distorcidos e com proporção próxima a zero. Como critério de aceitação para qualidade de malha, definiu-se que mais de 90% dos elementos tenham proporção acima de 0,75, e que elementos ruins não estejam em zonas de concentração de tensão. Desta forma, para atingir o critério, determinou-se para as peças um refinamento de tamanho de elemento de 8 mm com transição suave (*transition slow*) entre eles. A figura 9 a seguir apresenta os resultados do *Element Metrics* para a geometria atual, discretizada em 28854 elementos e unidos por 29444 nós.

Figura 10 – Malha chassi atual



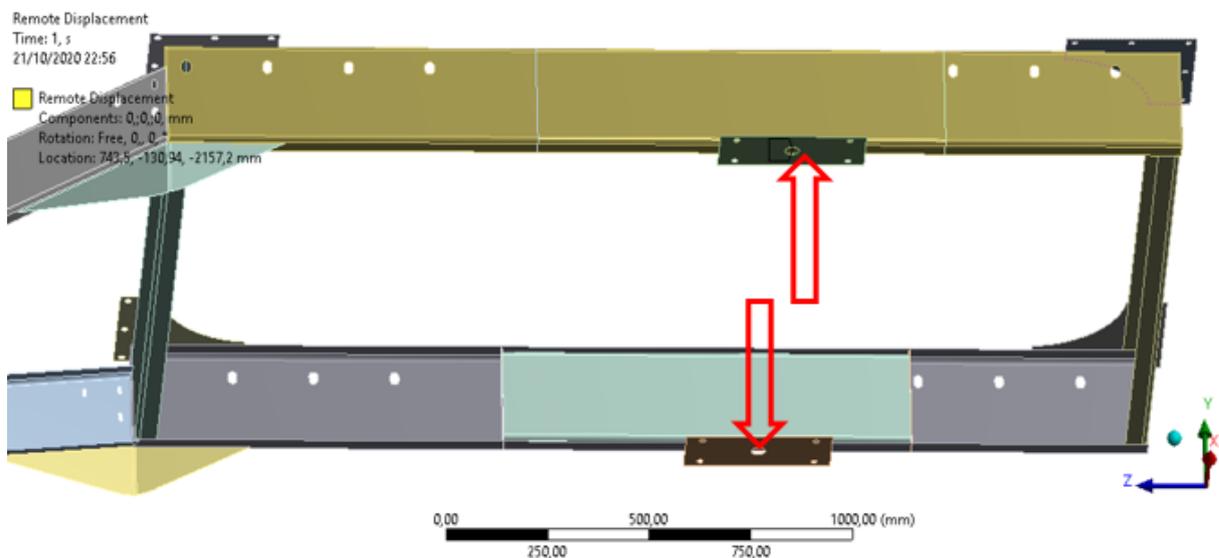
Fonte: Autor (2020)

#### 4.1.1.4 Restrições

As restrições foram definidas em três pontos regiões do chassi através do apoio *Remote displacement* (deslocamento remoto, em Português), nas duas chapas que fixam o eixo ao chassi e nos quatro furos na parte frontal do conjunto por onde a máquina é tracionada. Através do *Remote displacement*, o usuário define

quais são os graus de liberdade, referenciados a qual sistema de coordenadas e se a condição mecânica é de apoio rígido ou deformável. Para este estudo de caso, a condição mecânica é deformável na intenção de não mascarar tensões e o sistema de coordenadas referenciado é o local de apoio. Nas chapas de fixação do eixo foi restringido como fixa todas as translações e as rotações em torno do eixo y e z, podendo apenas girar em torno do eixo x, conforme mostra a seta na figura 10.

Figura 11 – Restrição de eixo



Fonte: Autor (2020)

Já o apoio frontal é nos furos de engate com o trator que, nas mesmas condições mecânicas dos dois apoios anteriores, possui translação livre ao longo do eixo Z e rotação livre em torno do eixo X, demais graus de liberdade estão restritos. Apenas no terceiro caso de carga, o *Remote displacement* frontal tem liberdade de transladar lateralmente ao longo do eixo X.

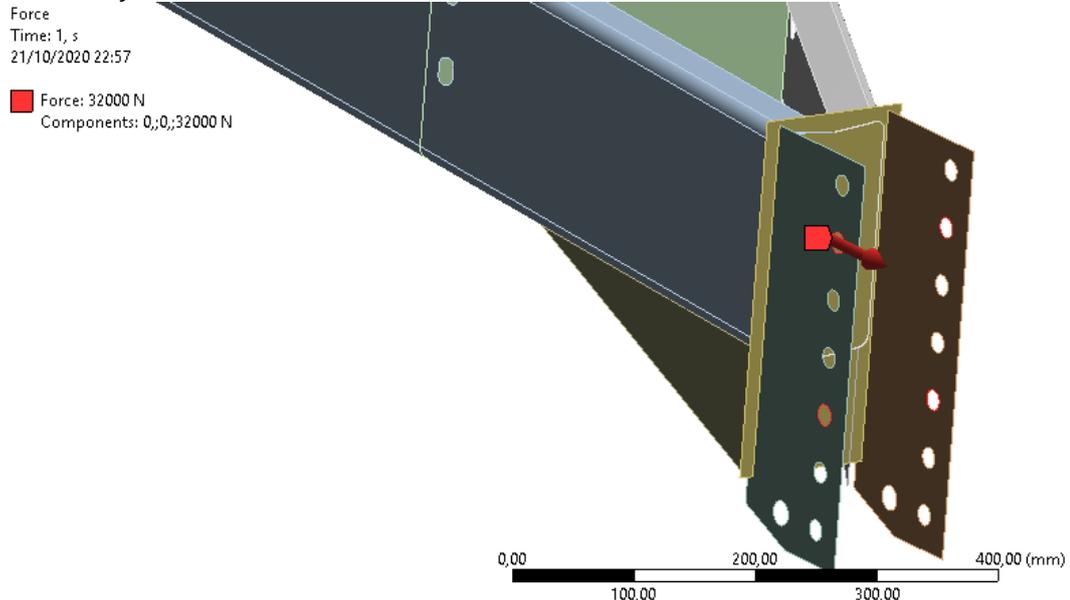
#### 4.1.1.5 Carregamentos

Os carregamentos aplicados nas análises seguiram o procedimento citado no cinco casos de carga, no capítulo de metodologia.

Foi aplicada uma força de 32000 N nos quatro furos por onde a máquina é tracionada, que é a força necessária para o deslocamento deste implemento carregado em terra solta na configuração de rodado que a máquina utiliza, que é um pneu 18.4-30 que é utilizado também em tratores. Essa força foi encontrada a partir das equações 7 e 9, que calculam a força necessária, através da multiplicação do coeficiente de rolamento de determinado solo, da carga total do implemento e do

raio do rodado utilizado, para movimentar o implemento levando em consideração as condições de solo e de carga. Neste estudo foi utilizado no cálculo o coeficiente de rolamento da areia, justamente por representar a pior situação.

Figura 12 – Tração frontal



Fonte: Autor (2020)

Já a carga do equipamento, neste conjunto do chassi, fica apoiada sobre as quatro chapas de fixação do depósito. A massa distribuída sobre a máquina com cereais como milho, soja ou trigo, tem uma resultante de 10500 kg. Assim, na análise estrutural estática linear, foi distribuída a carga igualmente de 10500 kg nos quatro pontos.

#### 4.1.2 Processamento chassi atual

Na etapa de processamento, também chamada de cálculo numérico que, por se tratar de uma análise linear, convergiu em cerca de 50 segundos. Utilizando assim, dos recursos computacionais disponíveis, cerca de 80% do processador, 67% da memória RAM e 74% de uso do SSD.

#### 4.1.3 Pós-processamento chassi atual

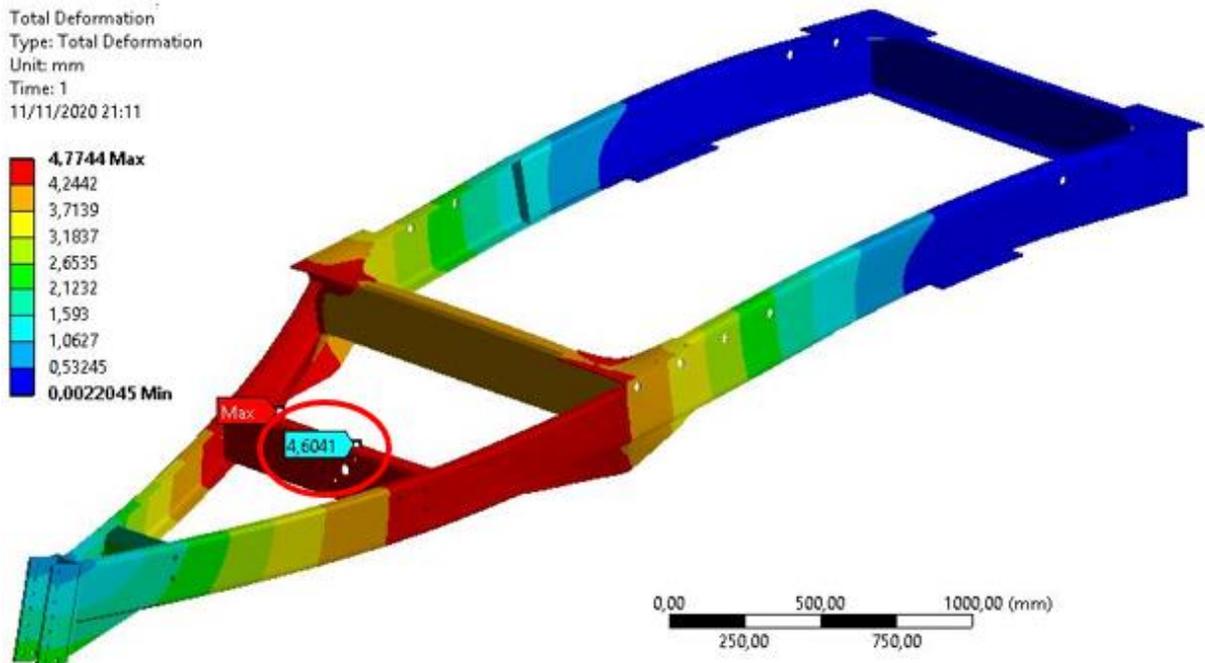
##### 4.1.3.1 Resultados de tensões e deformações para o chassi atual

Com a etapa de pré-processamento bem definida partiu-se para a etapa de configuração da análise. Configurou-se, assim, como é uma análise estática, uma análise linear e tensão equivalente (*Von-misses*) como base de cálculo.

Na primeira análise observou-se todo conjunto aplicando todas as forças citadas acima na etapa do pré-processamento. Utilizou-se como base de valor limite para falha a metade da tensão de ruptura do material, que segundo a teoria do limite da resistência para fadiga em baixos ciclos, é o indicado. Nesse caso, a tensão limite para não ocorrer falha neste material ficou estipulada, através da equação 5, em 230 MPa. Esse valor foi ajustado em todas as legendas escalares de cores das análises, para que se possa manter um padrão escalar de tensões distribuído uniformemente dentro dos 230 MPa, independente do valor máximo calculado. No estudo obteve-se como resultado tensões relativamente baixas, não excedendo a metade da tensão de ruptura, somente em alguns pontos específicos (passíveis de singularidade de tensão), com regiões bem pequenas e com redução ligeiramente alta de tensão ao longo de sua transição.

As deformações sofridas, conforme mostra a figura 12, não excederam, nos pontos mais críticos, mais de 4,8mm. Este valor não é relevante, pois não há mecanismos entre meio ao chassi que possam vir a falhar e o eixo de transmissão que é montado no ponto indicado é mancalizado por rolamentos auto compensadores.

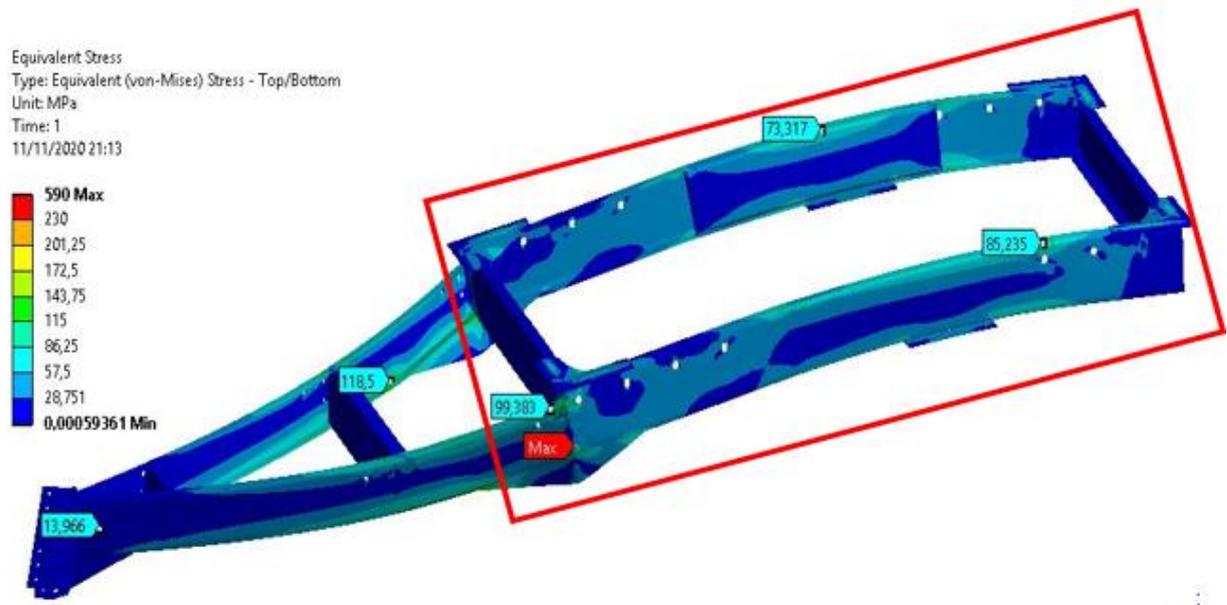
Figura 13 – Deformações chassi atual



Fonte: Autor (2020)

Ao analisar as tensões, observou-se que os valores máximos de tensão alcançados se localizaram na região de união da lança ao quadro traseiro, como pode ser observado na figura 13. Na parte frontal do engate e no quadro traseiro as tensões foram relativamente baixas, não excedendo, em grande parte, os 120 MPa.

Figura 14 – Análise inicial do chassi atual

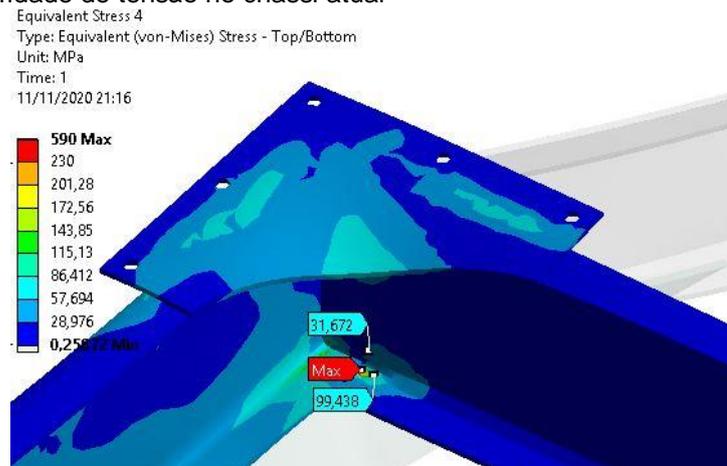


Fonte: Autor (2020)

Na região de união da lança ao quadro traseiro, conforme mostrado na figura 13, encontraram-se pontos com valores de tensão mais altos devido ao fato de ser praticamente a parte central entre o apoio ao engate do trator e o eixo traseiro. Nessa região teve-se picos de até 590 MPa, porém são regiões com áreas muito pequenas e essa tensão não chega a atravessar a espessura do material, o que define que isso seja uma singularidade de tensão.

De maneira mais clara, como mostra a figura 14, essa singularidade de tensão ocorre quando se tem propagação de forças sob uma área muito pequena ou passível de redução brusca de secção, transformando-se em um concentrador de tensão. Regiões onde a qualidade da malha é muito inferior, também podem apresentar singularidades de tensão, mas que não se aplica neste caso.

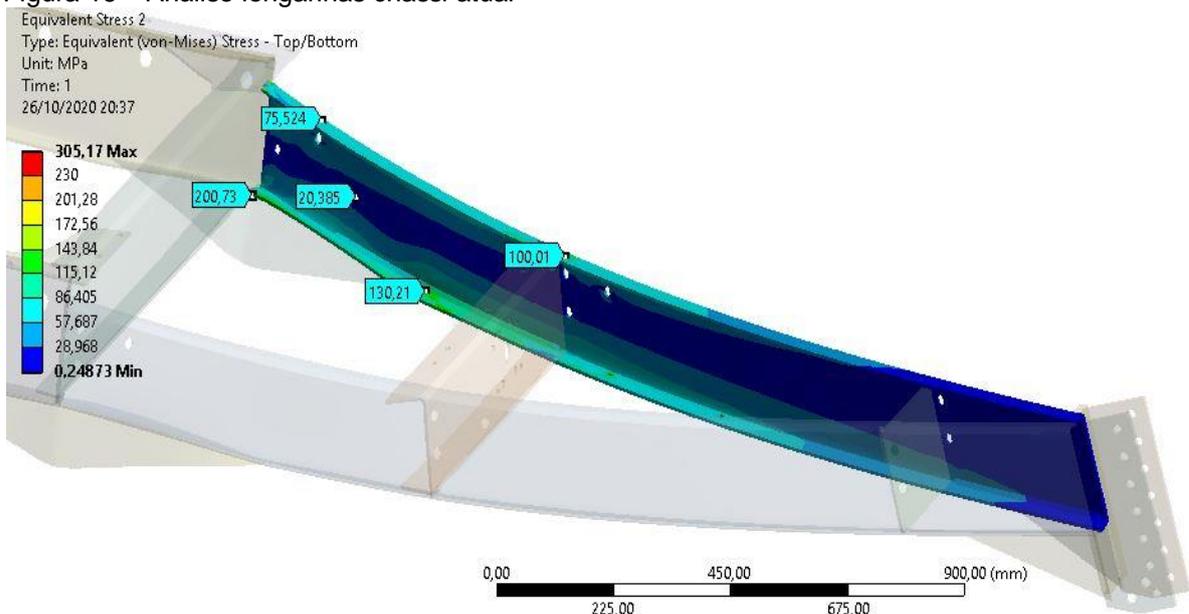
Figura 15 – Singularidade de tensão no chassi atual



Fonte: Autor (2020)

Em relação às duas longarinas da parte frontal do chassi e do reforço inferior teve-se tensões pouco elevadas e com comportamento mais constantes. Como pode ser visto na figura 15, nas duas longarinas, as regiões com maior concentração de tensão são a região de união destas ao quadro traseiro e também na região em que termina o reforço inferior. Nessas duas regiões os valores de tensão chegaram, em alguns pontos específicos, a 200 MPa, mas em grande parte se manteve abaixo de 150 MPa, o que é considerado aceitável neste tipo de análise, principalmente por representar um coeficiente de segurança de praticamente 4 vezes o limite da tensão de cisalhamento do material.

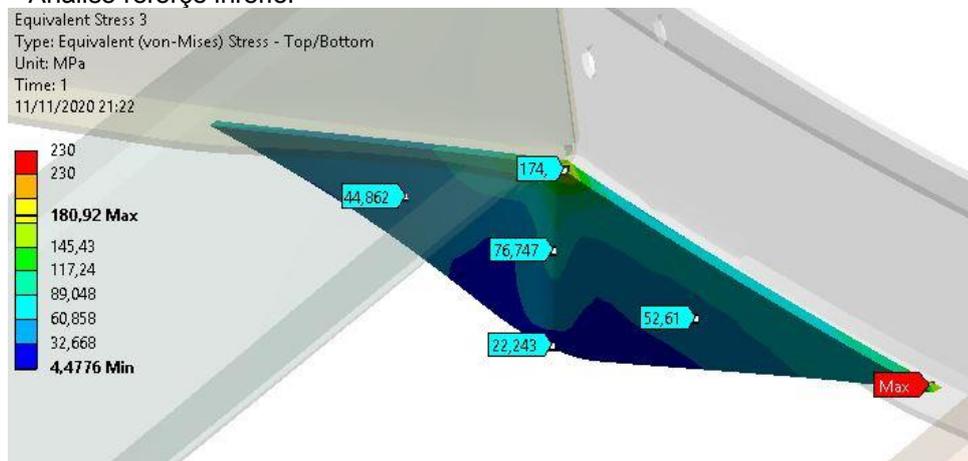
Figura 16 – Análise longarinas chassi atual



Fonte: Autor (2020)

No reforço inferior as regiões com valores de tensão mais elevados são pequenas e com valores similares, porém ainda inferiores, especificamente por concentrarem-se nas mesmas regiões das longarinas. Alcançou-se tensões de em torno de 180 MPa logo abaixo da união da longarina da lança ao quadro traseiro, porém em uma região relativamente pequena e sem atravessar toda espessura do material, apenas na parte interna da dobra. Outro local em que se teve um ponto de tensão um pouco mais elevado foi no final da geometria, na parte frontal, se devendo justamente ao fato de se ter uma espessura de material relativamente fina nessa região. Mas os valores deste ponto não excederam os 130 MPa, confirmando que nessa região não terão problemas estruturais.

Figura 17 – Análise reforço inferior

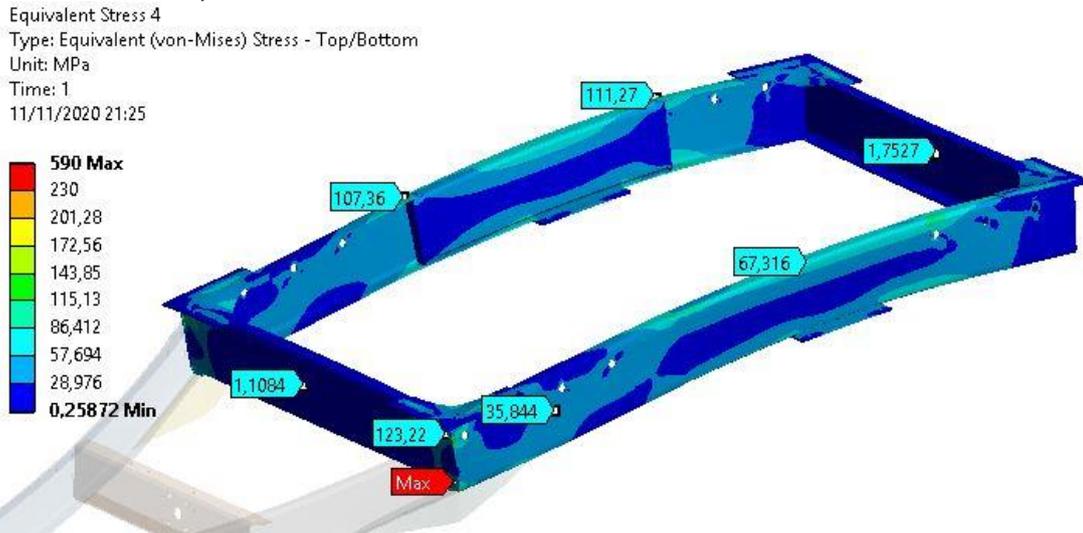


Fonte: Autor (2020)

O que já começou a se comprovar nesta etapa da análise é que, realmente, a região com maior concentração de tensão é a região de união entre a lança e quadro traseiro. Também observou-se o fato de que não se teve grandes valores de tensão na parte traseira do chassi, compreendida pelo quadro onde é apoiada a caixa depósito. Dessa maneira já se começa a ter um rumo de onde será possível efetuar alguma alteração de maneira mais segura.

Os valores de tensão, como mostra a figura 17, no quadro traseiro são relativamente baixos, não chegando a metade da tensão limite para análise. Em grande parte deste conjunto as tensões estão entre 20 e 80 MPa, chegando a valores de no máximo 125 MPa na longarina lateral na região frontal abaixo do suporte do depósito, mas em uma área muito pequena, e na primeira furação próximo a união da lança.

Figura 18 – Análise quadro traseiro atual



Fonte: Autor (2020)

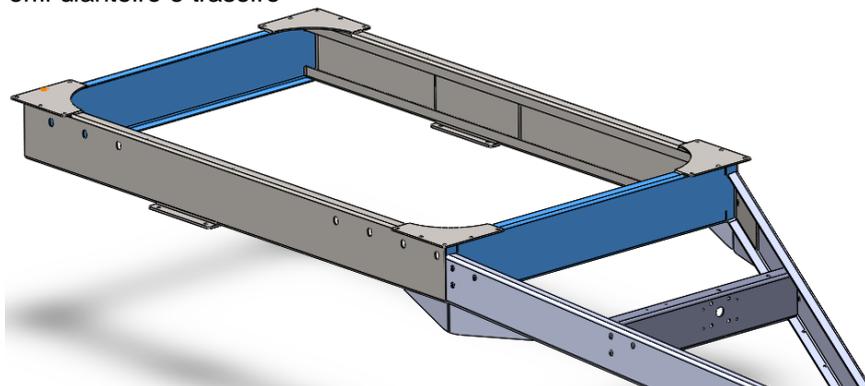
## 4.2 ALTERAÇÃO DE PROJETO

Com intuito de propor melhorias ao conjunto e possibilitar alguma redução de matéria prima e/ou redução de custo, elaborou-se um novo projeto do chassi modificando componentes de regiões em que se teve, na análise do chassi atual, os menores valores de tensão. Neste sentido propôs-se modificar, principalmente, o quadro traseiro onde fica apoiada a caixa depósito e também é fixado o eixo.

### 4.2.1 Projeto chassi proposto

Inicialmente alterou-se a espessura das longarinas frontal e traseira, selecionadas na figura 18, do quadro traseiro, pois nessas teve-se valores de tensão baixos na análise anterior. Atualmente os dois perfis tem espessura de 6,35mm e na proposta manteve-se a mesma geometria porém em espessura de 4,75mm.

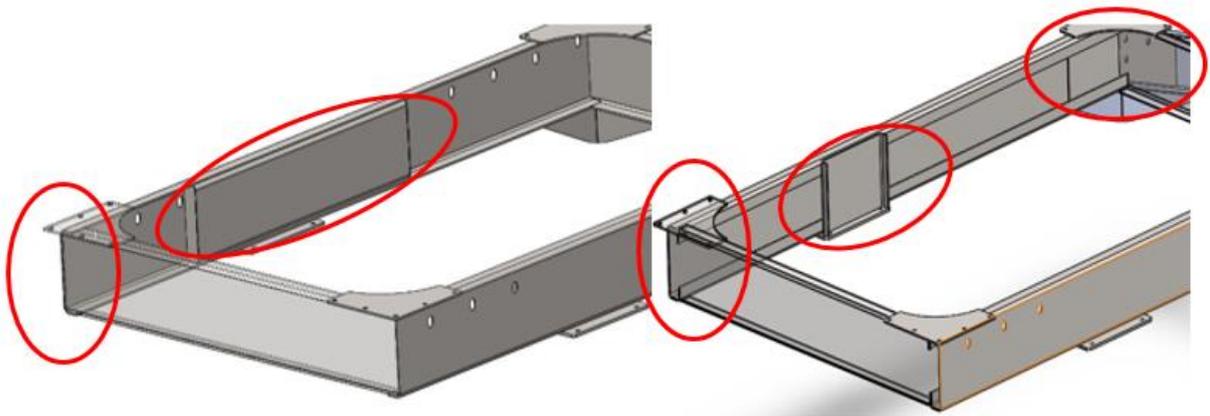
Figura 19 – Perfil dianteiro e traseiro



Fonte: Autor (2020)

Na parte lateral do quadro, onde se teve as alterações mais significativas, mudou-se a geometria e a espessura do perfil da longarina, além de também eliminar alguns componentes. A geometria atual é um perfil C aberto, ou seja, uma dobra em cada lado e um reforço interno, na região de fixação do eixo, também em formato C aberto mas posicionado de forma invertida ao perfil externo. No projeto proposto eliminou-se o reforço interno, junto com os seus fechamentos, e incluiu-se mais uma dobra em cada lado no perfil externo, formando um perfil C fechado. Além disso, também, foi alterada a espessura do perfil externo de 6,35mm para 4,75mm e colocado um reforço, com espessura de 6,35mm, acima da fixação do eixo. A figura 19 mostra, em forma de comparação, o projeto atual e o projeto proposto, com foco para a parte lateral do quadro traseiro.

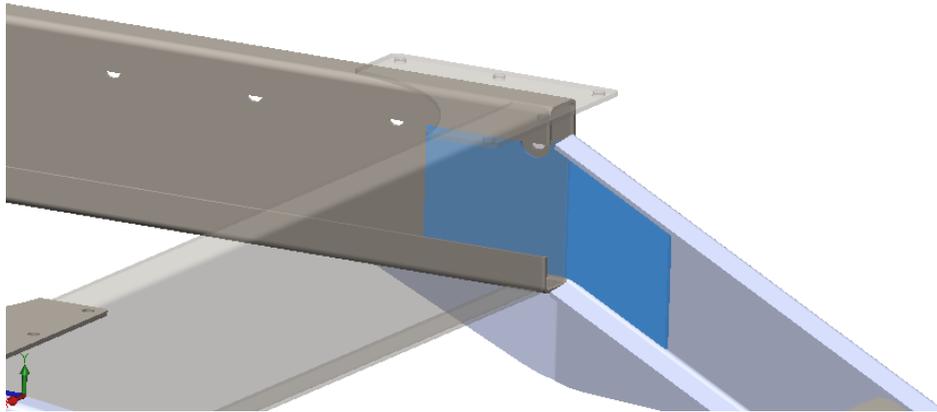
Figura 20 – Comparativo alteração longarina lateral



**Fonte:** Autor (2020)

Alterando a espessura dos perfis do quadro traseiro e eliminando o reforço interno tem-se uma redução de matéria prima muito significativa pois são basicamente os maiores componentes do conjunto, sendo assim responsável por grande parte de matéria prima do conjunto. Porém, com esta alteração, observando o comportamento da análise do chassi atual, percebeu-se que a região de fixação do eixo e de união a lança frontal poderiam ficar frágeis. Dessa forma, incluiu-se um reforço na parte interna de fixação do eixo, que pode ser visto na figura 19, e um reforço, também em espessura 6,35mm, na parte de união da lança ao quadro traseiro, que pode ser visto na figura 20.

Figura 21 – Reforço interno união da lança



Fonte: Autor (2020)

Com essas alterações, viu-se o projeto do chassi como definido e seguro para iniciar os estudos de análise de simulação e posterior validação.

### 4.3 ANÁLISE CHASSI PROPOSTO

#### 4.3.1 Pré-processamento chassi proposto

No pré-processamento, basicamente foram feitas as mesmas definições a análise anterior. Foram ajustadas questões de projeto, definido o material das peças, os ajustes de geometria, os contatos entre os componentes, as restrições aplicados na análise, a definição da malha mais adequada e os mesmos casos de carga no conjunto.

##### 4.3.1.1 Ajustes de projeto

Na nova proposta do chassi, de início já se eliminou os mesmos componentes removidos na etapa anterior, pois assim como na análise anterior, nesta também não haverá influência relevante nos resultados dos componentes removidos. Além disso, a eliminação dos mesmos componentes nas duas análises torna o estudo mais similar.

##### 4.3.1.2 Geometria, materiais e contatos

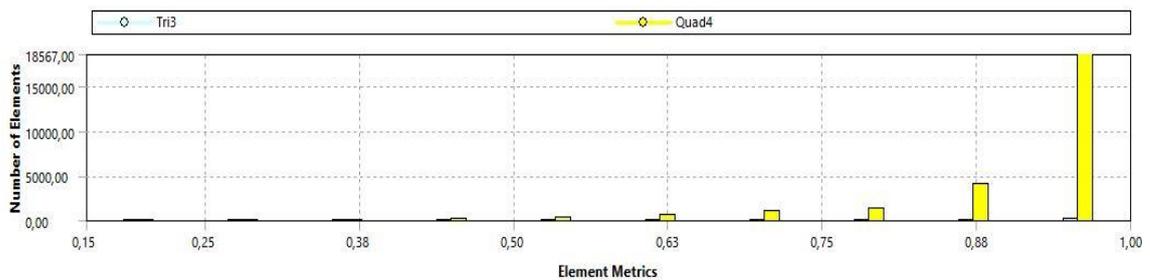
No item geometria foram feitas praticamente as mesmas definições que na análise anterior, ajustando os contatos dos itens novos e mantido os antigos, mantido todos componentes de chapa metálica definidos como elemento de casca e

mantido como *bonded* o tipo de contato entre todos os corpos. Também foi aplicado o mesmo material nos componentes.

#### 4.3.1.3 Geração de malha

Com as definições de projeto e geometria realizadas pode-se partir para a etapa de configuração e geração de malha. Basicamente nesta análise manteve-se a configuração de tamanho de elemento da análise anterior onde determinou-se para as peças um refinamento de tamanho de elemento de 8 mm com transição suave (*transition slow*) entre eles. Também, como critério de aceitação para qualidade de malha, definiu-se que mais de 90% dos elementos tenham proporção acima de 0,75, como pode ser visto na figura 21.

Figura 22 - Malha chassi proposto



Fonte: Autor (2020)

Nesta condição obteve-se uma quantidade um pouco menor de elementos e nós do que na análise anterior, principalmente pela eliminação dos reforços internos da região de fixação do eixo. Mas ainda assim, obteve-se um total de 26087 elementos e 27814 nós.

#### 4.3.1.4 Condições de contorno

As condições de contorno foram mantidas exatamente iguais às da análise anterior, pois são as condições de força e restrições a que o conjunto está aplicado. Assim, teve-se as mesmas restrições na fixação do eixo, a mesma força de tração de 32000 N e a mesma massa distribuída de 10500 kg.

### 4.3.2 Processamento chassi proposto

Na etapa de processamento, assim como no projeto do chassi atual, também convergiu em cerca de 50 segundos. Utilizando, assim, dos recursos computacionais

disponíveis, cerca de 80% do processador, 67% da memória RAM e 74% de uso do SSD.

### 4.3.3 Pós-processamento chassi proposto

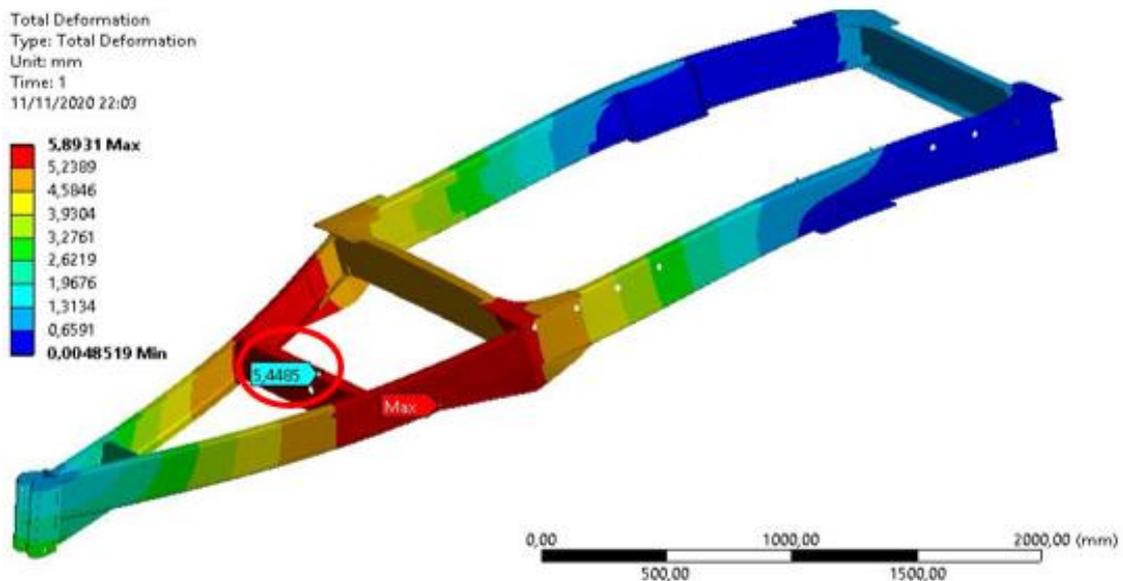
#### 4.3.3.1 Análise de tensões e deformações

Após ser finalizada e definida a etapa de pré-processamento e processamento iniciou-se a etapa de processamento do chassi proposto que compreende toda análise nas mais adversas situações ao que o conjunto é submetido.

Inicialmente fez-se uma análise do conjunto como um todo avaliando a questão dos deslocamentos sofridos e das tensões a que o conjunto está exposto. Ao avaliar as deformações pode ser observado, como mostra a figura 22 em escala aumentada, que as deformações não variaram muito em relação ao chassi atual. Mesmo mudando a geometria dos perfis do quadro, os maiores deslocamentos permaneceram na região da lança, mais próximo do suporte de mancalização.

As deformações não excederam os 5,9mm nos locais mais críticos, e na região da mancalização apontada teve-se um aumento de deformação de em torno 17%. Porém, como citado na análise do chassi atual, esta mancalização utiliza rolamentos autocompensadores e assim não se terá falha deste componente com esta deformação encontrada.

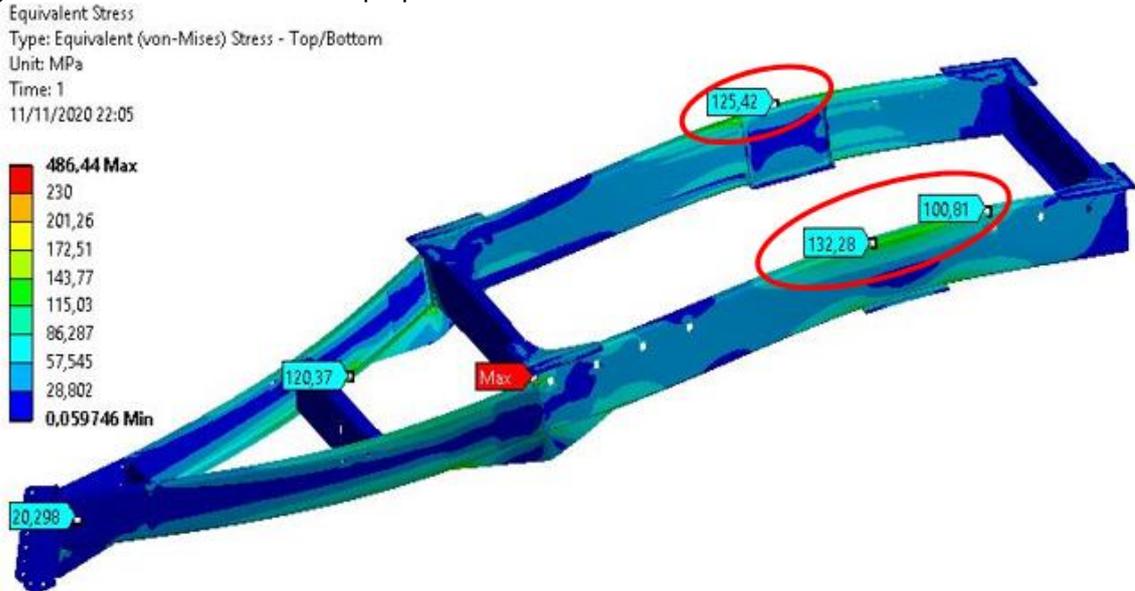
Figura 23 – Deformações chassi proposto



Fonte: Autor (2020)

Após isso fez-se também, no conjunto como um todo, a análise das tensões a que o conjunto está exposto, podendo verificar em que pontos há os maiores pontos de tensão e se sua localização continua na mesma região do chassi atual ou se mudou para os componentes em que se teve alterações.

Figura 24 – Análise inicial chassi proposto



Fonte: Autor (2020)

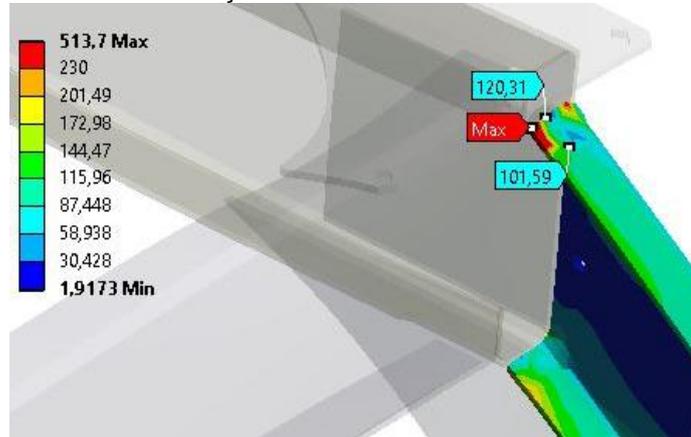
Como pode ser observado, se teve uma redução na intensidade da tensão na região de união da lança ao quadro, principalmente, pela inclusão do reforço na região interna da lança ao quadro traseiro. Porém, teve-se uma tensão mais elevada, como na análise do chassi atual, na extremidade frontal do reforço inferior onde chegou-se a tensões de em torno de 200 MPa.

Outra observação que pode ser feita é o aumento, mesmo que em pequenas intensidades, nos valores de tensão da longarina lateral na região acima da fixação do eixo. Na análise do chassi atual havia regiões pequenas, nas extremidades do reforço interno, com tensões um pouco mais elevadas. Na proposta, como houve a eliminação do reforço interno porém com inclusão de um menor sobre a chapa de fixação do eixo, teve-se uma aumento na região em que se concentra as tensões mais elevadas onde o pico se concentrou na região superior da lança.

É importante ressaltar que houve um pico de tensão de em torno de 500 MPa na extremidade da aba superior do perfil da lança junto ao quadro traseiro, como mostra a figura 24. Esse pico de tensão pode ser ignorada pois, além de ser uma região de tensão elevada extremamente pequena, logo ao lado no ponto elevado de

tensão as tensões baixaram consideravelmente, o que caracteriza uma singularidade de tensão.

Figura 25 – Singularidade de tensão lança

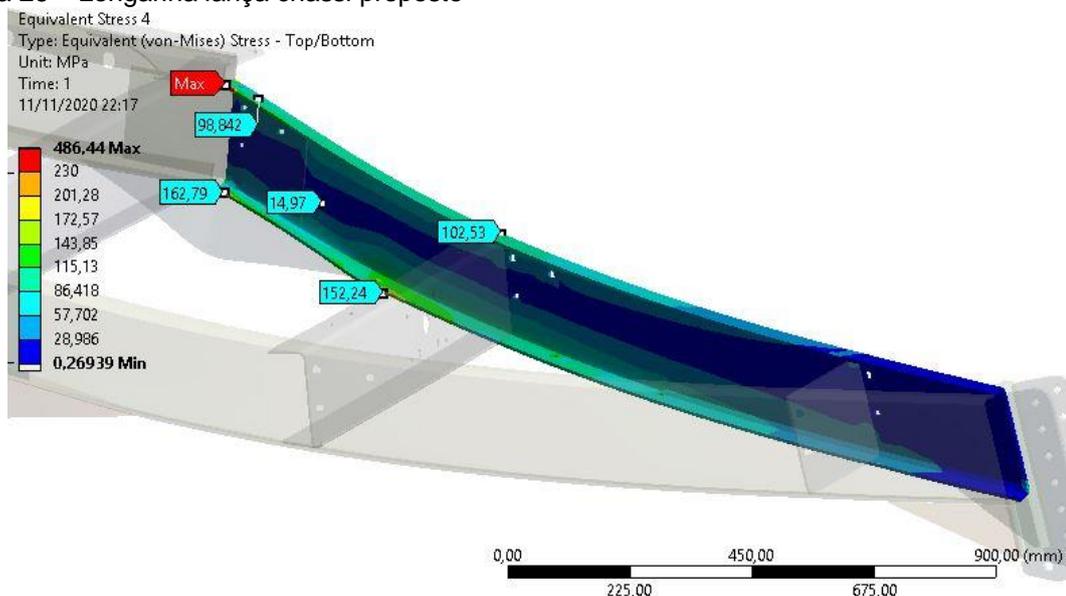


Fonte: Autor (2020)

A partir dessa análise inicial partiu-se para a análise dos componentes em que houve maiores intensidades de tensão e que também se analisou na análise do chassi atual.

Iniciando pela longarina da lança, onde não se teve alterações de projeto, verificou-se que os valores de tensão aumentaram, porém em intensidades pequenas. De modo geral, como pode ser visto da figura 25, as tensões se concentraram nas mesmas regiões da análise do chassi atual mas tiveram aumentos pequenos nos valores de tensão.

Figura 26 – Longarina lança chassi proposto

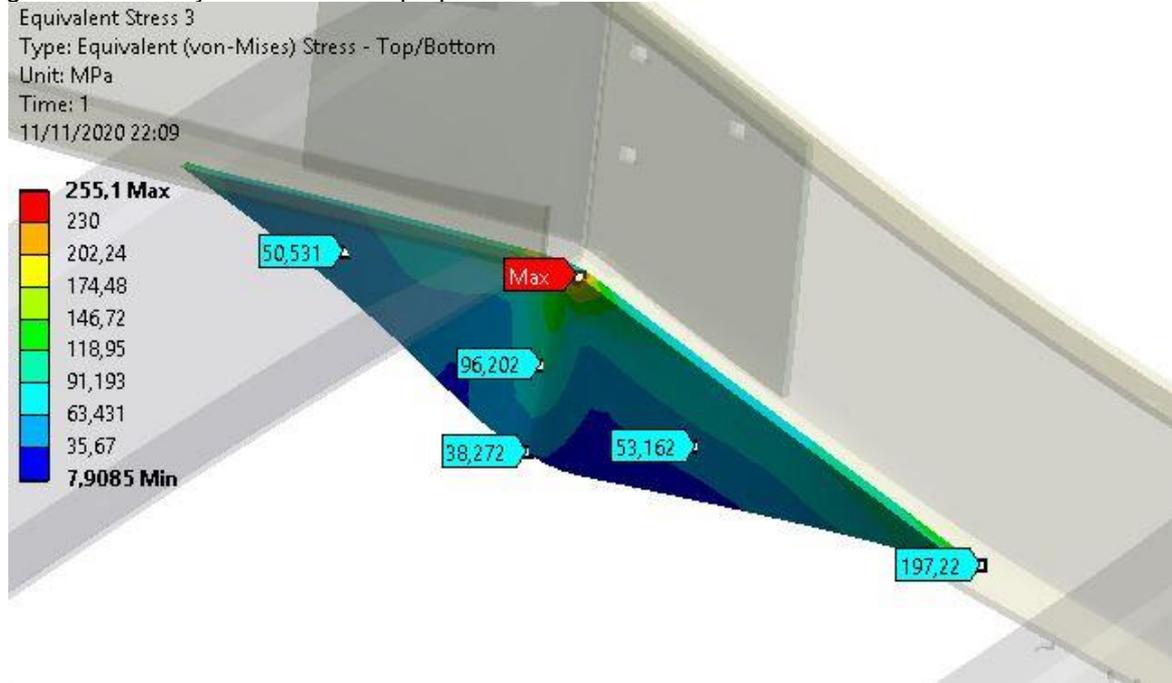


Fonte: Autor (2020)

Os valores de tensão não excederam nas regiões de maior intensidade, exceto no ponto de singularidade de tensão, os 170 MPa. Nas demais regiões do perfil as tensões não excederam os 120 MPa e, assim como na análise do chassi atual, tensões extremamente baixas na parte frontal. Isso mostra que se tem uma boa margem de segurança em relação a tensão a que o conjunto está exposto, uma vez que o limite de tensão especificado nas análises é de 230 MPa.

A análise do reforço inferior, outro ponto observado na análise do chassi atual, também foi analisado no chassi proposto. Como mostra a figura 26 a tensão ao longo do corpo se manteve constante mas com um pico na região interna da dobra na parte superior.

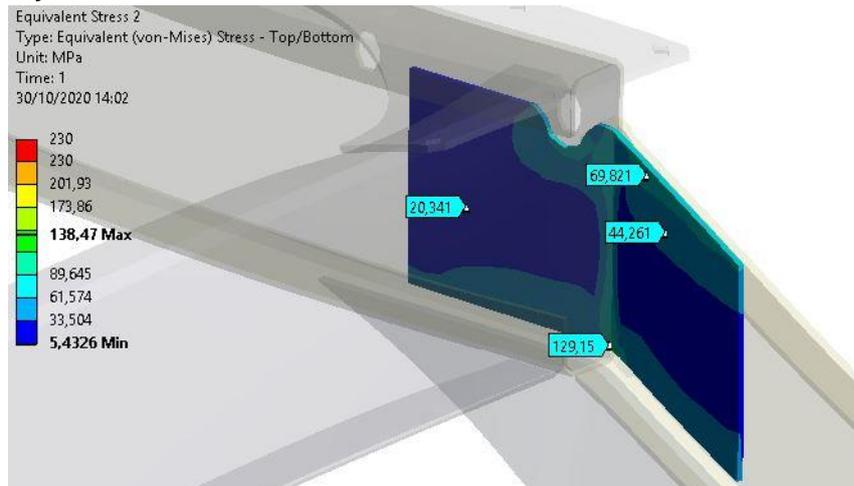
Figura 27 – Reforço inferior chassi proposto



**Fonte:** Autor (2020)

Comparado o reforço inferior do chassi proposto ao chassi atual se manteve a região em que ocorre os maiores valores de tensão porém, com um aumento na intensidade. Obteve-se valores de 30 a 160 MPa, chegando ao ponto máximo de 255 MPa na parte superior da dobra interna. O limite estipulado de 230 MPa está sendo ultrapassado nesse ponto mas, como é uma região pequena de valor alto e logo ao lado as tensões já tem valores bem menores, resolveu-se analisar o reforço interno, apresentado na figura 27, incluso no chassi proposto, pois o mesmo tem a mesma função, reforçar a união da lança ao quadro traseiro.

Figura 28 – Reforço interno

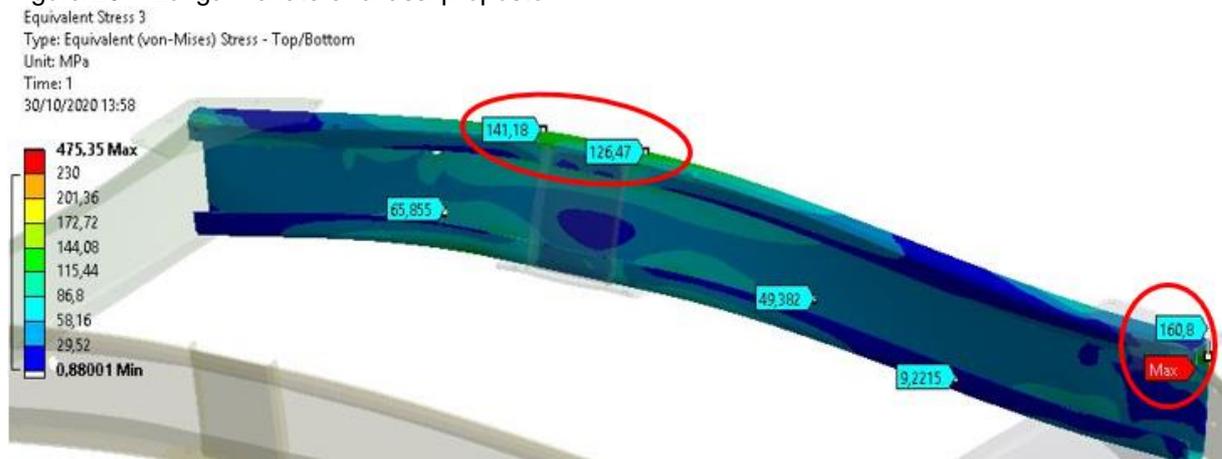


Fonte: Autor (2020)

Como mostra a figura 27, o reforço interno incluso não excede os 138 MPa. Isso comprova de que, por o reforço interno como inferior ter a mesma função de reforçar o maior momento fletor entre os dois pontos de apoio do chassi, o ponto de tensão encontrado no reforço inferior não colocará em risco o componente de alguma fratura.

Finalizada a análise da parte da lança frontal partiu-se para a análise da longarina lateral do quadro traseiro onde concentraram-se as alterações mais significativas de projeto. De modo geral, comparando o proposto com o atual, se teve aumentos na intensidade das tensões, mas que não são críticas a ponto de causar alguma fratura no componente. A figura 28 mostra que os valores, mesmo que aumentaram, ainda continuam seguros em relação ao limite estipulado na análise.

Figura 29 – Longarina lateral chassi proposto



Fonte: Autor (2020)

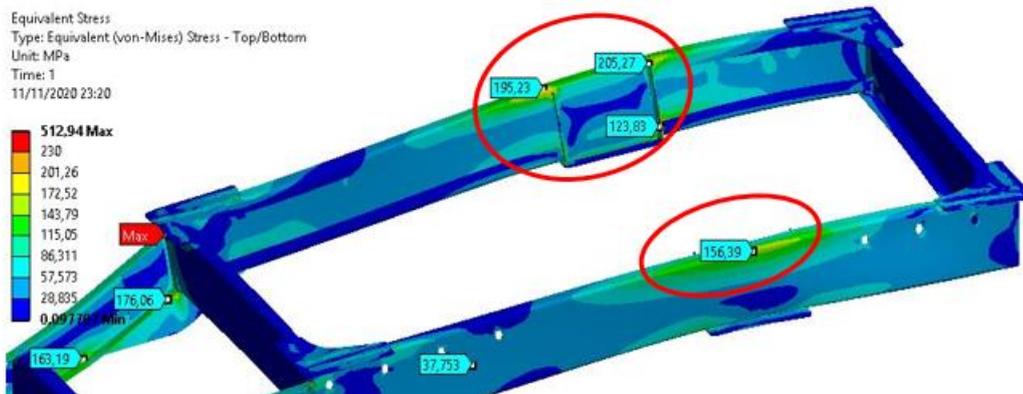
Os maiores valores de tensão concentraram-se exatamente acima da fixação do eixo, na aba superior. Isso ocorre devido ao fato de que grande parte da carga aplicada sobre o quadro se concentra justamente na chapa de fixação do eixo, ocasionando uma reação localizada. Mesmo assim os valores nessa região não excederam os 150 MPa, comprovando nesta análise de que não ocorrerão falhas nesta região.

Ao finalizar essa análise inicial do chassi proposto decidiu-se, com intuito de aperfeiçoar a análise e torná-la o mais próxima possível da realidade, fazer análises simulando variadas situações diferentes que acontecem na utilização da máquina. Dentre as situações analisadas pode-se citar a simulação do transporte do implemento carregado em um determinado ângulo lateral e outra sendo tracionada, pela força estipulada nas demais análises, a um ângulo diferente de 180°.

Desse modo, neste momento, fez-se a análise do caso de carga 3 que simula o implemento sendo movimentado, carregado, a um ângulo lateral de 12° de inclinação. Foi estipulado esse valor por ser o valor indicado pelo fabricante no manual de instruções como sendo o ângulo máximo sem que haja tombamento do implemento carregado.

Em uma análise prévia verificou-se que havia uma região com intensidades de tensão acima do ideal, mais especificamente na aba acima da fixação do eixo onde fica localizada grande parte da reação da carga. Assim resolveu-se por aumentar o comprimento do reforço que havia sido incluso nesta proposta. Como mostra a figura 29 o resultado foi positivo, a região de tensão reduziu em grande escala e agora não se tem mais um ponto crítico neste local, chegando no máximo a 205 MPa. A parte da lança não teve grandes variações de tensão em relação ao caso de carga 2.

Figura 30 – Análise ângulo lateral de 12°

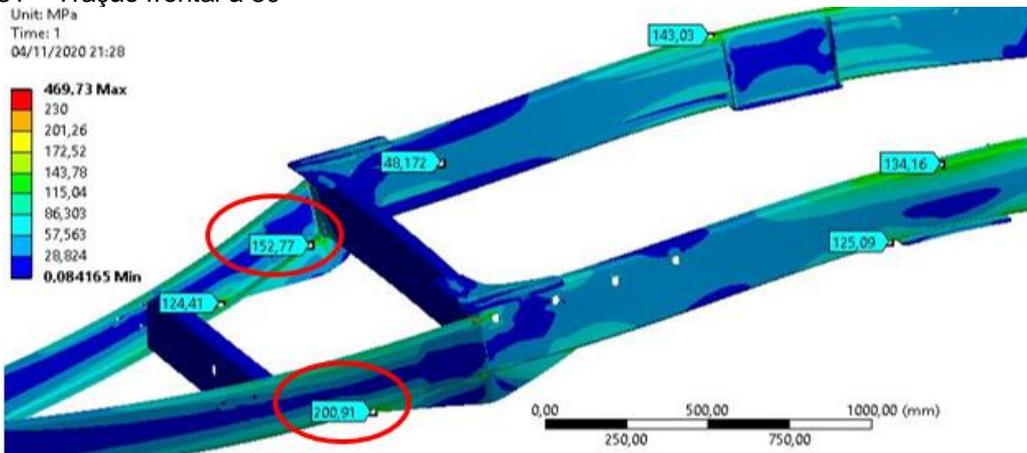


Fonte: Autor (2020)

Finalizada essa análise, partiu-se para o caso de carga 4 onde analisou-se o implemento sendo tracionado a 30° de inclinação. Esse valor foi estipulado a partir de uma informação do manual de instruções que estipula um ângulo máximo de trabalho com cardam a 30°. Essa situação pode ser encontrada quando o implemento está fazendo alguma curva ou até mesmo, como as chapas de fixação do eixo estão fixas nos planos x e y, estar sendo puxada em um atolamento. Esta é uma situação atípica, mas que realmente acontece na utilização no campo.

Assim como na situação simulada anteriormente, essa também não apresentou pontos críticos passíveis de alguma falha. Os valores, de modo geral, não excedem 200 MPa, exceto no término da aba superior das longarinas da lança, que em análises anteriores também já mostrou um concentrador de tensão inválido. A figura 30 apresenta os valores mais elevados que se encontrou ao longo de todo chassi, comprovando de que essa situação também não é crítica para este projeto e que o mesmo não irá falhar.

Figura 31 – Tração frontal à 30°

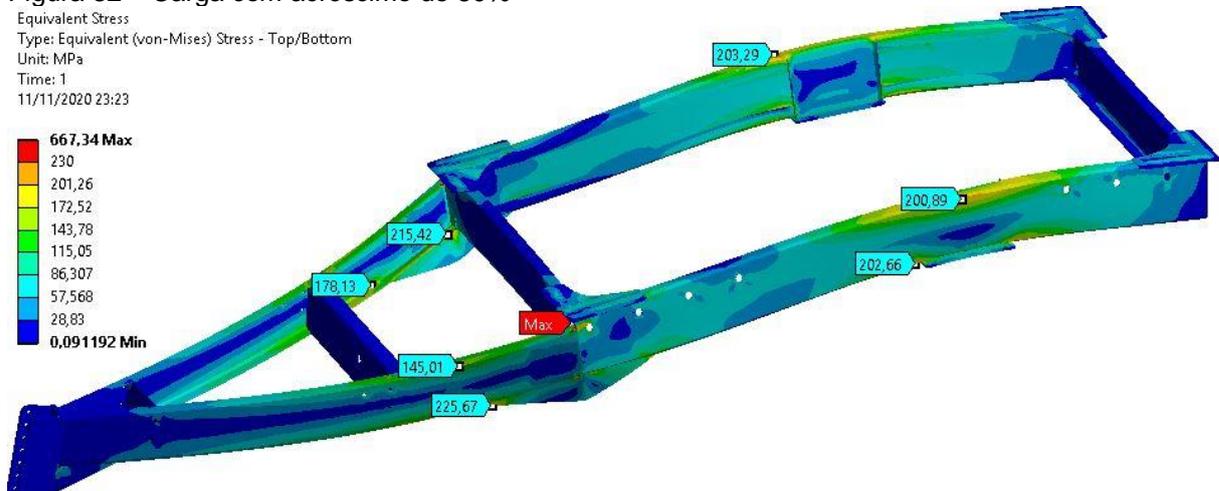


Fonte: Autor (2020)

Após feitos esses três modos de análise partiu-se para um que é em um caso muito extremo, mas que esporadicamente pode acontecer. Se trata da simulação da gravidade com 50% de aumento, ou seja, o peso da carga da máquina sobre o chassi sendo multiplicado por 1,5. Isso simula, mesmo que sendo uma estimativa, a máquina passando algum buraco, algum terraço, uma curva de nível, ou qualquer situação em que o rodado tem um deslocamento vertical simultâneo, gerando um impacto sobre os pontos de apoio do chassi.

Nesta análise nos resultados iniciou-se a ter mais regiões com intensidades de tensão mais elevada na parte frontal da lança. Porém, como a parte frontal da lança não sofreu alterações e atualmente este item não tem incidência de qualquer falha de campo nessa região, definiu-se não ser uma tensão que possa causar alguma falha, uma vez que no item físico tem-se os reforços de união da lança ao quadro traseiro. No quadro traseiro as tensões não excederam os 230 MPa, o que comprova de que o projeto proposto não terá incidência de falha nesta situação. A figura 31 apresenta os resultados da análise dessa situação.

Figura 32 – Carga com acréscimo de 50%



Fonte: Autor (2020)

Finalizando essas análises define-se como apto e seguro, através de análises estáticas lineares através de software de simulação, que o projeto proposto tem totais condições de implantação no objeto de estudo, uma vez que todas as análises ficaram dentro do especificado e foram validadas.

## CONCLUSÃO

Por fim, conclui-se que foi possível atender aos objetivos citados no início deste estudo. Através das primeiras análises do projeto atual foi possível identificar com clareza os pontos frágeis e superdimensionados do projeto. A partir disso, elaborou-se uma nova proposta de projeto e este foi validado através de análises realizadas em cinco casos diferente, trazendo o projeto o mais próximo possível da realidade.

Dessa forma, através do que foi especificado no início, as hipóteses estipuladas se confirmaram. Como citado neste item, o chassi tem possibilidade de reduções de matéria prima, principalmente nas longarinas do quadro onde se encontram as alterações mais significativas. Também é importante ressaltar que o reposicionamento de reforços internos e a inclusão de novos em pontos estratégicos auxiliou a manter a estrutura do produto.

Todo este estudo trará para a empresa um benefício de redução de em torno de 15% de matéria prima por produto, uma vez que reduziu-se de 296 kg para 251 kg o peso do conjunto. Além disso, reduziu-se também a quantidade de solda com a eliminação do reforço interno da longarina lateral. Isso demonstra o quão importante é este estudo dentro de uma engenharia.

Assim, em através do estudo realizado e dos resultados obtidos, constatou-se um melhor entendimento de análises estruturais estáticas lineares, que atualmente é muito utilizada em setores da engenharia. Desta forma, o estudo realizado foi um importante passo para novos estudos relacionados ao tema, envolvendo o uso de ferramentas computacionais na busca pela resolução de problemas estruturais ou de reduções de matéria prima.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realização do teste físico do projeto proposto através de sensores de tensão *Strain Gauge*, com o objetivo de validar a análise através da comparação de valores de tensão dos dois casos.
- Realização de análise dinâmica no software para teste de fratura por fadiga.
- Quantificação em valores da redução que será possível, através de redução de matéria prima e processo de fabricação, neste produto.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, J. F. A. C. **Estudo computacional via ANSYS de vigas, arcos e anéis com restrições de contato impostas por bases elásticas**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.
- AGRIMEC. **Carreta graneleira granbox flex plantio e colheita**. Disponível em:<<https://agrimec.com.br/project/carreta-graneleira-granbox-flex>>. Acesso em 15 de junho de 2020.
- ALVES, A. F. **Elementos finitos**. 7. ed. São Paulo: Editora Érica Ltda., 2002.
- ANSYS. **Structural analysis software solutions**. Disponível em:<<https://www.ansys.com/products/structures>>. Acesso em 10 de agosto de 2020.
- ARANT, M. O. **The effect of chassis torsional stiffness on the accuracy of heavy vehicle understeer and rollover modelling**. Clemson University, 2010.
- AZEVEDO, A. F. M. **Método dos elementos finitos**. Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, 2003.
- AZEVEDO, A. F. M. **Análise estrutural com Ansys Workbench**. Mogi das Cruzes: Domingos Flávio de Oliveira Azevedo, 2016.
- BENNETT, S. **Heavy duty truck systems**. 5. ed. Nova Iorque: Delmar Cengage Learning, 2009.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2012.
- CBCA. **Aços estruturais**. Disponível em:<<https://www.cbca-acobrasil.org.br/site/construcao-em-aco-acos-estruturais.php>>. Acesso em 10 de novembro de 2020.
- COSTA, B. A. C. **Conceção e dimensionamento do chassis e sistema de travagem de um veículo de competição do tipo Formula SAE**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014.
- GALI, M. F. **Modelo analítico de resistência ao rolamento de pneus de carga**. 2015 . Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.
- GENT, A. N.; WALTER, J. D. **Pneumatic Tire**. Mechanical Engineering Faculty Research. University of Akron, Ohio, USA, 2006.
- GENTA, G.; MORELLO, L. **The automotive chassis: Volume 1: Components Design**. Torino: Springer, 2009.
- GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of vehicle dynamics**. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1992.

INDUTAR. **Carreta agrícola graneleira**. Disponível em: <<https://www.indutar.com.br/carreta-agricola-graneleira>>. Acesso em 15 de junho de 2020.

JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K.M. **Fundamentos do projeto de componentes de máquinas**. 4. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2013.

LAKATOS, E. V.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

LEANDRO, V. M. **Análise estrutural de um chassi de semirreboque pelo método de elementos finitos**. 2019. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Automotiva)- Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2019.

MARINHO, I. J. P., **Projeto ótimo de estruturas metálicas de arquivancadas reutilizáveis via ansys**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC, Rio de Janeiro, 2002.

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

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. **Projeto de engenharia mecânica**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

SILVEIRA, F. L. Potência de tração de um veículo automotor que se movimenta com velocidade constante. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 1, 1304, 2011.

TIMOSHENKO, S. **Resistência dos materiais**. AO Livro Técnico: Rio de Janeiro, 1966.

## ANEXO A – PROPRIEDADES DO MATERIAL UTILIZADO

ELEMENTO QUÍMICO	ASTM A36 (PERFIS)
% C máx.	0,26
% Mn	... (1)
% P máx.	0,04
% S máx.	0,05
% Si	0,40
% Ni	...
% Cr	...
% Mo	...
% Cu	0,202
% V	...
(% Nb + %V)	...
Limite de escoamento (MPa)	250 mín.
Limite de resistência (MPa)	400-550
Alongamento Após ruptura, % (l <sub>0</sub> = 200mm)	20 mín.

**Fonte:** Adaptado de CBCA, AçoBrasil (2014).