

ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM CHASSI SEMIRREBOQUE PARA CAÇAMBA BASCULANTE¹

Gerson Balestreri Junior²

Paulo Vicari³

Fábio Goedel⁴

Paulo Miguel de Toni⁵

RESUMO

Dado o fato de que a malha rodoviária brasileira é precária, as fábricas de implementos rodoviários têm por objetivo entregar um produto robusto e seguro, com uma estrutura compacta e mais leve o possível, para que seus clientes possam efetuar a entrega de suas mercadorias sem complicações e com o maior custo benefício realizável. Os objetivos deste trabalho são apresentar um estudo através de uma simulação computacional da estrutura de um chassi semirreboque para caçamba basculante, avaliando o seu comportamento estrutural para sanar um problema causado no primeiro chassi construído, e buscar a causa da deformação na estrutura, por meio da visualização da deformação e dos fluxos de tensões causados pelas condições de trabalho em que o chassi é exposto. Para isso, um procedimento para o uso do método de elementos finitos é apresentado, detalhando o passo a passo no método de tratamento da geometria, geração de malha, de forma que as condições de contorno sejam aplicadas e os resultados sejam mais fieis possíveis. A modelagem do CAD neste trabalho foi realizada no SolidWorks[®] e a simulação foi efetuada no ANSYS Workbench[®]. Com as melhorias efetuadas notou-se uma diminuição na deformação e nos fluxos das tensões presentes na estrutura. A tensão mais alta indicada no novo formato do chassi foi de 95 MPa, muito abaixo do limite de escoamento do ASTM A-36 que é de 250 MPa. O novo formato do chassi apresentou uma diminuição de 185 kg e uma redução de 600 mm no seu comprimento.

Palavras-chave: Chassi. MEF. Simulação. Semirreboque. Caçamba basculante.

1 INTRODUÇÃO

As primeiras fabricantes de implementos rodoviários instaladas no Brasil são datadas do ano de 1950. Desde então esse setor da indústria veio se reinventando, sempre com o intuito de adequar as necessidades exigidas pelo mercado (GOLDENSTEIN; ALVES; AZEVEDO, 2006).

Na década de 90, com a implantação do plano real o Brasil passou por uma grande mudança na sua economia, isso fez com que vários setores da indústria sofressem grande

1 Pré-requisito para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

2 UCEFF Faculdades. Acadêmico do Curso de Engenharia Mecânica. E-mail balestrerijunior@outlook.com.

3 UCEFF Faculdades. Professor orientador . E-mail paulo.vicari@uceff.edu.br.

4 UPF. Professor coorientador. E-mail goedel@upf.br.

⁵ Docente do curso de Eng. Mecânica. paulomiguel@uceff.edu.br.

reestruturação, dentre estes setores encontra-se o de fabricantes de implementos rodoviários (PADILHA, 2018).

Os implementos rodoviários tem enorme influência para o escoamento de cargas em todo território nacional. Dados fornecidos pela Confederação Nacional do Transporte (2019) mostram que 61% de todas as cargas no Brasil são transportadas pelas rodovias, fazendo com que esse modal se torne o mais importante do país. Os demais modais estão divididos em 20,7% para ferrovias, 13,6% para aquaviários, 4,2% para dutoviários e 0,4% para a aéreos.

Para que os transportes de cargas via modal rodoviário sejam cada vez mais eficientes a indústria de implementos rodoviários tem como seu principal objetivo o desenvolvimento de acessórios e complementos ao caminhão. As implementadoras possuem uma enorme versatilidade, podem ser fabricados modelos com enorme variedade, tanto no tamanho quanto na sua estética (RANDON, 2018).

Como a legislação brasileira determina um peso máximo a ser carregado por cada caminhão, a indústria de implementos rodoviários está sempre buscando diminuir o peso das estruturas de seus implementos, conseqüentemente a quantidade de carga a ser transportada acaba sendo maior, tornando isso a principal finalidade, perante ao fato de inovar (GOLDENSTEIN; ALVES; AZEVEDO, 2006).

Para realizar a diminuição de peso, sem que seja enfraquecida a estrutura do chassi, é imprescindível que se faça um dimensionamento correto de todas as suas partes. Um chassi mal dimensionado pode ocasionar inúmeros problemas, dentre eles uma deformação anormal do produto, quebra da estrutura e até mesmo tombamentos, que podem ocasionar graves acidentes de trânsito.

As características no modelo do chassi a ser construído variam de acordo com a necessidade do cliente, porém o material mais usado na sua construção é o aço carbono estrutural, que tem como características a ductibilidade aliada a uma alta resistência mecânica.

De acordo com GmbH (2014), o termo Método dos Elementos Finitos (MEF) apareceu pela primeira vez em meados de 1960, tendo como seu principal precursor o americano Ray William Clough. Este método vem sendo usado desde 1970 por indústrias de produção automotiva, aeronáutica, aeroespacial etc.

O método de elementos finitos (MEF) tem a capacidade de fazer a divisão de uma estrutura com uma geometria complexa em um emaranhado de elementos simples, esse emaranhado pode ser formado por triângulos, quadriláteros, tetraedros, hexaedros etc.,

formando assim uma estrutura montada por um número finito de elementos individuais. O MEF parte do conceito de que após o conhecimento do comportamento de cada elemento separado, o comportamento global do conjunto pode ser conhecido também (GOEDEL; ALVES FILHO; WALBER, 2015).

Como resultado deste projeto de pesquisa se busca uma otimização da estrutura do chassi do implemento rodoviário, que irá produzir um melhor dimensionamento ocasionando redução do peso bruto total (PBT) do conjunto, ocasionando um implemento mais atraente e competitivo para ser lançado no mercado nacional.

Perante o ao que será apresentado mostra-se o questionamento: A utilização do método de elementos finitos contribuiria na comprovação dos cálculos estruturais feitos para a análise comportamental no chassi do implemento rodoviário em questão.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 IMPLEMENTOS RODOVIÁRIOS NO BRASIL

Entre os anos 1960 e 1980, fatores como um crescimento considerável da indústria automobilística no país, a baixa do preço do barril de petróleo e as crescentes taxas do PIB na década de 1970, fizeram com que o transporte rodoviário de cargas se firmasse como o principal meio de distribuição de mercadorias na matriz de transportes, chegando a representar uma participação de 70% (GOLDENSTEIN; ALVES; AZEVEDO, 2006).

De acordo com pesquisa realizada pela Confederação Nacional do Transporte (2019), mesmo se passando vários anos o setor de transportes rodoviários ainda representa a soma de 61% de todas as cargas escoadas em território nacional, mostrando que ainda hoje o principal meio de transportes no Brasil é realizado pelas rodovias.

2.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

2.2.1 O Método e as Aplicações

Constantemente engenheiros encontram barreiras no seu dia a dia para formulação de projetos, alguns desses mais simples e outros mais desafiadores, mas ambos precisam ser concluídos com êxito. Projetos mais simples podem ser resolvidos da forma mais rápida, por

meio de auxílio de fórmulas, livros, tabelas e etc. Projetos mais desafiadores são de uma complexidade enorme, com isso se torna inviável uma solução exata através de modelos matemáticos que abrangem todo o método (ALVES FILHO, 2018).

Na formulação dos projetos mais simples, as geometrias são regulares, tem material homogêneo, possuem também carregamento e condições de apoio simples. Assim, é permitido um resultado exato das deformações, deslocamentos e tensões aplicadas por todos os pontos. Somente em alguns problemas podem ser obtidos os resultados exatos usando métodos analíticos (ALVES FILHO, 2018).

De acordo com Alves Filho (2018), afirma-se que para calcular o deslocamento se dispõe uma equação diferencial de quarta ordem, mesmo tendo uma maior complicação a mesma pode ser resolvida pelo método analítico. Em problemas mais complexos se torna atraente o desenvolvimento de procedimentos aproximados que possibilitam a aplicação em caráter geral de forma não dependente da estrutura e da condição de carregamento, dentro do erro aceitável dos padrões da engenharia.

Ao contrário do método analítico que possui um sistema matemático para representar os infinitos pontos no sistema, a resolução através do MEF mostra resultados aproximados, o modelo numérico usado por esse método realiza a solução para alguns pontos no sistema (AZEVEDO, 2003).

Segundo Melconian (2014), o MEF constitui-se de um processo de conversão da estrutura em elementos finitos, conhecido como discretização, esse consiste em separar os elementos em pequenas partes que se conectam entre si por meio dos nós. Desta forma, um problema de geometria complexa pode se transformar em um número finito de problemas simples.

O autor ainda destaca que ao usar o método de discretização na peça, podem se formar infinitas combinações de tamanhos e tipos de elementos utilizados. Além da geometria do elemento, outro fator importante é a relação de aspecto, conhecida também como *aspect ratio*.

2.2.2 Os Tipos de Estruturas

Segundo Azevedo (2003), a classificação das estruturas acontece de acordo com sua geometria, elas são separadas em três tipos.

Quadro 1 - Classificação das estruturas

Estruturas Reticuladas (Linhas):	Nesse tipo de estrutura os elementos interagem unicamente em suas juntas ou nós, ou seja, trocam esforços entre si, somente nesses pontos. Seu comprimento é muito maior que suas dimensões transversais. Sua classe é constituída por vigas contínuas, pórticos planos, pórticos espaciais, grelhas, treliças planas e treliças espaciais.
Estruturas Laminares (Superfície):	Quando uma das dimensões da peça é muito menor que as outras, geralmente a espessura. Desenvolvem para ambos os lados de uma superfície média. Usada para elaboração da malha em estruturas compostas por chapas finas e moderadamente espeças, tubos, vigas I.
Estruturas Sólidas (Sólido Volumétrico):	Peças constituídas por três dimensões da mesma grandeza se tornam impossíveis de extrair uma superfície média, nesse caso torna-se necessário a utilização de elementos sólidos para então discretizar e preencher o volume da peça. Peças que não apresentam características similares as laminares ou reticulares se enquadram nesse caso.

Fonte: Adaptado de Alves Filho (2018), Azevedo (2003) e Melconian (2014).

2.2.3 Análise Matricial

Para elementos com conexões discretas na própria estrutura, como os pórticos e as treliças, a simplicidade na montagem das equações que demonstram o comportamento do sistema é maior que em elementos cujas estruturas são formadas por chapas e sólidos, demonstrando uma subdivisão dos elementos mais artificial (ALVES FILHO, 2018).

O ponto de partida para os deslocamentos e as forças aplicadas nos nós de cada elemento é a análise matricial da estrutura. Esse fundamento tem relação com um conceito básico, a constante elástica da mola, que nada mais é que a medida quantitativa da rigidez da mola. Essa constante elástica pode ser descrita como um coeficiente de rigidez onde se relaciona o deslocamento e a força, conhecida pela Lei de Hooke que é descrita pela equação 1: (MELCONIAN, 2014).

$$F = k.d \quad (1)$$

Sendo F [N] uma força, k [N/m] uma constante e d [m] o deslocamento.

2.2.4 Matriz de Rigidez

A diversidade nas classes dos problemas discretizados envoltos na montagem dos elementos finitos e conseqüentemente a obtenção das relações matemáticas que concedem a resolução do problema, ficam dispostas em algumas leis fundamentais na Matriz de Rigidez. Para cada situação é de suma importância discernir na montagem de elementos finitos e no

comportamento físico do material, uma técnica geral que concede uma aproximação do problema na montagem (AZEVEDO, 2003).

De acordo com Alves Filho (2018), apesar de em um primeiro momento serem aplicadas nas estruturas reticuladas, o modelo matemático que retrata de forma discreta a estrutura, tem aplicação nos elementos laminares e sólidos. A estrutura em equilíbrio deve atender as três leis ou relações fundamentais, descritas como:

Quadro 2 – Leis fundamentais para matriz de rigidez

Leis	Descrição
Equilíbrio de forças	nessa primeira lei, consegue-se usufruir das equações de equilíbrio para cada um dos elementos isoladamente. Com isso pode-se aplicar internamente a condição de equilíbrio em cada elemento, se este estiver com uma parte em equilíbrio, o mesmo também está.
Compatibilidade de deslocamentos	A condição dos deslocamentos ocorridos em cada um dos nós do elemento devem ser compatíveis. Por mais que sofram condições de deslocamento, os elementos devem estar conectados nos mesmos nós do início das condições aplicadas.
Comportamento do material	Esforços internos se propagam pela estrutura, ocasionando a deformação dos elementos. Na maior parte dos casos, as forças internas crescem proporcionalmente as deformações se o grau de esforços não for exorbitante.

Fonte: Adaptado de Alves Filho (2018).

De acordo com Melconian (2014), nas estruturas constituídas por apenas um elemento que é fixado em apenas um nó, a força externa F [N] gera um deslocamento U [m], que tem na sua característica uma linearidade proporcional a F [N.m]. Com o elemento sendo proporcional a estrutura, a rigidez do elemento torna-se proporcional a rigidez da estrutura, conforme equação 2:

$$F = K \cdot U \quad (2)$$

Sendo $K = k$, onde a constante elástica da mola é descrita como k [N/m], assim podemos contabilizar a rigidez da estrutura.

Com o conhecimento da a rigidez da estrutura e as forças aplicadas nela, a resposta obtida será um componente de deslocamento, conforme equação 3:

$$U = \frac{F}{K} \quad (3)$$

Componentes de deslocamento e componentes de rigidez estão presentes em grande número nas estruturas reais, com isso todas as forças externas e todos os deslocamentos nodais geram uma relação linear entre si, assim podemos expressar essa relação em forma de notação matricial, de acordo com a equação 4: (ALVES FILHO, 2018).

$$\{F\} = [K].\{U\} \quad (4)$$

Onde:

- $\{F\}$ é a matriz coluna que representa todas as cargas nodais [adm];
- $[K]$ é a matriz de rigidez da estrutura [adm];
- $\{U\}$ é a matriz coluna com todos os deslocamentos nodais [adm].

2.2.5 Nós e Malha

Após entender o comportamento de cada elemento presente no MEF, passa-se a entender o comportamento presente no conjunto estrutural de cada elemento. O conjunto estrutural do elemento, conhecido como malha, nada mais é que a interligação dos pontos, denominados nós. Com a geometria subdividida, as equações não podem mostrar uma solução exata, mas podem mostrar uma solução aproximada usando o MEF (AZEVEDO, 2003).

2.2.6 Deformações

As tensões e as deformações mostradas no MEF são essências para o modelo demonstrado no estudo. A deformação presente nos materiais é a variação nas dimensões de um determinado corpo que é submetido a aplicação de forças externas, numa condição permanente ou temporária. As propriedades físicas do corpo e a quantidade de força aplicada é que determinam a quantidade de deformação sofrida (MELCONIAN, 2014).

Deformações por tensão mecânica ocorridas em um determinado corpo, podem ser denominadas em três tipos: deformação por ruptura, quando o material sofre tensões externas que ultrapassam seu limite de ruptura; deformação plástica, quando o material sofre tensões externas abaixo do seu limite de escoamento ou de ruptura o material se deforma mas não se rompe; deformação elástica onde o material sofre tensões externas menores que sua tensão de

elasticidade, se deforma e após as tensões serem retiradas o material tende a voltar ao seu estado original (MELCONIAN, 2014).

De acordo com Alves Filho (2018), materiais com comportamento elástico respeitam as leis de Hooke, assim a tensão do material é diretamente proporcional a deformação do mesmo, onde E é denominada a constante de proporcionalidade. Assim a fórmula é expressa pela equação 5:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (5)$$

Onde:

- σ = Tensão sofrida no material [N/m];
- E = Módulo elástico ou de elasticidade do material [Pa];
- ε = Deformação específica do material [m].

As forças aplicadas em um objeto discretizado causam um fenômeno que é conhecido por deslocamento nodal, esse fenômeno consiste no distanciamento ou na aproximação dos nós que compõem os elementos da peça discretizada. (AZEVEDO 2003).

2.3 TEORIA DA ENERGIA DE DISTORÇÃO MÁXIMA – TEORIA DE VON MISES

A teoria de von Mises, ou teoria da energia de distorção máxima, teve origem a partir de uma análise feita em materiais dúcteis, onde esses eram tensionados hidrosticamente e esses materiais apresentavam resistência de escoamento muito acima dos valores obtidos a partir do ensaio de tração simples. A partir disso, foi postulado que o escoamento apresentava alguma relação com a distorção angular do elemento que estava sofrendo tensão (SHIGLEY, 2005).

De acordo com Shigley (2005), a teoria de von Mises mostra que o escoamento do material acontece quando a energia de deformação por distorção em uma unidade de volume atinge ou ultrapassa a quantidade de energia de deformação por distorção por unidade de volume no escoamento sob tração ou compressão simples do mesmo material.

Em casos em que envolvem tensões combinadas normal e de cisalhamento no mesmo ponto é adequado estabelecer uma tensão equivalente que seja adequada para retratar a combinação de tensões. A tensão de von Mises σ' é estabelecida como a tensão de tração

uniaxial que geraria a mesma energia de distorção que é gerada pela combinação atual das tensões aplicadas. Este método nos dá a possibilidade de analisar casos de tensão multiaxial combinada a tensões de cisalhamento como se fossem devidos a um carregamento de tração pura (NORTON, 2013).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo consiste em realizar uma análise estrutural de um chassi para caçamba basculante onde seu objetivo é ajustar os possíveis problemas ocorridos. Para obter os resultados, foi usado o software de análise estrutural Ansys®.

O chassi em estudo foi projetado e construído por uma empresa situada no Oeste de Santa Catarina. Após um período de uso deste chassi, o mesmo demonstrou problemas em sua estrutura, conforme Figura 1. A partir das avarias presentes nesta estrutura (elemento principal para sustentação do implemento rodoviário), emergiu-se a necessidade de entender o porquê a mesma entrou em falha, o que acarretou em grandes dificuldades de uso do implemento. Em vista disso, manifestou-se o desejo de analisar o comportamento da estrutura do chassi.

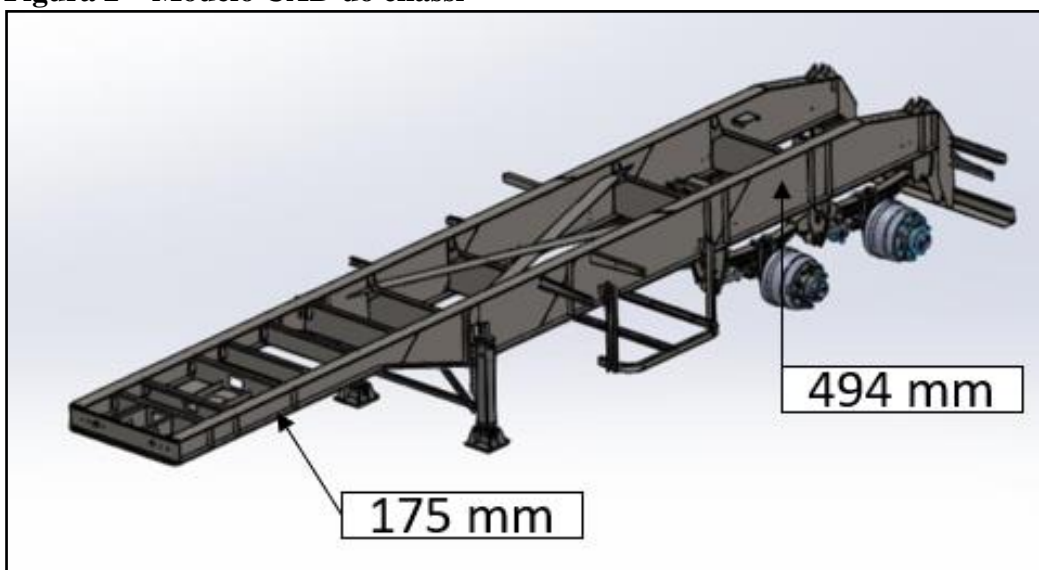
Figura 1 – Fotos do implemento



Fonte: dados da pesquisa (2020).

A estrutura preparada do chassi corresponde a 1.500 kg, é constituída por duas vigas I paralelas com 9400 mm de comprimento e uma altura que varia de 175 mm a 494 mm cada, essas vigas são conectadas por travessas com 1049 mm de comprimento, além disso, a estrutura é formada também por costelas e cintas que atuam como reforços. Todas suas peças estruturais são construídas em aço carbono ASTM A-36. Sua função é suportar os esforços exercidos pela caixa de carga e pelo sistema que forma o conjunto da suspensão, além disso, a grande maioria dos acessórios do implemento são fixados nele.

Figura 2 – Modelo CAD do chassi



Fonte: dados da pesquisa (2020).

A empresa cedeu o projeto CAD (*Computer Aided Design*) do chassi do implemento e nele foram feitos os preparos necessários através do software SolidWorks®, deixando apenas as peças que influenciam na estrutura do chassi.

O método de preparação da estrutura do chassi se dá pelo fato de que o projeto cedido tem a finalidade de suprir a necessidade de produção da fábrica, por meio de desenhos técnicos e detalhamentos a partir da montagem. Em vista disso, o modelo possui detalhes que necessitam de ajustes como folgas na montagem das peças, posicionamentos sobrepostos, furações e peças que não influenciam na estrutura do chassi. Havendo então que realizar os ajustes destes detalhes que não mostram influência no projeto de estudo.

Com o modelo do chassi preparado para a análise, o formato CAD é executado no software Ansys®, transformando o mesmo em um modelo CAE (*Computer Aided Engineering*), para então serem aplicadas as etapas que envolvem o estudo através do método dos elementos finitos (MEF). É necessário identificar o material da estrutura, o qual já se encontrava na biblioteca de materiais do Ansys®, o aço carbono estrutural ASTM A-36, a partir dessa escolha foram realizados os cálculos de tensão na estrutura do chassi.

A execução das condições de contorno é a parte do cálculo em as peças são restringidas, isto é, dando apenas um grau de liberdade para elas, ou que estejam fixas. As condições de contorno aplicadas no chassi são, a face em que o pino rei é soldado na mesa e em seu reforço, e a suspensão é representada por molas. Já na segunda seção foi simulado o momento de descarregamento do material presente na caixa de carga, considerado o ponto crítico de uso.

Para representação da caixa de carga, são usados valores que correspondem a caixa de carga com sua capacidade total atingida, fazendo com que a carga seja totalmente distribuída e de forma adequada. A força da gravidade também é apresentada no estudo.

A preparação da malha foi feita através do recurso automático do software, o refinamento da malha foi definido como padrão, após isso foram feitos alguns ajustes manuais para melhorar ainda mais o refinamento. Por ser uma malha muito refinada, ela gerou muitos elementos de malha e muitos nós, com isso, o tempo de processamento se tornou mais elevado, porém, o resultado apresentado permitiu demonstrar uma precisão considerável para a análise.

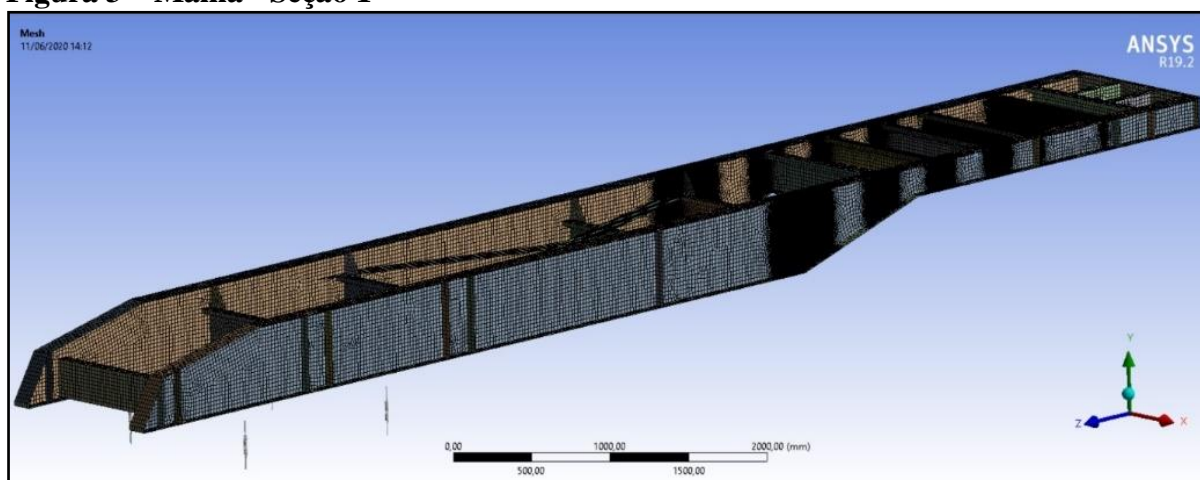
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas seções a seguir, as resoluções das análises feitas através do software serão mostradas por meio de imagens e tabelas, com o intuito de facilitar o entendimento e deste modo mostrar com maior clareza os resultados obtidos.

4.2 CONDIÇÃO DE CONTORNO 1: CARGA DISTRIBUÍDA

Para a realização desta análise, como informado anteriormente, o elemento utilizado para a geração da malha foi o elemento de casca ou laminar, com a malha padrão do software, conforme Figura 3.

Figura 3 – Malha - Seção 1



Fonte: dados da pesquisa (2020).

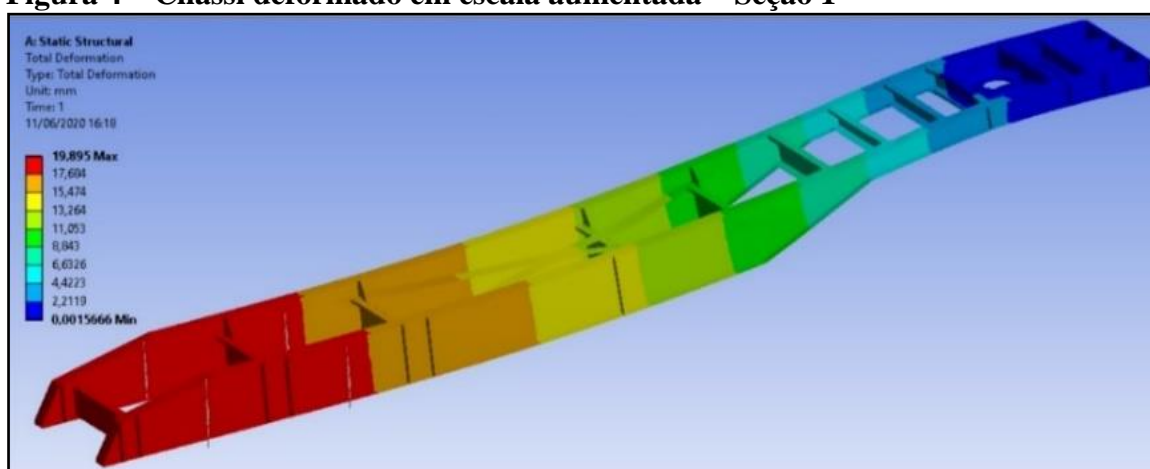
Nos locais em que a malha apresenta um elemento menor, representam os pontos mais críticos onde foi aplicado um refinamento para ter um resultado melhor dos fluxos das tensões.

As restrições aplicadas na estrutura foram feitas para simular uma situação muito próxima da realidade. A carga aplicada na estrutura é de 230500,00 [N], distribuindo igualmente esse valor para cada cinta superior do chassi. O engaste da estrutura foi efetuado em um ponto remoto exatamente na altura em que o pino rei é acoplado na quinta-roda. Outro recurso usado para melhor compreender o comportamento do chassi foram as molas, representadas de acordo com o posicionamento dos eixos e da suspensão. Cada mola possui um coeficiente de rigidez no valor de 1200 [N/mm].

Posteriormente a aplicação de todos os componentes de fixação, das condições de contorno e a geração da malha, foram obtidos os resultados das tensões equivalentes e das deformações presentes no chassi.

A Figura 4 mostra em uma escala aumentada o modo como a estrutura do chassi tende a se deformar, de acordo com o carregamento aplicado.

Figura 4 – Chassi deformado em escala aumentada – Seção 1

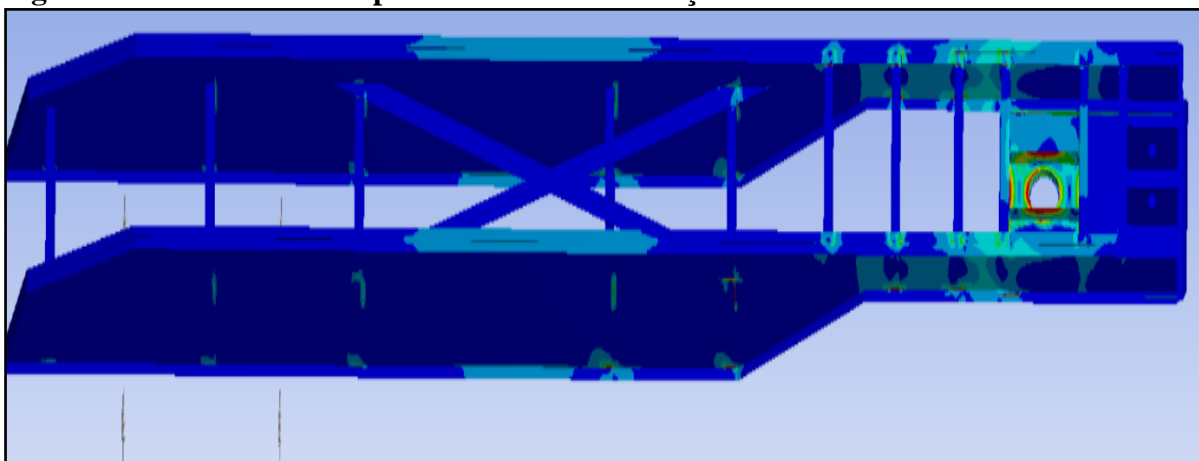


Fonte: dados da pesquisa (2020).

Visto que possui uma maior deformação da estrutura entre o local do engaste (pino rei) e a suspensão (molas), sucedendo em uma tensão mais elevada nas áreas de alteração da geometria do chassi (pescoço) e na parte mais próxima do engaste. Este valor de deformação se dá pelo fato de a análise ter a representação das molas no lugar das suspensões.

Analisando o estudo das tensões equivalentes foram obtidos os resultados presentes na estrutura, conforme Figura 5.

Figura 5 – Fluxo de tensão presente no chassi – Seção 1



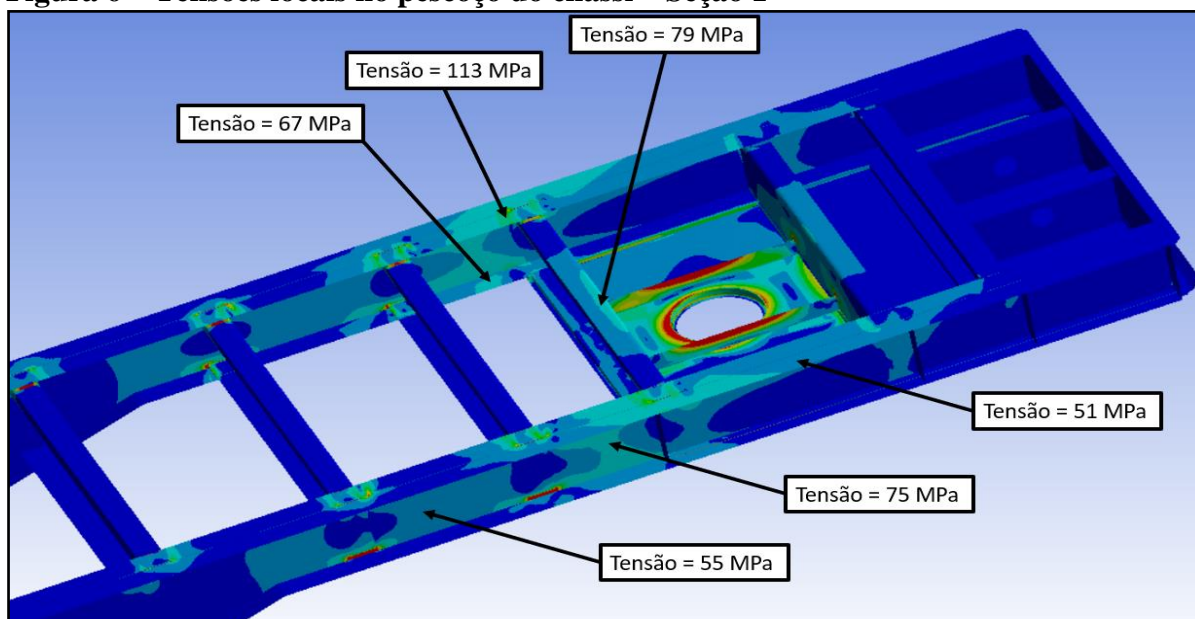
Fonte: dados da pesquisa (2020).

Nota-se que em alguns pontos, a tensão está acima da tensão de escoamento do material, porém, estes pontos são conhecidos como singularidades de tensão, estas singularidades existem devido as representações simplificadas das regiões soldadas, pois o objetivo da análise estrutural realizada é a avaliação do comportamento global do chassi, que é caracterizado por uma flexão.

Outro local que demonstra tensões elevadas e que podem ser desconsideradas é onde ocorre a fixação da estrutura (pino rei). Nesta área a restrição é aplicada apenas nos nós de duas faces, uma no reforço do pino rei e outra na mesa. Por ser uma baixa quantidade de elementos e nós presentes nessas faces, e a carga aplicada na estrutura é elevada, as tensões em volta desse local também se tornam elevadas.

A partir disso podem ser avaliadas as tensões que geram uma atenção maior na análise, de acordo com a Figura 6.

Figura 6 – Tensões locais no pescoço do chassi – Seção 1



Fonte: dados da pesquisa (2020).

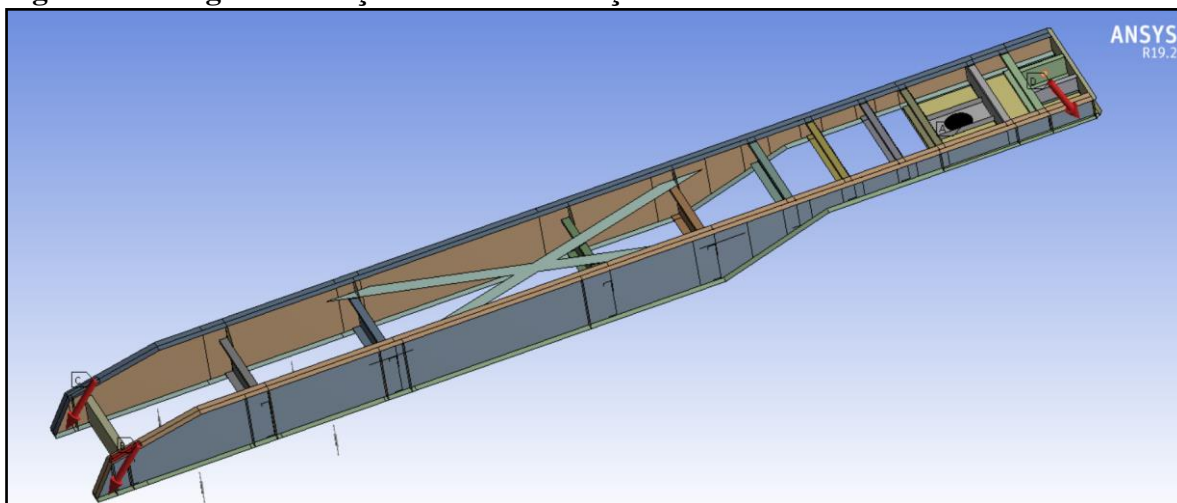
Apresentados os locais onde as tensões no chassi são mais elevadas, é calculado um fator de segurança de aproximadamente 2,1. De acordo com Mazetto (2019), o fator de segurança indicado para a construção de implementos rodoviários é de 1,7.

4.2 CONDIÇÃO DE CONTORNO 2: ESCOAMENTO DA CARGA

Nesta seção foram avaliadas as tensões equivalentes (von Mises) e as deformações. Este caso demonstra o ponto crítico de descarregamento, que se dá no momento em que a caixa de carga atinge uma inclinação de 45° em relação a face superior do chassi fazendo com que o produto comece a escoar.

A malha gerada, as representações da suspensão (molas), do pino rei (restrição) e o valor das cargas aplicadas continuam as mesmas da seção anterior, no entanto, o posicionamento da carga é alterado, de acordo com a Figura 7.

Figura 7 – Cargas e restrições no chassi – Seção 2

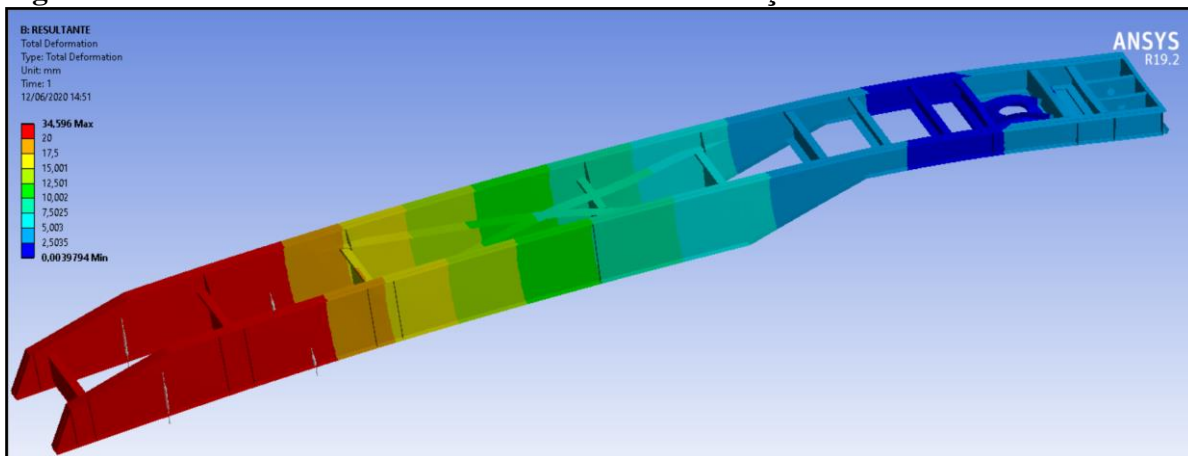


Fonte: dados da pesquisa (2020).

Nota-se que as cargas foram aplicadas nas áreas que representam o eixo do cilindro frontal (possuí função de elevar a caixa de carga) e o local onde é posicionado o sistema de articulação da caixa de carga.

A Figura 8 demonstra a deformação em uma escala aumentada, constata-se uma diferença se comparada com a deformação presente na seção anterior, além disso, percebe-se que ocorre uma deformação na parte frontal do chassi.

Figura 8 – Chassi deformado em escala aumentada – Seção 2

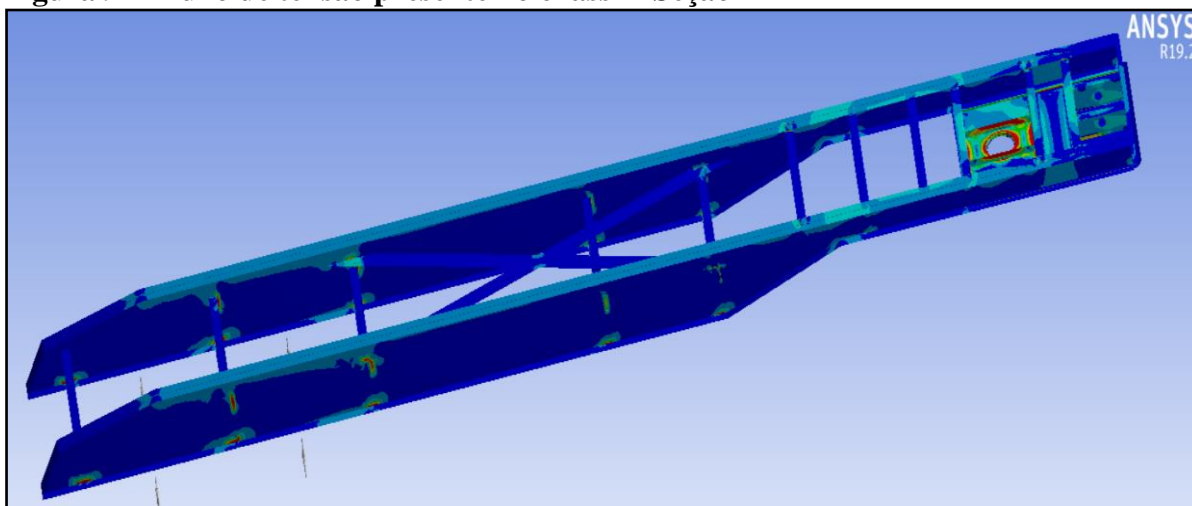


Fonte: dados da pesquisa (2020).

Além de mostrar essa deformação na parte frontal, a estrutura demonstra novamente uma deformação entre os locais da suspensão e da fixação, porém neste cenário ocorre uma flambagem na estrutura, comprimindo a parte inferior e tracionando a superior.

Como esperado, os fluxos de tensão mostraram um aumento nas partes superior e frontal da estrutura, conforme Figura 9.

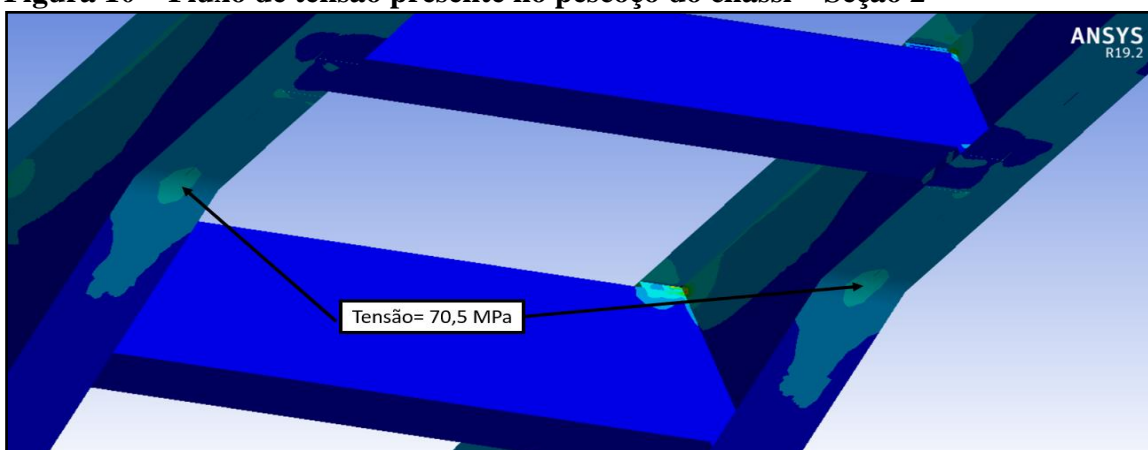
Figura 9 – Fluxo de tensão presente no chassi – Seção 2



Fonte: dados da pesquisa (2020).

Repara-se um fluxo de tensão elevado, se comparado à seção anterior, na parte onde ocorre uma transição geométrica no pescoço do chassi. Esse comportamento é mostrado na Figura 10.

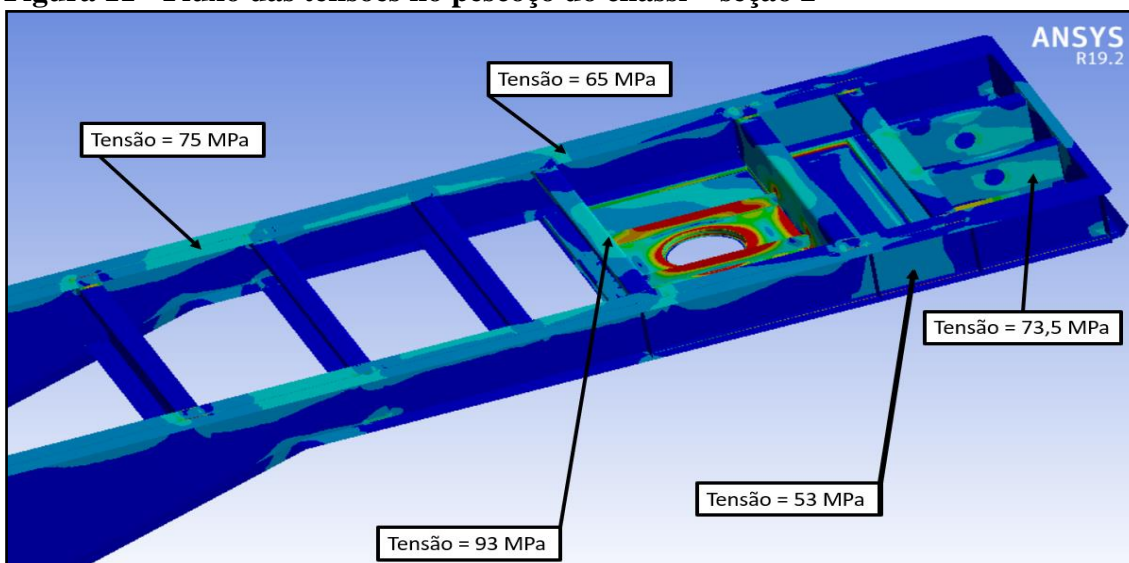
Figura 10 – Fluxo de tensão presente no pescoço do chassi – Seção 2



Fonte: dados da pesquisa (2020).

Esta tensão mais elevada se dá pelo fato de existir um aumento brusco na seção da alma, gerando um canto. As demais tensões a serem avaliadas nestas condições de contorno se mostram presentes na Figura 11.

Figura 11 - Fluxo das tensões no pescoço do chassi – seção 2



Fonte: dados da pesquisa (2020).

A partir da exposição dos dados do fluxo das tensões e da deformação nesta condição de contorno, o fator de segurança obtido é de 2,7. Pode se constatar a necessidade de algumas alterações na estrutura do chassi, visto que as tensões e a deformação ocorrida na parte frontal se mostraram elevadas.

4.3 CONDIÇÃO DE CONTORNO 3: NOVO FORMATO DO CHASSI

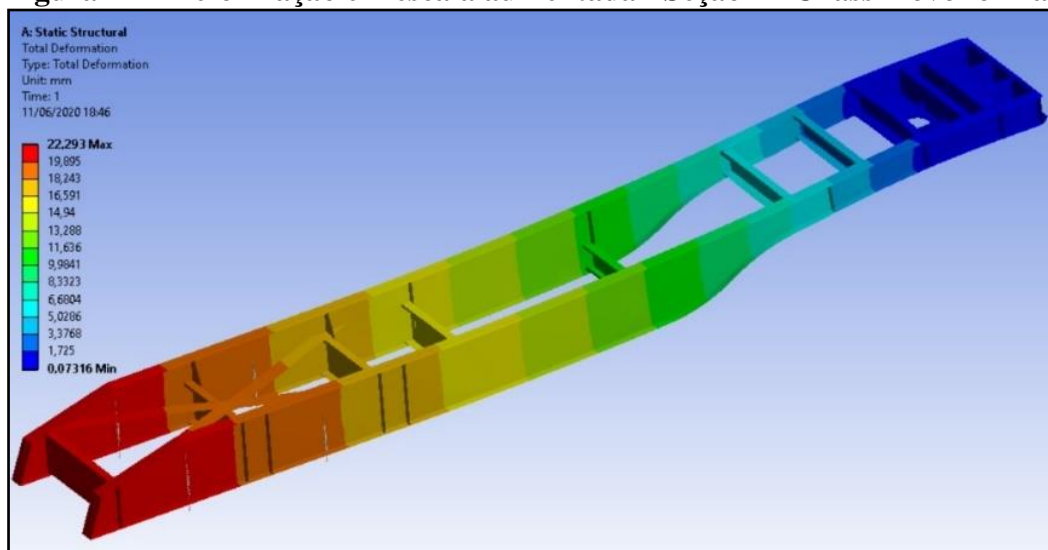
Com as informações necessárias obtidas, foram iniciados os processos de melhoria e redimensionamento da estrutura do chassi, executando alterações nas espessuras das cintas superiores e inferiores, diminuição da quantidade de travessas, novo posicionamento do reforço frontal do cilindro e do pino rei e uma suavização na geometria do pescoço do chassi, para melhor distribuição das tensões. O material utilizado continua sendo o aço carbono estrutural ASTM A-36.

As condições de contorno usados para a análise do novo modelo são os mesmos usados nos modelos anteriores, os parâmetros da geração da malha também possuem as mesmas características dos primeiros modelos.

Novamente a malha na região do pescoço do chassi foi refinada para uma melhor obtenção dos resultados das tensões. Com todos os dados necessários, as condições de contorno preenchidas e a malha gerada, foram obtidos os valores das tensões e deformações do novo formato do chassi.

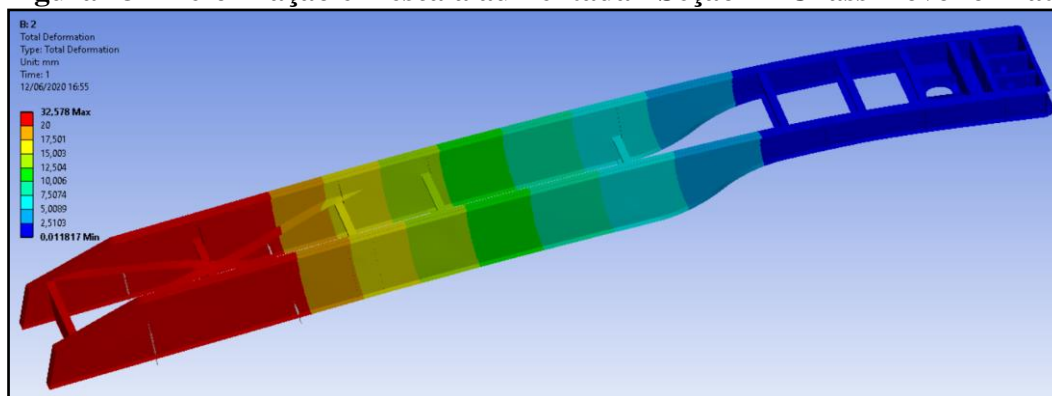
A deformação apresentada no novo formato do chassi é um pouco maior que a das seções anteriores conforme Figuras 12 e 13.

Figura 12 – Deformação em escala aumentada - Seção 1 - Chassi novo formato



Fonte: dados da pesquisa (2020).

Figura 13 - Deformação em escala aumentada - Seção 2 - Chassi novo formato



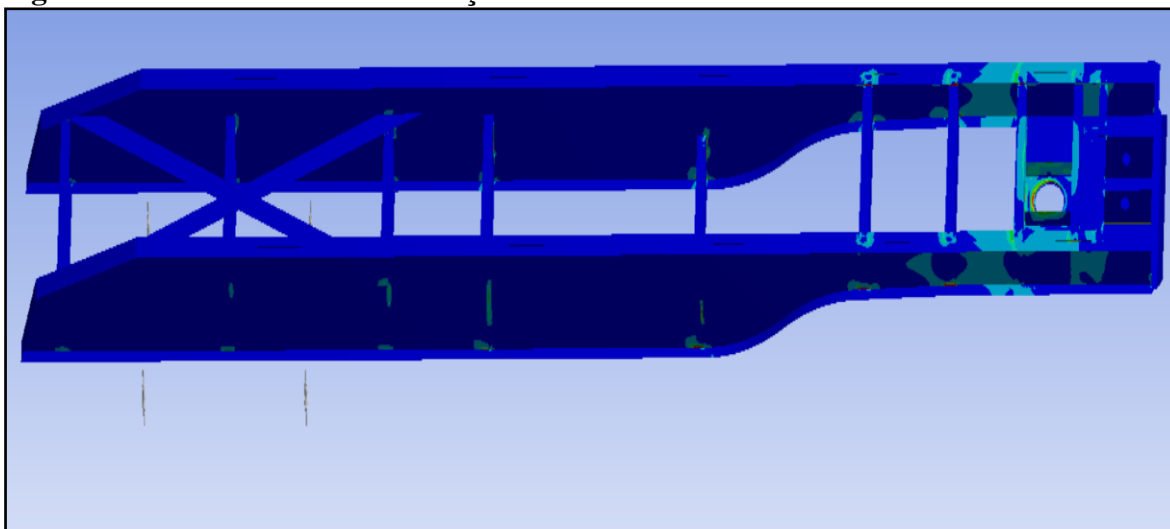
Fonte: dados da pesquisa (2020).

Nota-se na Figura 12 que essa deformação na parte traseira da estrutura é ligeiramente maior, isso se justifica pelo fato de as espessuras de algumas peças terem sido reduzidas. No pescoço a deformação é levemente menor, demonstrando que se demonstraram eficazes as melhorias executadas na estrutura do chassi.

Na Figura 13 estão presentes os resultados das deformações quando o chassi está sujeito a segunda condição de contorno, observa-se uma leve redução na deformação da parte traseira. Já na parte do pescoço a deformação é visivelmente menor, se comparado ao modelo anterior aplicado as mesmas condições.

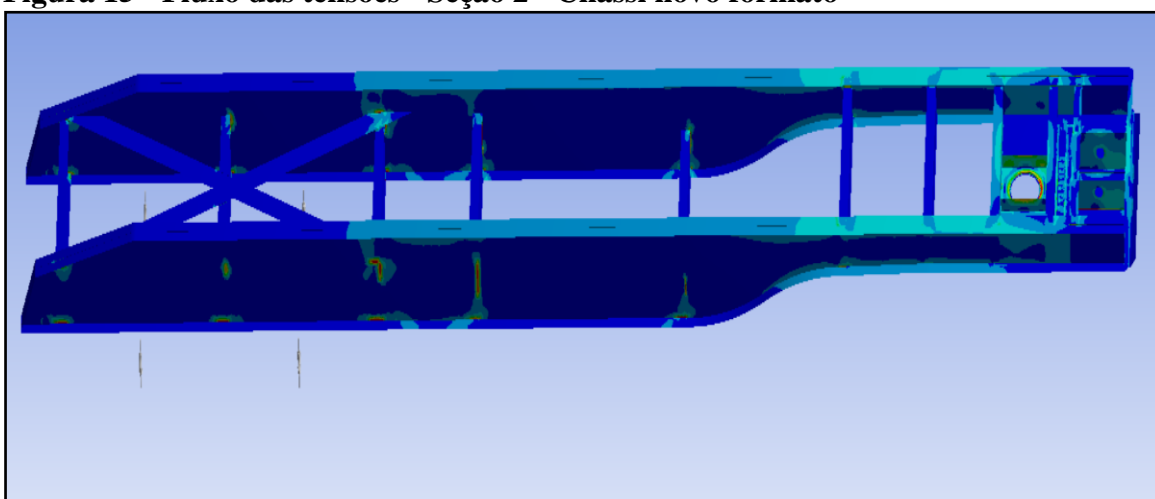
No novo formato do chassi, os fluxos das tensões acabam se tornando parecidos com os do formato anterior, como é mostrado nas Figura 14 e 15.

Figura 14 – Fluxo das tensões - Seção 1 - Chassi novo formato



Fonte: dados da pesquisa (2020).

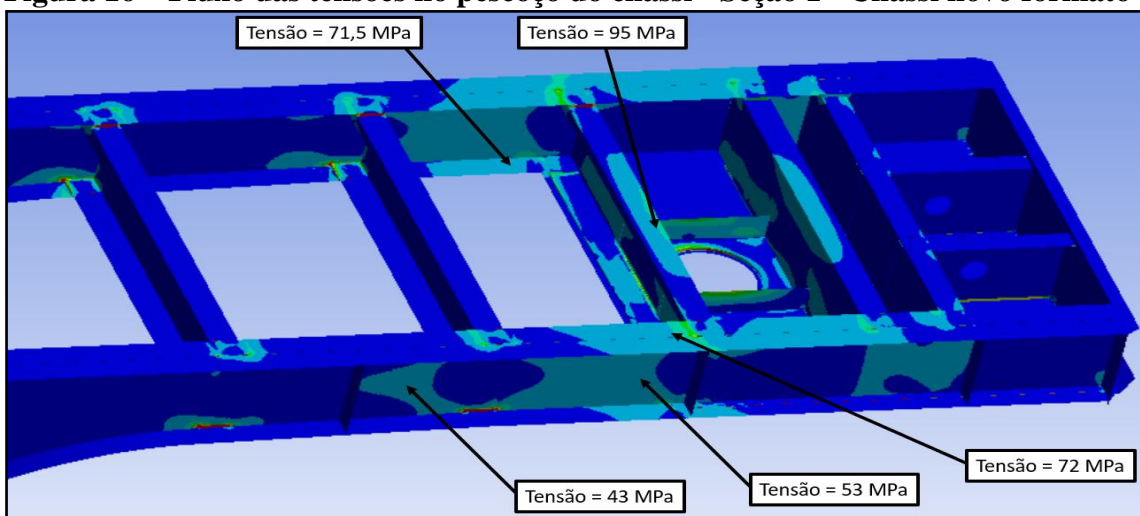
Figura 15 - Fluxo das tensões - Seção 2 - Chassi novo formato



Fonte: dados da pesquisa (2020).

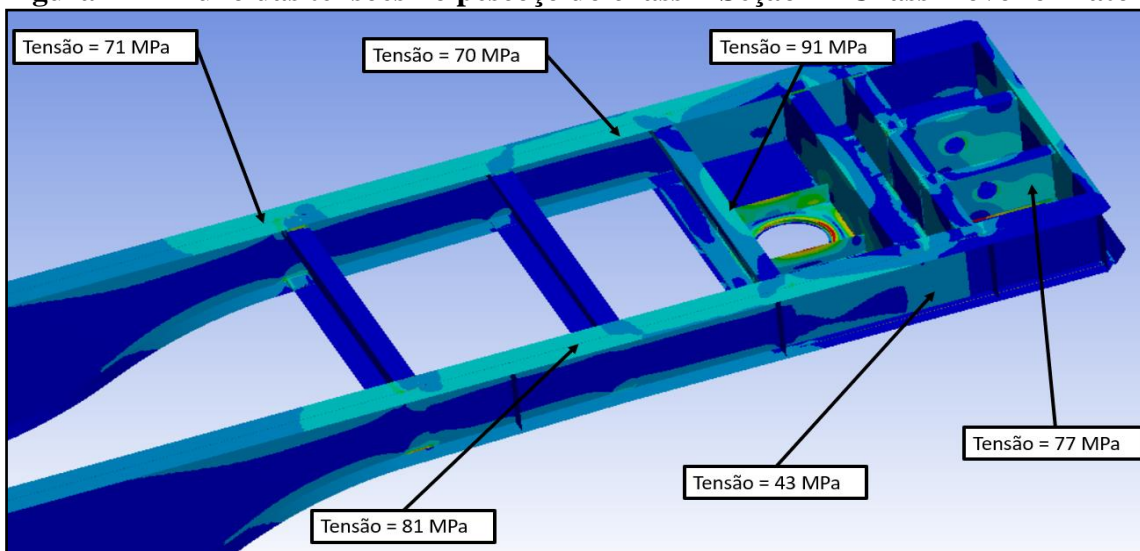
Os mesmos critérios foram adotados na preparação da estrutura do novo formato do chassi, assim ocasionando novamente as mesmas simetrias, que podem ser ignoradas pois o objetivo do estudo é analisar o comportamento global do chassi. Por consequente, as tensões que demandam maior cautela podem ser identificadas, conforme as Figuras 16 e 17.

Figura 16 – Fluxo das tensões no pescoço do chassi - Seção 1 - Chassi novo formato



Fonte: dados da pesquisa (2020).

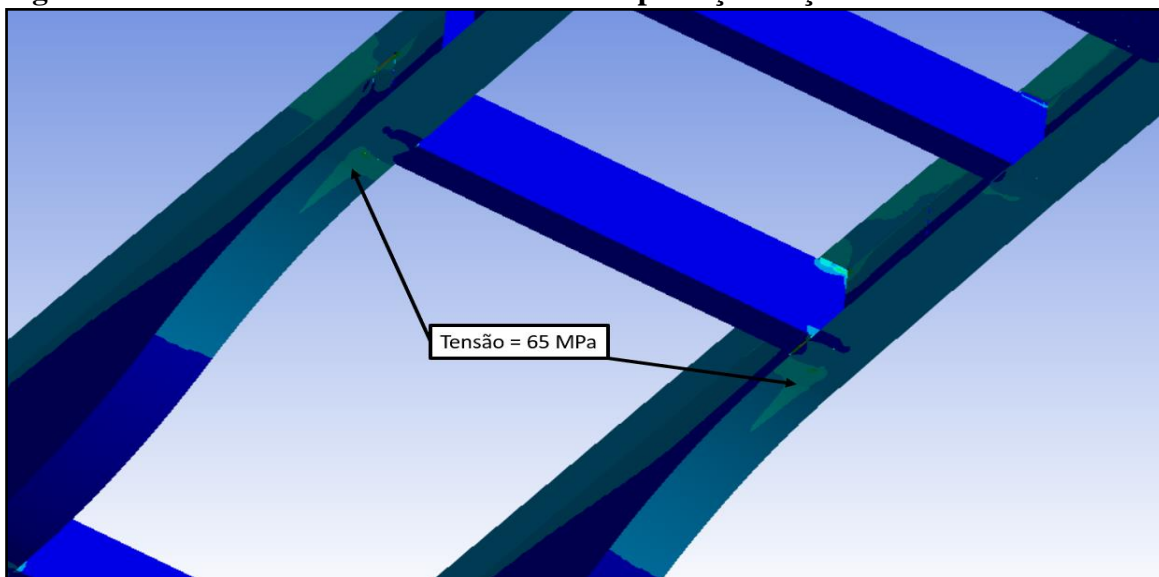
Figura 17 – Fluxo das tensões no pescoço do chassi - Seção 2 - Chassi novo formato



Fonte: dados da pesquisa (2020).

Para os pontos de tensão mais elevada no chassi mostrados nas figuras 16 e 17, foi calculado um fator de segurança de 2,7, longe dos 1,7 indicados para implementos rodoviários.

Os fluxos das tensões presentes na parte inferior do pescoço, quando o modelo é aplicado para a segunda condição de contorno podem ser identificadas na Figura 18.

Figura 18 – Fluxo das tensões na área inferior pescoço - Seção 2 - Chassi novo formato

Fonte: dados da pesquisa (2020).

Observa-se que além de o valor da tensão ser menor, o fluxo se apresenta mais disperso se comparado com a análise do primeiro modelo.

Tendo conhecimento das principais tensões atuantes em ambas as estruturas, deu-se início a uma comparação entre os dois modelos. A Tabela 1 demonstra as espessuras e tensões presentes nos dois modelos do chassi, para a primeira condição de contorno.

Tabela 1 – Diferença de tensões e espessuras dos chassis – Seção 1

Peça	Espessura V1	Espessura V2	Tensão V1	Tensão V2
Cinta superior	12,70 mm	9,50 mm	113 MPa	72 MPa
Cinta inferior	15,88 mm	12,70 mm	67 MPa	71,5 MPa
Travessa	8,00 mm	6,35 mm	79 MPa	95 MPa
Alma (perto do engaste)	8,00 mm	8,00 mm	75 MPa	53 MPa
Alma (pescoço)	8,00 mm	8,00 mm	55 MPa	43 MPa

Fonte: dados da pesquisa (2020).

Na Tabela 2, são apresentados os valores comparativos na segunda condição de contorno, demonstrando a eficiência obtida nas alterações propostas para o chassi.

Tabela 2 - Diferença de tensões e espessuras dos chassis - seção 2

PEÇA	Espessura V1	Espessura V2	Tensão V1	Tensão V2
Cinta superior (próximo ao engaste)	12,70 mm	9,50 mm	65 MPa	70 MPa
Cinta superior (próximo ao pescoço)	12,70 mm	9,50 mm	75 MPa	71 MPa
Cinta inferior (próximo ao pescoço)	15,88 mm	12,70 mm	70,5 MPa	65 MPa
Suporte cilindro frontal	8,00 mm	8,00 mm	73,5 MPa	77 MPa
Travessa	8,00 mm	6,35 mm	93 MPa	91 MPa
Alma (perto do engaste)	8,00 mm	8,00 mm	53 MPa	43 MPa

Fonte: dados da pesquisa (2020).

Como esperado os valores não tiveram grandes alterações, porém, houve uma redução de cerca de 185 kg na estrutura e também uma diminuição de 600 mm no comprimento total. Além dessas melhorias, pode-se destacar a diminuição no custo financeiro e no tempo de montagem.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo elaborado neste artigo teve como objetivo mostrar a necessidade de implementar os diferentes modos de análise estrutural em uma fábrica de implementos rodoviários, visto que o método de tentativa e falha, usado no chassi apresentado no estudo, se torna caro, demorado e na maioria das vezes ineficaz.

Os objetivos buscados para este trabalho foram atingidos, mostrando que a deformação apresentada no problema ocorreu pelo fato de o chassi possuir alguns problemas em sua estrutura, que poderiam ter sido evitados, caso uma análise estrutural tivesse sido realizada antes da manufatura do mesmo.

Com a finalização das primeiras análises, puderam ser apresentadas as melhorias onde se observou uma diferença satisfatória, se comparada ao modelo inicial do projeto. Visto que o implemento percorre grandes distâncias e o peso de sua estrutura interfere no consumo de combustível e no desgaste de todo o conjunto, assim mostrando a grande importância de atingir 185 kg de redução na estrutura.

Deixa-se aqui para trabalhos futuros a realização de uma análise aprimorada das singularidades criadas nas representações das soldas, uma análise dinâmica para demonstrar o comportamento do chassi em situações de frenagens e manobras laterais, uma análise estrutural para a redução no peso da caixa de carga e também uma análise aprimorada da parte do acoplamento do chassi, mais especificamente na mesa e no pino rei.

REFERÊNCIAS

ÁÇO, Centro Brasileiro da Construção. **Construção em aço: aços estruturais**. Disponível em: <<http://www.cbca-acobrasil.org.br/sit....e/construcao-em-aco-acos-estruturais.php>>. Acesso em: 13 out. 2019.

ALVES FILHO, Avelino. **Elementos Finitos – A base da tecnologia CAE**. 6. ed. São Paulo: Érica, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9762: Veículo rodoviário de carga – Terminologia**. Rio de Janeiro, 2012.

AZEVEDO, Álvaro F. M. **Método dos elementos finitos**. Faculdade de Engenharia de Porto. 1. ed. Portugal: 2003.

BRASIL. CNT. **Boletim estatístico - CNT - Fevereiro 2019**. 2019. Disponível em: <<https://cnt.org.br>>. Acesso em: 19 set. 2019.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2012.

COSTIN, Michael; PHIPPS, David. **Racing and Sports Car: Chassis Design**. 2. ed. Londres: William Clowes And Sons, Limited, 1961.

GMBH, Robert Bosch. **Manual de Tecnologia Automotiva**. 25. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 2014.

GOEDEL, Fabio; ALVES FILHO, Avelino; WALBER, Márcio. A Importância da Simulação Virtual para o Desenvolvimento de Produtos Industriais. **Conselho em Revista: CREA - RS**, Porto Alegre, v. 1, n. 108, p.39-39, maio 2015. Bimestral. Disponível em: <<http://www.resistenge.com.br/midia/artigo-sobre-elementos-finitos-na-revista-do-crea-rio-grande-do-sul-dos-professores-avelinonce-marcioresistenge-e-fabioresistenge/>>. Acesso em: 23 out. 2019.

GOLDENSTEIN, Marcelo; ALVES, Marcelo de Figueiredo; AZEVEDO, Rodrigo Luiz Sias de. **A indústria de implementos rodoviários e sua importância para o aumento da eficiência do transporte de cargas no Brasil**. 2006. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/9754/2/RB%2029%20O%20Transporte%20Rodovi%20a%20rio%20de%20Carga%20e%20o%20Papel%20do%20BNDES_P_BD.pdf>. Acesso em: 05 out. 2019.

MAZETTO, Vinicius. **Análise estrutural de um chassi de semirreboque pelo método de elementos finitos**. 2019. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Automotiva, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2019.

MELCONIAN, Marcos Vinícius. **Modelagem Numérica e Computacional com Similitude e Elementos Finitos**: Desenvolvimento de Equação Preditiva para o Cálculo da Força de Retenção em Freios de Estampagem. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2014.

NORTON, Roberto L. **Projeto de Máquinas**: Uma abordagem integrada. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

PADILHA, Claude Domingues. **Um novo marco para o transporte de carga no Brasil**. 2018. Disponível em: <<http://www.shreditorial.com.br/um-novo-marco-para-o-transporte-de-carga-no-brasil-por-claude-domingues-padilha/>>. Acesso em: 23 out. 2019.

SHIGLEY, Joseph. **Projeto de engenharia mecânica**. 7 ed. Porto Alegre. Ed. Bookman, 2005.

SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas Especiais**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 2010.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Composição Química dos Aços**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 2018. Disponível em: <<https://bv4.digitalpages.com.br/?term=A%25C3%25A7o%2520carbono&searchpage=1&filtro=todos&from=busca&page=4&ion=0#/legacy/176485>>. Acesso em: 13 out. 2019.