

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

DOUGLAS NOGUEIRA DE LIMA

ANÁLISE NUMÉRICA DE UMA ESTRUTURA DE CARROCERIA SOBRE CHASSI
FURGÃO DE UM CAMINHÃO

Joinville
2024

DOUGLAS NOGUEIRA DE LIMA

ANÁLISE NUMÉRICA DE UMA ESTRUTURA DE CARROCERIA SOBRE CHASSI
FURGÃO DE UM CAMINHÃO

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel em Engenharia
Automotiva do Centro Tecnológico de Joinville
da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Junichi Idehara

Joinville
2024

DOUGLAS NOGUEIRA DE LIMA

ANÁLISE NUMÉRICA DE UMA ESTRUTURA DE CARROCERIA SOBRE CHASSI
FURGÃO DE UM CAMINHÃO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 13 de Dezembro de 2024.

Banca Examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Junichi Idehara
Orientador(a)
Presidente

Prof. Dr. Antônio de Assis Brito Neto
Membro(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Vitor Takashi Endo
Membro(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar força e perseverança para completar esta etapa da minha vida.

À minha família, que foi meu porto seguro durante os momentos mais difíceis. agradeço especialmente os meus pais José e Clemir, minha noiva Maria Helena, minhas irmãs Deisi e Karina, pelo amor incondicional, apoio emocional e compreensão durante todo esse tempo.

A todos os meus amigos que sempre estiveram do meu lado, principalmente Ana, Ângelo, Eduardo, Matheus, Raphael, Thiago e Vinicius.

Gostaria de expressar minha gratidão ao meu orientador, Sérgio Junichi Idehara, pela orientação. Sua experiência e seus conselhos foram fundamentais para a realização deste projeto.

"O maior inimigo do conhecimento não é a ignorância, mas a ilusão do conhecimento."

(Stephen Hawking.)

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise numérica da estrutura de uma carroceria sobre chassi do tipo furgão, utilizando o software SolidWorks™. O estudo tem como objetivo avaliar o comportamento estrutural de um furgão em situações estática e de fadiga, com foco na influência de um reforço estrutural aplicado à coluna traseira. Utilizando Método dos Elementos Finitos (MEF) para determinar deformações, deslocamentos e tensões, considerando a estrutura sob carregamento de flexão e torção. Os resultados indicam que o reforço aplicado aumentou significativamente o coeficiente de segurança passando de 0,98 para 4,92 na condição de torção, garantindo maior integridade estrutural. Como recomendações, sugere-se a aplicação de análises mais detalhadas de fadiga em diferentes condições de operação e a exploração de materiais alternativos.

Palavras-chave: Simulação Estrutural. Solidworks. Sobre chassi. Furgão.

ABSTRACT

This study presents a numerical analysis of the structure of a body over chassi, using the SolidWorks™ software. The objective of the study is to evaluate the structural behavior of a van under static and fatigue conditions, focusing on the influence of a structural reinforcement applied to the rear column. The Finite Element Method (FEM) was employed to determine deformations, displacements, and stresses, considering the structure under bending and torsional loads. The results indicate that the applied reinforcement significantly increased the safety factor, from 0.98 to 4.92 under torsion conditions, ensuring greater structural integrity. As recommendations, it is suggested to apply more detailed fatigue analyses under different operating conditions and to explore alternative materials.

Keywords: Structural Simulation. SolidWorks. Over Chassi. Van.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Semirreboque	12
Figura 2 – Sobre chassi	13
Figura 3 – Quadro traseiro sem reforço	19
Figura 4 – Diagrama de corpo livre	20
Figura 5 – Fluxograma.	22
Figura 6 – Montagem Original sem Reforço	23
Figura 7 – Peças Sobre Chassi com Reforço	24
Figura 8 – Montagem Simplificada	25
Figura 9 – Fixação no Chassi	26
Figura 10 – Condição de Contorno para Simulação estática	27
Figura 11 – Carregamento estático	28
Figura 12 – Reforço Coluna Traseira	29
Figura 13 – Condições de Contorno Torção	30
Figura 14 – Diagrama de Corpo Livre para Torção	31
Figura 15 – Deslocamento no Eixo Y	32
Figura 16 – Convergência da Malha	33
Figura 17 – Detalhes da Malha	34
Figura 18 – Parâmetros Simulação Fadiga	35
Figura 19 – Gráfico S-N	35
Figura 20 – Deformação	36
Figura 21 – Deslocamento	37
Figura 22 – Tensão	37
Figura 23 – Deformação sem Reforço	38
Figura 24 – Deslocamento sem Reforço	38
Figura 25 – Tensão sem Reforço	39
Figura 26 – Deformação com Reforço	40
Figura 27 – Deslocamento com Reforço	40
Figura 28 – Tensão com Reforço	41
Figura 29 – Deformação Torção com Reforço	41
Figura 30 – Deslocamento Torção com Reforço	42
Figura 31 – Tensão com Reforço	42
Figura 32 – Estrutura Montada com o Reforço	44
Figura 33 – Fadiga Estrutura com Reforço	45
Figura 34 – Fadiga: Região com Maior Tendência a Falha Sob Torção	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Peças e Espessuras	23
Tabela 2 – Propriedades do Aço A36 segundo a norma ASTM International (2019)	24
Tabela 3 – Fixação Furgão no Chassi	27
Tabela 4 – Comparativo entre estrutura com reforço e sem reforço	43

LISTA DE SÍMBOLOS

τ	Tensão cisalhante
τ_{max}	Tensão cisalhante máxima
T	Momento torsor
c	Raio externo da seção transversal
J	Momento polar de inércia
V	Força cortante
Q	Primeiro momento de área da seção transversal
I	Momento de inércia
t	Espessura da seção
Σ	Somatório
M_A	Momento em relação ao ponto A
k_t	Rigidez torcional
F	Força
b	Braço do Momento
$\Delta\theta$	Angulo de torção
$\sigma_{\text{Escoamento}}$	Tensão de Escoamento
$\sigma_{\text{Equivalente máx de Von Misses}}$	Tensão Equivalente de Von Misses

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivo	11
1.1.1	Objetivo Geral	11
1.1.2	Objetivos Específicos	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1	Implementos rodoviários	12
2.2	Torção em Estruturas metálicas	14
2.3	Método dos Elementos Finitos	15
2.4	softwares utilizados no estudo de torção	17
2.5	Solidworks	17
3	METODOLOGIA	19
3.1	Projeto de Sobre Chassi Furgão	21
3.2	Carregamento em Flexão	25
3.3	Carregamento Torcional	29
3.4	Convergência da Malha de Elementos Finitos	33
3.5	Fadiga	34
4	ANÁLISE DE DADOS	36
4.1	Caso I	36
4.2	Caso II	39
4.3	Comparativo entre estrutura com reforço e sem reforço	43
4.4	Simulação Fadiga Estrutura com reforço	44
5	CONCLUSÕES	47
	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

Os implementos rodoviários surgiram no início do século XX como uma solução para aumentar a eficiência no transporte de cargas, acompanhando a evolução dos caminhões e da pavimentação das rodovias. No início, o transporte de cargas era limitado, pois os veículos não eram otimizados para carregar cargas pesadas ou até mesmo para realizar longas viagens, com o avanço tecnológico e com a necessidade de transportar cargas com volume maior de maneira mais eficiente, surgiram os semirreboques contribuindo no crescimento econômico e otimizando o fluxo de mercadorias (WRIGHT; DIXON, 2017).

O sobre chassi furgão surgiu como uma solução para o transporte de cargas, os primeiros furgões montados surgiram na Europa e nos Estados Unidos por volta de 1920, marcando uma revolução no design e na fabricação de veículos comerciais. A evolução desses veículos foi impulsionada pela crescente demanda de transportes em meios rurais e urbanos, com isso as fabricantes de veículos comerciais adaptaram chassis básico para vários tipos de carroceria, incluindo furgões, causando um aumento significativo na funcionalidade e na flexibilidade desses veículos (JUVINALL; MARSHEK, 2011).

Problemas estruturais surgem principalmente pela complexa interação da carga com a geometria do sobre chassi, a distribuição inadequada da carga leva ao desbalanceamento de forças, isso pode causar deformações localizadas e falhas estruturais, além de aumentar o desgaste prematuro da suspensão e dos pneus. Problemas de solda podem comprometer a integridade da estrutura, a qualidade da solda é crucial para garantir que os componentes suportem as cargas dinâmicas adequadamente, soldas mal feitas podem gerar pontos de concentração de tensão, levando ao surgimento de trincas por fadiga (BENNETT, 2015).

Fratura por propagação de trincas é outro problema estrutural relevante, quando trincas por fadiga se formam, elas tendem a crescer com o passar do tempo, principalmente em materiais submetidos a altos níveis de tensão cíclica. Nos sobre chassi e também nos semirreboques essas fraturas são frequentemente observadas em vigas e soldas, e principalmente em algumas junções onde esta sujeito a vibrações e a impactos (KLINGER; MARTIN, 2014).

A simulação estrutural permite o análise do comportamento das estruturas sob várias condições de carregamentos, por meios de softwares é possível prever o comportamento de estruturas de forma estática e dinâmica, identificando pontos críticos e potenciais falhas antes mesmo de sua construção. A otimização de projeto visa encontrar a melhor configuração de projeto que minimize o uso de materiais,

maximize a eficiência e o desempenho da estrutura. É essencial encontrar o equilíbrio entre custo, segurança e sustentabilidade (HIBBELER, 2017).

O Solidworks™ é um software Computer Aided Design (CAD) amplamente utilizado, com ferramentas poderosas para o design, simulação e documentação de produtos. Essa é uma ferramenta importante, devido sua capacidade de criar modelos 3D precisos e detalhados, assim facilitando o desenvolvimento de projetos complexos. Entre as principais funções do Solidworks™ pode-se destacar a parte de simulação, onde pode realizar análises de stress, fluxo de fluídos e dinâmica de movimento, podendo prever o desempenho de estruturas (PLANCHARD, 2018).

1.1 OBJETIVO

Para obter dados de cálculo estrutural do sobre chassi propõe-se os seguintes objetivos a seguir:

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é simular numericamente a estrutura de uma carroceria sobre chassi furgão de um caminhão Volkswagen Constellation 24.330 utilizando o software Solidworks™.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Modelagem no software Solidworks™ de uma carroceria sobre chassi de um caminhão;
- Avaliar o comportamento da estrutura com e sem o reforço localizado na coluna traseira do sobre chassi;
- Verificação do comportamento estático e de fadiga da estrutura.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 IMPLEMENTOS RODOVIÁRIOS

Os implementos rodoviários são dispositivos acoplados aos veículos de transportes rodoviários, foram desenvolvidos para transportar vários tipos de cargas, esses equipamentos são essenciais para a logística no transporte terrestre (CREDE; DEUL, 1991).

As tecnologias empregadas evoluíram significativamente, contendo itens como suspensão pneumática, Antilock Braking System (ABS), controle eletrônico de estabilidade (ESC) e monitoramento de carga. Esses avanços aumentam a segurança no transporte, e contribuem para a redução de custos operacionais através de um melhor gerenciamento de pneus e combustível (CREDE; DEUL, 1991).

Segundo Goldenstein, Alves e Azevedo (2006), os implementos são os componentes do caminhão que possuem a função específica do transporte de cargas. A configuração do equipamento depende da natureza da carga que será transportada e do seu objetivo (flexibilidade, custo, distância de transporte, interação com outros modais). Tais implementos classificam-se como carrocerias sobre chassi e rebocados.

Os modelos rebocados como na figura 1 têm maior capacidade de carga e são utilizados geralmente em longos percursos, em função do seu maior comprimento, não podem entrar em perímetros urbanos (HEISLER, 1995).

Figura 1 – Semirreboque



Fonte: O Autor (2024).

As carrocerias sobre chassi são normalmente compostas por veículos de carga de menor porte, como pode ser visualizado na figura 2, utilizados para distribuir as cargas até os consumidores finais. Trata-se de um modelo montado diretamente sobre o chassi do caminhão e não têm eixos ou chassi próprios (HEISLER, 1995).

Figura 2 – Sobre chassi



Fonte: O Autor (2024).

Os sobre chassi do tipo furgão são amplamente utilizado em ambientes urbanos e interurbanos, sua construção consiste em uma estrutura fechada montada sobre o chassi do veículo, proporcionando proteção contra chuvas, granizos e furtos. Segundo Crede e Deul (1991), os furgões são amplamente utilizados no transporte de produtos eletrônicos, móveis, alimentos embalados e outras mercadorias que requerem proteção durante o transporte.

Os principais tipos de fabricação de furgões são: os furgões isotérmicos, refrigerados e baús secos. Os furgões isotérmicos e refrigerados são amplamente utilizados no transporte de produtos perecíveis (alimentos e medicamentos), que necessitam de controle de temperatura. Os baús secos são utilizados para mercadorias que não necessitam de controle térmico, tornando-se uma solução versátil para uma variedade de produtos (CREDE; DEUL, 1991).

Embora amplamente utilizados e vantajosos, os sobre chassi furgão também apresentam diversos problemas estruturais que podem impactar sua eficiência e durabilidade. Segundo Crede e Deul (1991), um dos principais desafios é a distribuição

de carga. Quando a carga não é distribuída uniformemente, pode causar tensão excessiva em determinadas áreas da estrutura, levando a deformações ou até mesmo a falhas estruturais. Esta distribuição inadequada pode resultar em uma diminuição da vida útil do furgão e aumentar os custos de manutenção.

Outro problema que pode aparecer é a corrosão, como a estrutura é fabricada em aço, pode sofrer com a exposição a diferentes elementos ambientais, como água, sal e até produtos químicos, tudo isso pode acelerar o processo de corrosão e levar a falhas catastróficas. Vibrações e impactos durante o transporte podem causar fadiga nos materiais, isso pode ser acelerado se o veículo trafegar por vias de baixa qualidade, favorecendo o surgimento e a propagação de trincas (CREDE; DEUL, 1991).

As junções entre as partes do furgão também representam um ponto crítico. Áreas onde diferentes materiais se encontram, como soldas e rebites, são propícios a falhas devido a diferenças nas propriedades dos materiais e aos esforços concentrados, podendo comprometer a estanqueidade e a integridade estrutural. Para evitar todos esses problemas, é de extrema importância a realização de manutenção regular, como indicado por (CREDE; DEUL, 1991).

2.2 TORÇÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS

A análise da torção é fundamental para dimensionar e prever o comportamento de elementos estruturais que sofrem momentos torcionais. Quando um momento torsor é aplicado a um componente ele tende a causar uma rotação em torno do seu eixo longitudinal, gerando tensões e deformações específicas (BEER et al., 2014).

Segundo Beer et al. (2014) a torção é um tipo de sollicitação mecânica em que um momento torsor é aplicado a um elemento estrutural, causando a rotação de sua seção transversal em torno do eixo longitudinal. Quando uma estrutura metálica é sujeita a um momento torsor T , as tensões cisalhantes τ desenvolvem-se ao longo da seção transversal. A distribuição dessas tensões não é uniforme e depende da geometria da seção. Para eixos sólidos e vazados, a tensão cisalhante máxima ocorre na superfície externa e é dada por:

$$\tau_{max} = \frac{T \cdot c}{J} \quad (1)$$

Onde:

T é o momento torsor,

c é o raio externo da seção transversal,

J é o momento polar de inércia da seção transversal.

Para seções não circulares, como perfis em H ou em I, a análise fica mais complexa devido a distribuição não uniforme das tensões cisalhantes. Para seções de formas complexas em um modelo de viga, podemos reescrever a equação e pode-se calcular a tensão de cisalhamento pela seguinte equação:

$$\tau = \frac{V \cdot Q}{I \cdot t} \quad (2)$$

Onde:

V é a força cisalhante aplicada na seção,

Q é o primeiro momento de inércia de área da seção transversal acima (ou abaixo) do ponto considerado em relação ao eixo neutro,

I é o momento de inércia da seção transversal ao eixo neutro,

t é a largura da seção no ponto considerado (espessura perpendicular à direção da força cortante).

A tensão é um dos principais critérios para determinar a resistência do material, cada material possui seu limite de resistência, como limite de escoamento e limite de ruptura. A tensão permite avaliar se o material pode ou não suportar as cargas aplicadas sem falhar, a tensão ajuda a prever deformações e falhas que a estrutura pode sofrer (BEER et al., 2014).

A análise de tensão permite compreender como as forças aplicadas a uma estrutura são distribuídas internamente, essas forças variam dependendo do tipo de carregamento, como torsão, tração ou compressão. A tensão é utilizada para garantir que a estrutura seja projetada de maneira segura, ficando dentro dos limites aceitáveis, é necessário conhecer as tensões para poder determinar um fator de segurança adequado, evitando falhas na estrutura sob condições de carregamentos reais (BEER et al., 2014).

2.3 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

As aplicações de métodos analíticos para resolução de problemas estruturais são possíveis quando a geometria, carregamento e as condições de contorno são simples e bem definidas, retornando valores exatos de deslocamentos, tensões e deformações através de uma equação matemática (FILHO, 2018).

Na maioria das aplicações práticas há pouca relação com o cotidiano do engenheiro de cálculo estrutural, que muitas vezes se depara com problemas complexos, dificultando a solução analítica. Nesse sentido a aplicação do Método dos Elementos Finitos (MEF) é bastante relevante para esse tipo de análise em questão (FILHO, 2018).

O MEF consiste em um modelo aproximado de cálculos de sistemas contínuos, subdividindo uma estrutura contínua em um número finito de elementos, os mesmos são conectados por pontos discretos, denominado como nós, obtendo assim uma solução do problema através do comportamento de cada elemento (FILHO, 2018; BATHE, 1996).

Inicialmente o MEF foi associado a aplicações de análise linear de estruturas, vibrações, análises não lineares envolvendo grandes deflexões e deformações. Após a comprovação do método o mesmo foi migrado para outras áreas da física, como transferência de calor, escoamento de fluidos, eletromagnetismo, hidrodinâmica entre outros (FILHO, 2018; BATHE, 1996).

De acordo com (BATHE, 1996), o MEF é aplicado na resolução de problemas físicos na análise e projeto de engenharia. O problema físico normalmente envolve uma estrutura real ou componente estrutural sujeito a um certo carregamento.

A idealização do problema físico para um modelo matemático requer suposições que levam a equações diferenciais que governam o modelo matemático. A técnica de solução é um procedimento numérico, neste sentido faz-se necessário avaliar a precisão da solução (BATHE, 1996).

Caso os critérios de precisão não forem atendidos, a solução numérica deve ser repetida com parâmetros de resolução refinadas até que uma precisão suficiente seja refeita (BATHE, 1996).

Conseguir identificar os pontos críticos onde ocorrem as maiores concentrações de tensões é de extrema importância para evitar falhas estruturais. Segundo Silva, Costa e Freitas (2018) as junções entre o chassi e a carroceria do furgão são áreas particularmente susceptíveis a concentrações de tensões. A utilização de reforços locais, como adicionar elementos de rigidez adicionais ou aplicação de soldas reforçadas, é uma proposta eficaz para esses pontos críticos (SILVA; COSTA; FREITAS, 2018).

Análise de torção em estruturas de furgão é importante para garantir a integridade estrutural, segurança e eficiência de veículos comerciais. Segundo Huang, Li e Wang (2020), a implementação de modelos 3D detalhados permite prever com maior precisão a distribuição de tensões e deformações ao longo da estrutura do furgão, resultando em projetos mais otimizados e leves sem comprometer a segurança estrutural. O avanço das técnicas de simulação computacional, especificamente através do MEF, permite uma análise mais precisa das tensões em estruturas de furgões (HUANG; LI; WANG, 2020).

Outro ponto a se destacar é o uso de materiais compósitos e ligas metálicas avançadas. A substituição de partes da estrutura de aço por materiais compósitos de fibra de carbono pode reduzir o peso do furgão em até 30%, melhorando a eficiência energética, sem comprometer a rigidez torsional necessária para manter a integridade

da estrutura (ZHANG; LU; CHEN, 2019).

2.4 SOFTWARES UTILIZADOS NO ESTUDO DE TORÇÃO

Os softwares e tecnologias utilizados nos estudos de torção são essenciais para otimizar a estrutura de um furgão. Métodos como o MEF, a análise modal e o auxílio de softwares como ANSYS™, Abaqus™ e Solidworks™, são combinações para simular e estudar o comportamento de uma estrutura para diferentes tipos de carregamentos e aplicações. Assim, é possível fazer mudanças na estrutura obtendo resultados rápidos, auxiliando na otimização de projetos.

O ANSYS™ é um software amplamente utilizado em simulações de torção, é uma plataforma robusta para análises estruturais complexas utilizando MEF. A ferramenta permite simulação uma vasta gama de carregamentos e possibilita a análise de deformações e tensões com alta precisão (SILVA; RODRIGUES, 2018).

Abaqus™ é outro software muito utilizado para simulações de torção, é conhecido por ter uma avançada capacidade de modelagem e ser flexível em trabalhar com diferentes tipos de materiais e condições de contorno. De acordo com Costa e Almeida (2017), o Abaqus é particularmente eficaz em simulações não lineares e em análises que envolvem grandes deformações.

O Solidworks™ Simulation é integrado ao software CAD, que permite fazer análises de torção em uma interface amigável, muito utilizado em projetos iniciais e para validar conceitos de design. Segundo Oliveira, Souza e Nascimento (2016), apesar de ser menos avançado que o ANSYS™ ou Abaqus™, o SolidWorks™ Simulation é útil para análises preliminares devido à sua facilidade de uso e integração direta com o design CAD.

2.5 SOLIDWORKS

O solidworks™ é um software de modelagem 3D amplamente utilizado em diversas indústrias, como automotiva, aeroespacial, eletrônica e manufatura. O mesmo dispõe de uma variedade de ferramentas que permite a criação de modelos precisos e detalhados de peças e montagens, suas aplicações vão desde a concepção de novos produtos até a otimização de processos de fabricação e a criação de protótipos virtuais (PLANCHARD, 2018).

Dentre as principais vantagens estão sua interface simples e intuitiva, o que permite que até usuários iniciantes consigam criar modelos, sua facilidade em criar desenhos 2D a partir do modelo 3D é outra vantagem. De acordo com Planchard (2018) o SolidWorks™ possui a capacidade de realizar simulações e análises estruturais, térmicas e de fluxo de fluidos, o que permite uma verificação completa do projeto antes da fabricação.

As principais ferramentas disponíveis no Solidworks™ de acordo com Planchard (2018) são:

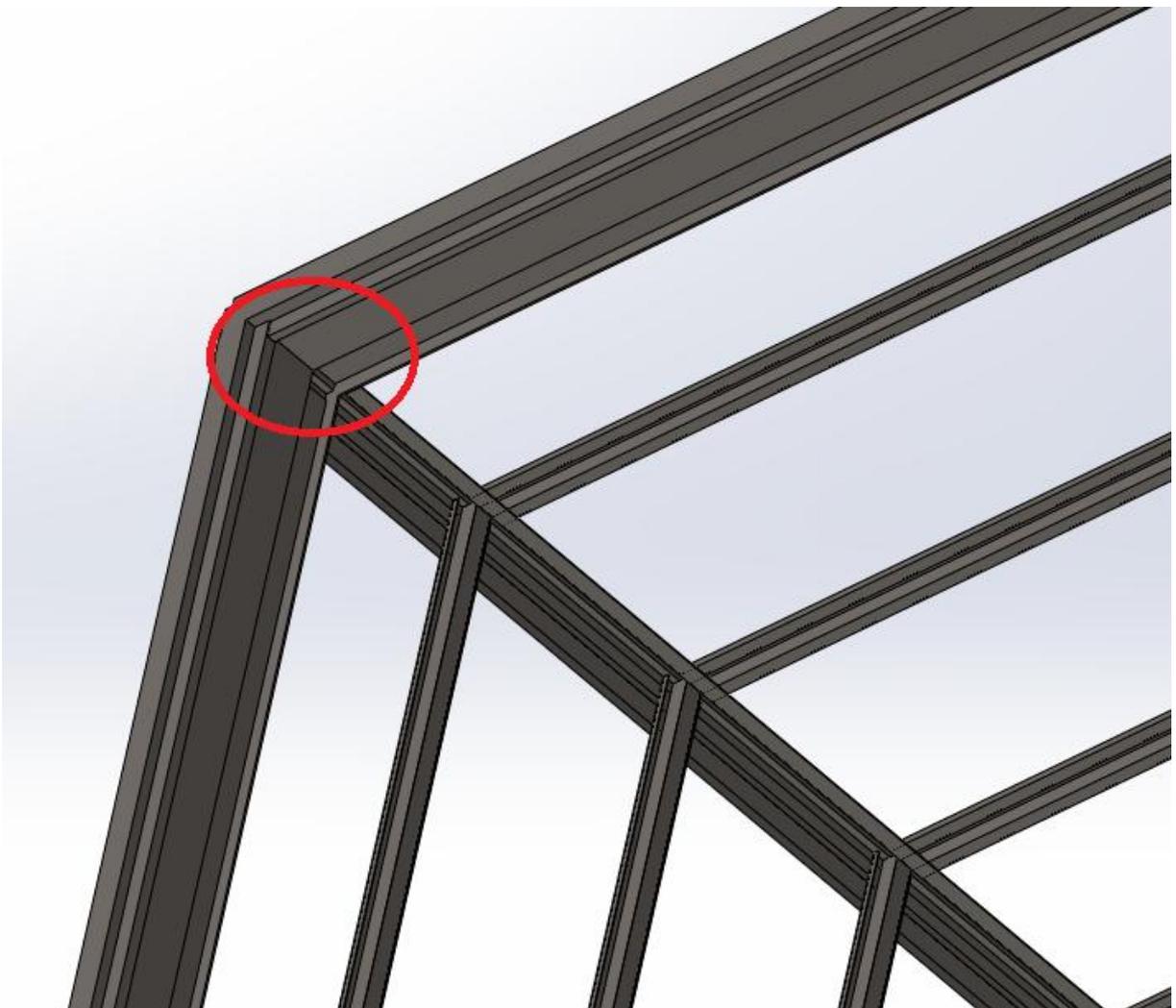
- Modelagem Paramétrica, ela permite que seus usuários criem modelos baseados em parâmetros, que podem ser facilmente alterados, deixando as modificações automáticas.
- Ferramentas de simulações que permitem a realização de análises de elementos finitos, simulação de dinâmica de fluídos computacional (CFD) e análise de movimentos.
- Sketching e Modelagem 3D, o Sketching permite a criação de esboço 2D, o qual serve como base para utilização de ferramentas como extrusão, revolução, varredura e loft, para transformar em modelos 3D.
- Assemblies, está função permite a criação de montagens a partir de múltiplas peças, proporcionando uma ideia de como os componentes interagem.
- Drawing, a ferramenta utilizada para detalhar os desenhos 2D a partir dos modelos 3D, permite também a geração automática de vistas ortográficas, seções, detalhes e anotações, garantindo que todas as especificações necessárias para a fabricação estejam presentes.

Além dos itens citados o Solidworks™ tem a facilidade de criar modelos a partir de escaneamento 3D de peças, isso transforma está em uma ferramenta indispensável na engenharia moderna. Conforme Planchard (2018), suas funcionalidades abrangentes e a capacidade de integrar-se com outras ferramentas de engenharia facilita o desenvolvimento de projetos complexos em diversas indústrias.

3 METODOLOGIA

Nas empresas de implementos rodoviários, sabe-se que existe um problema de trinca na junção entre a coluna traseira e o fechamento traseiro superior como demonstra a Figura 3, este problema afeta os projetos de sobre chassi com estrutura mais reforçada até os semirreboques furgões. Os projetos de sobre chassi e semirreboque furgão tem a estrutura similar, exceto pela parte inferior que é diferente.

Figura 3 – Quadro traseiro sem reforço



Fonte: O Autor (2024).

Os sobre chassi com estrutura mais reforçadas englobam os produtos com largura igual ou superior a 2400mm, ou seja, afeta uma grande quantidade de produtos, os sobre chassis com largura superior 2400mm tinha uma grande variação de altura e comprimento, dependendo muito do que o cliente transportava (carga volumosa ou pesada), mas a variação de comprimento ia desde 6500mm até a 11700mm

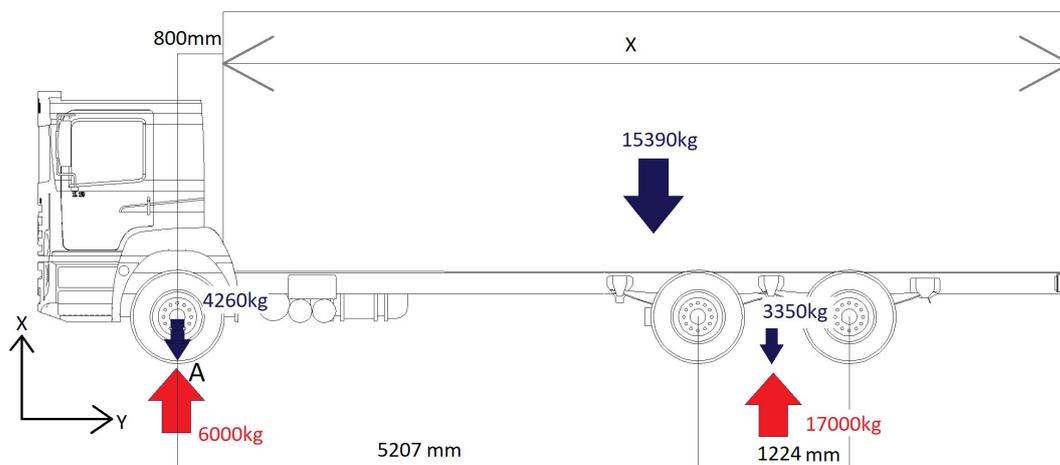
(dependendo do modelo do caminhão), pois o furgão já instalado no caminhão não pode ultrapassar 14000mm de comprimento total, e também com limite de Peso Bruto Total (PBT) de 23000kg ((CONTRAN), 2021).

Semirreboques tem a largura fixa em 2600mm mas o comprimento pode variar de acordo com o tipo de implemento (semirreboque, bitrem, bitrenção ou rodotrem) de acordo com as normas (CONTRAN) (2021), o comprimento pode chegar a 15400mm em um semirreboque respeitando as normas para não exceder 18600mm de comprimento total (caminhão e reboque).

Para dar início ao estudo do reforço entre a coluna traseira e o fechamento traseiro superior, foi realizado um projeto para um caminhão Volkswagen (VW) modelo constellation 24.330 com tração 6x2, entre eixo (EE) de 5207mm Volkswagen Caminhões e Ônibus (2020), peso bruto total (PBT) de 23000kg que segundo (CONTRAN) (2021) um eixo direcional pode suportar 6000kg e dois eixos em tandem podem suportar 17000kg.

Com base nesses dados é possível calcular o comprimento ideal do implemento, com o método utilizado na empresa e considerando uma distribuição de carga uniforme e a carga máxima para não haver excesso de peso em nenhum eixo, isso sem fazer alongamento de EE, caso exista alongamento de EE seria necessário outra análise, focada no tamanho do implemento, nesse estudo foi fixado o EE e variado o comprimento do furgão, fazendo um diagrama de corpo livre (DCL), como pode ser visualizado na Figura 4.

Figura 4 – Diagrama de corpo livre



Fonte: O Autor (2024).

Realizando um somatório de forças em X igual a zero, é possível calcular o quanto o caminhão consegue carregar sem exceder os limites previsto no (CONTRAN)

(2021), com isso é encontrado o valor de 15390kg, esse peso representa o furgão e a carga máxima que o veículo pode levar. Definido a carga máxima pode-se calcular o tamanho ideal do furgão, considerando uma distribuição uniforme de carga.

A soma dos momentos em relação ao ponto A é dada pela seguinte equação:

$$\sum M_A = -15390 \cdot \left(\frac{x}{2} + 0,8\right) - 3350 \cdot 5,819 + 17000 \cdot 5,819 = 0$$

Resolvendo a equação para x , obtemos:

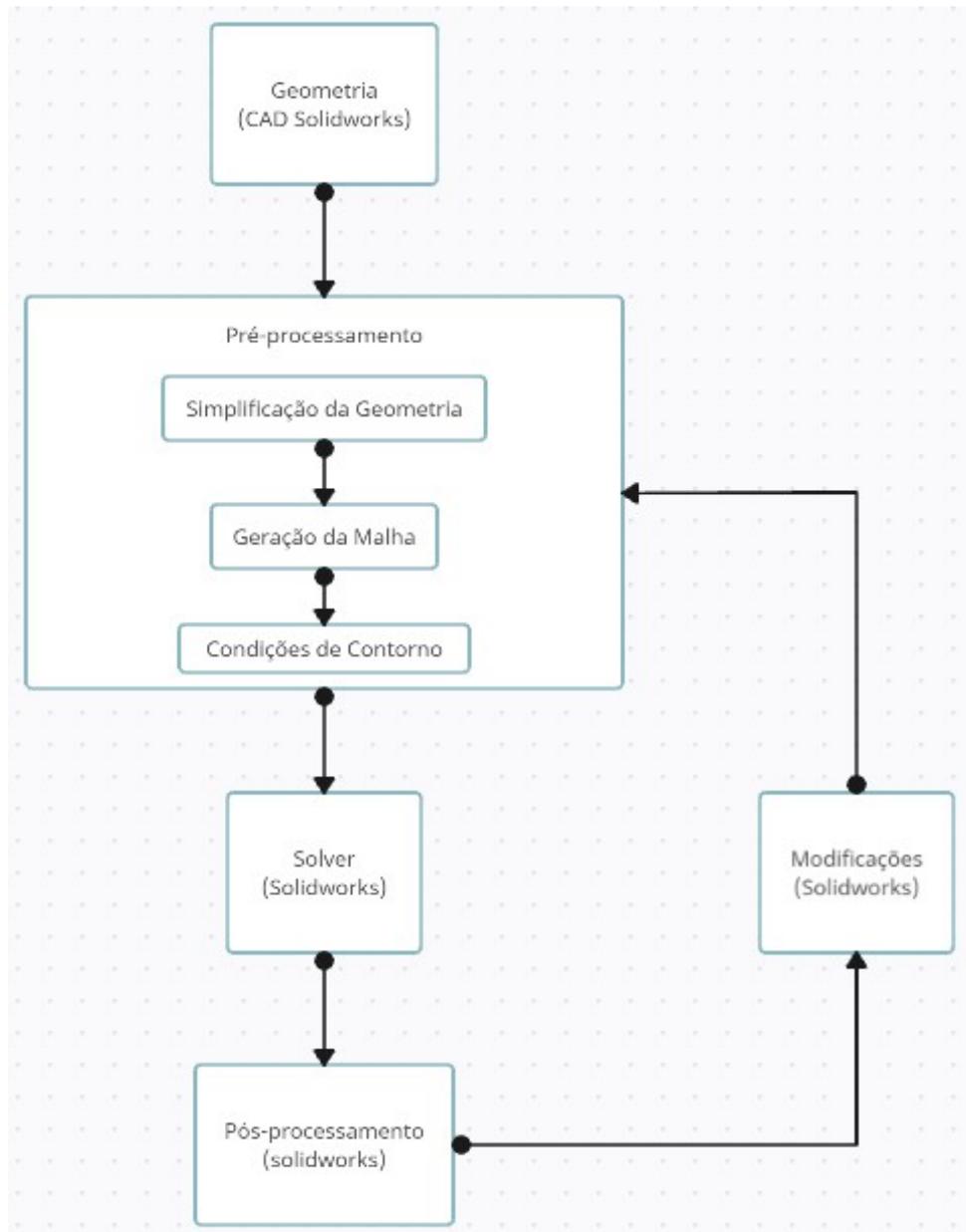
$$x = 8,722m$$

Como na empresa é padronizado o comprimento do furgão de 50mm em 50mm, então, o furgão ficou com 8700mm de comprimento, a largura máxima prevista na resolução é de 2600mm, com relação a altura o caminhão não pode ter mais que 4400mm de altura, do chão até o ponto mais alto do furgão, foi definido que a altura seria de 2850mm de altura interna do furgão (do assoalho até a parte interna da estrutura do teto), essa altura é mais comum, pois respeita a altura exigida e tem uma margem de segurança ((CONTRAN), 2021).

3.1 PROJETO DE SOBRE CHASSI FURGÃO

Com base nas dimensões calculadas e explicadas anteriormente será realizado um projeto de um sobre chassi furgão para um caminhão VW Costellation 24.330, com isso e com as principais etapas envolvidas no processo de otimização de projeto Noorbhasha (2010). Define-se a estrutura do trabalho como pode-se visualizar na Figura 5.

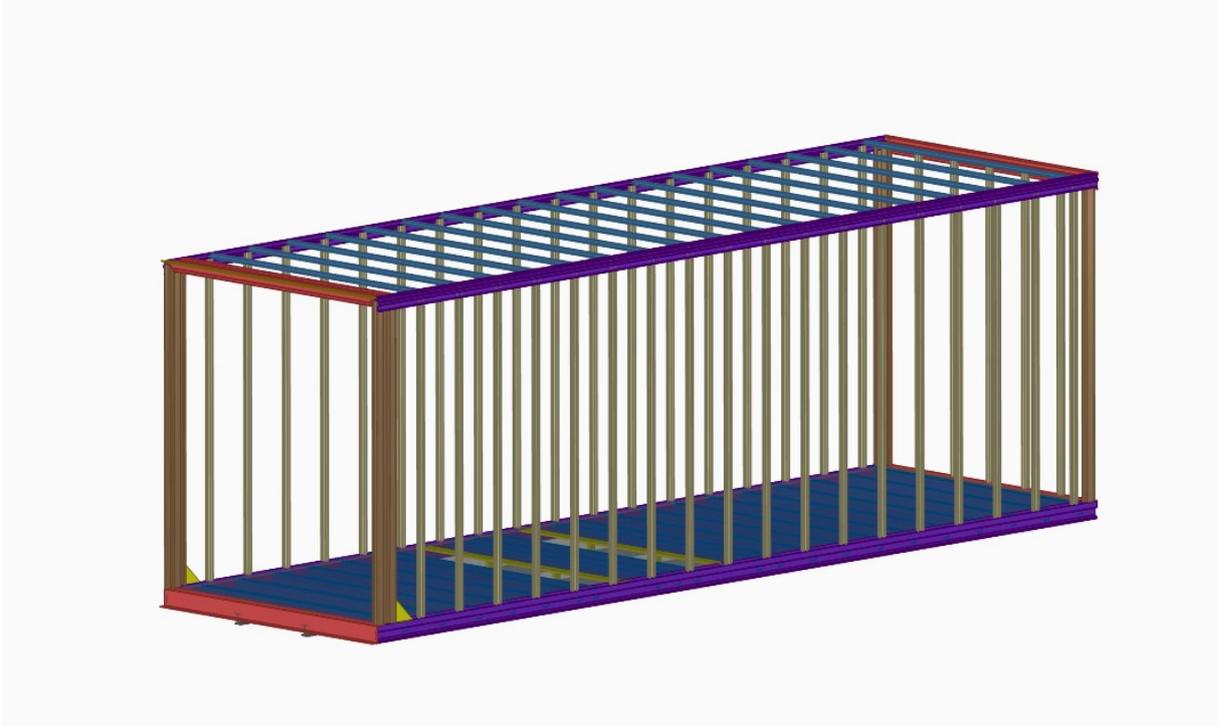
Figura 5 – Fluxograma.



Fonte: O Autor (2024).

Inicia-se modelando a estrutura no Solidworks™, com peças já existente no banco de dados da empresa, o modelo da estrutura foi adequado, pois existem folgas para facilitar a montagem da estrutura, essas folgas são retiradas no processo de soldagem, para o estudo foram retirados essas folgas, também são retirados raios de dobras das peças, os quais são importantes para facilitar a fabricação das peças, mas dificultam a geração da malha, na Figura 6 pode ser visualizada a estrutura original do projeto.

Figura 6 – Montagem Original sem Reforço



Fonte: O Autor (2024).

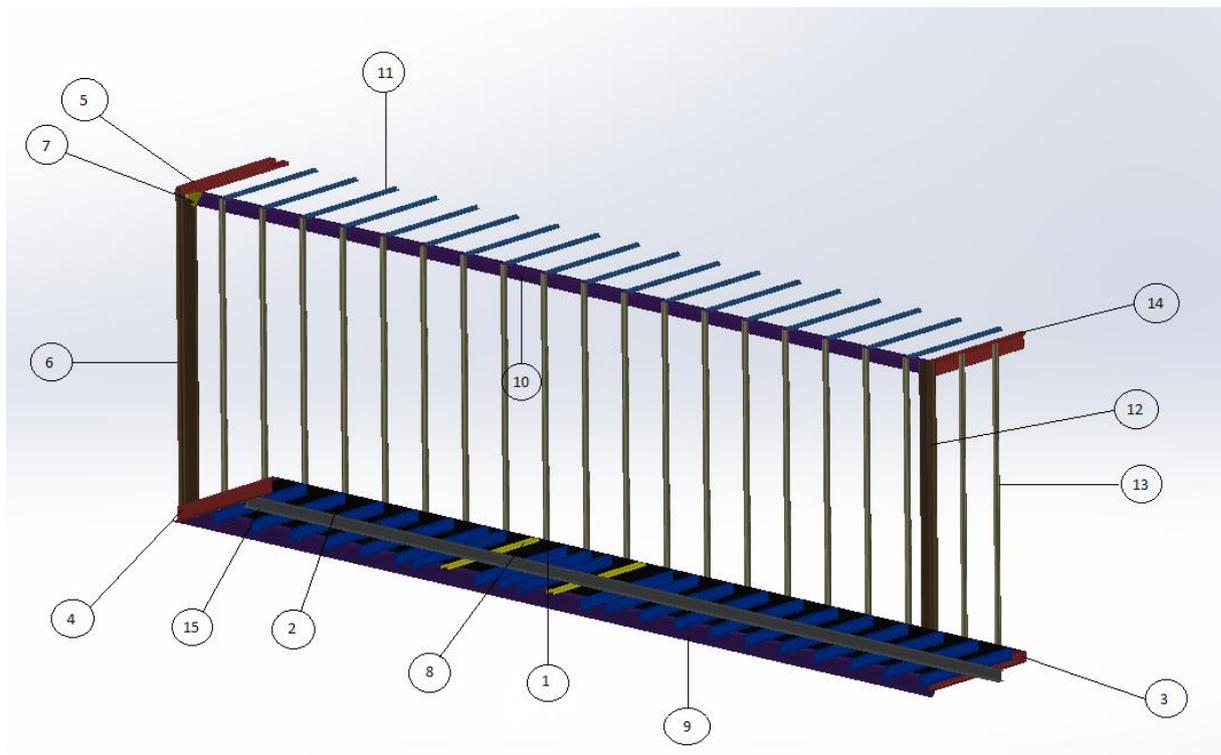
Dentro da estrutura existem peças menores, exceto a viga I de 4" e o assoalho de chapa de aço xadrez, todas as peças são fabricadas em chapas de aço dobradas, as espessuras das peças pode ser visualizada na Tabela a seguir.

Tabela 1 – Peças e Espessuras

Número	Peça	Espessura
1	Chapa de aço xadrez	4,75 mm
2	Travessa da base	4,17 mm
3	Fechamento frontal	3,75 mm
4	Fechamento traseiro	3,75 mm
5	Fechamento traseiro sup	3,75 mm
6	Coluna traseira	3,75 mm
7	Reforço da coluna traseira	3,17 mm
8	Travessa sobre o rodado	2,65 mm
9	Saia lateral Inf	2,25 mm
10	Saias lateral sup	1,95 mm
11	Travessa do teto	1,55 mm
12	Coluna frontal	1,55 mm
13	Coluna intermediária	1,55 mm
14	Fechamento frontal sup	1,55 mm
15	Viga I	4"

A Figura 7 detalha quais são as peças da tabela anterior, e onde estão localizadas.

Figura 7 – Peças Sobre Chassi com Reforço



Fonte: O Autor (2024).

As peças são fabricadas em Aço American Society for Testing and Materials (ASTM) A36, com uma composição química que contém até 0,29% de carbono, com baixos teores de manganês, fósforo e enxofre, pode facilmente ser soldado, o material apresenta alta ductibilidade, permitindo que o material seja dobrado ou moldado sem causar fraturas (HIBBELER, 2017), e é empregado em vários tipos de estruturas, as principais propriedades do aço A36 pode ser visualizado na tabela 2.

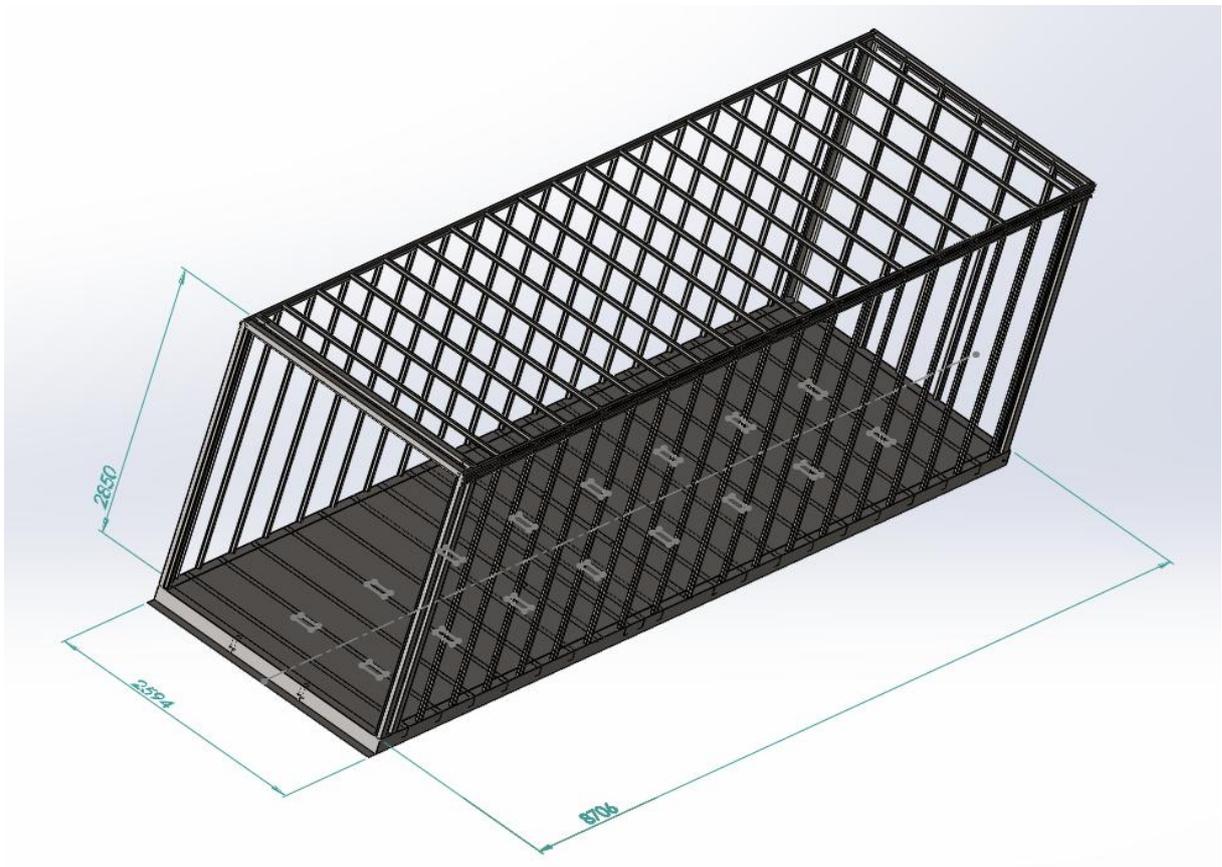
Tabela 2 – Propriedades do Aço A36 segundo a norma ASTM International (2019)

Propriedade	Valor
Limite de escoamento (min)	250 MPa
Limite de resistência à tração (min)	400 - 550 MPa
Alongamento (min)	20%
Peso específico	7850 kg/m ³
Coefficiente de Poisson	0,26
Módulo de elasticidade	200 GPa

O processo de simplificar a geometria, consistiu em unir as peças. No teto as peças unidas foram: as travessas do teto, saias laterais superiores, fechamento traseiro e fechamento frontal. No chassi, parte inferior da estrutura, as peças unidas foram: as travessas da base, saias laterais inferiores, fechamento frontal inferior e fechamento traseiro inferior. Para diminuir a quantidade de contatos, também foram retirados raios de dobras, que são importantes para a fabricação das peças e facilitam o corte e dobra do material, assim, facilitando a geração da malha, na Figura 8 demonstra como ficou

a montagem com as simplificações aplicadas.

Figura 8 – Montagem Simplificada



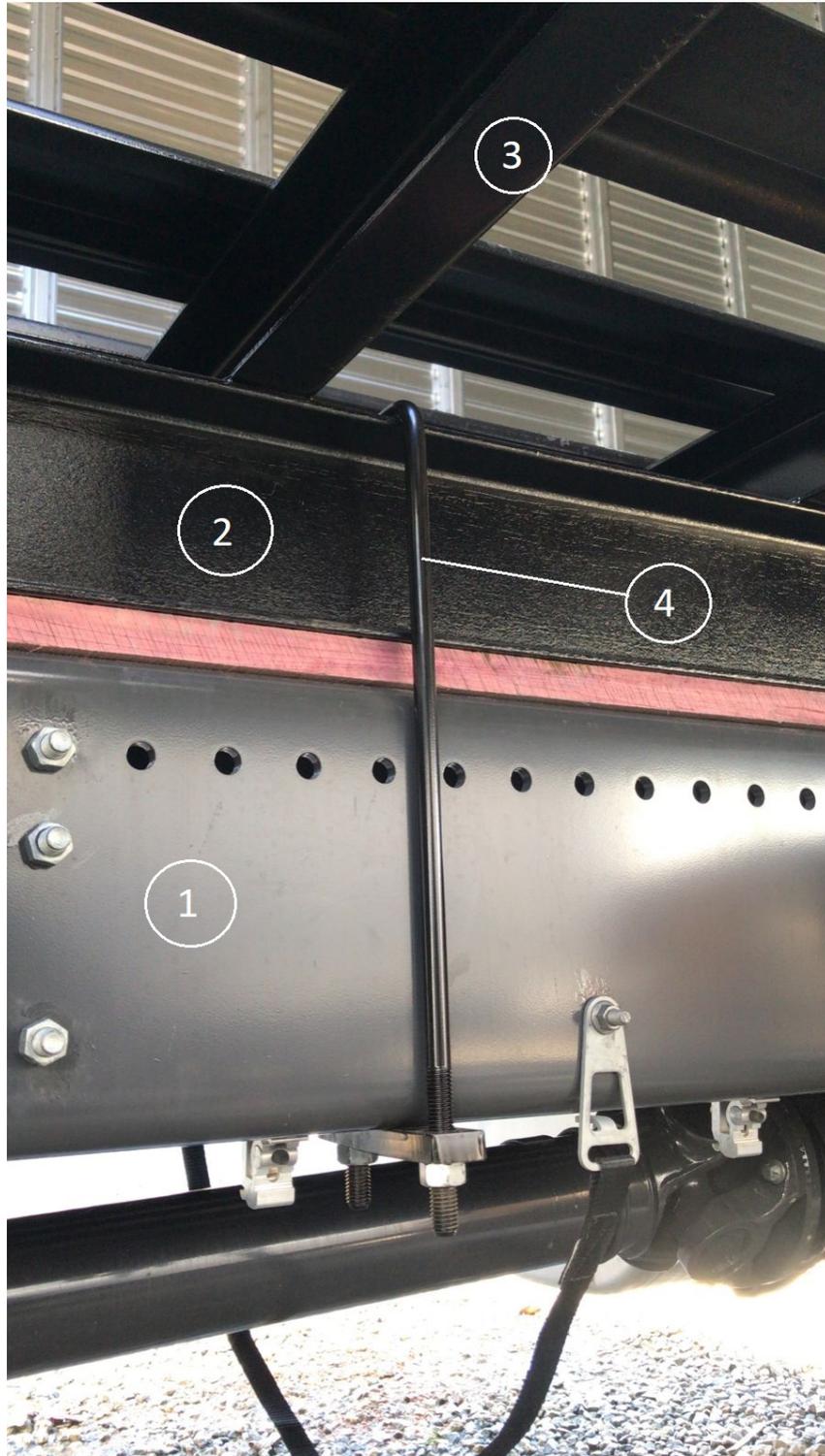
Fonte: O Autor (2024).

Depois de simplificar, começa o processo para gerar a malha, refinando a qualidade da malha e definindo as condições de contorno.

3.2 CARREGAMENTO EM FLEXÃO

Para a simulação estática, como pode-se visualizar a fixação do furgão no chassi do caminhão na Figura 9.

Figura 9 – Fixação no Chassi



Fonte: O Autor (2024).

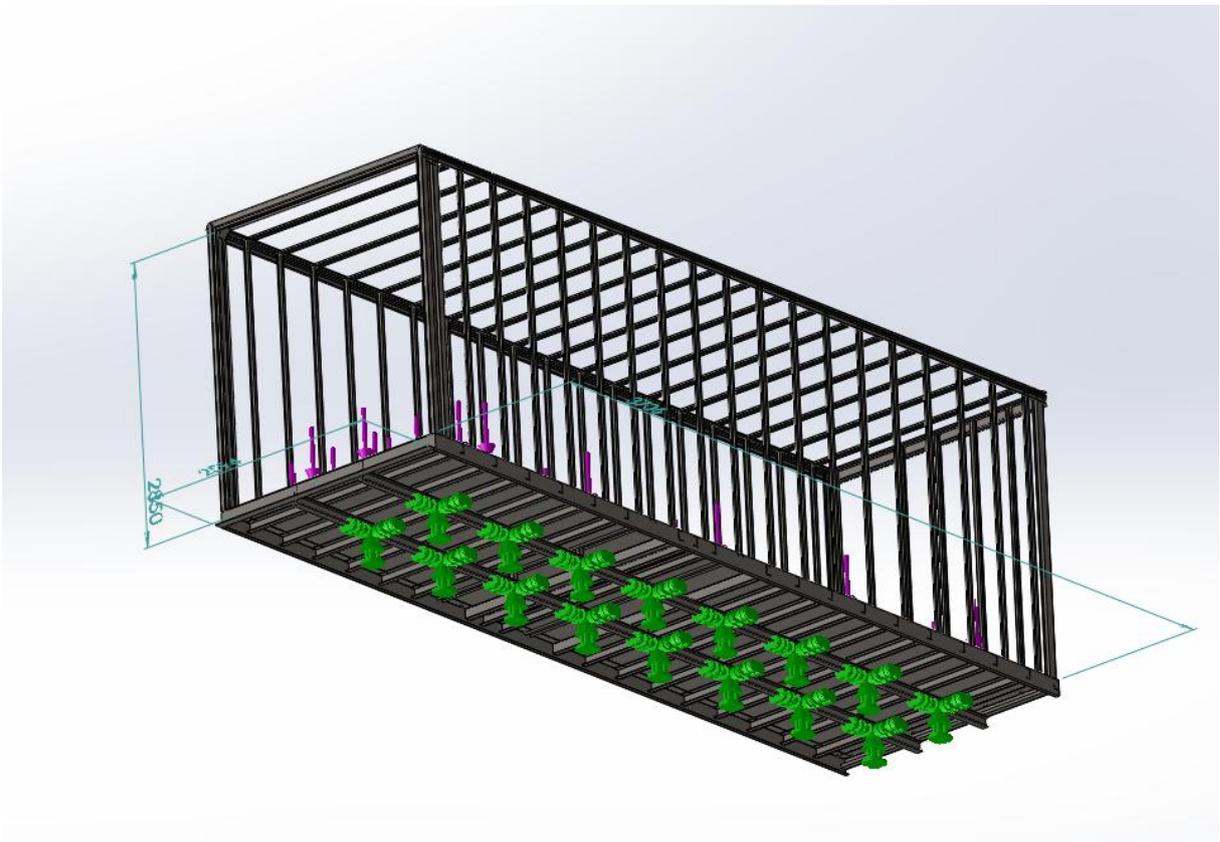
A Figura 9 demonstra como é fixado o furgão ao chassi do caminhão, pode-se visualizar que a longarina do furgão (viga I) fica posicionada sobre a longarina do chassi do caminhão, a Tabela 3 explica quais itens está sendo exibido na Figura 9.

Tabela 3 – Fixação Furgão no Chassi

Número	Descrição
1	Longarina do chassi do caminhão
2	Viga I de 4" da estrutura do furgão
3	Travessa da Base da estrutura do furgão
4	Grampo de fixação

Para a simulação estática, foi definido que nas posições dos grampos de fixação que ficam espaçados em 1000mm no chassi do furgão, é engastado, considerando que a pressão que o grampo aplica na longarina do furgão é muito alta, então considera-se que não possui graus de liberdade como demonstra a Figura 10.

Figura 10 – Condição de Contorno para Simulação estática



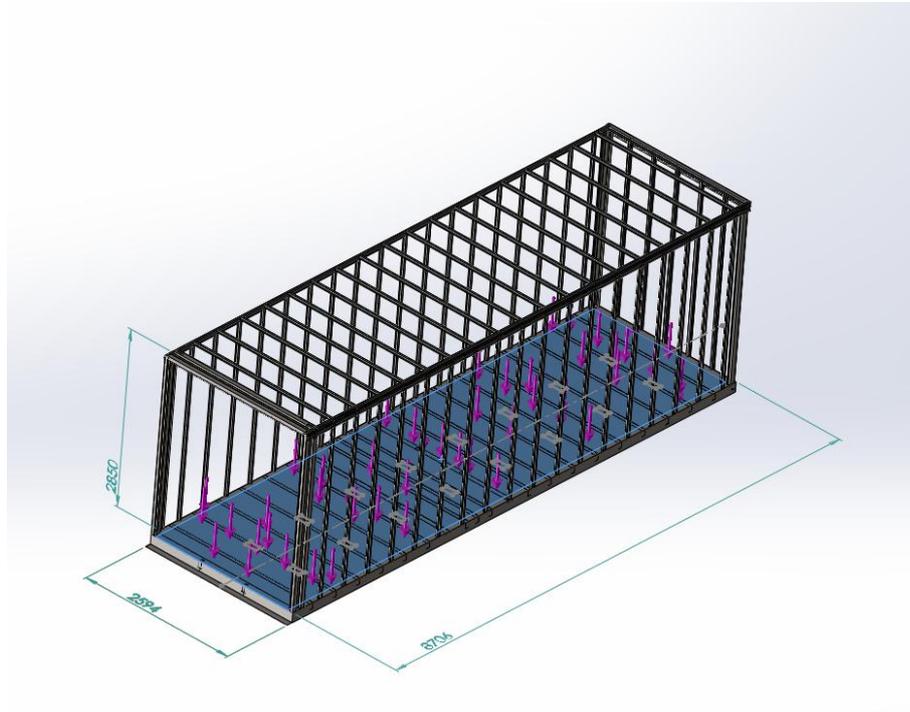
Fonte: O Autor (2024).

A condição engastada é uma simplificação para facilitar a convergência do estudo, como a viga I fica restrita nesses pontos, a tensão da região será potencialmente maior.

Na simulação estática, o carregamento da estrutura que será considerado, será o peso total que o veículo pode carregar como demonstra na Figura 4 que é 15390kg, desse valor subtraí 3500kg, peso aproximado de um furgão com as dimensões já citadas, e chega-se no valor de 11890kg, isso representa uma força de 116.640,9N

que será aplicada uniformemente sobre o assoalho como ilustrado na Figura 11.

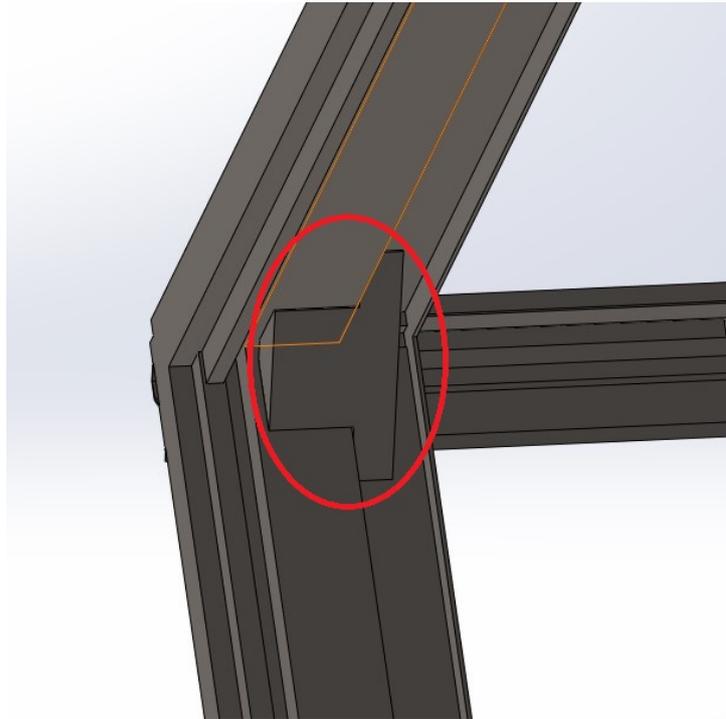
Figura 11 – Carregamento estático



Fonte: O Autor (2024).

Então, foram realizadas duas simulações uma com o reforço da coluna traseira (Caso II) como demonstra a Figura 12 e outra sem o reforço (Caso I), para avaliar se o reforço está efetivamente melhorando o desempenho do produto.

Figura 12 – Reforço Coluna Traseira



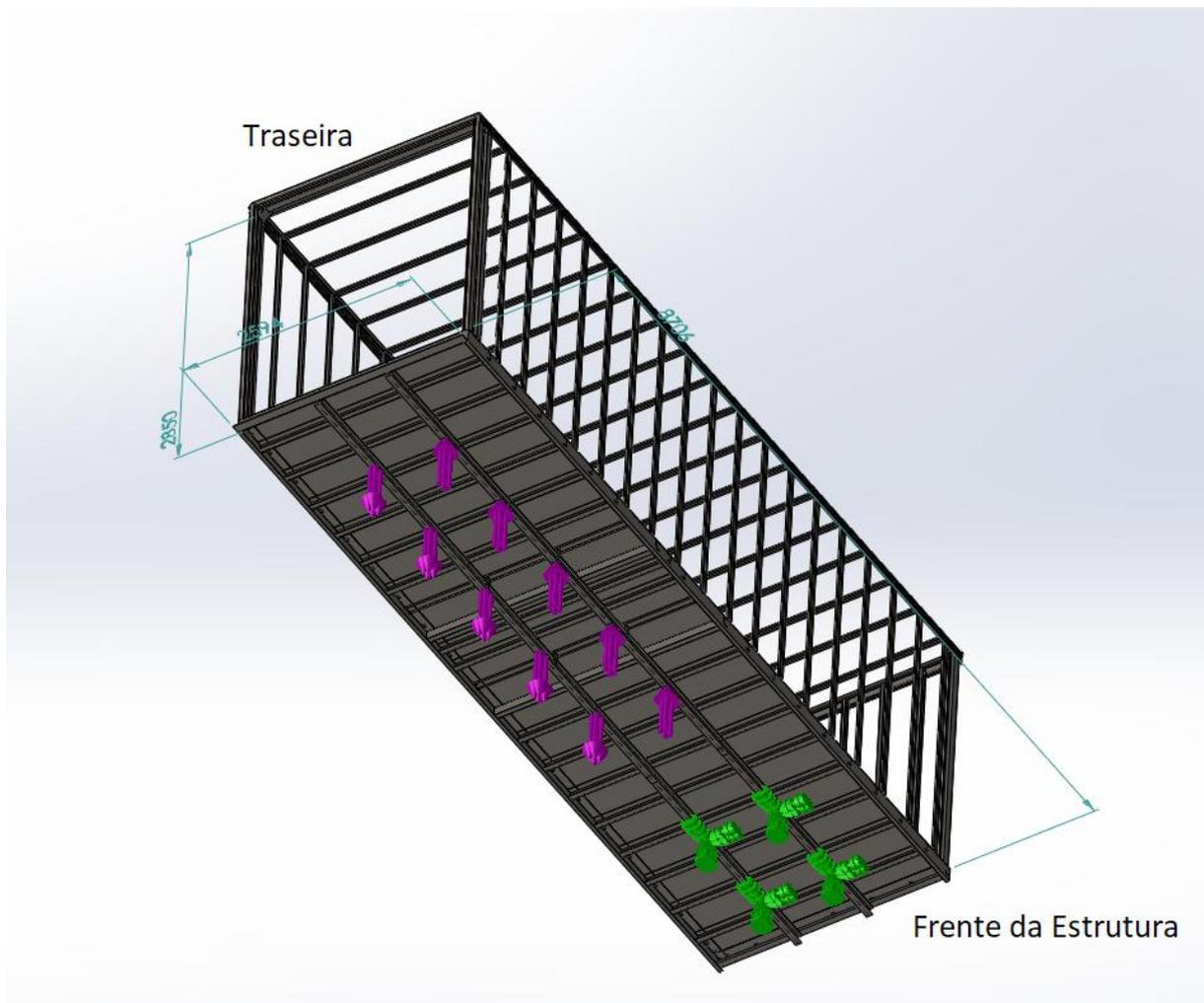
Fonte: O Autor (2024).

Os reforços são posicionados apenas na parte superior do quadro traseiro, ou seja, são dois reforços, um em cada lado da estrutura.

3.3 CARREGAMENTO TORCIONAL

Para a simulação de torção, foi definido que a estrutura fica engastada na parte frontal do piso, pois é a região mais próxima da cabine do caminhão, considerando que o chassi do caminhão está sofrendo uma torção na região do rodado traseiro, então, aplica-se um binário na parte traseira do veículo como na Figura 13.

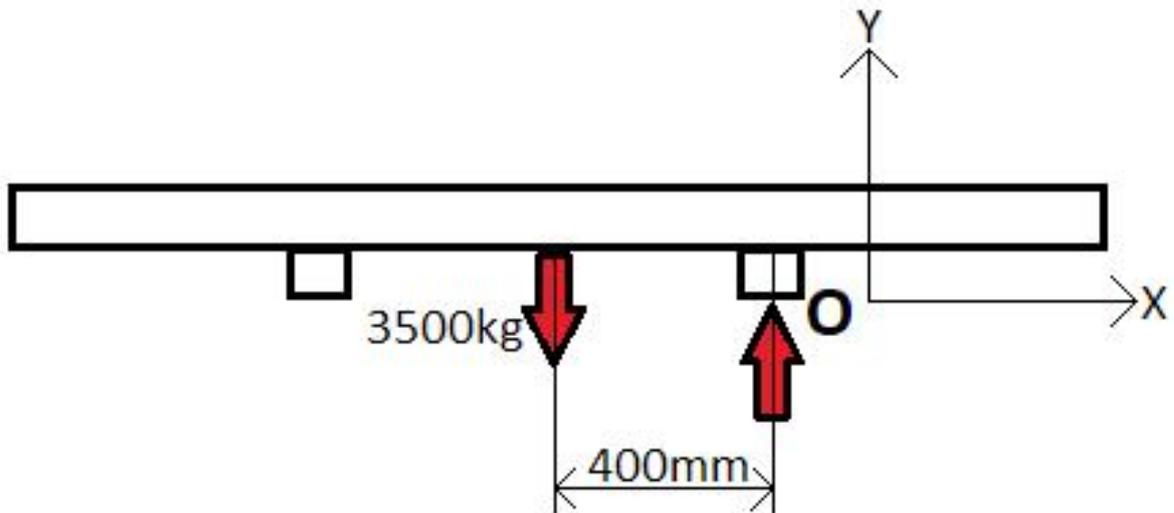
Figura 13 – Condições de Contorno Torção



Fonte: O Autor (2024).

Para estimar o torque aplicado a estrutura precisa-se fazer algumas suposições, simulando como se o veículo estivesse passando por um buraco, está sendo analisado exatamente o momento onde os pneus traseiros de um dos lados perdem contato com a pista e estão iniciando o deslocamento no eixo Y, assim pode ser realizado um DCL como demonstra a Figura 14.

Figura 14 – Diagrama de Corpo Livre para Torção



Fonte: O Autor (2024).

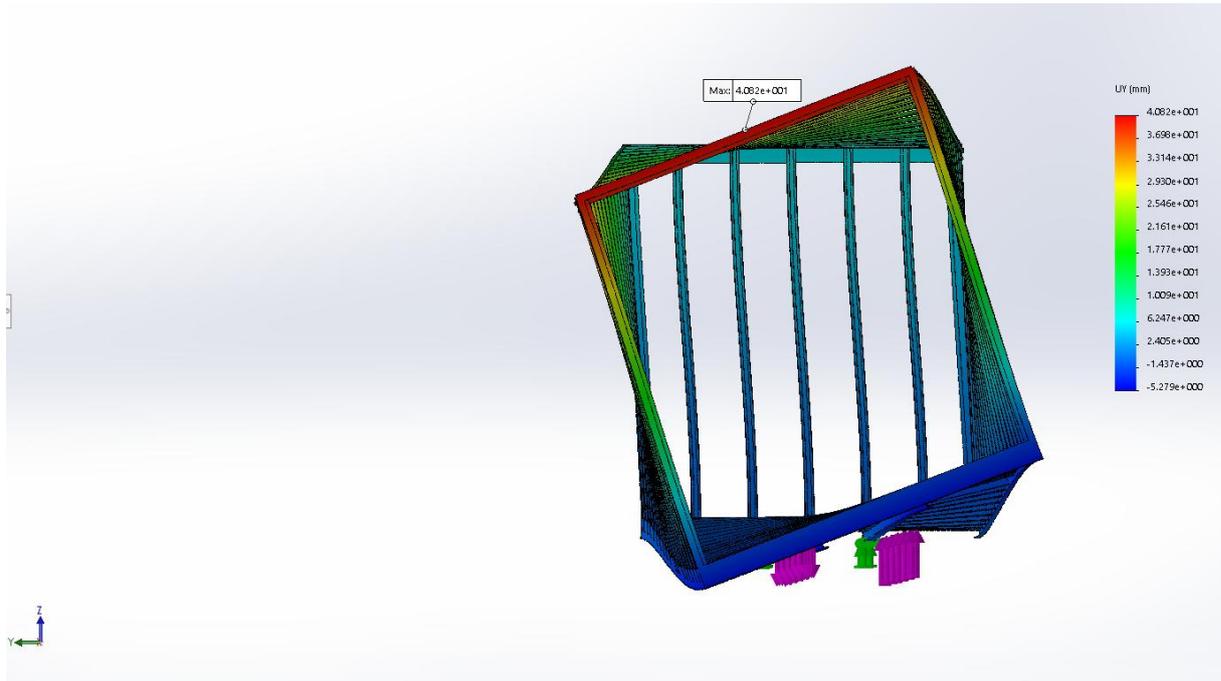
Realizando um somatório de torque em relação ao ponto O, assim chega-se na equação:

$$\sum \tau_O = (3500 \cdot 9,81 \cdot 0,4) = 1400 \text{ N.m.}$$

Onde está sendo considerado o peso do furgão vazio para realizar uma análise da rigidez torcional e tensões, pois quando o veículo está carregado, tem amarrações internas que seguram a estrutura, alterando a rigidez torcional, considerando apenas a excitação pelo próprio peso da estrutura, não está sendo considerado a interação com o chassi do veículo, pois seria necessário modelar o chassi completo do caminhão para uma análise mais detalhada da interação. Com esse torque é possível calcular o valor do binário que será utilizado na simulação, sendo aplicado na viga I da estrutura.

Foram realizadas duas simulações, uma com o reforço da coluna traseira e a outra sem o reforço, com o deslocamento da estrutura no eixo Y da estrutura como demonstra a Figura 15.

Figura 15 – Deslocamento no Eixo Y



Fonte: O Autor (2024).

Então, é possível estimar o ângulo de torção sabendo que o deslocamento no eixo Y representa o cateto oposto de um triângulo retângulo, e a altura representa o cateto adjacente, então é possível estimar o ângulo sabendo que a tangente do ângulo é o cateto oposto sobre o cateto adjacente, após encontrar o ângulo é possível calcular a rigidez torcional através da Equação (3):

$$k_t = \frac{F \cdot b}{\Delta\theta} \quad (3)$$

k_t é a rigidez torcional,
 F é a força do binário,
 b é o braço do momento,
 $\Delta\theta$ é o ângulo de torção.

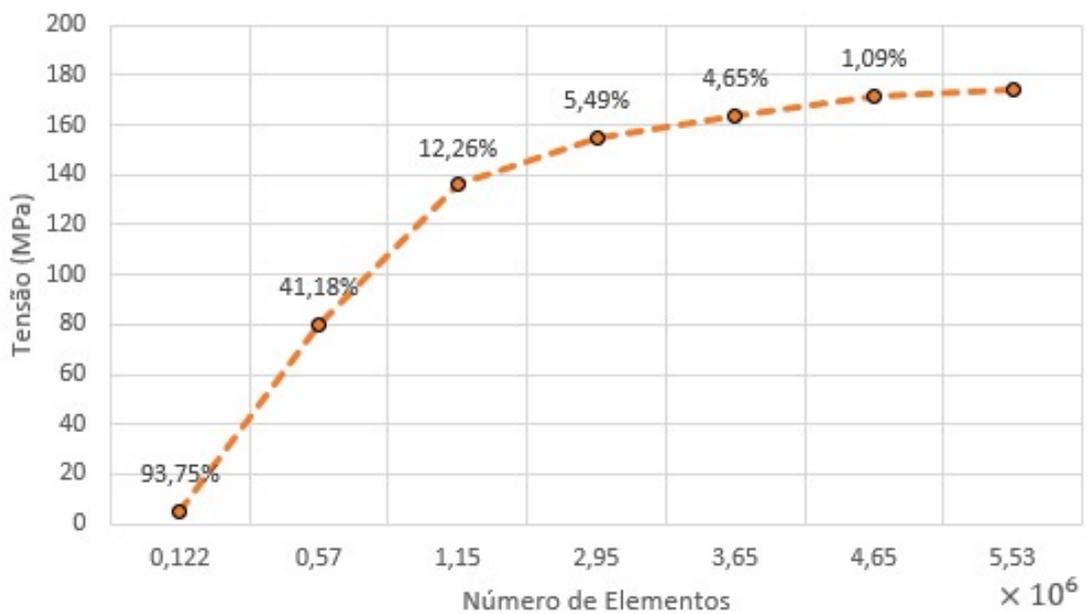
Com os dados obtidos de tensão das simulações do caso I e II, é possível fazer uma verificação do coeficiente de segurança, que considera a tensão de ruptura sobre a tensão equivalente de Von Mises como demonstra a Equação (4).

$$CS = \frac{\sigma_{\text{Escoamento}}}{\sigma_{\text{Equivalente máx de Von Mises}}} \quad (4)$$

3.4 CONVERGÊNCIA DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

Foi realizado um estudo de convergência da malha, sendo realizado 7 simulações variando o refinamento da malha na condição mais crítica, que é quando a estrutura está sofrendo torção e avaliando a variação da tensão máxima para realmente verificar a convergência, assim chegamos no gráfico que pode ser visualizado na Figura 16 que demonstra variação percentual da tensão máxima.

Figura 16 – Convergência da Malha



Fonte: O Autor (2024).

Com uma variação de 1% da tensão máxima com a iteração anterior, pode-se considerar a malha numericamente estável, a malha então ficou como na Figura 17, com 11.338.323 de nós e 5.537.666 de elementos.

Figura 17 – Detalhes da Malha

Malha Detalhes	
Nome do estudo	Análise estática (-Valor predeterminado<Como usinado>-)
Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado	Malha com base em curvatura
Pontos Jacobianos	16 pontos
Controle de malha	Definido
Tamanho máximo do elemento	24.3095 mm
Tamanho mínimo do elemento	1.21548 mm
Qualidade da malha	Alta
Total de nós	11338323
Total de elementos	5537666
Proporção máxima	539.59
Porcentagem de elementos com Proporção < 3	25.8
Porcentagem de elementos com Proporção > 10	3.47
% de elementos distorcidos (Jacobiana)	0
Tempo para conclusão da malha (hh:mm:ss)	00:55:34
Nome do computador	PC

Fonte: O Autor (2024).

Após a convergência da malha, foi replicado os mesmos parâmetros tanto para malha com reforço, tanto para a malha sem reforço. Então pode ser obtido os dados para analisar o efeito do reforço na estrutura.

3.5 FADIGA

Também foi realizado um estudo de fadiga na condição de torção com o reforço, pois foi a condição que foi adotada na empresa. Para o estudo foi considerado interação aleatória, está opção considera variações na carga que representa melhor uma condição real, também foi considerado a tensão máxima na condição mais crítica que é com tensão alternada, e para simplificar a análise não foram aplicados métodos de correção da tensão, como na Figura 18.

Figura 18 – Parâmetros Simulação Fadiga

Options Remark

Constant amplitude event interaction

Random interaction

No interaction

Computing alternating stress using

Stress intensity (P1-P3)

Equivalent stress (von Mises)

Max. absolute principal (P1)

Shell face

Top

Bottom

Mean stress correction

None

Goodman

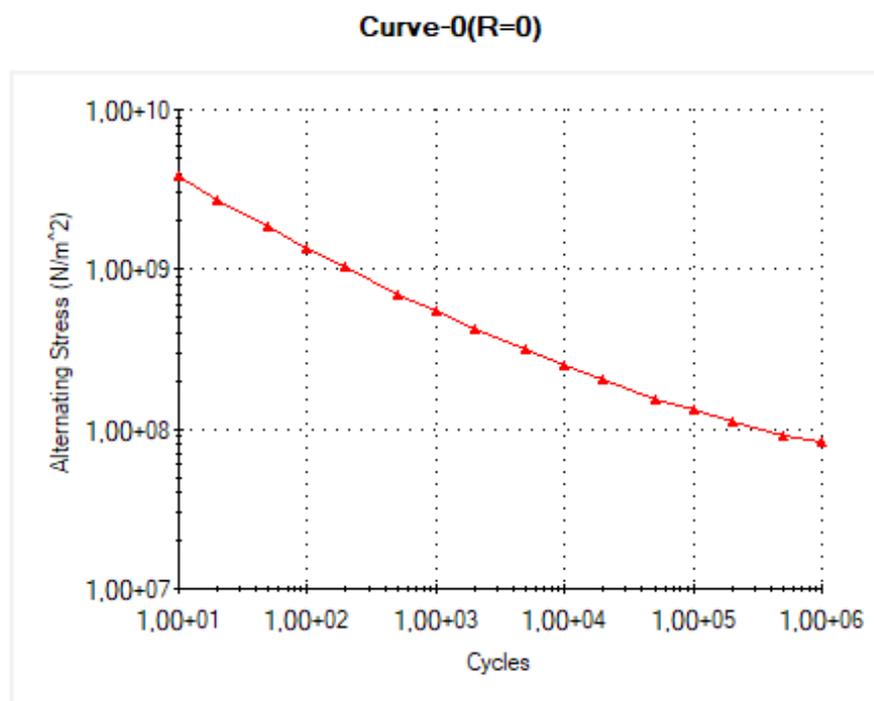
Gerber

Soderberg

Fonte: O Autor (2024).

Para a simulação de fadiga foi considerado o gráfico tensão por número de ciclos (S-N) da Figura 19 para o aço A36 disponível na biblioteca do Solidworks™.

Figura 19 – Gráfico S-N



—▲— Curve-0(R=0)

1.9227e+006, 1.91211e+006

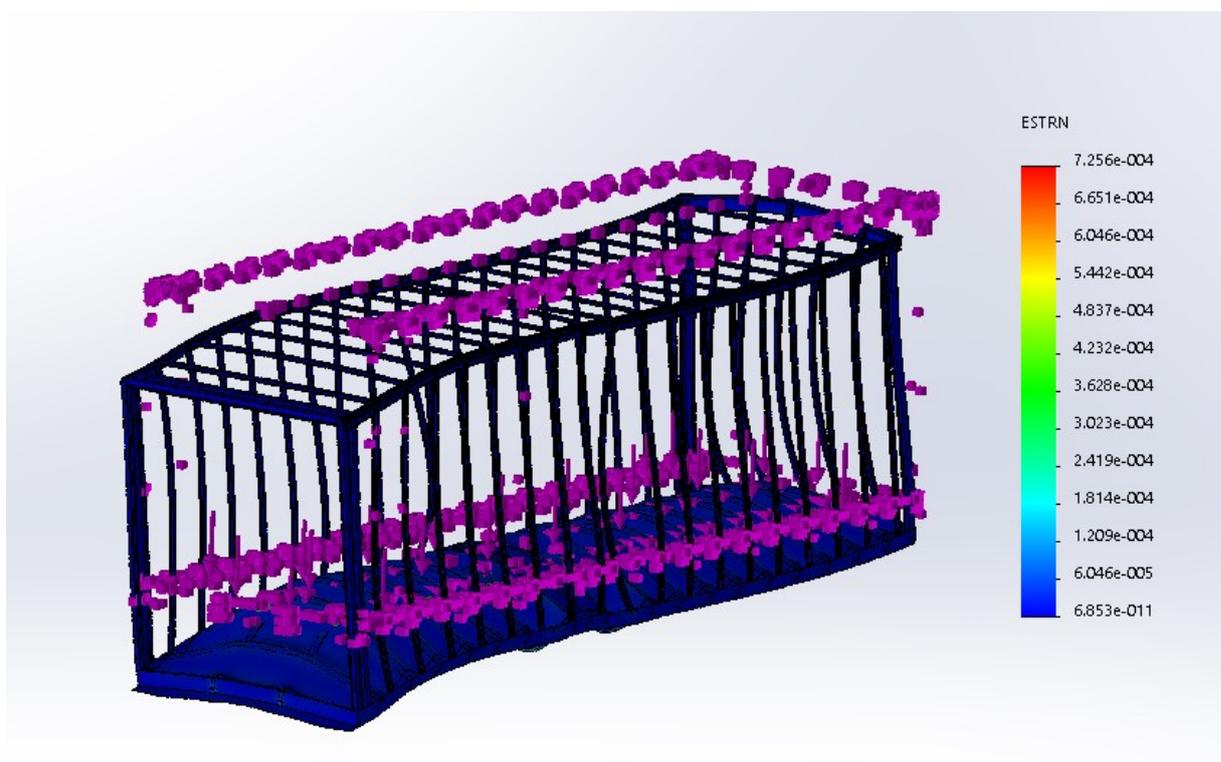
Fonte: O Autor (2024).

4 ANÁLISE DE DADOS

4.1 CASO I

Para a simulação estática obtém-se uma deformação máxima de $7,256 \times 10^{-4}$ como demonstra a Figura 20, a maior deformação se encontra na parte inferior da estrutura, o que já era esperando, pois a carga está toda na parte inferior da estrutura.

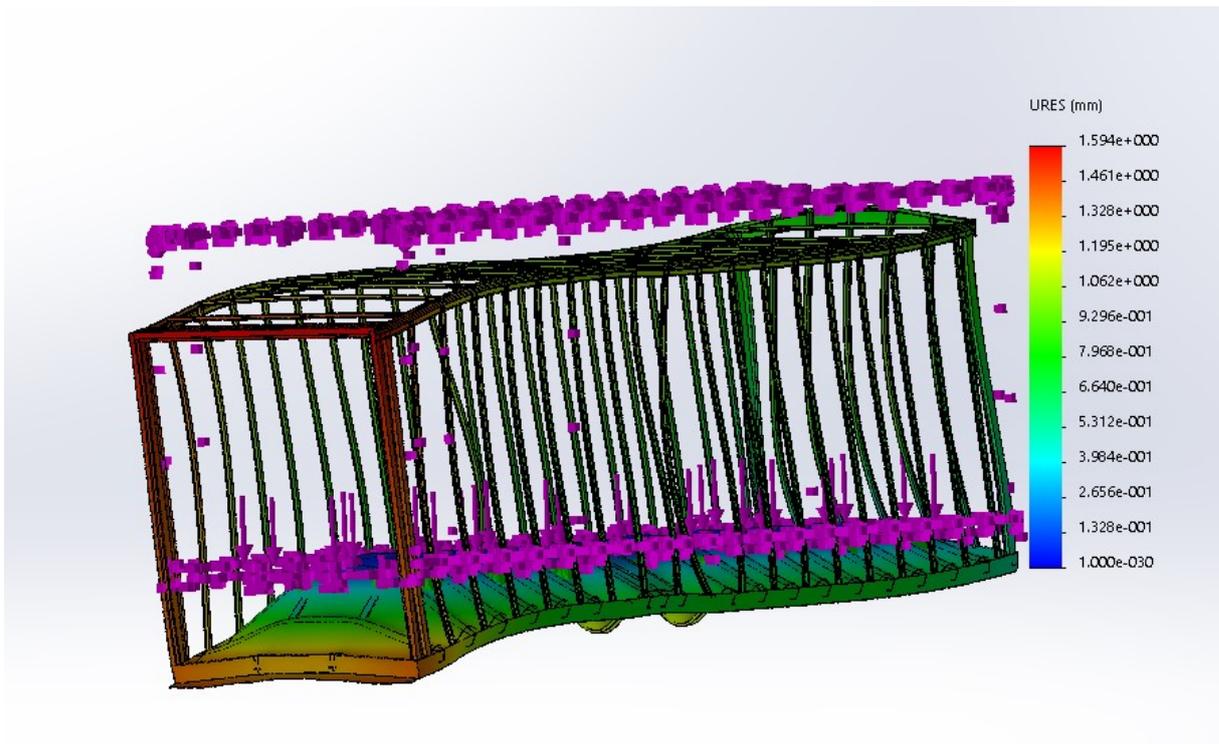
Figura 20 – Deformação



Fonte: O Autor (2024).

O deslocamento maior está no quadro traseiro atingindo 1,59mm como na Figura 21, como o mesmo é aberto, também é uma das partes mais reforçadas da estrutura, depois da parte inferior da estrutura é onde tem as peças com espessura maior.

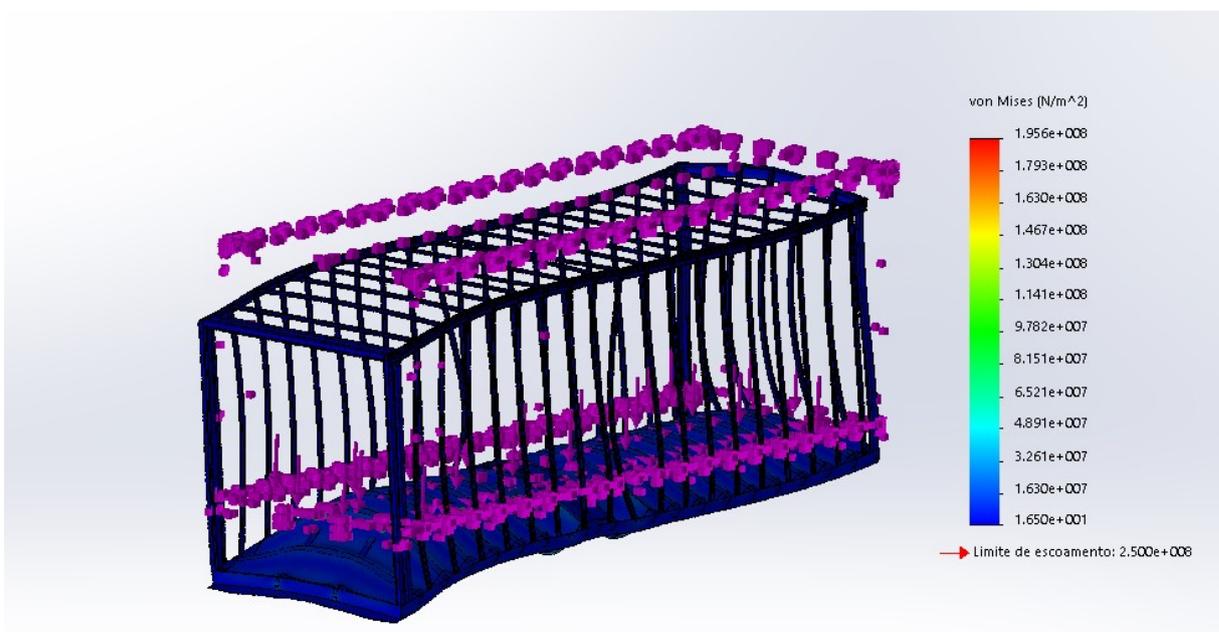
Figura 21 – Deslocamento



Fonte: O Autor (2024).

A tensão se concentrou principalmente nas fixações do chassi, obtendo uma tensão máxima de 195,6MPa como pode ser visualizado na Figura 25.

Figura 22 – Tensão



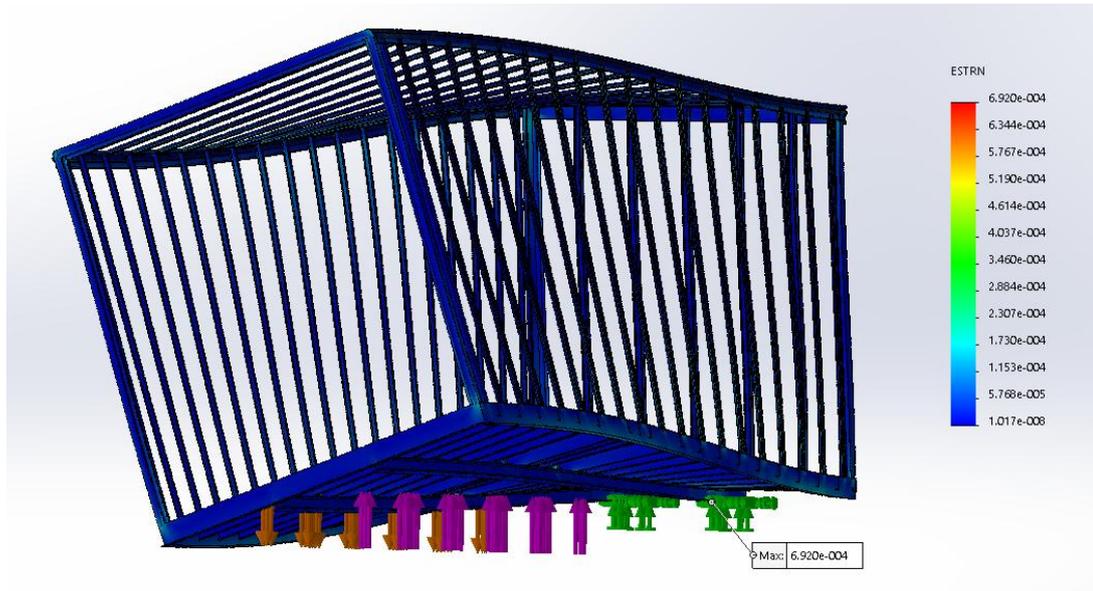
Fonte: O Autor (2024).

Com base nos resultados é possível calcular o coeficiente de segurança com a Equação (4) apresentada anteriormente, com a tensão de escoamento de

250MPa como demonstrado anteriormente, encontra-se o valor de 1,27 de coeficiente de segurança.

Sob torção obtem-se a deformação de $6,920 \times 10^{-4}$ como demonstra a Figura 23.

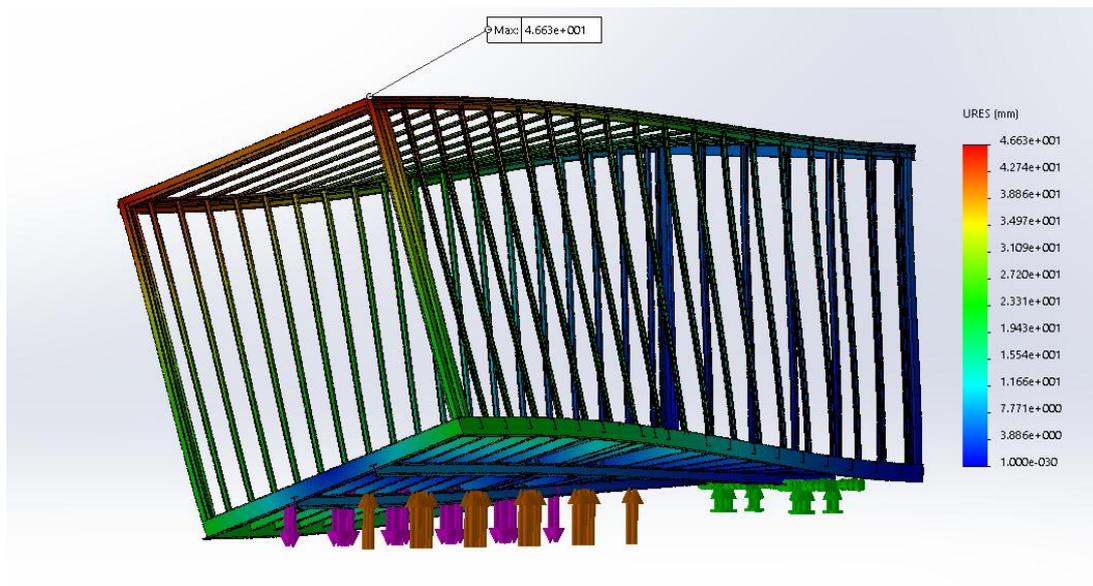
Figura 23 – Deformação sem Reforço



Fonte: O Autor (2024).

Para torção chega-se no valor de 46,63mm na parte superior do quadro traseiro como está representado na Figura 24.

Figura 24 – Deslocamento sem Reforço

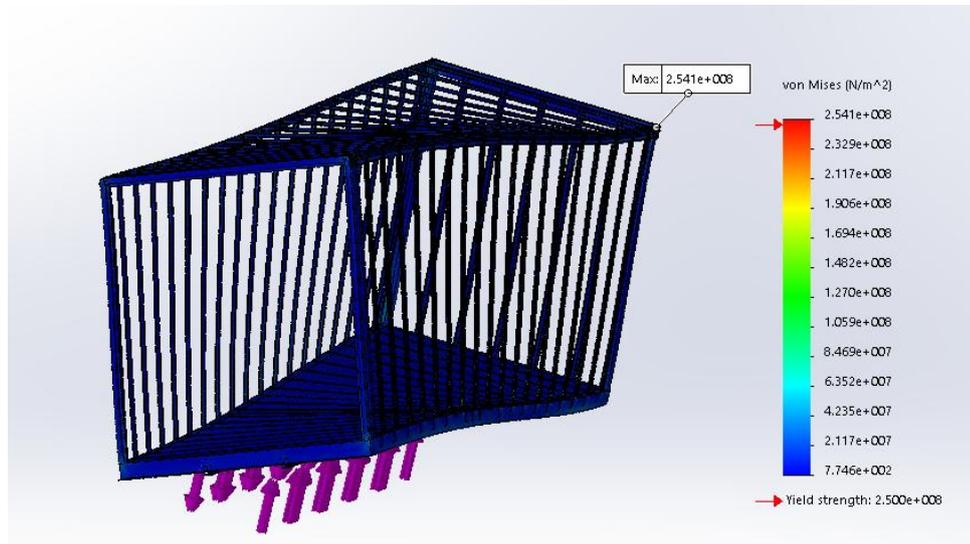


Fonte: O Autor (2024).

A tensão para torção sem o reforço apresentou valores elevados chegando em

254,1MPa como está mostrando a Figura 25, na região do surgimento de trincas e consequentemente onde será implementado o reforço, a tensão representou um valor de 127MPa.

Figura 25 – Tensão sem Reforço



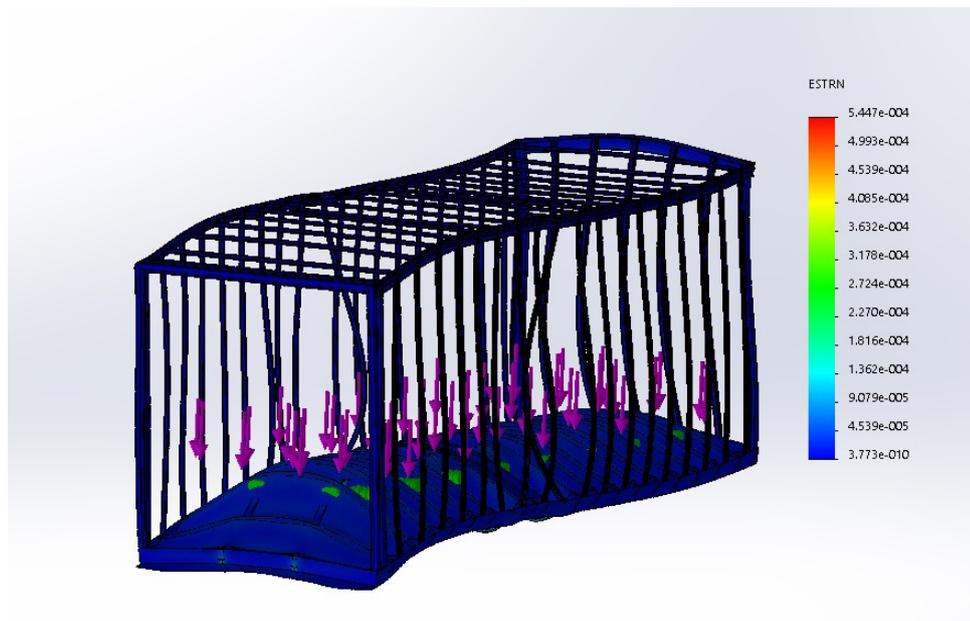
Fonte: O Autor (2024).

Com base nos resultados é possível calcular o coeficiente de segurança com a Equação (4) apresentada anteriormente, com a tensão de escoamento de 250MPa como demonstrado anteriormente, encontra-se o valor de 0,98 de coeficiente de segurança.

4.2 CASO II

Na parte estática obtem-se uma deformação de $5,477 \times 10^{-4}$ resultado melhor que a estrutura sem o reforço como demonstra a Figura 26.

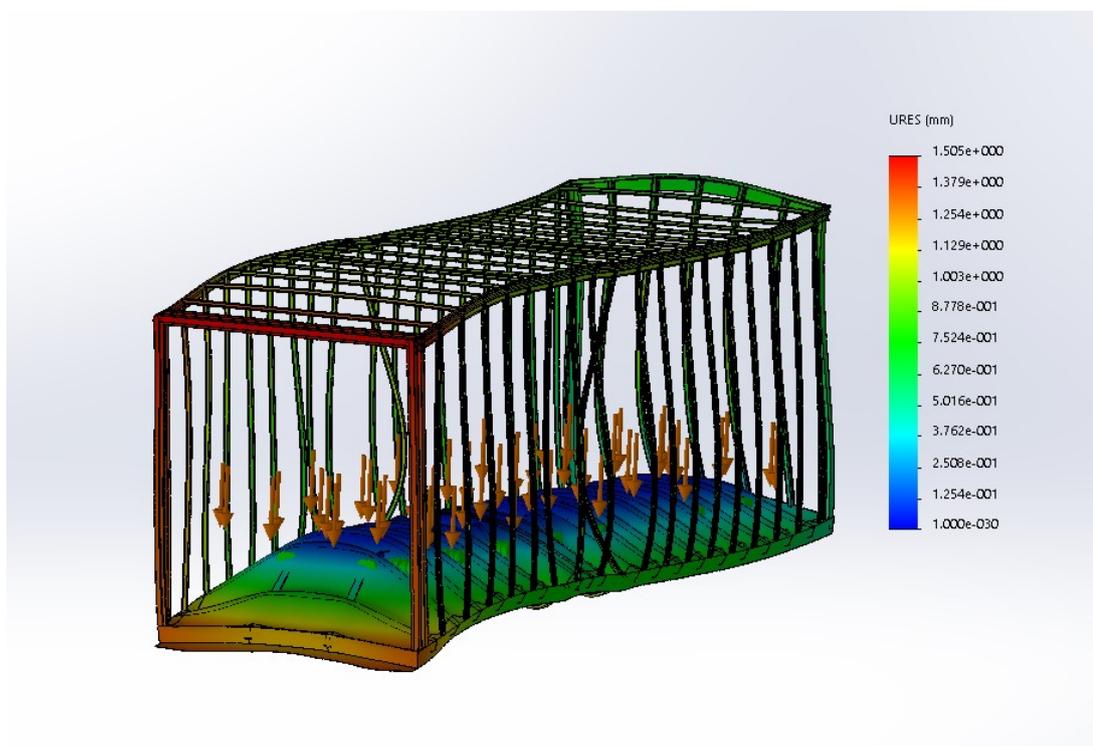
Figura 26 – Deformação com Reforço



Fonte: O Autor (2024).

O deslocamento para a simulação estática ficou 1,5mm no quadro traseiro, também apresenta uma pequena evolução em relação a estrutura sem o reforço como pode ser visualizado na Figura 27.

Figura 27 – Deslocamento com Reforço

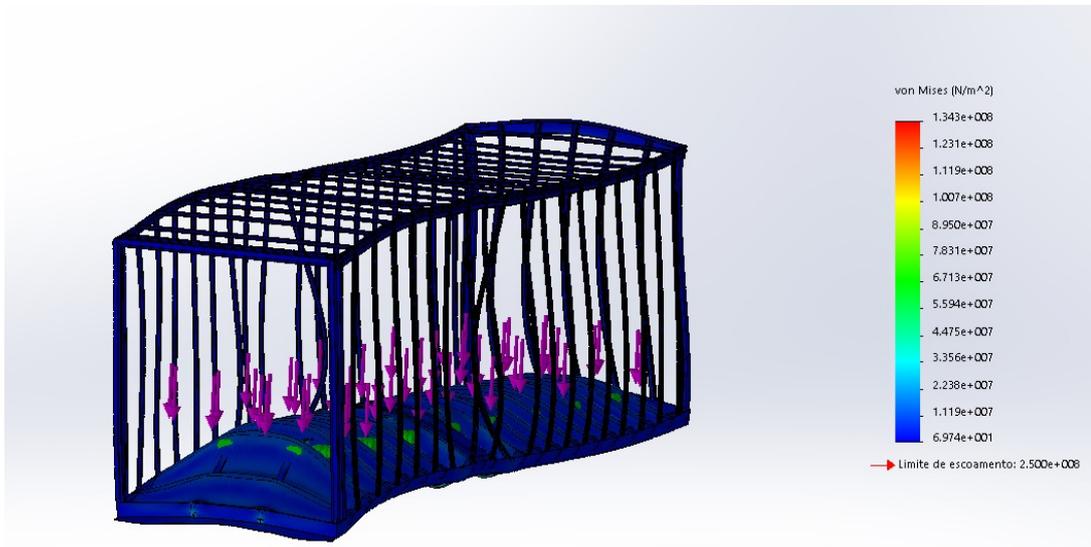


Fonte: O Autor (2024).

Como resultado da tensão foi obtido 134,3MPa, esse valor representa uma

redução de 31,34% da tensão comparado a simulação sem o reforço como demonstra a Figura 28.

Figura 28 – Tensão com Reforço

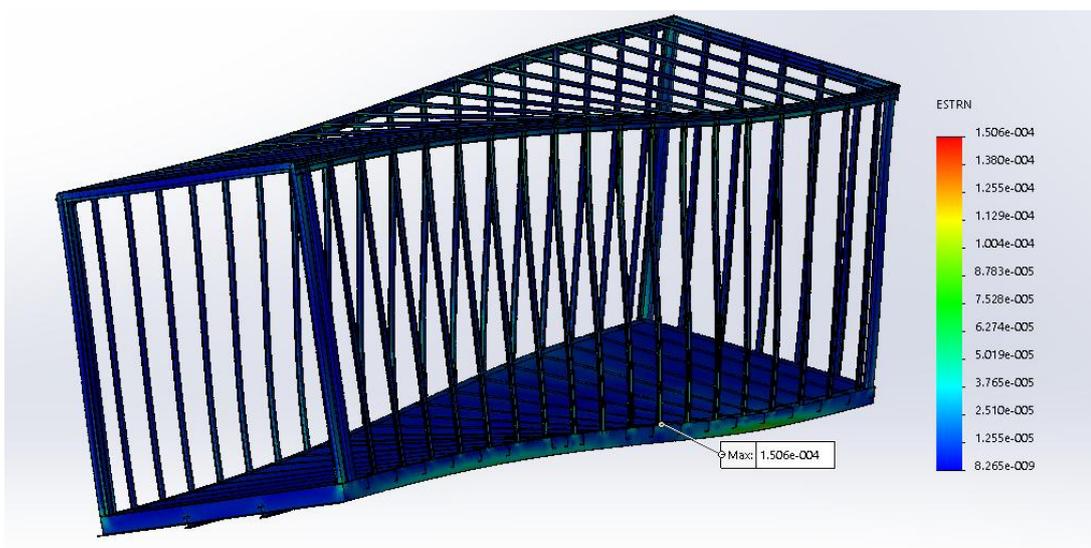


Fonte: O Autor (2024).

Com base nos resultados é possível calcular o coeficiente de segurança com a Equação (4) apresentada anteriormente, com a tensão de escoamento de 250MPa como demonstrado anteriormente, encontra-se o valor de 1,86 de coeficiente de segurança.

Para torção a estrutura apresenta uma deformação de $1,506 \times 10^{-4}$ como pode ser visualizado na Figura 29.

Figura 29 – Deformação Torção com Reforço

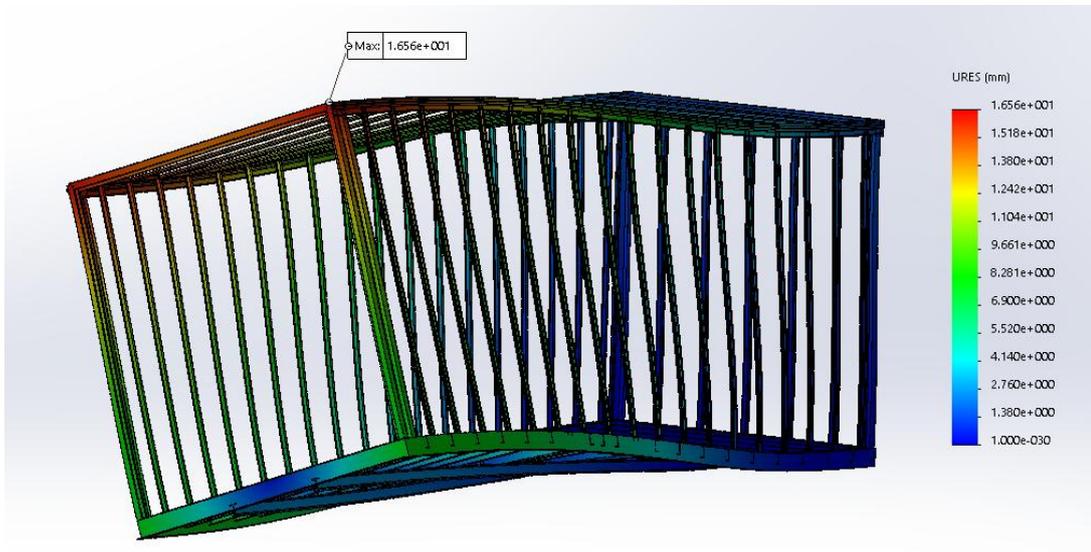


Fonte: O Autor (2024).

O deslocamento para torção ficou 16,56mm, reduzindo 64,49% do

deslocamento comparado com a estrutura sem o reforço como demonstra a Figura 30.

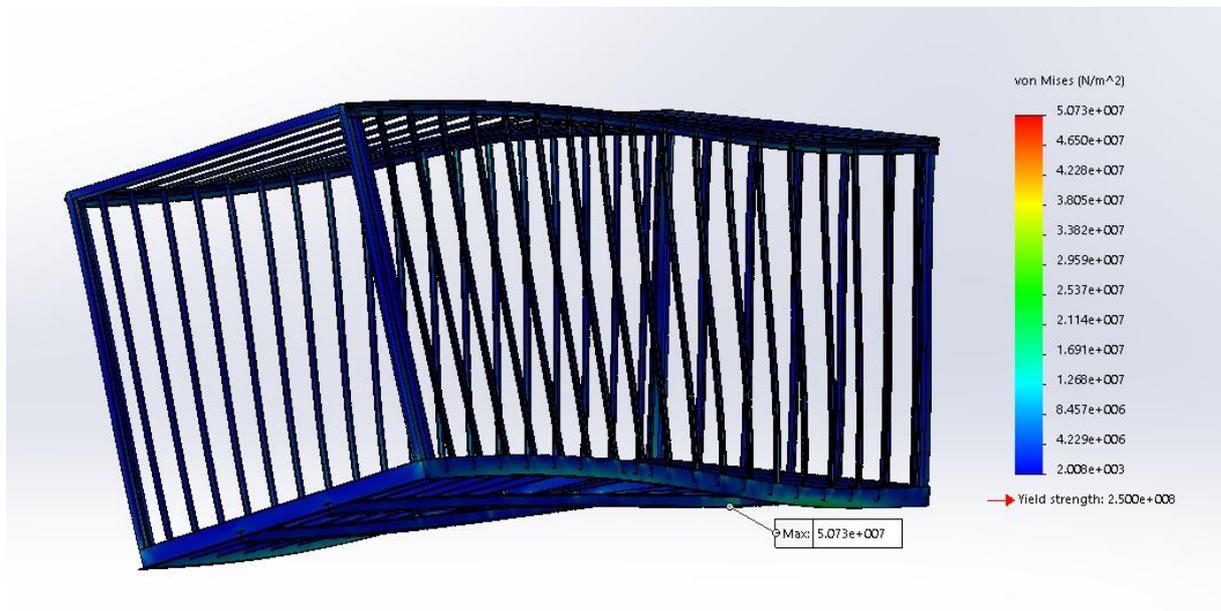
Figura 30 – Deslocamento Torção com Reforço



Fonte: O Autor (2024).

A tensão para a simulação de torção ficou 50,73MPa, na região do reforço a tensão chegou em 16,91MPa como demonstra a Figura 31.

Figura 31 – Tensão com Reforço



Fonte: O Autor (2024).

Com base nos resultados é possível calcular o coeficiente de segurança com a Equação (4) apresentada anteriormente, com a tensão de escoamento de 250MPa como demonstrado anteriormente, encontra-se o valor de 4,92 de coeficiente de segurança.

4.3 COMPARATIVO ENTRE ESTRUTURA COM REFORÇO E SEM REFORÇO

A Tabela 4 demonstra uma síntese dos dados obtidos através das simulações.

Tabela 4 – Comparativo entre estrutura com reforço e sem reforço

Dados	Caso I	Caso II
Deformação Simulação Est.	$7,256 \times 10^{-4}$	$5,477 \times 10^{-4}$
Deslocamento Simulação Est.	1,59mm	1,5mm
Tensão Simulação Est.	195,6MPa	134,3MPa
Coeficiente de Segurança para Simulação Est.	1,27	1,86
Deformação Simulação Torção	$6,920 \times 10^{-4}$	$1,506 \times 10^{-4}$
Deslocamento Simulação Torção	46,63mm	16,56mm
Tensão Simulação Torção	254,1MPa	50,73MPa
Tensão Região do Reforço Sob Torção	127MPa	16,91MPa
Coeficiente de Segurança Simulação Torção	0,98	4,92
Rigidez Torcional	1846,97Nm/graus	4844,29Nm/graus

Com os dados apresentados pode-se afirmar que a estrutura com reforço teve um desempenho superior a estrutura sem o reforço, em relação a torção foi obtido as maiores diferenças, a estrutura sem o reforço apresenta um coeficiente de segurança muito inferior a estrutura com o reforço, o mesmo proporcionou uma redução de 86,68% na região próxima do reforço e 80,03% na tensão equivalente de Von Misses máxima da estrutura, essa redução teve um grande impacto no coeficiente de segurança chegando em 4,92. Para estruturas de aplicações gerais com materiais dúcteis como aço A36, o coeficiente de segurança deveria ser um valor entre 2,0 e 3,0, mas podendo ser maior dependendo da aplicação e da criticidade do projeto (HIBBELER, 2017).

Após a implementação do reforço pela empresa como demonstra a Figura 32, diminui consideravelmente os casos de trinca na região do reforço, vale destacar que a maioria dos problemas que surgiram depois estavam atrelados a processos de fabricação, soldas mal feitas ou sem penetração e até mesmo peças que já foram fabricadas com alguma micro trinca resultante do processo de dobra.

Figura 32 – Estrutura Montada com o Reforço

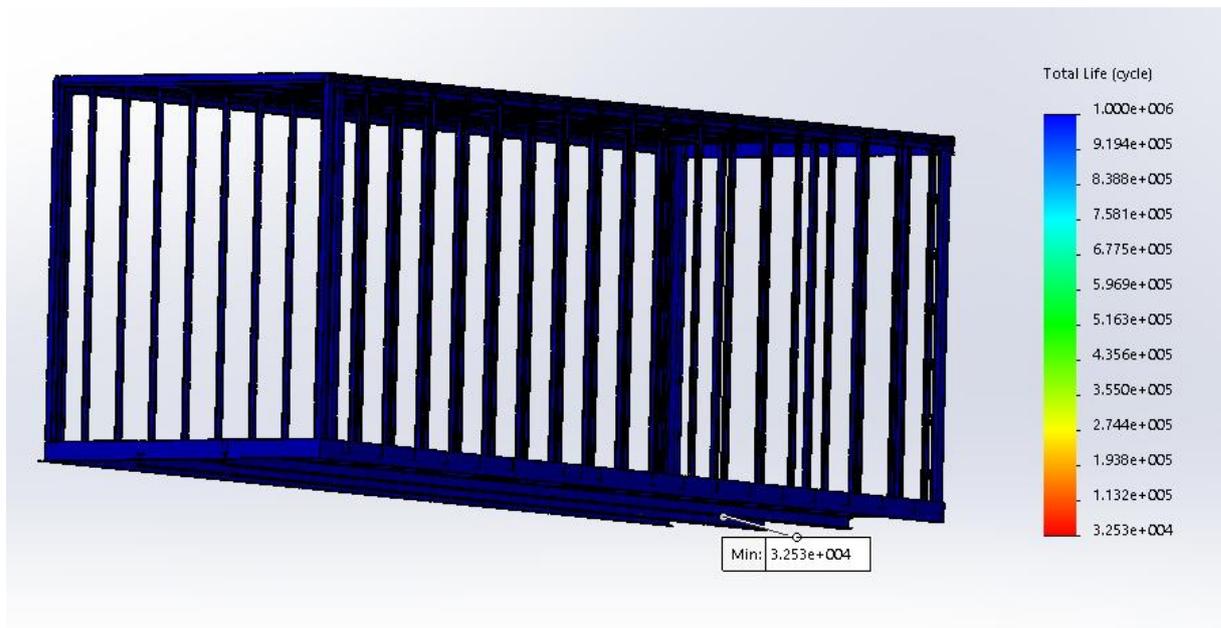


Fonte: O Autor (2024).

4.4 SIMULAÇÃO FADIGA ESTRUTURA COM REFORÇO

Para fadiga obtem-se vida infinita para várias partes da estrutura como demonstra a Figura 33.

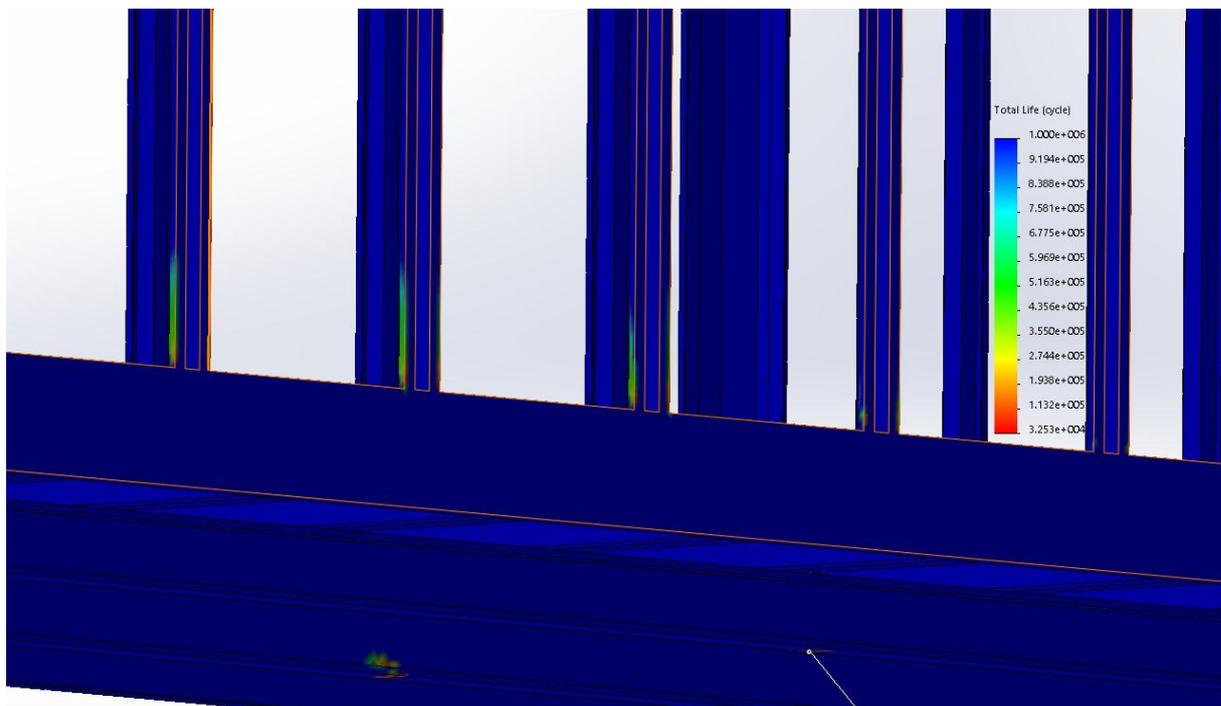
Figura 33 – Fadiga Estrutura com Reforço



Fonte: O Autor (2024).

Exceto na região inferior das colunas intermediárias que se localizam no meio da estrutura e na região inferior da Viga I próxima a área que ficou engastada, pela simulação teria a vida estimada em $3,253 \times 10^4$ ciclos nos pontos onde se concentra maior tensão como ilustra a Figura 34.

Figura 34 – Fadiga: Região com Maior Tendência a Falha Sob Torção



Fonte: O Autor (2024).

Com relação ao resultado da simulação de fadiga, está condizente com o que é

observado na empresa, alguns furgões mais velhos (baixa frequência), até mesmo de outros fabricantes, surgiam com avaria em algumas intermediárias centrais, exatamente na região onde indica a simulação. A empresa realizava reformas de furgões também, então, o que era observado é que existia muito mal uso do produto, sobre peso resultando em deformações na estrutura inferior do produto, falta de travamento interno quando o furgão está carregado, resultando em deformações na estrutura lateral.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma análise numérica da estrutura de uma carroceria sobre chassi de um caminhão VW 24.330 do tipo furgão, utilizando o software SolidWorks™ e o Método dos Elementos Finitos (MEF). O estudo focou na avaliação do comportamento estrutural em condições estáticas e dinâmicas, com e sem a aplicação de reforço estrutural na coluna traseira. Os resultados demonstraram a eficácia do reforço proposto para melhorar o desempenho e a segurança estrutural do furgão.

As máximas tensões dos modelos nos casos I e II não ocorreram nas regiões que, usualmente, surgem as falhas por trincas. Isso ocorre em função da forma como a estrutura foi avaliada, sem considerar as influências da flexibilidade do chassi do veículo, e por ter isolado somente a estrutura do furgão. Entretanto, o estudo confirma a realidade das empresas, que as tensões são consideravelmente reduzidas ao instalar os reforços em pontos estratégicos.

Os resultados da simulação mostraram que a estrutura reforçada apresentou desempenho significativamente superior em todas condições apresentadas. No caso da torção, o coeficiente de segurança aumentou de 0,98 para 4,92, resultando em uma grande melhoria na capacidade da estrutura de suportar cargas dinâmicas e esforços torcionais. Além disso, a deformação máxima e o deslocamento da estrutura foram consideravelmente reduzidos, com uma rigidez torcional aumentada de 1846,97 Nm/grau para 4844,29 Nm/grau, o que evidencia a eficiência do reforço aplicado. No caso estático, as tensões, deslocamentos e deformações também foram reduzidos, contribuindo para um coeficiente de segurança de 1,86.

Outro aspecto relevante foi a análise da fadiga, que indicou vida infinita em grande parte da estrutura reforçada. Entretanto, foram identificados alguns pontos mais críticos, como nas colunas intermediárias e na parte inferior da viga I, onde a concentração de tensão é maior. Esses pontos condicionam as falhas observadas na prática, destacando a importância de um controle mais específico no processo de fabricação e na utilização adequada do furgão para evitar danos prematuros.

Além de reduzir significativamente a ocorrência de trincas estruturais, a aplicação do reforço trouxe benefícios práticos, a análise também ressaltou a necessidade de melhorias nos processos de fabricação, incluindo soldagens mais robustas e a prevenção de microtrincas em peças dobradas, que ainda representam um desafio para garantir a eficiência máxima da solução proposta.

Este estudo reforça a importância do uso de ferramentas de simulação estrutural na engenharia automotiva, permitindo prever e melhorar o desempenho de componentes antes de sua implementação. Os resultados obtidos servem como base

para futuras melhorias nos projetos de sobre chassis, especialmente em aplicações comerciais que exigem alta resistência estrutural e confiabilidade.

Como recomendações para estudos futuros, para comparação da qualidade dos resultados numéricos, pode-se analisar pelo método dos elementos finitos empregando elementos do tipo casca, ao invés de elementos sólidos. Sugere-se também, a exploração de materiais alternativos para reduzir o peso da estrutura sem comprometer a integridade estrutural. Além disso, realizar análises mais detalhadas da interação entre o chassi do caminhão e o furgão e analisar a flambagem das colunas como um modelo não linear, poderiam fornecer uma visão mais precisa do comportamento estrutural em condições reais de operação.

Conclui-se que o objetivo geral foi alcançado com sucesso, uma vez que o reforço proposto é uma solução eficaz para melhorar a integridade estrutural do furgão. Este trabalho contribui para o desenvolvimento de projetos mais seguros e eficientes, destacando o papel essencial da simulação computacional na engenharia automotiva.

REFERÊNCIAS

- ASTM International. **Standard Specification for Carbon Structural Steel Plates**. 2019. ASTM A36/A36M-19. Disponível em: <https://www.astm.org/Standards/A36.htm>.
- BATHE, K. J. **Finite Element Procedures**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1996.
- BEER, F. P. et al. **Mechanics of Materials**. 7th. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.
- BENNETT, S. **Heavy-Duty Truck Systems**. 6th. ed. Boston, MA: Cengage Learning, 2015.
- TRÂNSITO (CONTRAN), C. N. de. **Resolução nº 882, de 13 de dezembro de 2021**. [S.l.], 2021. Estabelece requisitos técnicos de segurança para veículos e implementos rodoviários. Publicada no Diário Oficial da União em 14 de dezembro de 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-contran/resolucoes/Resolucao8822021.pdf>.
- COSTA, A. S.; ALMEIDA, J. P. Análise de torção em estruturas utilizando o software abaqus. **International Journal of Mechanical Engineering**, Lisboa, Portugal, v. 55, n. 3, p. 212–225, 2017.
- CREDE, R. C.; DEUL, W. H. **Engineering of Automotive Implementations**. 2nd edition. ed. Berlin, Germany: Springer, 1991.
- ALVES FILHO, A. **Elementos Finitos—A base da tecnologia CAE**. 1. ed. São Paulo, Brasil: Saraiva Educação SA, 2018.
- GOLDENSTEIN, M.; ALVES, M. d. F.; AZEVEDO, R. L. S. d. A indústria de implementos rodoviários e sua importância para o aumento da eficiência do transporte de cargas no Brasil. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2006.
- HEISLER, H. **Vehicle and Engine Technology**. 2nd. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1995.
- HIBBELER, R. **Structural Analysis**. 10th. ed. Hoboken, NJ: Pearson, 2017.
- HUANG, Y.; LI, J.; WANG, H. Advanced simulation techniques in van structure torsion analysis. **Journal of Automotive Engineering**, SAE International, v. 34, n. 6, p. 1254–1267, 2020.
- JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. **Fundamentals of Machine Component Design**. 5. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2011.
- KLINGER, J.; MARTIN, R. Fatigue and fracture mechanics in heavy vehicle structures. **Journal of Structural Engineering**, American Society of Civil Engineers (ASCE), New York, NY, v. 140, n. 12, p. 45–58, 2014.
- NOORBHASHA, N. Computational analysis for improved design of an SAE BAJA frame structure. **UNLV Theses**, 2010.

OLIVEIRA, M. C.; SOUZA, V. R.; NASCIMENTO, L. F. Simulação de torção em projetos iniciais com solidworks simulation. **Revista de Engenharia de Produção**, Belo Horizonte, MG, Brasil, v. 28, n. 1, p. 67–75, 2016.

PLANCHARD, D. C. **Engineering Design with SolidWorks**. 2018-2019 edition. ed. Mission, KS: Schroff Development Corporation, 2018.

SILVA, F. L.; RODRIGUES, G. T. Utilização do ansys na simulação de torção em veículos comerciais. **Revista de Simulação Computacional**, Curitiba, PR, Brasil, v. 19, n. 2, p. 98–110, 2018.

SILVA, T. R.; COSTA, L. P.; FREITAS, S. Analysis of critical points in van chassis-body connections. **International Journal of Structural Integrity**, Emerald Publishing, v. 9, n. 4, p. 567–578, 2018.

VOLKSWAGEN CAMINHÕES E ÔNIBUS. **VW Constellation 24.330: Especificações Técnicas**. 12^a edição. ed. Brasil, 2020.

WRIGHT, P. H.; DIXON, K. K. **Highway Engineering**. 8. ed. Hoboken: Wiley, 2017.

ZHANG, X.; LU, Y.; CHEN, M. Application of composite materials in van structures. **Materials Science and Engineering A**, Elsevier, v. 768, p. 136389, 2019.