

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ

ITACIR SIRTOLI JUNIOR

OTIMIZAÇÃO DO PERFIL DA LONGARINA DE UM SEMIRREBOQUE

**CASCADEL – PR
2019**

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ

ITACIR SIRTOLI JUNIOR

OTIMIZAÇÃO DO PERFIL DA LONGARINA DE UM SEMIRREBOQUE

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Mecânica, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Professor Orientador: Sergio Henrique Rodrigues Mota

**CASCADEL – PR
2019**

**CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ
ITACIR SIRTOLI JUNIOR**

OTIMIZAÇÃO DO PERFIL DA LONGARINA DE UM SEMIRREBOQUE

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário FAG,
como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, sob
orientação do Professor (a) Sergio Henrique Rodrigues Mota

BANCA EXAMINADORA



Orientador Prof. MSc. MBA. Sergio Henrique Rodrigues Mota
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheiro Mecânico



Professor MSc. Esp. Carlos Alberto Breda
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheiro Mecânico



Professor Esp. Geovane Duarte Pinheiro
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheiro de Controle e Automação

Cascavel, 26 de novembro de 2019.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, à minha namorada Sibeli, ao meu irmão Alex e, em especial, aos meus pais, Itacir Sirtoli e Norma Couto, pelo apoio incondicional em toda a minha trajetória.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer por este momento, por esta oportunidade de aprendizado. Todos nós temos sonhos, objetivos e metas; e valorizar cada instante, seja ele qual for, é essencial para o nosso crescimento.

Agradeço à minha família e amigos, que sempre me apoiaram e torcem pelo meu crescimento pessoal e profissional.

Em especial à minha namorada Sibeli Scheuermann, que sempre está ao meu lado, me incentivando, me motivando a seguir em frente; agradeço pelo seu companheirismo, amor e amizade.

Ao meu pai Itacir, minha mãe Norma e meu irmão Alex, que nunca mediram esforços em todas as fases da minha vida; sem eles, nada disso seria possível, sou eternamente grato.

À minha prima Jacqueline, que me auxiliou na conclusão deste trabalho, e pelos anos de amizade.

Quero agradecer, também, ao meu orientador, mestre Sergio Henrique Rodrigues Mota, que sempre me auxiliou quando solicitado, dedicando um pouco do seu tempo e contribuindo com experiência e conhecimento para a realização desta pesquisa.

Agradeço, também, a todos os outros mestres do curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário Fundação Assis Gurgacz, que compartilharam um pouco dos seus conhecimentos e foram essenciais para minha formação.

Agradeço, ainda, a todos os amigos e colegas de profissão que fiz durante os anos de faculdade.

RESUMO

A necessidade da busca constante de aprimoramento para atender de modo eficaz ao mercado competitivo e à satisfação dos clientes, assim como atender às normas de segurança, com um melhor custo-benefício, faz com que empresas no ramo de implementos rodoviários busquem potencializar os seus resultados. Diante disso, este trabalho surge como uma alternativa para a redução do peso da estrutura de um semirreboque e, conseqüentemente, para o aumento da sua capacidade de carga, atendendo às normas referentes aos limites de peso. Este trabalho foi desenvolvido com base em informações de projetos de uma empresa particular fabricante de implementos rodoviários, situada na cidade de Cascavel, no estado do Paraná. O objetivo da pesquisa é otimizar o perfil da longarina de um semirreboque carrega-tudo 3 eixos. Para isso, a metodologia aplicada para alcançar os resultados foi baseada em uma análise numérica, com a utilização do software Solidworks 2018, pelo método dos elementos finitos, considerando um carregamento estático. Nesse contexto, para alcançar os resultados, foi necessário informar valores referentes aos limites de carga estabelecidos por normas. Também foram informadas as propriedades mecânicas dos aços estruturais utilizados. Com base nessas informações, foram descritas todas as etapas de pré-processamento e, ainda, foi realizado um teste de convergência de malha para garantir uma precisão maior nos resultados. Diante disso, foram realizadas algumas análises que levaram em consideração a longarina antes da otimização e, posteriormente, realizadas análises com o perfil otimizado. Nessa perspectiva, verificou-se que o perfil da longarina antes da otimização encontra-se superdimensionado. Com isso, foi proposta a otimização, com a utilização do perfil W460 x 52, que possui um fator de segurança de 2,6.

Palavras-chave: Carrega-tudo. Método dos elementos finitos. Aços estruturais.

ABSTRACT

The need to constantly strive for improvement to effectively serve the competitive market and customer satisfaction, as well as meet the most cost-effective safety standards, makes companies not in the field of road implements that can leverage your results. Given this, this work appears as an alternative to reduce the weight of the structure of a semi-trailer and, consequently, to increase its load capacity, meeting the standards regarding weight limits. This work was developed based on project information from a private road implement manufacturer located in Cascavel, Paraná State. The aim of the research is to optimize the profile of stringer of the 3-axle all-purpose lowboy trailer. For this, the methodology applied to achieve the results was based on a numerical analysis, using Solidworks 2018 software, by the finite element method, considering a static loading. In this context, to achieve the results, it was necessary to inform values regarding the load limits established by standards. The mechanical properties of the structural steels used were also informed. Based on this information, all the preprocessing steps were described and a mesh convergence test was performed to ensure greater accuracy in the results. Given this, some analyzes were performed that took into account the stringer before optimization and subsequently performed analyzes with optimized profile. From this perspective, it was found that the profile of the stringer before optimization is oversized. Thus, the optimization was proposed, using the W460 x 52 profile, which has a security factor of 2,6.

Keywords: Lowboy Trailer. Finite Element Method. Structural steels.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Veículo trator.....	21
FIGURA 2: Semirreboque.....	21
FIGURA 3: Reboque.....	22
FIGURA 4: Semirreboque carrega-tudo.....	22
FIGURA 5: Chassi de semirreboque.....	23
FIGURA 6: Cargas externas.....	24
FIGURA 7: Desenho técnico perfil W.....	28
FIGURA 8: Tabela simplificada de bitolas de perfis estruturais.....	29
FIGURA 9: Alguns elementos finitos comuns.....	33
FIGURA 10: Resultados de refino da malha.....	34
FIGURA 11: Modelo CAD semirreboque carrega-tudo 3 eixos.....	35
FIGURA 12: Estrutura do semirreboque.....	36
FIGURA 13: Especificações técnicas VW Constellation 26.420.....	37
FIGURA 14: Definição da carga útil.....	38
FIGURA 15: Modelo CAD semirreboque carrega-tudo 3 eixos simplificado.....	39
FIGURA 16: Propriedades do material ASTM A572 GR50.....	39
FIGURA 17: Propriedades do material ASTM A36.....	40
FIGURA 18: Modelo discretizado.....	41
FIGURA 19: Contato local entre elemento de viga e de casca.....	41
FIGURA 20: Região de acoplamento por meio de pino rei.....	42
FIGURA 21: Região de engaste com o veículo trator.....	42
FIGURA 22: Modelo simplificado da suspensão do semirreboque.....	43
FIGURA 23: Regiões de engaste da suspensão.....	43
FIGURA 24: Carga distribuída na travessa.....	44
FIGURA 25: Pontos de aplicação de carga.....	45
FIGURA 26: Modelo discretizado sem controle de malha.....	46
FIGURA 27: Modelo discretizado - Tamanho do elemento de viga de 100 mm.....	46
FIGURA 28: Gráfico de convergência da malha.....	47
FIGURA 29: Gráfico de deslocamento do perfil W460 x 106.....	49
FIGURA 30: Gráfico de tensão perfil W460 x 106.....	49
FIGURA 31: 1ª análise - Tensão máxima.....	50
FIGURA 32: 1ª análise - Deslocamento máximo.....	50

FIGURA 33: 1ª análise - Fator de segurança.....	51
FIGURA 34: 1ª análise - Tensão na longarina.....	51
FIGURA 35: 1ª análise - Tensão na longarina com carga aplicada na travessa 17.....	52
FIGURA 36: Gráfico de deslocamento do perfil W460 x 52.....	54
FIGURA 37: Gráfico de tensão perfil W460 x 52.....	54
FIGURA 38: 2ª análise - Tensão máxima.....	55
FIGURA 39: 2ª análise - Deslocamento máximo.....	55
FIGURA 40: 2ª análise - Fator de segurança.....	56
FIGURA 41: 2ª análise - Tensão na longarina.....	56
FIGURA 42: 2ª análise - Tensão na longarina com carga aplicada na travessa 17.....	57
FIGURA 43: Gráfico de deslocamento do perfil W360 x 32,9.....	59
FIGURA 44: Gráfico de tensão perfil W360 x 32,9.....	59
FIGURA 45: 3ª análise - Tensão máxima.....	60
FIGURA 46: 3ª análise - Deslocamento máximo.....	60
FIGURA 47: 3ª análise - Fator de segurança.....	61

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Limites máximos de peso.....	26
TABELA 2: Propriedades mecânicas.....	27
TABELA 3: Características do aço ASTM A572 Grau 50.....	27
TABELA 4: Resultado do teste de convergência da malha.....	47
TABELA 5: Resultado da simulação do perfil W460 x 106.....	48
TABELA 6: Peso do quadro do chassi antes da otimização.....	52
TABELA 7: Resultado da simulação do perfil W460 x 52.....	53
TABELA 8: Peso do quadro do chassi com o perfil W460 x 52.....	57
TABELA 9: Resultado da simulação do perfil W360 x 32,9.....	58
TABELA 10: Peso do quadro do chassi com o perfil W360 x 32,9.....	61

LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1: Tensão equivalente de Von Mises.....	30
EQUAÇÃO 2: Tensão equivalente de Von Mises em termos das tensões aplicadas.....	30
EQUAÇÃO 3: Coeficiente de segurança.....	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CAD – *Computer Aided Design* (Desenho Auxiliado por Computador)

CAE – *Computer Aided Engineering* (Engenharia Auxiliada por Computador)

CAT – Certificado de Adequação à Legislação de Trânsito

CMT – Capacidade Máxima de Tração

CNT – Confederação Nacional de Transporte

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento

CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito

C.S. – Coeficiente de segurança

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

E – Módulo de elasticidade ou módulo de Young

f_u – Limite de resistência

f_y – Limite de escoamento

G – Módulo de elasticidade transversal

GDL – Graus de liberdade

kg – Quilograma

kg/m³ – Quilograma por metro cúbico

kN/m³ – Quilonewton por metro cúbico

m – Metro

MEF – Método dos Elementos Finitos

mm – Milímetro

Mpa – Megapascal

NBR – Norma Brasileira

PBT – Peso Bruto Total

PBTC – Peso Bruto Total Combinado

1-D – Uma dimensão

2-D – Duas dimensões

3-D – Três dimensões

ν – Coeficiente de Poisson

γ – Peso específico

σ_1 – Tensão principal 1

σ_2 – Tensão principal 2

σ_3 – Tensão principal 3

σ_x – Tensão principal no eixo x

σ_y – Tensão principal no eixo y

σ_z – Tensão principal no eixo z

σ' – Tensão equivalente de Von Mises

τ_{xy} – Tensão de cisalhamento em xy

τ_{yz} – Tensão de cisalhamento em yz

τ_{zx} – Tensão de cisalhamento em zx

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo geral	17
1.1.2	Objetivos específicos	17
1.2	JUSTIFICATIVA	18
1.3	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	19
1.4	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1	SEMI-REBOQUE	21
2.2	LONGARINA	23
2.3	TIPOS DE CARGAS	23
2.4	ÓRGÃO REGULAMENTADOR	25
2.4.1	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte	25
2.4.1.1	Resolução nº1	25
2.5	AÇOS ESTRUTURAIS	26
2.5.1	Propriedades dos aços estruturais utilizados	27
2.5.2	Perfis laminados	28
2.5.3	Esforços atuantes em vigas	29
2.5.4	Critério de falha em materiais dúcteis	29
2.6	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)	31
2.6.1	Tipos de elementos	32
2.6.2	Ordem dos elementos	34
2.6.3	Convergência da malha	34
3	ENCAMINHAMENTOS METODOLÓGICOS	35
3.1	DESCRIÇÃO DO MODELO	36
3.2	DEFINIÇÃO DAS CARGAS ATUANTES CONFORME NORMAS	36
3.3	ANÁLISE COMPUTACIONAL PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1	1ª ANÁLISE – VERIFICAÇÃO DO PERFIL W460 X 106	48
4.2	2ª ANÁLISE – OTIMIZAÇÃO COM BASE NO PERFIL W460 X 52	53
4.3	3ª ANÁLISE – OTIMIZAÇÃO COM BASE NO PERFIL W360 X 32,9	58

5	CONCLUSÃO.....	62
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	63
5.2	LIMITAÇÕES.....	63
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64

1 INTRODUÇÃO

A principal modalidade de transporte de carga presente na atualidade são as rodovias. Segundo a Confederação Nacional de Transporte (CNT, 2018), 61,1% de toda a carga transportada é por meio das rodovias. Nessa conjuntura, os semirreboques têm a necessidade de suprir grande parte da demanda de transporte de carga imposta pelo mercado mundial. Com base nisso, os semirreboques carrega-tudo desempenham importante função no que diz respeito à agilidade de transporte de equipamentos pesados.

Dado o exposto, o presente trabalho apresenta uma análise estrutural com base em dados pertinentes a uma empresa particular fabricante de implementos rodoviários, situada em Cascavel, no Paraná. Para realização desse estudo, foi utilizado um projeto de um semirreboque carrega-tudo 3 eixos de 21 metros de comprimento. A análise desse equipamento teve por objetivo a redução do peso de sua estrutura e, conseqüentemente, um aumento na capacidade de carga, visto que esses semirreboques devem seguir normas referentes ao seu Peso Bruto Total Combinado (PBTC). Diante disso, a análise computacional foi desenvolvida com a utilização do software Solidworks 2018, visando à otimização da longarina do chassi.

Sob a mesma ótica, o objetivo geral do trabalho é a otimização do perfil da longarina, enquanto os objetivos específicos levaram em consideração as cargas atuantes determinadas por normas, assim como as propriedades dos materiais utilizados no chassi do semirreboque. Já a metodologia da pesquisa se deu por meio de análises computacionais pelo método dos elementos finitos, com a utilização do software Solidworks 2018.

Nessa perspectiva, para dar credibilidade a este trabalho, foi necessário buscar por referenciais teóricos. Diante disso, este trabalho visa contribuir para o desenvolvimento das pessoas e empresas no que se refere a uma análise estrutural com a utilização de softwares de elementos finitos. Sob o mesmo prisma, a obtenção do seu resultado poderá contribuir para um menor gasto de material em projetos de longarinas. Mediante a isso, foi realizado um estudo de caso que verificou o dimensionamento da longarina utilizada pela empresa analisada, e foi proposta uma configuração otimizada do perfil da longarina.

A disposição deste trabalho se dá através de tópicos. Nesse contexto, podemos verificar, inicialmente, o objetivo geral e os objetivos específicos, com base no tema do trabalho que é a otimização do perfil da longarina. Em seguida, é apresentada a justificativa do trabalho, que descreve a importância da sua análise. Após isso, é apresentada a caracterização do problema, assim como a delimitação da pesquisa. Em seguida, é

demonstrada a revisão bibliográfica, com tópicos referentes ao semirreboque, a exemplo da longarina, que é um componente integrante do chassi da estrutura do semirreboque.

Na sequência, são apresentados tópicos relacionados aos tipos de cargas, bem como ao órgão regulamentador responsável pelo controle dos limites de cargas. Do mesmo modo, são apresentadas as propriedades dos aços estruturais utilizados, assim como algumas variações de bitolas de perfil W, que podem ser utilizados para a fabricação do chassi, conforme dados obtidos com o fornecedor. Após isso, são apresentados os esforços atuantes em vigas e também o critério de falha para os materiais dúcteis.

Posteriormente, no que abrange o referencial teórico, é apresentado um tópico sobre o Método dos Elementos Finitos (MEF), que apresenta conceitos referentes aos tipos de elementos, a ordem desses elementos e ainda uma descrição sobre a convergência de malha. Por fim, são apresentados os encaminhamentos metodológicos, demonstrando todas as etapas percorridas para a obtenção do resultado, assim como os resultados para cada uma das análises executadas e a conclusão dos resultados obtidos. No intuito de analisar este trabalho por outras perspectivas, foram deixadas algumas sugestões de trabalhos futuros.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Otimizar o perfil da longarina de um semirreboque carrega-tudo 3 eixos.

1.1.2 Objetivos específicos

- Estabelecer as cargas atuantes exercidas sobre a estrutura do semirreboque, de acordo com as normas que regem os limites máximos de carregamento para um semirreboque carrega-tudo 3 eixos, de uma empresa particular.
- Pesquisar as informações técnicas do material utilizado no chassi do semirreboque conforme dispõe o fornecedor.
- Verificar se o perfil da longarina encontra-se superdimensionado, através de uma análise computacional pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), com a utilização do software Solidworks e considerando um carregamento estático.
- Propor uma nova configuração otimizada do perfil da longarina, com base na simulação computacional através do software Solidworks para carregamento estático.

- Realizar um teste de convergência de malha, para melhor precisão dos resultados.

1.2 JUSTIFICATIVA

Atualmente, as rodovias apresentam-se como o principal meio de circulação para transporte de cargas. Segundo a Confederação Nacional de Transporte (CNT, 2018), 61,1% de toda a carga transportada se dá por meio do modal rodoviário. Diante disso, verifica-se ainda que os principais veículos utilizados para esses transportes são os reboques e os semirreboques. Dentre os tipos de semirreboques, está o semirreboque carrega-tudo, o qual possui uma relevante função no cenário atual, visto que as cargas transportadas por eles são equipamentos do segmento da terraplanagem, agricultura, entre outros.

Dado o exposto, os semirreboques carrega-tudo vêm desempenhando uma importante função, principalmente quanto à agilidade no transporte de maquinários agrícolas, os quais são muito solicitados em várias regiões do Brasil. Segundo a CONAB (2019), a estimativa de produção de grãos, para a safra 2018/19, é de 235,3 milhões de toneladas. Verifica-se, com isso, que o crescimento da produção deverá ser de aproximadamente 3,4%; logo, 7,7 milhões de toneladas a mais que a safra anterior. Em consequência a esse aumento, os semirreboques carrega-tudo são utilizados para suprir a necessidade de deslocamento dos maquinários agrícolas de modo ágil, eficiente e correto, conforme as normas para transportes de cargas indivisíveis. Diante disso, se faz válida a pesquisa referente ao semirreboque.

Sob o mesmo prisma, outro fator relevante para elaboração deste trabalho foi a realização de estágio em uma empresa fabricante de implementos rodoviários, na qual o autor verificou a necessidade de se atribuir técnicas de engenharia, visto que, até então, a empresa apresentava uma carência nesse setor pelo fato de ser nova no mercado. Porém, essa empresa buscava os melhores conceitos e técnicas para afirmar a sua qualidade. Desse modo, este trabalho busca realizar uma análise estrutural para obter maior precisão de seus projetos. De acordo com Martha (2017), análise estrutural é a etapa de projeto na qual se idealiza o comportamento da estrutura em questão, utilizando dados de carregamentos e solicitações que devem ser informados antecipadamente. Dessa maneira, é possível obter valores referentes às deformações, tensões e deslocamentos da estrutura do projeto analisado.

Em suma, não era possível afirmar se a estrutura dos equipamentos da empresa particular encontrava-se superdimensionada, devido às incertezas do seu projeto. Diante disso, esse estudo tem por objetivo realizar essa análise estrutural com a utilização do software Solidworks, pelo método dos elementos finitos em um semirreboque carrega-tudo 3 eixos,

para que, dessa forma, mais informações sejam conhecidas sobre o equipamento, principalmente quanto à sua capacidade de carga e resistência. Assim, torna-se possível a realização de um projeto otimizado da longarina do semirreboque carrega-tudo.

Sob a mesma ótica, nota-se que empresas do ramo de implementos rodoviários buscam, cada vez mais, uma qualificação técnica e profissional, tendo em vista a necessidade de melhorias quanto a segurança, confiabilidade e redução de seus custos, gerando um maior lucro e garantindo a sua competitividade no mercado mundial. Portanto, essa pesquisa contribui para o desenvolvimento dessas empresas.

Diante do exposto, é observado que a falta de informação das empresas acaba por gerar um gasto de material desnecessário, uma vez que o equipamento pode estar superdimensionado, maximizando o impacto ambiental negativo. Pretende-se, então, por meio desta pesquisa, a redução do desperdício de materiais produzidos por essas empresas, através do estudo de otimização. Desse modo, é possível a redução da massa da estrutura e, conseqüentemente, um maior carregamento líquido sobre ela, visto que os equipamentos seguem normas referentes ao seu Peso Bruto Total (PBT).

Por fim, podemos constatar que estudos direcionados à análise estrutural em implementos rodoviários, por meio de software de Engenharia Auxiliada por Computador (CAE – *Computer Aided Engineering*) pelo método dos elementos finitos, contribuem para agregar conhecimento na área da Engenharia Mecânica.

1.3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Como otimizar o perfil da longarina de um semirreboque carrega-tudo 3 eixos e aumentar a capacidade de carga?

1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa será fundamentada em dados pertinentes a uma indústria particular, fabricante de implementos rodoviários, que está situada na região oeste do Paraná, na cidade de Cascavel.

O equipamento selecionado para a pesquisa será um semirreboque carrega-tudo 3 eixos de 21 metros de comprimento. O referente produto não se encontra disponível na empresa para verificações *in loco*. Dessa forma, o estudo seguirá os parâmetros do projeto de

modo simplificado, respeitando suas dimensões e materiais disponibilizados pela própria empresa.

Acerca dessas informações, o componente do equipamento adotado para ser analisado foi a longarina.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 SEMIRREBOQUE

Com base no DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, na Resolução nº 1, de 14 de janeiro de 2016, Art. 4º, entende-se que o veículo automotor responsável pela tração do reboque ou de um semirreboque é denominado de veículo trator (Figura 1). Além disso, define que um veículo que apresenta um ou mais eixos, o qual é engatado a um veículo motor, pode ser chamado de semirreboque, quando este for apoiado ao veículo trator, conforme Figura 2; e também pode ser denominado de reboque, quando for ligado por meio de uma articulação, visto na Figura 3.



Figura 1: Veículo trator.

(Fonte: Iveco, 2019).



Figura 2: Semirreboque.

(Fonte: Randon Implementos, 2019).



Figura 3: Reboque.

(Fonte: Teixeira Implementos Rodoviários, 2019).

Dado o exposto, a norma ABNT 9762 (2012) também descreve que um semirreboque carrega-tudo (Figura 4) é um tipo de implemento rodoviário que apresenta como característica o fato de possuir um compartimento de carga aberto, com a sua estrutura inteira, não apresentando articulações. Esse modelo de semirreboque é projetado para atender à demanda de transporte de cargas específicas, que possuem um peso elevado, com cargas concentradas e também cargas indivisíveis.



Figura 4: Semirreboque carrega-tudo.

(Fonte: Teixeira Implementos Rodoviários, 2019).

Segundo Silva (2013), o semirreboque possibilita variados tipos de carregamento de carga, com pesos elevados e de grandes dimensões, por meio de modal rodoviário. Além disso, tem como característica o fato de não possuir propulsão motora, logo necessita ser tracionado. Sob o mesmo prisma, apresenta como ponto positivo o fato de que o semirreboque permite o acoplamento com vários modelos de veículos tratores de forma ágil e simples, o que favorece o quesito de intercambiabilidade.

2.2 LONGARINA

Conforme Nascimento (2009), o conjunto que necessita de melhor planejamento em um projeto de semirreboque é o chassi, uma vez que serve de base para os demais subconjuntos. Dessa maneira, essa é a parte mais solicitada, pelo fato de que a maior parte das cargas e esforços é transmitida a ele.

Silva (2013) descreve o conceito base de um chassi de semirreboque (Figura 5), o qual é constituído por uma estrutura que apresenta duas longarinas no eixo longitudinal e travessas que fazem a união dessas longarinas.

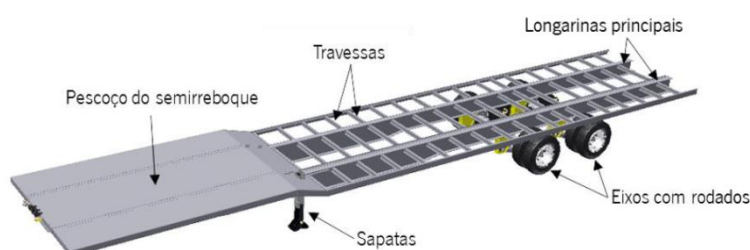


Figura 5: Chassi de semirreboque.

(Fonte: Rui Manuel Alves da Silva, 2013).

A longarina, por sua vez, é o principal componente da estrutura do chassi, sendo disposta de maneira longitudinal ao eixo do veículo (NBR 11412, 2011).

Boaretto (2012) confirma a ideia de que a longarina é o item que desempenha a função principal no que diz respeito à estrutura de um chassi. Além disso, para o seu projeto, devem ser levadas em consideração as legislações vigentes referentes à distribuição de carga. Boaretto (2012) descreve, ainda, o fato de que o dimensionamento da longarina deve respeitar as necessidades geométricas para o acoplamento com o veículo trator e também com a sua suspensão e, com isso, obter uma resposta positiva quanto à sobrecarga originada dessa suspensão e do seu acoplamento.

2.3 TIPOS DE CARGAS

Hibbeler (2010) explica os princípios da resistência dos materiais e descreve que, para o projeto de qualquer máquina ou estrutura, é necessário utilizar os conceitos da estática para estabelecer as forças que atuam sobre os elementos, e também ressalta a importância quanto ao tipo de material para obtenção do resultado. Em relação às forças atuantes, que também denomina de cargas externas (Figura 6), o autor em questão descreve que, quando um

corpo se encontra em contato direto com a superfície de outro, é dado o nome de força de superfície. Nesse contexto, comenta que, quando uma força é submetida a uma área pequena ao se analisar a totalidade de um corpo, é chamada de força concentrada. Dado o exposto, destaca, ainda, que carga distribuída linear é quando uma carga atua ao longo de uma área estreita. E, por fim, denomina a força de corpo, que é caracterizada por ser uma carga concentrada, que age no centro de gravidade do corpo. Essa carga é mais conhecida como o seu próprio peso.

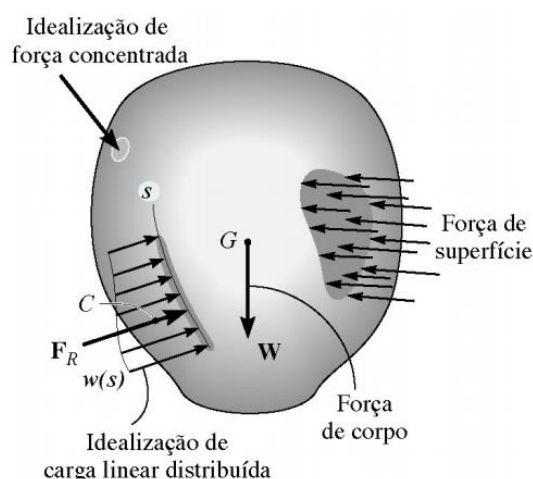


Figura 6: Cargas externas.

(Fonte: R.C HIBBELER, 2010).

Segundo Gaviraghi (2005), as longarinas estão sujeitas a vários tipos de cargas, que podem se apresentar de maneira distribuída, concentrada e, ainda, de forma combinada.

Conforme Norton (2013), cargas estáticas são caracterizadas pelo fato de sua aplicação ser de maneira lenta e permanecer constante em função do tempo. As cargas dinâmicas podem ser aplicadas de maneira súbita, como uma carga de impacto; e ainda podem ser cargas variadas repetidamente em função do tempo, que seria chamado de carga de fadiga. Ambos os casos poderiam acontecer simultaneamente em cargas dinâmicas.

De acordo com Karaoglu (*apud* GAVIRAGHI, 2005), o carregamento estático é resultante de um somatório de cargas em função do peso do veículo e da carga aplicada sobre a sua estrutura. Nesse contexto, o autor comenta, ainda, que as forças que atuam sobre o quadro da estrutura proporcionam a flexão da longarina e dos demais componentes do chassi.

Dado o exposto, a Resolução nº 1 do DNIT (2016) apresenta uma carga que se denomina de indivisível. Esse nome se dá pelo fato de essa carga ser apresentada como um único equipamento, com pesos e dimensões superiores aos permitidos. Desse modo, faz-se necessária a utilização de um transporte especial que ofereça uma capacidade de carga que

atenda às necessidades solicitadas. Dessa maneira, é importante possuir uma suspensão adequada, uma estrutura forte, com dimensões apropriadas. O equipamento que se enquadra nessas características é o semirreboque carrega-tudo. Como exemplos de carga indivisível estão as máquinas agrícolas, as pás eólicas, os transformadores, as máquinas de uso industrial e de construção, entre outros.

2.4 ÓRGÃO REGULAMENTADOR

2.4.1 Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

A sede do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT) fica localizada em Brasília. O DNIT é considerado uma autarquia federal que possui vínculo com o Ministério de Transportes. Dentre os objetivos do departamento, está a implementação da Política de Infraestrutura, cabendo a ele a função de manutenção e melhorias nas vias federais, com a utilização de recursos da União. Dessa maneira, o DNIT é o responsável pela gestão e execução das vias navegáveis, como rodovias federais e ferrovias.

Dado o exposto, outra atribuição do DNIT é o fato de ele ser o órgão competente para fazer valer as ações do Art. 21 do Código de Trânsito Brasileiro. Dessa forma, uma das funções a se destacar é o fato de o órgão ser o responsável pela aplicação de multas quanto ao excesso de peso, o qual é aferido com a utilização de lombadas eletrônicas e através dos postos de pesagens (DNIT, 2018).

2.4.1.1 Resolução nº 1

A Resolução nº 1, de 14 de janeiro de 2016, do DNIT, tem como objetivo regulamentar o uso das rodovias federais quanto ao transporte de cargas indivisíveis e excedentes em dimensões e pesos, e também regulamentar o trânsito dos veículos especiais.

O Art. 5º da resolução em questão descreve que, para o transporte de cargas indivisíveis, é necessária a utilização de veículos adequados, os quais devem apresentar um bom estado de conservação, com estrutura e potência motora compatível à força de tração necessária.

No terceiro parágrafo do Art. 5º, é informado sobre a necessidade de o veículo trator possuir uma Capacidade Máxima de Tração (CMT) que atenda aos valores referentes ao Peso Bruto Total Combinado (PBTC). Logo, a CMT deve ser igual ou superior ao PBTC.

Por fim, no Art. 8º, são especificados os limites máximos de peso por eixo ou conjuntos de eixos, para veículos que possuem eixos com suspensão mecânica ou pneumática ou hidropneumática. De maneira resumida, as aplicações dos limites máximos para algumas situações podem ser verificadas na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1: Limites máximos de peso.

	Eixos isolados Distância entre eixos > 2,40	02 eixos, em tandem Distância entre eixos $1,50\text{ m} \geq D \leq 2,40\text{ m}$	03 eixos, em tandem Distância entre eixos $1,50\text{ m} \geq D \leq 2,40\text{ m}$
02 pneumáticos por eixos	7,5 toneladas		
04 pneumáticos por eixos	12,0 toneladas	24,0 toneladas	30,0 toneladas
08 pneumáticos por eixos	16,0 toneladas	24,0 toneladas	36,0 toneladas

(Fonte: DNIT, 2016).

2.5 AÇOS ESTRUTURAIS

De acordo com Chiaverini (2008), os aços utilizados em estruturas podem ser divididos em aços carbonos e aços de alta resistência e baixo teor de liga.

Os aços carbonos devem respeitar alguns requisitos referentes a ductilidade, homogeneidade, uma boa soldabilidade, ser suscetível a cortes por chama sem ocasionar o seu endurecimento, possuir uma razoável resistência à corrosão e também apresentar um valor elevado na relação entre limite de resistência e limite de escoamento. No que se refere à utilização dos aços de alta resistência e baixo teor de liga, podemos visualizar que esses aços seguem uma tendência moderna que visa ao uso de estruturas cada vez maiores. Desse modo, esses aços de maior resistência são utilizados para evitar o aumento excessivo do peso nas estruturas e, assim, minimizar a utilização de peso morto nas estruturas (CHIAVERINI, 2008).

Sob o mesmo contexto, os aços de alta resistência e baixa liga são muito úteis quando se deseja um acréscimo na resistência, o que permite um aumento da carga unitária da estrutura ou ainda a redução proporcional da sua secção, sendo possível, desse modo, a utilização de perfis de secção mais leves. Outra característica desse aço é quando se deseja aumentar a sua resistência à corrosão atmosférica, assim como melhorar a resistência ao choque e ao limite de fadiga e, por fim, quando se deseja uma maior relação do limite de

escoamento para o limite de resistência à tração, sem perdas consideráveis de ductilidade (CHIAVERINI, 2008).

2.5.1 Propriedades dos aços estruturais utilizados

O catálogo Gerdau (2014) de barras e perfis apresenta os aços da linha ASTM comercializados pela empresa e também as características desses materiais. Dentre eles, está o aço ASTM A36, que é classificado como um aço-carbono. Os valores relacionados às suas propriedades mecânicas podem ser visualizados na Tabela 2. O aço ASTM A36 tem como principais aplicações a utilização em implementos rodoferroviários, máquinas e implementos agrícolas, estruturas metálicas em geral, serralheria e passarelas. O catálogo Gerdau (2014) também apresenta o aço ASTM A572 Grau 50, o qual é um aço estrutural de baixa liga e alta resistência, e suas propriedades mecânicas também são demonstradas na Tabela 2. As principais aplicações do aço ASTM A572 Grau 50 ocorrem em torres de transmissão de energia, passarelas, máquinas e implementos agrícolas, estruturas metálicas em geral e implementos rodoferroviários.

Tabela 2: Propriedades mecânicas.

Especificação	Limite de Escoamento (f_y) Mín. (MPa)	Limite de Resistência (f_u) Mín. (MPa)	Alongamento 200 mm (%)	Alongamento 50 mm (%)
ASTM A36	250	400-550	20	21
ASTM A572 Grau 50	345	450	18	21

(Fonte: Gerdau, 2014).

Outras informações relevantes sobre o aço ASTM A572 Grau 50 podem ser visualizadas na Tabela 3 abaixo, conforme o manual de estacas metálicas da Gerdau (2018).

Tabela 3: Característica do aço ASTM A572 Grau 50.

Especificação	Módulo de elasticidade (E)	Coefficiente de Poisson (ν)	Módulo de elasticidade transversal (G)	Peso específico (γ)
ASTM A572 Grau 50	200.000 MPa	0,3	77.000 Mpa	77 kN/m ³

(Fonte: Gerdau, 2018).

2.5.2 Perfis laminados

Para a utilização dos materiais de aço-carbono e aço de alta resistência e baixa liga, verificam-se várias formas geométricas de produtos disponíveis, que podem ser classificados genericamente por perfis, barras e chapas, os quais podem se apresentar como cantoneiras, perfil C, perfil U enrijecido, perfil I, perfil H, entre outros (PINHEIRO, 2005).

Segundo Pinheiro (2005), a designação dos perfis laminados se dá pelo código literal, altura em (mm) e peso (kg/m). Um exemplo da utilização dessa designação é o perfil W460x106, o qual é um perfil I de abas largas e paralelas, com aproximadamente 460 mm de altura e 106 kg/m.

O perfil W, com suas respectivas cotas de referências para a determinação de suas dimensões, pode ser visualizado em um desenho técnico na Figura 7. Sob o mesmo prisma, são apresentadas algumas dimensões de perfil W por meio da Tabela de bitolas de perfis estruturais da Gerdau (2018), na Figura 8 abaixo.

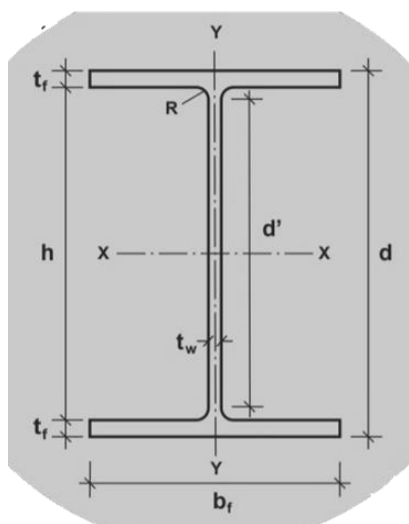


Figura 7: Desenho técnico perfil W.

(Fonte: Gerdau, 2018).

BITOLA mm x kg/m	Massa Linear kg/m	d mm	b _f mm	ESPESSURA		h mm	d' mm	Área cm ²
				t _w mm	t _f mm			
W 360 x 32,9	32,9	349	127	5,8	8,5	332	308	42,1
W 360 x 39,0	39,0	353	128	6,5	10,7	332	308	50,2
W 360 x 44,6	44,6	352	171	6,9	9,8	332	308	57,7
W 360 x 51,0	51,0	355	171	7,2	11,6	332	308	64,8
W 360 x 58*	58,0	358	172	7,9	13,1	332	308	72,5
W 360 x 64,0	64,0	347	203	7,7	13,5	320	288	81,7
W 360 x 72,0	72,0	350	204	8,6	15,1	320	288	91,3
W 360 x 79,0	79,0	354	205	9,4	16,8	320	288	101,2
W 360 x 91,0 (H)*	91,0	353	254	9,5	16,4	320	288	115,9
W 360 x 101,0 (H)*	101,0	357	255	10,5	18,3	320	286	129,5
W 360 x 110,0 (H)*	110,0	360	256	11,4	19,9	320	288	140,6
W 360 x 122,0 (H)*	122,0	363	257	13,0	21,7	320	288	155,3
W 410 x 38,8	38,8	399	140	6,4	8,8	381	357	50,3
W 410 x 46,1	46,1	403	140	7,0	11,2	381	357	59,2
W 410 x 53,0	53,0	403	177	7,5	10,9	381	357	68,4
W 410 x 60,0	60,0	407	178	7,7	12,8	381	357	76,2
W 410 x 67,0*	67,0	410	179	8,8	14,4	381	357	86,3
W 410 x 75,0*	75,0	413	180	9,7	16,0	381	357	95,8
W 410 x 85,0*	85,0	417	181	10,9	18,2	381	357	108,6
W 460 x 52,0	52,0	450	152	7,6	10,8	428	404	66,6
W 460 x 60,0	60,0	455	153	8,0	13,3	428	404	76,2
W 460 x 68,0*	68,0	459	154	9,1	15,4	428	404	87,6
W 460 x 74,0	74,0	457	190	9,0	14,5	428	404	94,9
W 460 x 82,0	82,0	460	191	9,9	16,0	428	404	104,7
W 460 x 89,0	89,0	463	192	10,5	17,7	428	404	114,1
W 460 x 97,0*	97,0	466	193	11,4	19,0	428	404	123,4
W 460 x 106,0*	106,0	469	194	12,6	20,6	428	404	135,1

Figura 8: Tabela simplificada de bitolas de perfis estruturais.

(Fonte: Gerdau, 2018).

2.5.3 Esforços atuantes em vigas

Conforme Hibbeler (2010), as vigas são projetadas para suportar as cargas aplicadas perpendicularmente aos seus eixos longitudinais. Mediante a essas cargas, as vigas acabam desenvolvendo uma força de cisalhamento interno e geram um momento fletor. Em geral, esses esforços variam ao longo do comprimento da viga.

Sob o mesmo contexto, quando houver a necessidade de a viga resistir tanto à tensão de cisalhamento como à de flexão, diz-se que ela é projetada com base na resistência. Para isso, as tensões de flexão e de cisalhamento não poderão ultrapassar a tensão admissível do material (HIBBELER, 2010).

2.5.4 Critério de falha em materiais dúcteis

Na criação de determinado projeto, é necessário estabelecer um limite superior para o estado de tensão; esse limite define a falha do material. Diante disso, os materiais dúcteis costumam adotar o limite de escoamento como limite de falha (HIBBELER, 2010).

De acordo com Norton (2013), várias teorias foram elaboradas para explicar a falha; dentre elas está a teoria de Von Mises-Hencky, que é a mais precisa. Dado o exposto, é importante salientar que em muitas situações verifica-se a presença de tensões normais

combinadas e tensão de cisalhamento no mesmo ponto. Para representar essa combinação, é utilizada a tensão equivalente de Von Mises (σ'). Essa tensão pode ser encontrada para os casos tridimensionais por meio da Equação 1 e também pode ser expressa em termos das tensões aplicadas pela Equação 2. Se o resultado dessa equação for maior ou igual ao limite de escoamento, significa que, pelo critério da tensão equivalente de Von Mises, esse material escoará, ocasionando a sua falha. As equações estão dispostas logo abaixo, respectivamente.

Tensão equivalente de Von Mises.

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 - \sigma_2 \cdot \sigma_3 - \sigma_1 \cdot \sigma_3} \quad (1)$$

Onde:

σ' : Tensão equivalente de Von Mises (MPa)

σ_1 : Tensão principal 1 (MPa)

σ_2 : Tensão principal 2 (MPa)

σ_3 : Tensão principal 3 (MPa)

Tensão equivalente de Von Mises em termos das tensões aplicadas.

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

Onde:

σ' : Tensão equivalente de Von Mises (MPa)

σ_x : Tensão principal no eixo x (MPa)

σ_y : Tensão principal no eixo y (MPa)

σ_z : Tensão principal no eixo z (MPa)

τ_{xy} : Tensão de cisalhamento em xy (MPa)

τ_{yz} : Tensão de cisalhamento em yz (MPa)

τ_{zx} : Tensão de cisalhamento em zx (MPa)

A partir dessa perspectiva, é possível determinar um coeficiente de segurança para os elementos estruturais e, dessa forma, assegurar o seu desempenho. Para isso, o limite de

tensão do material, no caso a tensão de escoamento, deve ser superior a tensão admissível. O fator de segurança é calculado conforme a Equação 3 abaixo (BEER *et al*, 2015).

$$C.S = \frac{\text{limite de tensão}}{\text{tensão admissível}} \quad (3)$$

Onde:

C.S: Coeficiente de segurança

2.6 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

Para Soriano (2009), o MEF é a ferramenta numérica mais eficiente quando se necessita da resolução de equações diferenciais com condições de contorno, pelo fato de haver programas atuais que trabalham de modo automático. Dessa maneira, é possível analisar praticamente o comportamento de qualquer sistema físico regido por equações diferenciais ou integrais.

Norton (2013) explica que o método analítico é principalmente aplicável quando se possui componentes de geometria simples. Entretanto, muitos componentes de máquinas possuem geometria complexa, o que dificulta o cálculo analítico e, por vezes, impossibilita esses cálculos. Com isso, faz-se válida a utilização do método dos elementos finitos, pois é possível dividir determinado volume em um conjunto finito de elementos contíguos e discretos e, assim, resolver um conjunto de equações referentes a cada elemento, bem como seus nós.

Norton (2013) descreve, ainda, que os cálculos de tensão e deformação são obtidos por essa divisão do componente em elementos finitos e discretos. Esses elementos são conectados pelos seus nós, e essa conexão de elementos é chamada de malha. Para obter um resultado com maior precisão referente aos valores das tensões, é necessário aumentar o número de elementos analisados, ocasionando, com isso, a redução do tamanho desse elemento. Contudo, esse refinamento do elemento provoca um aumento de tempo de processamento.

Segundo Azevedo (2003), o MEF é utilizado quando o objetivo da análise visa ganhos satisfatórios tanto em questões econômicas como em questões funcionais, pois podem ser realizadas inúmeras análises e modificações das características de um projeto de determinada estrutura.

De acordo com Melconian (2014), a resolução de um problema pelo MEF é subdividida em três etapas, sendo elas o pré-processamento, o processamento e o pós-processamento.

O pré-processamento é a etapa na qual utiliza-se um software de Desenho Auxiliado por Computador (CAD – *Computer Aided Design*) para a obtenção de arquivos compatíveis com o MEF. Dessa maneira, realiza-se a importação do CAD para o MEF com o objetivo de resolver o que for requerido. Nessa etapa, define-se o tipo de malha que discretiza o domínio em estudo, configurando o tipo e tamanho dos elementos que irão compor a malha. No pré-processamento, ainda são informadas as condições de contorno, tipo de contato (união), o valor da carga aplicada, as propriedades dos materiais, tipo de estudo, entre outros (MELCONIAN, 2014).

A etapa de processamento é o momento em que ocorre a formulação dos cálculos para a resolução dos problemas por meio de equações, levando em consideração todos os fatores aplicados no pré-processamento. O tempo de resolução dessas equações vai depender da complexidade da análise, devido à quantidade de elementos presentes na malha gerada pela discretização (MELCONIAN, 2014).

O pós-processamento é a etapa em que os resultados das análises definidas nos passos anteriores são apresentados. Os resultados podem ser visualizados por meio de gráficos, assim como em forma de superfície de resposta com cores, sendo possível, então, analisar o comportamento da estrutura, a distribuição dos esforços, a deformação, entre outras grandezas. Esses resultados ainda podem ser exibidos em forma de animação, mostrando o comportamento da peça deformada em vários instantes de tempo (MELCONIAN, 2014).

2.6.1 Tipos de elementos

Norton (2013) apresenta alguns elementos finitos comuns, que podem ser classificados como de uma dimensão, duas dimensões e três dimensões. Os elementos de uma dimensão são denominados de 1-D e sua característica principal é a presença de um elemento do tipo linha; os elementos de duas dimensões, chamados de 2-D, podem ser classificados como elementos de área e possuem elementos do tipo linha, triângulo e quadrilátero; e, por fim, os elementos de três dimensões (3-D) são classificados como elementos de volume, apresentando elementos do tipo linha, tetraedro e hexaedro. É possível, ainda, classificá-los quanto ao tipo de ordem: linear ou quadrático. O termo “ordem” refere-se à ordem da função

(normalmente um polinômio) que é utilizada para interpolar o deslocamento no interior do elemento.

Os elementos de 1-D, 2-D e 3-D definem a quantidade de graus de liberdade (GDL) em cada nó do elemento. Para exemplificar, Norton (2013) utilizou um elemento de linha, pois ele está presente em todas as dimensões apresentadas. Diante disso, o elemento do tipo linha em uma dimensão apresenta 2 GDL, um em cada nó. Isso representa um elemento de treliça que pode apenas transmitir força ao longo de seu comprimento e não suporta momento nos nós. Já os elementos de linha de duas dimensões têm 3 GDL em cada nó e podem representar uma viga 2-D, o que permite que sejam atribuídos força e momento em duas direções. Por último, os elementos de três dimensões possuem 6 GDL em cada nó e, com isso, é possível representar um eixo-viga 3-D. Esses elementos transmitem momentos e torque em adição às forças lineares nas três direções. Na Figura 9, abaixo, há uma representação de alguns tipos de elementos finitos.

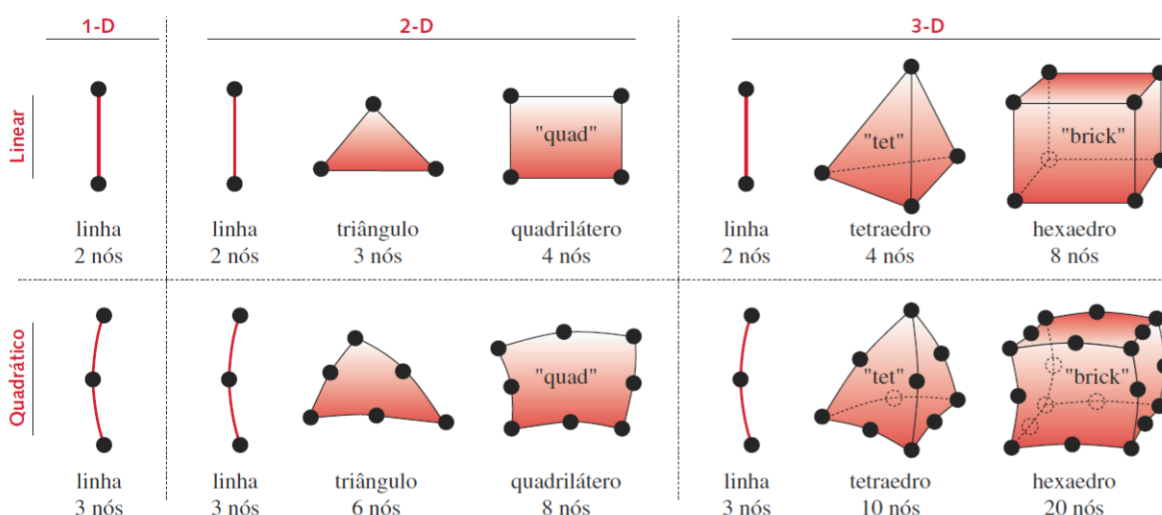


Figura 9: Alguns elementos finitos comuns.

(Fonte: Norton, 2013).

Conforme Solidworks (2018), no seu ambiente de simulação os elementos podem ser classificados como sólidos, casca e viga. Os elementos de viga são do tipo linha com 2 nós na extremidade e apresentam 6 GDL por nó, sendo 3 de translação e 3 de rotação. Os elementos denominados de casca são do tipo triangulares, podendo ser de primeira e segunda ordem com 6 GDL por nó. E, por fim, os elementos sólidos são elementos tetraédricos de primeira e segunda ordem e apresentam 3 GDL por nó.

2.6.2 Ordem dos elementos

Segundo Norton (2013), a ordem dos elementos está ligada à sua capacidade de aproximação de um resultado mais preciso nos cálculos das tensões. Contudo, utilizar elementos de ordem superiores acaba por aumentar significativamente o tempo de processo. Com isso, os analistas optam primeiramente pela utilização dos elementos de modelo linear (1ª ordem).

Os elementos lineares aplicam-se aos contornos retos, enquanto os elementos de ordem superior são utilizados em contornos curvos. Sendo assim, os elementos de ordem superior são a melhor opção quando se necessita de uma análise em peças de contornos complexos, possibilitando trabalhar com gradientes de tensão mais altos (NORTON, 2013).

2.6.3 Convergência da malha

O refinamento da malha é outro procedimento a ser tomado quando se tem por objetivo uma melhor precisão dos resultados. Em geral, o refinamento deve ser aplicado principalmente nas regiões de alta concentração de tensão (NORTON, 2013).

Para verificar se a malha foi suficientemente refinada, é aplicado um teste de convergência. O teste de convergência se dá a partir da execução dos cálculos com uma quantidade de elemento. Após isso, refina-se a malha diminuindo o tamanho dos elementos e executam-se os cálculos novamente. Com esse procedimento, é analisada a variação dos valores de tensão. Dessa forma, quando ocorrer uma diferença de tensão significativa entre os processos de refinamento, significa que a malha anterior ainda é muito grosseira. Porém, quando essa diferença de tensão se tornar menor, indica que a solução converge para um valor real. Para apresentar a convergência da malha, é usual a utilização de um gráfico como na Figura 10 (NORTON, 2013).

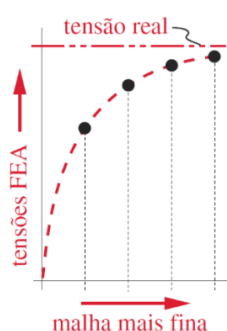


Figura 10: Resultados de refino da malha.

(Fonte: Norton, 2013).

3 ENCAMINHAMENTOS METODOLÓGICOS

Com o objetivo de alcançar a otimização da longarina de um semirreboque carregado, a elaboração deste trabalho apresenta um estudo de caso. Segundo Gil (2002), estudo de caso é uma modalidade de pesquisa que apresenta como característica a necessidade de um estudo intenso, que demanda muito tempo. Esses estudos têm como base poucos objetos, no intuito de se obter grande conhecimento sobre eles. Para Yin (2001), estudo de caso é um método de análise que objetiva obter informações de um conteúdo empírico, em que o pesquisador seleciona algumas variáveis específicas, no intuito de concentrar sua atenção a elas.

A partir da necessidade de se obter um bom embasamento teórico para o estudo de caso, foi realizada uma pesquisa bibliográfica. De acordo com Prodanov e Freitas (2013), pesquisa bibliográfica tem por objetivo a elaboração da contextualização da pesquisa. Dessa forma, é possível observar que o pesquisador busca manter-se atualizado, trazendo, com isso, informações relevantes referentes a artigos, monografias, teses, entre outros. Assim, o pesquisador desenvolve um caráter interpretativo em relação aos dados obtidos.

Dado o exposto, o componente analisado nesta pesquisa é a longarina de um semirreboque carrega-tudo 3 eixos, de 21 metros de comprimento. Diante disso, para ser possível a realização da análise, utilizou-se o modelo CAD 3D do semirreboque, que se encontrava modelado por meio do software Solidworks 2018. Assim, optou-se pela utilização do próprio software Solidworks 2018 para a análise computacional, devido à facilidade da importação do modelo CAD para o modelo CAE, além de o software possuir ferramentas capazes de gerar um bom resultado. O modelo em CAD do semirreboque carrega-tudo utilizado neste estudo pode ser visualizado na Figura 11, abaixo.

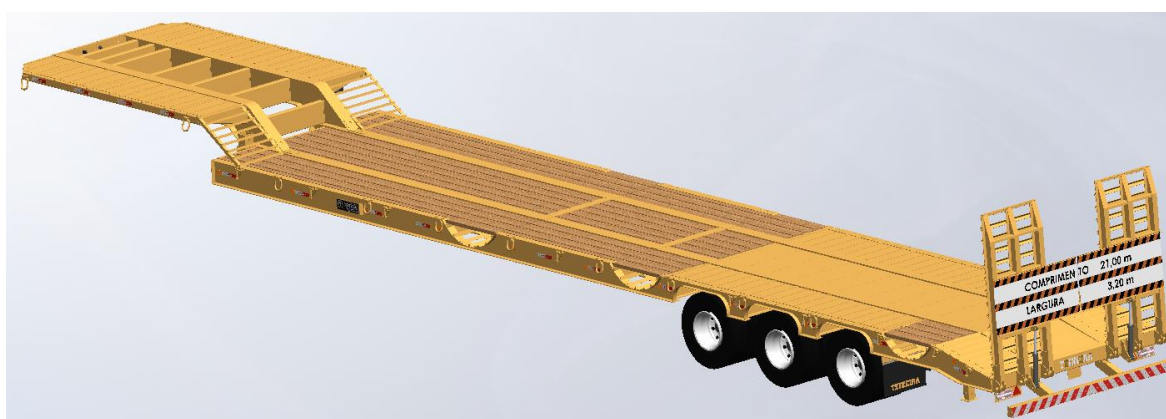


Figura 11: Modelo CAD semirreboque carrega-tudo 3 eixos.

(Fonte: Autor, 2019).

3.1 DESCRIÇÃO DO MODELO

As características dimensionais do semirreboque carrega-tudo analisado são as seguintes: 21 m de comprimento por 3,20 m de largura. O chassi é composto por duas longarinas, dois fechamentos laterais e por travessas passantes, sendo que todos esses componentes são perfis de vigas do tipo I laminado, de material ASTM A572 Grau 50. Diante disso, o componente do qual se deseja a otimização é a longarina, que possui dimensões conforme tabela de bitolas de perfis estruturais Gerdau (2018), para a bitola W460x106. Nesse âmbito, o pescoço do semirreboque é construído em chapa de aço ASTM A36. Por fim, o semirreboque apresenta 3 eixos, com um espaçamento de 1,51 m entre eixos. Também vale ressaltar que todos os componentes estruturais do semirreboque são unidos pelo processo de soldagem.

Nesse contexto, a estrutura do semirreboque com a denominação de seus componentes pode ser verificada por meio da Figura 12, abaixo.

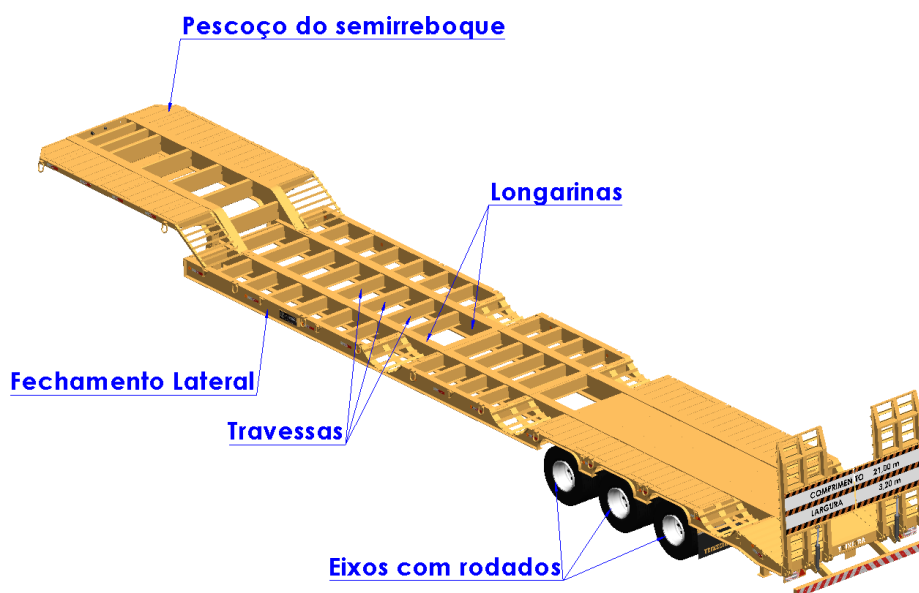


Figura 12: Estrutura do semirreboque.

(Fonte: Autor, 2019).

3.2 DEFINIÇÃO DAS CARGAS ATUANTES CONFORME NORMAS

No intuito de estabelecer os limites aplicados sobre a estrutura do semirreboque analisado, foram selecionados alguns critérios para determinação desse limite. Primeiramente, levou-se em consideração a Resolução nº 1 do DNIT, que regulamenta o uso das rodovias federais quanto ao transporte de cargas indivisíveis. Essa resolução leva em consideração as

características dimensionais do semirreboque para determinação dos limites máximos permitidos. As características utilizadas para essa determinação foram o fato de o semirreboque apresentar a combinação de 3 eixos, em tandem, com uma medida entre eixos de 1,51 m; e possuir 4 pneumáticos por eixos. Diante disso, atendendo à normativa da Resolução nº 1, o Peso Bruto Total (PBT) do semirreboque é de 30 toneladas. Outro fator relevante para a determinação dos limites é estabelecer a tara do semirreboque. Desse modo, foi adotada a tara de 10 toneladas, conforme informado pelo Certificado de Adequação à Legislação de Trânsito (CAT) da empresa particular analisada.

Posteriormente à definição do peso e PBT do semirreboque, foi definido um modelo de cavalo mecânico a fim de utilizar a combinação dos veículos de carga, no intuito de determinar o Peso Bruto Total Combinado (PBTC). Para isso, o cavalo mecânico utilizado foi um VW Constellation 26.420. Os valores referentes a sua tara e seu PBT homologado podem ser visualizados por meio da Figura 13, abaixo.

PESOS (kg)

Peso em ordem de marcha (Total)	8.715
Eixo dianteiro	4.644
Eixo traseiro	4.071
Capacidade técnica (Total)	26.500
Eixo dianteiro	6.500
Eixo traseiro	20.000
Peso bruto total (PBT) - homologado	23.000
Peso bruto total combinado (PBTC)	63.000
Capacidade máx. de tração (CMT)	63.000

Figura 13: Especificações técnicas VW Constellation 26.420.

(Fonte: Volkswagen Caminhões e Ônibus, 2019).

Por fim, levou-se em consideração a Resolução nº 526, de 29 de abril de 2015, do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), o qual estabelece percentuais de tolerância referentes ao limite de peso. Conforme o Art. 5º desta resolução, serão admitidas a tolerância de 5% sobre os limites de pesos regulamentares, tanto para o PBT como para o PBTC, em sua fiscalização em balanças rodoviárias.

Seguindo todos os critérios acima demonstrados, e por meio da diferença do PBTC permitido e da tara do semirreboque e cavalo mecânico, determinou-se a carga útil que seria aplicada sobre a estrutura de 36.935 kg. Para exemplificar essa definição da carga útil, segue abaixo a Figura 14.

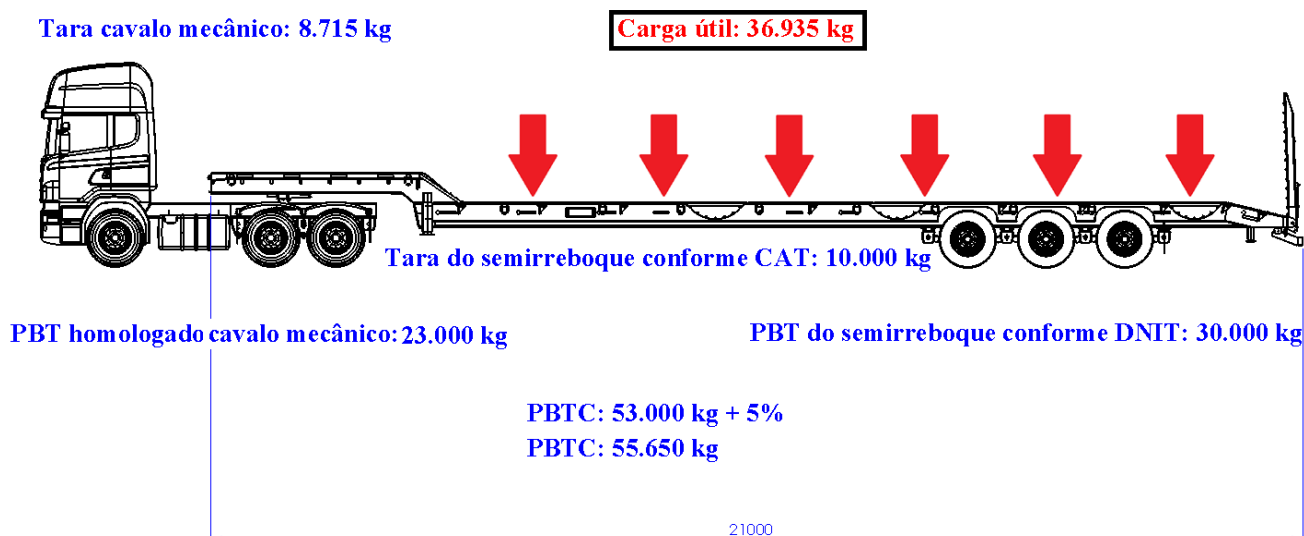


Figura 14: Definição da carga útil.

(Fonte: Autor, 2019).

3.3 ANÁLISE COMPUTACIONAL PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

Nesta etapa, será demonstrado um passo a passo do procedimento realizado para a execução da análise computacional pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), sabendo que o software utilizado para essa simulação foi o Solidworks 2018 e o equipamento analisado é o semirreboque carrega-tudo 3 eixos. Essa análise tem por objetivo assegurar que as condições de contorno estejam conforme a realidade e o seu resultado seja satisfatório, com o intuito de conseguir otimizar o perfil da longarina, considerando uma análise estática.

Diante disso, a primeira ação tomada na fase de pré-processamento foi a simplificação do modelo CAD, visto que o modelo completo é muito complexo e a sua utilização demandaria alto esforço computacional e elevado tempo de processamento. Dessa forma, a simplificação foi executada de maneira com que os componentes necessários para obtenção dos resultados finais fossem mantidos. Com essa simplificação, foi possível realizar a análise e garantir a simulação de forma mais rápida e eficiente, reduzindo o tempo de processamento. O modelo simplificado do semirreboque carrega-tudo pode ser visualizado por meio da Figura 15, abaixo.

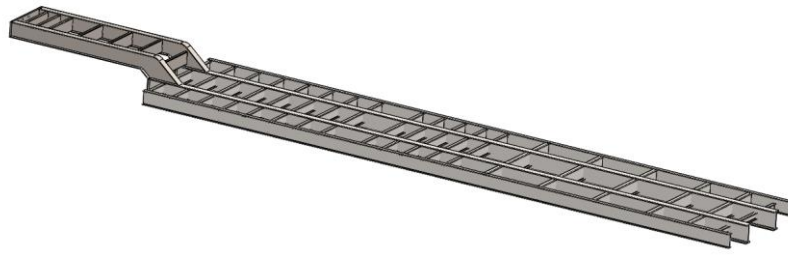


Figura 15: Modelo CAD semirreboque carrega-tudo 3 eixos simplificado.

(Fonte: Autor, 2019).

Posterior à simplificação, foi necessário informar dados referentes às propriedades dos materiais utilizados na simulação. Para isso, foi preciso criar uma biblioteca para o aço ASTM A572 GR50, pelo fato de não haver esse material por padrão no software Solidworks 2018; enquanto o aço ASTM A36 era um material padrão dentro da plataforma do Solidworks 2018 e, por isso, suas propriedades já se encontravam definidas.

Os valores inseridos para o material ASTM A572 GR50 seguiram o catálogo de barras e perfil Gerdau (2014) e o manual de estacas metálicas Gerdau (2018), sendo o limite de escoamento de 345 Mpa; o limite de resistência de tração com um valor de 450 Mpa; o módulo de elasticidade com 200.000 Mpa; o coeficiente de Poisson no valor de 0,3; e, por fim, a massa específica no valor de 77 kN/m³ - por meio de conversão, o valor utilizado da massa específica foi de 7851,81 kg/m³. A Figura 16 apresenta os valores inseridos na plataforma Solidworks após a criação da nova biblioteca de material para o aço ASTM A572 GR 50.

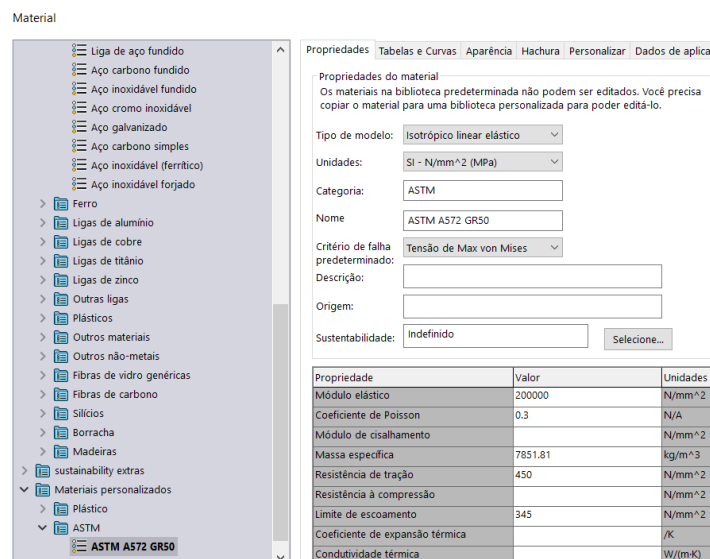


Figura 16: Propriedades do material ASTM A572 GR50.

(Fonte: Autor, 2019).

Sob o mesmo prisma, a Figura 17 apresenta as propriedades do aço A36 dentro da plataforma do Solidworks 18, na qual possui como limite de escoamento o valor de 250 Mpa e um limite de resistência de tração no valor de 400 Mpa, ambos os valores estão de acordo com o catálogo de barras e perfil Gerdau (2014). Também apresenta um coeficiente de Poisson de 0,26 e uma massa específica no valor de 7850 kg/m³.

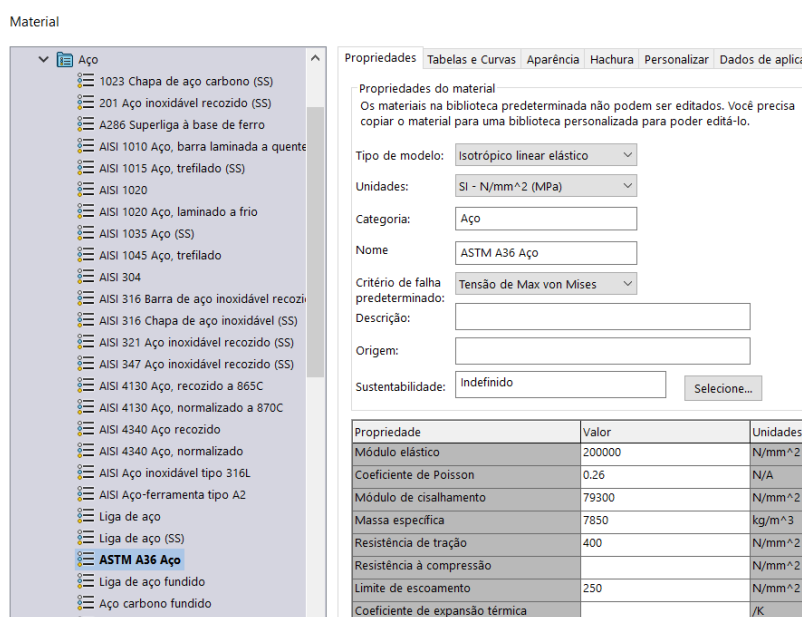


Figura 17: Propriedades do material ASTM A36.

(Fonte: Autor, 2019).

Após apresentar as propriedades dos materiais, passamos para a etapa da geração de malha. Essa etapa é quando o modelo CAD é transformado em um modelo MEF, no qual discretiza o modelo em milhares de elementos no intuito de realizar os cálculos da análise.

Dado o exposto, a modelagem do CAD do semirreboque foi realizada com a utilização de recursos de chapas metálicas e componentes estruturais. Diante disso, o Solidworks 2018, por padrão na aba de simulação, reconhece os recursos de chapa metálica como elementos de casca e os recursos de componente estrutural como elementos de viga. Dessa forma, é configurada uma simulação de malha mista.

Sob o mesmo contexto, a fim de assegurar um resultado mais preciso, foi efetuado um teste de convergência de malha nos elementos do tipo viga, por meio da aplicação de um controle de malha nessa região. A realização do teste sobre esses elementos se deu porque o componente do qual se deseja a otimização – a longarina do chassi – é formado por esse tipo de elemento. Para o teste de convergência, primeiramente foi escolhida uma travessa aleatória

para atribuir os valores correspondente a carga e, então, executou-se o estudo sem o refinamento da malha. Em seguida, foi aplicado um controle de malha para o refinamento do elemento e, assim, executou-se a análise novamente. Esse procedimento se repetiu até alcançar a convergência da malha.

Em relação aos elementos de casca que compõem o pescoço do semirreboque, foi utilizada uma malha padrão sem o seu refinamento, para não gerar um aumento no tempo de processamento, já que os valores encontrados nesses componentes serão desconsiderados. O modelo do semirreboque discretizado pode ser visualizado conforme a Figura 18, abaixo.

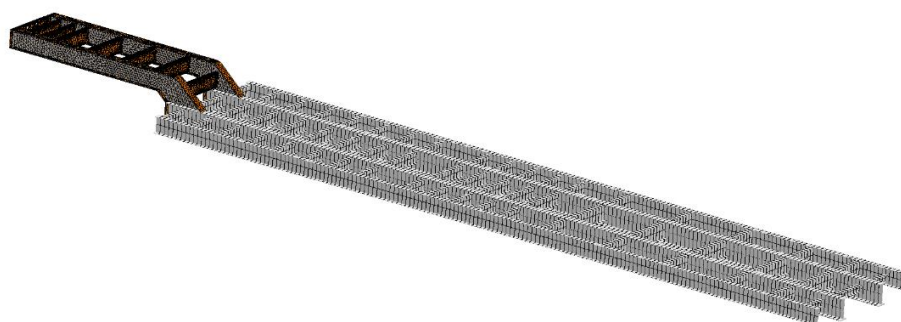


Figura 18: Modelo discretizado.

(Fonte: Autor, 2019).

Outra etapa importante nessa fase de pré-processamento foi a geração de contatos. Para isso, foram criados contatos locais entre os componentes de casca do tipo unido, como se os corpos fossem soldados. O mesmo procedimento foi realizado entre os elementos de casca e elementos de viga. Nesse âmbito, uma demonstração dessa geração de contato pode ser visualizada na Figura 19, abaixo.

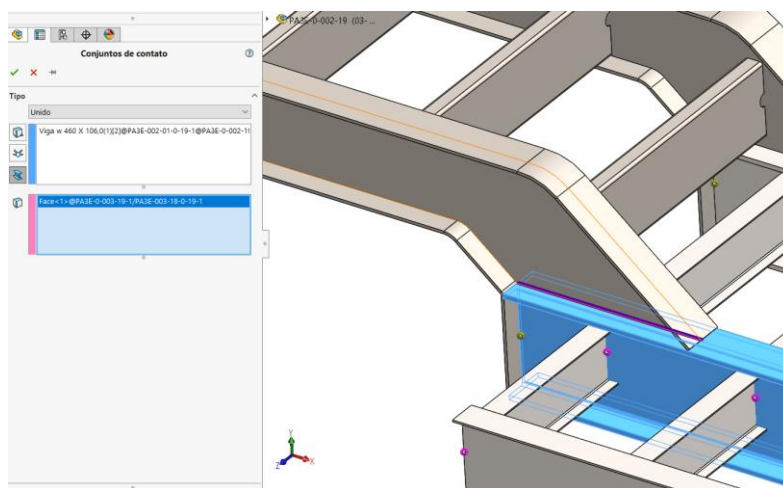


Figura 19: Contato local entre elemento de viga e de casca.

(Fonte: Autor, 2019).

Posteriormente à geração dos contatos, foram definidas as condições de contorno, estabelecendo, dessa forma, quais seriam os pontos de fixação na análise computacional. Diante disso, o acoplamento do semirreboque no veículo trator ocorre por meio de um pino rei, que pode apresentar duas posições para atender às variações possíveis de cavalo mecânico. Sendo assim, a Figura 20 demonstra a região de acoplamento por meio do pino rei.

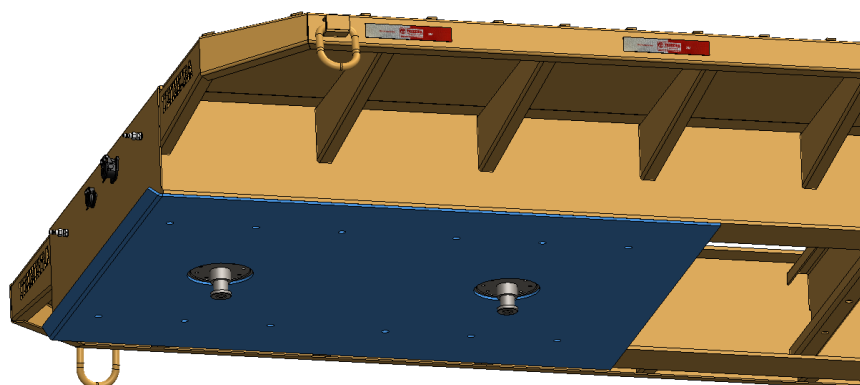


Figura 20: Região de acoplamento por meio de pino rei.

(Fonte: Autor, 2019).

Entretanto, para a análise computacional, considerou-se o fato de o pino rei ser soldado à chapa na parte inferior do pescoço. Por isso, utilizou-se toda a área de contato dessa chapa com o pescoço do semirreboque para atribuir as regiões de engaste. Dessa forma, para a fixação do modelo na simulação, foi utilizada a ferramenta acessório de fixação do tipo geometria fixa, que restringe todos os graus de liberdade. Nesse contexto, a Figura 21 demonstra a região de engaste utilizada na simulação computacional.

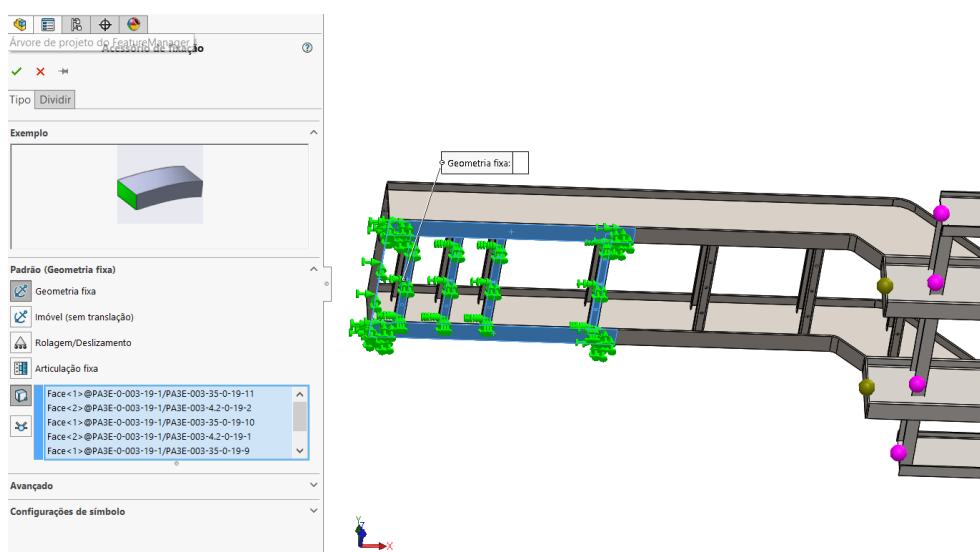


Figura 21: Região de engaste com o veículo trator.

(Fonte: Autor, 2019).

Dado o exposto, foi preciso determinar a região de engastamento referente à suspensão. A Figura 22 demonstra o modelo simplificado da suspensão do semirreboque, sendo possível observar que a fixação se divide em 4 apoios em cada longarina.

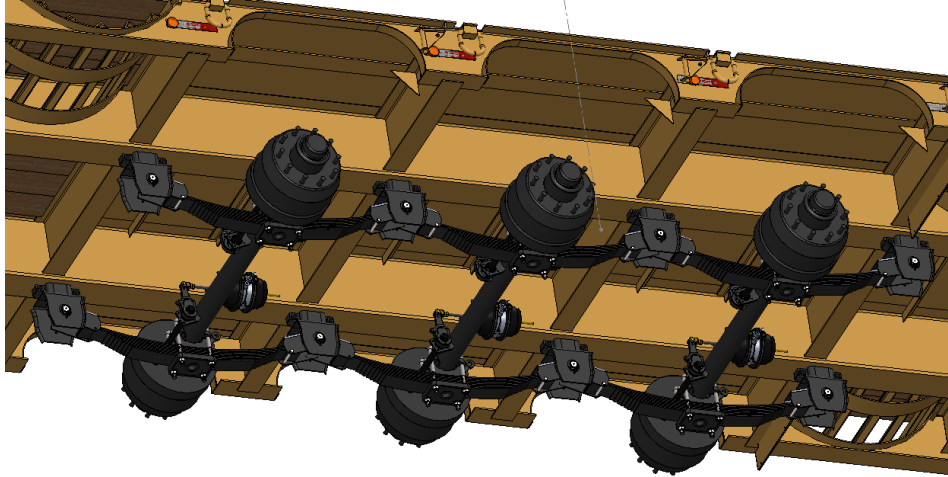


Figura 22: Modelo simplificado da suspensão do semirreboque.

(Fonte: Autor, 2019).

Diante disso, para representar os pontos de fixação, o autor modelou uma chapa nas dimensões de 184 mm x 385 mm, com o intuito de representar esses pontos de fixação. Após a modelagem, na aba de simulação, foi considerado que essas chapas são elementos rígidos. Dessa maneira, essas chapas não sofrerão deformações e, assim, não influenciarão na obtenção do resultado final, tendo como função apenas o engastamento. Esse engastamento foi dado utilizando a ferramenta acessórios de fixação, com o recurso de geometria fixa. As regiões de engaste da suspensão podem ser visualizadas na Figura 23.

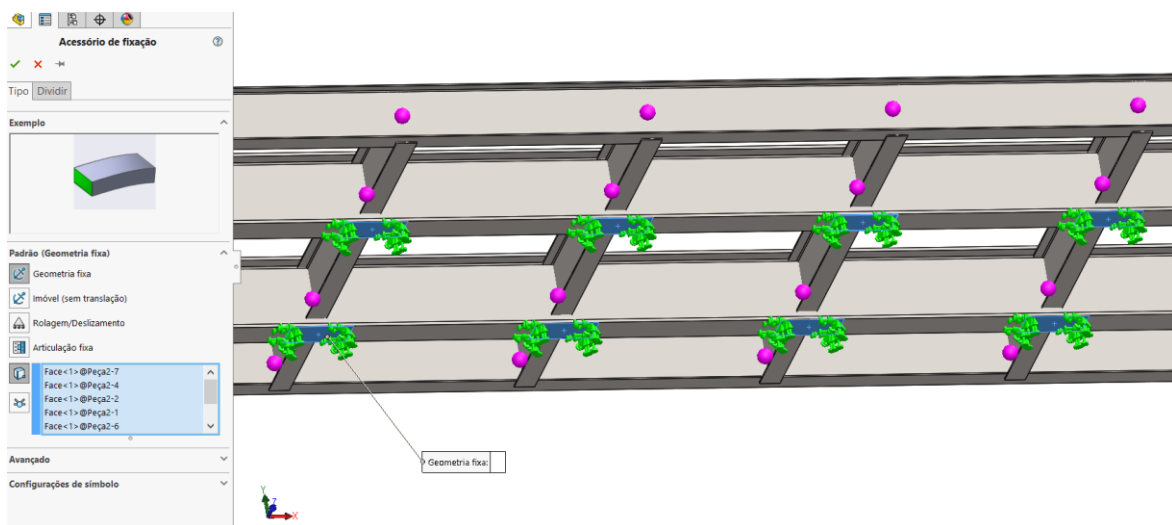


Figura 23: Regiões de engaste da suspensão.

(Fonte: Autor, 2019).

Por último, atendendo a todas as etapas de pré-processamento, foi definido como seria a aplicação das cargas sobre o modelo. Como o semirreboque carrega-tudo é um equipamento muito versátil pelo fato de transportar vários tipos de equipamentos, tornou-se difícil uma distribuição de carga específica. Desse modo, com o objetivo de prever a pior condição, foi aplicado o valor total da carga útil em cada uma das travessas do semirreboque isoladamente. Essa aplicação sobre as travessas foi considerada como uma carga distribuída em todo o seu comprimento. A Figura 24 demonstra a aplicação da carga distribuída na travessa.

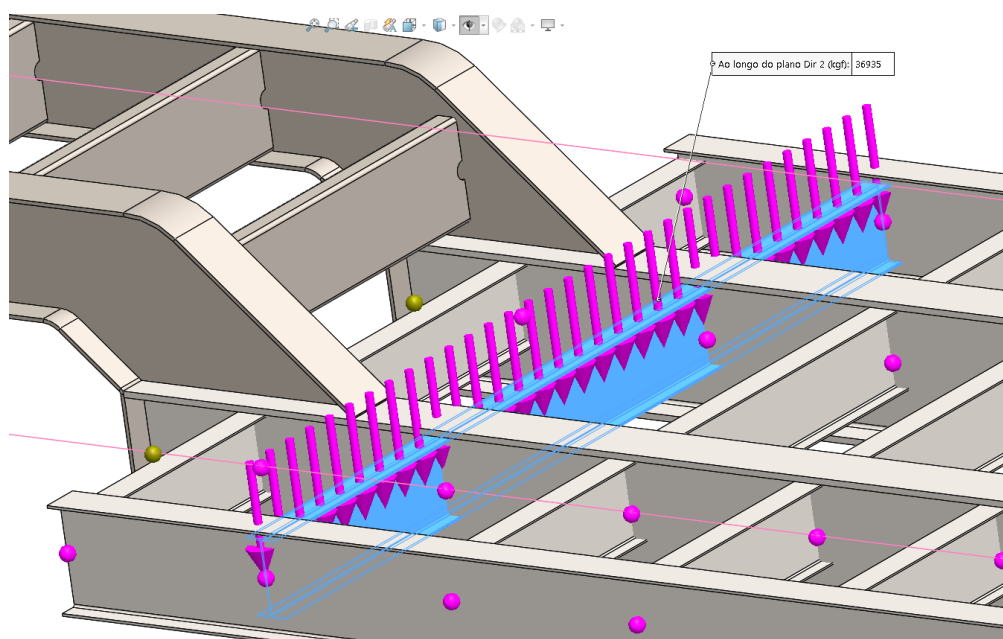


Figura 24: Carga distribuída na travessa.

(Fonte: Autor, 2019).

Nessa etapa de aplicação de cargas, foram desconsideradas duas travessas: uma é a mais próxima do pescoço, pois dificilmente haverá equipamento apoiado sobre ela; e a mais próxima à rampa de embarque, porque esta é utilizada somente no momento de embarque e porque possui pés de apoio para a realização do carregamento.

Para concluir essa etapa de aplicação de carga, foi levada em consideração a força da gravidade, dessa forma, o peso da estrutura também é considerado na análise. Por meio da Figura 25, são demonstrados todos os pontos de aplicação de carga utilizados na simulação e também numerados para serem identificados no resultado final da análise.

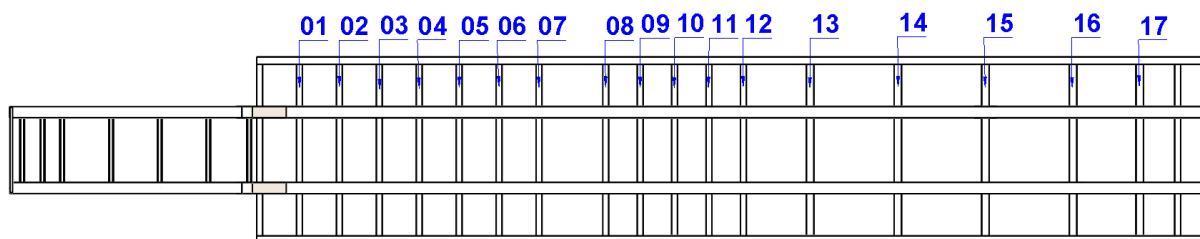


Figura 25: Pontos de aplicação de carga.

(Fonte: Autor, 2019).

Dado o exposto, como o objetivo da pesquisa é verificar se o semirreboque da empresa particular se encontra superdimensionado, foram adotados todos esses critérios de pré-processamento em sua análise, com a aplicação da carga no valor de 36.935 kg, obtido conforme as normas.

Sob a mesma ótica, como o outro objetivo da pesquisa é propor um modelo otimizado da longarina, também foram adotados os mesmos critérios de pré-processamento, exceto em relação ao valor da aplicação de carga. Desse modo, para a otimização, utilizou-se o catálogo de bitolas e perfis da Gerdau (2018), com a alteração do perfil da longarina padrão W460x106 por um modelo mais leve, conforme disponível no catálogo. Diante disso, a variação da aplicação da carga é resultante da diferença do peso retirado da estrutura, que permite uma maior capacidade de carga sobre a estrutura, sendo necessária essa correção no valor da carga aplicada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados foram obtidos por meio da resolução dos cálculos computacionais com a utilização do software Solidworks 2018, a partir do método dos elementos finitos, levando em consideração todos os passos aplicados no pré-processamento, conforme citados anteriormente nos encaminhamentos metodológicos, e considerando uma análise estática.

Diante disso, a Figura 26 demonstra o modelo discretizado sem um controle de malha, enquanto a Figura 27 demonstra o modelo com um controle de malha na região dos elementos de viga, no qual esse elemento apresenta o tamanho de 100 mm. Esse refinamento foi realizado no teste de convergência da malha.

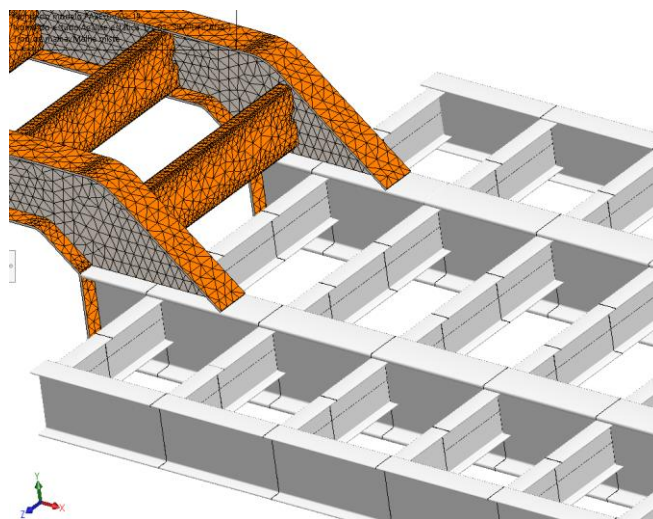


Figura 26: Modelo discretizado sem controle de malha.

(Fonte: Autor, 2019).

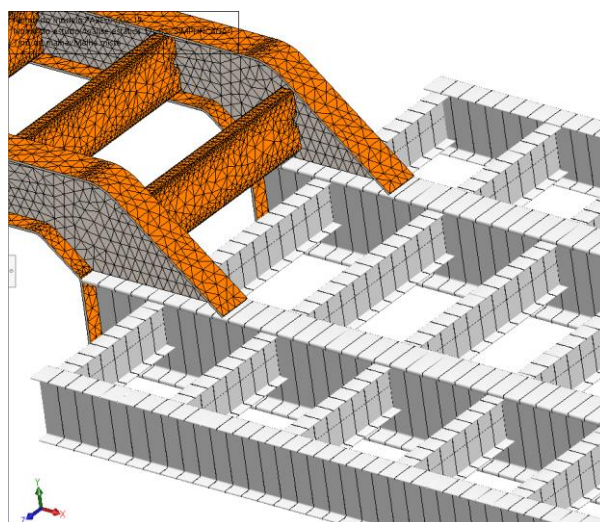


Figura 27: Modelo discretizado - Tamanho do elemento de viga de 100 mm.

(Fonte: Autor, 2019).

Nessa perspectiva, para o teste de convergência de malha, foi realizada a aplicação de carga na travessa de número 17, para obtenção dos seus resultados. Os valores resultantes desse teste de convergência podem ser visualizados na Tabela 4, abaixo.

Tabela 4: Resultado do teste de convergência da malha.

Tamanho do elemento	n° de nós	Tempo de geração de malha (s)	Tensão (Mpa)
500	54.481	00:32	87,651
400	54.593	00:34	81,879
300	54.795	00:36	77,025
200	55.179	00:40	69,433
100	56.505	00:42	69,475

(Fonte: Autor, 2019).

Nesse âmbito, para demonstrar visualmente a convergência do valor da tensão, foi gerado um gráfico (Figura 28).

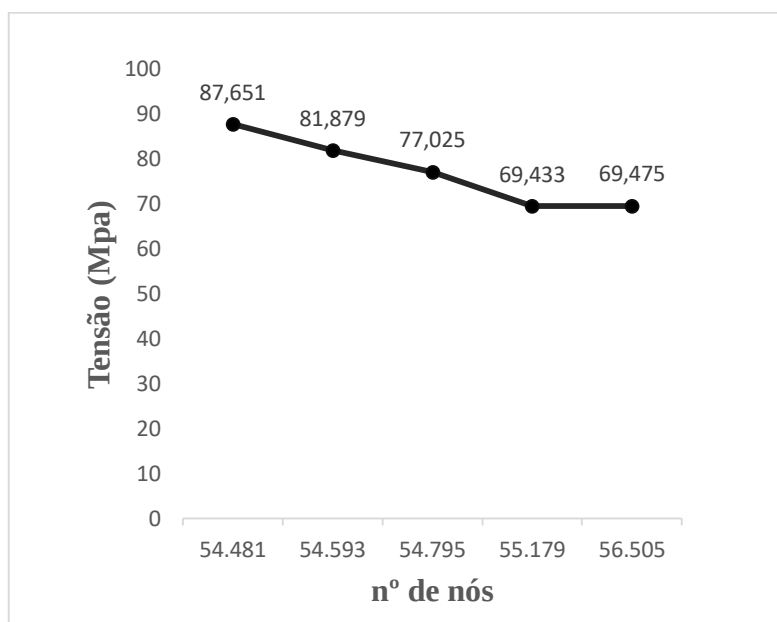


Figura 28: Gráfico de convergência da malha.

(Fonte: Autor, 2019).

Diante disso, todas as análises utilizaram o controle de malha com um tamanho de elemento de 100 mm. Dado o exposto, para avaliação dos resultados tanto da verificação do perfil W460 x 106, como do perfil otimizado, serão apresentadas as análises a seguir.

4.1 1ª ANÁLISE – VERIFICAÇÃO DO PERFIL W460 X 106

Na 1ª análise, foram consideradas todas as condições de contorno da etapa de pré-processamento para uma carga de 36.935 kg. Os resultados de tensão máxima obtidos em todos os pontos de aplicação de carga podem ser visualizados na Tabela 5 e também por meio de gráfico na Figura 29, que considera os valores de deslocamento. Já na Figura 30, constam os valores de tensão.

Tabela 5: Resultado da simulação do perfil W460 x 106.

Perfil W460 x 106		
Travessa	Deslocamento (mm)	Tensão axial e de curvatura (Mpa)
01	5,883	126,675
02	5,125	117,67
03	4,814	117,75
04	4,563	116,979
05	4,36	116,031
06	4,208	115,893
07	4,07	116,407
08	3,601	111,738
09	3,192	107,506
10	2,718	105,048
11	2,192	104,36
12	1,639	105,197
13	0,841	73,125
14	0,775	68,356
15	0,791	69,216
16	0,781	69,153
17	3,46	69,475

(Fonte: Autor, 2019).

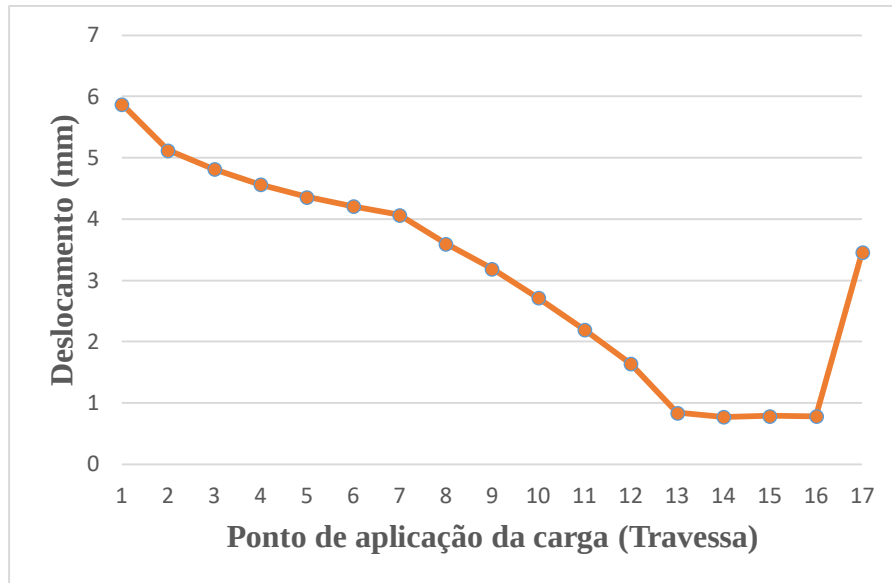


Figura 29: Gráfico de deslocamento do perfil W460 x 106.

(Fonte: Autor, 2019).

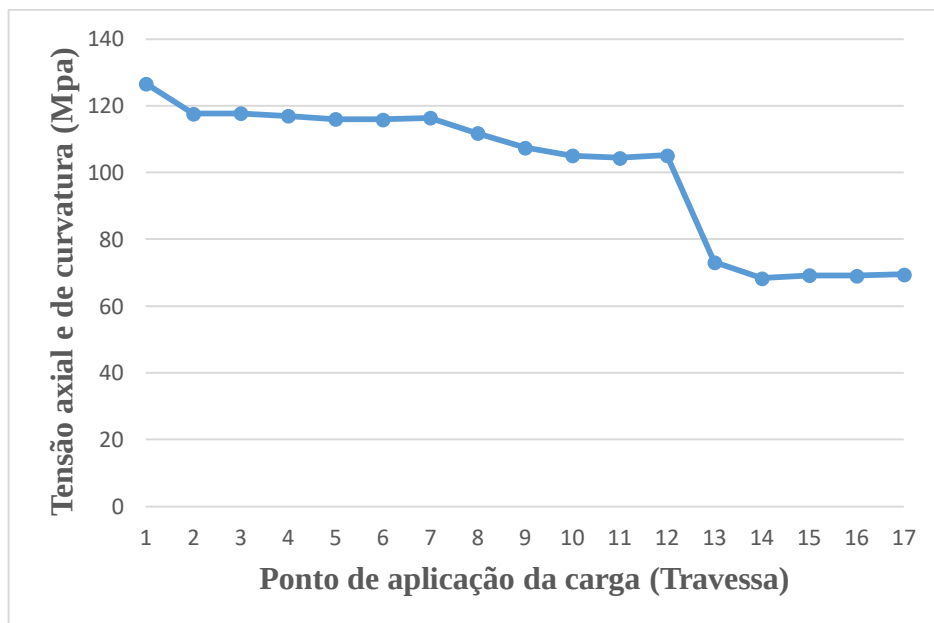


Figura 30: Gráfico de tensão perfil W460 x 106.

(Fonte: Autor, 2019).

Diante disso, para apresentar os resultados por meio da plataforma do Solidworks 2018, optou-se por demonstrar a região mais crítica, que apresenta o maior valor para tensão, sendo essa carga aplicada na travessa 1. Dessa forma, a Figura 31, a Figura 32 e a Figura 33 demonstram a análise com os resultados de tensão máxima, deslocamento máximo e fator de segurança, respectivamente.

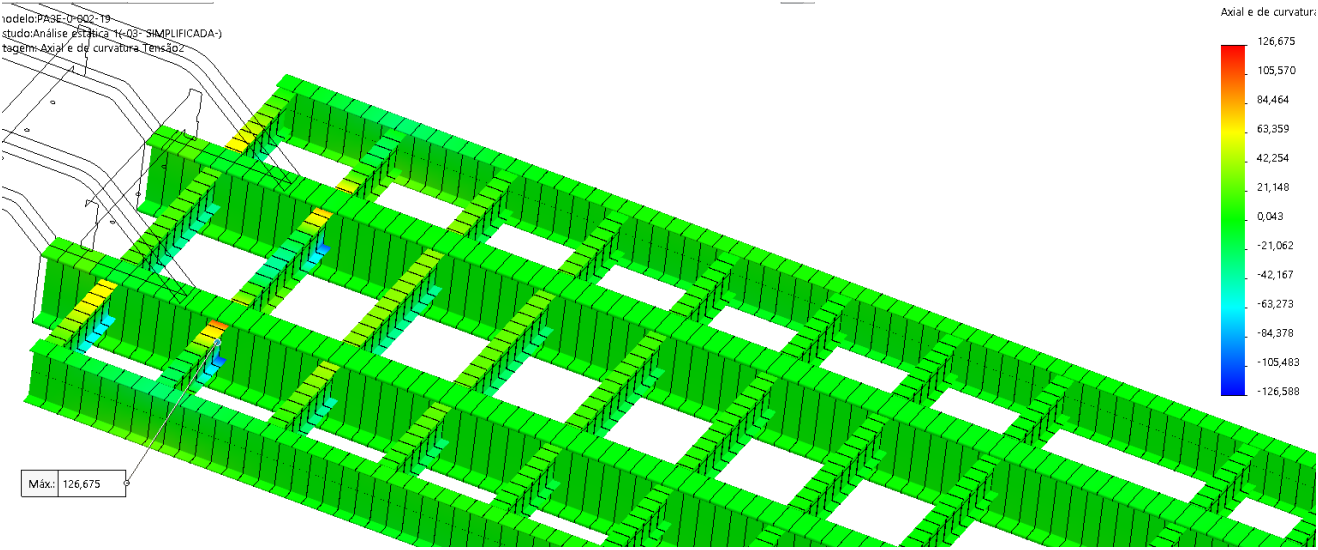


Figura 31: 1ª análise - Tensão máxima.
(Fonte: Autor, 2019).

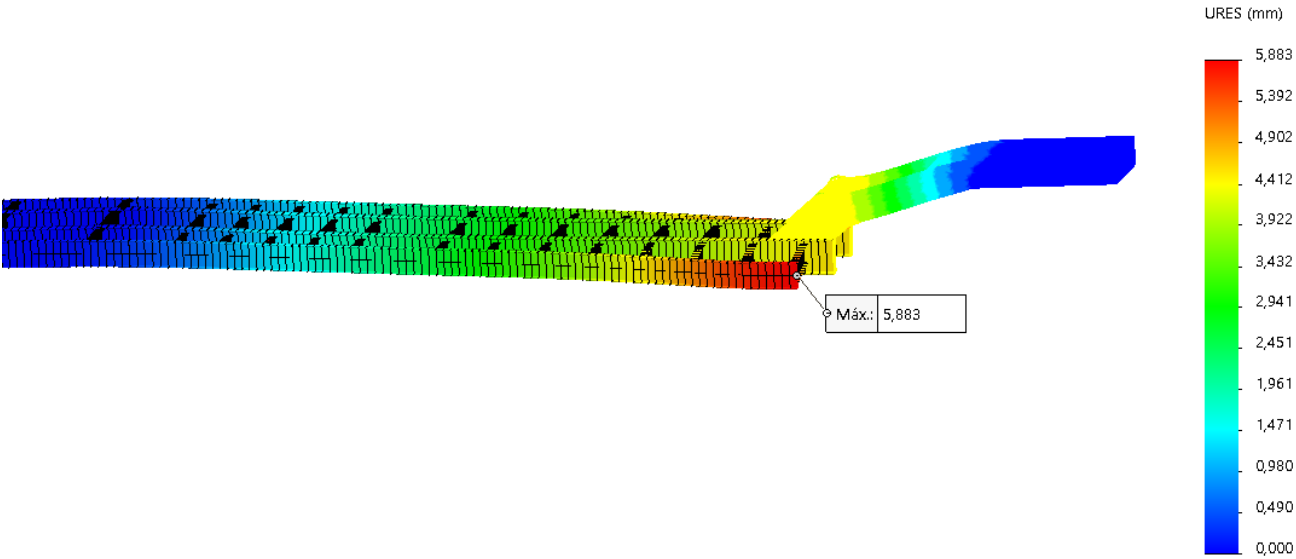


Figura 32: 1ª análise - Deslocamento máximo.
(Fonte: Autor, 2019).

Nome do modelo:PA3E-0-002-19
Nome do estudo:Análise estática 1(-03- SIMPLIFICADA-)
Tipo de plotagem: Fator de segurança Fator de segurança1
Critério: Automático
Distribuição do fator de segurança: Mín. FOS = 2,7

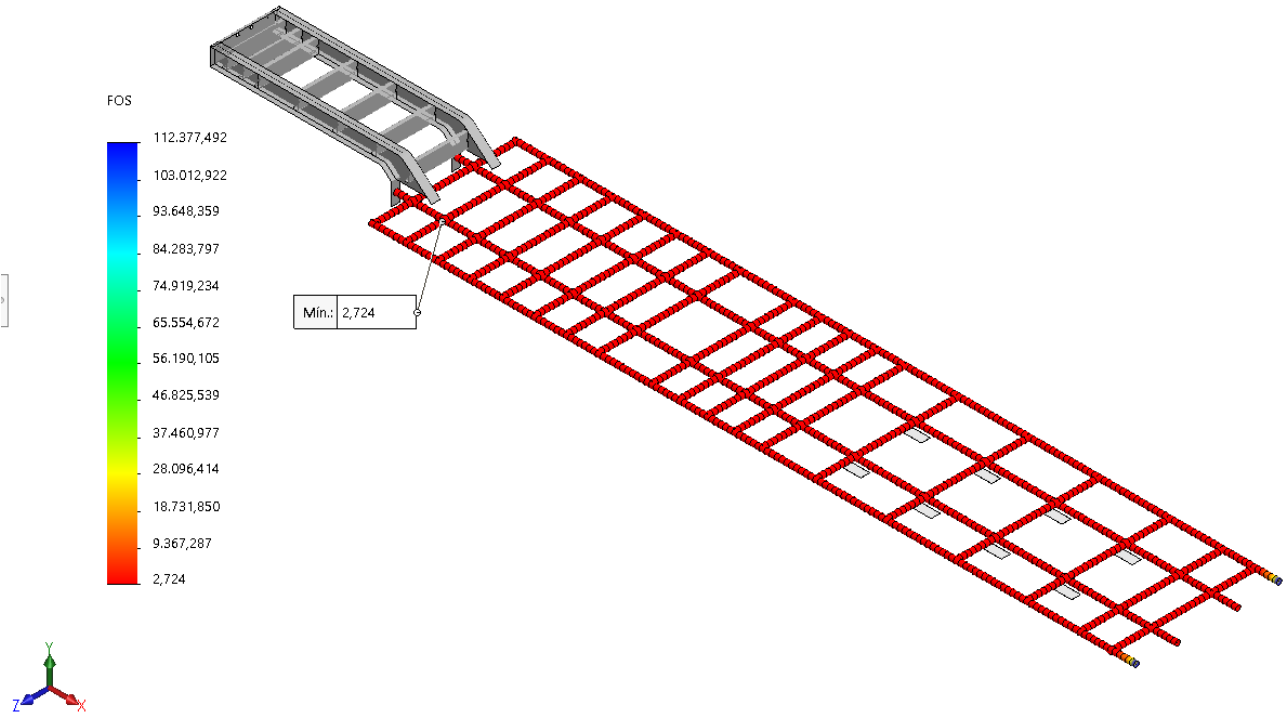


Figura 33: 1ª análise - Resultados do fator de segurança.
(Fonte: Autor, 2019).

Sob a mesma ótica, é demonstrado um detalhe com o valor máximo da tensão na longarina, com a mesma aplicação de carga na travessa 1, no qual o valor encontrado foi de 30,189 Mpa (Figura 34).

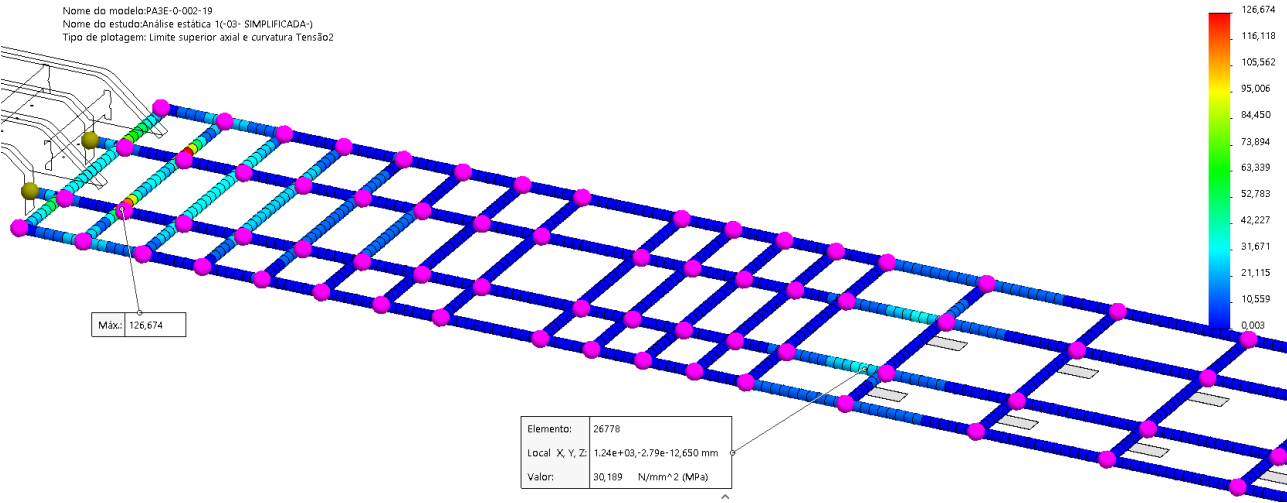


Figura 34: 1ª análise - Tensão na longarina.
(Fonte: Autor, 2019).

Sob o mesmo contexto, porém considerando a aplicação da carga na travessa 17, é possível visualizar que o valor máximo da tensão na longarina, foi de 51,033 Mpa (Figura 35).

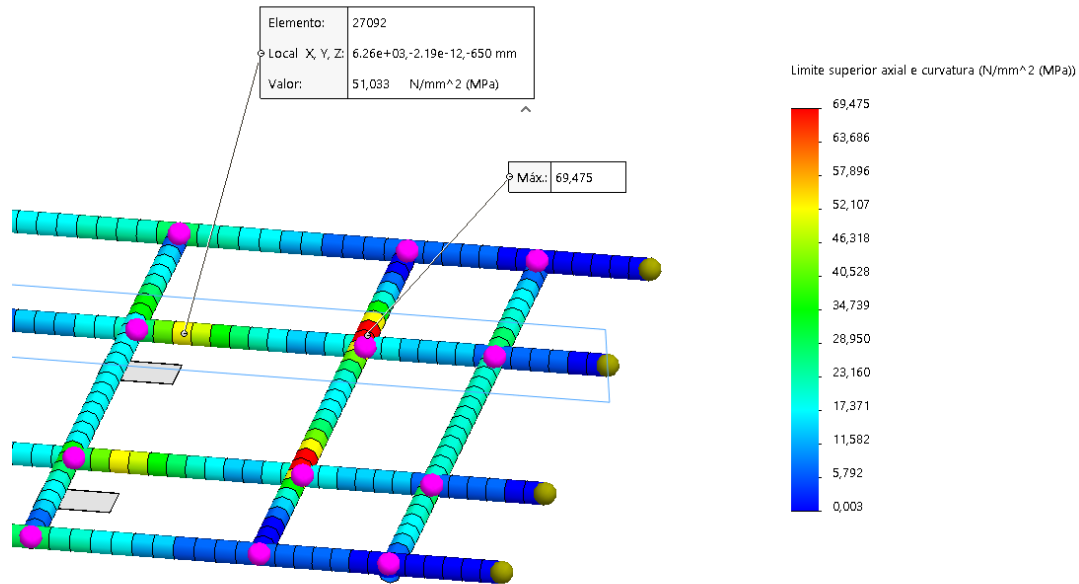


Figura 35: 1ª análise - Tensão na longarina com carga aplicada na travessa 17.

(Fonte: Autor, 2019).

Por fim, o peso do quadro do chassi antes da otimização, considerando apenas os componentes de viga laminada, é apresentado na Tabela 6, abaixo.

Tabela 6: Peso do quadro do chassi antes da otimização.

Chassi do semirreboque carrega-tudo 3 eixos		
Descrição	UN.	Peso
Longarinas	Kg	3543,6
Fechamento lateral	Kg	1066,74
Travessas	Kg	1268,38
TOTAL:	Kg	5878,72

Fonte: Autor (2019).

4.2 2ª ANÁLISE – OTIMIZAÇÃO COM BASE NO PERFIL W460 X 52

Na 2ª análise, foram consideradas todas as condições de contorno da etapa de pré-processamento para uma carga de 38.715 kg. A diferença no valor da carga, se deu pela redução da tara e assim, permitindo o acréscimo desse valor em carga útil. Os resultados de tensão máxima obtidos em todos os pontos de aplicação de carga podem ser visualizados na Tabela 7 e também por meio de gráfico na Figura 36, que considera os valores de deslocamento. Já na Figura 37, constam os valores de tensão.

Tabela 7: Resultado da simulação do perfil W460 x 52.

Perfil W460 x 52		
Travessa	Deslocamento (mm)	Tensão axial e de curvatura (Mpa)
01	7,025	132,690
02	6,307	123,359
03	6,149	121,836
04	6,132	119,869
05	6,197	116,877
06	6,317	114,42
07	6,378	111,966
08	5,98	103,46
09	5,424	99,061
10	4,619	97,826
11	3,606	99,616
12	2,481	105,296
13	0,986	75,658
14	0,9	70,445
15	0,923	71,322
16	0,916	71,499
17	5,502	127,242 (Longarina)

(Fonte: Autor, 2019).

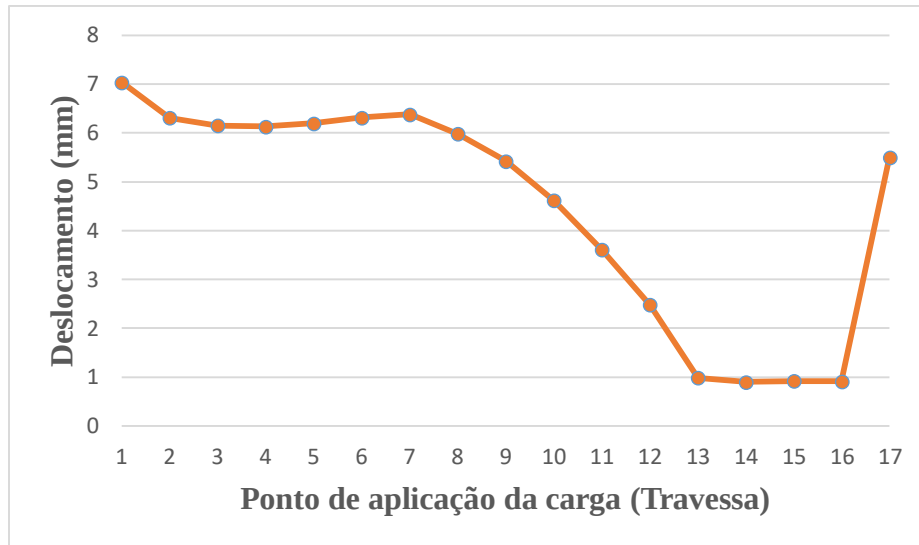


Figura 36: Gráfico de deslocamento do perfil W460 x 52.

(Fonte: Autor, 2019).

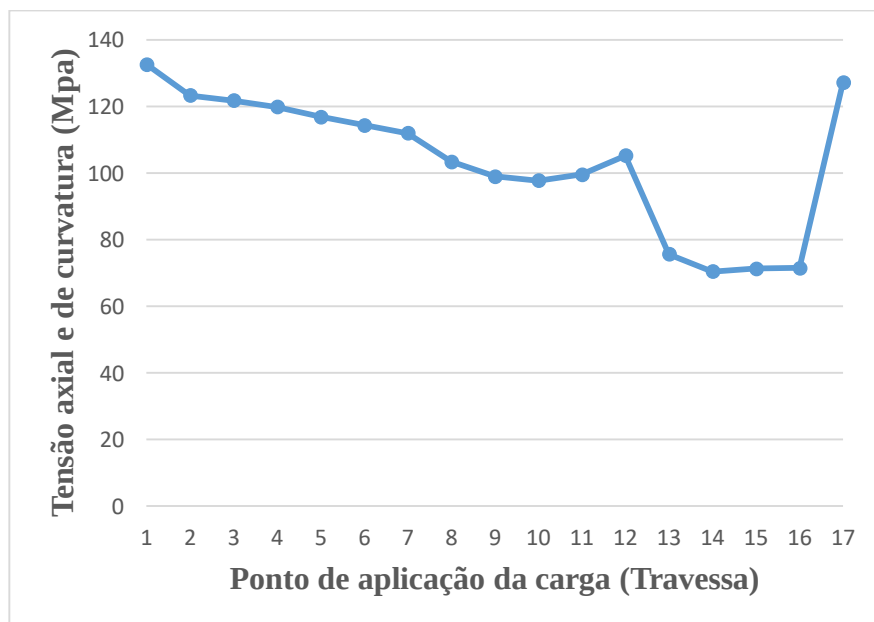


Figura 37: Gráfico de tensão perfil W460 x 52.

(Fonte: Autor, 2019).

Dado o exposto, verifica-se que a região mais crítica, que apresenta o maior valor para tensão, está sendo aplicada na travessa 1. Dessa forma, a Figura 38, a Figura 39 e a Figura 40 demonstram a análise com os resultados de tensão máxima, deslocamento máximo e fator de segurança, respectivamente.

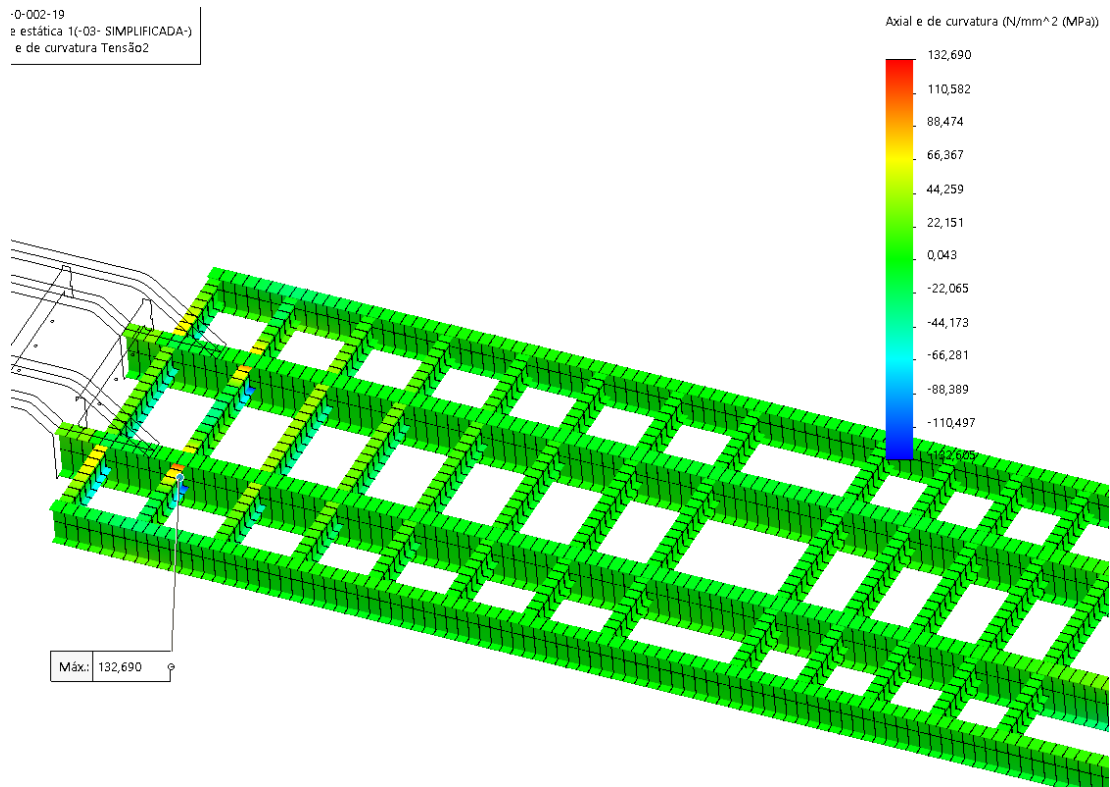


Figura 38: 2ª análise - Tensão máxima.
(Fonte: Autor, 2019).

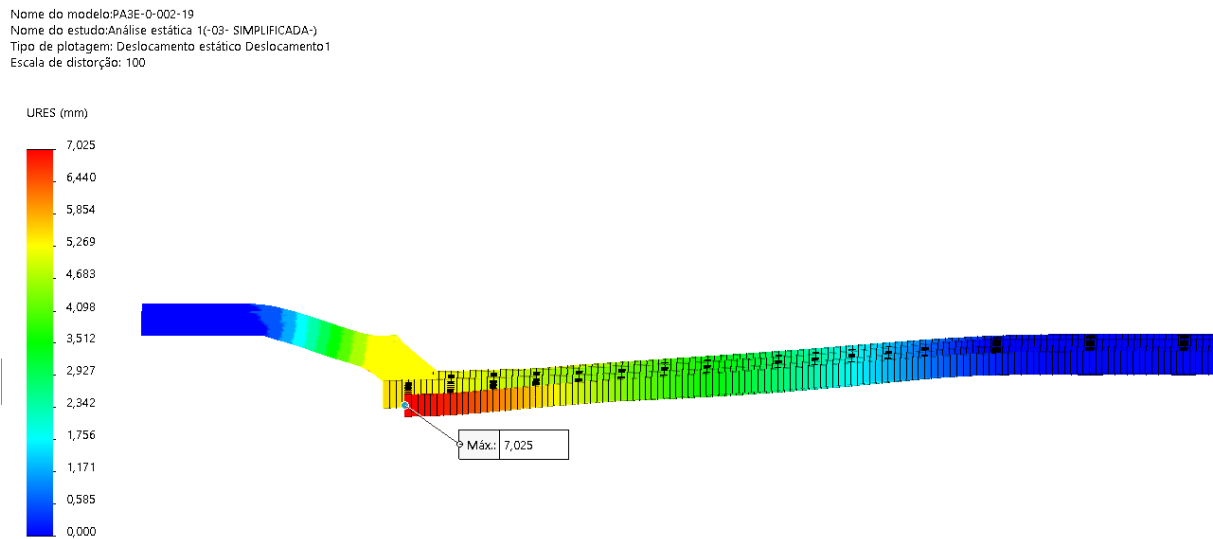


Figura 39: 2ª análise - Deslocamento máximo.
(Fonte: Autor, 2019).

Nome do modelo:PA3E-0-002-19
 Nome do estudo:Análise estática 1(-03- SIMPLIFICADA-)
 Tipo de plotagem: Fator de segurança Fator de segurança1
 Critério: Automático
 Distribuição do fator de segurança: Min. FOS = 2.6

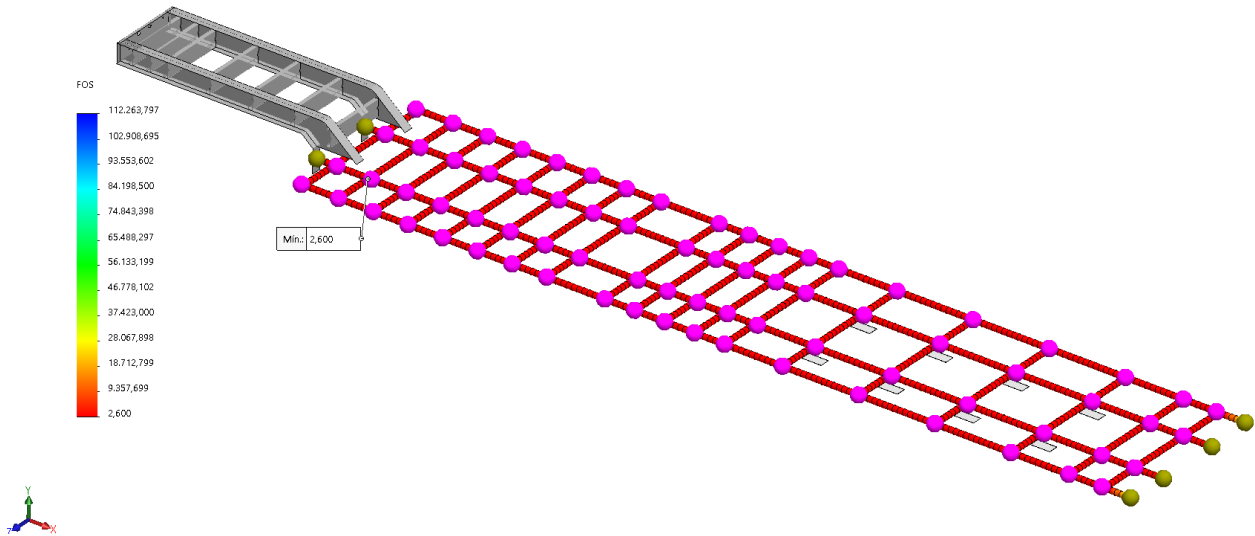


Figura 40: 2ª análise - Fator de segurança.

(Fonte: Autor, 2019).

Sob o mesmo prisma, é demonstrado um detalhe com o valor máximo da tensão na longarina, considerando à aplicação de carga na travessa 1, no qual o valor encontrado foi de 43,980 Mpa (Figura 41).

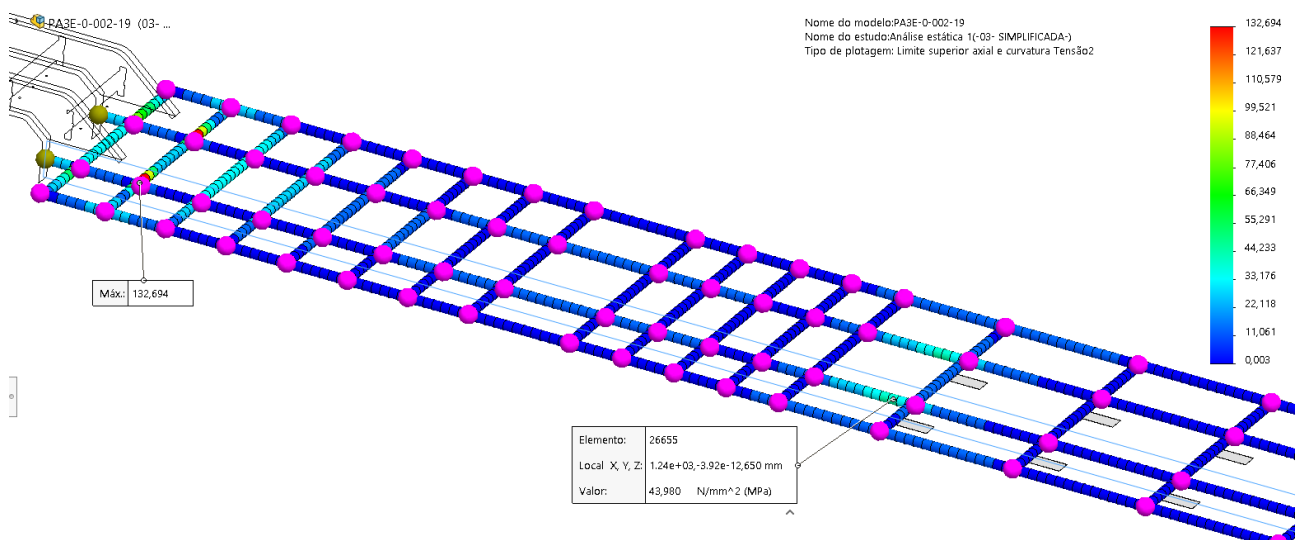


Figura 41: 2ª análise - Tensão na longarina.

(Fonte: Autor, 2019).

Sob o mesmo contexto, porém considerando a aplicação da carga na travessa 17, é possível visualizar que o valor máximo da tensão se deu na longarina, no qual o valor encontrado foi de 127,242 Mpa (Figura 42).

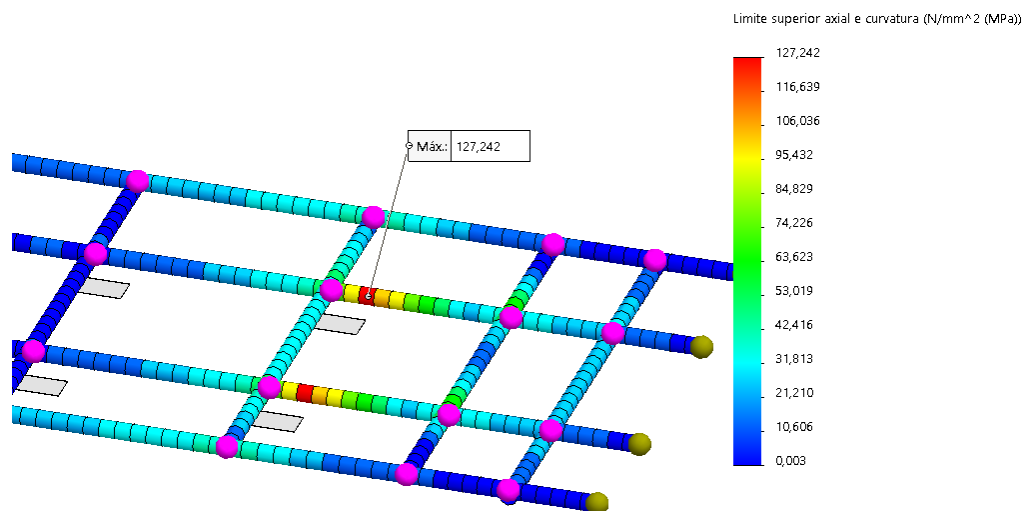


Figura 42: 2ª análise – Tensão na longarina com carga aplicada na travessa 17.

(Fonte: Autor, 2019).

Por fim, o peso do quadro do chassi com a utilização do perfil W460 x 52, considerando apenas os componentes de viga laminada, é apresentado na Tabela 8, abaixo.

Tabela 8: Peso do quadro do chassi com o perfil W460 x 52.

Chassi do semirreboque carrega-tudo 3 eixos		
Descrição	UN.	Peso
Longarinas	Kg	1764,08
Fechamento lateral	Kg	1066,74
Travessas	Kg	1268,38
TOTAL:	Kg	4099,2

Fonte: Autor (2019).

4.3 3ª ANÁLISE – OTIMIZAÇÃO COM BASE NO PERFIL W360 X 32,9

Na 3ª análise, foram consideradas todas as condições de contorno da etapa de pré-processamento para uma carga de 39.390 kg. A diferença no valor da carga, se deu pela redução da tara e assim, permitindo o acréscimo desse valor em carga útil. Os resultados de tensão máxima obtidos em todos os pontos de aplicação de carga podem ser visualizados na Tabela 9 e também por meio de gráfico na Figura 43, que considera os valores de deslocamento. Já na Figura 44, constam os valores de tensão.

Tabela 9: Resultado da simulação do perfil W360 x 32,9.

Perfil W360 x 32,9		
Travessa	Deslocamento (mm)	Tensão axial e de curvatura (Mpa)
01	8,026	137,56
02	7,458	126,88
03	7,603	124,04
04	7,982	119,882
05	8,502	113,972
06	9,048	106,717
07	9,553	116,113 (Longarina)
08	9,872	148,767 (Longarina)
09	9,244	166,748 (Longarina)
10	7,894	181,081 (Longarina)
11	5,824	184,584 (Longarina)
12	3,716	163,609 (Longarina)
13	1,141	76,261
14	1,021	70,589
15	1,046	71,47
16	1,051	72,258
17	8,745	257,907 (Longarina)

(Fonte: Autor, 2019).

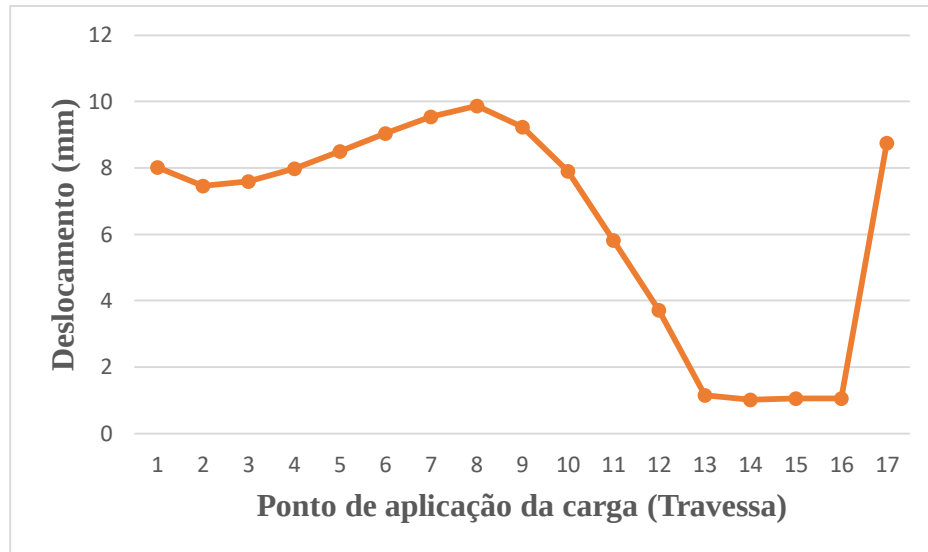


Figura 43: Gráfico de deslocamento do perfil W360 x 32,9.
(Fonte: Autor, 2019).

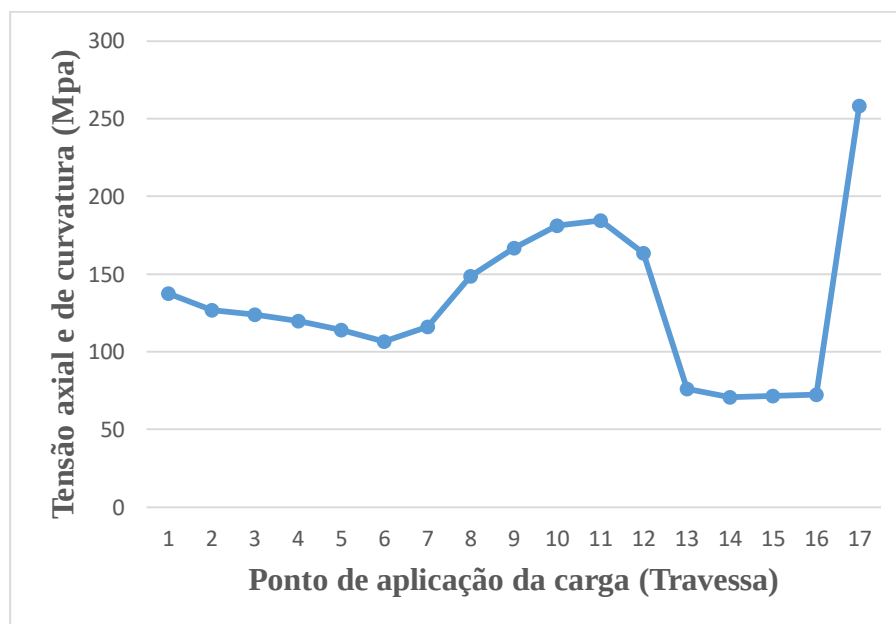


Figura 44: Gráfico de tensão perfil W360 x 32,9.
(Fonte: Autor, 2019).

Diante do exposto, verifica-se que a região mais crítica, que apresenta o maior valor para tensão, está na região da longarina quando a carga é aplicada na travessa 17. Já o deslocamento máximo é verificado com a aplicação da carga na travessa 8. Dessa forma, a Figura 45, a Figura 46 e a Figura 47 demonstram a análise com os resultados de tensão máxima, deslocamento máximo e fator de segurança, respectivamente.

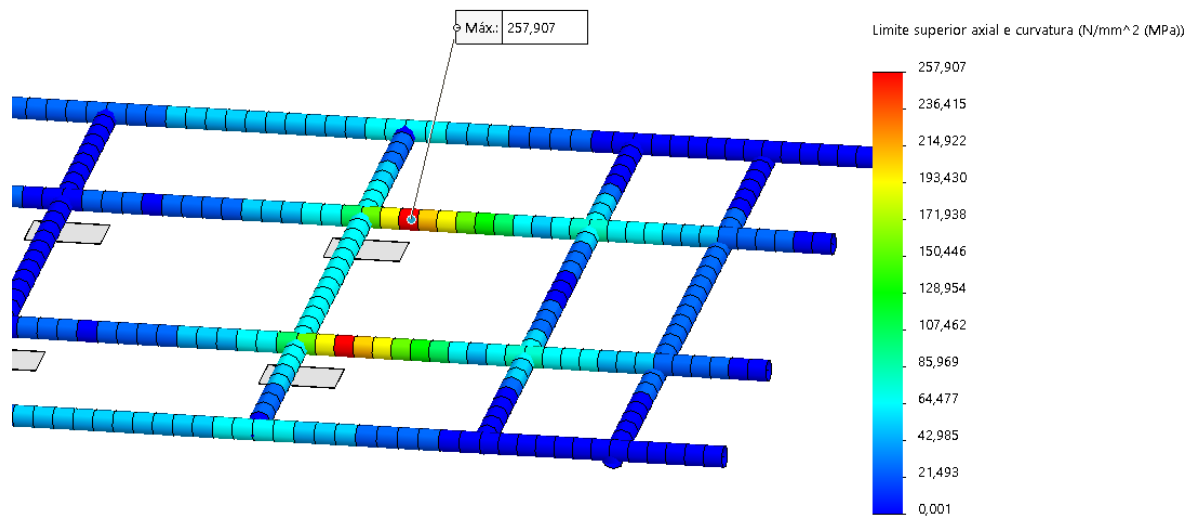


Figura 45: 3ª análise - Tensão máxima.

(Fonte: Autor, 2019).

Nome do modelo: PA3E-0-002-19
 Nome do estudo: Análise estática 8(-03- SIMPLIFICADA-)
 Tipo de plotagem: Deslocamento estático Deslocamento1
 Escala de distorção: 100

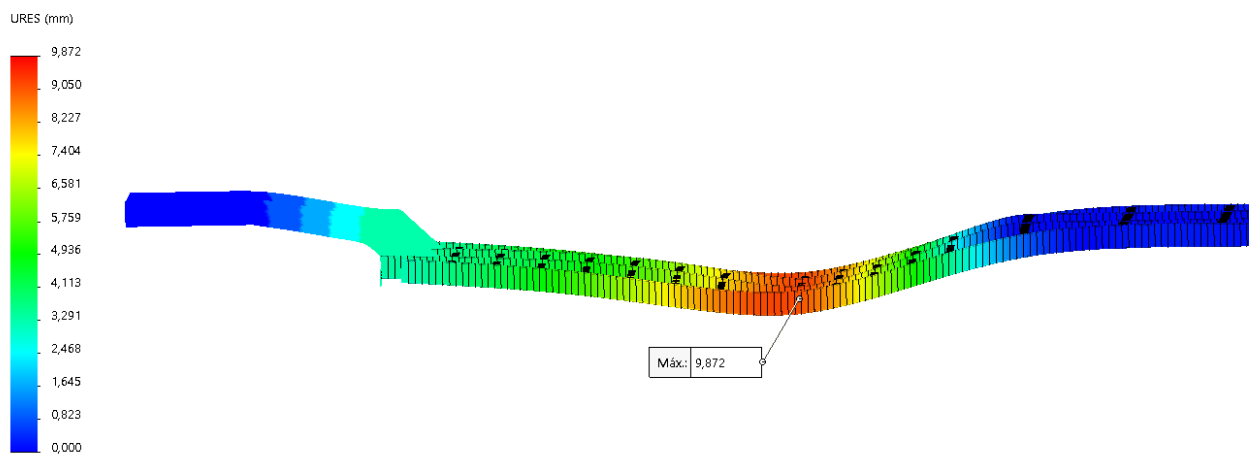


Figura 46: 3ª análise - Deslocamento máximo.

(Fonte: Autor, 2019).

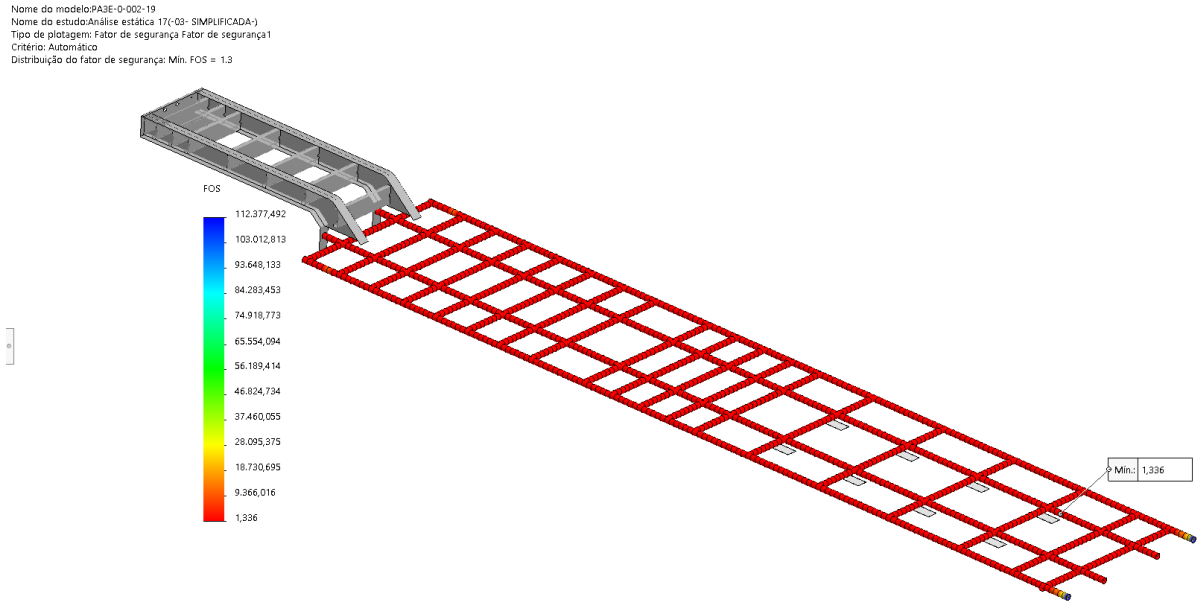


Figura 47: 3ª análise - Fator de segurança.

(Fonte: Autor, 2019).

Por fim, o peso do quadro do chassi com a utilização do perfil W360 x 32,9, considerando apenas os componentes de viga laminada, é apresentado na Tabela 10, abaixo.

Tabela 10: Peso do quadro do chassi com o perfil W360 x 32,9.

Chassi do semirreboque carrega-tudo 3 eixos		
Descrição	UN.	Peso
Longarinas	Kg	1089,46
Fechamento lateral	Kg	1066,74
Travessas	Kg	1268,38
TOTAL:	Kg	3424,58

Fonte: Autor (2019).

5 CONCLUSÃO

Diante do grande avanço tecnológico -o qual é impulsionado pelo modelo de mercado atual capitalista-, é notória a presença de empresas agressivas que buscam inovações à frente do seu tempo. Essas empresas, em virtude da ascensão tecnológica, almejam cada vez mais uma qualificação profissional, assim como qualificações técnicas de engenharia para o desenvolvimento de um determinado equipamento, que atenda a questões como eficiência, qualidade, segurança e custo. Nessa perspectiva, foram realizadas análises numéricas pelo método dos elementos finitos, com o objetivo de otimizar o perfil da longarina.

Diante disso, o presente trabalho gerou alguns resultados, o qual atendeu aos objetivos específicos, determinando o valor da carga útil, apresentando as propriedades dos materiais e realizando o teste de convergência de malha, que se mostrou satisfatório.

Posteriormente, com os resultados das simulações computacionais, foi constatado que o perfil W460 x 106 encontrava-se superdimensionado com um fator de segurança de 2,724, com isso, validando a análise deste trabalho, que busca a otimização.

Nesse âmbito, foram apresentadas análises de otimização com os perfis W460 x 52 e W360 x 32,9. Desse modo, com base nos resultados gerados, tanto do perfil W460 x 106, como do perfil W460 x 52, notou-se que a tensão máxima se deu na travessa em que foi aplicada a carga, com um valor bem inferior ao limite de escoamento de 345 Mpa. Contudo, constatou-se que, na simulação do perfil W460 x 52, houve um acréscimo no valor da tensão na região da longarina e esse valor ficou bem evidenciado com a aplicação da carga na travessa 17. Porém, mesmo com esse acréscimo no valor da tensão na longarina, o fator de segurança se manteve muito próximo à primeira análise no valor de 2,6.

Com base nos resultados relacionados à otimização com o perfil W360 x 32,9, verificou-se que a tensão máxima foi na região da longarina e o fator de segurança obtido foi de 1,336, demonstrando uma redução na resistência desse equipamento. Diante disso, como essa análise não considerou as cargas dinâmicas como, por exemplo, cargas de impacto e cargas relacionadas à fadiga, concluiu-se que o perfil W460 x 52 atenderá o objetivo em relação a otimização, garantindo a segurança do equipamento.

Nesse contexto, adotando o perfil W460 x 52 constatou-se uma redução do peso no quadro do chassi de aproximadamente 30,2%, mais especificamente a 1.779,52 kg, essa redução permite uma aplicação de carga maior e ainda a redução de gastos em sua fabricação, assim como, relacionado ao consumo de combustível e consumo dos pneus. Por fim a análise

computacional se mostra muito eficiente para promover melhorias, tanto em questões econômicas, como em questões de segurança.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar uma análise experimental com a utilização de extensômetros, para validação desta análise numérica.
- Executar uma análise numérica do semirreboque, considerando as cargas dinâmicas.
- Analisar este estudo com foco na viabilidade financeira.
- Desenvolver o mesmo estudo, utilizando outros materiais e outros tipos de geometrias.

5.2 LIMITAÇÕES

Este trabalho apresentou algumas limitações, pelo fato de a análise numérica demandar grande esforço computacional. Diante disso, como o equipamento utilizado para realização deste trabalho não apresentava as configurações ideais, houve um elevado tempo de processamento na totalidade das simulações. Dessa forma, este trabalho poderia ter atingido resultados melhores, se houvesse um pouco mais de tempo, abrangendo uma quantidade maior de análises.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9762**: Veículo rodoviário de carga – Terminologia. 3.ed. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 11412**: Implementos rodoviários – Veículos rebocados - Terminologia. 2.ed. Rio de Janeiro, 2011.

AZEVEDO, A. **Método dos elementos finitos**. 1ed. Porto, Portugal: Editora Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R. Jr.; DEWOLF, J. T.; MAZUREK, D. F. **Mecânica dos materiais**. 7.ed. Porto Alegre: Editora AMGH, 2015.

BOARETTO, J. **Comportamento estrutural de um chassi de semirreboque submetido a manobras relacionadas às dinâmicas lateral e vertical**. 2012. Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia para o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Plano CNT de transporte e logística 2018**. Disponível em <<https://www.planotransporte.cnt.org.br>> Acesso em: 22 out. 2019.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **7º Levantamento – Safra 2018/2019**. Disponível em <<https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/2845-producao-de-graos-cresce-3-4-e-chega-a-235-3-milhoes-de-toneladas>> Acesso em: 07 jun. 2019.

CONTRAN – CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. Altera a Resolução CONTRAN nº 258, de 30 de novembro de 2007. Resolução n. 526, de 29 de abril de 2015.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Aprovam as normas de utilização de rodovias federais para o transporte de cargas indivisíveis e excedentes em peso e/ou dimensões para o trânsito de veículos especiais. Resolução n. 1, de 14 de janeiro de 2016.

_____. **Institucional 2018**. Disponível em <<http://www.dnit.gov.br/acesso-a-informacao/insitucional>> Acesso em: 07 jun. 2019.

GAVIRAGHI, D. L. **Metodologia de desenvolvimento de um anteprojeto para veículos leves e médios**. 2005. Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia para o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GERDAU. **Catálogo barras e perfis**. Disponível em <<https://www2.gerdau.com.br/produtos/perfil-i-gerdau>> Acesso em: 07 jun. 2019.

_____. **Manual estacas metálicas Gerdau.** Disponível em <<https://www2.gerdau.com.br/produtos/perfil-estrutural-gerdau>> Acesso em: 22 out. 2019.

_____. **Tabela de bitolas.** Disponível em <<https://www2.gerdau.com.br/produtos/perfil-estrutural-gerdau>> Acesso em: 22 out. 2019.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 4.ed. São Paulo: Editora Atlas, 2002.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais.** 7.ed. São Paulo: Editora Pearson Prentice Hall, 2010.

MARTHA, L. F. **Análise de estruturas: Conceitos e métodos básicos.** 2.ed. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2017.

MELCONIAN, M. V. **Modelagem numérica e computacional com similitude e elementos finitos: Desenvolvimento de equação preditiva para o cálculo da força de retenção em freios de estampagem.** 1.ed. São Paulo: Editora Blucher, 2014.

NASCIMENTO, V. do. **Desenvolvimento de projetos de semi-reboques canavieiros.** 2009. Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia para o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

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

PINHEIRO, A. C. da F. B. **Estruturas metálicas: Cálculos, detalhes, exercícios e projetos** 2.ed. São Paulo: Editora Blucher, 2005.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. **Metodologia do trabalho científico: Métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico.** 2.ed. Novo Hamburgo: Editora Feevale, 2013.

SILVA, R. M. A. da. **Projeto e desenvolvimento de um semirreboque para transporte de automóveis.** 2013. Tese de mestrado, para obtenção de grau de mestre em Engenharia Mecânica na Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães-Portugal.

SORIANO, H. L. **Elementos finitos: Formulação e aplicação na estática e dinâmica das estruturas.** 1.ed. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna LTDA., 2009.

VOLKSWAGEN, Caminhões e ônibus. **Especificações Técnicas VW Constellation 26.420.** Disponível em <<https://www.vwco.com.br/produtos-volkswagen/modelo/constellation-7/26-420-6x4-tractor-v-tronic-35>> Acesso em: 28 out. 2019.

YIN, R. K. **Estudo de caso: Planejamento e métodos.** 2.ed. Porto Alegre: Editora Bookman, 2001.