

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

ANDERLÃ PINHEIRO MAGALHÃES

ANÁLISE ESTRUTURAL DO CONJUNTO PÉ DE APOIO DE SEMIRREBOQUE

MANAUS

2019

ANDERLÃ PINHEIRO MAGALHÃES

ANÁLISE ESTRUTURAL DO CONJUNTO PÉ DE APOIO DE SEMIRREBOQUE

Trabalho de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

Orientador: Prof. Arlindo Pires Lopes, Ph.D.

**MANAUS
2019**

188a Magalhães, Anderlã Pinheiro
 Análise estrutural do conjunto pé de apoio de
 semirreboque. / Anderlã Pinheiro Magalhães. Manaus :
 [s.n], 2019.
 80 f.: color.; 30 cm.

 TCC - Graduação em Engenharia Mecânica -
 Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2019.
 Inclui bibliografia
 Orientador: Arlindo Pires Lopes

 1. Elementos finitos. 2. Análise estrutural. 3.
 Semirreboque. 4. Mecânica dos sólidos. 5. Pé de apoio.
 I. Arlindo Pires Lopes (Orient.). II. Universidade do
 Estado do Amazonas. III. Análise estrutural do conjunto
 pé de apoio de semirreboque.

ANÁLISE ESTRUTURAL DO CONJUNTO PÉ DE APOIO DE SEMIRREBOQUE

Este Trabalho de Curso foi considerado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA) e aprovado em sua forma final pela comissão examinadora.

Manaus, 12 de dezembro de 2019.

Banca examinadora:

Arlindo Pires Lopes

Orientador: Prof. Arlindo Pires Lopes, Ph.D.
Universidade Do Estado Do Amazonas-UEA

Bruno Mello de Freitas

Prof. Bruno Mello De Freitas, M. Sc
Universidade Do Estado Do Amazonas-UEA

Adriana Alencar Santos

Prof. Adriana Alencar Santos, M. Sc
Universidade Federal Do Amazonas-UFAM

Dedico este trabalho a todos que tornaram este sonho possível em especial a minhã mãe Maria Clotilde Oliveira Pinheiro , minha filha Maria Isabelly da Silva Magalhães e minha esposa Thainá Barbosa pelo carinho e amor dedicado, pois a cada degrau alcançado e em todas as minhas conquistas estiveram ao meu lado prestando apoio e ajuda nos momentos conturbados e prosperos.

AGRADECIMENTOS

Para elaboração deste trabalho várias pessoas prestaram ajuda e apoio de forma incondicional, e agradecer é o mínimo que eu posso fazer para demonstrar minha gratidão. Agradeço primeiramente à Deus, pois sem ele este momento não seria possível, agradeço por estar sempre ao meu lado dando a força necessária para sempre seguir pelo caminho correto e honesto da vida.

Agradeço minha mãe, Maria Clotilde por sempre acreditar no sonhos do seu filho. Agradecimento a minha esposa Thainá Barbosa que esteve ao meu lado desde o início do meu ingresso a universidade e por fazer parte da minha vida. Agradecimento mais que especial a minha filha Maria Isabelly por ser minha maior inspiração para sempre seguir em frente. Agradeço as minhas irmãs Deine e Deicy que sempre estiveram torcendo para meu avanço pessoal. Agradecimento ao meu pai, João de Sabóia por ter me dado a educação e orientação para a vida. Agradeço a todos os familiares que sempre acreditaram e confiaram em meus sonhos e objetivos pois o apoio deles foi de imensa importância para a caminhada que decidi seguir. Obrigado aos meus familiares que foram obrigados a conviver com as tensões, incertezas, angústias, momentos de frustração e de desânimo, afetando-os de algum modo, a eles dedico a minha alegria por chegar ao fim deste percurso

Um agradecimento especial ao meu orientador, professor Arlindo Pires Lopes por todas as conversas e ensinamentos por meio das disciplinas ministradas e por ter a oportunidade de ser orientando de um profissional mais que qualificado e brilhante do mundo da engenharia.

Agradeço aos amigos que pude colher ao longo destes anos na universidade, pessoas que são exemplos de humildade e profissionalismo , meu agradecimento ao Lúcio Picanço, Fernanda Campos, Carlos Chirano, Ana Caroline Ribeiro, Vinicius Gomes.

Aos amigos conterrâneos de minha cidade natal, Tefé, e aos amigos que tive a oportunidade de conhecer, meu sincero agradecimento por contribuírem de forma direta e indireta eu agradeço ao Leonardo Dantas, Tiago Helder, Leandro Pereira, Elionay Amancio, José Carlos, Tiago Castro, Jamile Oliveira, Nathan Barbosa, Rondson Arantes e João Victor Ferreira.

Agradeço ao grupo Bertolini, empresa que tive o prazer de aprender e evoluir como profissional. Agradeço ao Engenheiro Mecânico Sérgio Corrêa por ter acreditado em meu potencial e pelos ensinamentos passados. Agradeço ao Engenheiro Mecânico Evaldo Everton, profissional incrível que de modo significativo ajudou-me a crescer como profissional.

Agradecimento ao Engenheiro Mecânico Vinicius Mariano, profissional exemplar que inspira pela dedicação e comprometimento, agradeço a todos os conselhos que certamente me ajudaram a crescer como profissional. Um agradecimento especial ao Frederico Victor Alfaia, profissional e amigo que tive a oportunidade de conhecer e compartilhar conhecimento. Agradecimento a todas as equipes do grupo (Engenharia, PCP, PCM, Comercial e Produção) que de certo modo contribuíram para meu crescimento profissional.

Agradeço também a todas as pessoas e entidades que contribuíram para que eu pudesse desenvolver e concluir este trabalho. E foram muitos os que, de alguma forma, direta ou indireta, deram essa contribuição.

Não posso furtar-me a registrar o meu agradecimento aos professores de Engenharia Mecânica, a todos os funcionários e a Coordenação e aos meus colegas de curso, com os quais pude estabelecer uma convivência pessoal e intelectual ao longo de todo esse tempo.

A todos estes (e a todos aqueles que, por falha minha, não foram mencionados) o meu muito obrigado.

“A habilidade só é desenvolvida por horas e horas e horas de trabalho duro”

(Will Smith)

RESUMO

O presente trabalho teve como meta analisar os esforços que atuam no conjunto pé de apoio de semirreboque fabricado por empresa de implementos rodoviários situado na cidade de Manaus. Foi realizada revisão bibliográfica sobre mecânica dos sólidos, legislação de trânsito, propriedades mecânicas dos materiais e fundamentos básicos de elementos finitos, com o intuito de alcançar o objetivo proposto da pesquisa. Para o trabalho, foi primeiramente selecionado o semirreboque com maior capacidade de carga, justamente para obter o maior carregamento na região do conjunto pé de apoio, com base no caminhão trator e legislação de trânsito. A análise do presente trabalho se deu em duas etapas, uma análise analítica da tensão e análise utilizando ferramenta de elementos finitos, aplicando uma análise estática linear que permitiu obter informações sobre tensões e deformação no modelo em estudo utilizando software comercial para o modelamento e análise. Para o modelamento e análise de elementos finitos do projeto utilizou-se software SolidWorks 2017, e observou-se a importância do uso de ferramentas CAD e CAE para projetos de engenharia. Os cálculos realizados serviram para determinar o valor do carregamento aplicado no conjunto pé de modo que foram obtidos resultados analíticos que foram comparados com os resultados do modelo computacional. Com a execução da ferramenta de análise pôde-se encontrar resultados satisfatórios como observar o comportamento da estrutura quando submetida ao carregamento, além de mostrar que as condições de contorno utilizadas apresentaram sucesso para análise comprovando a efetividade do método de elementos finitos.

PALAVRAS-CHAVE: Elementos finitos, semirreboque, mecânica dos sólidos.

ABSTRACT

This work aimed to analyze the efforts that work in the set of support legs of semi-trailers manufactured by a road implements company located in the city of Manaus. A bibliographic review on solid mechanics, traffic legislation, mechanical properties of materials and basic foundations of finite elements was performed in order to achieve the proposed objective of the research. For the work, it was first selected the semi-trailer with greater load capacity, precisely to obtain the largest load in the region of the set of support feet, based on the tractor truck and traffic legislation. The analysis of the present work took place in two stages, an analytical analysis of stress and analysis using a finite element tool, applying a linear static analysis that allowed obtaining information on stress and strain in the model under study using commercial software for modeling and analysis. For the modeling and finite element analysis of the design, SolidWorks 2017 software was used, and the importance of the use of CAD and CAE tools for engineering projects was observed. The calculations performed served to determine the value of the load applied to the foot set so that analytical results were obtained that were compared with the results of the computational model. With the execution of the analysis tool it was possible to find satisfactory results such as observing the behavior of the structure when subjected to loading, in addition to showing that the boundary conditions used were successful for analysis proving the effectiveness of the finite element method.

KEY WORDS: Finite elements, semi-trailer, solid mechanics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Emplacamentos de reboques e semirreboques no período de 2008-2018.	17
Figura 2 – Implemento rodoviário do tipo carroceria sobrechassi baú.	22
Figura 3 - Implemento rodoviário do tipo reboque graneleiro.	23
Figura 4 - Implemento rodoviário do tipo semirreboque baú.....	23
Figura 5 - Caminhão trator marca Mercedes-Benz modelo Axor.	24
Figura 6 – Modelo de quinta roda JSK 38C.....	24
Figura 7 - Veículo articulado, caminhão trator e semirreboque.....	25
Figura 8 - Balanço dianteiro para semirreboque.	26
Figura 9 - Veículo articulado com comprimento máximo 16 metros.	27
Figura 10 - Veículo articulado, caminhão e semirreboque, máximo 18,6 metros.....	27
Figura 11 - Veículo articulado com eixos distanciados.	28
Figura 12 – Peso transmitido por eixo segundo resolução 210/2006.	29
Figura 13 – Modelo Suspensão mecânica em tandem dois e três eixos.	29
Figura 14 - Condição para eixos distânciados.....	30
Figura 15 - Anexo I da portaria 63/2009.....	31
Figura 16 - Tensões causadas por esforços externos.....	32
Figura 17 - Efeito da tensão de cisalhamento.....	33
Figura 18 –Juntas sobrepostas.....	34
Figura 19 - Juntas de dupla superposição.....	35
Figura 20 - Determinação da área de elemento submetido a cisalhamento.	36
Figura 21 - Deformação normal para um dado corpo.	37
Figura 22 - Deformação por cisalhamento.	38
Figura 23 - Corpo de prova para ensaio de tração ou compressão.	39
Figura 24 - Diagrama Tensão-Deformação.....	40
Figura 25 - Módulo de elasticidade para diferentes tipos de aços.....	42
Figura 26 - Deformações longitudinal e lateral ocasionada pela carga P.....	42
Figura 27 - Modelo idealizado e modelo elemento finito.	44

Figura 28 - Geometria dos elementos finitos.	45
Figura 29 - Malha de elementos finitos.....	47
Figura 30 - Resultados para diferentes refinamentos da malha.	49
Figura 31 - Vista superior da fábrica da BAL.	50
Figura 32 - Bertolini Da Amazônia-BAL.....	50
Figura 33 - Solução para problemas de análise estrutural em engenharia.	53
Figura 34 - Caminhão trator VW modelo Constellation 25.360.	55
Figura 35 - Esquema de veículo articulado, caminhão trator e semirreboque.	57
Figura 36 – Diagrama de corpo livre do veículo articulado - caminhão e semirreboque.....	59
Figura 37 - Redução do carregamento distribuído do veículo articulado.....	60
Figura 38 - Diagrama de corpo livre do caminhão trator.	60
Figura 39 - Diagrama de corpo livre do semirreboque.	62
Figura 40 - Diagrama de corpo livre para determinar o carregamento na região do pé de apoio.	63
Figura 41 - Caminhão Constellation 25.420	64
Figura 42 - Chassi II de semirreboque equipado com pé de apoio regulável/ escamoteável.....	65
Figura 43 - Vista lateral do conjunto pé de apoio.	65
Figura 44 - Modelo 3D realizado com auxílio de software CAD.	66
Figura 45 - Visão de corte da região de contato das peças com auxílio de pino articulador.....	67
Figura 46 - Coluna separada para a análise.....	69
Figura 47 - Condições aplicadas para a preparação da malha.....	70
Figura 48 - Malha para análise em elementos finitos.	70
Figura 49 - Vista do modelo original e modelo analisado.	71
Figura 50 - Região fixa para análise.....	71
Figura 51 - Região de aplicação do carregamento.	72
Figura 52 - Malha obtida por SolidWorks 2017.....	72
Figura 53 - Análise de tensão von Mises.	73
Figura 54 - Análise de deslocamento do objeto de estudo.	73
Figura 55 - Diagrama com as deformações causadas pelo o carregamento aplicado.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação de caminhões tratores.....	56
Tabela 2 - Modelos de caminhões considerados para análise.....	57
Tabela 3 - Relação do caminhão e comprimento para o semirreboque.....	58
Tabela 4 - Relação da capacidade de carga para o semirreboque.	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BAL	Bertolini Da Amazônia Indústria E Comércio Ltda
BD	Balanço Dianteiro
BT	Balanço Traseiro
CMT	Capacidade Máxima de Tração
CNT	Confederação Nacional de Transporte
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
CTB	Código de Trânsito Brasileiro
DCL	Diagrama de Corpo Livre
DENATRAN	Departamento Nacional de Trânsito
EE	Entre Eixos
IR	Implemento Rodoviário
MEF	Método dos Elementos Finitos
PBT	Peso Bruto Total
PBTC	Peso Bruto Total Combinado

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 Problematização e Hipóteses	18
1.2 Delimitação do estudo	19
1.3 Objetivos.....	19
1.3.1 Objetivo Geral	19
1.3.2 Objetivos Específicos	19
1.4 Justificativa.....	20
2. REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1 Implementos Rodoviários.....	22
2.1.1 Carroceria sobre chassi.....	22
2.1.2 Rebocados.....	23
2.1.3 Caminhão Trator.....	23
2.2 Legislação.....	24
2.2.1 Resolução 210/2006	25
2.2.2 Portaria 63/2009	30
2.3 Resistência De Materiais	31
2.3.1 Tensão.....	31
2.3.2 Deformação	37
2.3.3 Propriedades Mecânicas Dos Materiais.....	38
2.4 Elementos Finitos	43
2.4.1 Tipos De Análise	44
2.4.2 Análise Não Linear Ou Linear.....	45
2.4.3 Tipos De Elementos	45
2.4.4 Grau De Liberdade	45
2.4.5 Ordem Dos Elementos.....	46
2.4.6 Malha.....	47

3. METODOLOGIA.....	50
3.1 Local de estudo	50
3.2 Método.....	51
3.3 Técnica.....	51
3.4 Procedimento	52
4. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS	54
4.1 Caminhão Trator.....	54
4.2 Comprimento Do Semirreboque.....	57
4.3 Distribuição De Carga	58
4.4 Modelo Conjunto Pé De Apoio	64
4.5 Cálculo Anlítico.....	66
4.6 Preparação da malha.....	68
4.7 Análise Elementos Finitos	71
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

1. INTRODUÇÃO

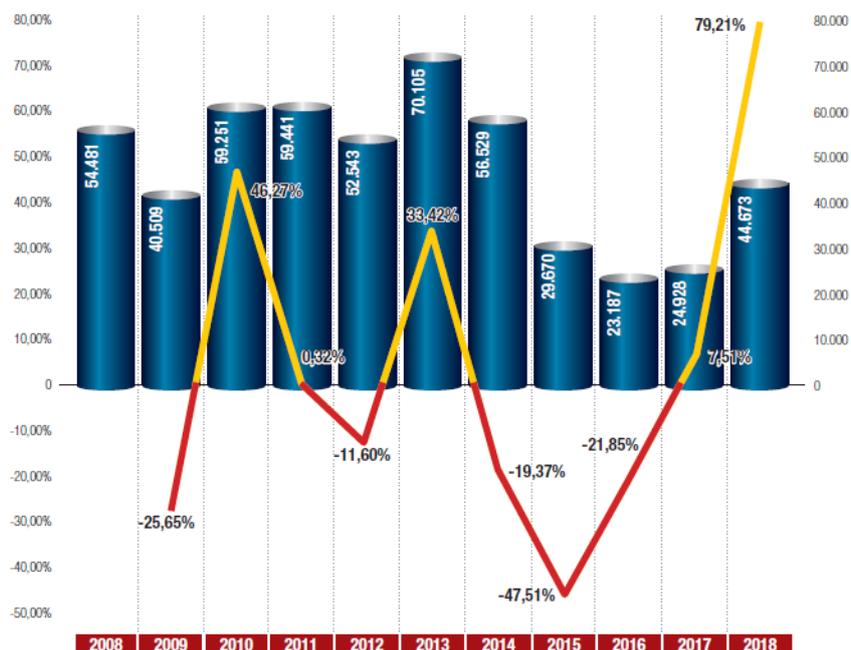
Os modais de transporte são considerados os pilares para o crescimento econômico da nação, visto que estão intimamente ligados com o desenvolvimento e expansão da capacidade produtiva, que quanto maior a produtividade de um país maior a necessidade de transporte e logística. De modo geral, pessoas necessitam se mover para diferentes pontos, cargas e produtos devem chegar aos consumidores. Este fenômeno é possível graças aos modais de transporte presente no Brasil, que favorece o crescimento regional proporcionando geração de empregos, melhora da economia e condição de vida da população (CNT, 2019).

Dentre os modais de transporte: aéreo, ferroviário, aquaviário e rodoviário, o transporte rodoviário é considerado o modal predominante na matriz de transportes no Brasil, com participação de 61,1% no transporte de cargas. No período de 2007 a 2017 o número de veículos passou de 49,6 milhões para 97,1 milhões, mostrando um aumento de 95,6%. Em 2017, foram fabricados 2,7 milhões de veículos, dos quais 3,1% são caminhões que corresponde cerca de 83700 unidades. O crescimento de veículos rodoviários de carga também apresentou crescimento notável de 78,9% em 10 anos, mostrando a alta demanda por serviços no segmento rodoviário (CNT, 2018).

Segundo a NBR 9762 (2005), o veículo rodoviário de carga é o veículo destinado para o trânsito nas vias terrestres, designado para o transporte geral de cargas, sejam líquidos, gases e sólidos. O veículo rodoviário de carga é composto por veículo automotor (caminhão ou caminhão trator) e implemento rodoviário (sobre chassi ou semirreboque). Para o transporte de cargas para curtas e longas distâncias, a utilização dos implementos rodoviários torna-se fundamental.

Após passar por um período de quedas, a indústria de implementos rodoviários segue com crescimento e reerguendo-se no panorama rodoviário. No período de 2017 a 2018, a indústria de implementos rodoviários mostrou desenvolvimento notável, passando de 35000 para 45000 empregos formados diretos e indiretos, faturamento de R\$4,1 bilhões para R\$4,8 bilhões, emplacamentos internos de 60491 para 90195 implementos e responsável por cerca de 60% do transporte de cargas no país. A Figura 1 mostra o comportamento do mercado de semirreboques no período de 10 anos. (ANFIR, 2018,2019).

Figura 1 - Emplacamentos de reboques e semirreboques no período de 2008-2018.



Fonte: ANFIR (2019, p. 84).

Na região norte, localizada na cidade de Manaus, encontrar-se a Bertolini Da Amazônia Indústria E Comércio LTDA (BAL), fabricante de implementos rodoviários. A BAL faz parte do grupo Transportes Bertolini. A empresa surgiu para suprir a necessidade de equipamentos para a realização do transporte de carga na região. O fundador do grupo Bertolini, Sr Irani Bertolini, no ano de 1993 iniciou a fabricação de semirreboques na cidade de Manaus pela BAL, atualmente conhecida como Bertolini Implementos Rodoviários. A BAL fabrica diversos modelos de implementos para atender as exigências do mercado, além de satisfazer a necessidade do cliente e contribuir para o avanço econômico da região norte. (BAL, 2019; EMPRESAS BERTOLINI, 2019).

Para realizar a fabricação de implementos rodoviários no Brasil são adotados parâmetros estabelecidos por normas, resoluções, portarias e deliberações que devem ser obedecidos no projeto do produto. Caso o implemento fabricado não obedeça às orientações previstas nos documentos legislativos e técnicos, o implemento rodoviário estará proibido de transitar pelas vias terrestres nacionais. A resolução de trânsito 210/2006 do CONTRAN serve como base para o projeto, estudo e análise de implementos rodoviários. A resolução estabelece os limites de pesos e dimensões para veículos de transporte de cargas e passageiros que transitam nas vias brasileiras.

O anexo I do CTB (1997) define o semirreboque como veículo de um ou mais eixos que se apoia na sua unidade tratora por meio de engate pino rei com a quinta roda do caminhão trator. O mercado oferece uma variedade de produtos com o intuito de atender à necessidade do cliente e o tipo de carga a ser transportada. O semirreboque é um veículo de carga destinado para o transporte de cargas em grande quantidade, tamanho e para longas distâncias. O semirreboque quando não conectado ao caminhão trator (pino rei e quinta roda) fica sujeito ao apoio conjunto de eixos e pé de apoio.

O conhecimento e aplicação da mecânica dos sólidos associada as propriedades mecânicas dos materiais utilizados para a fabricação do semirreboque é de suma importância para garantir a qualidade, funcionalidade e sobretudo a segurança do produto. Os materiais metálicos são utilizados em larga escala na indústria mecânica pois proporcionam resistência mecânica elevada, alta rigidez e ductilidade. A compreensão das propriedades mecânicas de dado material é primordial para garantir o funcionamento adequado e evitar possíveis falhas mecânicas quando submetido a esforços externos (ASKELAND & PHULÉ, 2011).

Com o avanço dos computadores, os métodos numéricos surgiram para auxiliar na resolução de problemas com alto grau de complexidade, que utilizando métodos analíticos não seriam possíveis de resolver. A engenharia auxiliada por computador (CAE) e o método FEA (método dos elementos finitos) são ferramentas que contribuem para análise e solução de problemas reais com geometrias complexas, como um virabrequim por exemplo. Segundo o método FEA, é realizada a decomposição de um componente em número finito de elementos discretos que são conectados por nós, no qual é possível obter uma aproximação das tensões e deformações do componente. A ferramenta tem alta relevância na engenharia com o intuito de auxiliar em cálculos e análises em situações reais com elevada complexidade (NORTON, 2013).

Dessa maneira o estudo do comportamento do conjunto pé de apoio escamoteável/regulável quando submetido a carregamentos externos, auxiliado por ferramenta de análise de elementos finitos, torna-se fundamental para adquirir informações das tensões e deformações, e obter o dimensionamento correto dos elementos do conjunto.

1.1 Problematização e Hipóteses

O método de elementos finitos é ferramenta adequada para análises de tensão e deformação em elementos estruturais do conjunto pé de apoio fabricado para semirreboque quando submetido a carregamentos definidos com base na legislação de trânsito?

Hipóteses:

H0: Quanto menor o comprimento do semirreboque maior será o carregamento submetido na região do conjunto pé.

H1: As propriedades mecânicas dos materiais utilizados para a fabricação do conjunto resistem aos esforços e garantem funcionalidade do produto.

H2: A ferramenta de elementos finitos é fundamental para projetos de engenharia, visto a eficiência e o alto grau de processamento para resolver problemas complexos

H3: Conhecimento a respeito da estática e resistência dos materiais é fundamental para a correta modelagem, interpretação e análise dos resultados obtidos do MEF.

H4: Ferramentas de modelamento e análise permitem redução de custos, matéria prima, processos e mão de obra.

1.2 Delimitação do estudo

O trabalho de conclusão de curso propõe a realizar uma pesquisa que se delimita a estudar a resistência de materiais e utilizar o método de elementos finitos como ferramenta para analisar os esforços externos aplicados nos elementos estruturais do conjunto pé de apoio regulável-escamoteável de semirreboque. O semirreboque considerado para o estudo está de acordo com as definições previstas na resolução 210/2006. O conjunto pé de apoio considerado para o estudo é fabricado pela BAL, empresa do ramo de implementos rodoviários situada na região norte, na cidade de Manaus-AM. Utiliza-se como ferramentas para obtenção de informações para o andamento do estudo: as pesquisas, projetos, manuais, livros e softwares de auxílio.

1.3 Objetivos**1.3.1 Objetivo Geral**

Realizar o estudo de mecânica dos sólidos no conjunto pé de apoio de semirreboque fabricado por empresa de implementos rodoviários situada na cidade de Manaus, utilizando ferramentas analíticas e elementos finitos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar o semirreboque que apresente o maior carregamento na região do conjunto pé de apoio;
- Calcular o carregamento que será aplicado na região do conjunto pé;

- Dimensionar furo e pino utilizando método analítico;
- Modelar conjunto pé de apoio utilizando software de modelamento 3D;
- Construir malha para estudo de elementos finitos;
- Realizar análise de elementos finitos do conjunto pé de apoio.

1.4 Justificativa

Devido um fenômeno comum na engenharia, elementos e estruturas são submetidos a carregamentos dinâmicos, ou seja, são submetidos a tensões repetitivas de diferentes formas como tração, compressão, flexão, vibração, cisalhamento e outros, que com o tempo causam a fratura do material. Esse fenômeno é conhecido como a fadiga que nada mais é a queda de resistência ou a fratura do material submetido a tensão repetitiva (BEER et al, 2013).

O presente trabalho tem como meta principal a aplicação da resistência de materiais e método de elementos finitos no projeto conjunto pé de apoio de semirreboque produzido na empresa BAL, localizada em Manaus/AM.

O método de elementos finitos associado a análise de projetos vem ganhando espaço dada a capacidade de solucionar problemas com alto grau de complexidade, onde tais problemas não seriam de fácil resolução pelo método analítico. Atualmente, existem vários softwares comerciais que permitem a realização do estudo de elementos finitos. O método é aplicável em diversas áreas da engenharia tais como: engenharia mecânica, naval, civil e outras.

A pesquisa tem como finalidade esclarecer e garantir para a sociedade a necessidade de estudos no segmento para compreensão e esclarecimento das vantagens da utilização da ferramenta na engenharia. O objetivo de qualquer fabrica é oferecer produtos com qualidade e principalmente com segurança. O intuito do trabalho é mostrar que uma empresa situada em Manaus/AM possui capacidade para oferecer produtos com qualidade e alto desempenho utilizando ferramentas CAD, CAE e, principalmente, do conhecimento da mecânica dos sólidos para interpretar os resultados.

A pesquisa também auxiliará a instituição de ensino e comunidade acadêmica com ganho de conhecimento e engrandecimento do acervo de pesquisas na área de resistência de materiais e análise de elementos finitos. A presente pesquisa utiliza como base para a obtenção de dados a observação e levantamento de informações a respeito do problema proposto, e aplicação de conhecimentos em um projeto real de mercado.

Por meio do trabalho será possível mensurar todos os aspectos importantes relacionados ao processo de elaboração, fabricação e montagem do produto, de modo a conhecer os pontos positivos e negativos, mas que podem ser ajustados, corrigidos e até mesmo melhorados, conforme as necessidades e os resultados que serão obtidos com o trabalho.

O estudo sobre resistência mecânica no conjunto pé de apoio, associado à aplicação do método de elementos finitos, será abordado com a finalidade de garantir uma visão de projeto que permitirá a análise e observação do comportamento do material quando submetido a carregamentos.

O presente estudo possibilitará amplos conhecimentos a todos os profissionais envolvidos que buscam conhecer, melhorar seus intelectos e crescimento profissional, inclusive no segmento acadêmico, uma vez que este trabalho contribuirá com o aumento de pesquisas e informações a respeito do tema.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Implementos Rodoviários

O implemento rodoviário juntamente com veículo de tração resulta no veículo rodoviário de carga. Os implementos rodoviários são os reboques, semi-reboques e carrocerias sobre chassi, ou seja, os componentes do caminhão ou caminhão trator responsáveis pela função específica do transporte de cargas para curtas ou longas distâncias (GOLDENSTEIN; ALVES; AZEVEDO, 2006). A indústria de implementos rodoviários desenvolve produtos com diferentes dimensões (largura, altura e comprimento) e objetivo de transporte (grãos, botijões de gás, cargas em geral), que devem seguir os requisitos determinados nas resoluções, portarias, deliberações, normas e especificações técnicas. A resolução de trânsito base para o projeto de implementos rodoviários no Brasil é a resolução 210/2006 do CONTRAN.

2.1.1 Carroceria sobre chassi

As carrocerias sobre chassi (Figura 2) compõem veículos de carga de menor porte, utilizados usualmente para distribuir as cargas até os consumidores finais, predominante nas áreas urbanas. As carrocerias do implemento são montadas diretamente sobre o chassi do caminhão e não possui eixos ou chassi próprios (GOLDENSTEIN; ALVES; AZEVEDO, 2006). O caminhão, veículo responsável por receber a carroceria sobrechassi, é definido como veículo automotor complementado com equipamento veicular que o torna apto a desempenhar os trabalhos de transporte de carga (NBR 9762, 2005). O projeto das carrocerias sobre chassi depende da aplicação que o cliente procura, dessa forma o produto apresenta uma variedade de configurações como baú furgão, gaiola para transporte de botijão, basculantes, carga seca e etc.

Figura 2 – Implemento rodoviário do tipo carroceria sobrechassi baú.



FONTE: BAL (2019)

2.1.2 Rebocados

Os rebocados possuem maior comprimento e capacidade de transporte de carga. São utilizados usualmente em longos percursos e volumes de carga maiores. Este tipo de implemento se aplica para o transporte de mercadorias das unidades industriais até os centros de distribuição. Os rebocados são estruturas completas, com chassi, eixos, suspensão, freios e demais acessórios, e são engatadas ao caminhão trator. Os veículos utilizados para tracionar os rebocados são denominados caminhão trator ou cavalo mecânico (NBR 9762, 2005). Os rebocados podem ser do tipo reboque (Figura 3) - implemento rodoviário tracionado por caminhão trator por meio de engate, e semirreboque (Figura 4) - implemento tracionado por caminhão-trator por meio do engate da quinta roda com pino rei (NBR 9762, 2005).

Figura 3 - Implemento rodoviário do tipo reboque graneleiro.



Fonte: FACCHINI (2019).

Figura 4 - Implemento rodoviário do tipo semirreboque baú.



FONTE: BAL (2019).

2.1.3 Caminhão Trator

O caminhão-trator (Figura 5) é caracterizado como veículo automotor equipado com quinta roda (Figura 6) destinado a tracionar ou arrastar outro veículo (NBR 9762, 2005). O

semirreboque é trelado ao caminhão trator por meio do engate do pino rei do semirreboque com a quinta roda do veículo trator. A combinação do semirreboque com caminhão trator forma um veículo articulado que possui capacidade de carga e dimensões estabelecidos pela a resolução 210/2006 do CONTRAN.

Figura 5 - Caminhão trator marca Mercedes-Benz modelo Axor.



FONTE: MERCEDES BENS (2019).

Figura 6 – Modelo de quinta roda JSK 38C



FONTE: JOST (2019).

2.2 Legislação

Os implementos rodoviários fabricados no Brasil só poderão transitar pelas vias terrestres se possuir registro e licenciamento em órgão competente. No Brasil o DENATRAN (Departamento Nacional de Trânsito) é o órgão máximo executivo ligado ao sistema de trânsito que possui autonomia administrativa, técnica, e jurisdição sobre todo o território nacional. O implemento rodoviário deve seguir as normas técnicas, resoluções, portarias e deliberações,

e caso o produto encontre-se fora das especificações estabelecidas o veículo de transporte de carga fica impossibilitado de ter registro e licenciamento.

2.2.1 Resolução 210/2006

A resolução 210 de 13 novembro de 2006 do CONTRAN estabelece os limites de peso e dimensões para os veículos que transitem por vias terrestres e dá outras providencias. Com o passar dos anos a resolução 210/2006 sofreu alterações pelas as resoluções 284/2008, 326/2009, 577/2016, 608/2016, 625/2016, 628/2016 e pela deliberação 105/2010.

As alterações ocorridas na resolução 210/2006 não descreditam a totalidade das informações contidas no documento. O presente trabalho tem como objeto o estudo do conjunto pé de apoio utilizado em semirreboques, dessa maneira, as informações para os veículos designados para o transporte coletivo de passageiros não serão consideradas no referencial teórico, mas vale lembrar que todo o conteúdo pode ser encontrado na resolução 210/2006.

2.2.1.1 Dimensões

As dimensões autorizadas para veículos com carga ou sem carga são:

- I. Largura máxima: 2,60 metros;
- II. Altura máxima: 4,40 metros;
- III. Comprimento total: o comprimento depende do tipo do implemento rodoviário, de modo que para o trabalho foi referenciado o veículo articulado com duas unidades, de modo:
 - a) Veículos articulados com duas unidades, do tipo caminhão trator e semirreboque (Figura 7): 18,60 metros;

Figura 7 - Veículo articulado, caminhão trator e semirreboque.



O limite para o comprimento do balanço traseiro (BT) para veículos de transporte de carga é definido como:

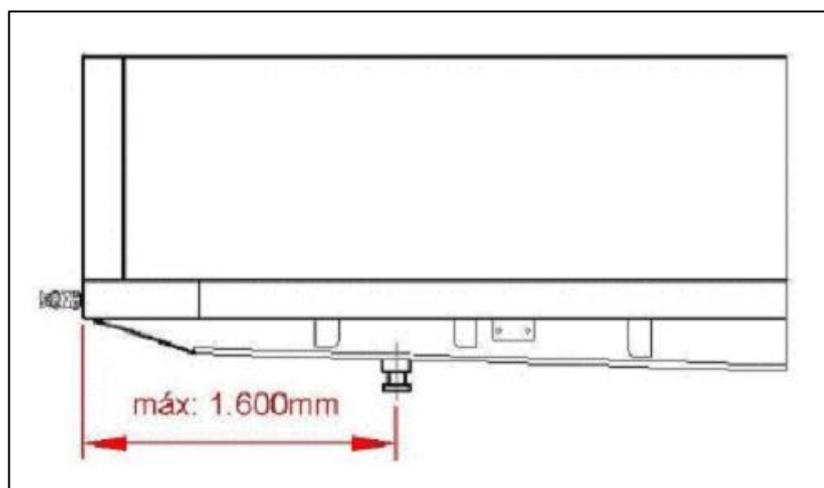
- I. Veículos não-articulados de transporte de carga, até 60 % da distância entre os dois eixos (EE) mais externos, não podendo exceder a 3,50 metros.

A distância entre os eixos (EE) deverá ser medida de centro a centro no plano vertical das rodas dois eixos extremos do veículo. No caso do semirreboque, a distância entre eixos é medida da distância do plano central que passa pelo pino rei até o último eixo traseiro.

O balanço traseiro (BT) é definido como a distância entre o plano vertical que passa pelos centros das rodas traseiras extremas e o ponto mais recuado do veículo, considerando-se todos os elementos rigidamente fixados ao mesmo. O balanço dianteiro (BD) é definido como a distância entre o plano vertical que passa pelos centros das rodas dianteiras (no caso do semirreboque, o pino rei) e a frontal do veículo.

Para o semirreboque, o BD deverá obedecer a NBR ISO 1726. Segundo a NBR 1726, o BD é estabelecido como a distância do eixo central que passa pelo pino rei até a frontal do semirreboque (Figura 8). Considerando um semirreboque com 2,6 metros de largura, o BD máximo é aproximadamente 1,600 metros.

Figura 8 - Balanço dianteiro para semirreboque.



FONTE: GUIA DO TRC (2019).

2.2.1.2 Pesos

Os limites máximos de peso bruto total (PBT), peso bruto total combinado (PBTC) e peso bruto total transmitido por eixo nas superfícies das vias terrestres são estabelecidos pela resolução 210/2006.

Peso Bruto Total e Peso Bruto Combinado

O PBT e PBTC dependem do comprimento da combinação do veículo articulado e do sistema de eixos. O limite da capacidade máxima de tração (CMT) da unidade tratora é determinada pelo fabricante. Para o presente trabalho será considerado a combinação de caminhão trator e semirreboque.

- a) PBTC para veículos articulados com duas unidades, do tipo caminhão-trator e semi-reboque, e comprimento total inferior a 16 metros: 45 toneladas (Figura 9);

Figura 9 - Veículo articulado com comprimento máximo 16 metros.



FONTE: RANDON MULTIEIXO (2012).

- b) PBTC para veículos articulados com duas unidades, do tipo caminhão-trator e semi-reboque com eixos em tandem triplo e comprimento total superior a 16 metros e máximo 18,6 metros: 48,5 toneladas (Figura 10);

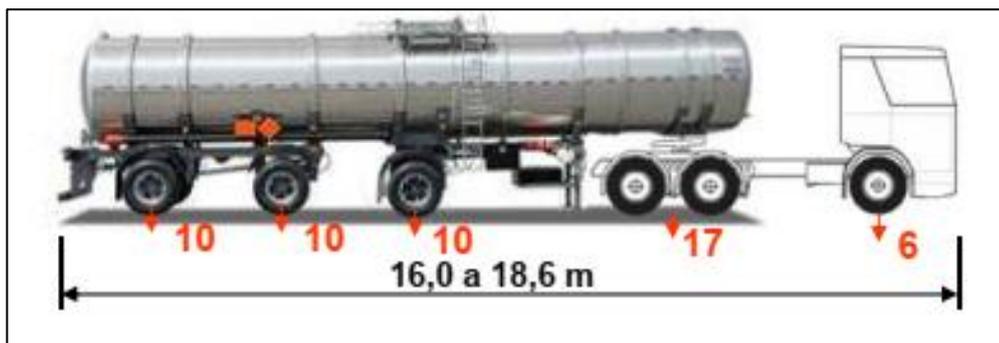
Figura 10 - Veículo articulado, caminhão e semirreboque, máximo 18,6 metros.



FONTE: RANDON MULTIEIXO (2012).

- c) PBTC para veículos articulados com duas unidades, do tipo caminhão-trator e semi-reboque com eixos distanciados, e comprimento total igual ou superior a 16 metros e máximo 18,6 metros: 53 toneladas (Figura 11).

Figura 11 - Veículo articulado com eixos distanciados.



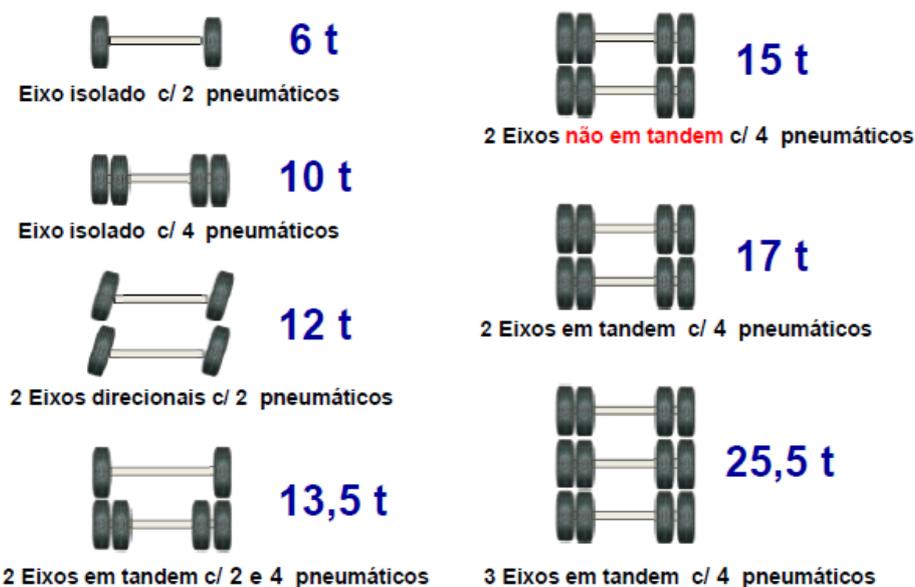
FONTE: RANDON MULTIEIXO (2012).

Peso Bruto Transmitido Por Eixo

Os limites de peso transmitido por eixo para os veículos automotores e para os implementos rodoviários equipados com sistema de eixo são estabelecidos na resolução 210/2006. Os limites de peso bruto transmitido por eixo e conjunto de eixos só prevalecem se todos os pneumáticos, de um mesmo conjunto de eixos, forem da mesma rodagem e calçarem rodas no mesmo diâmetro. Segue a relação dos pesos transmitidos por eixo considerados para o caminhão trator e semirreboque utilizados no presente trabalho. A Figura 12 mostra um esquema ilustrado do sistema de eixos com o respectivo limite de peso transmitido para diferentes configurações.

- a) Peso bruto por eixo isolado de dois pneumáticos: 6 toneladas;
- b) Peso bruto por eixo isolado de quatro pneumáticos: 10 toneladas;
- c) Peso bruto por conjunto de dois eixos em tandem, quando à distância entre os dois planos verticais, que contenham os centros das rodas, for superior a 1,20 metros e inferior ou igual a 2,40 metros: 17 toneladas;
- d) Peso bruto por conjunto de três eixos em tandem, aplicável somente a semi-reboque, quando à distância entre os três planos verticais, que contenham os centros das rodas, for superior a 1,20 metros e inferior ou igual a 2,40 metros: 25,5 toneladas;

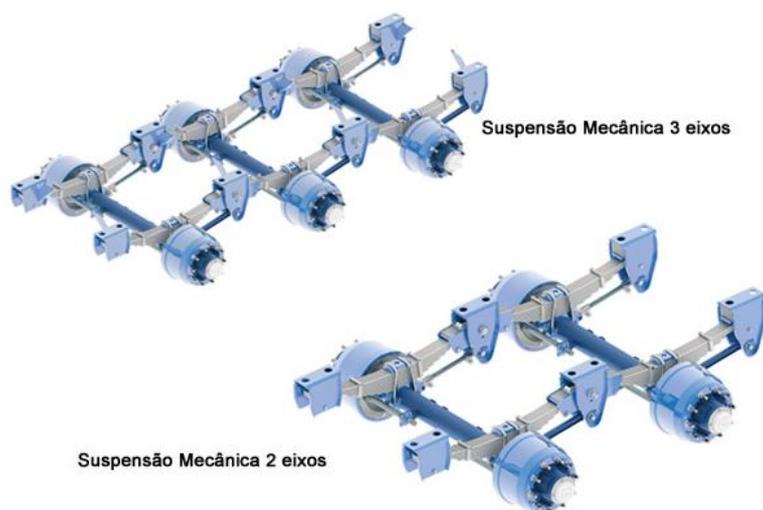
Figura 12 – Peso transmitido por eixo segundo resolução 210/2006.



FONTE: Randon Multieixo (2012).

Considera-se eixos em tandem (Figura 13) dois ou mais eixos que constituam um conjunto integral de suspensão. Eixos tandem de rodas duplas são formados por dois ou mais eixos consecutivos ligados a um dispositivo de suspensão (chamado de balancim) responsável por distribuir a carga entre os eixos.

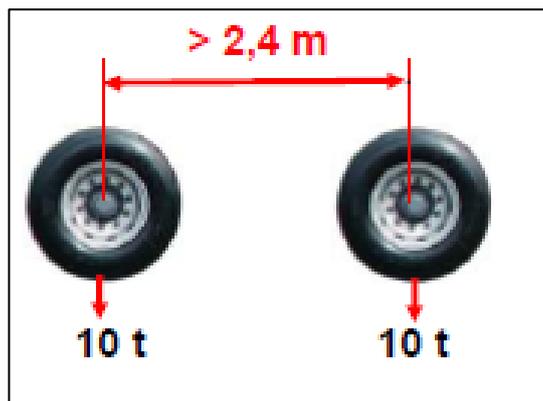
Figura 13 – Modelo Suspensão mecânica em tandem dois e três eixos.



FONTE: SUSPENSY (2019).

Quando a distância entre os planos dos centros das rodas de um conjunto de dois ou mais eixos for superior a 2,40 metros, cada eixo será considerado como distanciado.

Figura 14 - Condição para eixos distânciados.



FONTE: RANDON MULTIEIXO (2019).

Em qualquer par de eixos ou conjunto de três eixos em tandem, com quatro pneumáticos em cada, com os respectivos limites legais de 17 toneladas e 25,5 toneladas, a diferença de peso bruto total entre os eixos mais próximos não deverá exceder a 1.700kg.

2.2.2 Portaria 63/2009

A portaria 63 de 31 de março de 2009 estabelece a homologação dos veículos e combinações de veículos de transporte de carga e de passageiros. O material presente na portaria 63 determina os respectivos limites de comprimento, PBT e PBTC.

A base para a homologação de veículos e combinações de veículos surgiu das especificações registradas nas resoluções 210/2006 e 211/2006 do CONTRAN. Como dito, se o veículo de transporte de carga não estiver de acordo com as normas, deliberações, portarias e resoluções, o produto fica impossibilitado de ser registrado e licenciado para transitar pelas vias terrestres.

O anexo da Portaria 63/ 2009 contém diversas combinações de comprimento, PBT e PBTC para o qual o projeto deverá atender. A Portaria 63/ 2009 assim como seu anexo podem ser obtidos no endereço eletrônico do portal do DENATRAN. Para o veículo articulado composto por duas composições, caminhão trator e semirreboque, existe uma variedade de arranjos que dependem do sistema de eixos e comprimento. A Figura 15 mostra as composições possíveis para o caminhão trator e semirreboque.

Vale lembrar que a Portaria 63/ 2009 possui combinações para carrocerias sobrechassi, veículos articulados com duas ou mais unidades e veículos para o transporte de passageiros.

Figura 15 - Anexo I da portaria 63/2009.

COMPOSIÇÕES HOMOLOGADAS PARA O TRANSPORTE DE CARGA										
Caminhão Trator + Semi-reboque			Peso máximo por eixo ou conjunto de eixos (t)	PBT E PBTC (t)						Comprimento máximo (m)
				Comprimento total (metros)						
				Inferior a 14,0	Inferior a 16,0	Superior ou igual a 16,0	Inferior a 17,0	Superior ou igual a 17,0	Superior a 18,8	Superior ou igual a 25,0
I-9			6 + 10 + 10 = 26		26	26				
I-10			6 + 10 + 17 = 33		33	33				
I-11			6 + 10 + 10 + 10 = 36		36	36				
I-12			6 + 10 + 20,5 = 41,5		41,5	41,5				
I-13			6 + 10 + 10 + 17 = 43		43	43				
I-14			6 + 10 + 10 + 10 + 10 = 46		46	46				
I-15			6 + 17 + 10 = 33		33	33				
I-16			6 + 17 + 10 + 10 = 43		43	43				
I-17			6 + 13,5 + 10 + 10 = 39,5		39,5	39,5				
I-18			6 + 17 + 25,5 = 48,5		45	48,5				
I-19			6 + 13,5 + 25,5 = 45		45	45				
I-20			6 + 17 + 10 + 17 = 50		45	50				
I-21			6 + 13,5 + 10 + 17 = 46,5		45	46,5				
I-22			6 + 17 + 10 + 10 + 10 = 53		45	53				
I-23			6 + 13,5 + 10 + 10 + 10 = 49,5		45	49,5				
I-24			6 + 13,5 + 10 = 29,5		29,5	29,5				
I-25			6 + 13,5 + 17 = 36,5		36,5	36,5				

FONTE: Portaria 63 (2009).

2.3 Resistência De Materiais

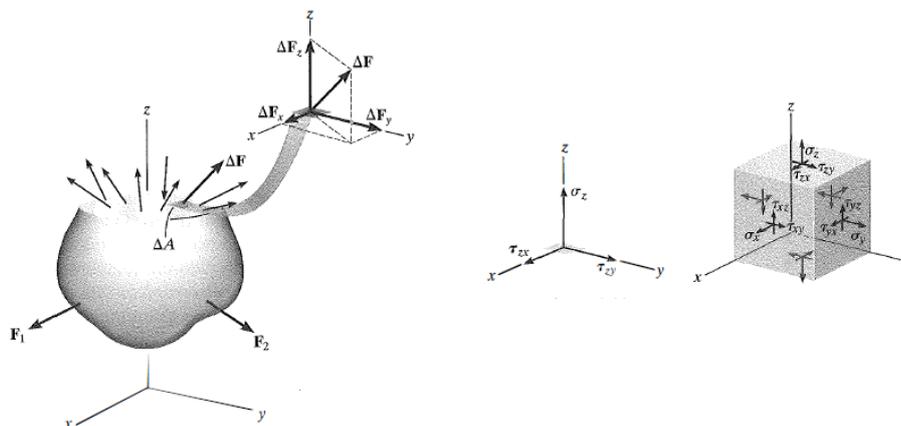
Segundo HIBBELER (2009), a resistência dos materiais é o ramo da mecânica que estuda as relações entre as cargas externas aplicadas a um corpo deformável e a intensidade das forças internas que agem no interior do corpo, além de tratar o fenômeno de deformações do corpo e estabilidade quando sujeito a forças externas. As equações da estática são ferramentas que permitem a determinação dos esforços internos causados por esforços externos que agem sobre um elemento estrutural ou mecânico. A matéria prima que compõe o elemento estrutural possui papel importante para a elaboração das equações da resistência dos materiais, desse modo, torna-se indispensável o conhecimento das propriedades mecânicas do material utilizado.

2.3.1 Tensão

Considere um corpo (Figura 16) com área seccionada e dividida em pequenas áreas ΔA . A medida que ΔA diminui é adotado duas premissas para as propriedades do material. A primeira é que o material deve ser contínuo, ou seja, o material deve possuir continuidade e distribuição uniforme de matéria, e a segunda premissa diz que o material deve ser coeso que significa um material que possui suas partes muito bem conectadas, sem trincas ou separações. Sobre a área é associado uma força ΔF , que atua em determinada direção e para análise da

tensão utiliza-se as três componentes ΔF_x , ΔF_y e ΔF_z que são forças tangentes e normal a área ΔA . O quociente entre a força e a área é denominado tensão, que nada mais é que “a intensidade da força interna sobre um plano específico que passa por um dado ponto”.

Figura 16 - Tensões causadas por esforços externos.



FONTE: HIBBELER (2009).

Tensão Normal

A intensidade de força, ou força por unidade de área, que age perpendicularmente ao plano ΔA é definido como tensão normal, σ . A Equação 1 representa que ela age no sentido Z considerando como base a Figura 16:

$$\sigma_z = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_z}{\Delta A} \quad (1)$$

Se a força normal tracionar o elemento ΔA , esse efeito será chamado de tensão de tração, já o contrário, se a força normal empurrar o elemento ΔA , o efeito é conhecido como tensão de compressão.

Tensão De Cisalhamento

A intensidade da força que age por unidade de área, que atua tangente a ΔA , é denominada tensão de cisalhamento τ . As coordenadas para a tensão de cisalhamento são determinadas pelas Equação 2 e Equação 3:

$$\tau_{zx} = \lim_{\Delta x \rightarrow A} \frac{\Delta F_x}{\Delta A} \quad (2)$$

$$\tau_{zy} = \lim_{\Delta x \rightarrow A} \frac{\Delta F_y}{\Delta A} \quad (3)$$

No sistema internacional, a medida para a tensão normal ou cisalhamento é Newton por metro quadrado $\left(\frac{N}{m^2}\right)$ que pode ser escrita como 1 Pascal (1 Pa). Devido os grandes valores encontrados na engenharia é utilizado os prefixos como k (10^3), M (10^6) ou G (10^9).

Tensão de cisalhamento média

Para determinar o valor da tensão de cisalhamento considere uma força F aplicada na barra de material deformável (Figura 17). Considerando os apoios rígidos e F suficientemente grande para deformar e causar falha, a força F gera um esforço interno tangente V que é aplicado na área da seção transversal A . A relação entre V e A é conhecida como a tensão cisalhamento média que é distribuída sobre cada área seccionada que desenvolve a força de cisalhamento. A tensão de cisalhamento média é matematicamente escrita por:

$$\tau_{méd} = \frac{V}{A} \quad (4)$$

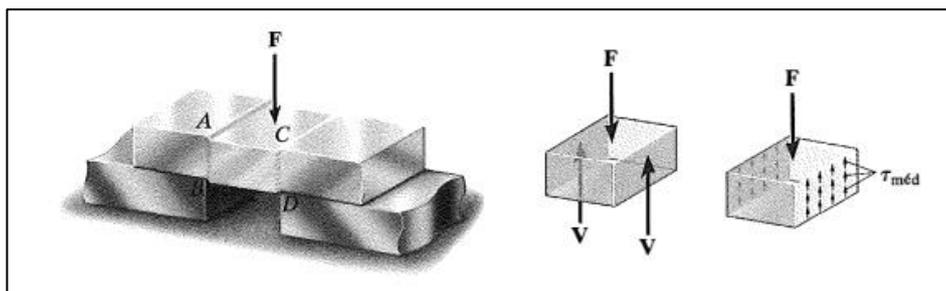
Na expressão,

$\tau_{méd}$ é tensão de cisalhamento média na seção, que é a mesma em cada ponto localizado na seção e atua na mesma direção do esforço V .

V é a força de cisalhamento interna resultante na seção e determinada pelas equações de equilíbrio.

A é a área da seção transversal.

Figura 17 - Efeito da tensão de cisalhamento.



FONTE: HIBBELER (2019).

Na Figura 17 é possível notar que a tensão de cisalhamento acompanha o sentido do esforço cortante V . A tensão de cisalhamento média é dividida em dois grupos: cisalhamento simples (também conhecido como cisalhamento direto) e cisalhamento duplo. O cisalhamento ocorre frequentemente em diversos tipos de acoplamentos como por exemplo: parafusos, pinos, material de solda e etc.

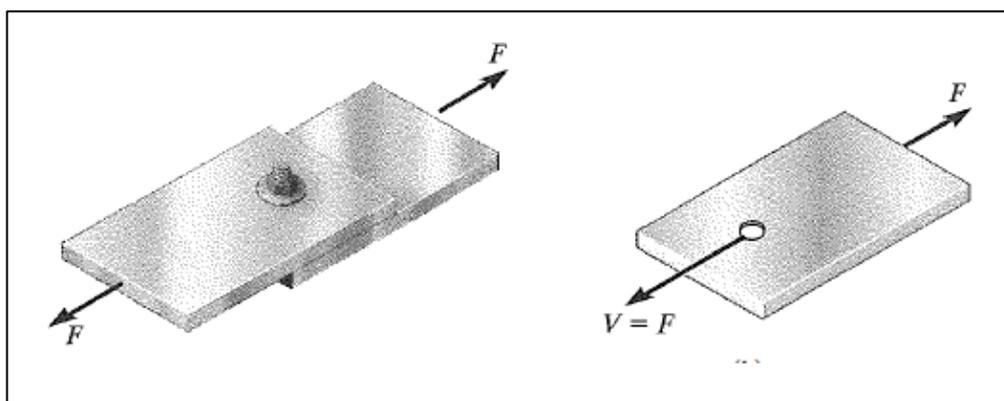
A Equação 4 representa uma aproximação, visto que o estudo minucioso das tensões mostram resultados superiores quando comparados. Porém, a Equação 4 pode ser utilizada em projetos e análises de engenharia. Normas da engenharia utilizam a Equação 4 para cálculos das dimensões de elementos de fixação e resistência de fixação de juntas sujeitas a cargas de cisalhamento.

Cisalhamento Simples

Considere as juntas de aço conectadas por pino ou outro elemento de fixação como mostrado na Figura 18. A maneira que as chpas estão dispostas são conhecidas como *juntas sobrepostas*. Ao realizar um corte entre os elementos é obtido o diagrama de corpo livre (DCL). Para manter a condição de equilíbrio a área da seção transversal do parafuso e a superfície de fixação entre os elementos está sujeita a uma única força de cisalhamento $V = F$, de modo que a tensão de cisalhamento é escrita:

$$\tau = \frac{V}{A} = \frac{F}{A} \quad (5)$$

Figura 18 –Juntas sobrepostas.



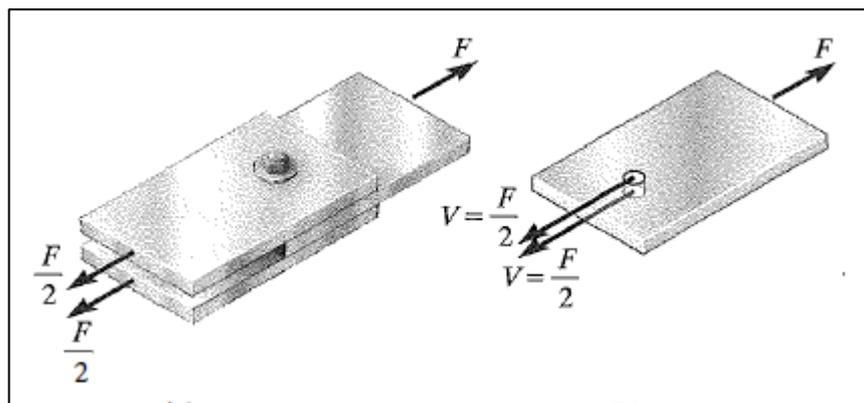
FONTE: HIBBELER (2019).

Cisalhamento Duplo

Quando o acoplamento é composto por mais de duas juntas deve-se considerar duas superfícies de cisalhamento como é mostrado na Figura 19. Este tipo de acoplamento é conhecido como juntas de dupla superposição. Ao realizar um corte entre os elementos, o DCL mostra que haverá força de cisalhamento para cada junção, ou seja, a condição de cisalhamento duplo mostra que $V = F/2$ age sobre cada área seccionada. Matematicamente é escrito da seguinte forma:

$$\tau = \frac{V}{A} = \frac{\frac{F}{2}}{A} = \frac{F}{2A} \quad (6)$$

Figura 19 - Juntas de dupla superposição.



FONTE: HIBBELER (2019)

Tensão Admissível

Para qualquer projeto de engenharia a tensão aplicada no elemento estrutural deve ter restrição com respeito a capacidade de carga que o material pode suportar respeitando níveis de segurança. Para garantir a segurança no projeto, deve-se escolher uma tensão admissível que restrinja a carga aplicada a um valor menor do que a carga que o elemento é capaz de suportar.

A tensão admissível deve ser levada em conta por uma série de razões: a carga considerada no projeto pode ser diferente da aplicada na realidade, as dimensões do projeto podem variar no processo de fabricação e montagem de componentes, vibrações, impactos inesperados ou até mesmo por condições do material disponível.

A carga ou tensão admissível para um projeto depende do **fator de segurança** FS, que é a razão entre carga de ruptura (ou tensão de ruptura) e a carga admissível (ou tensão admissível). A carga de ruptura F_{rup} é determinada por ensaios experimentais e o fator de segurança FS é especificado com base na experiência do engenheiro ou projetista, e manuais técnicos. Matematicamente:

$$FS = \frac{F_{rup}}{F_{adm}} \quad (7)$$

Se a carga aplicada ao elemento estiver linearmente relacionada com a tensão desenvolvida no interior do elemento, a Equação 7 é escrita em termos da tensão normal e tensão de cisalhamento.

$$FS = \frac{\sigma_{rup}}{\sigma_{adm}} \quad (8)$$

$$FS = \frac{\tau_{rup}}{\tau_{adm}} \quad (9)$$

Vale ressaltar que o fator de segurança escolhido deve ser maior que 1 para evitar possível falha. Alguns valores do fator de segurança dependem do material aplicado e do tipo de aplicação.

Projeto De Acoplamentos Simples

Considerando as premissas adequadas para o material, as equações de tensão normal e tensão cisalhamento podem ser aplicadas para o projeto de acoplamentos simples e elementos mecânicos. Para o caso do elemento está submetido a força normal ou força de cisalhamento é possível determinar a área por meio das Equações 10 e 11:

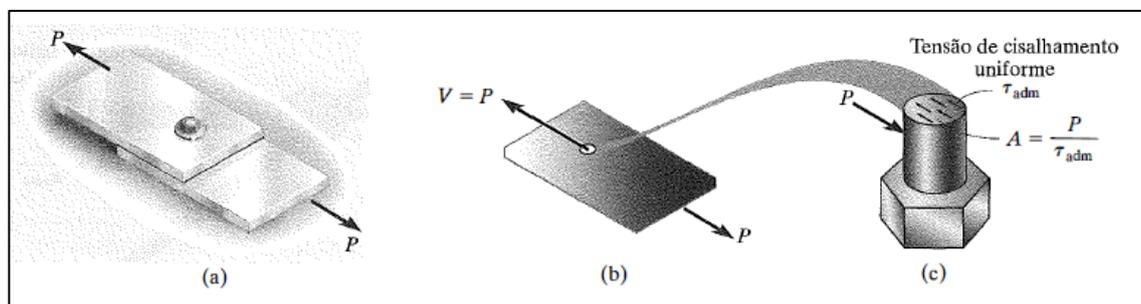
$$A = \frac{P}{\sigma_{adm}} \quad (10)$$

$$A = \frac{V}{\tau_{adm}} \quad (11)$$

De modo geral, a utilização das equações citadas podem ser aplicadas em modelos básicos de problemas presentes em projetos de engenharia. Para o presente estudo será considerado os projetos que envolvem o cisalhamento transversal.

- Área da seção transversal de um acoplamento submetido a cisalhamento: Elementos como parafusos e pinos, são normalmente utilizados para unir chapas, pranchas e outros elementos. Para uma junta sobreposta (Figura 20), o parafuso ou pino está sujeito a uma força de cisalhamento interna V em sua seção transversal. Para este caso, é possível determinar a área do elemento estrutural com o auxílio da Equação 12.

Figura 20 - Determinação da área de elemento submetido a cisalhamento.



FONTE: HIBBELER (2010).

$$A = \frac{P}{\tau_{adm}} \quad (12)$$

2.3.2 Deformação

Sempre que um corpo for submetido a forças haverá a tendência de alterar sua forma e tamanho, este fenômeno é conhecido como deformação. As deformações podem ser perceptíveis ou não, depende basicamente do tipo de material. De maneira geral, a deformação nos materiais não é uniforme, considere que barras longas terão deformações diferentes ao longo de seu comprimento, dessa maneira, serão considerados elementos curtos com o intuito de avaliar elementos uniformes perante as deformações recebidas.

Para a engenharia, as medições de deformação são obtidas por meio de experimentos, uma vez obtida pode ser relacionada com cargas aplicadas, ou tensões que agem no interior do corpo. A deformação é causada por uma variação de comprimento e ângulo, logo existe a deformação normal e deformação por cisalhamento.

Deformação Normal

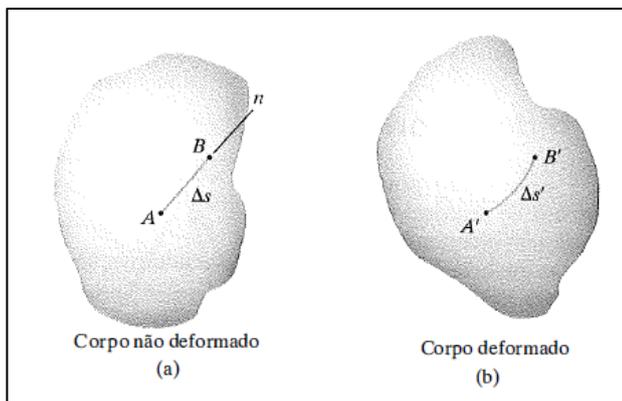
Todo alongamento ou contração de um segmento de reta é conhecido como deformação normal. Considere um segmento de reta AB de comprimento Δs ao longo do eixo n (Figura 21). Após a deformação, o segmento será dado pelo segmento curvo A'B' e terá um comprimento $\Delta s'$. A deformação normal média é dado por:

$$\epsilon_{med} = \frac{\Delta s' - \Delta s}{\Delta s} \quad (13)$$

Avaliando a Equação 13 pode-se observar que ϵ positivo representa que o corpo sofrerá um alongamento, em contra partida, o valor negativo significa que o segmento sofrerá encurtamento. Se o valor da deformação ϵ for conhecido, o valor para $\Delta s'$ será definido como:

$$\Delta s' \approx (1 + \epsilon)\Delta s \quad (16)$$

Figura 21 - Deformação normal para um dado corpo.



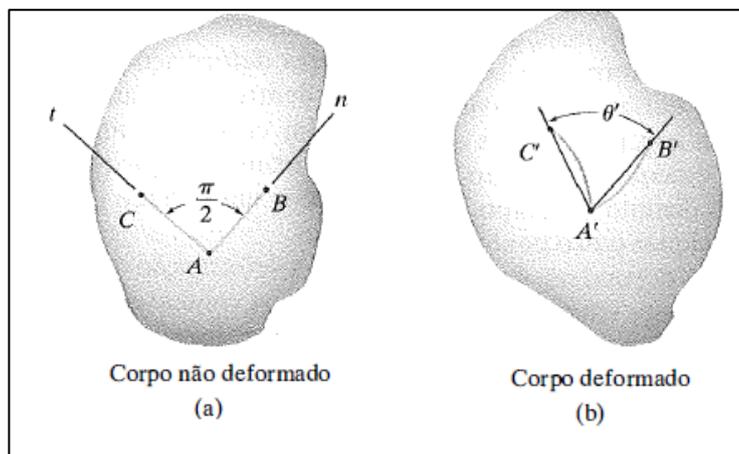
Deformação Por Cisalhamento

A mudança de ângulo entre dois segmentos de reta inicialmente perpendiculares é conhecido como deformação por cisalhamento. O ângulo que define o valor da deformação por cisalhamento é mostrado na Equação 17 representado por γ e medido em radianos. Para análise considere a Figura 22 que mostra os segmentos de retas AB e AC com ângulo de 90 graus. Após passar por deformação as extremidades são deslocadas de modo a criar um ângulo θ' :

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \theta' \quad (17)$$

A expressão da Equação 17 mostra que se θ' for menor que $\pi/2$ a deformação de cisalhamento será positiva, ao passo que θ' for maior $\pi/2$ a deformação será negativa.

Figura 22 - Deformação por cisalhamento.



FONTE: HIBBELER (2010).

A deformação é uma medida adimensional, porém, é prática expressar a deformação em termos da razão de unidades de comprimento ($\frac{m}{m}$ ou $\frac{\mu m}{m}$). Para aplicação de engenharia, os valores para ϵ são muito pequenos que chegam a ordem de micrometros (μ).

2.3.3 Propriedades Mecânicas Dos Materiais

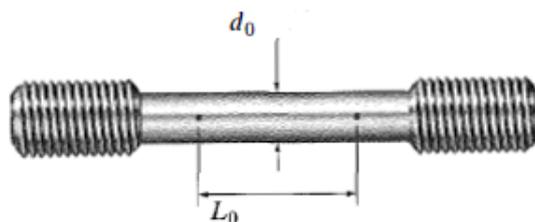
Diagrama Tensão – Deformação

A resistência de dado material depende da capacidade de suportar carregamentos sem apresentar deformação excessiva ou ruptura do material. A propriedade mecânica relacionada a resistência do material pode ser obtida por meios de métodos experimentais. Um método comum para determinação das propriedades do material é a aplicação de testes de tração e compressão com a utilização de equipamentos e procedimentos adequados.

Ao realizar um ensaio mecânico é possível obter valores relacionados a tensão e deformação do corpo de prova e construir um gráfico. O gráfico obtido com os valores resulta uma curva denominada diagrama *tensão-deformação*.

Com base nos dados coletados em experimento, é possível determinar a tensão nominal (Equação 18) que é a divisão da carga P pela área inicial do corpo de prova A_0 . Vale lembrar que a tensão é constante na seção transversal. De modo semelhante, por meio do aparelho extensômetro, é possível determinar a deformação nominal (Equação 19), que é a divisão da variação δ pelo comprimento original do corpo de prova L_0 . A deformação é constante em toda a região entre os pontos de calibragem. A Figura 23 mostra um modelo de corpo de prova submetido a testes.

Figura 23 - Corpo de prova para ensaio de tração ou compressão.



FONTE: HIBBELER (2010).

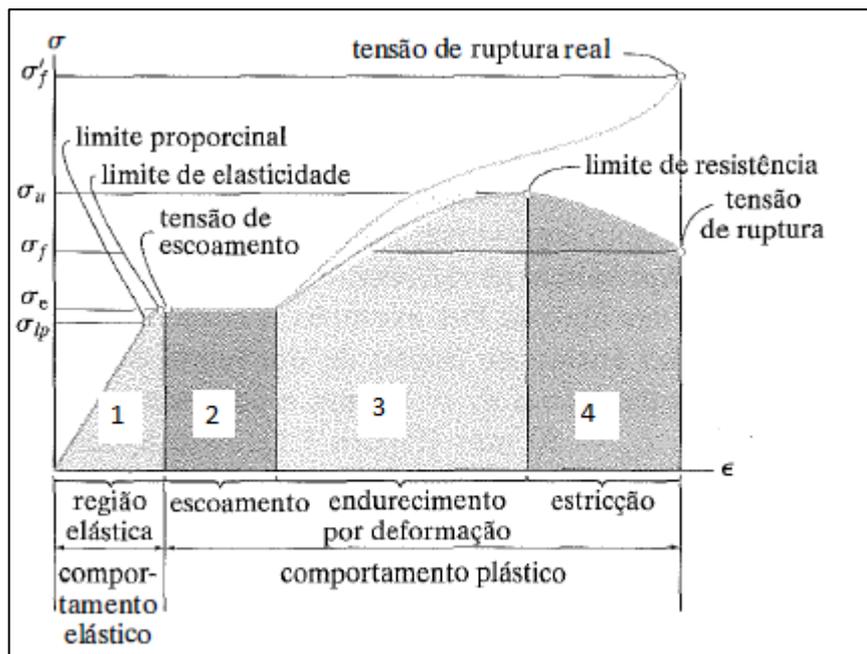
$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (18)$$

$$\epsilon = \frac{L-L_0}{L_0} = \frac{\delta}{L_0} \quad (19)$$

Com os resultados do experimento é plotado um gráfico no qual a tensão é ordena e a deformação é a abscissa. O diagrama tensão deformação tem grande importância na engenharia, visto que por ele pode-se obter informações sobre a resistência do material quando submetido a tração ou compressão, sem conhecer a geometria. Para um mesmo material, dois diagramas tensão-deformação apresentarão diferenças, mesmo que pequenas, devido os procedimentos do experimento e composição química do material.

O diagrama tensão deformação (Figura 24) é composto por quatro regiões de comportamento que dependem do grau da deformação. Para apresentar as regiões presentes no diagrama tensão- deformação é considerado o aço, material comum na indústria para fabricação de elementos estruturais e mecânicos.

Figura 24 - Diagrama Tensão-Deformação.



FONTE: HIBBELER (2010).

Comportamento elástico: O comportamento elástico do material ocorre quando a deformação ocorre na região 1 como mostra a Figura 24. No comportamento *elástico* é visto que a curva é reta, de modo que a tensão é proporcional a deformação. O limite superior da tensão para a relação linear é chamado limite de proporcionalidade. Se o material for submetido a uma tensão que passe ligeiramente ao valor do limite de proporcionalidade, o material ainda poderá responder de maneira elástica, entretanto a reta tende a curvar-se até o material alcançar o limite de elasticidade. Na região elástica quando o carregamento é removido, o corpo de prova retornará a sua forma original. Para aços, o limite de proporcionalidade e o limite elástico possuem valores muito parecidos.

Escoamento: Um aumento na tensão acima do limite de elasticidade resultará na quebra do limite elástico que fará com que o material fique deformado permanentemente. Para este fenômeno é chamado de *escoamento* e pode ser visualizado na região 2. Para esta região o material fica submetido a tensão de escoamento e deformação plástica. Ao alcançar o ponto de escoamento, o corpo de prova continua a alongar-se, sem qualquer acréscimo de carga. Quando o material entra na região de escoamento as deformações costumam-se ser 10 a 40 vezes maiores do que as produzidas na região elástica.

Endurecimento Por Deformação: Finalizada a região de escoamento e aplicada uma carga adicional ao corpo de prova, a curva ficará crescente e achatada que segue até atingir uma

tensão máxima conhecida como *limite de resistência*. Este fenômeno é conhecido como endurecimento por deformação e pode ser visualizado na região 3. Durante o ensaio mecânico, a área da seção transversal do corpo de prova tende a diminuir e o corpo a se alongar. A redução da área é considerável e uniforme ao longo do comprimento.

Estricção: Após atingir o limite máximo de resistência, a área da seção transversal tende a diminuir em uma determinada região do corpo de prova, não em toda a extensão do corpo. O resultado nesta etapa causa a constrição ou estricção do material e é crescente na região ao passo que o corpo se alonga mais. Conforme a região diminui continuamente, a menor área pode suportar uma carga decrescente, desse modo o diagrama tende a curvar-se para baixo até o corpo quebrar quando atinge a tensão de ruptura. Este efeito ocorre na região 4.

As situações mostradas se encaixam no diagrama tensão-deformação convencional, onde as premissas consideradas quando comparadas ao diagrama tensão-deformação real chegam a apresentar diferenças notáveis, visto que no caso real é considerada a variação da seção transversal para cada valor de tensão e deformação. Por outro lado, na engenharia, a maioria dos aços utilizados trabalham na região elástica onde a diferença não é grande. Se o material utilizado for rígido, a deformação na região elástica ficará pequena e o erro para os dois casos será pequeno, cerca de 0,1% (HIBBELER, 2009),.

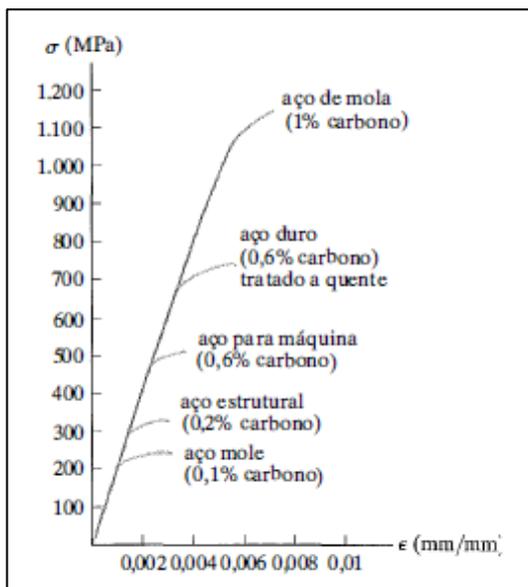
Lei De Hooke

Para projetos de engenharia, o diagrama de tensão-deformação exibe uma relação linear da tensão e deformação na região elástica. O cientista Robert Hooke, em 1676, observou que molas quando submetidas a um aumento de tensão resultavam em um aumento proporcional na deformação. Hoje este fenômeno é conhecido como a lei de Hooke que é expressa por:

$$\sigma = E\epsilon \quad (20)$$

Na expressão, E representa a constante de proporcionalidade, denominada módulo de elasticidade ou módulo de Young. O módulo de elasticidade representa a inclinação da reta. A unidade para E é Pascal e seus prefixos são K, M, G . A Equação 20 dada pela lei de Hooke representa a porção inicial da linha reta do diagrama tensão-deformação até o limite de proporcionalidade. O módulo de elasticidade é uma propriedade mecânica que representa a rigidez de um material que depende exclusivamente da composição química do material, porém, para a maioria dos aços, partindo dos mais dúcteis até os mais duros, o módulo de elasticidade é igual (Figura 28).

Figura 25 - Módulo de elasticidade para diferentes tipos de aços.



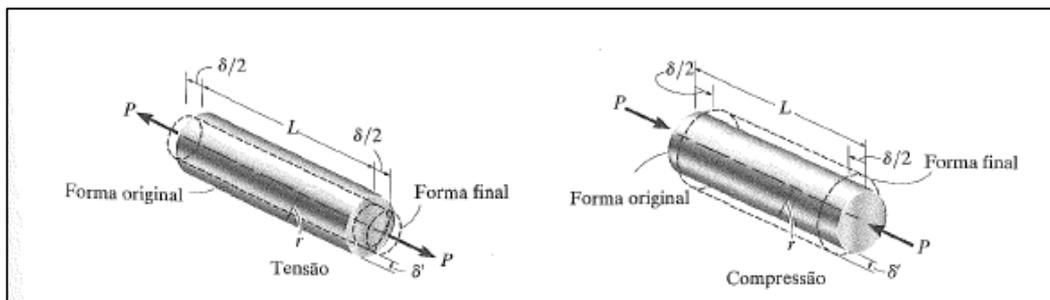
FONTE: HIBBELER (2010).

Coefficiente De Poisson

Quando um material é submetido a um esforço de tração, o corpo é alongado longitudinalmente e contraído lateralmente. De modo semelhante se for aplicado um esforço de compressão, a força irá contrair o material no sentido de aplicação da força e os lados se expandirão lateralmente. Considerando uma barra com comprimento L e raio r , a carga P irá causar uma mudança no comprimento longitudinal e lateral. A carga P aplicada na barra causará uma deformação longitudinal e lateral. As deformações são representadas matematicamente pelas Equações 21 e 22 e ilustradas pela Figura 26.

$$\epsilon_{long} = \frac{\delta}{L} \quad (21)$$

$$\epsilon_{lat} = \frac{\delta r}{r} \quad (22)$$

Figura 26 - Deformações longitudinal e lateral ocasionada pela carga P .

FONTE: HIBBELER (2010)

O cientista francês S. D. Poisson, percebeu que na região elástica, a razão entre as deformações é uma constante, a constante entre as deformações é conhecida como Coeficiente de Poisson que é representado por ν . O valor obtido é válido para um material homogêneo e isotrópico. Matematicamente o valor numérico é expresso por:

$$\nu = -\frac{\epsilon_{lat}}{\epsilon_{long}} \quad (23)$$

O sinal negativo na expressão significa que o alongamento longitudinal, que provoca deformação positiva, gera contração lateral, que por sua vez ocasiona deformação negativa e vice versa. Outro ponto a considerar é que o coeficiente de Poisson ocorre apenas com carregamento axial ou longitudinal. O coeficiente é uma medida adimensional e para a maioria dos sólidos o valor gira em torno de 1/4 a 1/3.

2.4 Elementos Finitos

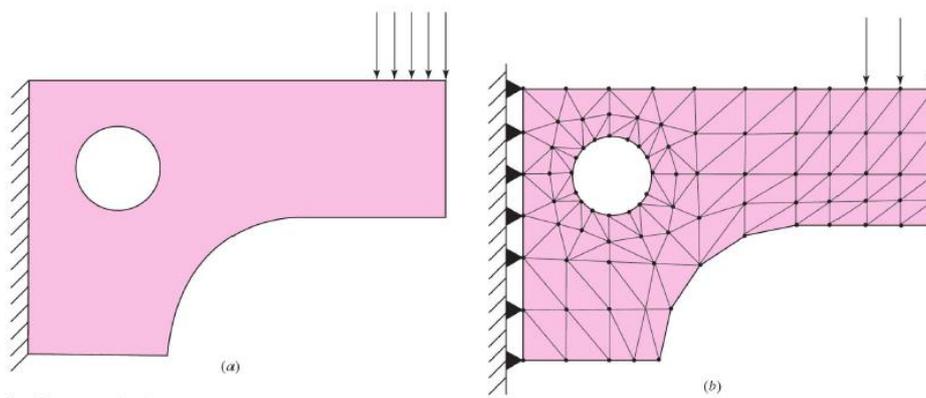
Componentes mecânicos como barras, vigas, etc. podem ser analisados com o uso de ferramentas analíticas, permitindo conhecer as tensões e deformações que o material está sujeito quando submetido a diferentes tipos de esforços e carregamentos. Por outro lado, problemas com geometrias complexas não permitem a utilização de métodos básicos da mecânica para determinar a solução, no qual torna-se necessário recorrer para aproximações para obter resultados satisfatórios (BUDYNAS & NISBETT, 2011).

Para determinar as tensões e deflexão de dado elemento estrutural com alta complexidade em sua geometria, toma-se o procedimento de dividir o seu volume em um conjunto finito de elementos contínuos e resolver um grupo de equações, cada qual aplicada sobre um elemento e seus nós que conectam entre si (NORTON, 2013). O método dos elementos finitos surgiu como ferramenta para ajudar e acelerar a análise de tensões e deformações de um sólido quando submetido a carregamentos externos. Antes da aplicação dos elementos finitos eram utilizadas técnicas de resolução direta de sistemas de equações de derivadas parciais que regem o fenômeno físico (AZEVEDO, 2003).

Com o avanço das tecnologias a utilização de métodos numéricos se deu com o intuito de obter resultados muito mais precisos quando comparado ao método analítico. Um ponto importante ao utilizar uma ferramenta de análise de elementos finitos é realizar a adequada interpretação dos resultados apresentados pelo computador, desse modo, o engenheiro ou projetista deve possuir conhecimentos técnicos suficientes para interpretar os resultados obtidos. Os elementos finitos estão ligados ao desenvolvimento de procedimentos aproximados

que podem ser aplicados de modo geral, independentemente da forma da estrutura e do carregamento, dentro dos limites aceitáveis da engenharia (ALVES FILHO, 2000). A Figura 27 ilustra um modelo idealizado e submetido ao MEF.

Figura 27 - Modelo idealizado e modelo elemento finito.



FONTE: BUDYNAS & NISBETT (2011).

A teoria matemática e as aplicações do método são imensas. O mercado oferece diversas plataformas que permitem analisar e estudar elementos finitos como por exemplo: ANSYS, NASTRAN, ABAQUS e outros. O MEF possui aplicações em diversos segmentos da engenharia como análises estáticas e dinâmica, linear e não-linear, de tensão, deflexão, vibrações livres e forçadas, transferência de calor, instabilidade elástica, acústica e etc (BUDYNAS & NISBETT, 2011).

2.4.1 Tipos De Análise

Para dado problema a análise de uma estrutura deve ser considerado primordialmente a classificação quanto à geometria, modelo do material e ações aplicadas. O MEF aplicado depende das simplificações intrínsecas a cada tipo de problema. De modo a considerar alguns pontos necessários para a fase de análise de uma estrutura (AZEVEDO, 2003).

Análise Dinâmica Ou Estática

As ações sobre estruturas são submetidas geralmente por carregamentos dinâmicos, devendo ser consideradas as forças de inércia associadas ao movimento acelerado a que cada um dos seus componentes está submetido. Por esta razão, espera-se que para a análise de uma estrutura sejam considerados os efeitos dinâmicos. Apesar disso, em muitos casos é aceitável considerar que as ações são aplicadas de modo suficientemente lento, tornando desprezíveis as forças de inércia validando desse modo uma análise estática. (Azevedo, 2003).

2.4.2 Análise Não Linear Ou Linear

Na análise de um corpo sólido é comum considerar que os deslocamentos causados por esforços externos são considerados pequenos quando comparados com as dimensões dos componentes da estrutura. Assume-se que não existe influência da alteração da geometria na distribuição dos esforços e das tensões. Toda análise é realizada com base na geometria inicial não deformada. Se esta proposição não for acatada a análise é designada não linear. É frequente considerar que o nível do material que constitui a estrutura e a relação entre tensões e deformações é linear (AZEVEDO, 2003).

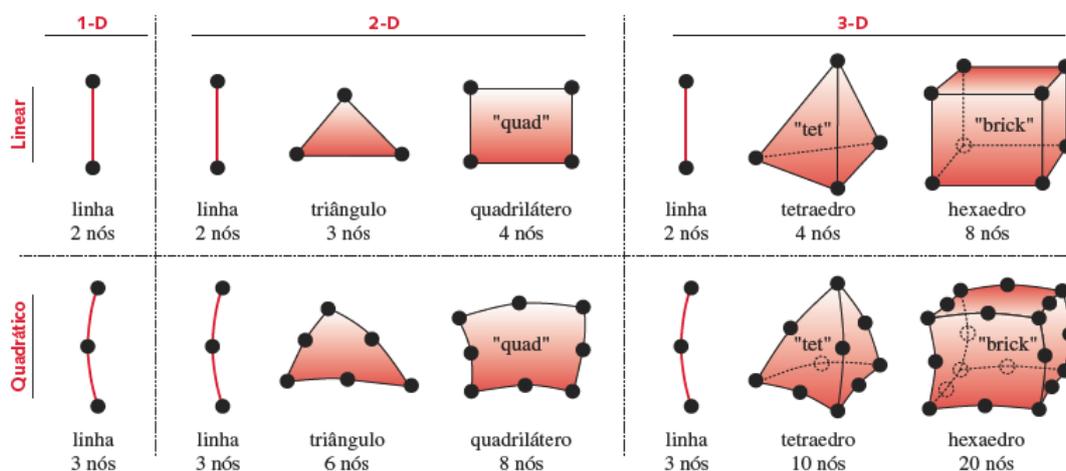
2.4.3 Tipos De Elementos

A forma dos elementos finitos pode ser em uma, duas ou até mesmo três dimensões, que representam os elementos lineares, área e volume. O tipo do elemento pode ser de diferente ordem que implica na função utilizada para a interpolação de deslocamento. O uso de geometrias simples permite alcançar resultados desejáveis e com um custo de processamento razoável quando comparado a elementos superiores, além do fato da solicitação de processamento computacional maior (NORTON, 2013).

2.4.4 Grau De Liberdade

Um elemento finito é definido por uma quantidade n de nós, e o conjunto de elementos finitos forma amalha. O elemento finito pode ser dividido em uma, duas ou três dimensões como mostrado na Figura 28. Estes grupos definem a quantidade de graus de liberdade que cada nó do elemento finito possui. (NORTON, 2013).

Figura 28 - Geometria dos elementos finitos.



FONTE: NORTON (2013).

Como mostrado na Figura 28, os elementos de linha são comuns em qualquer grupo. Os elementos de linha são normalmente utilizados para a modelagem de estruturas do tipo viga e treliça com área de seção constante podendo ter de um até seis graus de liberdade para cada nó, Por exemplo, um elemento de linha 1-D tem dois graus de liberdade, um para cada nó, fisicamente representa um elemento de treliça conectado por elementos de fixação móvel, representando apenas esforços na direção do seu comprimento e não podendo suportar momento nos nós (NORTON, 2013).

Um elemento de linha 2-D possui três GDL por nó que fisicamente representa um elemento de viga submetido a momentos e forças nas direções vertical e horizontal. Já para um elemento de linha 3-D cada nó possui seis GDL e representa uma estrutura que é submetida a momento, torção e deslocamentos em três direções. Ao considerar elementos com geometrias mais complexas tais como triângulos, quadriláteros e assim por diante, surgem mais graus de liberdade (NORTON 2013).

2.4.5 Ordem Dos Elementos

Elementos de alta ordem são conhecidos por apresentar melhor capacidade para representar contornos de geometrias de peças complexas, porém elementos de alta ordem exigem um maior poder de processamento para realização de análises. Existem também os elementos lineares que são aplicados a elementos retos. Muitas das vezes é de preferência utilizar os elementos retos para modelamentos devido o tempo de processamento ser razoável e apresentar resultados satisfatórios. Especialistas no segmento orientam a não utilizar os elementos triangulares de três nós ou tetraedros de quatro nós, por conta de estimativas imprecisas e a recomendação é utilizar os elementos quadrilátero de quatro nós ou hexaedro de oito nós. Uma vez que elementos vizinhos, independente da ordem, compartilham nós e cada elemento possui um valor de tensão nodal diferente, e existirão pelo menos dois valores de tensão para cada nó. Desse modo, o campo de tensão calculado pelo FEA possui uma série de valores descontínuos, variando de elemento por elemento. Uma maneira de ajustar segue dos processadores criar um valor médio para a tensão em cada elemento para exibir um contorno de tensão suave. (NORTON 2013)

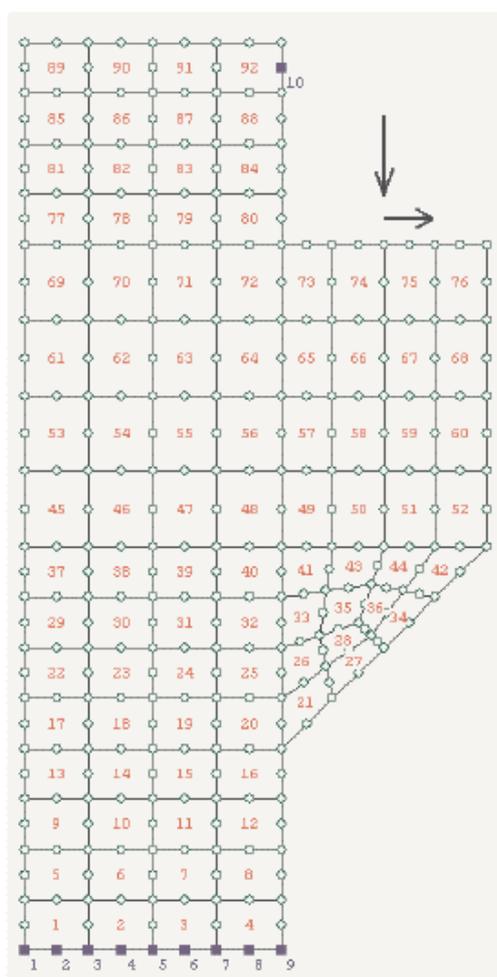
Existe dois tipos de refinamentos. O primeiro é o refinamento h adaptativo normalmente utilizado para limitar a ordem do elemento a segunda ordem, que implica que o refinamento da malha deve ser usado para aumentar o número e diminuir a geometria dos elementos. Já o refinamento p-adaptativo permite que a ordem do polinômio dos elementos possa ser aumentada. O

refinamento p adaptativo permite que os elementos sejam maiores e em menor quantidade que os elementos usados no refino do h adaptativo para um mesmo problema.

2.4.6 Malha

A malha é o conjunto dos elementos que são formados por nós (Figura 29). Atualmente existem diversos programas que permitem exportar um modelo tridimensional e gerar a malha para realizar o estudo. A maioria dos softwares permite gerar malha com elementos quadriláteros lineares ou mistos, quadriláteros e triangulares. Na concepção de projetos novos é aconselhável gerar uma malha com menor quantidade de elementos, mesmo sabendo que os resultados apresentarão precisão precária, no entanto ganha-se tempo no processamento. Este procedimento é realizado para verificar a viabilidade do projeto, e caso o projeto seja definido é então realizado um estudo e aprimoração da malha para obtenção de melhores resultados (NORTON, 2013).

Figura 29 - Malha de elementos finitos.



FONTE: AZEVEDO (2011).

Densidade Da Malha

Uma malha com elementos grosseiros (maiores) é aconselhada quando se deseja obter redução no tempo de processamento e estudo da viabilidade de projetos. Para dada peça, uma malha grosseira fornece resultados satisfatórios, porém depende do tipo de aplicação que se está procurando. Para regiões onde a tensão é alta, como em locais com concentrações de tensão, uma malha mais refinada com elementos h-adaptativos ou malha com a mesma densidade, porém com elementos p-adaptativos de ordem superior é necessária para capturar com maior precisão a variação da tensão. Dessa maneira, dependendo da aplicação do tipo de resultado que se está procurando, pode ser necessário variar a densidade da malha. O processo da escolha do grau da malha é chamado de refino da malha (NORTON, 2013).

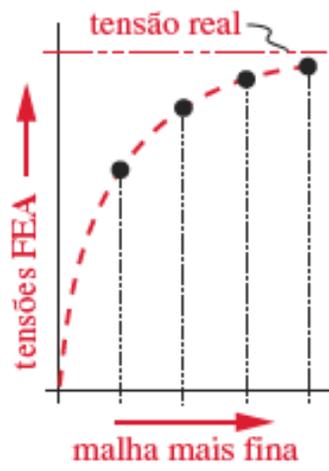
Refino Da Malha

Uma malha mais grosseira pode ser aplicada inicialmente em um componente, no entanto o engenheiro, calculista, projetista ou analista deve usar conceitos da resistência dos materiais e propriedade dos materiais para ter embasamento a respeito da distribuição de tensão em membros carregados para determinar se aquela região necessita ter uma malha mais fina ou não. O refino da malha é necessário principalmente nas regiões de alta concentração de tensões. Regiões com uma malha fina permite obter resultados mais confiáveis e precisos, porém o processamento para análises é considerável alto em termos de processamentos quando comparados com uma malha mais grossa (maior grau) (NORTON, 2013).

Convergência

A maneira de saber se o refino da malha é suficiente para o estudo, é realizar um teste de convergência. Tomando um ponto de partida, no qual é considerado uma malha de tamanho ideal. As regiões que recebem as maiores tensões são aplicadas um fator de redução e é construído uma nova malha, mais refinada, calculando-se novamente as tensões. Os valores de tensão obtidos nas regiões de estudo são comparados para as diferentes densidades de malhas com o intuito de verificar os resultados das análises. Se houver diferença significativa entre as soluções, indica que a malha anterior é muito grosseira e deve ser refinada. Eventualmente, a mudança nos valores calculados para a tensão em malhas sucessivamente mais refinadas se tornará menor, indicando que a solução converge para o valor real, este efeito pode ser observado na Figura 30 (NORTON, 2013).

Figura 30 - Resultados para diferentes refinamentos da malha.



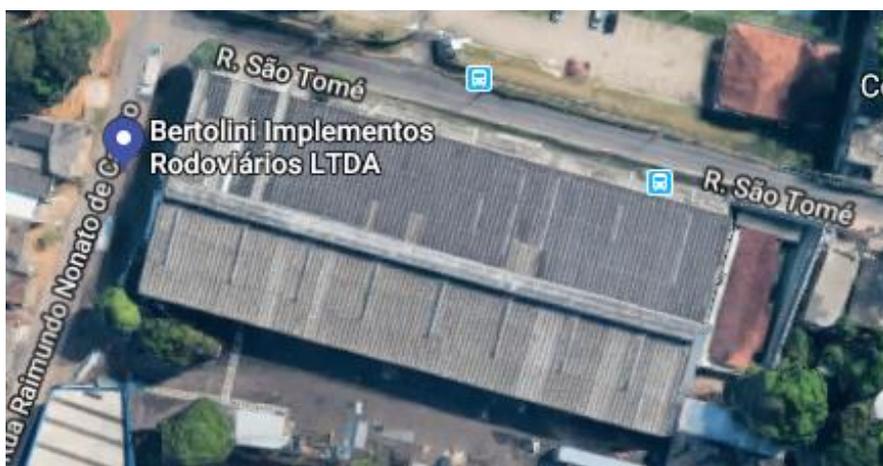
FONTE; NORTON (2013)

3. Metodologia

3.1 Local de estudo

O presente trabalho teve como objetivo analisar o dimensionamento do conjunto pé apoio regulável escamoteável, também conhecido como pé amazônico, de semirreboque fabricado por empresa do segmento de implementos rodoviários, a Bertolini Implementos Rodoviários.

Figura 31 - Vista superior da fábrica da BAL.



FONTE: Google Mapas (2019)

A BAL está instalada na cidade de Manaus - AM, e incentivada pela SUFRAMA. A empresa é fabricante de implementos rodoviários para o transporte de cargas, conforme a necessidade do mercado. A empresa situa-se na Rua Raimundo Nonato de Castro, 288 Bairro Santo Agostinho - Manaus – AM.

Figura 32 - Bertolini Da Amazônia-BAL.



FONTE: TBL empresas (2019)

3.2 Método

O método dedutivo parte das teorias e leis, na maioria das vezes pressupõe a ocorrência dos fenômenos particulares, ou seja, segue de um ramo de conhecimento maior (mais amplo) e segue para um ramo particular (mais restrito). O método dedutivo segue de pontos que considera todas as premissas verdadeiras, logo, a conclusão é verdadeira. Os procedimentos que tomam como base os conceitos matemáticos ou teorias de ciências exatas fazem parte do método dedutivo (MARCONI & LAKATOS, 2003).

O método dedutivo, de acordo com o entendimento clássico, é o método que parte do geral e, a seguir, desce ao particular. A partir de princípios, leis ou teorias consideradas verdadeiras e indiscutíveis, prediz a ocorrência de casos particulares com base na lógica. (PRODANOV, 2013, p. 27).

O presente trabalho de pesquisa será desenvolvido baseado no método dedutivo, com pesquisa aplicada que busca alcançar e gerar conhecimento com a aplicação prática de teorias da ciência dos materiais e mecânica dos sólidos para um dado problema específico. De acordo com Zanella (2013) tanto as pesquisas qualitativa e quantitativa são complementares, podendo ser utilizadas em uma mesma pesquisa.

A pesquisa do trabalho se enquadra em um pesquisa exploratória que tem como objetivo propiciar maior ligação com o tema proposto, com o intuito de torná-lo mais restrito. A pesquisa irá envolver um levantamento bibliográfico de referências em livros, artigos e outros meios que auxiliam no levantamento de dados úteis ao trabalho, levando em conta uma abordagem quantitativa e qualitativa dos resultados (GERHARDT & SILVEIRA, 2009).

3.3 Técnica

Quanto aos procedimentos técnicos, ou seja, a maneira pela qual os dados necessários e relevantes para a elaboração do trabalho serão obtidos, fazer-se necessário traçar um modelo conceitual e eficaz que pode ser traduzido como planejamento, visto que expressa as idéias de modelo, sinopse e plano (PRODANOV, 2013). A coleta de dados pode ser interpretada como o conjunto de procedimentos por meio das quais o modelo de análise é confrontado aos dados coletados (GERHARDT & SILVEIRA, 2009).

Os procedimentos aplicados para a devida coleta de dados enquadram-se em dois grandes grupos, o primeiro grupo tende a agregar as pesquisas bibliográfica e documental, que

normalmente são conhecidas como fonte de “papel”. O segundo grupo engloba as conhecidas fontes de “gente” que significa dizer que são fontes que dependem de outros para a coleta de informações tais como pesquisa experimental, levantamento, estudo de campo e estudo de caso (ZANELLA, 2013).

O presente trabalho de pesquisa utiliza de técnicas para coleta de informações necessárias para as análises das hipóteses e objetivos propostos. Para o trabalho é considerado a pesquisa bibliográfica que toma como base livros, artigos, manuais técnicos, documentos legislativos e internet com o objetivo de interação a respeito do tema proposto (PRODANOV, 2013).

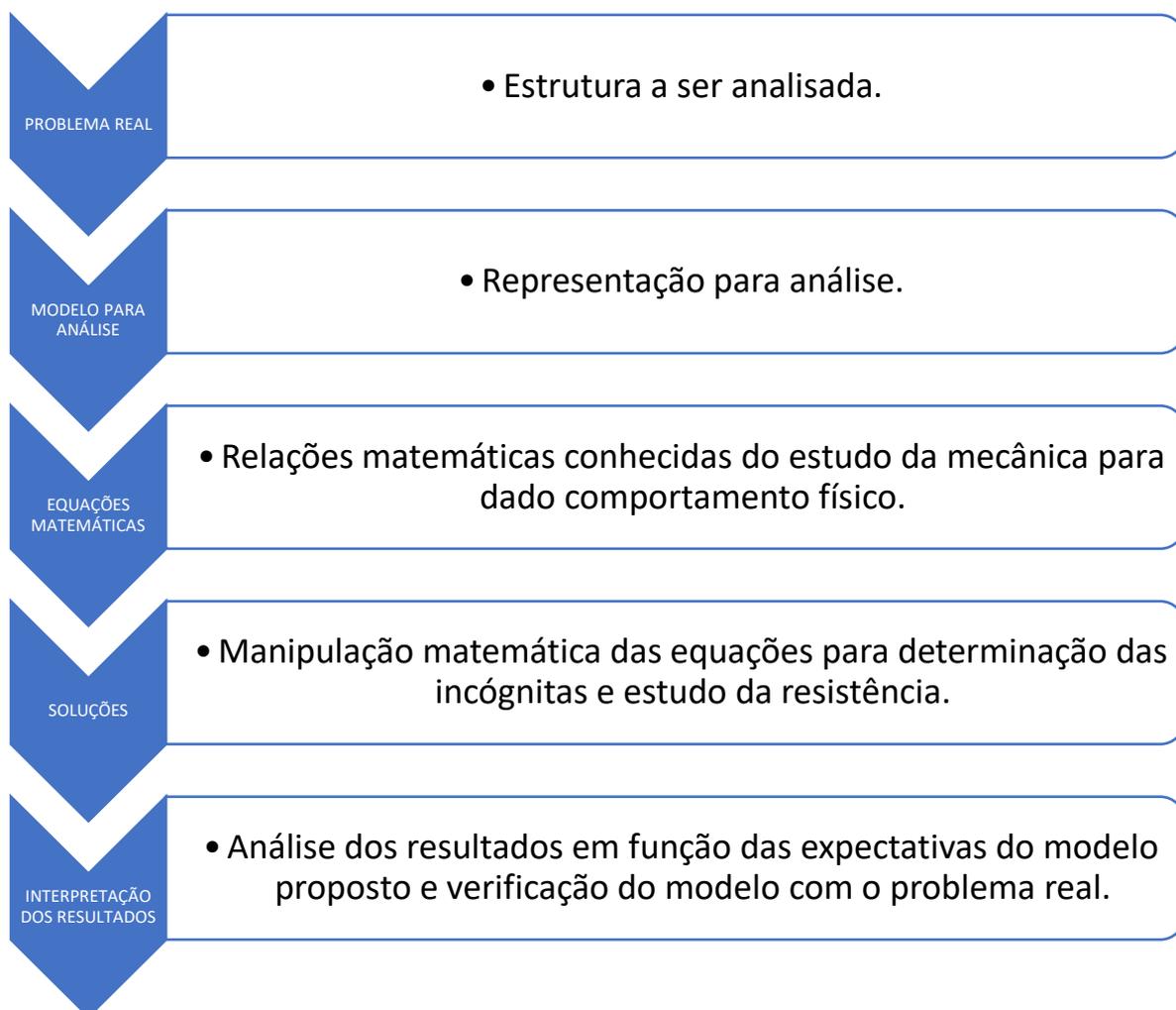
O trabalho também se encaixa em uma pesquisa experimental no qual é selecionado as variáveis que são capazes de influenciar no objeto de estudo, definimos as formas de controle e de observação dos efeitos causados. Na pesquisa experimental as condições de controle dependem do local apropriado, aparelhos e instrumentos de medição, a fim de confirmar o modo ou as causas pelas quais um fato é produzido (PRODANOV, 2013).

3.4 Procedimento

Para o presente trabalho será seguido o procedimento de levantamento bibliográfico com o objetivo de obter o máximo de informações a respeito do tema proposto abrangendo áreas de conhecimento como: transporte rodoviário, implementos rodoviários, legislações, resistência de materiais e elementos finitos.

O passo seguinte é selecionar o caminhão adequado que irá apresentar a possibilidade de maior carregamento de carga para o semirreboque, o caminhão será selecionado com base nas informações técnicas obtidas nos endereços eletrônicos de diferentes montadoras. Ao determinar o caminhão trator será realizado uma tratativa da estática do caminhão trator e semirreboque, respeitando o documento legislativo de trânsito para semirreboque. Para auxiliar no procedimento para determinação de carregamentos que serão aplicados no semirreboque é considerado um esquema gráfico como mostrado na Figura 33.

Figura 33 - Solução para problemas de análise estrutural em engenharia.



FONTE: FILHO (2000).

Após determinar os valores do carregamento aplicados no conjunto pé, a próxima etapa do trabalho será realizar o modelamento do objeto de estudo em software CAD, especificamente no SolidWorks 2017. A etapa seguinte será a preparação da malha do objeto para estudo de elementos finitos com software CAE, com o objetivo de conhecer o comportamento do conjunto pé e visualizar as tensões e deformações causadas pelo carregamento e comparar o método analítico com método computacional.

Desse modo o trabalho tem como premissa a aplicação direta de conhecimentos absorvidos ao longo do curso de engenharia mecânica, que envolve a mecânica dos sólidos, métodos numéricos e modelamento auxiliado por computador.

4. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

O presente trabalho de conclusão de curso teve como objetivo realizar o estudo dos efeitos das cargas aplicadas sobre a região do conjunto pé apoio regulável e escamoteável utilizado em semirreboque fabricado por empresa de implementos rodoviários situada na cidade de Manaus-AM, utilizando ferramenta de elementos finitos para o modelamento e análise. O semirreboque escolhido para o estudo foi determinado com base no maior carregamento possível, possibilitando obter o maior valor de carga na região do pé de apoio. A escolha teve como referência a resolução 210/2006 do CONTRAN e a portaria 63/2009 do DENATRAN. Desse modo, o veículo articulado composto por semirreboque e caminhão trator, terá no máximo 18,6 metros e PBTC de 48,5 toneladas com sistema de suspensão em tandem.

O capítulo inicia com a escolha do caminhão trator a ser utilizado para a combinação de veículo de carga. O capítulo segue com a determinação do comprimento do semirreboque com base nas informações do caminhão trator e dados da resolução 210/2006 do CONTRAN. Determinado o comprimento do semirreboque, foi então especificado o valor do carregamento que o semirreboque poderá transportar, assim como a carga que será aplicada na região do pé de apoio. Com as informações obtidas utiliza-se o método analítico obtido em livros de resistência dos materiais para determinar a área do furo pelo qual o pino será posicionado. Utilizando software CAD foi modelado o projeto e avaliado as propriedades mecânicas dos materiais utilizados na montagem do conjunto. Após realizar o modelo realizou-se a preparação da malha para o estudo em MEF. Ao fim desta etapa os resultados foram comparados.

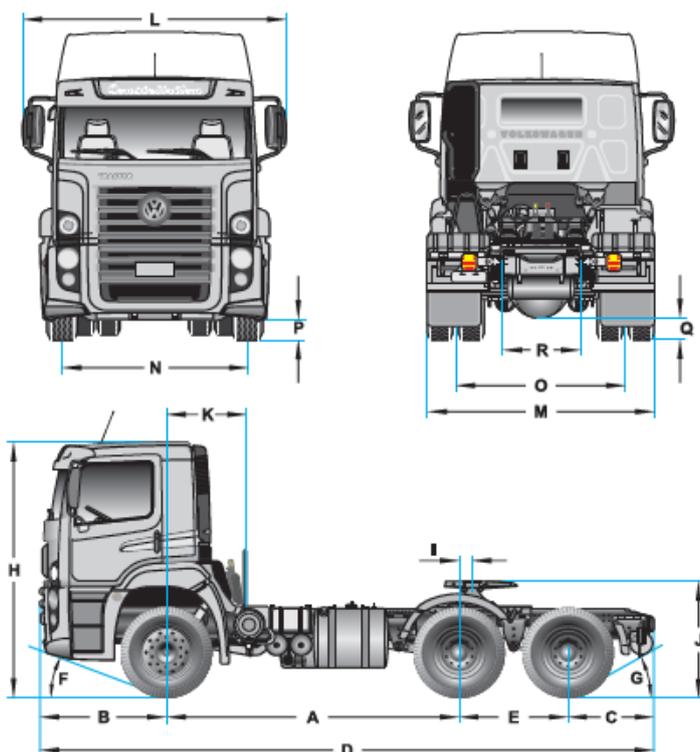
4.1 Caminhão Trator

O implemento rodoviário depende exclusivamente do veículo automotor, pois é com base no veículo que é determinado os limites de carga (PBT ou PBTC) e a dimensão de comprimento do produto. Desse modo, para semirreboques o caminhão trator (Figura 34) apresenta papel importante, pois é do caminhão que se inicia o projeto do semirreboque. Tomando como base as especificações do caminhão trator, é definido o comprimento e a capacidade de carga do semirreboque, assim como a capacidade da combinação.

O caminhão trator define o comprimento do semirreboque e também a capacidade de carga. Para determinar o semirreboque foi considerado o caminhão adequado, de modo a considerar o peso e comprimento do caminhão trator. Com base nas premissas levantadas, foi realizado um levantamento com as informações técnicas dos caminhões tratores, disponíveis nos endereços eletrônicos das montadoras. Para atender um PBTC de 48,5 toneladas equipado

com sistema de eixos em tandem, o caminhão trator escolhido é do tipo 6X2. O caminhão do tipo 6x2 é escolhido pois permite o uso do PBTC citado, de modo a garantir uma maior capacidade de carga. A Figura 34 mostra um modelo obtido de caminhão em ficha técnica de montadora.

Figura 34 - Caminhão trator VW modelo Constellation 25.360.



FONTE: VW (2019).

Para o estudo, o levantamento contou com 15 modelos de caminhões de diferentes montadoras com o intuito de identificar o caminhão trator que permita o maior carregamento para o semirreboque. O levantamento contou com seis montadoras diferentes. A montadora com mais modelos foi a IVECO com cinco modelos, seguida da VOLVO com quatro modelos. Alguns modelos terão o mesmo comprimento e peso, porém a diferença encontra-se nas especificações do motor do caminhão. A Tabela 1 mostra a relação dos equipamentos levantados contendo as informações de comprimento e peso do caminhão.

Tabela 1 - Relação de caminhões tratores.

Montadora	Modelo	Tipo	Comprimento [mm]	Peso [Kg]
IVECO	HI WAY - 600S56T	6X2	6858	9045
IVECO	HI ROAD - 600S40T	6X2	7143	8860
IVECO	HI ROAD - 600S44T	6X2	7143	8860
IVECO	HI WAY - 600S44T	6X2	7158	9130
IVECO	HI WAY - 600S48T	6X2	7158	9130
MAN	TGX - 28.440	6X2	7181	9170
MERCEDES	ACTROS 2546 - ESTRADEIRO	6X2	6867	9772
MERCEDES	AXOR 2536 - MULTIUSO	6X2	7230	9273
MERCEDES	AXOR 2544 - MULTIUSO	6X2	7230	9273
VOLVO	FH 6X2T PNEUMÁTICO	6X2	6540	8695
VOLVO	FH 6X2T TANDEM	6X2	6740	8655
VOLVO	FH 6x2T BALANCIM	6X2	6840	8765
VOLVO	FM 6X2T	6X2	7040	8635
VW	CONSTELLATION - 25.420	6X2	6989	8155
VW	CONSTELLATION - 25.360	6X2	6989	8430

FONTE: Própria (2019).

Com base no levantamento realizado identificou-se que o caminhão trator com menor peso em ordem de marcha (peso do caminhão no qual é considerado o leito sem implemento rodoviário, sem motorista, com todos os reservatórios de fluidos cheios, freios, estepe, extintor de incêndio e caixa de ferramentas) é o modelo **CONSTELLATION 25.420** da montadora VW, enquanto o modelo mais pesado é **ACTROS 2546 – ESTRADEIRO** da montadora Mercedes.

Outro ponto que vale ser ressaltado é o modelo **FH 6X2T PNEUMÁTICO** da montadora VOLVO que apresentou o menor comprimento, ao passo que o modelo **AXOR 2544 – MULTIUSO** da montadora Mercedes dispõe do maior comprimento. De modo geral, avaliando os dados da Tabela 1 pode-se afirmar que a média para o comprimento e peso para caminhões tratores do tipo 6x2 são respectivamente 7,007 metros e 8923 Kg.

Diante dos resultados obtidos, fica nítido que o projeto de um semirreboque, independentemente do tipo de carga que o mesmo venha a transportar, depende do caminhão trator, pois o mesmo traz impacto direto no comprimento e peso do semirreboque. Os caminhões que possuem os limites mínimos e máximos para o comprimento e peso podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2 - Modelos de caminhões considerados para análise.

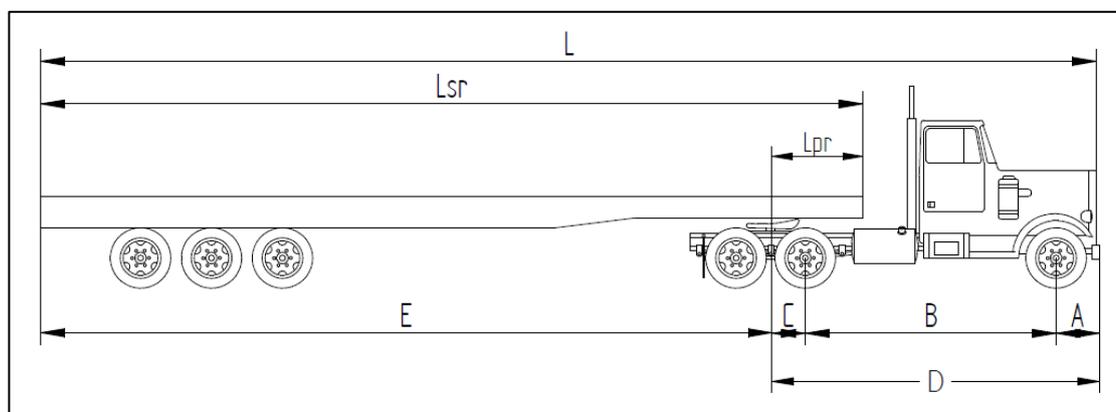
Dado	Montadora	Modelo	Comp. [mm]	Peso [Kg]
Maior comprimento	MERCEDES	AXOR 2544 - MULTIUSO	7230	9273
Maior peso	MERCEDES	ACTROS 2546 - ESTRADIEIRO	6867	9772
Menor comprimento	VOLVO	FH 6X2T PNEUMÁTICO	6540	8695
Menor peso	VW	CONSTELLATION - 25.420	6989	8155

FONTE: Própria (2019).

4.2 Comprimento Do Semirreboque

Como dito no item anterior, o semirreboque é definido com base no caminhão disponibilizado, logo conhecendo o caminhão é então determinado o comprimento e capacidade de carga a transportar do semirreboque. Neste primeiro momento foi determinado o comprimento do semirreboque sem considerar o PBTC da combinação do veículo articulado. Da lista de caminhões selecionados, foram escolhidos os quatro modelos presentes na Tabela 2 para a análise. A Figura 35 mostra um esquema genérico para um caminhão 6x2 acompanhado de um semirreboque.

Figura 35 - Esquema de veículo articulado, caminhão trator e semirreboque.



FONTE: Própria (2019)

Na Figura 35 a variável L representa o comprimento máximo para o veículo articulado com duas unidades composta por um caminhão trator e semirreboque, L_{pr} representa o balanço dianteiro para o semirreboque, a cota A representa o balanço dianteiro do caminhão trator, a cota B representa a distância entre os dois primeiros eixos do caminhão, a cota C representa a distância da 5ª roda ao eixo anterior, L_{sr} representa o comprimento do semirreboque.

Os valores para L e L_{pr} são estabelecidos pela resolução 210/2006 do CONTRAN, e os valores para A , B , C são definidos com base nas informações disponíveis nas fichas técnicas dos caminhões. Baseado nas informações definidas pelas legislações e documentos técnicos, é

definido o comprimento do semirreboque. Para determinar o comprimento do semirreboque foi necessário determinar os valores de D e E . Os valores para L e L_{pr} são:

$$L = 18600mm$$

$$L_{pr} = 1600mm$$

A variável D é determinada com o auxílio da Equação 24

$$D = A + B + C \quad (24)$$

A variável E é determinada com o auxílio da Equação 25:

$$E = L - D \quad (25)$$

Por fim, o comprimento do semirreboque, L_{sr} é dado pela Equação 26:

$$L_{sr} = E + L_{pr} \quad (26)$$

Aplicando os valores conhecidos nas Equações 24, 25, 26 é determinado o comprimento do semirreboque para cada caminhão pré selecionado para análise. Para cada modelo de caminhão haverá um valor para A, B, C, D e E , e os valores para L e L_{pr} são fixos para todos os caminhões. A Tabela 3 mostra os resultados obtidos para cada caminhão trator, de modo a determinar o comprimento para cada semirreboque.

Tabela 3 - Relação do caminhão e comprimento para o semirreboque.

Modelo	Comp. [mm]	Peso [Kg]	A[mm]	B[mm]	C[mm]	L[mm]	Lpr[mm]	D[mm]	E[mm]	Lsr[mm]
AXOR 2544 - MULTIUSO	7230	9273	1440	3600	350	18600	1600	5390	13210	14810
ACTROS 2546 - ESTRADAIRO	6867	9772	1440	3300	470	18600	1600	5210	13390	14990
FH 6X2T PNEUMÁTICO	6540	8695	1365	3000	450	18600	1600	4815	13785	15385
CONSTELLATION - 25.420	6989	8155	1511	3300	258	18600	1600	5069	13531	15131

FONTE: Própria (2019).

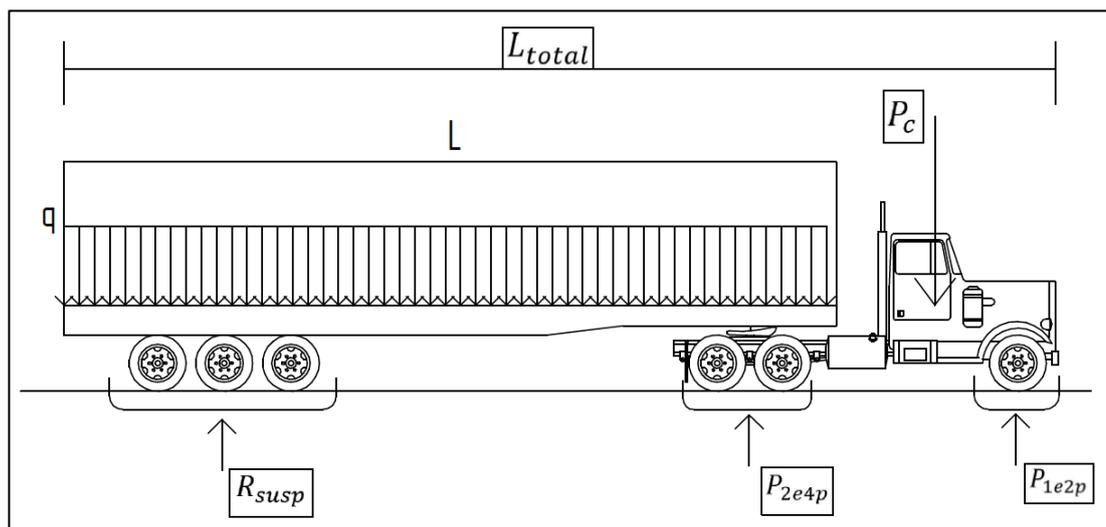
4.3 Distribuição De Carga

Para o cálculo de distribuição de carga considerou-se as equações da estática para determinar os esforços externos e reações que agem na combinação caminhão trator e semirreboque. A Figura 36 mostra um modelo de um veículo articulado composto por duas unidades, caminhão trator e semirreboque, no qual o semirreboque está equipado com sistema de suspensão em tandem, comprimento máximo de 18,6 metros e PBTC de 48,5 toneladas.

Para o estudo tomou-se o carregamento distribuído ao longo do semirreboque, este tipo de carregamento é comum para a maioria dos implementos rodoviários como por exemplo o

transporte de paletes acomodados dentro de um baú furgão, container, transporte de grãos e outros. Porém, deve-se levar em conta as situações na qual a carga é concentrada, como ocorre no transporte de bobinas. O carregamento é representado por q e sua medida é dada por [Kg/m], o valor de q é determinado conhecendo o carregamento concentrado e o comprimento do semirreboque.

Figura 36 – Diagrama de corpo livre do veículo articulado - caminhão e semirreboque.



FONTE: Própria (2019)

A Figura 37 mostra a simplificação do carregamento distribuído para o carregamento concentrado para auxiliar no cálculo da distribuição de carga. As reações mostradas são referentes aos pesos transmitidos por cada eixo isolado e conjuntos de eixos especificados na resolução 210/2006. No cálculo da distribuição, o peso da suspensão tem relevância, visto que é uma quantidade considerável de massa que atua na região mostrada na Figura 37.

O peso da suspensão foi obtido através de contato com empresa fornecedora, a SILPA. Segundo informações passadas por colaborador da empresa, o peso da suspensão com três eixos do tipo tandem atendendo o sistema Nakata corresponde a 3375 kg, e é composto pelo o peso dos feixes de molas, suporte de molas, eixos, rodas e demais acessórios. Com base na informação obtida foi calculado o valor da reação no conjunto suspensão dado por:

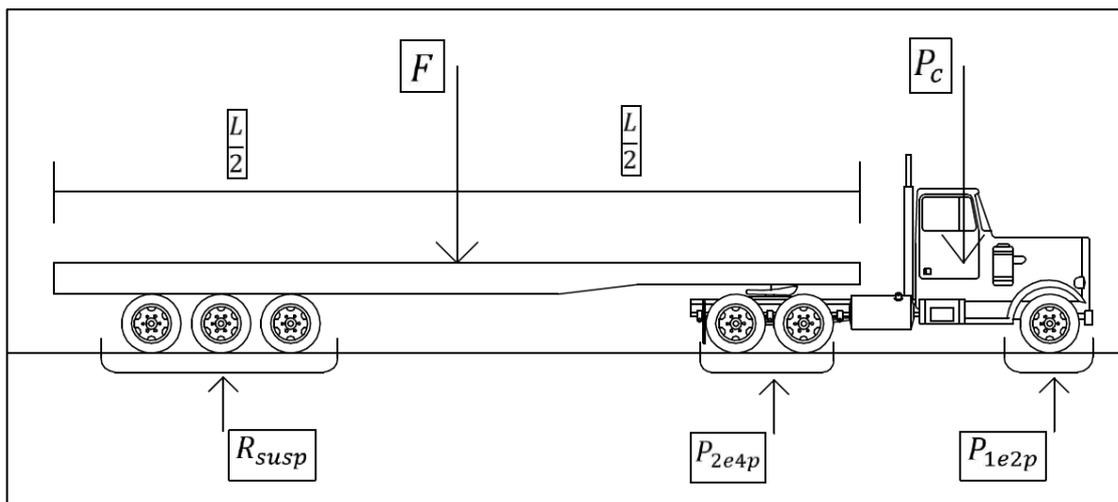
$$R_{susp} = P_{3e4p} - 3375 \quad (27)$$

Onde:

R_{susp} - Reação que ocorre na suspensão menos o peso da suspensão expressa em kg.

P_{3e4p} - Peso transmitido pelo conjunto suspensão composto por três eixos com quatro pneumáticos cada.

Figura 37 - Redução do carregamento distribuído do veículo articulado.

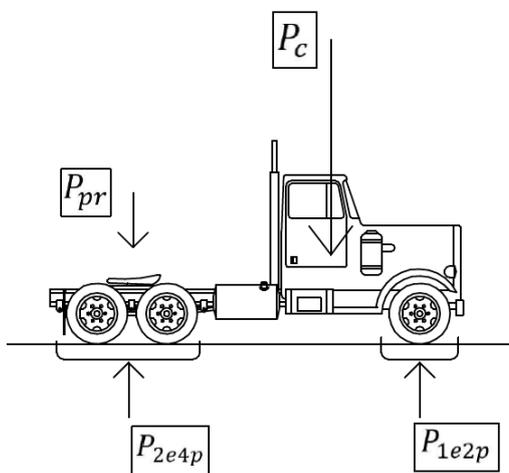


FONTE: Própria (2019)

Para determinar o posicionamento da suspensão do semirreboque, o balanço traseiro, peso que cai sobre a quinta roda do caminhão trator e o carregamento que cai sobre o semirreboque deve ser considerado o DCL separado para cada composição, caminhão e semirreboque. A Figura 38 representa o DCL de um caminhão trator do tipo 6X2.

Observe que quando a composição é separada surge a variável P_{pr} que representa um esforço interno entre o caminhão e o semirreboque que agirá no sentido vertical caindo sobre a região da quinta roda, este carregamento representa o carregamento do semirreboque que poderá cair sobre a região da quinta roda. A variável P_{pr} aparece na região atuando no sentido vertical na direção para cima, onde a carga aplicada no semirreboque representa o carregamento que o pino rei será submetido a carregar, ou seja, a reação que o elemento terá que exercer.

Figura 38 - Diagrama de corpo livre do caminhão trator.



FONTE: Própria (2019)

O peso do caminhão foi obtido através de ficha técnica da montadora e as reações de apoio são os pesos transmitidos por cada eixo, de modo que o peso do caminhão e as reações são conhecidas. Aplicando o somatório das forças no sentido vertical o valor de P_{pr} é determinado.

$$P_{2e4p} + P_{1e2p} - P_c - P_{pr} = 0 \quad (28.1)$$

$$P_{pr} = P_{2e4p} + P_{1e2p} - P_c \quad (28.2)$$

Onde:

P_{pr} - Carga que o pino rei recebe e consequentemente a carga que cai na região da quinta roda.

P_{2e4p} - Peso transmitido por conjunto de dois eixos com quatro pneumáticos cada.

P_{1e2p} - Peso transmitido por eixo isolado com dois pneumáticos cada.

P_c - Peso do caminhão trator.

A Figura 39 representa o DCL para o semirreboque. Os apoios são representados pela a suspensão e pino rei. A distância do plano que passa pelo centro do pino rei até a frontal do semirreboque é conhecida como balanço dianteiro BD , e para o presente trabalho foi considerado 1,6 metros (máximo permitido pela legislação).. Aplicando o somatório das forças verticais:

$$R_{susp} + P_{pr} - F = 0 \quad (29.1)$$

$$F = R_{susp} + P_{pr} \quad (29.2)$$

Na Equação 29.2, F representa o carregamento concentrado que é aplicado no ponto médio do semirreboque, e os valores de R_{susp} e P_{pr} foram determinados utilizando as Equações 27 e 28.2. Aplicando o somatório dos momentos em relação ao pino rei, foi determinado a distância que passa entre os planos centrais da roda do segundo eixo e o pino rei.

O Carregamento concentrado representado por F é expresso em kg por respeitar a unidade do peso transmitido por eixo. Uma unidade de força além do N (Newton) é o kgf (quilograma força) onde 1 kgf representa aproximadamente 9,81 N.

$$R_{susp} * EE - F \left(\frac{L}{2} - BD \right) = 0 \quad (30.1)$$

$$EE = \frac{F \left(\frac{L}{2} - BD \right)}{R_{susp}} \quad (30.2)$$

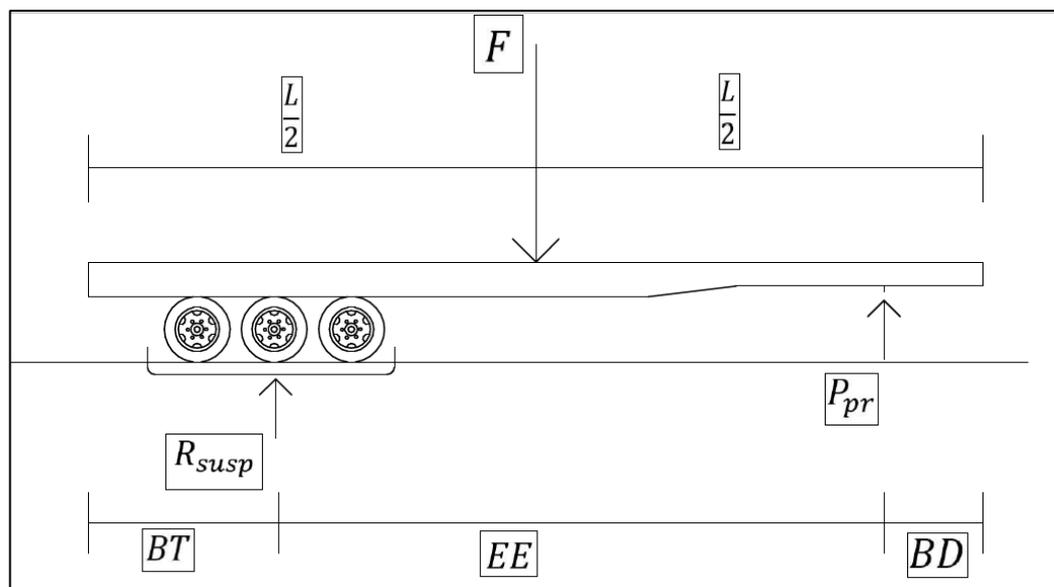
Onde

EE - Distância entre o pino rei e o plano médio da roda do segundo eixo da suspensão.

L - Comprimento do semirreboque.

BD - Balanço dianteiro para o semirreboque, limite máximo de 1,6 metros.

Figura 39 - Diagrama de corpo livre do semirreboque.



FONTE: Própria (2019)

As equações obtidas foram aplicadas para os quatro modelos de caminhões selecionados, afim de obter o caminhão que permita transportar a maior quantidade de carga. A Tabela 4 mostra a relação dos parâmetros obtidos para cada combinação.

Tabela 4 - Relação da capacidade de carga para o semirreboque.

Modelo	Lc [mm]	Peso [Kg]	Lsr[mm]	Ppr [Kg]	Psusp [Kg]	Rsusp [Kg]	F [kg]	q [Kg/m]
AXOR 2544 - MULTIUSO	7230	9273	14810	13727	3375	22125	35852	2420,80
ACTROS 2546 - ESTRADEIRO	6867	9772	14990	13228	3375	22125	35353	2358,44
FH 6X2T PNEUMÁTICO	6540	8695	15385	14305	3375	22125	36430	2367,89
CONSTELLATION - 25.420	6989	8155	15131	14845	3375	22125	36970	2443,33

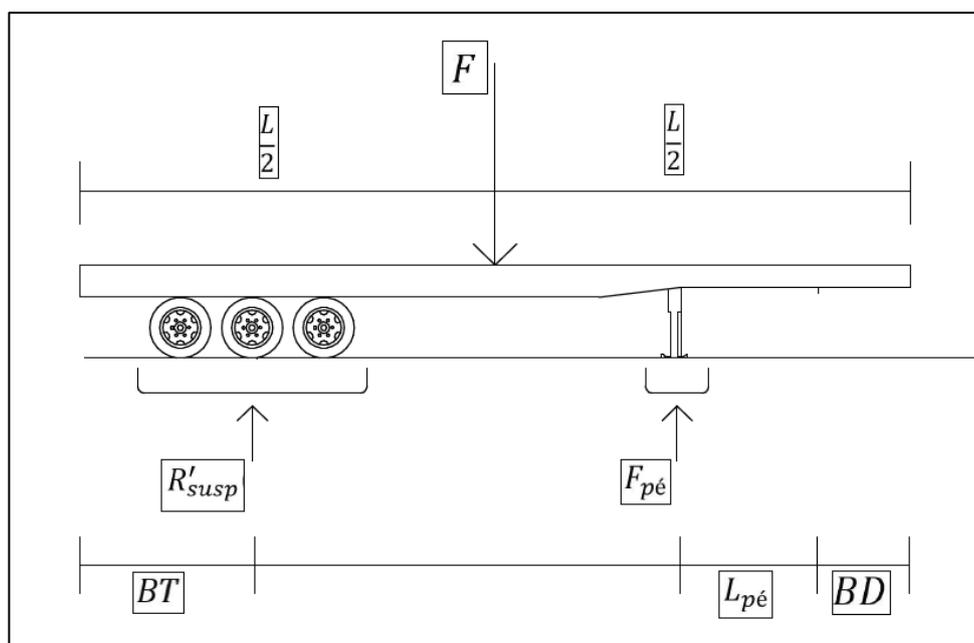
FONTE: Própria (2019).

Analisando os resultados da Tabela 4 o caminhão trator que apresenta o maior carregamento para o semirreboque é o modelo CONSTELLATION 25.420, logo, este caminhão trator foi escolhido para realizar o estudo com o conjunto pé de apoio. Vale notar que a diferença entre os semirreboques com as capacidades de carga mínima e máxima é de 1617 Kg.

Após determinar a combinação com maior capacidade de carga, foi realizado o cálculo para determinar o carregamento aplicado na região do pé de apoio. A Figura 40 mostra o

diagrama de corpo livre do semirreboque apoiado sobre a suspensão e o pé de apoio. Para esta configuração a reação da suspensão aplicada no semirreboque será alterada devido a alteração do apoio na parte dianteira do semirreboque, de modo a aplicar as equações de equilíbrio para determinar as variáveis.

Figura 40 - Diagrama de corpo livre para determinar o carregamento na região do pé de apoio.



FONTE: Própria (2019)

O pé de apoio é posicionado a uma distância de 2,40 metros do pino rei e esta distância é especificada em resolução e apresentada nos manuais de implementação das montadoras. Com o auxílio das equações de equilíbrio determinou-se os valores para R'_{susp} e $F_{pé}$.

$$R'_{susp} + F_{pé} - F = 0 \quad (31.1)$$

$$F_{pé} = F - R'_{susp} \quad (31.2)$$

Onde:

R'_{susp} - Peso que será transmitido pela suspensão considerando o posicionamento do pé.

$F_{pé}$ - Carregamento que cai na região do pé de apoio e é expresso em kg respeitando o padrão de unidades da resolução 210/2006, mas para cálculos futuros o valor para $F_{pé}$ será cálculo em N.

Para determinar o valor de R'_{susp} foi considerado a soma dos momentos em torno do pé da região do pé de apoio.

$$R'_{susp}(EE - L_{pé}) - F\left(\frac{L}{2} - (L_p + BD)\right) = 0 \quad (32.1)$$

$$R'_{susp} = \frac{F\left(\frac{L}{2} - (L_p + BD)\right)}{(EE - L_{pé})} \quad (32.2)$$

Onde:

$L_{pé}$ - Distância entre o pé de apoio e o pino rei do semirreboque.

Aplicando os dados obtidos nas Equações 31.2 e 32.2, os valores para peso do caminhão, comprimento do semirreboque, carregamento concentrado, carregamento distribuído, carregamento na região do pé de apoio, distância do pino rei até o segundo eixo e a reação na suspensão com o semirreboque apoiado no pé de apoio, com referência no caminhão CONSTELLATION 25.420 são:

Figura 41 - Caminhão Constellation 25.420

$$P_c = 8155 \text{ Kg}$$

$$L = 15,130 \text{ m}$$

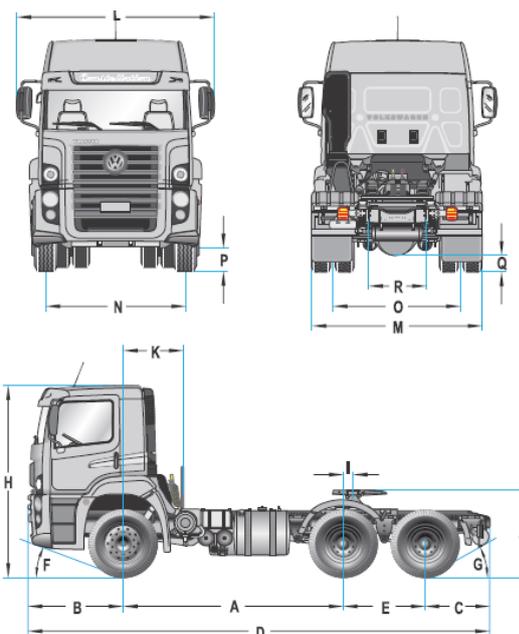
$$F = 36970 \text{ Kg}$$

$$q = 2443 \text{ Kg/m}$$

$$EE = 9,967 \text{ m}$$

$$F_{pé} = 19553 \text{ Kg}$$

$$R'_{susp} = 17417 \text{ Kg}$$



FONTE: VW (2019).

4.4 Modelo Conjunto Pé De Apoio

O presente trabalho dedicou-se a estudar o efeito do carregamento aplicado na região do pé de apoio escamoteável/ regulável utilizado em semirreboques fabricados na BAL – Bertolni Da Amazônia Indústria e Comércio Ltda. A Figura 42 mostra um modelo de chassi II de semirreboque baú equipado com o conjunto pé de apoio .

Este modelo de pé de apoio é utilizado em diversos implementos rodoviários como semirreboque gaseira e semirreboque veículo porta container, por exemplo. Uma característica

notável neste tipo de acessório estar no ajuste da altura, sendo semelhante com modelos comerciais de aparelhos de levantamento, no entanto, o pé fabricado exige um esforço maior por parte do motorista por conta do conjunto ser mais pesado.

Figura 42 - Chassi II de semirreboque equipado com pé de apoio regulável/ escamoteável.



FONTE: Própria (2019)

A Figura 43 mostra uma vista lateral que apresenta o posicionamento do conjunto pé e região que recebe a parcela de carga do peso do semirreboque. Para a realização do trabalho, foi obtido junto a empresa o projeto do pé de apoio para que pudesse ser realizado o modelamento utilizando ferramenta CAD e posterior análise de elementos finitos com auxílio de ferramenta CAE.

Figura 43 - Vista lateral do conjunto pé de apoio.

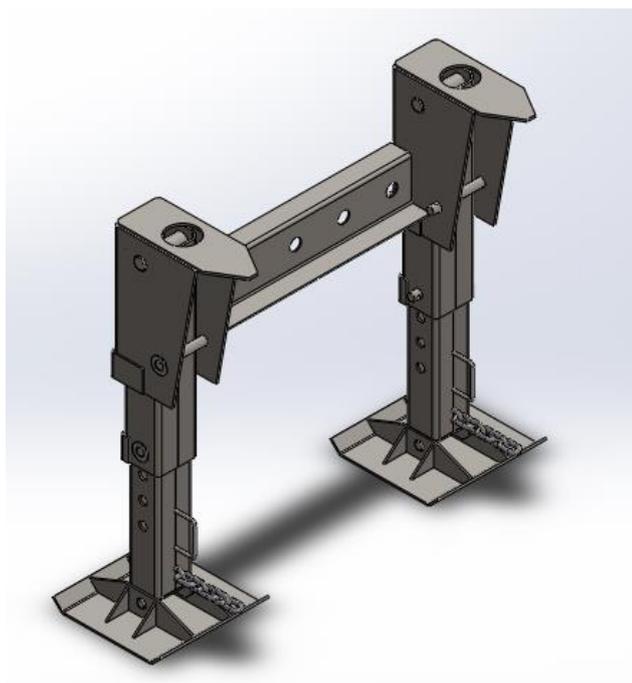


FONTE: Própria (2019)

O projeto do pé é composto por chapas de aço A36 com diferentes espessuras e aço redondo para a fabricação do pino. Com o auxílio da bibliografia técnica e software de modelamento foi obtido as principais propriedades mecânicas e massa das peças modeladas e utilizadas na montagem do conjunto. Para o projeto utilizou-se o software CAD Solidworks 2017 que permitiu realizar o modelamento de todas as partes do produto. A massa do conjunto pé de apoio é de 132,31 kg e foi determinada através do modelamento das peças e montagem do conjunto (Figura 44) .

A ferramenta CAD tem papel fundamental para projetos de engenharia, da a possibilidade de realizar estudos de posicionamentos, realizar avaliação de processos de fabricação e até mesmo montagens do conjuntos sem necessitar da perda de material e mão de obra. Ao seguir esta metodologia de projeto os ajustes por conta de erros serão muito menores, visto que a ferramenta permite evitar tal situação.

Figura 44 - Modelo 3D realizado com auxílio de software CAD.



FONTE: Própria (2019).

4.5 Cálculo Anlítico

A mecânica dos sólidos é fundamental para avaliar a condição de determinado material quando submetido aos esforços externos. Para realizar a análise de qualquer elemento estrutural deve-se especificar que o material deve ser contínuo, ou seja, o material deve ter distribuição uniforme em sua composição, e coeso, que significa um material com todas as suas partes bem conectadas, sem vazios e sem trincas.

As colunas do conjunto péque estão conectadas sofrerão o esfoço de cisalhamento entre as chapas e o pino. Realizar o dimensionamento de juntas conectadas por pino é muito comum no ramo da engenharia. No referencial teorico é citado o procedimento para realizar o cálculo da área do pino quando submetido a um cisalhamento simples.

Para realizar a fabricação do conjunto pé são utilizadas chapas de aço estrutural ASTM A36 com diferentes espessuras e o aço redondo aço SAE 1020, elemento responsável pela rotação do conjunto pé. Levantou-se as propriedades mecânicas para os dois tipos de materiais utilizados. O Quadro 1 mostra as informações referentes aos aços ASTM A36 e SAE 1020.

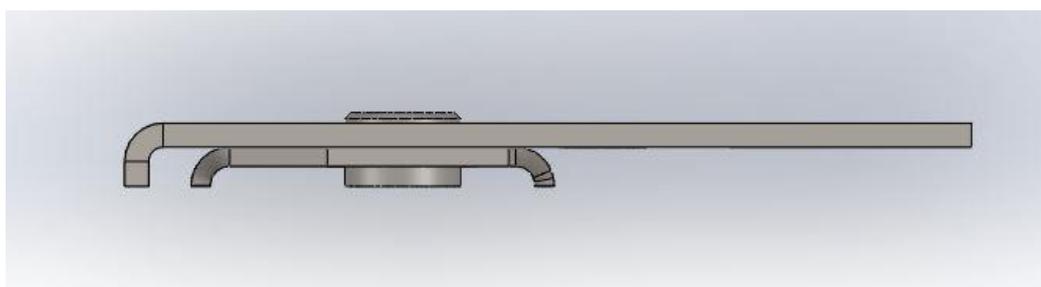
Quadro 1 - Reção das propriedades mecânicas.

Propriedade	ASTM A36	SAE 1020
Módulo elástico	200 Gpa	200 Gpa
Coefficiente de Poisson	0,26 Sem dimensão	0,29 Sem dimensão
Massa específica	7850 Kg/m ³	7900 Kg/m ³
Resistência de tração	400 MPa	420 MPa
Limite de escoamento	250 MPa	350 MPa

FONTE: Própria (2019)

Após realizar avaliação adequada para o conjunto pé foi utilizada a Equação 5 para determinar a área do furo do pino, de modo que a tensão admissível e carregamento aplicado foram previamente determinados. A Figura 45 mostrar vista superior que detalha as duas chapas metálicas unidas por elemento de pino.

Figura 45 - Visão de corte da região de contato das peças com auxílio de pino articulador.



FONTE: Própria (2019)

A área foi determinada com a aplicação da equação abaixo que relaciona o esfoço cortante e a tensão de cisalhamento admissível:

$$A = \frac{V}{\tau_{adm}} \quad (33)$$

Onde na equação τ_{adm} é a tensão de cisalhamento admissível para o projeto e V representa o esfoço de cisalhamento. A tensão de cisalhamento admissível considerada para o

estudo será 50% do valor da tensão de escoamento do aço ASTM A36. O motivo de escolher a tensão do aço A36 partiu de que tensão de escoamento do aço SAE 1020 ser 100MPa maior, de modo que para o projeto o andamento do projeto será considerado a tensão menor de valor.

$$\tau_{adm} = 0,5 * 250 * 10^6 = 125 * 10^6 = 125MPa$$

O esforço de cisalhamento será considerado conforme mostrado na Figura 45. Para o cálculo foi considerado o valor máximo que cairá sobre a região do pé de apoio. A carga que cai sobre a região do pé é de 19553 kg ou 191814,93 N (considerar $g = 9,81m/s^2$). Para a análise foi considerado apenas um lado do pé, logo o valor da carga será metade, ou seja, 95907,465 N, de maneira que o valor será: $V = 95908,275 N = 95,908 KN$. Aplicando os valores obtidos na Equação 33.

$$A = \frac{V}{\tau_{adm}} = \frac{95908,275N}{125000000Pa} = 0,0007673 m^2$$

A área também pode ser escrita para determinar o raio e o diâmetro do furo.

$$A = \pi r^2 \quad (34)$$

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (35)$$

Com base no resultado obtido da Equação 33 e aplicando na Equação 34, o valor do raio e diâmetro do furo serão:

$$r = \sqrt{\frac{0,0007673}{\pi}} = 0,0156278m = 15,62781mm$$

$$D = 2 * r = 2 * 15,62781mm = 31,25562mm$$

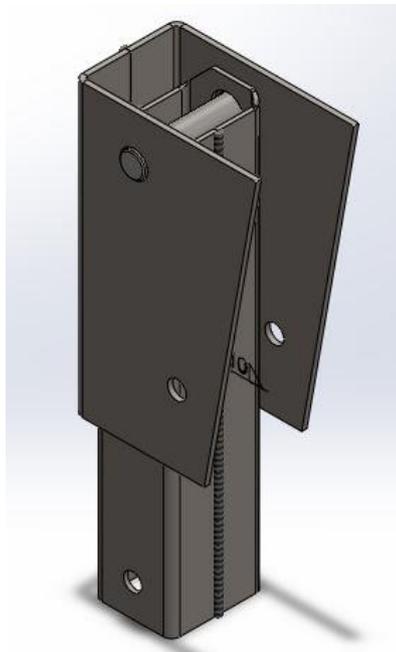
O diâmetro para o furo é aproximadamente 1 ¼” (31,75mm), logo o diâmetro pino será de 1 1/8” (28,575mm) garantindo uma folga de 3,175mm. O diâmetro do pino utilizado no projeto da empresa é de 38,1mm, ou seja, o cálculo mostrou que existe a possibilidade de utilizar um aço redondo com bitola menor, de modo a diminuir uma parte do custo do produto.

4.6 Preparação da malha

Para realizar o estudo de elementos finitos no projeto foram tomadas ações para diminuir a chances de erros ou até mesmo falhas no momento de construir o modelo para análise. Para isto o estudo contará com apenas um dos lados do conjunto pé de apoio e modelo simplificado

como mostrado na Figura 46. Outro ponto para a análise foi considerar as peças que fazem parte da junção, possibilitando conhecer os esforços naquela região.

Figura 46 - Coluna separada para a análise.



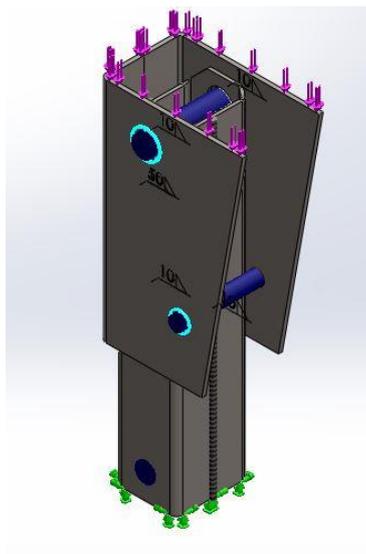
FONTE: Própria (2019)

Com a simplificação realizada foi possível preparar a malha, assim como determinar os conectores, restrições e o carregamento aplicado no objeto de estudo. Para cada furo foi considerado um conector do tipo pino, onde um conector nada mais é que um elemento que permite substituir uma peça para simular seus efeitos no resto do modelo, de modo que estes resultados são apenas possíveis realizando o modelamento de tal componente.

Para a análise considerou-se o pino para suportar o carregamento aplicado para um dos lados, de modo que se o pino garantir funcionalidade e segurança, os outros elementos também irão garantir a devida funcionalidade, sendo desta maneira então justificada a motivação de reduzir o sistema para um modelo mais compacto. Para a preparação da malha foi considerado que todos os corpos fossem tratados como corpos sólidos, isto parte do princípio que o material principal para a concepção do projeto são chapas metálicas.

Na parte inferior da coluna será considerada a região fixa onde representará a região de apoio do conjunto pé, que vai garantir a reação causada pela carga que atua no sentido vertical na direção para baixo. O carregamento aplicado na parte superior como mostrado na Figura 47 foi obtido no item 4.3, onde foi considerado metade do carregamento.

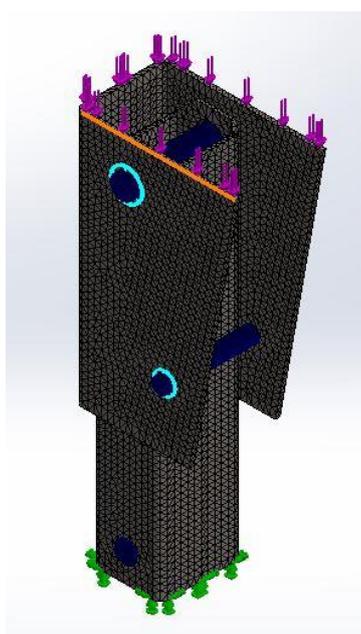
Figura 47 - Condições aplicadas para a preparação da malha.



FONTE: Própria (2019)

Após definir todos os parâmetros necessários para a preparação da malha, foi dado início aos testes no modelo. Para o trabalho utilizou-se um computador equipado com processador Intel Core i5-6200U com 2,30GHz e memória de 4GB. Em fase preliminar utilizou um grão mais grosso com o intuito de observar o comportamento do modelo. Após os primeiros testes saírem com resultados satisfatórios, foi então realizada o refino máximo permitido pelo o software. O software utilizado para análise em elementos finitos foi o SolidWorks Simulation da SolidWorks 2017.

Figura 48 - Malha pra análise em elementos finitos.

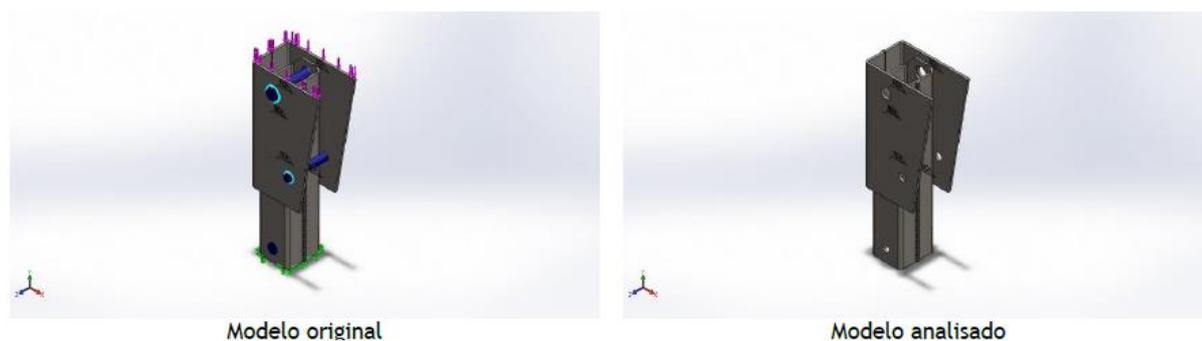


FONTE: Própria (2019)

4.7 Análise Elementos Finitos

Utilizando o SolidWorks 2017 foi possível realizar o estudo de elementos finitos para o conjunto pé de apoio. Foi realizada uma simulação do tipo de análise estática, que permite conhecer as tensões que agem no corpo assim como o deslocamentos ocasionados pelo carregamento. A Figura 49 mostra o modelo original com todos os parametros estabelecidos e modelo aplicado para a análise.

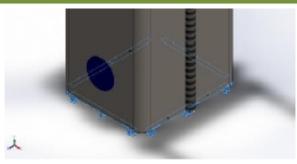
Figura 49 - Vista do modelo original e modelo analisado.



FONTE: Própria (2019)

A análise realizada foi do tipo estática e a malha gerada para o estudo é malha sólida. O material utilizado para o projeto é chapa de aço ASTM A36. A Base da coluna do pé foi fixada restringindo seus seis graus de liberdade, de modo que o programa é capaz de mostrar o somatório das resultes das forças (Figura 50).

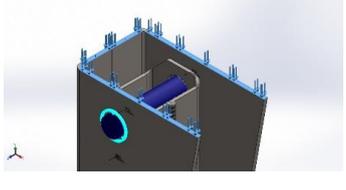
Figura 50 - Região fixa para análise.

Nome do acessório de fixação	Imagem de acessório de fixação	Detalhes de acessório de fixação		
Fixo-1		Entidades: 6 face(s) Tipo: Geometria fixa		
Forças resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Força de reação(N)	-0.000717163	95907.5	-0.000484467	95907.5
Momento de reação(N.m)	0	0	0	0

FONTE: Própria (2019)

O carregamento considerado atuou diretamente na parte superior da coluna mostrada. A coluna receberá a carga que foi determinada na distribuição de carga. A Figura 51 mostra a região onde foi submetido o carregamento.

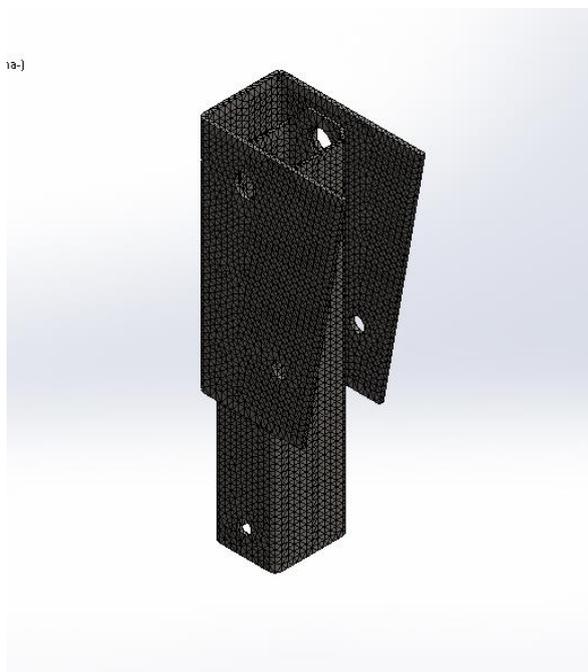
Figura 51 - Região de aplicação do carregamento.

NOME DA CARGA	CARREGAR IMAGEM	DETALHES DE CARGA
FORÇA-1		Entidades: 4 FACE(S) Tipo: APLICAR FORÇA NORMAL Valor: 95907.5 N

FONTE: Própria (2019)

Foram definidos três pinos conectores que servem para observar o efeito do carregamento aplicado nas regiões periféricas a dos furos. Após passar por todas as etapas de definição, a malha encontrou-se como compatível para a análise. Para a execução da análise de elementos finitos para o projeto, encontrou-se um total de 58691 nós, totalizando 30790 elementos para geração da malha mostrada na Figura 52.

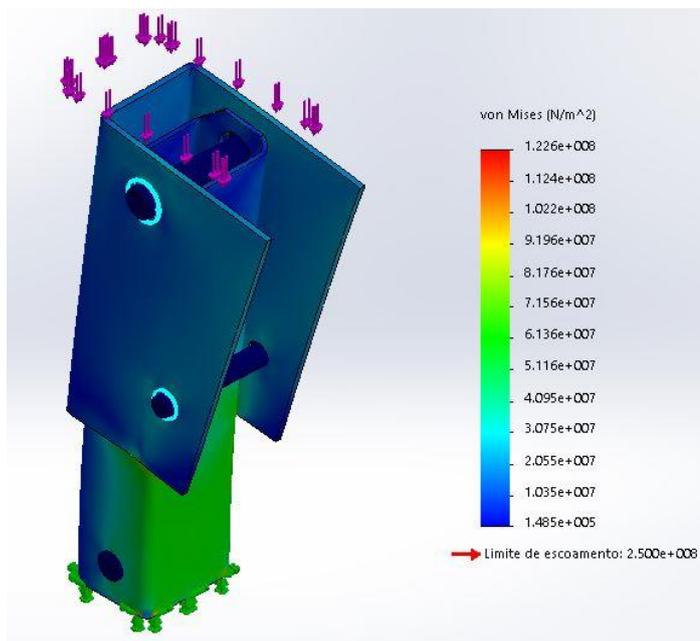
Figura 52 - Malha obtida por SolidWorks 2017.



FONTE: Própria (2019)

Para o estudo de tensão (Figura 53) foi identificado que o nó 36707 detectou o menor valor de tensão de von Mises com 148 *KPa* e o nó 17843 encontrou-se com a maior tensão para o estudo realizado com cerca de 122,6 *MPa*.

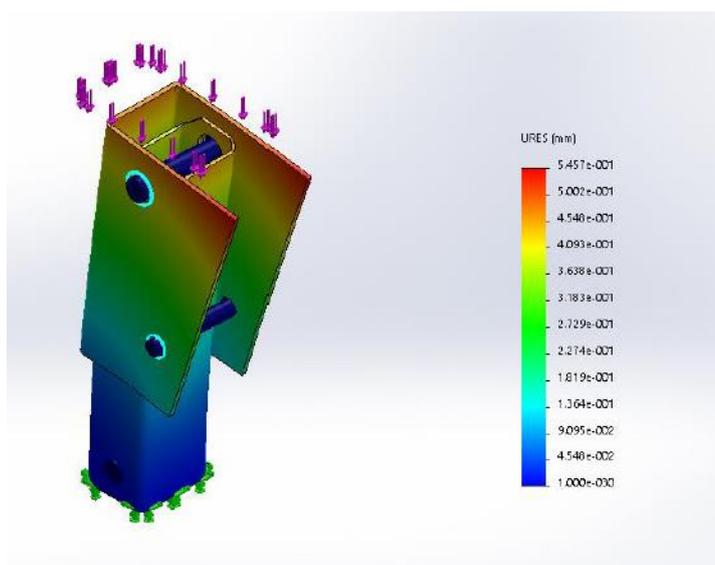
Figura 53 - Análise de tensão von Mises.



FONTE: Própria (2019)

A análise mostrou resultados referentes aos deslocamentos do material (Figura 54). Para efeitos visuais o programa extrapolar a movimentação com o intuito de mostrar visualmente o efeito de carregamentos. Ao analisar o diagramam gerado observa-se que o deslocamento mínimo foi igual a 0, nó 477 e deslocamento máximo de $5,457e^1-0,001$ mm localizado no nó 31586.

Figura 54 - Análise de deslocamento do objeto de estudo.



FONTE: Própria (2019)

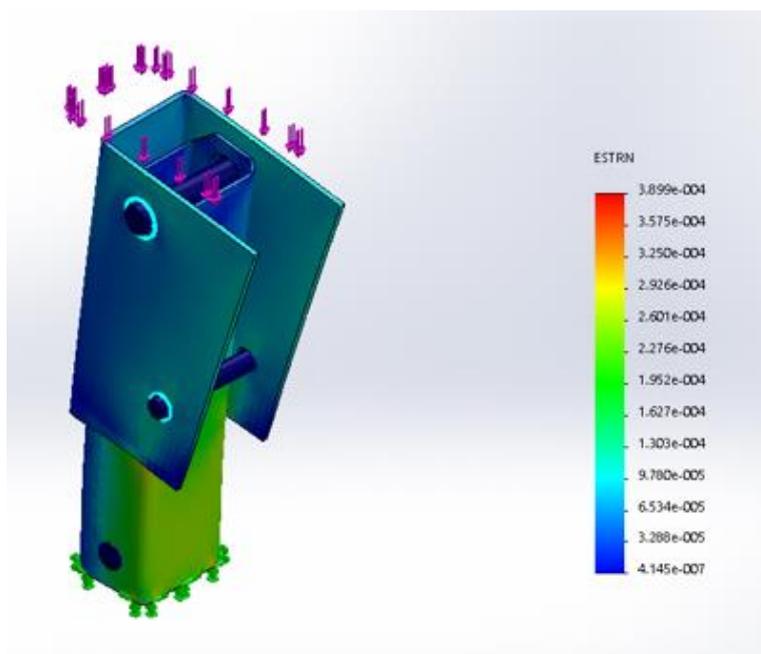
¹ Representa base 10.

Outro ponto encontrado na análise foi a deformação (Figura 55), onde a deformação é algo permanente quando ultrapassa determinado limite de resistência. Para o presente trabalho foi obtido a deformação mínima de $4,145e-007$ localizado no nó 21700 e deformação máxima de $3,899e-004$ situada no nó 11445.

Comparando os três diagramas mostrados nas Figuras 53, 54 e 55 nota-se que regiões com cores mais frias que representam tensões, deslocamentos e deformações menores, dando então a possibilidade de pensar em outro tipo de material alternativo visando encontrar uma matéria prima com um custo menor e propriedades mecânicas para manter a segurança e funcionalidade do projeto.

Os resultados obtidos na simulação foram satisfatórios de modo que o material atendeu as necessidades quando submetido ao carregamento, no qual mostra que o esforço não ultrapassar a tensão de escoamento para o aço ASTM A36.

Figura 55 - Diagrama com as deformações causadas pelo o carregamento aplicado.



FONTE: Própria (2019)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao término do trabalho foi possível alcançar todos os objetivos propostos ao longo do trabalho, de modo a obter resultados satisfatórios.

Para qualquer projeto de semirreboque, independente da modalidade de transporte de carga o projeto depende exclusivamente do caminhão trator, pois será através do mesmo a definição de comprimento e peso do semirreboque. Além de depender exclusivamente do caminhão trator, os implementos são baseados em resoluções, normas técnicas, das quais podemos destacar a resolução 210/ 2006 do CONTRAN.

O cálculo de distribuição de carga é fundamental para o conhecimento das cargas que o implemento fica submetido, além de determinar a posição do conjunto suspensão. Por meio do cálculo da distribuição de carga é possível conhecer os carregamentos aplicados em diferentes pontos do semirreboque.

A ferramenta CAD é fundamental para elaboração de projetos de engenharia onde permite ao projetista ou engenheiro modelar o projeto e definir pontos importantes para o projeto. Este tipo de ferramenta permite que seja realizado um projeto e análise sem ter custos com a matéria prima, processos e mão de obra para execução, onde o modelamento do conjunto pé de apoio de semirreboque foi utilizado como ferramenta de modelamento o Software SolidWorks 2017.

Com a utilização das equações da estática e resistência dos materiais, calculou-se o diâmetro para um dado pino, no qual foi considerando uma tensão admissível de cisalhamento inferior ao limite de escoamento e carga que cai sobre a região do pé de apoio, onde determinou-se um furo 1 ¼” (31,75mm) e pino de 1 1/8” (28,575) de forma a garantir a confiabilidade do produto e redução de custo.

Utilizando os devidos parâmetros no software de análise, foi realizada uma análise com maior grau de complexidade, onde abrangeu-se um cálculo que manualmente seria inviável. Constatou-se que o diâmetro hoje utilizado pela a empresa é bem dimensionada, de maneira que seria viável a utilização de um pino com uma bitola menor, visando economizar custos.

Na simulação, a tensão máxima encontrada não ultrapassou o limite de escoamento do aço A36, de modo que a simulação com o auxílio de ferramenta de elementos e correta interpretação dos resultados teve total sucesso em sua abordagem, ou seja, o material utilizado atende os requisitos técnicos suportando o carregamento aplicado.

Dado o valor que é o aço ASTM A36, sugere-se a alternativa de avaliar outro aço estrutural que apresente as propriedades mecânicas necessárias para um projeto confiável, seguro, e com matéria prima com menor valor de aquisição. Uma ideia de aplicação de material seria o aço ASTM A 992.

O ramo de implementos rodoviários permite um grande leque de trabalhos a serem realizados nos campos de mecânica dos sólidos, processos de fabricação, ciências dos materiais e claro no segmento de elementos finitos. Pode-se realizar estudos e análises do semirreboque completo ou em regiões diferentes do chassi com a intenção de compreender as tensões e deformações aplicadas, compreender efeitos de carregamentos em diferentes tipos de travessas que compõem o chassi e outros campos de pesquisa.

Fica então concluída a pesquisa de trabalho onde foi possível conhecer um pouco da indústria mecânica pesada, que envolve diversos processos de fabricação permitindo ao estudante aplicar conhecimentos adquiridos na universidade em um projeto de linha de fabricação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASKELAND, D. R; PHULÉ, P. P. **Ciência e engenharia dos materiais**. Revisão técnica: Gloria Dulce de Almeida Soares, Ivan Napoleão Bastos, Wagner Figueiredo Sacco; Tradução: Vertice Translate e All Tasks. São Paulo: Cengage Learning, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 1726**: Veículos rodoviários – acoplamento mecânico entre caminhão-trator e semirreboque – intercambialidade. Rio De Janeiro, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9762**: Veículo rodoviário de carga – Terminologia. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE IMPLEMENTOS RODOVIÁRIOS. **Anuário da indústria de implementos rodoviários, 2018**. São Paulo, 2018.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE IMPLEMENTOS RODOVIÁRIOS. **Anuário da indústria de implementos rodoviários, 2019**. São Paulo, 2019.
- AZEVEDO, A. F. M. **Método dos elementos finitos**. Porto: FEUP, 2003.
- BAL. **Bertolini da Amazônia Indústria e Comércio Ltda**. Disponível em <<http://www.tbl.com.br/empresa-bal.jsp>>. Acesso em: 08 agosto de 2019
- BEER, F. P. et al. **Estática e mecânica dos materiais**. Tradução: Antônio Eustáquio De Melo Pertence; Revisão: técnica: Antonio Pertence Júnior. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- BRASIL. Código de Trânsito Brasileiro (CTB). Lei Nº 9.503, de 23 de Setembro de 1997 que institui o Código de Trânsito Brasileiro: Anexo I. Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos. Brasília.
- BUDYNAS, R. G & NISBETT, J. K. **Elementos de máquinas de Shigley**: Projeto de engenharia mecânica. Tradução técnica João Batista de Aguiar, José Manuel de Aguiar. 8 Ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. O transporte move o Brasil: resumo das propostas da CNT ao país, 2019. Brasília.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Plano CNT de transporte e logística, 2018. Brasília.
- CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO (CONTRAN). **Resolução Nº 210 de 13 de novembro de 2006**. Estabelece os limites de peso e dimensões para veículos que transitem por

vias terrestres e dá outras providências. Ministerio das cidades. Brasília: 2006. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/resolucoes>>. Acessado em: 02 de agosto de 2019.

DENATRAN. **Departamento Nacional de Trânsito**. Disponível em: <<https://infraestrutura.gov.br/denatran>>. Acesso em: 09 setembro 2019

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRANSITO – PORTARIAS. **Portaria 63/2009**: Homologar os veículos e as combinações de veículos de transporte de carga e de passageiros, constantes do Anexo desta Portaria, com seus respectivos limites de comprimento, peso bruto total – PBT e peso bruto total combinado – PBTC. Brasília. 2009. Disponível em: <<https://infraestrutura.gov.br/component/content/article/115-portal-denatran/8525-portarias-2009-denatran.html>>. Acessado em: 05 de setembro de 2019.

EMPRESAS BERTOLINI. Transportes Bertolini. Disponível em: <<http://www.tbl.com.br/empresas.jsp>>. Acesso em: 08 de agosto de 2019.

FACCHINI. **Produtos – Reboque Graneleiro**. Disponível em <<https://www.facchini.com.br/produto/reboque-graneleiro>>. Acesso em 30 Outubro de 2019.

FILHO, A. F.; **Elementos Finitos**: A base da tecnologia CAE. São Paulo: Érica, 2000.

GARCIA, A; SPIM, J. A; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**. Rio De Janeiro: LTC, 2000.

GERHARDT, E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de pesquisa**; coordenado pela Universidade Aberta do Brasil – UAB/UFRGS e pelo Curso de Graduação Tecnológica – Planejamento e Gestão para o Desenvolvimento Rural da SEAD/UFRGS. – Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GOLDENSTEIN, M.; ALVES, M. F.; AZEVEDO, R. L. S.. **A indústria de implementos rodoviários e sua importância para o aumento da eficiência do transporte de carga**. Rio De Janeiro: BNDES Setorial, n. 24, p. 241-260, set. 2006.

GUIA DO TRC. **Resolução da resolução 210/2006 do CONTRAN**. Disponível em: <<http://www.guiadotrc.com.br/noticiaid2.asp?id=32254>> Acesso em 20 setembro de 2019.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos materiais**. Tradução Arlete Simille Marques; revisão técnica Sebastião Simões da Cunha Jr. – 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. cap. 1, 2, 3 e 7.

JOST Brasil. **Quinta roda JSK 38C**. Disponível em: <<https://www.jost.com.br/pt/produtos-jost/quinta-roda-jsk-38c>>. Acesso em 30 outubro de 2019.

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

MERCEDES-BENZ. **Linha de Caminhões e caminhões trator**. Disponível em: <<https://www.mercedes-benz.com.br/caminhoes>>. Acesso em 8 de agosto de 2019.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**/ Robert L. Norton; [tradução: Konstantinos Dimitriou Stavropoulos ... et al.]. – 4. Ed. – Dados eletrônicos. – Porto Alegre: Bookman, 2013. cap. 1 e 8.

PRODANOV, C. C. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. – 2. ed. – Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

RANDON MULTIEIXO. **Por dentro das novas resoluções: Resolução 210, Resolução 2011, Resolução 11 e Portarias 63 e 33**. RANDON, 2012.

SUSPENSSYS. **Suspensão mecânica – Suspensões mecânicas 1, 2, 3 e 4 eixos**. Disponível em: <<http://www.suspenssys.com/pt/produtos/semirreboques/suspensao-mecanica/suspensoes-mecanicas-1-2-3-e-4-eixos>>. Acesso em 25 de setembro de 2019.

ZANELLA, L. C. H. **Metodologia de pesquisa**. 2. ed. reimp. – Florianópolis: Departamento de Ciências da Administração/UFSC, 2013.