

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

LEONARDO LINSHALM KÖHLER

ESTUDO DE CARGAS EM UM SEMIRREBOQUE CARREGA TUDO UTILIZANDO
MÉTODOS NUMÉRICOS E ANÁLISE EXPERIMENTAL

Joinville

2018

LEONARDO LINSHALM KÖHLER

ESTUDO DE CARGAS EM UM SEMIRREBOQUE CARREGA TUDO UTILIZANDO
MÉTODOS NUMÉRICOS E ANÁLISE EXPERIMENTAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva no Curso de Engenharia Automotiva da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Prof. Marcos Alves Rabelo, Dr. Eng.

Joinville

2018

LEONARDO LINSHALM KÖHLER

ESTUDO DE CARGAS EM UM SEMIRREBOQUE CARREGA TUDO UTILIZANDO
MÉTODOS NUMÉRICOS E ANÁLISE EXPERIMENTAL

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

Banca Examinadora:

Dr. Modesto Hurtado Ferrer
Coordenador do Curso
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Marcos Alves Rabelo
Orientador
Presidente

Dr. Modesto Hurtado Ferrer
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Thiago Antônio Fiorentin
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a toda minha família, especialmente aos meus pais, Sadir José Köhler e Lucile Linshalm Köhler, os quais são meus maiores exemplos de força, honestidade e compaixão. Sem vocês, com certeza, nada disso seria possível.

Ao meu Opa, João Linshalm Filho (*in memoriam*), por toda sua trajetória de vida inspiradora, e por ter cultivado durante todos os seus dias de vida, acima de todas as coisas, a união da nossa família.

Aos meus amigos Luan Mathiola, Carlos Pessi, Henrique Luz, Caíque Fonseca, Nicolás Cavalheiro, Rafael Kiemo, Lucas Menezes, Júlia Baumgärtner, Marcus Hamann, Rodrigo Dallabona, e outros tantos que estiveram presentes durante minha vida acadêmica. A estes, meu mais sincero obrigado, pois o suporte e incentivo investidos em mim foram essenciais para que eu alcançasse este objetivo.

Ao meu orientador, Dr. Eng. Marcos Alves Rabelo, que me proporcionou os mais variados conhecimentos de engenharia e ensinamentos de vida, fomentando cada vez mais a vontade de tornar-me engenheiro.

Ao meu amigo e professor, Dr. Eng. Modesto Hurtado Ferrer, que me guiou durante a vida acadêmica da melhor forma possível, buscando sempre maximizar minhas qualidades profissionais e pessoais.

Ao meu tio, João Linshalm Neto, por todos os conhecimentos, apoio e confiança ofertados a mim, e pela oportunidade de desenvolver este assunto em um problema de engenharia real.

Agradeço a Equipe Fórmula CEM UFSC pelos 4 anos de participação nos projetos dos veículos desenvolvidos, além de me auxiliarem no desenvolvimento dos meus conhecimentos de engenharia.

A Universidade Federal de Santa Catarina Campus Joinville por todas as oportunidades, pela estrutura e por auxiliar na minha formação de Engenheiro Automotivo.

Também aproveito para agradecer as empresas Carrocerias Linshalm Ltda, WEG Transformadores e Falcão Bauer, por compartilharem comigo algumas das informações essenciais para a realização deste trabalho.

Finalmente, agradeço a Deus, por todos os momentos vividos até este momento.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo voltado às simulações computacionais, auxiliado por análises experimentais aplicadas em um chassi estrutural de um veículo semirreboque do tipo Carrega Tudo, projetado por uma empresa denominada Desenvolvedora, localizada na Região Sul do Brasil. A proposta do trabalho, contudo, é desenvolver um modelo numérico que se aproxime ao máximo do comportamento real do produto quando carregado. Os programas de simulação CAE comerciais utilizados neste trabalho são o ALTAIR Hypermesh® e OptiStruct®, devido à sua vasta utilização no ramo industrial, bem como pelo seu método de resolução se basear no Método de Elementos Finitos (MEF). Sabendo-se que os materiais utilizados neste projeto são classificados como dúcteis, busca-se estudar os modos de falha acerca destes, no que diz respeito a cargas estáticas. Em paralelo ao estudo de falhas mecânicas, analisa-se por critérios de engenharia, a estrutura do chassi em relação à natureza e origem das forças nele atuantes, bem como, as condições de contorno do chassi. Isto possibilita uma melhor adequação do modelo computacional em relação ao modelo real. Com o modelo computacional bem definido, simula-se, inicialmente, uma análise modal, devido ao seu processamento ser muito mais rápido, a fim de calibrar-se a malha de maneira a evitar incongruências nos resultados finais. Com isso, utiliza-se o mesmo pré-processamento para as simulações envolvendo a condição de carregamento estático. Com o uso de transdutores, captam-se as variações de deformação e aceleração do chassi em unidade de tensão elétrica em função do carregamento nele imposto, que com um aparelho aquisitor compatível, converte-os para deformação no que diz respeito aos extensômetros, e aceleração em unidade de g no que tange aos acelerômetros. As informações adquiridas são, então, utilizadas como comparativo com os resultados provenientes da simulação numérica. Tal feito, garante uma simulação mais próxima da realidade, o que valida a qualidade da mesma. Por conseguinte, faz-se a interpretação dos resultados obtidos tanto na simulação numérica, quanto nos ensaios práticos, com base nas propriedades mecânicas dos materiais utilizados no projeto e comparam-se estes resultados com os reais.

Palavras-chave: Simulação. MEF. Extensômetros. Acelerômetros. Carrega Tudo.

ABSTRACT

This work presents a study focused on computational simulations, aided by experimental analysis using Strain Gages and Accelerometers, applied to a structural chassis of a Lowboy Semitrailer, which was projected by a company named as Developer, which is located in Southern Region of Brazil. The proposal of this work, however, is to develop a numerical model that approaches the maximum of the real behavior of the product when it is loaded. The commercial CAE simulation program that has been used in this work is the ALTAIR Hypermesh® and OptiStruct®, due to its wide use in the industrial area, as well as its resolution program be based on Finite Element Methods (FEM). Since the materials used on the project are classified as ductile, was sought to study the failure modes about it, it means, for static loads. In parallel to the study of mechanical failures, was analyzed by engineering criteria, the structure of the chassis in relation to the nature and origin of the forces acting on it, as well as the boundary conditions of the semitrailer. That allows a better adaptation of the computational model in relation to the real model. With the well-defined computational model, modal analysis are initially simulated, due to their much faster simulation processes, in order to calibrate the mesh to try to avoid incongruences in the results. Thereby, the same pre-processing is used for the simulations about the static loads. Using Strain Gages, it is possible to sense deformations' variations from the chassis (in units of voltage) in function of the loading applied on it. Then, with a compatible acquisition device (in this case, made by LYNX®), converts these voltages values to deformation regarding the strain gages, and accelerations in units of g regarding the accelerometers. The acquired information are then transferred to the CAE program and later attributed to the numerical model. This fact ensures a simulation closer to the reality, which validates the quality of the simulation. Therefore, the results obtained during the numerical simulations and also during the experimental tests, are then interpreted with the mechanical properties of the materials used in the project, and these results are compared with the real ones.

Keywords: Simulation. FEM. Strain Gages. Accelerometers. Lowboy Trailer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vendas registradas entre janeiro e março de 2016 e 2017.....	18
Figura 2 – Carroceria Carrega Tudo.	20
Figura 3 – Análise de curva de convergência de malha.....	26
Figura 4 – Corpo modelado por elementos finitos bidimensionais.	28
Figura 5 – Representação de um extensômetro linear padrão.....	30
Figura 6 - Diagrama do sistema de medição através de extensômetros.....	31
Figura 7 – Percepção de deformações em um extensômetro.....	32
Figura 8 – Fluxograma de aquisição	33
Figura 9 – Fluxograma de aquisição de dados.....	34
Figura 10 – Sistema massa-mola utilizado para se medir aceleração.	35
Figura 11 – Aplicação de um acelerômetro à estrutura semirreboque Carrega Tudo.	36
Figura 12 – Fluxograma de atividades desempenhadas.....	38
Figura 13 – Estrutura do Semirreboque Carrega Tudo em CAD.....	40
Figura 14 – Semirreboque Carrega Tudo carregado com subestação elétrica móvel.	40
Figura 15 – Fluxo de trabalho adotado via otimização computacional.....	41
Figura 16 – CAD detalhado do semirreboque Carrega Tudo.....	43
Figura 17 – Estrutura simplificada em CAD.....	44
Figura 18 – Carregamento e reações normais acerca da estrutura.	45
Figura 19 – Discretização do carregamento e das reações normais por MEF.	46
Figura 20 – Componentes do conjunto de suspensão traseira que possuem contato com a carroceria Carrega Tudo.....	47
Figura 21 – Discretização em Altair Hypermesh® das áreas de engaste na região traseira da carroceria Carrega Tudo.	48
Figura 22 – Região de engaste da parte dianteira da carroceria Carrega Tudo.	49
Figura 23 – Discretização em Altair Hypermesh® da área de engaste na região dianteira da carroceria Carrega Tudo.....	50
Figura 24 – Distribuição da força imposta pelo transformador.	51
Figura 25 – Exclusão dos espaços entre as travessas e as longarinas.	52
Figura 26 – Preenchimento dos espaços entre travessas e longarinas.	53
Figura 27 – Geometria simplificada final.	54

Figura 28 – Aplicação de “ <i>washer</i> ” no contorno de um concentrador de tensão.....	55
Figura 29 – Corpos idênticos na estrutura.	56
Figura 30 – Parâmetros de qualidade da malha.....	57
Figura 31 – Avaliação dos elementos finitos a partir do parâmetro de “ <i>skew</i> ”.	58
Figura 32 – Frequências naturais encontradas pela análise modal.	59
Figura 33 – Frequência natural encontrada para malha com 8 mm.	60
Figura 34 – Malha refinada com elementos finitos de 8 mm.	60
Figura 35 – Instrumentação de um extensômetro em uma chapa metálica.	64
Figura 36 – Instrumentação realizada para o ensaio experimental.	65
Figura 37 – Dispositivo aquisitor de dados.....	66
Figura 38 – Programa de aquisição de dados.....	67
Figura 39 – Posicionamento dos extensômetros – vista lateral esquerda.....	68
Figura 40 – Posicionamento dos extensômetros – vista lateral direita.....	69
Figura 41 – Circuito total percorrido durante o teste de trafegabilidade.	71
Figura 42 – Trecho não pavimentado do circuito.	71
Figura 43 – Localização do extensômetros no modelo computacional.	72
Figura 44 – Resultado da simulação computacional para carregamento estático.....	73
Figura 45 – Vista lateral esquerda com os resultados da simulação computacional para carregamento estático.....	73
Figura 46 – Vista lateral direita com os resultados da simulação computacional para carregamento estático.....	74
Figura 47 – Resultado computacional referente aos extensômetros EX1 e EX5.	74
Figura 48 – Resultado computacional referente aos extensômetros EX9 e EX10. ...	75
Figura 49 – Resultado da simulação computacional com carregamento estático.	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Vendas de reboques e semirreboques registradas.	19
Tabela 2 – Propriedades mecânicas do ASTM A572 para cada espessura.	21
Tabela 3 – Medições de tensão com o semirreboque em repouso.	77
Tabela 4 – Medições de tensão com o semirreboque acoplado ao veículo trator.	78
Tabela 5 – Medições de tensão com o semirreboque carregado e acoplado ao veículo trator.	78
Tabela 6 – Comparativo entre ensaio experimental e computacional.	79
Tabela 7 – Maiores variações de aceleração em estrada pavimentada a 50 km/h. ...	81
Tabela 8 – Maiores variações de aceleração em estrada não pavimentada a 40 km/h.	82
Tabela 9 – Valores máximos de aceleração durante o teste de trafegabilidade.	82
Tabela 10 – Maiores variações de tensão em estrada pavimentada a 40 km/h.	83
Tabela 11 – Maiores variações de tensão em estrada não pavimentada a 30 km/h.	83
Tabela 12 – Maiores variações de tensão durante o teste de trafegabilidade.	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MEF – Método de Elementos Finitos

CAD – Computer Aided Design

CAE – Computer Aided Engineering

CNT – Confederação Nacional do Transporte

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

ASTM – American Society for Testing and Materials

MFEL – Mecânica da Fratura Linear Elástica

FAC – Fadiga de Alto-Ciclo

FBC – Fadiga de Baixo-Ciclo

GRANTE – Grupo de Análise e Projeto Mecânico

FS – Fator de Segurança

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

MPa – Unidade de Mega Pascal

CG – Centro de Gravidade

LISTA DE SÍMBOLOS

L_e	Limite de escoamento do material
L_r	Limite de ruptura do material
σ'	Tensão equivalente de von Mises
U	Energia de deformação total
σ_x	Tensão no plano x
σ_y	Tensão no plano y
σ_1	Tensão principal
σ_2	Tensão principal
σ_3	Tensão principal
τ_{xy}	Tensão de cisalhamento ou distorção angular no plano xy
β	Fator geométrico de intensidade de tensão
a	Tamanho da trinca inicial
S_y	Tensão de escoamento do material
$S_{y,70\%}$	70% da tensão de escoamento do material
S_{ut}	Tensão de limite de tração do material
S_e	Tensão de limite de vida em fadiga
S_{adm}	Tensão admissível
σ_m	Tensão média no material
σ_{min}	Tensão mínima no material
σ_{max}	Tensão máxima no material
σ_a	Tensão alternada
$\Delta\sigma$	Variação de tensão do material
u	Deslocamento do elemento na direção global x
v	Deslocamento do elemento na direção global y
K_g	Fator de sensibilidade do extensômetro
ε	Deformação
L	Comprimento do <i>gage</i>
ΔL	Variação de comprimento do <i>gage</i>
R	Resistência elétrica
R_o	Resistência elétrica do material
ΔR	Variação de resistência elétrica do material

ϑ	Coeficiente de Poisson
ρ	Resistividade
$\Delta\rho$	Variação de resistividade
mV	Milivolt (unidade de tensão elétrica)
V	Tensão elétrica
ΔV	Variação de tensão elétrica
F	Força
Ω	Ohm (unidade de resistência)
V_i	Tensão elétrica de entrada
V_o	Tensão elétrica de saída
®	Marca registrada
a	Aceleração
k	Constante inerente a mola
x	Deslocamento
g	Unidade de aceleração em g

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	15
1.1.	OBJETIVOS.....	16
1.1.1.	Objetivo Geral	16
1.1.2.	Objetivos Específicos.....	16
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1.	O MODAL RODOVIÁRIO.....	17
2.1.1.	Caracterização do Semirreboque Carrega Tudo.....	20
2.2.	FALHAS POR ESFORÇOS ESTÁTICOS E DINÂMICOS	21
2.2.1.	Material Dúctil sob Carregamento Estático	22
2.3.	MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)	24
2.3.1.	Elementos Finitos do Tipo 2D.....	27
2.3.2.	Elementos de 1ª e 2ª Ordem.....	27
2.3.3.	Análise Global-local.....	29
2.4.	FUNDAMENTOS DE EXTENSÔMETRIA.....	29
2.4.1.	Funcionamento de um Extensômetro	32
2.5.	ACELERÔMETROS	34
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
3.1.	SIMULAÇÃO NUMÉRICA POR MEF	41
3.1.1.	Pré-processamento Numérico	42
3.2.	INSTRUMENTAÇÃO DO SEMIRREBOQUE.....	61
3.2.1.	Preparação das Regiões de Instrumentação.....	61
3.3.	AQUISIÇÃO DE DADOS	66
3.3.1.	Ensaio de Carregamento Estático	67
3.3.2.	Ensaio de Trafegabilidade.....	70
4.	RESULTADOS OBTIDOS	72
4.1.	RESULTADOS REFERENTES AO CARREGAMENTO ESTÁTICO	72
4.1.1.	Simulação Computacional do Carregamento Estático.....	72
4.1.2.	Ensaio Experimental do Carregamento Estático	77
4.1.3.	Comparativo Entre os Resultados de Carregamento Estático	79
4.2.	RESULTADOS REFERENTE AO TESTE DE TRAFEGABILIDADE	80
4.2.1.	Ensaio Experimental do Teste de Trafegabilidade	80
5.	CONCLUSÃO.....	85

REFERÊNCIAS.....	88
APÊNDICE A – Frequência de Deformação ao Longo do Tempo na Região do Extensômetro EX1.....	92

1. INTRODUÇÃO

O transporte tem importância fundamental no desenvolvimento de qualquer país. A Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2002), considera este como um serviço horizontalizado que viabiliza, além do desenvolvimento econômico, os setores diretamente ligados a segurança e a qualidade de vida. Observa-se por meio dos dados disponibilizados pela própria CNT (2010), que o modal rodoviário prevalece em 61,1% do total frente aos demais modais.

Dado o conhecimento da importância atual acerca do modal rodoviário na economia do Brasil e, por este, segundo o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social Setorial (BNDES SETORIAL, 2006, p. 242), ser “[...] amplamente dominante e os transportadores de carga e operadores logísticos esforçarem-se para aumentar sua eficiência, os fabricantes de veículos de cargas devem ser mais inovadores e apresentar produtos cada vez mais especializados e customizados”.

Portanto, estando o mercado de implementos rodoviários cada vez mais concorrido, o aparecimento de falhas em projetos comercializáveis pode comprometer o legado, bem como o futuro de qualquer empresa do ramo, visto que a confiabilidade é tida como fator principal na hora da compra.

Com o propósito de se estudar os fenômenos de falha em um semirreboque Carrega Tudo, se faz necessário a utilização de simulação computacional, que ainda é tida como paradigma na indústria de implementos rodoviários. De acordo com Peres (2006, p. 1), “[...] o desenvolvimento destes produtos fora sempre baseado na experiência dos fabricantes, tendo como base testes experimentais e falhas já ocorridas no mercado”, o que tornou o setor defasado em metodologia de desenvolvimento estrutural.

Destarte, a metodologia deste trabalho consiste em utilizar duas ferramentas da engenharia atual, a simulação computacional e a aquisição de dados via sensores transdutores. A utilização da simulação antes da instrumentação de um produto, permite reduzir custos de desenvolvimento por meio de ajustes no projeto ainda em fase computacional, evitando a construção de inúmeros protótipos para diferentes experimentos. Portanto, com o poder computacional disponibilizado no mercado, análises por meio de programas de engenharia assistida por computador (CAE – computer aided engineering) tornaram-se atualmente acessíveis.

Neste trabalho, serão utilizados programas CAE comerciais do tipo MEF (método de elementos finitos) como ferramentas de projeto, bem como o uso de extensômetros e acelerômetros, para análises experimentais do produto acerca das medições de deformação e cálculo de tensões.

As medições de deformações via transdutores, possibilitam calibrar as simulações, o que permite além de um melhor entendimento físico do problema, uma maior assertividade no que tange os resultados computacionais.

Por conseguinte, a metodologia desenvolvida durante este trabalho também poderá ser empregada em análises futuras de outros produtos, auxiliando desde o pré-processamento computacional até questões de comparações de resultados.

1.1. OBJETIVOS

Como estratégia de orientação para o desenvolvimento deste trabalho, definiu-se objetivo geral e objetivos específicos.

1.1.1. Objetivo Geral

Analisar o comportamento da estrutura de uma carroceria semirreboque Carrega Tudo por meio de análises computacionais e experimentais, utilizando-se, respectivamente, os programas ALTAIR Hypermesh® e OptiStruct®, e sensores transdutores, neste caso, extensômetros e acelerômetros.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Instrumentar o semirreboque Carrega Tudo com extensômetros a fim de analisar-se as tensões mecânicas presentes;
- Acoplar acelerômetros ao semirreboque Carrega Tudo e ao transformador a fim de analisar-se as acelerações atuantes;
- Examinar por meio de análises computacionais em CAE, os efeitos de tensão mecânicas presentes no semirreboque Carrega Tudo;
- Apresentar comparativo entre os resultados numérico e experimental;
- Comprovar a validação da estrutura do semirreboque Carrega Tudo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nas próximas subseções serão apresentados os conceitos referentes aos seguintes tópicos: modal rodoviário, semirreboque Carrega Tudo, falhas por esforços estáticos e dinâmicos (fenômeno de fadiga), método de elementos finitos (MEF) e análises experimentais via extensômetros e acelerômetros.

2.1. O MODAL RODOVIÁRIO

Um dos maiores entraves em relação ao crescimento econômico do Brasil está intimamente ligado à eficiência da cadeia logística de infraestrutura do transporte de carga existente. A matriz brasileira de transporte de cargas é desbalanceada e privilegia em demasia o modal rodoviário, em que 96,2% da locomoção de passageiros e 61,8% da movimentação de cargas é dada através deste modal, contrariando o que ocorre em outros países de dimensões similares a do Brasil, como Estados Unidos, Rússia e Canadá (BNDES SETORIAL, 2006; CNT, 2010).

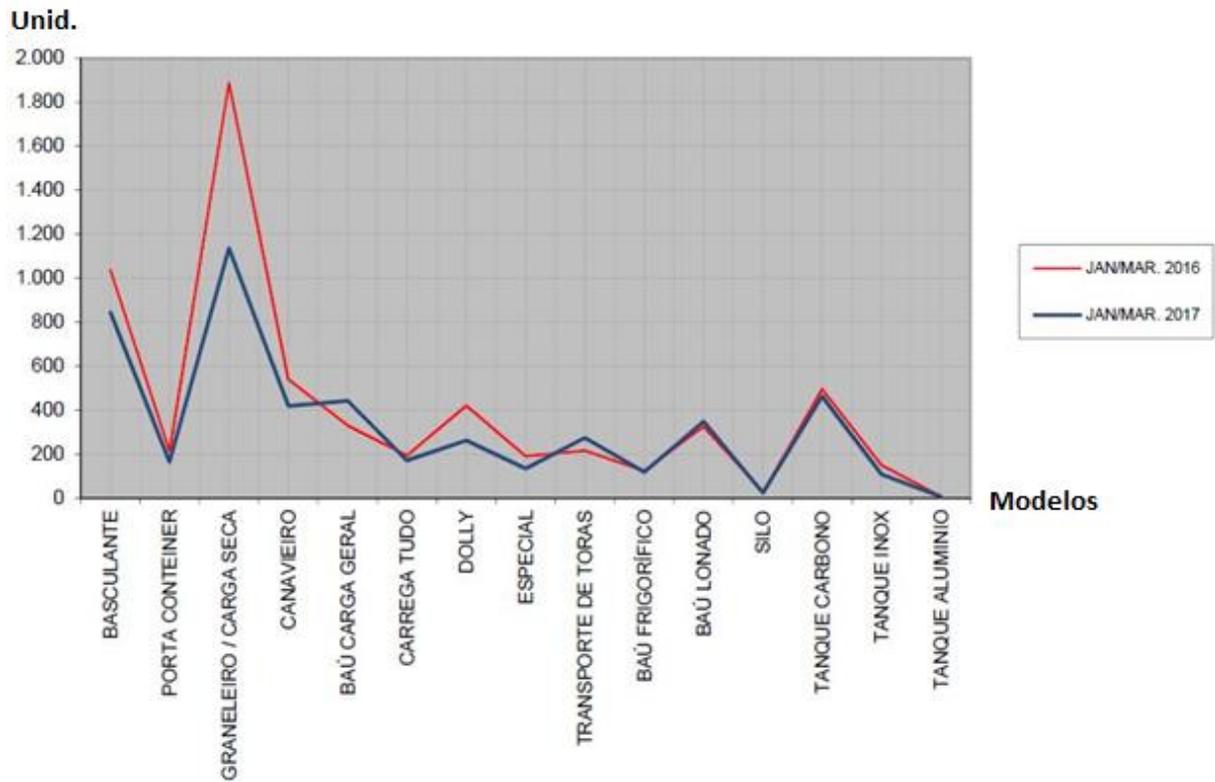
Uma das justificativas para a dominância do modal rodoviário perante aos demais, é dado pelo contexto histórico vivenciado pelo Brasil. Na década de 1920, Washington Luís presidiu o país com o lema de sua campanha eleitoral “Governar é abrir estradas”. O modelo de investimento no modal foi adotado e disseminado nos governos de Getúlio Dorneles Vargas e Eurico Gaspar Dutra (PEREIRA; LESSA; CARDOSO, 2008).

Outra justificativa é apresentada por Keedi (2003 apud BOARETTO, 2012, p.2) quando relata que “[...] o transporte rodoviário não se atém, em hipótese alguma, a trajetos fixos, tendo a capacidade de transitar por qualquer lugar, apresentando uma flexibilidade ímpar, proporcionando assim uma vantagem competitiva perante os outros modais”.

A partir dos dados disponibilizados pela Associação Nacional dos Fabricantes de Implementos Rodoviários (ANFIR, 2017), apresentados na Figura 1, percebe-se que a economia atual não está favorável ao mercado de implementos rodoviários, o que se deve a atual crise que assola o país, desde o final de 2014, quando os escândalos de corrupção envolvendo a política brasileira começaram a vir à tona. O

mercado fraco, portanto, é reflexo direto das medidas tomadas pelo governo para se readmitir no mapa econômico mundial.

Figura 1 – Vendas registradas entre janeiro e março de 2016 e 2017.



Fonte: ANFIR (2017).

A fim de garantir ao leitor números mais exatos, criou-se a Tabela 1.

Tabela 1 – Vendas de reboques e semirreboques registradas.

Reboques e Semirreboques			
Família	Jan/Mar 2016	Jan/Mar 2017	Percentual
Basculante	1037	845	-18,51
Porta Contêiner	213	164	-23,00
Graneleiro/Carga	1888	1136	-39,83
Canavieiro	539	417	-22,63
Baú de Carga Geral	329	441	34,04
Carrega Tudo	193	170	-11,92
Dolly	419	262	-37,47
Especial	190	134	-29,47
Transporte de Toras	216	274	26,85
Baú Frigorífico	123	117	-4,88
Baú Lonado	325	348	7,08
Silo	27	22	-18,52
Tanque Carbono	495	462	-6,67
Tanque Inox	149	107	-28,19
Tanque Alumínio	7	6	-14,29
Total	6150	4905	-20,24

Fonte: Adaptado de ANFIR (2017).

Pela Tabela 1, nota-se que apenas 20% dos implementos rodoviários estão em um período de crescimento, sendo assim, as fabricantes acabam buscando maneiras para otimizar seus projetos, diminuindo os custos com sobredimensionamento sem que isso prejudique a confiabilidade de seus produtos, a fim de garantir uma maior margem de lucro.

Historicamente, carrocerias do tipo Carrega Tudo proporcionam maiores margens de lucro à seus fabricantes, tendo em vista que sua demanda é menor dado a sua aplicação específica, bem como pela concorrência nacional no que diz respeito à produção deste modelo ser baixíssima. Este fato, somado ao interesse de aquisição de uma frota deste produto por parte de um importante cliente, sediado próximo a região da fabricante do produto aqui em estudo, propiciaram que o foco deste trabalho fosse no veículo Carrega Tudo.

A fim de preservar as marcas das empresas presentes neste trabalho, adotou-se os nomes: empresa Desenvolvedora, a respeito da empresa responsável pelo projeto e manufatura do semirreboque Carrega Tudo, e empresa Cliente, referente à empresa interessada na avaliação e compra do semirreboque Carrega Tudo.

2.1.1. Caracterização do Semirreboque Carrega Tudo

O semirreboque Carrega Tudo, também designado como Prancha Carrega Tudo, é um produto com classificação específica para o uso no transporte de cargas indivisíveis e excedentes em peso e/ou dimensões para o trânsito em rodovias. Sua definição como semirreboque se dá por conta desta carroceria possuir um ou mais eixos e por ser engatada por meio de articulação a um veículo ou unidade tratora. A Figura 2 exhibe o semirreboque Carrega Tudo a ser avaliado neste trabalho.

Figura 2 – Carroceria Carrega Tudo.



Fonte: Carrocerias Linshalm Ltda. (2017).

Conforme conceito exposto na Resolução nº 01 de 14 de Janeiro de 2016, disponibilizado pelo DNIT (2016), “carga indivisível é a carga unitária com peso e/ou dimensões excedentes aos limites regulamentares, cujo transporte requeira o uso de veículos especiais com lotação (capacidade de carga), dimensões, estrutura, suspensão e direção apropriadas”. Entre os exemplos de cargas indivisíveis, encontram-se: equipamentos de grande porte, pás eólicas, vagões, transformadores, reatores, guindastes, máquinas de uso industrial, máquina perfuratrizes, máquinas agrícolas, estruturas metálicas, silos, usinas de asfalto, usinas de britagem, e etc.

Para o presente trabalho, o veículo em questão fora projetado para transportar subestações elétricas móveis, produto que se enquadra na classificação de transformadores. Estes transformadores possuem características listadas conforme abaixo:

- Dimensão: 2,00 x 1,95 x 3,30 [m]
- Peso total: 27.000 [kg]

A configuração estrutural do semirreboque a ser avaliado no decorrer deste trabalho, consiste basicamente de longarinas em formatos de “I”, as quais são interligadas por meio de travessas – distribuídas ao longo do chassi do semirreboque.

O projeto do chassi em questão, possui material estritamente dúctil, no caso, o já citado, aço ASTM A572, o qual possui 210 GPa de módulo de elasticidade. Suas demais propriedades mecânicas estão relacionadas na Tabela 2, onde L_e e L_r representam, respectivamente, os limites de escoamento e ruptura em unidade de MPa.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas do ASTM A572 para cada espessura.

ASTM A572			
Espessura (mm)	L_e (MPa)	L_r (MPa)	Alongamento (%)
6,30	489	603	21,0
8,00	450	551	25,0
9,50	504	609	21,5
16,0	471	585	26,0
19,0	415	554	24,0

Fonte: Adaptado de Usiminas® (2017).

Faz-se necessário o entendimento do comportamento para cada uma das espessuras acima, pois estas referem-se as dimensões utilizadas durante o projeto. A diferença acerca dos resultados envolvendo L_e e L_r , para cada uma das espessuras, deve-se ao fato de que materiais metálicos, durante sua concepção, estão sujeitos a inúmeras variações na microestrutura, mesmo apesar dos rigorosos controles de fabricação adotados pelas empresas produtoras de aço.

2.2. FALHAS POR ESFORÇOS ESTÁTICOS E DINÂMICOS

Uma peça pode falhar se suas deformações e distorções forem grandes o suficiente para que não funcione adequadamente. Uma peça pode falhar também sofrendo ruptura e separando-se. Ambas as condições são falhas, mas os mecanismos que as causam são muito diferentes. Apenas materiais dúcteis podem deformar significativamente antes de se romperem. Materiais frágeis, entretanto, rompem sem mudanças significativas na forma. (NORTON, 2013).

Outro fator significativo na falha é o tipo do carregamento, se estático ou dinâmico. Cargas estáticas são aplicadas lentamente e permanecem essencialmente constantes no tempo. Cargas dinâmicas podem ser tanto aplicadas subitamente (carga de impacto), como variadas repetidamente no tempo (carga de fadiga), ou até mesmo ambas. Os mecanismos de falha são totalmente diferentes em cada caso. (NORTON, 2013).

O conhecimento do valor de resistência do material utilizado em qualquer componente de engenharia, como o caso deste chassi, é de fundamental importância, pois este é o termo de comparação para se definir o nível de segurança do componente.

Desta forma, o material deve ter a capacidade de suportar cargas analisadas de diferentes formas, sendo estas:

- Resistência à fadiga: é necessário distinguir os períodos de nucleação e de propagação da trinca, pois os fenômenos envolvidos são distintos;
- Resistência à falha estática (sem defeito interno): pode ser associada a um escoamento, uma instabilidade, ou mesmo com a ruptura do material;
- Resistência à ruptura estática (com defeito interno): define o tamanho admissível de trinca para não ocorrer a ruptura final do componente – mecânica da fratura linear elástica (MFLE).

2.2.1. Material Dúctil sob Carregamento Estático

Enquanto materiais dúcteis rompem-se quando tensionados estaticamente acima do limite de ruptura, suas falhas em peças mecânicas geralmente ocorrem quando escoam sob carregamento estático. A tensão de escoamento dos materiais dúcteis é apreciavelmente menor que a tensão limite de ruptura. (NORTON, 2013).

As teorias que descrevem este tipo de falha com concordância aos resultados práticos, são duas: a Energia de Distorção de von Mises-Hencky, ou somente Teoria da Energia de Distorção, e a Máxima Tensão de Cisalhamento. Contudo, a primeira é mais precisa, e é a partir desta que surge a Tensão Equivalente de von-Mises, a mais difundida no âmbito de engenharia atual. (SHIGLEY, 2005).

A teoria de von Mises-Hencky consiste em avaliar o nível de tensão interna sofrido pelo objeto em função das componentes consequentes de carregamentos

hidrostáticos e componentes da energia de distorção, as quais somadas, resultam na energia de deformação total, denominada pela variável U . (SHIGLEY, 2005).

Entretanto, os programas de engenharia atuais, tais como o ALTAIR OptiStruct®, incorporam em sua interface a teoria da tensão equivalente de von-Mises. Esta é justificada pela formulação simples e de rápida resolução, sendo considerada uma otimização da teoria de von Mises-Hencky.

Em situações envolvendo tensões combinadas, como normal e de cisalhamento em um mesmo ponto, define-se uma tensão equivalente que possa ser usada para representar a combinação de tensões. Sendo assim, a tensão equivalente de von Mises (σ') é definida como a tensão de tração uniaxial que criaria a mesma energia de distorção que é originada pela combinação atual das tensões aplicadas. Esse procedimento permite tratar casos de tensão multiaxial combinada às tensões de cisalhamento como se fossem devidos a um carregamento de tração pura, o que facilita a análise computacional, visto que o processamento se torna menor. (NORTON, 2013).

A Tensão Equivalente de von-Mises para casos tridimensionais (3D) é dada pela Equação 1.

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x\sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (1)$$

Onde: σ_x , σ_y e τ_{xy} são, respectivamente, tensão principal no eixo x, tensão principal no eixo y e tensão de cisalhamento.

O coeficiente de segurança para esta teoria, supondo estado tridimensional, é dado pela Equação 2.

$$\frac{S_y}{N} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_3} \quad (2)$$

Onde: σ_1 , σ_2 e σ_3 são todas variáveis de tensão principal, sendo cada uma para um eixo específico.

As duas equações anteriores estão presentes no programa de simulação numérica a ser utilizado no desenvolvimento deste trabalho (ALTAIR OptiStruct®) e, por isso, apresentou-se ambas.

Porém, durante as análises computacionais relacionados ao estudo de caso deste trabalho, utilizaram-se apenas a teoria das tensões principais, visto que o objetivo é comparar-se tais resultados com os resultados práticos, os quais são medidos por meio de extensômetros uniaxiais posicionados na direção longitudinal à estrutura. As Equações 3 e 4, são utilizadas durante as análises computacionais.

$$\sigma_1 = \sigma_{max} = 1/2 (\sigma_x + \sigma_y) + \sqrt{[1/2 (\sigma_x - \sigma_y)]^2 + \tau_{xy}^2} \quad (3)$$

$$\sigma_2 = \sigma_{min} = 1/2 (\sigma_x + \sigma_y) - \sqrt{[1/2 (\sigma_x - \sigma_y)]^2 + \tau_{xy}^2} \quad (4)$$

Em que para o caso deste trabalho, τ_{xy}^2 é nulo.

2.3. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

Segundo Oliveira (2000 apud LOTTI et al., 2006, p. 1) “[...] Em 1956, Turner, Clough, Martins e Topp, trabalhando em um projeto de aeronaves para a Boeing®, propuseram um método de análise estrutural, similar ao Método de Elementos Finitos, vindo a utilizá-lo pela primeira vez em 1960”, caracterizando-se como a primeira aparição formal do método como ferramenta de engenharia.

Para calcular os estados de tensão de uma estrutura, as soluções analíticas baseadas nas teorias clássicas são as formas mais diretas, porém só existem para estruturas simples e em algumas condições de contorno. Os métodos analíticos clássicos permitem o cálculo da resposta exata dos deslocamentos, deformações e tensões na estrutura em todos os seus pontos, porém estas soluções são somente conhecidas para alguns casos, que fogem da maioria das aplicações práticas de engenharia. (ALVES, 2000; PERES, 2006).

Para estruturas complexas como o Carrega Tudo em questão, os métodos numéricos de aproximação são os mais utilizados. Dentre esses se destaca o MEF, o qual é seguramente o processo mais utilizado para resoluções de problemas de engenharia, dado sua acessibilidade e assertividade. Em situações onde é difícil desenvolver-se uma formulação analítica do problema, este método tem se provado como um dos mais confiáveis. (FONSECA, 2002 apud PERES, 2006; SPYRAKOS, 1994 apud PERES, 2006).

Segundo Cook et al. (2001), o método de elementos finitos tem vantagens em relação a outros métodos numéricos, entre elas: versatilidade e apelo físico.

Algumas das vantagens são:

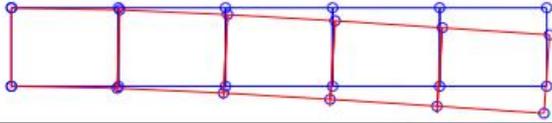
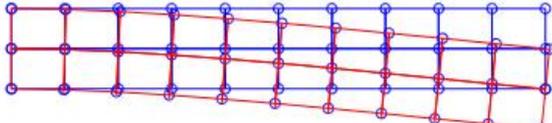
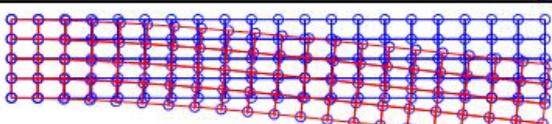
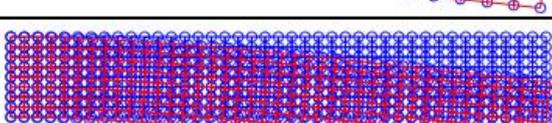
- O MEF é aplicado em todos os tipos de problema, entre eles: transferência de calor, análise de tensões, campos magnéticos, dentre outros;
- Não há restrição geométrica para o MEF. O corpo ou região de análise pode apresentar qualquer forma;
- Condições de contorno e solicitações inseridas podem assumir várias formas, tentando se aproximar da realidade;
- As propriedades dos materiais não estão restritas à isotropia.

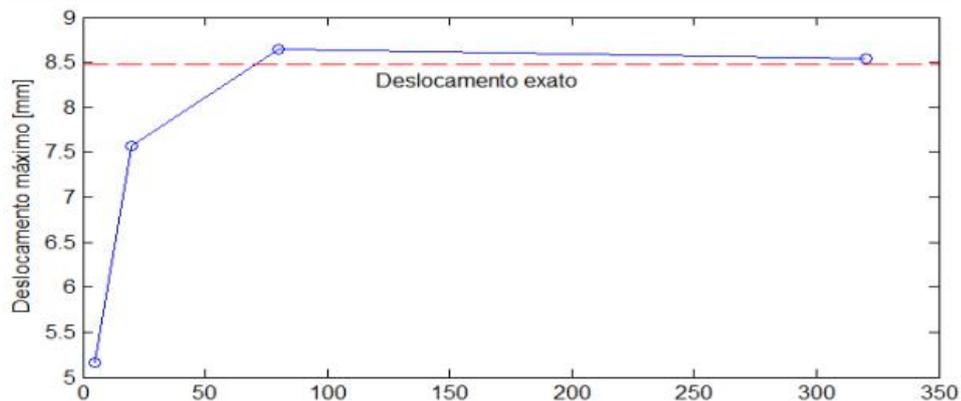
A ideia básica do MEF consiste em subdividir, inicialmente, o domínio do problema, em subdomínios de dimensões finitas – elementos finitos – tais que o conjunto de todos os elementos finitos sejam igual ao domínio original. Em seguida, sobre cada elemento finito, isoladamente, adota-se um comportamento aproximado, local, para as incógnitas do problema. Estas incógnitas estão normalmente associadas ao estado de tensão e de deformação, as quais são geradas por ações externas ao domínio em questão. (ALVES, 2007; AZEVEDO; 2003).

Portanto, resumidamente, o MEF é descrito como um método de solução aproximada de equações diferenciais, o qual possibilita a simulação de situações reais em um espaço discreto, cujo limite infinitesimal tende ao contínuo. Adendo a isto, subentende-se que para a obtenção de respostas mais acuradas, basta-se aumentar o número de elementos que discretizam o domínio original, o que não é uma verdade absoluta. (ALVES; 2007).

Tal fato pode ser percebido pela Figura 3, onde fica claro que os resultados apresentados pelas malhas designadas como “20x4” e “40x8”, sofreram apenas uma pequena variação a respeito do resultado final. Entretanto, o tempo e custo de processamento para ambas as malhas é bem diferente, sendo a malha “40x8” muito mais densa, tomando assim, um maior tempo para solucionar o problema, além de requisitar maior custo computacional. Este fenômeno é conhecido como “curva de convergência”.

Figura 3 – Análise de curva de convergência de malha.

Malha	Deslocamentos	δ_{\max} [mm]
5x1		5,16
10x2		7,57
20x4		8,64
40x8		8,54



Fonte: Adaptado de Filho (2016).

Para Alves (2000, p. 6), “[...] É próprio da mente humana querer subdividir os sistemas em seus componentes individuais, ou em seus elementos. [...] A partir do entendimento do comportamento de cada elemento, é possível entender o comportamento do conjunto”.

O elemento a ser utilizado para formação da malha (conjunto de elementos finitos que discretizam o objeto de estudo) são definidos por sua forma geométrica, pelas funções de interpolação e pelos tipos de problemas para os quais foram desenvolvidos. Cada tipo de elemento possui um determinado número de pontos nodais (nós), os quais agrupam os graus de liberdade do elemento. Estes elementos, possuem nomenclaturas próprias, podendo variar conforme o autor, sendo descrito por Alves (2000) como, “[...] elementos unidimensionais, elementos planos e, por fim,

os elementos tridimensionais”. Para o presente trabalho, adotou-se os elementos planos, também conhecido como elementos 2D.

2.3.1. Elementos Finitos do Tipo 2D

Elementos 2D, ou elemento planos, são utilizados quando 2 (duas) das 3 (três) dimensões de um corpo prevalecem em magnitude. Tal fenômeno se enquadra perfeitamente ao estudo de caso avaliado durante este trabalho, pois o chassi do semirreboque Carrega Tudo é composto por inúmeras chapas de aço ASTM A572, além de vigas em formatos “I” e “U”, ambas também constituídas em aço ASTM A572.

Assim, é possível perceber que os componentes presentes na estrutura do chassi do semirreboque Carrega Tudo, são todos elementos planos, em que suas dimensões de largura e comprimento são muito maiores do que suas as dimensões de espessura. Este fato torna imprescindível uma análise computacional por MEF sem que sejam utilizados elementos finitos do tipo 2D.

Para entender quando é possível utilizar elementos finitos 2D, é comumente utilizado o parâmetro de “índice de esbeltez”, o qual não será explanado durante este trabalho, visto que para esta situação, é perceptível que os componentes do chassi da carroceria Carrega Tudo são essencialmente planos.

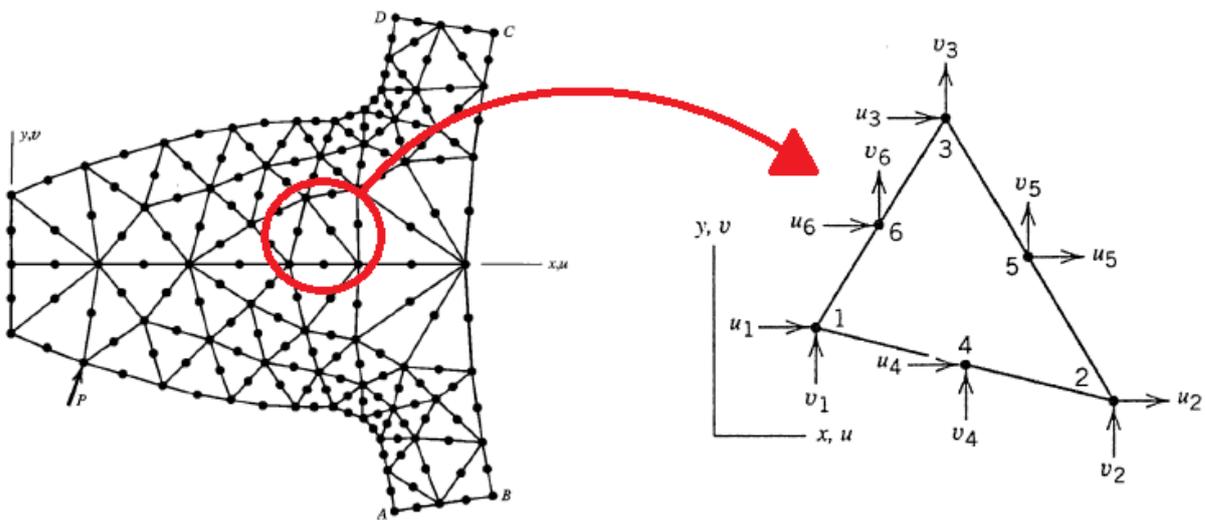
2.3.2. Elementos de 1ª e 2ª Ordem

Elementos finitos, independentemente de sua origem, sejam estes unidimensionais (1D), planos (2D) ou tridimensionais (3D), possuem uma equação que descreve seu formato, conhecida como, funções de forma. Estas funções variam conforme a ordem e o formato de cada elemento, podendo ser de primeira ou segunda ordem, bem como triangular ou quadrado – quando referentes a elementos planos.

Como este trabalho possui foco em um chassi de semirreboque Carrega Tudo constituído basicamente por elementos classificados como planos (em que duas de suas três dimensões se sobressaem em relação ao tamanho sobre uma terceira dimensão), serão apresentados apenas as equações acerca dos elementos planos.

A Figura 4, ilustra um corpo subdividido em elementos finitos triangulares 2D. Usualmente, são conhecidos como elementos do tipo T6, dado seu perfil triangular com 6 nós. Este elemento faz parte do grupo de elementos de segunda ordem, pois possui um nó intermediário entre os nós das extremidades. Com isso, sua função de interpolação é mais complexa, pois aumenta-se a quantidade de graus de liberdade. Em contrapartida, funções de segunda ordem possibilitam resultados mais assertivos, principalmente por serem capazes de descrever as variações de tensão ao longo da área do próprio elemento, o que não é possível em elemento com funções de primeira ordem.

Figura 4 – Corpo modelado por elementos finitos bidimensionais.



Fonte: Autor (2018).

Ainda em conformidade com a Figura 4, é possível descrever as variáveis “ u ” e “ v ”, presentes em cada um dos nós, como sendo:

$$u = \beta_1 + \beta_2x + \beta_3y + \beta_4x^2 + \beta_5xy + \beta_6y^2 \quad (5)$$

$$v = \beta_7 + \beta_8x + \beta_9y + \beta_{10}x^2 + \beta_{11}xy + \beta_{12}y^2 \quad (6)$$

Onde “ u ” e “ v ” são variáveis que descrevem o deslocamento do elemento T6. A partir destes deslocamentos, o programa CAE utiliza-os em forma de vetor para aplicá-los na Equação 7, também conhecida como equação de equilíbrio.

$$[K]\{d\} = \{f\} \quad (7)$$

Onde $[K]$, $\{d\}$ e $\{f\}$ são, respectivamente, matriz de rigidez global, vetor de graus de liberdade do problema e vetor das forças nodais equivalentes.

2.3.3. Análise Global-local

Ao tratar-se da matriz de rigidez global, ou até mesmo da matriz de flexibilidade global, deve-se entender ao que o termo global se refere. Sendo assim, classifica-se como modelo global o modelo completo a ser avaliado, neste caso, toda a estrutura do chassi do semirreboque Carrega Tudo.

Entretanto, também existe a análise local, visto que qualquer corpo presente no modelo global possui seus próprios eixos de referência. Isso permite ao analista verificar com maior precisão valores localmente dispostos, como por exemplo uma tensão muito concentrada em uma região específica da estrutura global. Análises deste tipo são conhecidas como Global-local.

Em alguns casos não existe distinção entre o modelo global e local, pois só existe um modelo detalhado, como é o caso deste trabalho. Em outros casos, o modelo global pode possuir uma formulação de elementos mais complexa que o modelo local, porém o nível de detalhamento geométrico sempre maior no modelo local.

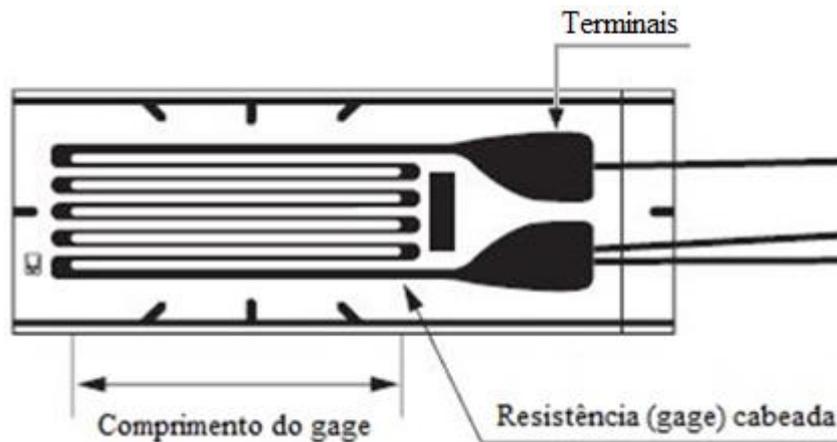
2.4. FUNDAMENTOS DE EXTENSÔMETRIA

O método experimental – realizado por meio de extensômetros – faz-se necessário neste trabalho, visto que sua aplicação torna o estudo suficientemente confiável a ponto de propor qualquer solução plausível à empresa denominada Desenvolvedora (do chassi em estudo), caso seja necessário.

Segundo o Grupo de Análise e Projeto Mecânico (GRANTE, 2004), “[...] O competitivo mercado atual exige que os projetos reduzam seus custos primando pela qualidade”. A afirmação incita diretamente aos custos relacionados ao sobredimensionamento de projetos. A extensometria, por sua vez, é uma das práticas de engenharia que possibilita o constante aprimoramento em projeto, já que a mesma aponta o real comportamento de um corpo em relação as suas tensões internas, estando este em condições de trabalho ou não.

Sendo assim, os extensômetros, internacionalmente nomeados de Strain Gages, são basicamente sensores transdutores extremamente sensíveis que possuem internamente uma resistência elétrica (gage) capaz de captar até as mínimas tensões (strain) internas impostas ao objeto instrumentado, daí seu nome: Strain Gage. A Figura 5 ilustra detalhadamente um extensômetro padrão (KYOWA®, 2017).

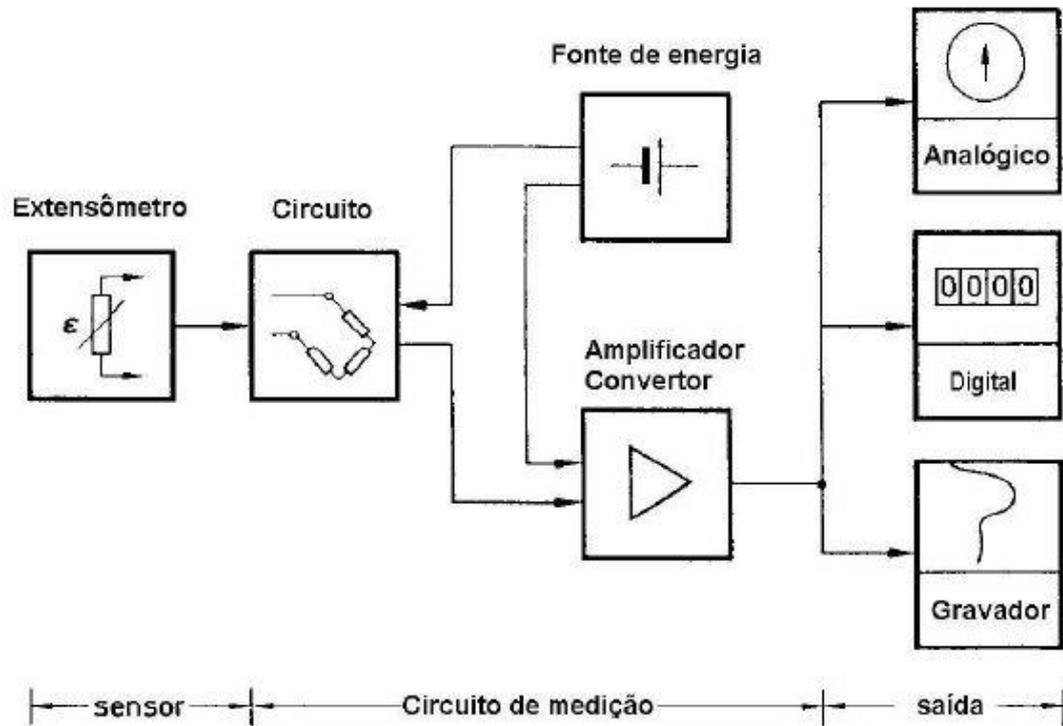
Figura 5 – Representação de um extensômetro linear padrão.



Fonte: Adaptado de KYOWA® (2017).

Mais especificamente, a análise experimental por extensômetros não é composta somente pelos extensômetros propriamente ditos. Esta análise, na verdade, demanda de um sistema com extensômetros, terminais, cabos manga, e pelo menos um aquisitor de dados e um computador. Neste sistema, quaisquer deformações sofridas pelo corpo, são captadas pelo extensômetro em unidade de voltagem, as quais são transferidas ao terminal por cabos específicos. Em seguida, estes terminais, ligados ao aquisitor de dados por cabos manga – robustos o suficiente para estarem expostos ao ambiente durante o período de experimentação –, repassam os valores. Com o aquisitor de dados devidamente calibrado, é possível converter os valores registrados em voltagem para tensões e deformações, respectivamente em unidades de Pa e mm. A Figura 6 representa esquematicamente o enlace entre cada um dos componentes que compõem o sistema de medição experimental. (VALIDO; SILVA, 1997; WEBER, 2008;).

Figura 6 - Diagrama do sistema de medição através de extensômetros.



Fonte: GRANTE (2004).

Entretanto, a fabricante de extensômetros, HBM®, esclarece que não existe um único extensômetro apto a cumprir todos os requisitos, independentemente de material, aplicação e condições ambientes. Por este motivo, existem extensômetros de vários formatos e tamanhos, além de outras particularidades, sendo uma das mais importantes, o fator de sensibilidade (K_G).

Segundo Minela (2017), “[...] O fator de sensibilidade (K_G) é resultante da razão entre a deformação (ϵ), equivalente a expressão $(\Delta L/L)$, e a variação na resistência das ligas metálicas $(\Delta R/R_0)$ ”. A fórmula final para o cálculo de K_G é apresentado na Equação 8.

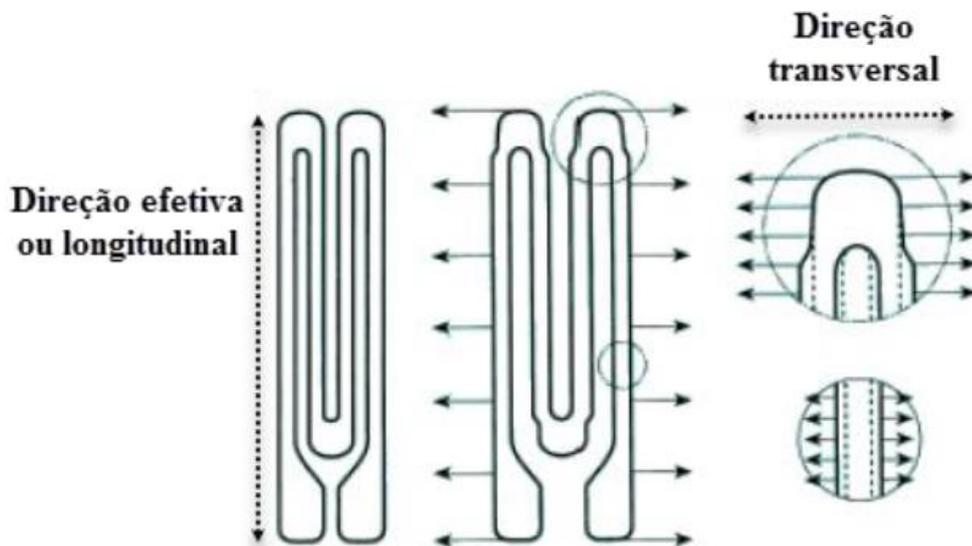
$$K_G = \frac{\frac{\Delta R}{R_0}}{\epsilon} \quad (8)$$

Além disso, o fator de sensibilidade é definido conforme o material em que o extensômetro é concebido e, geralmente, encontra-se entre os valores de 2 (dois) e 4 (quatro).

Dado a disponibilidade comercial durante o período de testes experimentais deste trabalho, utilizou-se extensômetros do tipo linear, fabricados pela empresa brasileira Excel® a base de poliamida, com K_G igual a 2,1.

Esta sensibilidade pode ser verificada tanto na direção longitudinal ou efetiva de medição, como na direção transversal do extensômetro (HOFFMANN, 1989). A Figura 7 ilustra quais as direções em que a sensibilidade é afetada em um extensômetro.

Figura 7 – Percepção de deformações em um extensômetro.



Fonte: MINELA (2017).

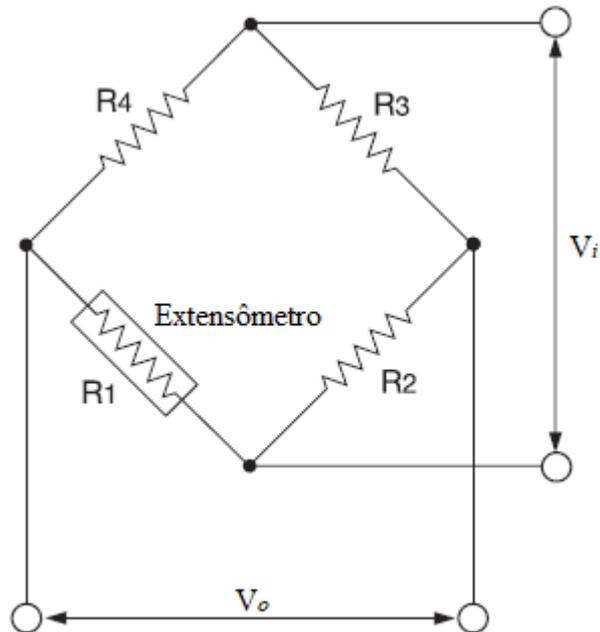
2.4.1. Funcionamento de um Extensômetro

O método fundamental de medição utilizado pelos extensômetros acerca da sua resistência elétrica e captação de deformações, é uma ponte de Wheatstone, a qual tem seu funcionamento descrito da seguinte maneira:

“A ponte de Wheatstone pode ser montada de diversas formas ($\frac{1}{4}$ de ponte, $\frac{1}{2}$ ponte, ponte completa e $\frac{1}{2}$ ponte diagonal) dependendo do número de extensômetro utilizados. O circuito é alimentado por uma corrente elétrica, através de uma fonte de energia. A variação da resistência elétrica do extensômetro, devido à deformação ocorrida na peça, provoca um desequilíbrio na ponte. Ocorre uma variação de tensão de saída da ponte, devido ao reequilíbrio da ponte, que passa por um amplificador de voltagem, e é lido em uma placa de aquisição de dados. As informações coletadas pela placa, normalmente são tensão elétrica, e possuem a unidade de mV. Esses dados podem ser processados e transformados em uma grandeza especificada pelo usuário, como micro deformação, tensão, ou força, dependendo do caso”. (GRANTE, 2004, p. 2).

A Figura 8 ilustra o circuito de uma ponte de Wheatstone.

Figura 8 – Fluxograma de aquisição



Fonte: Adaptado de KYOWA® (2017).

A medição com a utilização da ponte de Wheatstone é realizada de forma que cada resistor presente possui sua função no processo de medição. A resistência R_1 representa o extensômetro ativo, fixado sobre a estrutura a qual se deforma. Já a resistência R_2 é um extensômetro que tem como função compensar, ou seja, eliminar ou atenuar efeitos de origem térmica para que estas não influenciem nas medições de deformações mecânicas detectadas. Por fim, R_3 e R_4 são denominadas resistências elétricas puras. (VALIDO; SILVA, 1997).

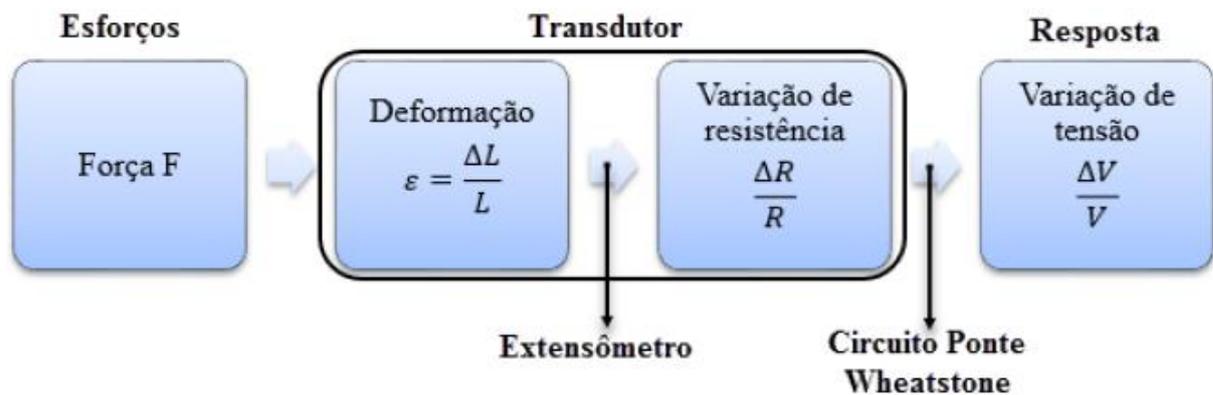
O princípio de trabalho do extensômetro está baseado na relação deformação/resistência do condutor elétrico. Todo condutor elétrico muda sua resistência elétrica quando submetidos a tensões mecânicas, sejam estas compressivas ou trativas. As causas das variações são devido à deformação do condutor, e pela variação na resistividade do material condutor, conseqüente de mudanças micro estruturais no condutor. Esta variação de resistividade é descrita pela Equação 9. (GRANTE, 2004).

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \varepsilon(1 + 2\nu) + \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (9)$$

Em que as variáveis R, ν e ρ , representam, respectivamente, resistência, coeficiente de Poisson, e resistividade.

Destarte, é possível compreender o correto funcionamento do método de instrumentação a ser utilizado neste trabalho. Contudo, apresenta-se a Figura 9, a fim de exemplificar ao leitor, como é o processo de aquisição de dados via extensometria.

Figura 9 – Fluxograma de aquisição de dados.



Fonte: MINELA (2017).

Os assuntos referentes a seleção e aplicação de extensômetros são abordados de maneira mais detalhada durante o capítulo “3. MATERIAIS E MÉTODOS”.

2.5. ACELERÔMETROS

A aceleração é uma grandeza física cinemática que aponta quão rapidamente a velocidade de um corpo varia ao longo do tempo. O acelerômetro é um sensor eletrônico que visa medir esta grandeza. (ROCHA, 2014).

Os acelerômetros comerciais são baseados na medição das componentes cartesianas do vetor de aceleração gravitacional, comumente encontrados no mercado como sensores de inclinação, tecnologia que permitiu a criação de sensores miniaturizados, que oferecem boa resposta à aceleração dinâmica resultante de movimento, baixa demanda de energia e baixa tensão de excitação. (SOBRINHO et al., 2016).

O princípio básico de funcionamento por trás deste acelerômetro é o sistema de massa e mola. As molas, enquanto dentro da sua região linear, são governadas

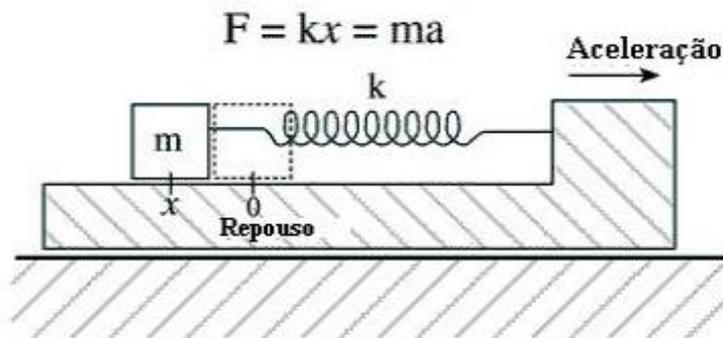
pela lei de Hooke, a qual explica que o deslocamento da mola é proporcional à força aplicada, conforme a Equação 10.

$$F = kx \quad (10)$$

Onde k é um constante inerente à mola.

A Figura 10 ilustra o funcionamento de um sistema massa-mola simples, que neste caso, é basicamente o mesmo princípio de funcionamento de um acelerômetro.

Figura 10 – Sistema massa-mola utilizado para se medir aceleração.



Fonte: BUDZINSKI (1999).

Outro princípio físico envolvido é a segunda lei de Newton, que relaciona força com massa e aceleração através da Equação 11.

$$F = ma \quad (11)$$

Igualando as Equações 12 e 13, obtém-se:

$$ma = kx \quad (12)$$

Pela Equação 12, portanto, é possível perceber que uma aceleração causa um deslocamento da massa, conforme demonstrado pela Equação 13.

$$x = \frac{(ma)}{k} \quad (13)$$

Alternativamente, se a massa sofre um deslocamento, significa que a massa está sob uma aceleração, e com isso, obtém-se a Equação 14.

$$a = \frac{(kx)}{m} \quad (14)$$

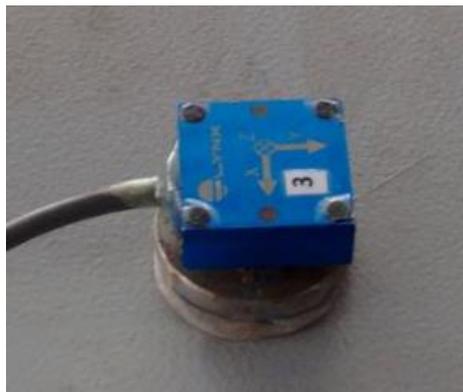
Desta maneira o problema de medir aceleração tornou-se um problema de medir o deslocamento de uma massa.

Estas deduções, entretanto, são referentes a um acelerômetro de eixo único. Contudo, o funcionamento de acelerômetros com mais eixos é essencialmente o mesmo, visto que é apenas necessário um sistema como este para cada eixo existente.

Para a verificação do comportamento dinâmico das unidades, utilizaram-se 8 (oito) acelerômetros do modelo ADXL343, fabricados pela empresa Analog Devices®, todos com faixa de operação entre -16 g e +16 g. Estes acelerômetros apresentam 3 (três) eixos de medição, neste trabalho denominados como X, Y e Z, a fim de facilitar a interpretação dos dados.

A Figura 11 ilustra um dos acelerômetros aplicados a estrutura em estudo neste trabalho, e representam os 7 (sete) demais acelerômetros aqui utilizados.

Figura 11 – Aplicação de um acelerômetro à estrutura semirreboque Carrega Tudo.



Fonte: Autor (2017).

O acelerômetro ADXL345 possibilita medir a aceleração dinâmica proveniente de movimentos ou choques, bem como acelerações estáticas, como por exemplo, a gravidade, que permite que o dispositivo seja usado como um sensor de inclinação.

Segundo a fabricante do dispositivo utilizado, a Analog Devices®, este sensor é composto por uma estrutura micro usinada de polissilício, construído em cima de uma base de silício. Também possui molas constituídas de polissilício, as quais suspendem a estrutura sobre a superfície da base e fornecem uma resistência contra forças de aceleração.

A deflexão da estrutura é medida a partir de capacitores diferenciais os quais estão presentes em placas fixas independentes e em placas fixas ligadas a massa em movimento, neste caso, a estrutura do chassi de semirreboque Carrega Tudo. A aceleração, por sua vez, desequilibra o capacitor diferencial, resultando em uma saída do sensor cuja amplitude é proporcional à aceleração. A modulação sensível à fase é usada para determinar a magnitude e a polaridade da aceleração. (ANALOG DEVICES®, 2009).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentadas as etapas referente ao processo de experimentação, bem como o desenvolvimento nas etapas de simulação computacional, ambos focados na carroceria semirreboque do tipo Carrega Tudo.

O objetivo deste trabalho é aprofundar-se acerca das práticas da engenharia de aplicação por meio de um estudo de caso envolvendo a validação de uma carroceria Carrega Tudo. Entre as práticas da engenharia de aplicação, estão presentes neste trabalho: aquisição de dados via extensômetros e acelerômetros, e simulações computacionais por MEF.

A Figura 12 apresenta o fluxograma de atividades desempenhadas pelo autor durante o desenvolvimento deste trabalho.

Figura 12 – Fluxograma de atividades desempenhadas.



Fonte: Autor (2018).

Além disso, pretende-se com este trabalho, apresentar um passo a passo referente a discretização do modelo computacional para o programa de simulação em CAE. O intuito é que as técnicas utilizadas durante as etapas de pré-processamento, processamento e pós-processamento numérico, possam ser futuramente utilizados

como referência no desenvolvimento dos demais produtos de implementos rodoviários. Tal aplicação se daria, especialmente, em chassis de reboques e semirreboques, visto que estes tendem a ser constituídos por corpos essencialmente planos, os quais são melhores discretizados por elementos finitos bidimensionais.

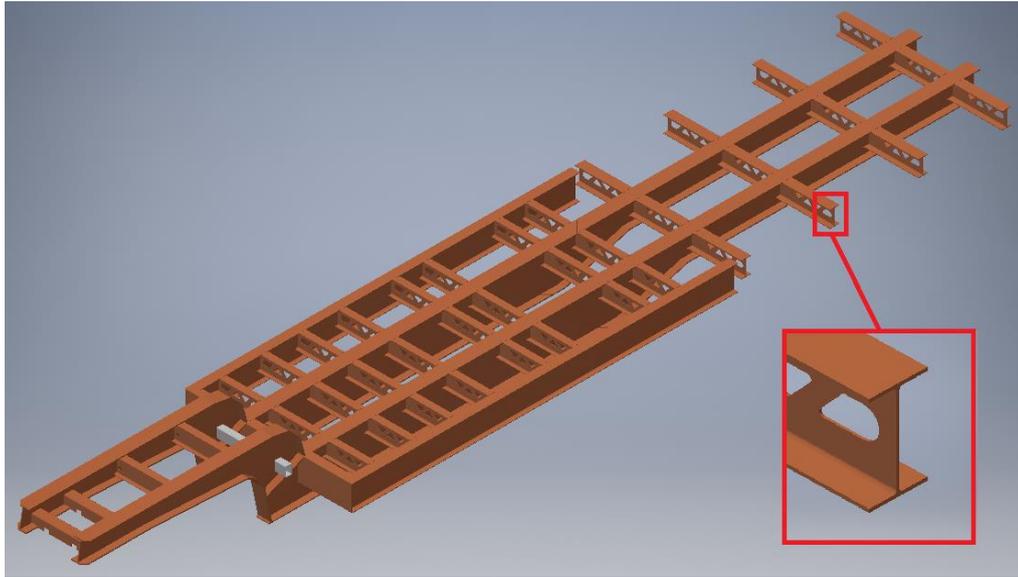
Para a o desenvolvimento desta avaliação, algumas premissas relevantes são apontadas a seguir:

- O modelo em CAD do semirreboque foi fornecido pela empresa denominada Desenvolvedora;
- A estrutura do semirreboque Carrega Tudo foi desenvolvida para transportar grandes transformadores por longas distâncias;
- O modelo da carroceria já estava definido e em fase de manufatura quando se iniciou este trabalho, o que impossibilitou quaisquer otimizações do modelo em CAD, dados os resultados por CAE;
- Fez-se necessário simplificações entorno do modelo CAD para o correto funcionamento do modelo numérico em CAE (tais simplificações são de inteira responsabilidade do autor deste trabalho);
- O critério de falha foi estabelecido pela empresa denominada Cliente, em que é considerado falha quando as tensões mecânicas internas da carroceria ultrapassarem 70% do valor de tensão de escoamento do material empregado (ASTM A572), neste caso, de 350 MPa;

Consideradas estas premissas, apresenta-se o modelo construtivo da estrutura.

Pela Figura 13, é possível identificar que o chassi do Carrega Tudo deste trabalho possui 4 longarinas, sendo estas, 2 (duas) designadas como “principais”, as quais estão localizadas ao longo da região central do chassi, e outras 2 (duas) designadas como “secundárias”, localizadas nas regiões mais externas do veículo semirreboque.

Figura 13 – Estrutura do Semirreboque Carrega Tudo em CAD.



Fonte: Autor (2018).

Já a Figura 14, ilustra o carregamento realizado com a própria subestação elétrica móvel durante os testes experimentais, ao qual o semirreboque Carrega Tudo fora desenvolvido para transportar.

Figura 14 – Semirreboque Carrega Tudo carregado com subestação elétrica móvel.



Fonte: Autor (2017).

Todos os testes experimentais foram realizados em área privada, mais especificamente, nas dependências da empresa denominada Cliente, a qual estava em processo de avaliação e compra do semirreboque presente neste trabalho.

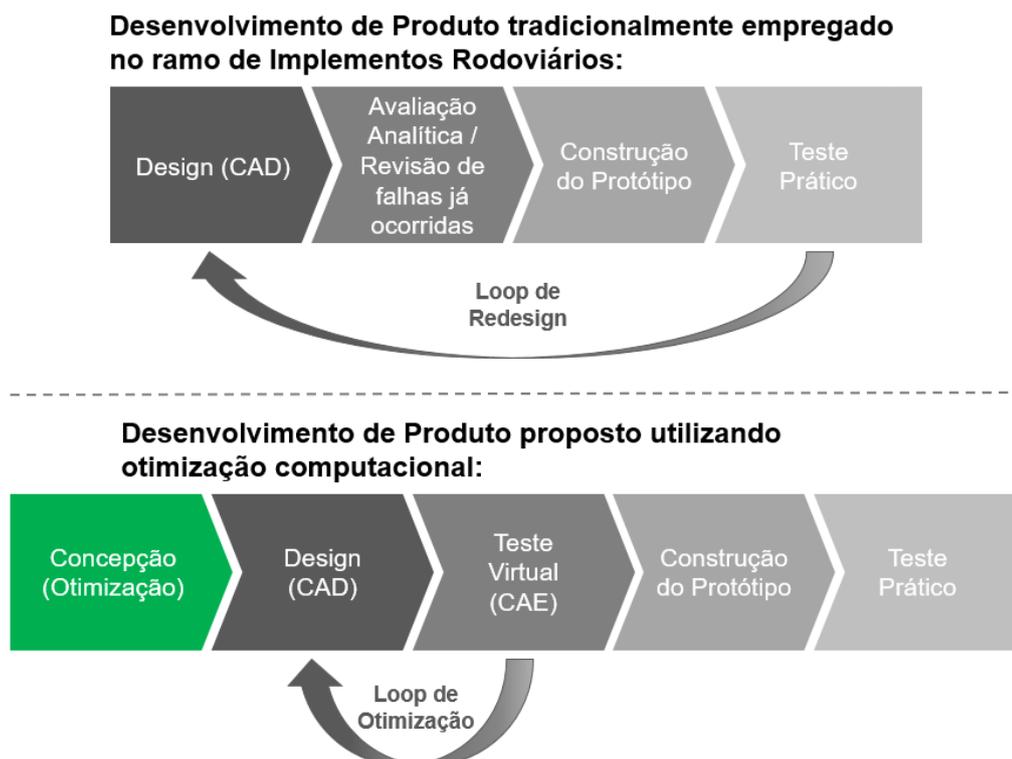
O teste contou com toda equipe técnica necessária, desde os engenheiros responsáveis pela validação dos testes, até uma equipe de segurança a postos para quaisquer inconvenientes que pudessem ocorrer.

3.1. SIMULAÇÃO NUMÉRICA POR MEF

O objetivo de utilizar-se o MEF como ferramenta deste trabalho, é seguir a tendência da indústria global, dado a possibilidade de diminuição do tempo de análise e custo, além do poder assertivo cada vez mais próximo da realidade.

A Figura 15 apresenta de maneira intuitiva, um comparativo entre a sequência de desenvolvimento de produto usualmente exercido pelas pequenas e médias fabricantes de implementos rodoviários, com o fluxo de desenvolvimento de produto quando empregado o processo de simulação computacional (uma das proposta deste trabalho) – descrito na Figura 15 como “Teste Virtual (CAE)”.

Figura 15 – Fluxo de trabalho adotado via otimização computacional.



Fonte: Adaptado de ALTAIR® (2018).

O *loop* de otimização presente de na Figura 15, quando comparado ao *loop* de *redesign*, é facilmente compreendido como um processo que além de agregar maior assertividade ao projeto como um todo, permite a empresa desenvolvedora reduzir seus custos com a diminuição da produção de protótipos, ponto este que também é apresentado por Peres (2006, p. 12), onde descreve que “[...] Com programas mais robustos as simulações tornaram-se mais realísticas eliminando alguns testes que antes só podiam ser realizados experimentalmente com protótipos”.

Peres (2006, p. 12) vai além, quando afirma que “[...] o sucesso desse segmento (automotivo) está diretamente ligado à capacidade de se introduzir novos produtos ao mercado mantendo parâmetros como qualidade e custos baixos”.

Portanto, optou-se por utilizar durante este trabalho, programas CAE alinhados com o mercado atual. Com isso, destacaram-se os programas desenvolvidos pela ALTAIR®, que assim como a maioria dos programas comerciais de ponta que adotam o MEF como método de solução, possui em sua interface opções que permitem ao projetista adequar sua análise conforme a idealização do projeto sem grandes dificuldades, dado a sua interface amigável, bem como por possuir uma vasta bibliografia disponível para os usuários.

Além disso, o principal fator de decisão para a escolha de utilizar-se os programas da ALTAIR®, é o fato de que a mesma empresa possui programas específicos para pré-processamento e pós-processamento, sendo estes, respectivamente, ALTAIR Hypermesh® e ALTAIR OptiStruct®, ambos com licenças disponibilizadas para os alunos de graduação da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Este fato torna-se um diferencial, pois excluem-se os problemas ligados a necessidade de se transferir arquivos de uma plataforma à outra.

3.1.1. Pré-processamento Numérico

Para análise do comportamento de uma estrutura qualquer, deve-se construir um modelo que seja o mais representativo possível. Simplificações são atribuídas à geometria de projeto, embora em métodos de aproximação, como o de elementos finitos, seja possível uma representação da geometria de forma quase exata, dependendo do nível de detalhamento do modelo numérico, mas em muitos casos esse detalhamento significa um custo computacional muito elevado. (PERES, 2006).

Para a parametrização inicial do modelo em CAE, utilizou-se o CAD disponibilizado pela empresa desenvolvedora do semirreboque Carrega Tudo. Dado o nível de detalhamento presente no CAD em questão, o qual pode ser visualizado pela Figura 16, iniciou-se processos de simplificação da geometria, de maneira a tornar possível o processamento da análise numérica em uma máquina convencional, bem como, para otimizar o tempo de processamento da simulação.

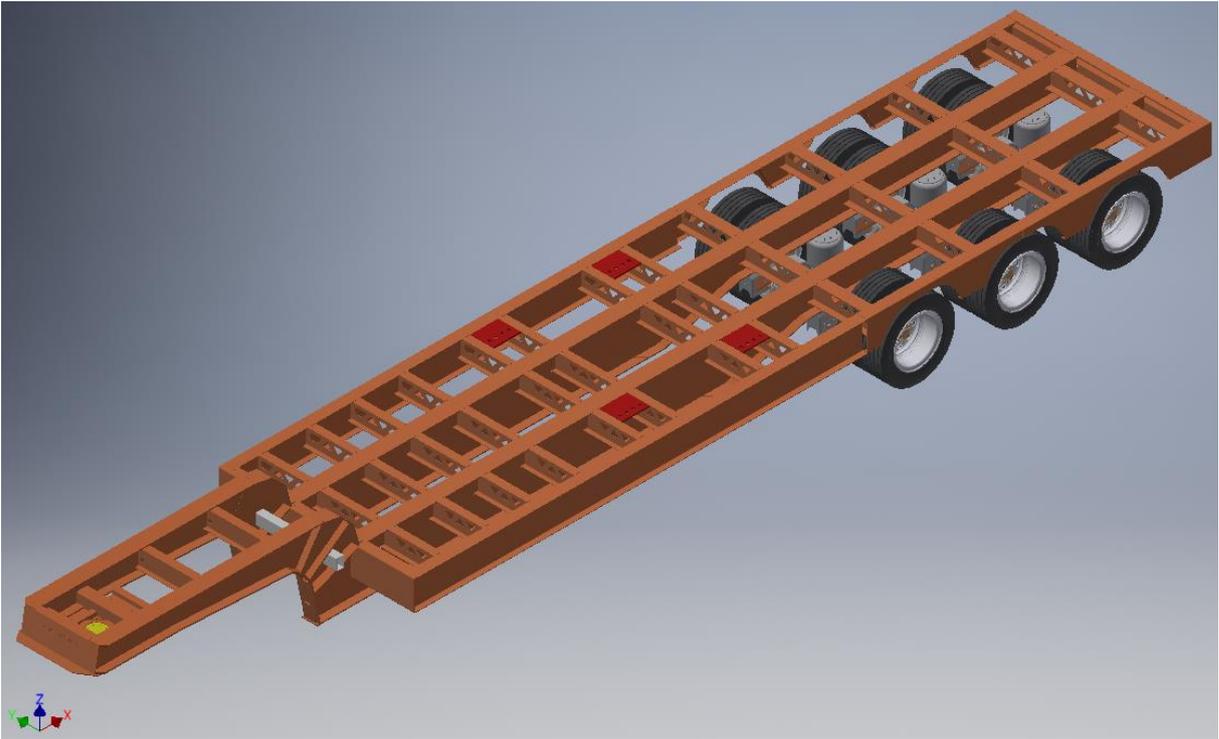
Figura 16 – CAD detalhado do semirreboque Carrega Tudo.



Fonte: Autor (2017).

Desta maneira, utilizando-se o programa CAD Autodesk Inventor® e o programa CAE Altair Hypermesh®, conseguiu-se simplificar a estrutura de maneira que se mantivessem todos os corpos essencialmente estruturais, bem como outros corpos igualmente importantes para a correta descrição da geometria. A Figura 17 representa a estrutura simplificada, utilizada durante as etapas de pré-processamento e processamento numérico em Altair OptiStruct®.

Figura 17 – Estrutura simplificada em CAD.



Fonte: Autor (2018).

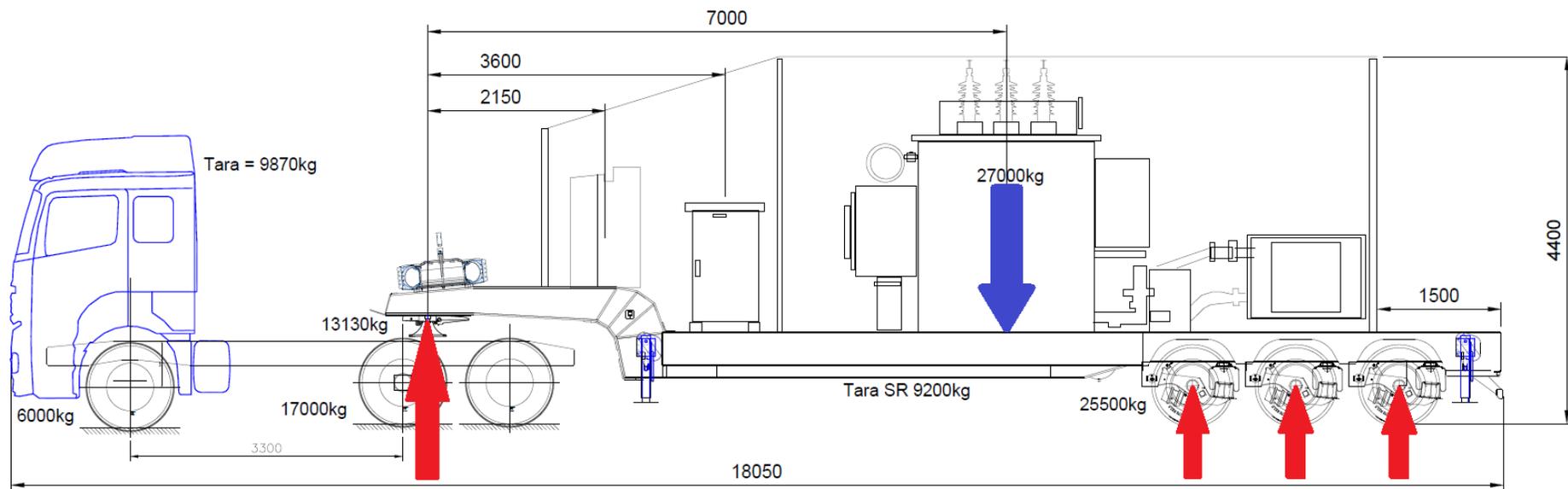
Ainda pela Figura 17, é possível perceber que se mantiveram alguns corpos que não necessitariam estar presentes durante o processo de simulação, sendo estes, principalmente, o conjunto de suspensão e os eixos traseiros, os quais podem ser discretizados por funções de engaste disponibilizadas pelo programa CAE Altair Hypermesh®.

Entretanto, optou-se por manter inicialmente todo este conjunto, a fim de entender quais seriam as exatas áreas de engaste, diminuindo-se as taxas de erro por discretização.

Porém, para repassar o correto entendimento de como ocorrem o carregamento e suas respectivas reações na estrutura em estudo, utiliza-se da Figura 18, em que com ela é possível entender onde encontram-se cada uma destas forças.

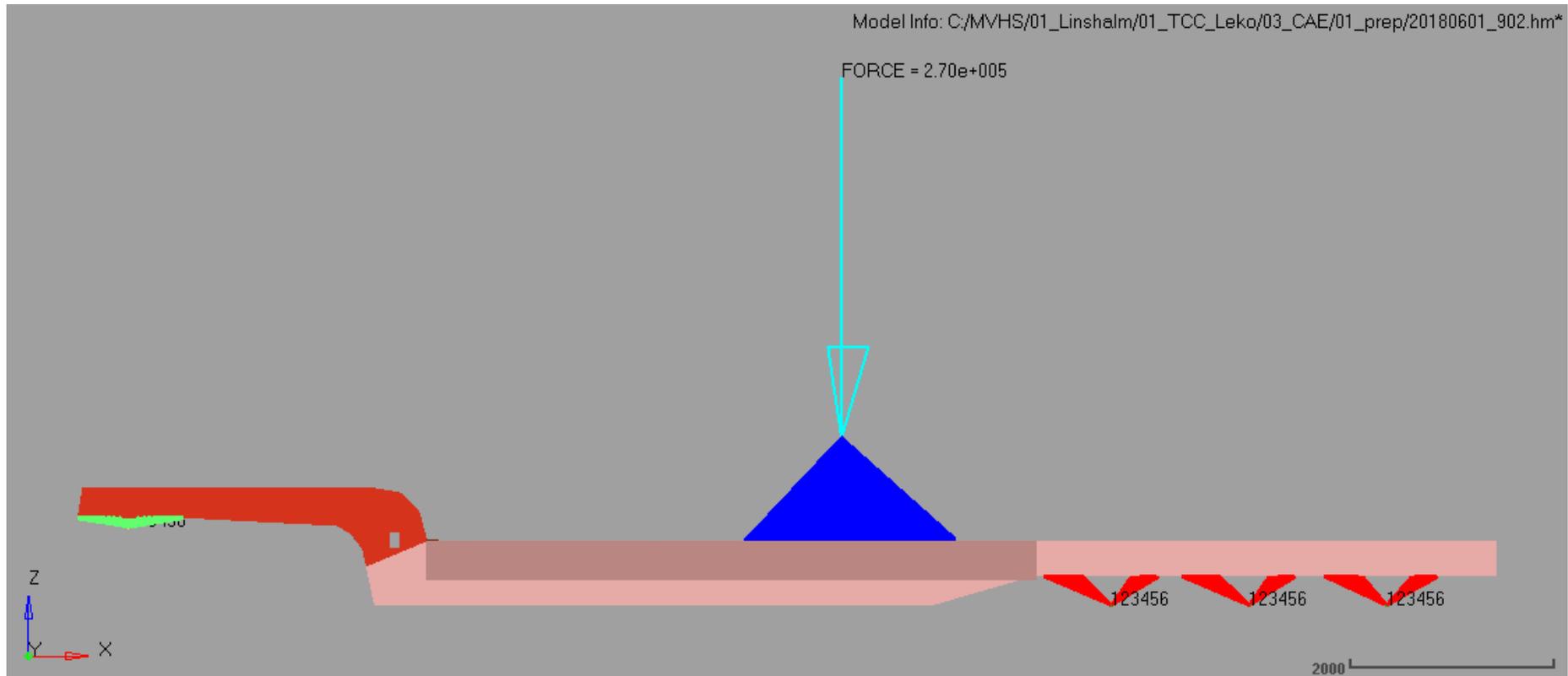
Com isso, é possível durante a etapa de pré-processamento, representar e, conseqüentemente, avaliar a situação da estrutura quando carregada e acoplada ao cavalo mecânico, a qual seria a situação mais crítica no que se refere ao ensaio de carregamento estático. Já a Figura 19, apresenta como foram aplicadas o carregamento e suas respectivas condições de contorno ao longo da estrutura global.

Figura 18 – Carregamento e reações normais acerca da estrutura.



Fonte: Autor (2018).

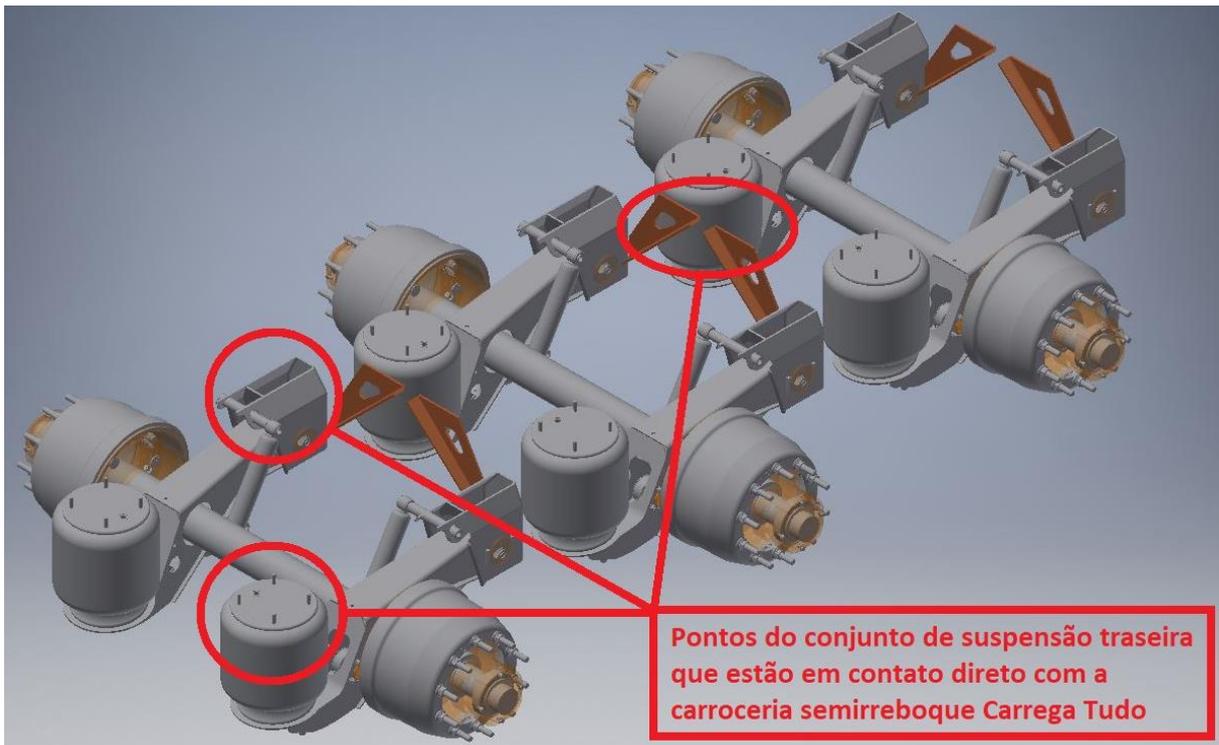
Figura 19 – Discretização do carregamento e das reações normais por MEF.



Fonte: Autor (2018).

Já com as Figura 20, Figura 21, Figura 22 e Figura 23, é possível entender de maneira ilustrativa os pontos de engaste presentes na parte traseira e dianteira do veículo semirreboque Carrega Tudo.

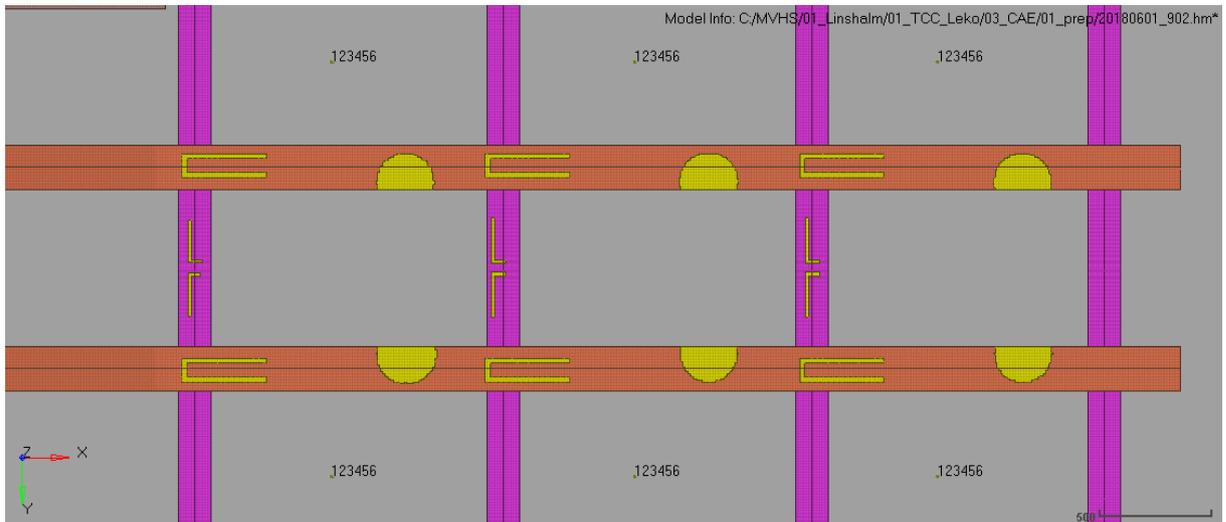
Figura 20 – Componentes do conjunto de suspensão traseira que possuem contato com a carroceria Carrega Tudo.



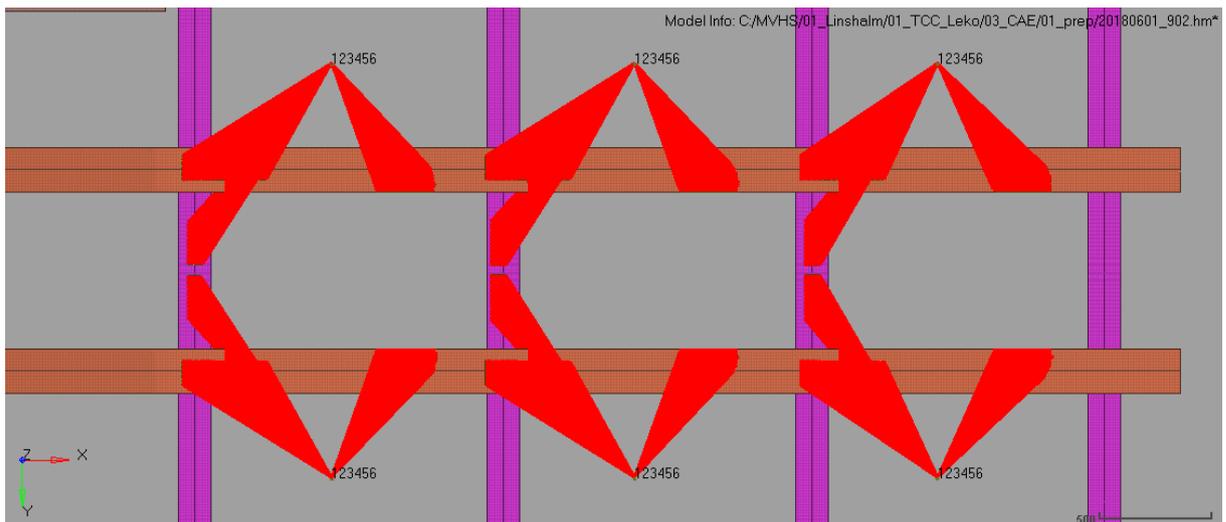
Fonte: Autor (2018).

A Figura 21 (a), ilustra a região de contato existente entre os componentes do conjunto de suspensão traseira e o chassi do semirreboque Carrega Tudo, neste caso, representado pelas regiões coloridas em amarelo. Pela mesma imagem, é possível perceber o devido cuidado adotado ao representar estas condições de contorno no modelo numérico da maneira mais próxima do real possível, visto seu impacto no resultado final. Já a Figura 21 (b), apresenta como ficaram os contatos rígidos entre conjunto de suspensão, chassi e roda.

Figura 21 – Discretização em Altair Hypermesh® das áreas de engaste na região traseira da carroceria Carrega Tudo.



(a)



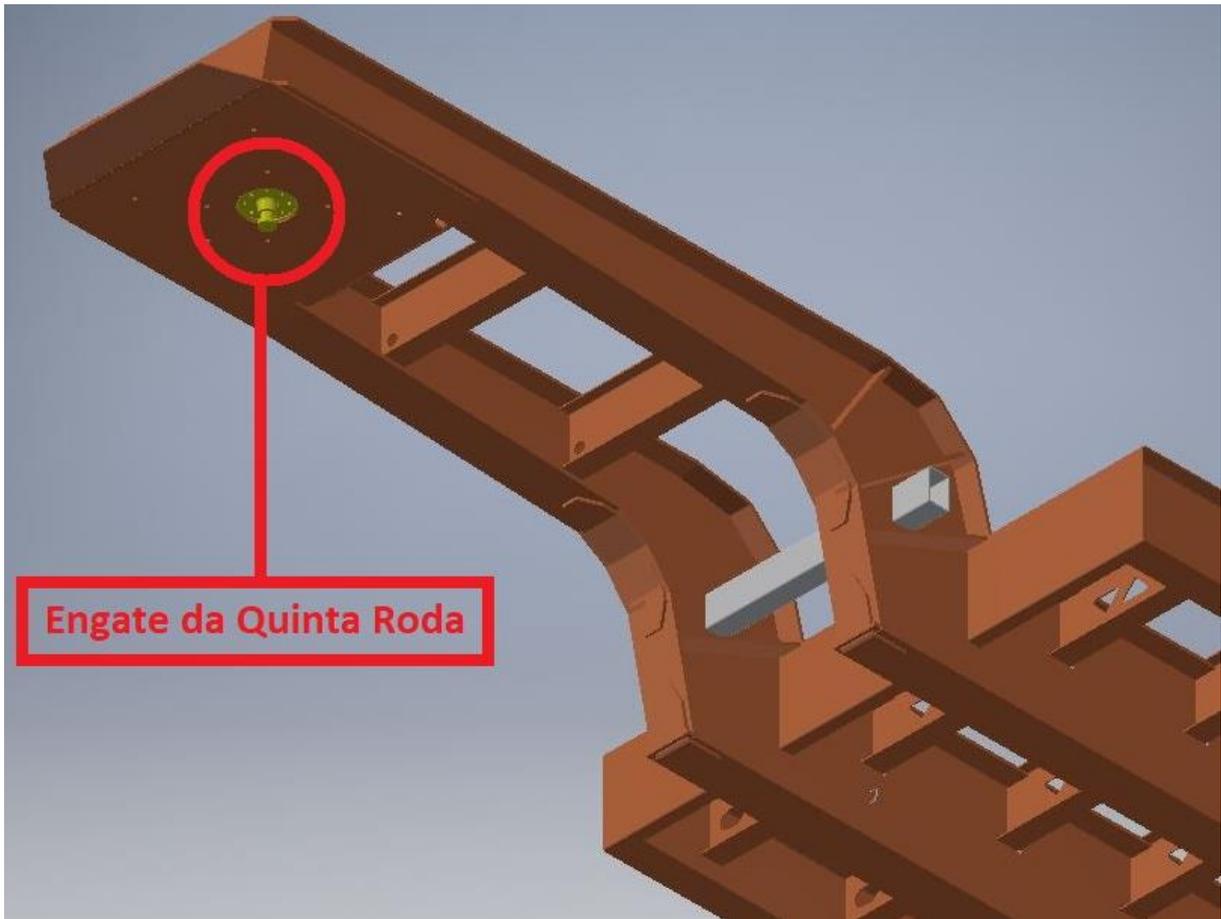
(b)

Fonte: Autor (2018).

A Figura 22, entretanto, apresenta a mesma condição de engaste, porém referente a região frontal do chassi do semirreboque Carrega Tudo. Nesta região, o contato é exercido pelo componente denominado “pino rei”, o qual é destacado na Figura 22 como “engaste da quinta roda”, onde quinta roda é o componente responsável pelo acoplamento do semirreboque ao cavalo mecânico.

Este pino rei, portanto, é quem transmite a força normal para o restante da região frontal do chassi.

Figura 22 – Região de engaste da parte dianteira da carroceria Carrega Tudo.



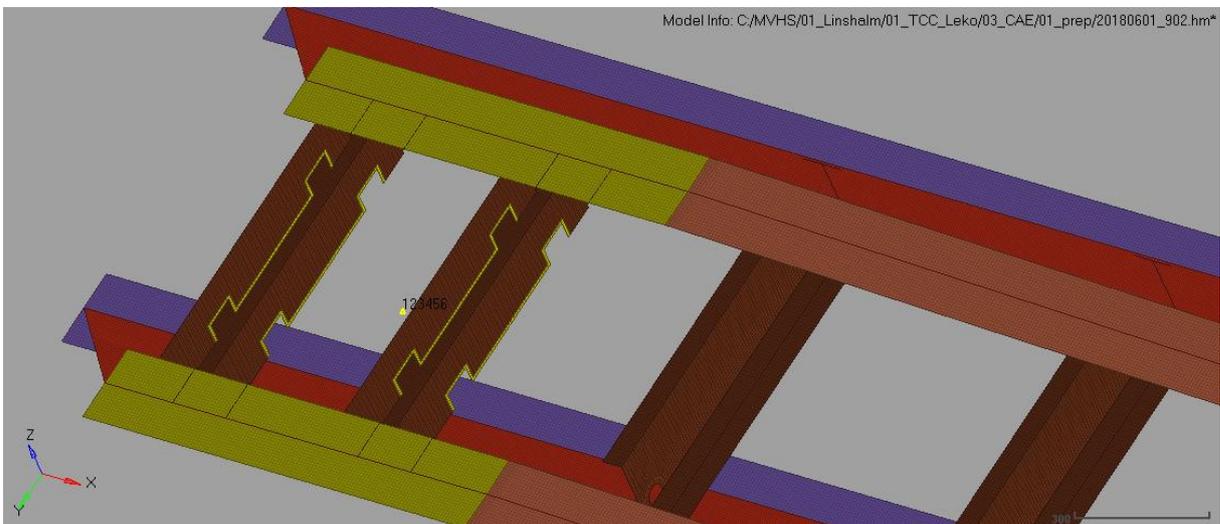
Fonte: Autor (2018).

A Figura 23 apresenta como fora discretizado o engaste da região frontal. As regiões em amarelo presentes na malha (Figura 23 (a)), indicam os elementos finitos que estão engastados.

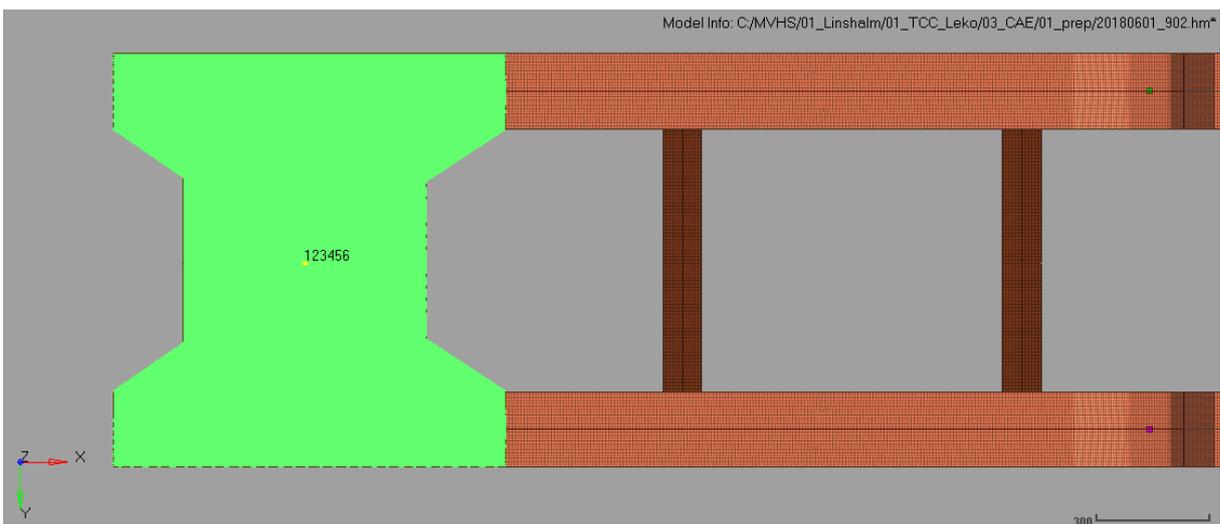
Neste local, optou-se por simplificar ao máximo a quantidade de elementos e detalhes, de maneira que se mantivessem apenas os elementos responsáveis por transferir a reação normal para o chassi propriamente dito.

A Figura 23 (b), ilustra o contato rígido existente entre do pino rei até as regiões de engaste no chassi (elementos amarelos da Figura 23 (a)).

Figura 23 – Discretização em Altair Hypermesh® da área de engaste na região dianteira da carroceria Carrega Tudo.



(a)

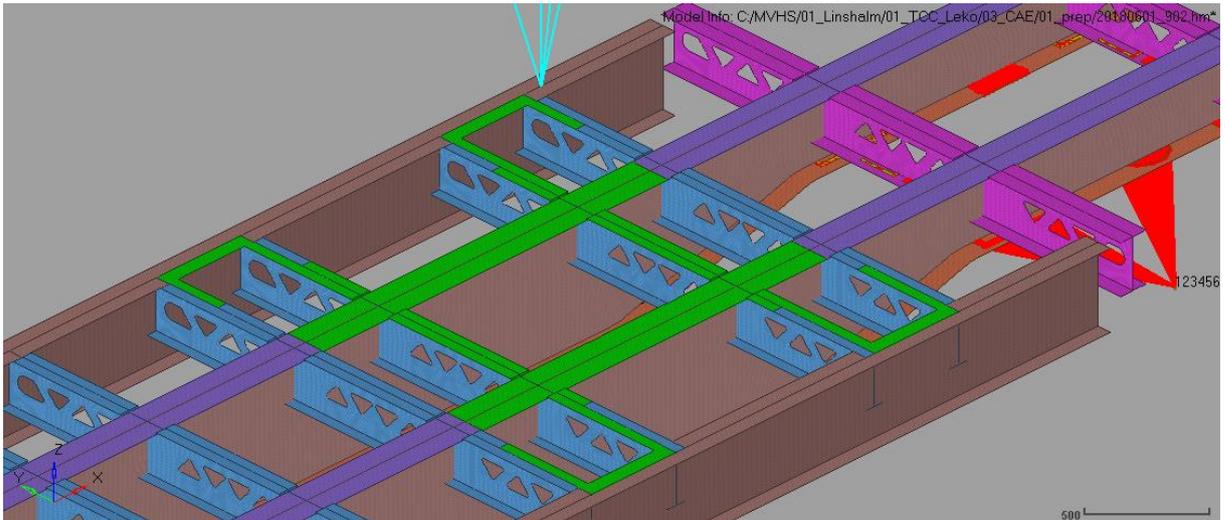


(b)

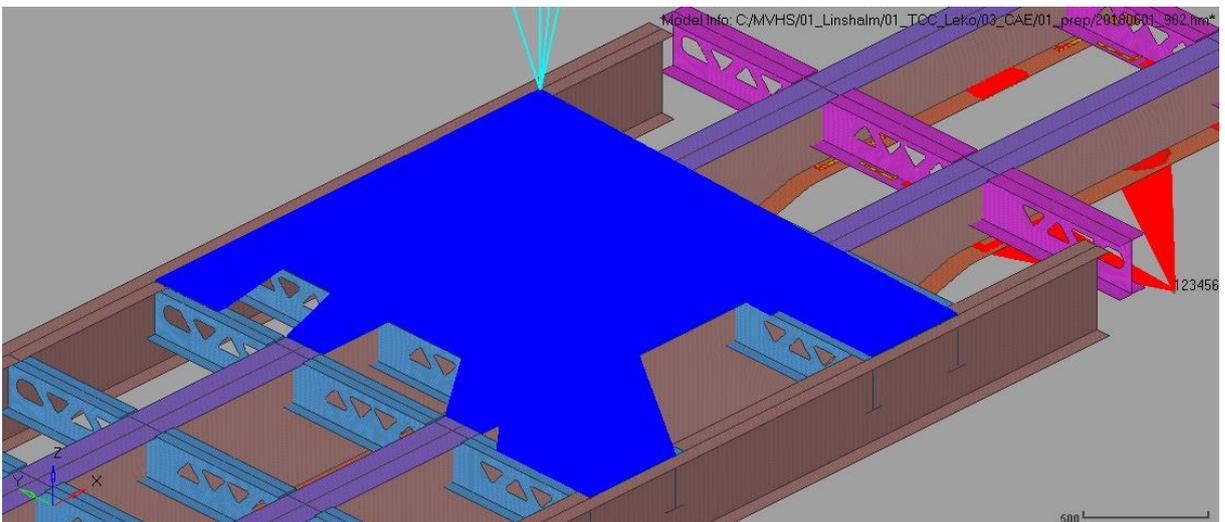
Fonte: Autor (2018).

Com relação à região de carregamento, analisou-se quais dos corpos do chassi da carroceria Carrega Tudo estariam em contato com o transformador da empresa Cliente, para que se distribuísse a força da maneira mais condizente possível com a realidade. A Figura 24 possibilita o entendimento de como fora distribuída as 27 toneladas de força imposta somente pelo peso do transformador.

Figura 24 – Distribuição da força imposta pelo transformador.



(a)



(b)

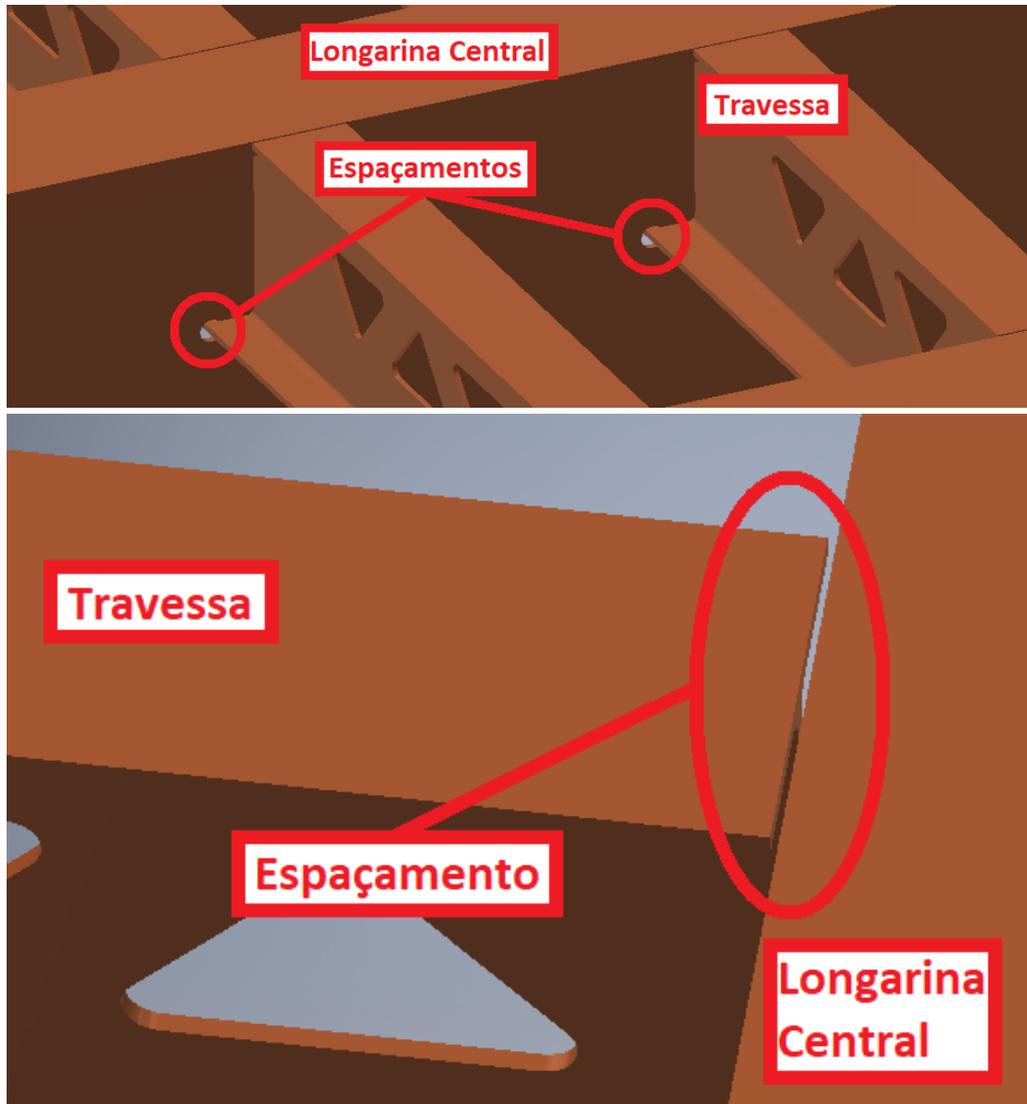
Fonte: Autor (2018).

Assim, pelas regiões esverdeadas presentes na Figura 24 (a), percebe-se que se considerou como região de distribuição de carga, apenas os locais do chassi que estavam de fato em contato com o transformador da empresa Cliente. Já a Figura 24 (b), ilustra o contato rígido criado entre o CG do transformador e o chassi do semirreboque Carrega Tudo.

Também, durante a etapa de pré-processamento, além de definir e discretizar as regiões de engaste e carregamento acerca da estrutura semirreboque Carrega Tudo, simplificou-se mais algumas regiões da estrutura, que apesar de serem detalhes quase imperceptíveis, permitem espaço para que surjam falhas durante o

processamento da simulação. A Figura 25 demonstra quais foram as simplificações adotadas além das apresentadas até o momento.

Figura 25 – Exclusão dos espaços entre as travessas e as longarinas.

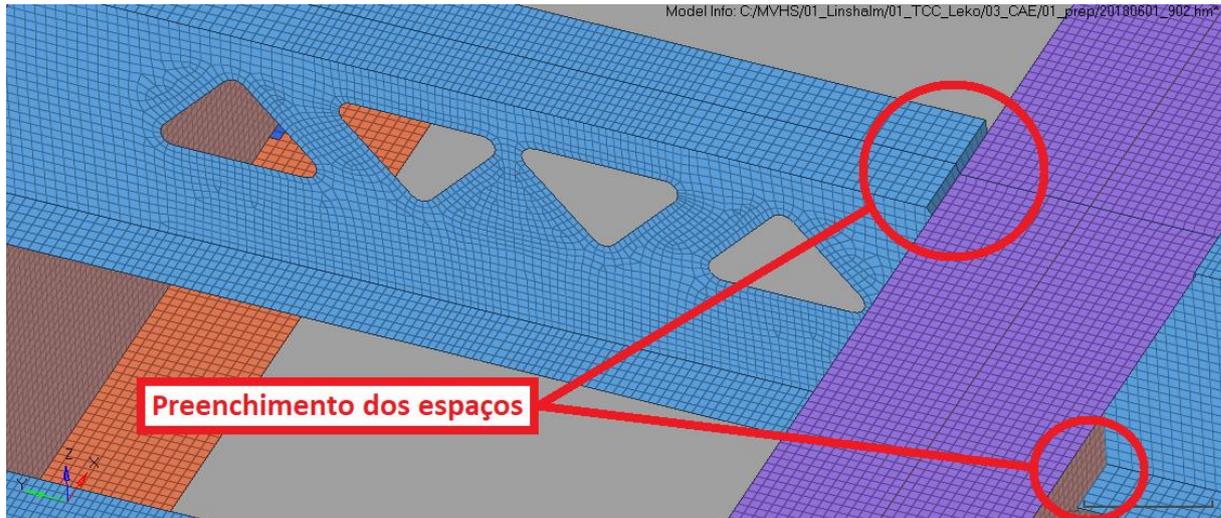


Fonte: Autor (2018).

Com isso, os espaçamentos apresentados na Figura 25, foram preenchidos como se não existissem. Na verdade, estes espaçamentos só existem no CAD, pois durante a manufatura da carroceria Carrega Tudo estas peças precisam ser encaixadas antes de passarem pelo processo de solda e, por isso, faz-se necessário estes espaçamentos na prática.

O resultado deste preenchimento está presente na Figura 26. Realizou-se tal modificação utilizando o próprio programa de pré-processamento, Altair Hypermesh®.

Figura 26 – Preenchimento dos espaços entre travessas e longarinas.



Fonte: Autor (2018).

Com a Figura 26, percebe-se que agora as longarinas e travessas se comportarão como um corpo rígido. Apesar do programa Altair Hypermesh® permitir replicar as regiões de solda a partir do comando “contato” – possibilitando, inclusive, introduzir as propriedades presentes na solda –, optou-se por apenas modificar a geometria e preenche-la manualmente, de maneira que não houvessem folgas. Esta estratégia deu-se por conta do comando “contato” adicionar inúmeras variáveis a mais no cálculo numérico, tornando o custo computacional inviável para este trabalho.

Ainda durante a etapa de pré-processamento, utilizou-se da ferramenta de conversão de corpos para superfícies, denominada no programa Altair Hypermesh®, como “*midsurface*”. A intenção de se transformar todos os corpos da estrutura em modelos de superfícies, é devido ao fato de que a simulação empregada neste estudo, fora calculada com elementos finitos do tipo 2D, ou seja, elementos planos.

Como já comentado durante este trabalho, elementos 2D são utilizados em estruturas compostas por corpos planos, o que neste caso se traduz no fato de que as dimensões relativas à largura e comprimento são muito maiores do que a dimensão relativa a espessura.

Após a transformação dos corpos para superfície, é possível adotar uma espessura para cada uma destas superfícies. Apesar do programa não adicionar visualmente esta espessura, o mesmo leva esta informação em consideração durante o cálculo de processamento numérico. Além disso, os raios de adoçamentos

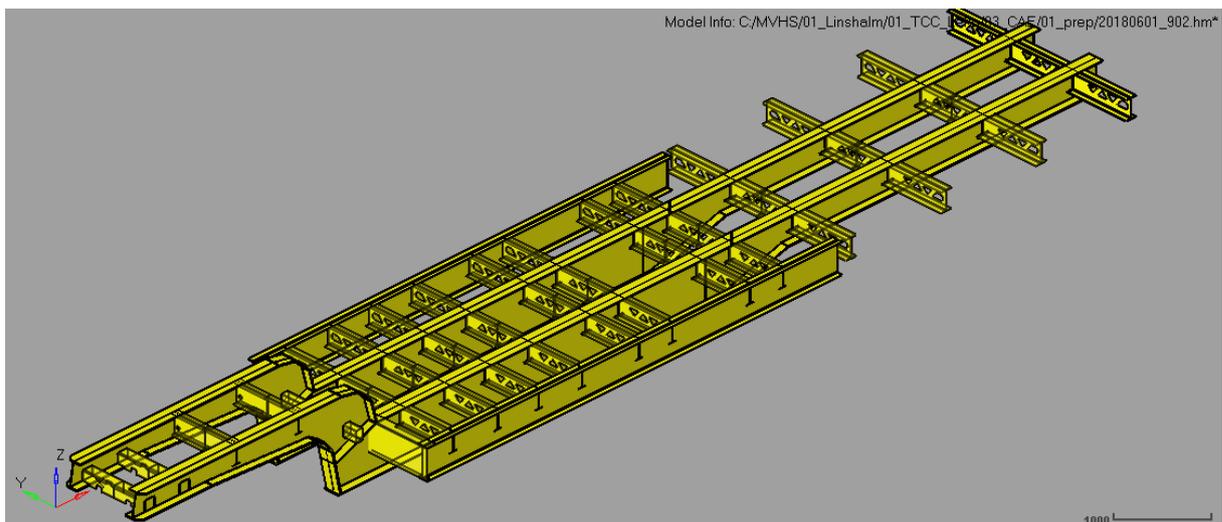
presentes nas vigas de seção “I” também são levados em conta pelo programa, não criando fatores de concentrações inexistentes na prática.

Adendo à ferramenta de “*midsurface*”, utilizaram-se outros comandos do programa Altair Hypermesh®, sendo suas utilizações igualmente indispensáveis para a discretização do modelo numérico aqui em estudo. Entre as principais ferramentas estão:

- *Toggle edge*: ferramenta responsável por transformar linhas sólidas em linhas de construção (também conhecidas como linhas pontilhadas), o que permite ao operador eliminar furos sem que seja necessário deletar-se um esboço;
- *Trim*: ferramenta responsável pela função de “aparar”.
- *Delete entity*: função utilizada para excluir superfícies desnecessárias, ou até mesmo superfícies que estavam ocupando um mesmo espaço físico.

As funções supracitadas foram utilizadas somente durante o período de adequação do modelo CAD para modelo CAE, a fim de evitar-se incongruências durante a etapa de processamento. A Figura 27 ilustra a geometria utilizada durante as etapas de criação de malha e processamento.

Figura 27 – Geometria simplificada final.



Fonte: Autor (2018).

Discretizado o modelo em CAE, iniciou-se as etapas de criação de malha. Para isso, em regiões com maior nível de detalhamento, tais como alívios de peso ou demais concentradores de tensão, utilizou-se da ferramenta denominada “*washer*”, a

qual permite ao usuário criar uma espécie de fronteira, em que nela existam apenas elementos finitos geometricamente bem definidos e de acordo com o tamanho de estipulado desejado.

A Figura 28 ilustra uma região em que foi utilizado a ferramenta “*washer*”, visto que por ser um local com presença de alívios de peso, também é uma região concentradora de tensão e, portanto, é necessário o correto entendimento das tensões presentes nesta região.

Figura 28 – Aplicação de “*washer*” no contorno de um concentrador de tensão.



Fonte: Autor (2018).

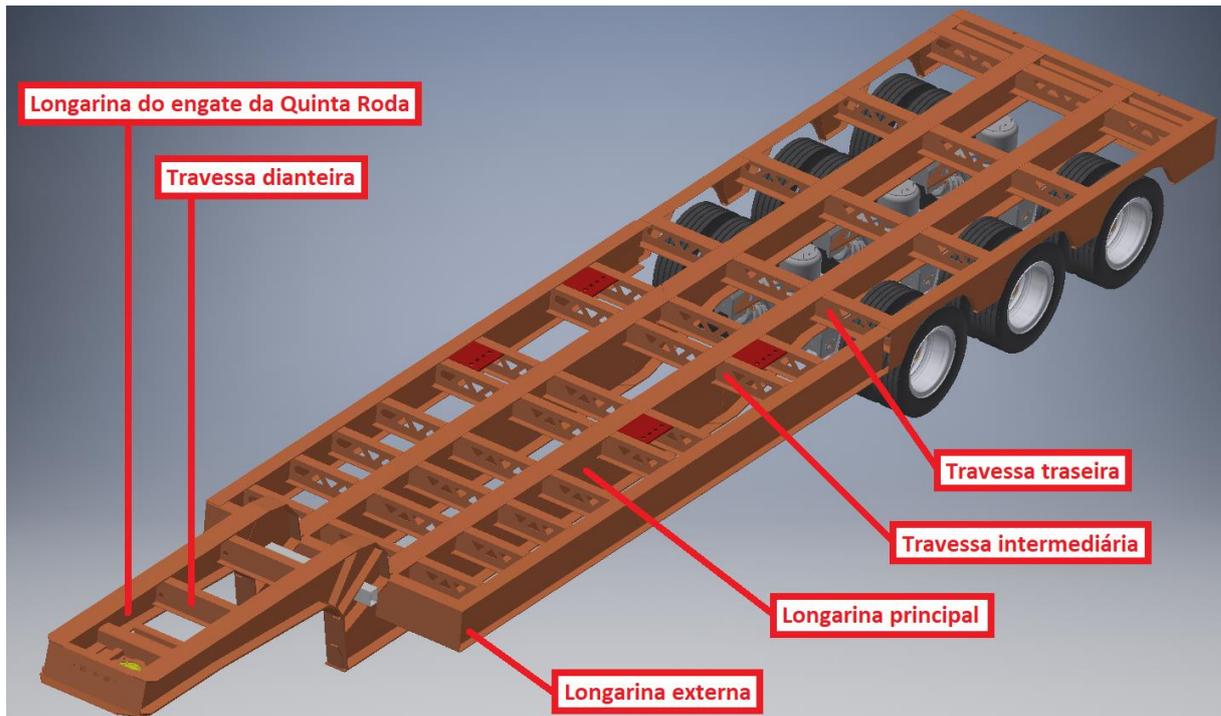
Com isso, é possível perceber como a ferramenta “*washer*” trabalha. Neste caso, utilizou-se desta ferramenta para melhorar, principalmente, o fluxo de elementos finitos presentes entre um e outro alívio de peso, aumentando, a qualidade da malha e, conseqüentemente, a assertividade da simulação computacional.

Pelo fato da estrutura do chassi de semirreboque Carrega Tudo possuir inúmeros corpos idênticos, foi possível modelar a malha em alguns corpos e, posteriormente, replicar as malhas para os demais corpos iguais, poupando-se tempo

e garantindo-se maior assertividade na simulação. Para a realização desta replicação, bastou-se apenas utilizar-se da ferramenta “*reflect*”.

A Figura 29 apresenta quais os corpos que se repetem (de maneira idêntica) durante a estrutura.

Figura 29 – Corpos idênticos na estrutura.



Fonte: Autor (2018).

Com as malhas devidamente replicadas aos corpos repetidos, apenas finalizou-se o modelamento da mesma nos corpos restantes. Para isso, utilizou-se das mesmas técnicas de modelagem utilizadas anteriormente.

Finalizada a malha em questão, avaliou-se sua qualidade a partir de alguns parâmetros indicados pelo próprio programa Altair Hypermesh®. Evidentemente que existem alguns parâmetros mais relevantes do que outros e, para este caso, os parâmetros referentes à “*aspect ratio*”, “*warpage*”, “*skew*” e “*jacobian*”, foram os utilizados. Abaixo, encontram-se descritas as suas respectivas definições, como sendo:

- *Aspect ratio*: avalia o formato dos elementos utilizados na malha, verificando se os elementos triangulares e quadrados estão muito

deformados ou não, visto que isto implica diretamente na qualidade da resposta final da simulação.

- *Warpage*: verifica se existem elementos que não estão no plano correto, ou seja, se existem elementos desconectados com demais elementos finitos que o cercam. Basta um único elemento contendo esta falha para fazer com que a simulação não venha a convergir.
- *Skew*: Avalia a qualidade do elemento com base nos valores de ângulos interno.
- *Jacobian*: Avalia a qualidade do elemento com base em um círculo interno ao elemento, o qual é tido como bom, quando o círculo é capaz de tangenciar todos os vértices do elemento.

Com as definições dos parâmetros de qualidade de malha supracitados, apresenta-se pela Figura 30, a quantidade de elementos que não se enquadraram nos valores estipulados para cada um dos parâmetros de qualidade.

Figura 30 – Parâmetros de qualidade da malha.

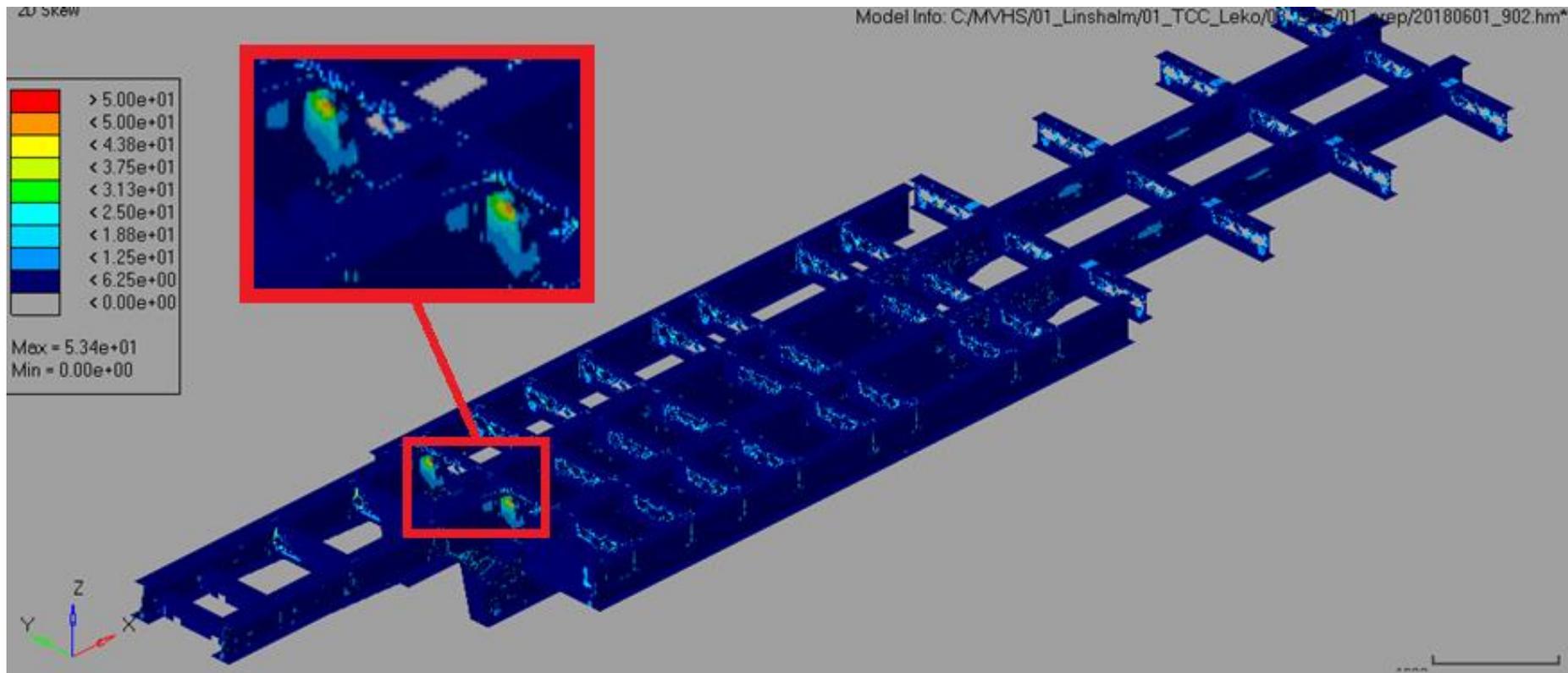
	# fail	% fail	worst	fail value	threshold
<input type="checkbox"/> min size	██████	██████	██████	██████	
<input type="checkbox"/> max size	██████	██████	██████	██████	
<input checked="" type="checkbox"/> aspect ratio	0	0.00	4.2	5.0	4 . 4 0 0
<input checked="" type="checkbox"/> warpage	0	0.00	11.6	15.0	1 3 . 0 0 0
<input checked="" type="checkbox"/> skew	124	0.02	53.4	40.0	3 4 . 0 0 0
<input checked="" type="checkbox"/> jacobian	0	0.00	0.61	0.60	0 . 7 0 0

	# fail	% fail	worst	fail value	threshold
<input type="checkbox"/> min size	██████	██████	██████	██████	
<input type="checkbox"/> max size	██████	██████	██████	██████	
<input checked="" type="checkbox"/> aspect ratio	0	0.00	4.2	5.0	6 . 6 6 7
<input checked="" type="checkbox"/> warpage	0	0.00	11.6	15.0	2 0 . 0 0 0
<input checked="" type="checkbox"/> skew	124	0.02	53.4	40.0	5 0 . 0 0 0
<input checked="" type="checkbox"/> jacobian	0	0.00	0.61	0.60	5 e - 0 1

Fonte: Autor (2018).

Assim, pela Figura 30, é possível perceber que para a condição de “warm” (condição equivalente a “regular”), apenas 0,02 % dos elementos finitos presentes na estrutura demonstraram um índice de qualidade insatisfatória, sendo que todos estes não se adequaram apenas ao parâmetro de “skew”. A Figura 31 ilustra a localização dos elementos com base no parâmetro de “skew”. Neste caso, apenas os elementos em vermelho são considerados insatisfatórios.

Figura 31 – Avaliação dos elementos finitos a partir do parâmetro de “skew”.



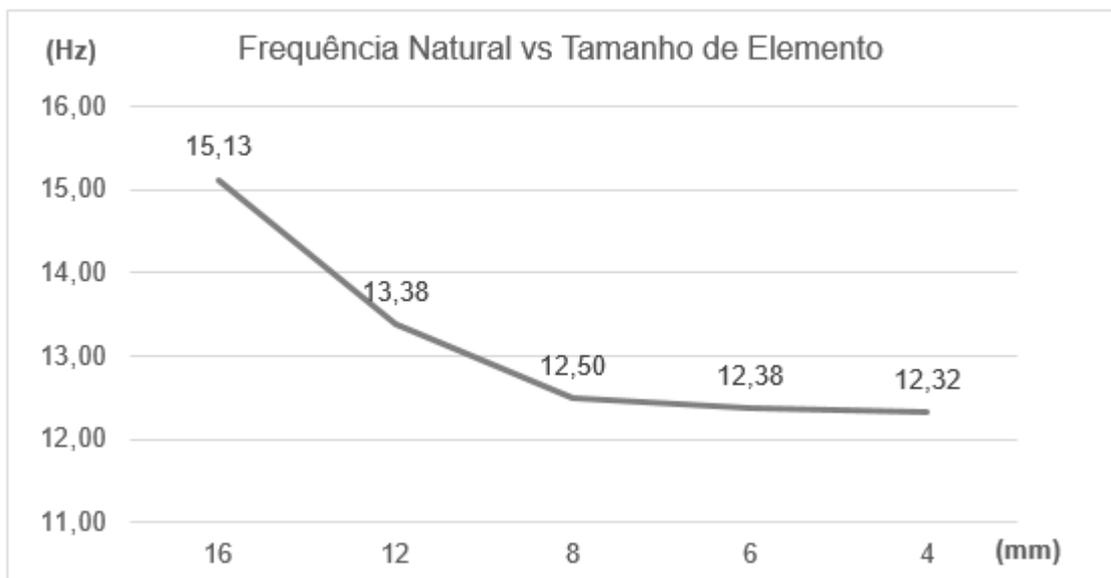
Fonte: Autor (2018).

Portanto, estes resultados garantem à malha um ótimo padrão de qualidade, já que 99,98 % dos elementos estão de acordo com os parâmetros sugeridos pelo próprio programa Altair Hypermesh®.

Com a malha modelada e posteriormente validada, optou-se por iniciar uma análise modal livre de carregamento, a qual consiste em estudar as propriedades dinâmicas da estrutura sob excitação por vibração. O propósito é otimizar a quantidade de elementos finitos presentes na estrutura em questão.

Esta análise modal consiste basicamente em encontrar o valor da frequência natural da estrutura para cada tamanho de elemento, os quais são definidos pelo próprio usuário. Neste caso, simulou-se a análise modal para as malhas compostas de elementos com 4, 6, 8, 12 e 16 mm. Os resultados estão presentes na Figura 32.

Figura 32 – Frequências naturais encontradas pela análise modal.



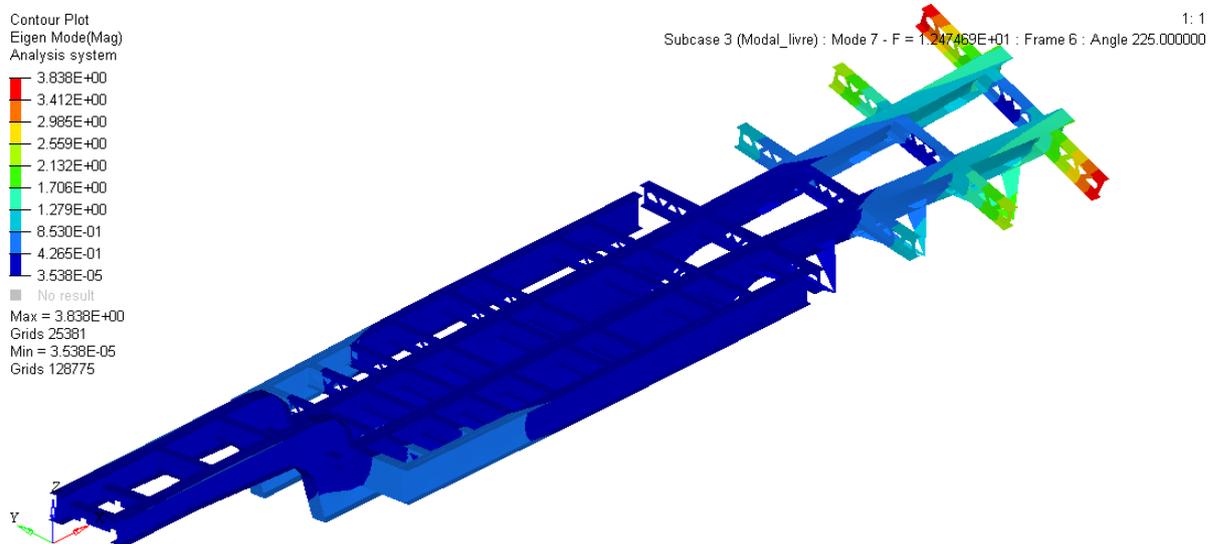
Fonte: Autor (2018).

De acordo com a Figura 32, compreende-se que a malha com tamanho equivalente a 8 mm seria a mais apropriada para a estrutura, visto que a frequência natural crítica ficou próximo a 12,50 Hz, pois é onde o valor de frequência natural começa a se estabilizar, independentemente do quão refinada seja a malha.

Isso indica que a malha de tamanho de 8 mm apresentará um resultado praticamente idêntico a malha de 4 mm, porém com um tempo de processamento 2 (duas) vezes mais rápido, além de exigir 50 % a menos de poder computacional.

A Figura 33, ilustra o resultado de frequência natural crítica encontrado a partir da malha com tamanho de elemento equivalente a 8 mm.

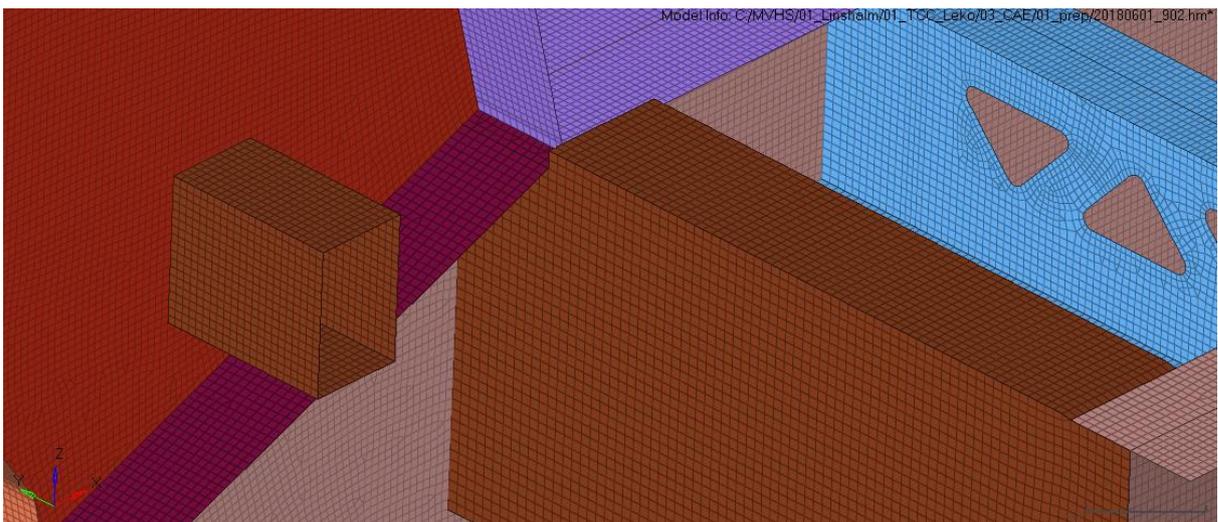
Figura 33 – Frequência natural encontrada para malha com 8 mm.



Fonte: Autor (2018).

A Figura 34 apresenta o refinamento proposto pela malha contendo tamanho de 8 mm, malha esta utilizada durante a etapa de processamento numérico.

Figura 34 – Malha refinada com elementos finitos de 8 mm.



Fonte: Autor (2018).

Por fim, apresentam-se algumas das características referente à malha final, sendo estas:

- Elemento finito predominante: CQUAD4 (quadrado);
- Função de interpolação adotada: 1ª ordem;
- Quantidade total de elementos: 806.325;
- Quantidade de elementos triangulares (CTRIA3) total: 2.852;
- Porcentagem de elementos CTRIA3: 0,35%.

Pelas características supracitadas, destaca-se o fato de que a função de interpolação empregada foi a de primeira ordem, dado sua vantagem frente a velocidade de processamento, fato este devido a menor quantidade de nós em um mesmo elemento.

Já os elementos de segunda ordem oferecem como principal vantagem, expressar a variação de tensão interna ao nó, sendo mais acurada quando o resultado é avaliado localmente. Entretanto, como utilizou-se uma malha já muito refinada em um corpo de magnitude dimensional considerado grande, a vantagem dos elementos de segunda ordem, para este caso específico, não influenciam diretamente no resultado final. Visto isso, optou-se pelo ganho em tempo e custo computacional possibilitados pelos elementos de primeira ordem.

3.2. INSTRUMENTAÇÃO DO SEMIRREBOQUE

A precisão e eficácia nos resultados obtidos com a utilização de extensômetros possui forte dependência com o modo como é aplicado na peça ou corpo de prova. Para a instalação do extensômetro no local de medição é necessário primeiramente o tratamento da superfície a ser analisada, removendo tinturas, oxidação ou qualquer tipo de impureza que possa influenciar na aquisição de dados. (HOFFMANN, 1989).

3.2.1. Preparação das Regiões de Instrumentação

Os resultados a serem obtidos por meio da prática extensométrica, estão intimamente ligados a maneira com a qual é realizada a fixação dos extensômetros na peça ou corpo que se deseja instrumentar. Portanto, para se realizar a instalação

destes extensômetros ao corpo em questão, alguns processos de pré-fixação são de extrema importância, sendo estes:

1. Limpeza;
2. Lixamento;
3. Marcação das linhas de referência;
4. Limpeza pós marcação;
5. Colagem;
6. Verificação da resistência.

Já o processo de aplicação de acelerômetros se assemelha muito ao que fora utilizado durante a colagem dos extensômetros, portanto, entende-se que para introduzi-lo corretamente ao corpo, seguem-se praticamente os mesmos passos. Entretanto, por conta do seu modelo construtivo, os acelerômetros são mais robustos que os extensômetros e por conta disto, os cuidados quanto a aplicação deste sensor são menos impactantes no resultado final, o que traduz em uma maior confiabilidade de resultados, mesmo quando o instrumentador é mais inexperiente.

O objetivo com estes processos, é garantir a remoção de tinturas, oxidação ou qualquer outro tipo de impureza que possa influenciar na aquisição de dados. Destarte, sem estes processos, o experimento pode tornar-se inválido.

Os processos acima são devidamente explanados a seguir, de forma respectiva, a fim de detalhar ao leitor sobre como aplicar os métodos apresentados.

Em referência ao item 1, a superfície deve ser limpa com a aplicação de álcool isopropílico¹, freon TF², ou ainda acetona, solvente ou tolueno, desde que estes não reajam com o material a ser analisado. (BARRETO JUNIOR, 2017).

Já em relação ao item 2, esta mesma superfície deverá ser lixada com lixa específica para metal, podendo ser de gramaturas 100, 220, 320 ou 400, de forma a obter ranhuras desordenadas, o que garante melhor aderência do extensômetro ao corpo. (BARRETO JUNIOR, 2017). Para o presente trabalho, utilizou-se a gramatura de 220.

Já com o item 3, garante-se que o extensômetro será colado na posição que se deseja medir as deformações, visto que o extensômetro utilizado neste trabalho, é do modelo uniaxial, ou seja, mede deformações em apenas uma direção. Portanto,

¹ Comumente utilizado em materiais que podem reagir com demais solventes.

² Solvente menos ativo.

caso a colagem seja realizada de maneira que o extensômetro fique torto, suas medições estarão entregando valores em discordância com a realidade da peça.

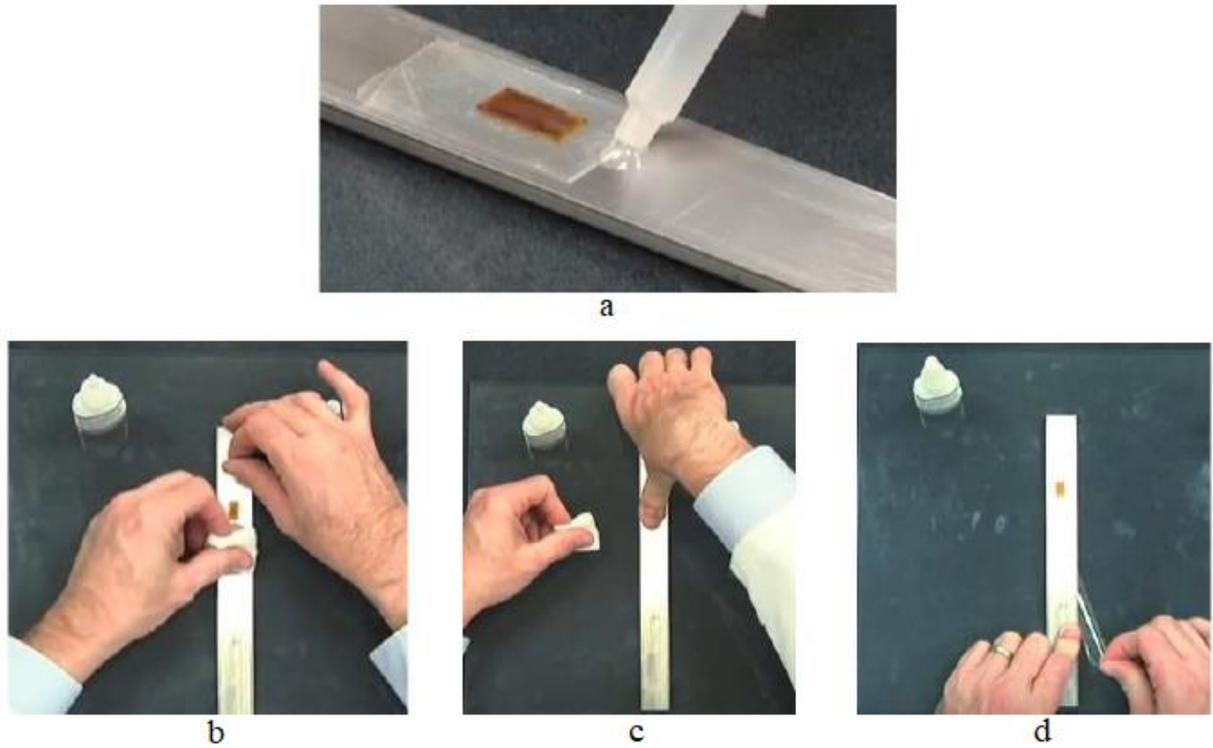
Ainda em referência ao item 3, segundo Minela (2017), “[...] O processo de marcação não deve ser realizado a partir de utensílios que possuam grafite, como o lápis por exemplo, em virtude de o grafite ter ação lubrificante”. Durante a instrumentação deste trabalho, as marcações foram realizadas com um riscador próprio para superfícies de aço.

Finalizado o processo de marcação, inicia-se o processo do item 4, limpeza pós marcação. Esta nova limpeza, é executada com gaze embebida em solvente, o que retira os resíduos provenientes dos processos de lixamento e marcação. Durante esta limpeza, praticam-se movimentos em uma única direção de forma a friccionar a peça.

Durante o processo do item 5, é necessário selecionar adequadamente o adesivo, o qual varia conforme o material da superfície em que será colado o extensômetro. A seleção errônea do tipo de adesivo comprometerá a aderência do extensômetro com a superfície do corpo e, conseqüentemente, acarretará em medições incorretas.

Com o extensômetro corretamente posicionado, a fita é levemente retirada até a posição para a aplicação do adesivo (Figura 35 (a)) e posteriormente a fita com o extensômetro são reposicionados (Figura 35 (b)), aplicando pressão contra a peça, para uma melhor fixação (Figura 35 (c)). Cada fabricante apresentará o valor de pressão que deverá ser imposto sobre o extensômetro para a colagem efetiva. Com o extensômetro colado, a fita é cuidadosamente removida (Figura 35 (d)). (HOFFMANN, 1989).

Figura 35 – Instrumentação de um extensômetro em uma chapa metálica.



Fonte: MINELA apud Vishay Precision Group (2017).

Já pela Figura 36, é possível visualizar como foram acoplados os extensômetros deste estudo de caso, durante os ensaios práticos.

Figura 36 – Instrumentação realizada para o ensaio experimental.



Fonte: Autor (2017).

Após a colagem e cura do adesivo do extensômetro na peça, é necessário realizar a verificação da resistência e seu isolamento. Mede-se o valor de resistência nominal dada pelo fabricante, verificando se o extensômetro está bem colado à superfície da peça, o que implica não apresentar variações fora da tolerância indicada pelo fabricante. (MINELA, 2017).

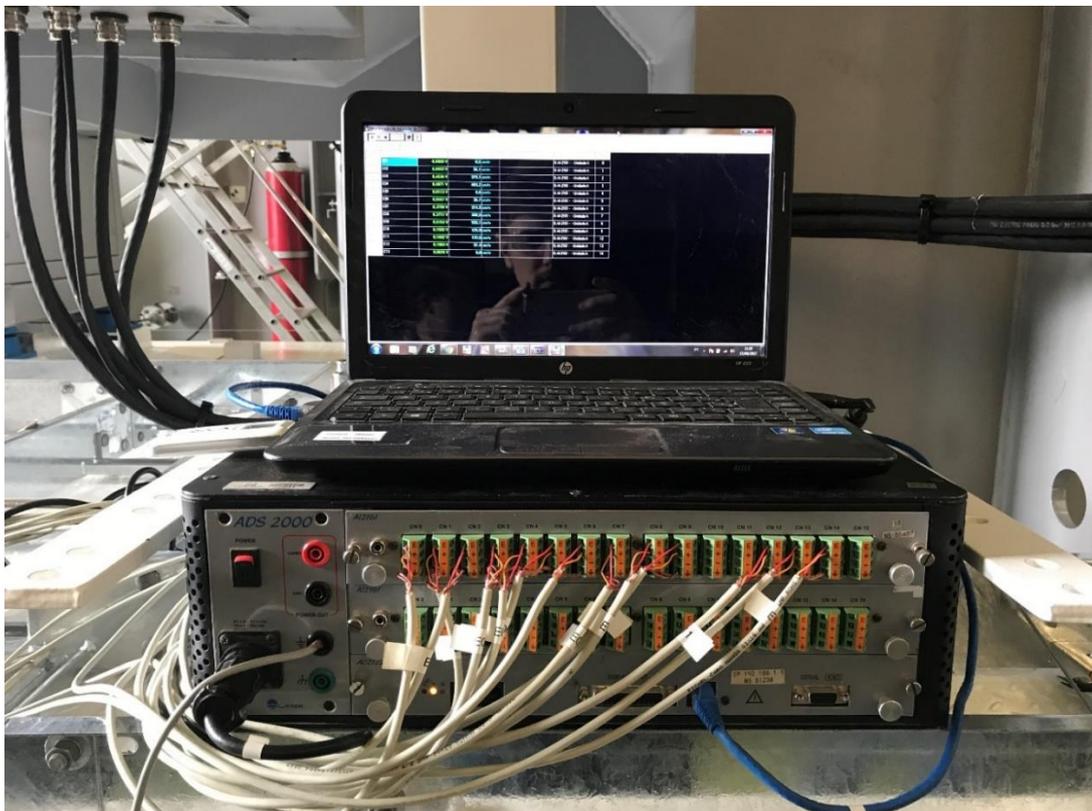
A última operação para efetuar a medição é a ligação dos circuitos ou fios, soldados nos terminais dos extensômetros e ao aparelho que efetuará a leitura dos valores fornecidos pelo extensômetro. (MINELA, 2017).

A ligação entre o extensômetro e a placa de aquisição de sinais é realizada a partir da conexão de fios entre os terminais do dispositivo de medição e os terminais da placa de aquisição. Para esta ligação é necessário que estes fios não estejam ligados de forma tensionada, para que não ocorra o rompimento dos mesmos durante o processo de medição. (MINELA, 2017).

3.3. AQUISIÇÃO DE DADOS

O sistema utilizado nas atividades de aquisição dos parâmetros de deformações é composto por uma unidade de aquisição de dados produzida pela LYNX®, modelo ADS-2000-IP. O equipamento é dotado de placas condicionadoras de sinais modelo AI2161-VB de 32 canais e programas especializados. A unidade instalada está ilustrada na Figura 37.

Figura 37 – Dispositivo aquisitor de dados.



Fonte: Autor (2017).

Já os programas utilizados para a aquisição dos sinais e para o tratamento dos dados foram o AqDados® (versão 7.2) e AqDAnalysis®, respectivamente. As telas de controle das placas de aquisição de dados utilizadas são mostradas na Figura 38.

Figura 38 – Programa de aquisição de dados.



Fonte: Autor (2017).

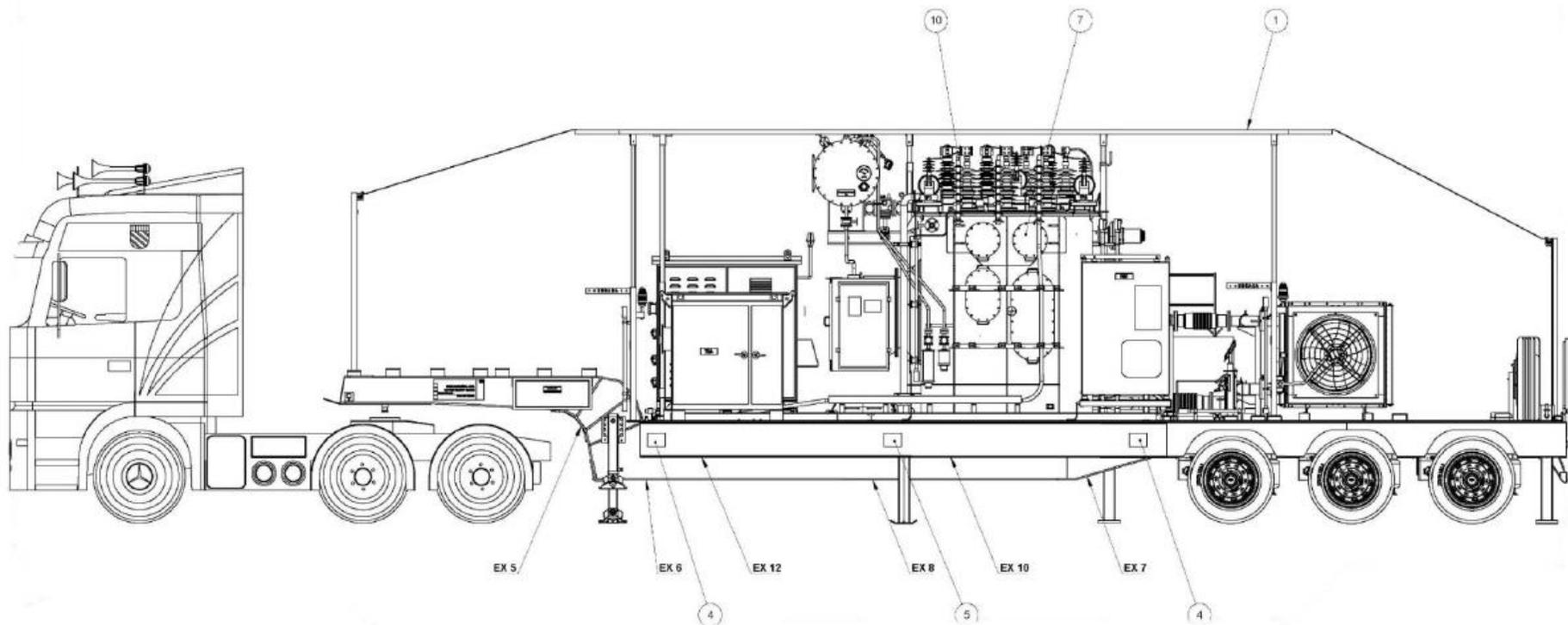
Com o objetivo de determinar as deformações superficiais, foram adotados extensômetros elétricos fabricados pela Excel Sensores®, modelo PA-06-250BA-120L. Tais sensores apresentam as seguintes características técnicas:

- Filme metálico de Constantan sobre base de poliamida;
- Auto compensação para temperatura;
- Resistência nominal: 120 Ω ;
- Fator de Sensibilidade (gage factor): 2.1;
- Dimensões da grelha (fole): (6,5 x 3,05) mm.

3.3.1. Ensaio de Carregamento Estático

O ensaio de carregamento tem como objetivo averiguar tensões atuantes na estrutura durante a fixação do transformador. Para isso, são utilizados extensômetros em pontos definidos pela empresa Cliente, conforme apresentado nas Figura 39 e Figura 40, sendo estas referentes as vistas laterais esquerda e direita, respectivamente.

Figura 39 – Posicionamento dos extensômetros – vista lateral esquerda.



Fonte: Autor (2017).

O ensaio consiste em medir os esforços da estrutura durante as 3 (três) etapas do carregamento:

- Etapa 1 - Estrutura em repouso;
- Etapa 2 - Acoplamento da carreta ao semirreboque;
- Etapa 3 - Estabilização da estrutura carregada no semirreboque.

A instalação dos sensores de deformação fora realizada antes da montagem da estrutura, permitindo a verificação dos esforços produzidos por seu peso próprio. Este procedimento possibilitou avaliar os esforços reais atuantes no chassi.

Após a leitura das tensões na estrutura em repouso, o transformador é locado e fixado ao semirreboque e, por fim, inicia-se a aquisição de dados que persiste por mais 30 (trinta) minutos. A aquisição dos dados permanece ininterrupta durante todo o processo.

3.3.2. Ensaio de Trafegabilidade

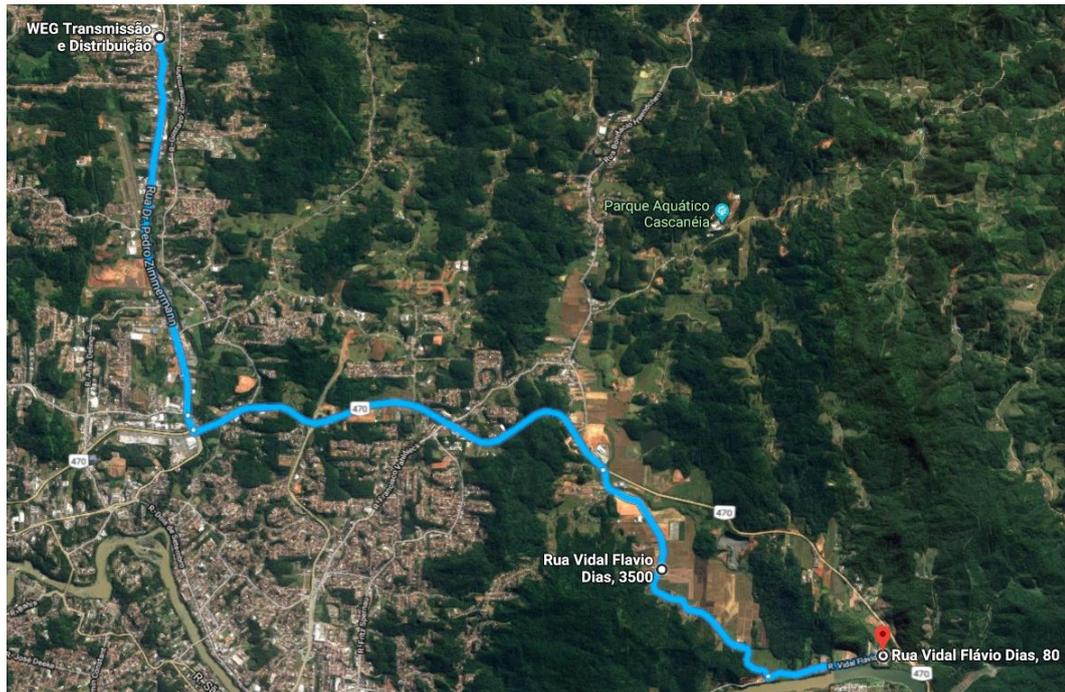
O ensaio de trafegabilidade tem como objetivo avaliar a magnitude das acelerações relativas aos pontos específicos dos equipamentos montados sobre o semirreboque Carrega Tudo, verificando a conformidade dos valores de aceleração durante os ensaios com os padrões aceitáveis e seguros especificados pela empresa Cliente, a qual aponta como valor máximo de segurança, 5 g de aceleração.

O ensaio fora realizado em vias que simulam as condições dinâmicas reais do transporte ao qual o equipamento transitará. Os ensaios, portanto, foram realizados em vias pavimentadas com asfalto, e em vias não pavimentadas, neste caso, em estrada de terra.

Durante as vias pavimentadas, transitou-se em velocidades de 40 km/h, 50 km/h e 60 km/h. Já nas vias não pavimentadas, transitou-se em velocidades de 20 km/h, 30 km/h e 40 km/h. Em ambas as etapas foram realizados 3 (três) ensaios para cada uma das velocidades supracitadas. Com isso, o percurso total contabilizou aproximadamente 32 km.

A Figura 41 apresenta o circuito total percorrido pela estrutura instrumentada.

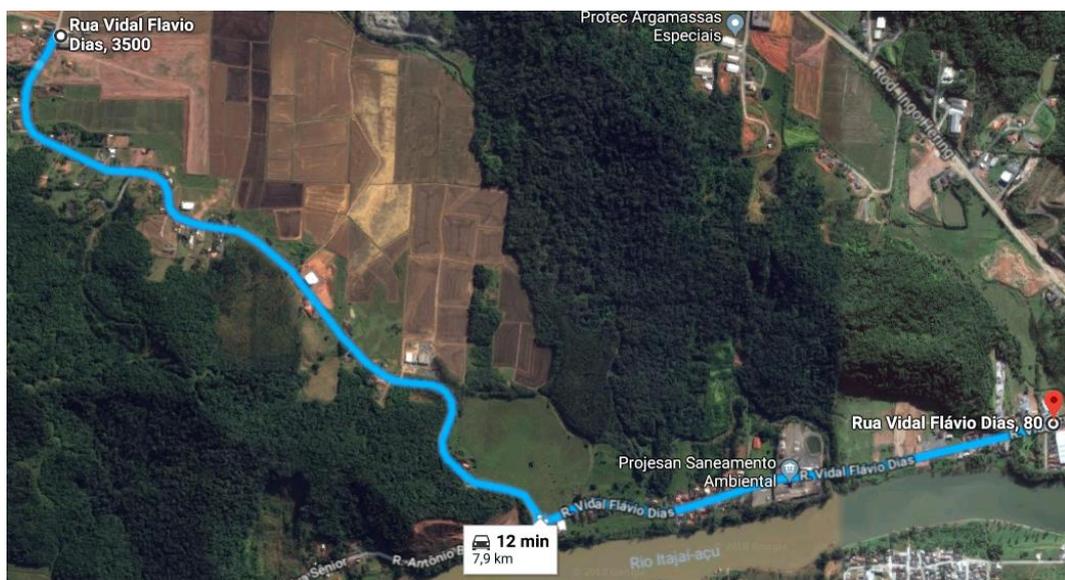
Figura 41 – Circuito total percorrido durante o teste de trafegabilidade.



Fonte: Google Maps® (2018).

Já a Figura 42, ilustra apenas o trecho não pavimentado.

Figura 42 – Trecho não pavimentado do circuito.



Fonte: Google Maps® (2018).

Após os ensaios de trafegabilidade, adquiriram-se os dados a partir do mesmo dispositivo aquisitor descrito na seção anterior, o LYNX® ADS-2000-IP.

4. RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos foram compilados separadamente entre as simulações numéricas e os ensaios práticos (carregamento estático e trafegabilidade). Posteriormente, fez-se uma comparação entre ambos, com o propósito de tentar-se validar as simulações numéricas a partir da aproximação com os resultados experimentais.

4.1. RESULTADOS REFERENTES AO CARREGAMENTO ESTÁTICO

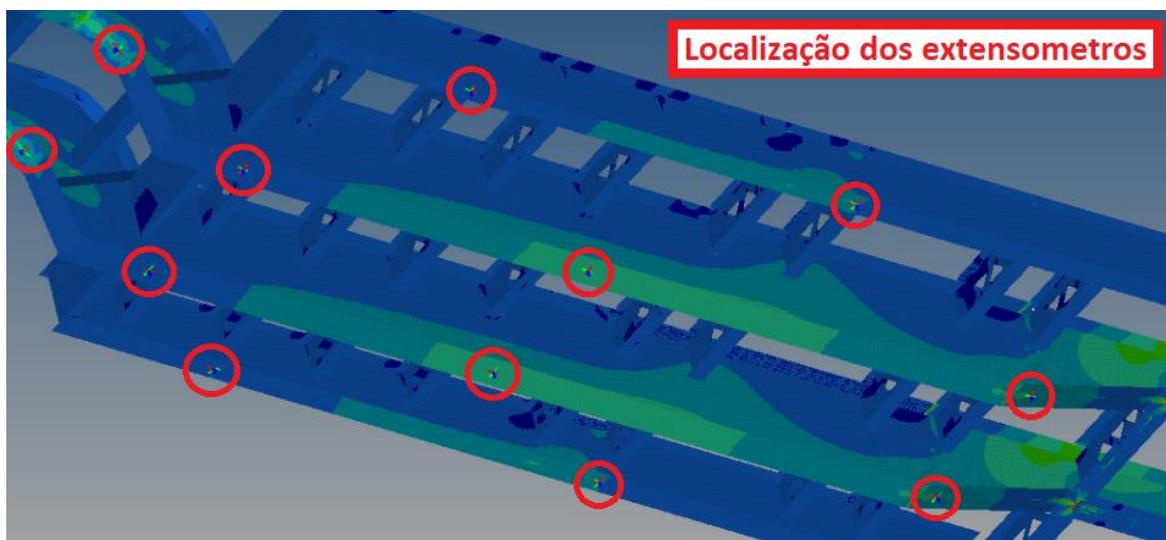
Os resultados das tensões internas foram apresentados em formato de figuras e tabelas, de maneira a expor com maior clareza os valores encontrados durante o desenvolvimento deste trabalho.

Devido ao fato dos extensômetros utilizados serem uniaxiais, os resultados de tensão na simulação numérica estão de acordo com a teoria da tensão principal.

4.1.1. Simulação Computacional do Carregamento Estático

Inicialmente, é preciso entender onde foram posicionados os extensômetros no modelo computacional, o que é ilustrado pela Figura 43, conforme abaixo.

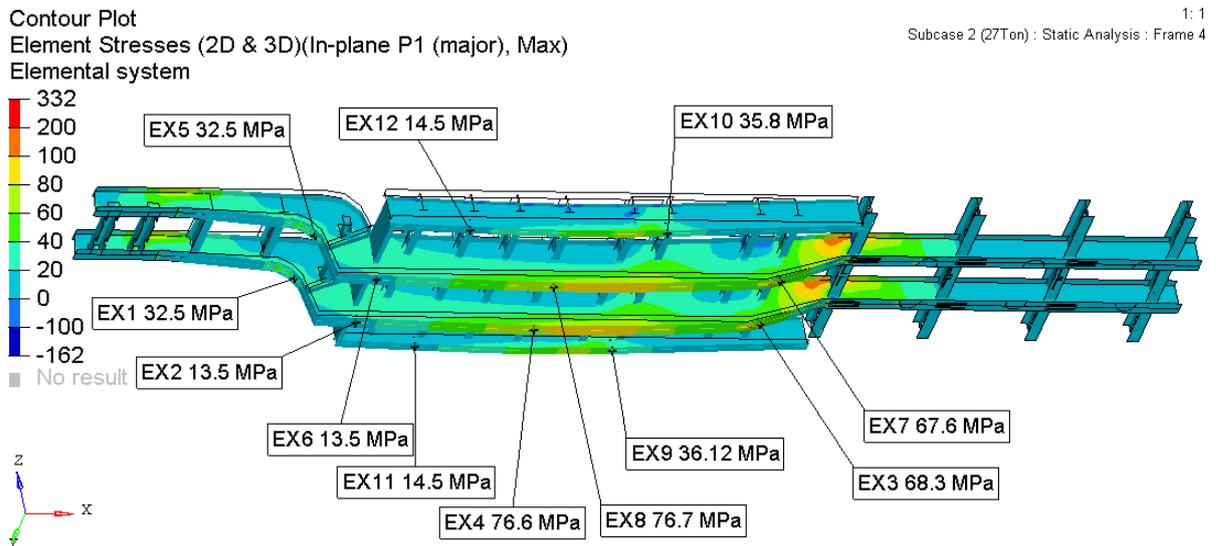
Figura 43 – Localização do extensômetros no modelo computacional.



Fonte: Autor (2018).

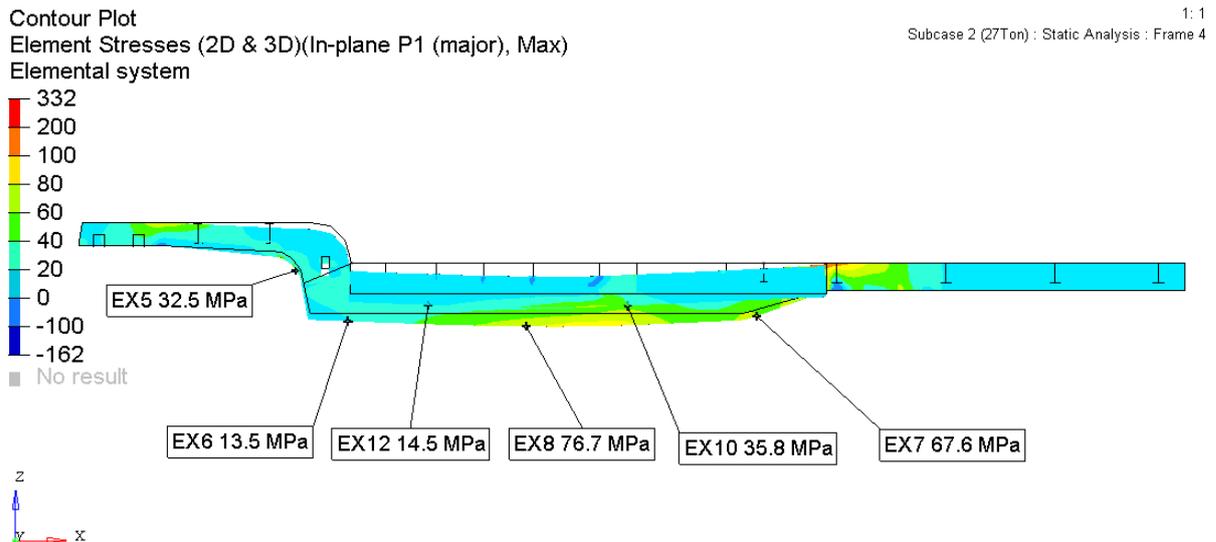
Após, apresentam-se as Figura 44, Figura 45 e Figura 46, as quais expressam os resultados obtidos nas localidades apresentadas na Figura 43.

Figura 44 – Resultado da simulação computacional para carregamento estático.



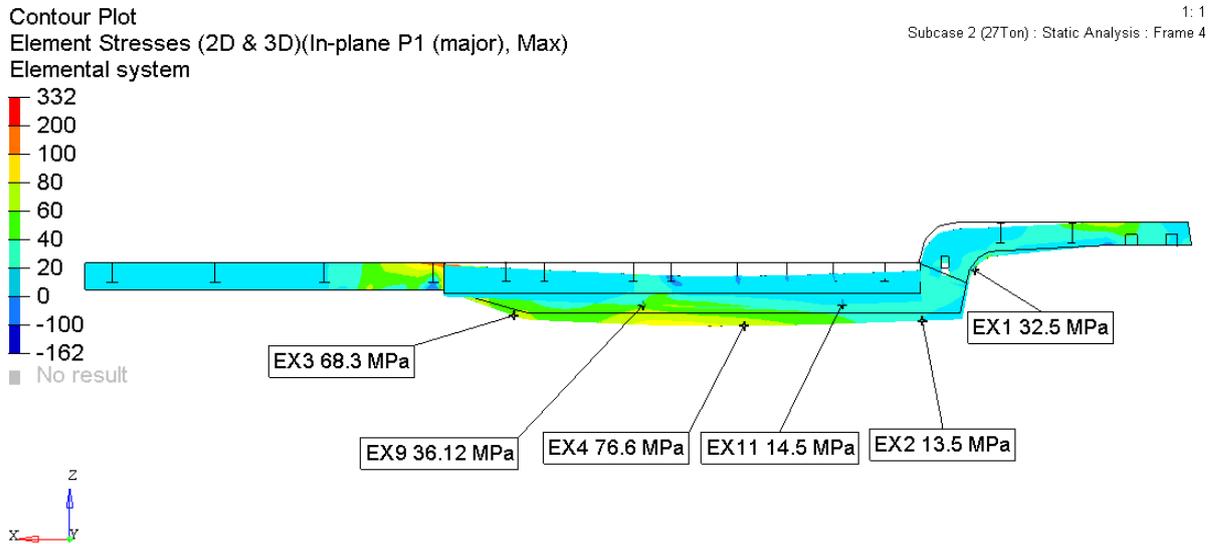
Fonte: Autor (2018).

Figura 45 – Vista lateral esquerda com os resultados da simulação computacional para carregamento estático.



Fonte: Autor (2018).

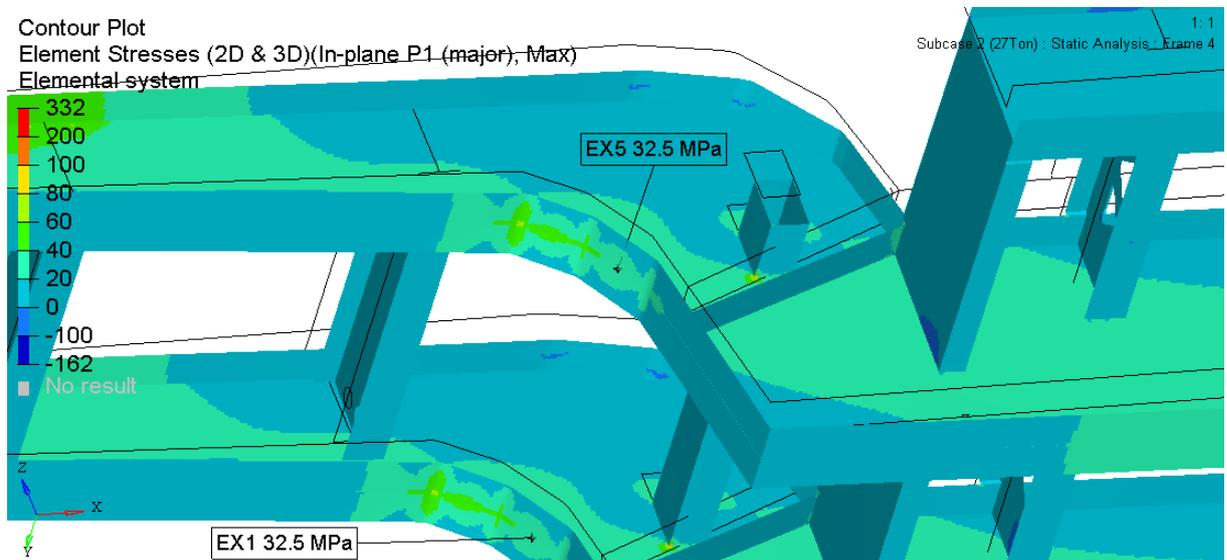
Figura 46 – Vista lateral direita com os resultados da simulação computacional para carregamento estático.



Fonte: Autor (2018).

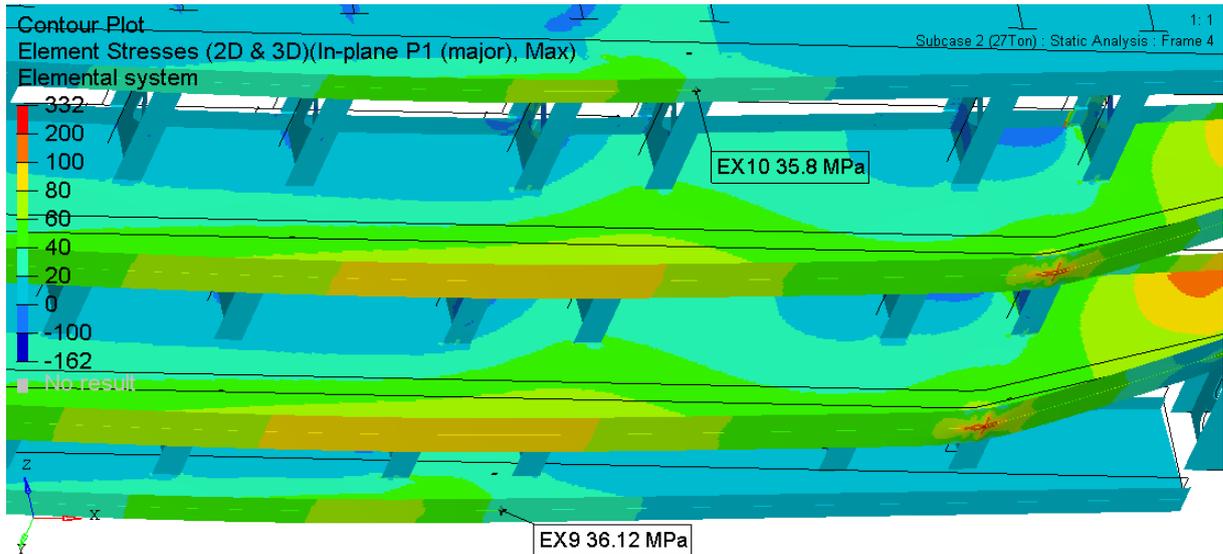
As Figura 47 e Figura 48, apresentam os resultados locais acerca das regiões referentes aos extensômetros EX1, EX5, EX9 e EX10, devido ao fato de seus resultados apresentarem peculiaridades quando comparados aos resultados práticos. Neste caso, para os extensômetros EX1, EX5 e EX10 obtiveram-se resultados bem satisfatórios, com diferença praticamente nula, e para o extensômetro EX9 o resultado apontou uma divergência bem considerável.

Figura 47 – Resultado computacional referente aos extensômetros EX1 e EX5.



Fonte: Autor (2018).

Figura 48 – Resultado computacional referente aos extensômetros EX9 e EX10.

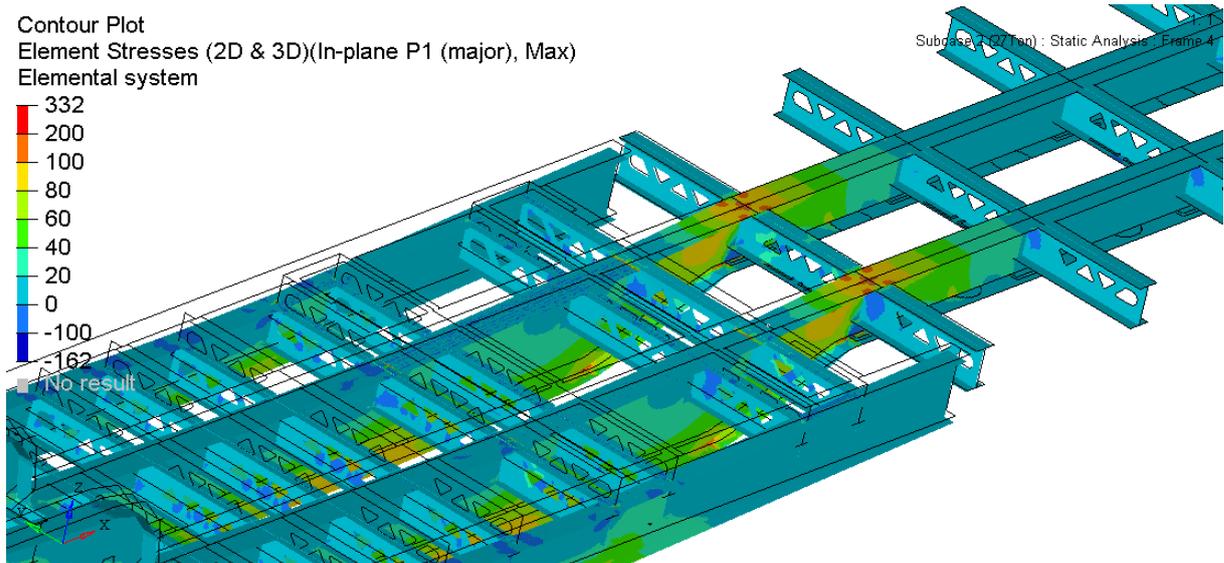


Fonte: Autor (2018).

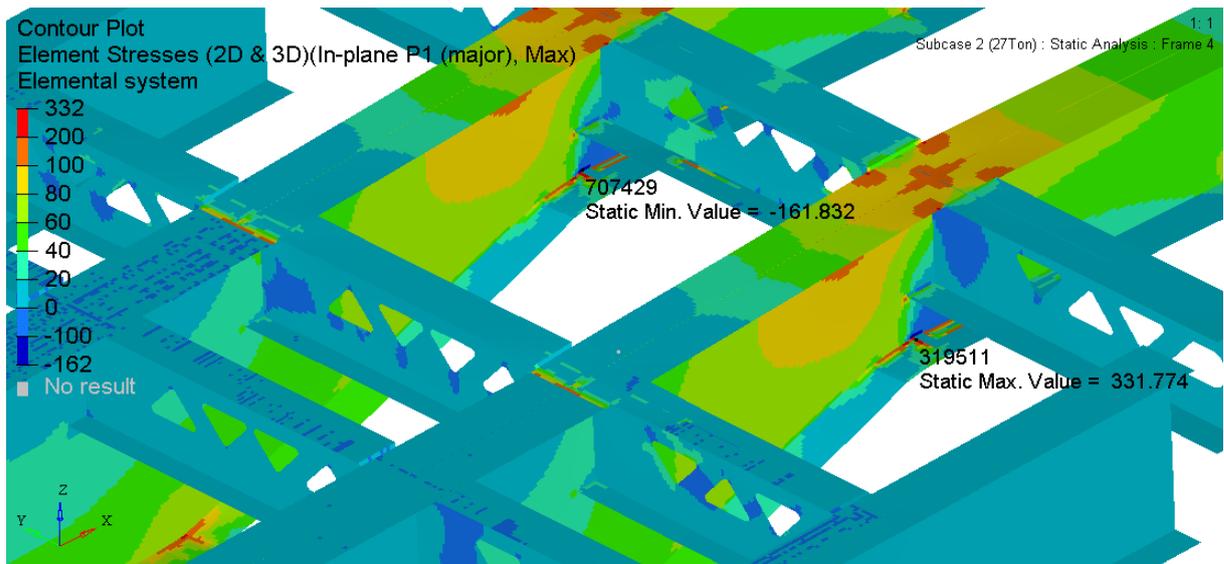
Além disso, analisou-se as demais regiões da estrutura global, não atendo-se apenas aos locais onde encontram-se os extensômetros.

Como por exemplo a região apresentada pela Figura 49 (a), onde encontraram-se os picos de tensão durante a simulação numérica.

Figura 49 – Resultado da simulação computacional com carregamento estático.



(a)



(b)

Fonte: Autor (2018).

Assim, pela Figura 49 (b), nota-se que os valores de pico máximo de tensão de tração e compressão, em MPa, foram de 331,77 e 161,83, respectivamente.

Pela simulação numérica, percebe-se que a região com maior concentração de tensão está localizada justamente em um local onde não fora acoplado nenhum extensômetro. Esta região é contemplada por uma diminuição de seção muito significativa, além de estar localizada entre a região de aplicação do carregamento e a região de engaste proporcionada pelo conjunto de suspensão traseira.

4.1.2. Ensaio Experimental do Carregamento Estático

Durante os ensaios experimentais do carregamento estático, tomou-se o cuidado de manter, por pelo menos 30 minutos ininterruptos, a leitura das tensões internas por meio dos extensômetros, o que agrega maior confiabilidade aos resultados práticos.

A partir da Tabela 3, encontram-se os valores de tensão interna presentes na estrutura do chassi do semirreboque Carrega Tudo em repouso, ou seja, descarregado e desacoplado do cavalo mecânico (veículo trator).

Tabela 3 – Medições de tensão com o semirreboque em repouso.

Sensores	Unidade	Máximo	Mínimo	Amplitude
EX1	MPa	0,42	-1,47	1,88
EX2	Mpa	0,42	-1,32	1,74
EX3	Mpa	2,2	-1,2	3,4
EX4	MPa	1,11	-1,17	2,28
EX5	MPa	0,63	-1,11	1,74
EX6	MPa	0,9	-1,48	2,38
EX7	MPa	2,38	-2,38	4,75
EX8	MPa	0,9	-0,85	1,75
EX9	MPa	2,06	-0,69	2,74
EX10	MPa	0,96	-1,06	2,02
EX11	MPa	1,38	-0,9	2,28
EX12	MPa	2,03	-1,28	3,31

Fonte: Autor (2018).

Já a Tabela 4, indica os valores das tensões internas presentes na estrutura em questão, quando carregada com o transformador da empresa Cliente, porém não acoplada ao cavalo mecânico.

Tabela 4 – Medições de tensão com o semirreboque acoplado ao veículo trator.

Sensores	Unidade	Máximo	Mínimo	Amplitude
EX1	MPa	0,37	2,41	2,77
EX2	Mpa	8,64	5,69	2,95
EX3	Mpa	80,39	77,66	2,72
EX4	MPa	85,58	82,4	3,18
EX5	MPa	2,32	0,05	2,27
EX6	MPa	8,13	4,23	3,91
EX7	MPa	66,73	62,35	4,38
EX8	MPa	65,84	59,99	5,85
EX9	MPa	119,36	48,11	71,25
EX10	MPa	27,41	23,85	3,56
EX11	MPa	29,06	26,2	2,86
EX12	MPa	19,57	15,84	3,73

Fonte: Autor (2018).

Finalmente, pela Tabela 5, encontram-se os valores de tensão interna referentes a situação mais crítica, quando o semirreboque Carrega Tudo está carregado com o transformador da empresa Cliente e acoplado ao cavalo mecânico.

Tabela 5 – Medições de tensão com o semirreboque carregado e acoplado ao veículo trator.

Sensores	Unidade	Máximo	Mínimo	Amplitude
EX1	MPa	32,3	30,26	2,04
EX2	Mpa	56,77	53,4	3,37
EX3	Mpa	78,5	75,2	3,3
EX4	MPa	113,13	110,27	2,86
EX5	MPa	30,38	27,84	2,54
EX6	MPa	70,4	64,96	5,44
EX7	MPa	58,23	54,32	3,91
EX8	MPa	105,27	100,59	4,68
EX9	MPa	121,2	117,46	3,74
EX10	MPa	36,97	34,26	2,71
EX11	MPa	40,09	37,49	2,6
EX12	MPa	36,42	33,33	3,09

Fonte: Autor (2018).

Portanto, percebe-se que a máxima variação de tensão foi adquirida durante a 3ª etapa (Tabela 5), referente a condição de semirreboque carregado e acoplado ao veículo trator, sendo este valor igual a 121,2 MPa, identificado pelo extensômetro 9 (EX 9), o qual está localizado na parte central da longarina principal direita do semirreboque.

A razão pela qual a estrutura do semirreboque Carrega Tudo possui um maior estresse no lado direito, se dá pelo fato da carga imposta a ele ser excêntrica.

4.1.3. Comparativo Entre os Resultados de Carregamento Estático

Na Tabela 6, encontram-se os resultados obtidos pelos extensômetros durante o ensaio prático, bem como os resultados atingidos no decorrer das simulações numéricas.

Tabela 6 – Comparativo entre ensaio experimental e computacional.

Sensores	Unidade	Ensaio Prático	Simulação Computacional	Diferença	Diferença (%)
EX1	MPa	32,3	32,48	-0,18	0,56
EX2	Mpa	56,77	13,52	43,25	76,18
EX3	Mpa	78,5	67,57	10,93	13,92
EX4	MPa	113,13	76,59	36,71	32,45
EX5	MPa	30,38	32,44	-2,06	6,78
EX6	MPa	70,4	13,52	56,88	80,80
EX7	MPa	58,23	68,32	-10,12	17,38
EX8	MPa	105,27	76,58	28,69	27,25
EX9	MPa	121,2	35,83	85,37	70,44
EX10	MPa	36,97	36,12	0,85	2,30
EX11	MPa	40,09	14,51	25,58	63,81
EX12	MPa	36,42	14,45	21,97	60,32

Fonte: Autor (2018).

Durante a análise comparativa, estipulou-se que uma diferença de até 40 %, seria considerável, visto as simplificações atribuídas durante a etapa de pré-processamento.

Com isso, destacam-se os resultados referentes aos extensômetros EX2, EX6, EX9, EX11 e EX12. Em que o EX9 apresentou a maior diferença entre os

resultados experimental e computacional. É interessante o fato de que destes 5 extensômetros, 3 deles estão presentes nas longarinas externas (EX9, EX11 e EX12).

Tais diferenças, muito possivelmente estão ligadas às simplificações adotadas ao longo da geometria da estrutura, bem como às condições de contorno aplicadas, apesar de todo o cuidado tomado.

Outro ponto que acreditasse estar influenciando nos resultados, principalmente no que diz respeito aos extensômetros EX2, EX6, EX11 e EX12, é o fato de que não se adicionaram alguns carregamentos na simulação numérica, mas que estiveram presentes durante o teste prático. Carregamentos estes, que estiveram presentes na região frontal da prancha de carregamento do semirreboque, e que apesar de serem bem menos expressivos que a carga do transformador (27 ton), acabam influenciando nas tensões internas.

Porém, de modo geral, é possível perceber que os resultados oriundos da simulação computacional apresentaram consistência acerca de seus valores de tensão.

4.2. RESULTADOS REFERENTE AO TESTE DE TRAFEGABILIDADE

Para o ensaio de trafegabilidade, os resultados das tensões e acelerações estruturais foram organizados em tabelas, de maneira a apresentarem com mais clareza os valores encontrados durante os ensaios realizados, tanto em unidade de aceleração, quanto em unidade de tensão.

4.2.1. Ensaio Experimental do Teste de Trafegabilidade

As Tabela 7 e Tabela 8, descrevem os resultados de aceleração encontrados durante os ensaios realizados nas respectivas condições de estrada pavimentada a 50 km/h e estrada não pavimentada a 40 km/h.

Tabela 7 – Maiores variações de aceleração em estrada pavimentada a 50 km/h.

Sensor	Máximo (g)	Mínimo (g)	Amplitude (g)	Média modular (g)
Ac01X	0,7	-0,4	1,0	0,5
Ac01Y	0,4	-0,4	0,8	0,4
Ac01Z	0,6	-0,4	1,0	0,5
Ac02X	0,6	-0,9	1,5	0,8
Ac02Y	1,4	-1,0	2,4	1,2
Ac02Z	0,6	-0,4	1,1	0,0
Ac03X	101	-1,0	2,1	1,1
Ac03Y	0,8	-0,9	1,7	0,9
Ac03Z	3,5	-1,5	5,0	2,5
Ac04X	0,9	-0,9	1,8	0,9
Ac04Y	2,1	-2,0	4,1	2,1
Ac04Z	2,7	-2,3	5,0	2,5
Ac05X	0,6	-0,7	1,3	0,6
Ac05Y	1,4	-1,0	2,4	1,2
Ac05Z	0,5	-0,3	0,8	0,4
Ac06X	2,0	-2,7	4,7	2,3
Ac06Y	0,4	-0,4	0,8	0,4
Ac06Z	0,5	-0,4	0,8	0,4

Fonte: Autor (2018).

Tabela 8 – Maiores variações de aceleração em estrada não pavimentada a 40 km/h.

Sensor	Máximo (g)	Mínimo (g)	Amplitude (g)	Média modular (g)
Ac01X	0,8	-0,3	1,1	0,6
Ac01Y	0,5	-0,4	0,8	0,4
Ac01Z	0,6	-0,6	1,3	0,6
Ac02X	1,0	-1,4	2,4	1,2
Ac02Y	1,2	-1,1	2,3	1,2
Ac02Z	0,5	-0,4	0,9	0,0
Ac03X	1,0	-1,8	2,8	1,4
Ac03Y	0,7	-1,1	1,9	0,9
Ac03Z	3,5	-3,0	6,5	3,2
Ac04X	1,6	-1,1	2,8	1,4
Ac04Y	1,9	-2,3	4,2	2,1
Ac04Z	6,3	-4,9	11,1	5,6
Ac05X	0,6	-1,2	1,8	0,9
Ac05Y	1,1	-1,2	2,4	1,2
Ac05Z	0,3	-0,3	0,7	0,3
Ac06X	2,4	-2,5	4,9	2,5
Ac06Y	0,6	-0,6	1,2	0,6
Ac06Z	0,4	-0,4	0,8	0,4

Fonte: Autor (2018).

A fim de compilar os resultados referente aos picos de aceleração máxima e mínima para ambas condições, estrada pavimentada e não pavimentada, criou-se a Tabela 9.

Tabela 9 – Valores máximos de aceleração durante o teste de trafegabilidade.

Tipo de pista	Velocidade (km/h)	Sensor	Máximo (g)	Mínimo (g)	Amplitude (g)
Pavimentada	50	Ac03Z	3,5	-1,5	4,3
Não pavimentada	40	Ac04Z	6,3	-4,9	8,7

Fonte: Autor (2018).

Assim, nota-se que o maior valor encontrado foi de 6,3 g, capturado pelo acelerômetro Ac04Z durante o ensaio a 40 km/h em estrada não pavimentada. Valor

este, acima do critério de falha estipulado pela empresa Cliente, a qual desejava valores abaixo de 5 g.

Já a partir das Tabela 10 e Tabela 11, apresentam-se os resultados referentes à tensão, medidos pelos extensômetros durante as condições de estrada pavimentada a 40 km/h e estrada não pavimentada a 30 km/h, respectivamente.

Tabela 10 – Maiores variações de tensão em estrada pavimentada a 40 km/h.

Sensor	Máximo (MPa)	Mínimo (MPa)	Amplitude (MPa)	Média modular (MPa)
EX1	9,1	-6,7	15,8	7,9
EX2	45,6	-19,1	64,7	32,4
EX3	24,2	-31,8	56,0	28,0
EX4	62,5	-30,7	93,2	46,6
EX5	11,9	-13,3	25,2	12,6
EX6	32,9	-25,1	58,0	29,0
EX7	16,9	-22,8	39,7	19,8
EX8	42,2	-35,8	78,0	39,0
EX9	36,5	-11,1	47,6	23,8
EX10	16,9	-16,3	33,2	16,6
EX11	35,2	-8,8	44,0	22,0
EX12	16,6	-19,6	36,2	18,1

Fonte: Autor (2018).

Tabela 11 – Maiores variações de tensão em estrada não pavimentada a 30 km/h.

Sensor	Máximo (MPa)	Mínimo (MPa)	Amplitude (MPa)	Média modular (MPa)
EX1	7,9	-9,8	17,7	8,8
EX2	35,8	-31,1	66,9	33,4
EX3	23,7	-20,0	43,8	21,9
EX4	49,9	-36,5	86,4	43,2
EX5	10,4	-12,8	23,2	11,6
EX6	29,7	-24,4	54,1	27,0
EX7	19,0	-26,8	45,8	22,9
EX8	32,3	-34,7	67,0	33,5
EX9	34,5	-41,4	75,9	38,0
EX10	33,5	-22,1	55,6	27,8
EX11	33,5	-43,7	77,3	38,6
EX12	43,9	-30,2	74,0	37,0

Fonte: Autor (2018).

As maiores variações de tensão (MPa) durante o ensaio de trafegabilidade estão descritas na Tabela 12.

Tabela 12 – Maiores variações de tensão durante o teste de trafegabilidade.

Tipo de pista	Velocidade (km/h)	Sensor	Máximo (MPa)	Mínimo (MPa)	Amplitude (MPa)
Pavimentada	40	EX4	62,5	-30,7	93,2
Não pavimentada	30	EX4	49,9	-36,5	86,4

Fonte: Autor (2018).

Os valores máximos representam tensão devido a força de tração, enquanto os valores mínimos representam tensão provindo de força compressiva. O maior valor encontrado foi de 62,5 MPa, registrado pelo extensômetro EX 4 durante o ensaio a 40 km/h em estrada pavimentada, conforme Tabela 12.

No APÊNDICE A, encontra-se a frequência com que a deformações são aplicadas na região do extensômetro EX1, instrumentado no decorrer deste trabalho.

5. CONCLUSÃO

Durante o presente trabalho, buscou-se avaliar a segurança estrutural acerca do projeto de semirreboque Carrega Tudo. Para isso, utilizou-se de programas de simulação computacional CAE e experimentos práticos a partir de extensômetros e acelerômetros.

Para a devida avaliação em ambiente computacional, fora necessário adotar simplificações ao longo da estrutura, de maneira que se mantivessem apenas componentes necessariamente estruturais, ou que possuísem influência direta no que tange a aplicação das condições de contorno e carregamento, como foi o caso de se manter o conjunto de suspensão traseira, bem como de manter-se as placas responsáveis pela fixação do transformador a estrutura do semirreboque.

Definidos os parâmetros que se manteriam no modelo numérico, iniciou-se o processo de discretização em CAE, no qual aplicou-se todas as ferramentas descritas ao longo do trabalho durante a etapa de pré-processamento, a fim de modelar-se a malha da melhor maneira possível, chegando-se, neste caso, em uma malha formada por elementos CQUAD4, com funções de forma de primeira ordem e tamanho de 8 mm. Malha esta, que fora validada com base nos parâmetros de qualidade disponíveis no programa ALTAIR Hypermesh®, sendo estes, “*aspect ratio*”, “*warpage*”, “*skew*” e “*jacobian*”.

Com o modelo numérico finalizado, simulou-se as condições de carregamento estático, replicando-se o teste de estrutura carregada e acoplada ao veículo trator. O objetivo destas simulações, é aproximar-se ao máximo dos resultados experimentais, e que neste caso, fora alcançado nas regiões respectivas aos extensômetros EX1, EX3, EX4, EX5, EX7, EX8 e EX10.

Acerca dos extensômetros EX9, EX11 e EX12, destaca-se o fato de que todos estão posicionados nas longarinas mais externas, e a grande diferença ali presente pode estar ligada a maneira como realizaram-se os contatos entre estas longarinas e as travessas – no qual não se utilizou o comando de contato por solda –, bem como a forma como fora aplicado o carregamento nas chapas de fixação. Outro ponto interessante, é que durante os testes práticos, o extensômetro EX9 apontou um valor de tensão interna muito acima do valor apresentado pelo EX10, o qual fora acoplado na região simétrica ao EX9, o que pode indicar uma falha durante o processo de

instrumentação do EX9, visto que apesar do carregamento ser excêntrico, esta excentricidade é muito pequena (de aproximadamente 7 cm) para gerar uma diferença tão grande em relação a tensão interna presente entre um lado e outro da carroceria.

Já com relação as divergências de resultados numéricos e práticos dos extensômetros EX2 e EX6, ambos presentes na região frontal da carroceria, pode estar relacionado ao fato da não aplicação em ambiente CAE de alguns carregamentos que estiveram presentes durante o teste prático. Estes carregamentos, apesar de bem menos expressivos quando comparados ao peso do transformador, acabam por afetar as estruturas próximas.

Referente aos ensaios experimentais, o estudo das deformações mecânicas fora realizado avaliando-se as máximas variações de tensão obtidas no ensaio de carregamento conjuntamente com as maiores variações de tensão obtidas durante o ensaio de trafegabilidade, com o intuito de se analisar as variações de tensão tanto referentes ao peso do transformador, quanto no que diz respeito à estrutura carregada em movimento.

Desse modo, o maior conjunto de variações de tensão foi obtido no extensômetro EX4, o qual apresentou uma tensão de 113,13 MPa durante o ensaio de carregamento estático, bem como uma tensão de 62,5 MPa durante o teste de trafegabilidade a 40 km/h em via pavimentada, totalizando 175,63 MPa.

Tomando-se como base o limite de escoamento comercialmente empregado ao material ASTM A572, o qual é de 350 MPa, percebe-se que as variações de tensão obtidas nos ensaios de carregamento estático e de trafegabilidade, apresentaram variações de tensão modulares máximas de aproximadamente 50% do limite de escoamento adotado.

Portanto, com a condição de falha definida pela empresa Cliente como sendo a tensão interna maior ou igual a 70% do limite de escoamento do material de base, neste caso o ASTM A572, o projeto do semirreboque Carrega Tudo foi validado com um fator de segurança (FS) de aproximadamente 1,4, como apresentado pela Equação 15.

$$FS = \frac{S_{y,70\%}}{S_{adm}} = \frac{245 \text{ [MPa]}}{175,63 \text{ [MPa]}} = \sim 1,4 \quad (15)$$

No que tange a análise vibracional, observaram-se níveis de acelerações abaixo do especificado, tanto em estrada não pavimentada quanto em estrada pavimentada, exceto no que diz respeito aos resultados apresentados pelo acelerômetro Ac04, o qual indicou um pico máximo de 6,3 g na direção vertical (Z).

Por conta dos resultados encontrados no acelerômetro Ac04, realizou-se um processo de revisão nas fixações do painel e constatou-se que os elementos de fixação na base do painel estavam sem aperto, o que acabou por invalidar as medições decorrentes deste acelerômetro. Dessa forma, foram executados os torques específicos em tais fixações e considerou-se a falha corrigida, visto que este foi o único acelerômetro a apontar um valor acima do limite de 5 g.

Todos os demais acelerômetros apontaram valores significativamente abaixo de 5 g, o que associado ao fato de que a carga sobre o semirreboque ser praticamente simétrica, invalida a hipótese de apenas esta região apontar um pico de aceleração.

Com ambos os testes finalizados, entende-se pelos resultados aqui apresentados, que a estrutura do semirreboque Carrega Tudo está validada com relação as exigências da empresa Cliente.

Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se citar:

- Incrementar na simulação, a função de contato por solda, incluindo-se as propriedades da solda utilizada durante o processo de manufatura da estrutura real;
- Implementar extensômetros em outros locais, como por exemplo nas regiões de pico identificadas na simulação numérica;
- Simulações avaliando-se a vida em fadiga da estrutura, utilizando-se os dados de aceleração provenientes dos acelerômetros aqui aplicados.

REFERÊNCIAS

ALVES, Alvelino. **Elementos finitos: a base da tecnologia CAE**. 1 ed. São Paulo. Ed. Érica, 2000. 292 p. Inclui índice. ISBN 85-7194-7414

ALVES, Lucas. **Métodos dos elementos finitos**. 2007. 438 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos do Setor de Tecnologia/Setor de Ciências Exatas, Departamento de Engenharia Civil/Departamento de Matemática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

ALTAIR®. **Practical aspects of finite element simulation: a study guide**. 2015. 3 ed. Ed. Altair University. 503 p.

ANALOG DEVICES®. **Data Sheet ADXL343**. Disponível em: <<http://www.analog.com/en/parametricsearch/11175#/p4143=16%20g>>. Acesso em: 10 junho 2018.

ARAUJO, Rodrigo et al. UNIDADE DE MEDIDA INERCIAL PARA CÁLCULO DE DESLOCAMENTO. **Revista eletrônica científica inovação e tecnologia**, Medianeira, v. 2, n. 2, p.43-47, maio 2013. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/recit/article/viewFile/215/pdf>>. Acesso em: 01 maio 2018.

ANFIR. Associação Nacional dos Fabricantes de Implementos Rodoviários. **Emplacamentos do setor de janeiro a março de 2016 e 2017**. 2017. Disponível em: <www.anfir.org.br>. Acesso em: 17 maio 2017.

AZEVEDO, Álvaro. **Método dos elementos finitos**. 1 ed. Porto, Portugal. Ed. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003. 258 p. Inclui índice.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. BNDES Setorial. **A indústria de implementos rodoviários e sua importância para o aumento da eficiência do transporte de cargas no Brasil**. 2006. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br/bibliotecadigital>>. Acesso em: 07 abr. 2017.

BARRETO JÚNIOR, Euler. **Extensometria: Manual prático**. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAROQAK/extensometria-manual-pratico>>. Acesso em: 20 maio 2018.

BOARETTO, Joel. **Comportamento estrutural de um chassi de semirreboque submetido a manobras relacionadas às dinâmicas lateral e vertical**. 2012. 145 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. BUDZINSKI, João Augusto Scheid. **Acelerômetros**. 1999. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/edu/Sensores/1999/joao/index.htm>>. Acesso em: 24 maio 2018.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Resolução nº 01/2016**. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/rodovias/operacoes-rodoviaras/sistema-de-gerenciamento-de-autorizacao-especial-de-transito-siaet/RESOLUO012016DNITCargasIndivisveis.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2017.

PROMEC, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

CARROCERIAS LINSHALM LTDA®. **Produto carroceria carrega tudo**. 2017. Disponível em: <www.linshalm.com.br>. 05 maio 2017.

CNT. Confederação Nacional do Transporte. **Transporte de cargas no Brasil: Ameaças e Oportunidades para o Desenvolvimento do País**. 2002. Disponível em: <http://www.sestsenatsaogoncalorj.com/biblioteca/relatorios_pesquisas/cnt-coppead-cargas2002.pdf>. Acesso em: 06 abr. 2017.

CNT. Confederação Nacional do Transporte. **Pesquisa CNT de rodovias**. 2010. Disponível em: <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/>>. Acesso em: 07 abr. 2017.

COOK, Robert D. et al. **Concepts and applications of finite element analysis**. 4th ed. Madison: John Wiley & Sons, Inc., 2001.

FILHO, Flavio Herrera. **Estudo da convergência de malha no estado plano de tensões utilizando o elemento finito isoparamétrico quadrilateral de quatro nós**. XXVIII CIC (Congresso de Iniciação Científica da UNESP). Bauru. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. 2016. 1 p.

GOOGLE MAPS®. **Circuitos percorridos durante o teste de trafegabilidade**. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps>>. Acesso em: 17 maio 2018.

GRANTE. Grupo de Análise e Projeto Mecânico. **Apostila de extensometria**. Florianópolis. Ed. Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, 2004. 48 p. Inclui índice.

HOFFMANN, Karl. **An introduction to measurements using strain gauges.** Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1989.

KYOWA®. **Catálogo de extensômetros.** Disponível em:

<<http://www.panambra.com/produto-marca/Kyowa>>. Acesso em: 17 maio 2017.

LOTTI, Raquel et al. **Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos.** Maringá. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. 2006. 9 p.

MINELA, Sthefani Neves. **Extensometria: estudo e aplicação.** 2017. 92 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Automotiva, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.

MINELA, Sthefani Neves. **Extensometria: estudo e aplicação.** 2017. 92 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Automotiva, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.

MÜLLER, Tiago Augusto Meurer. **Análise de vida em fadiga de ponta de eixo traseiro utilizando o método de elementos finitos.** 2017. 59 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Automotiva, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.

NORTON, Robert. **Projeto de máquinas: Uma Abordagem Integrada.** 4 ed. Porto Alegre. Ed. Bookman, 2013. 1028 p. Inclui índice. ISBN 9780136123705.

PEREIRA, Luiz; LESSA, Simone; CARDOSO, Antônio. **Planejamento e transporte rodoviário no Brasil.** Universidade Estadual de Montes Claros, Colloquim Internacional Envolvimentos Contra a Pobreza, Montes Claros, 2008.

PERES, Gustavo. **Uma metodologia para simulação e análise estrutural de veículos de transporte de carga.** 2006. 173 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

PETRACCONI, César. **Análise comparativa do componente de fadiga do gancho reboque posterior de um veículo automotor.** 2008. 92 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

ROCHA, Fábio Saraiva da; MARANGHELLO, Guilherme Frederico; LUCCHESI, Márcia Maria. Acelerômetro eletrônico e a placa Arduino para ensino de física em tempo real. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Eldorado do Sul, v. 31, n. 1, p.1-26, 25 nov. 2013. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

SEIFERT, Kurt; CAMACHO, Oscar; **Implementing Positioning Algorithms Using Accelerometers**. Freescale Semiconductor. Application Note, 2007. Disponível em: <http://perso-etis.ensea.fr/~pierandr/cours/M1_SIC/AN3397.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2018.

SHIGLEY, Joseph. **Projeto de engenharia mecânica**. 7 ed. Porto Alegre. Ed. Bookman, 2005. 960 p. Inclui índice. ISBN 978-85-363-0562-2.

SOBRINHO, José Ricardo et al. **Avaliação de um sensor acelerômetro mems aplicado a uma bomba de sangue centrífuga implantável**. In: 9º COLAOB, 2016, Foz do Iguaçu. Artigo. São Paulo: IFSP, 2016. p. 1 - 10.

VALIDO, Aníbal; SILVA, J. Duarte. **Introdução à extensometria elétrica de resistência**. Setúbal, Portugal. Ed. Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Superior Tecnologia Setúbal. 1997. 29 p.

WEBER, Albano. **Metrologia e instrumentação**. Caxias do Sul. Ed. Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul. 2008. 16 p.

APÊNDICE A – Frequência de Deformação ao Longo do Tempo na Região do Extensômetro EX1

Extensômetro EX1

