

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Hernane Vieira Gandra

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL E ESTUDO DAS TENSÕES
NO CHASSI DO CAMINHÃO FORA DE VIA**

Belo Horizonte

2017

Hernane Vieira Gandra

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL E ESTUDO DAS TENSÕES
NO CHASSI DO CAMINHÃO FORA DE VIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Gilmar Cordeiro da Silva

Belo Horizonte

2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

G196a Gandra, Hernane Vieira
Avaliação do comportamento estrutural e estudo das tensões no chassi do caminhão fora de via / Hernane Vieira Gandra. Belo Horizonte, 2017.
106 f.: il.

Orientador: Gilmar Cordeiro da Silva
Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

1. Minérios de ferro - Exploração. 2. Metais - Fadiga. 3. Tratores agrícolas. 4. Transporte rodoviário de carga. I. Silva, Gilmar Cordeiro da. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

SIB PUC MINAS

CDU: 669.162.12

Hernane Vieira Gandra

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL E ESTUDO DAS TENSÕES
NO CHASSI DO CAMINHÃO FORA DE VIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Gilmar Cordeiro da Silva

Prof. Dr. Gilmar Cordeiro da Silva (Orientador) – PUC-MG

Prof. Dr. Pedro Américo Almeida Magalhães Junior (Examinador interno) – PUC-MG

Prof. Dr. Fernando Helder Teixeira (Examinador externo) – VALE

Belo Horizonte, 15 de dezembro de 2017.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pelas bênçãos derramadas em minha vida todos os dias. Agradeço minha família pela compreensão e suporte dedicados a mim durante o tempo de estudos. Gratidão a todos da Vale S/A, por me apoiarem na realização de mais um sonho. Agradeço ao Clério Santos Vieira, pelas palavras de incentivo, apoio técnico e a todo grupo docente da PUC-Minas, pelo conhecimento transmitido e as novas amizades construídas. Quero agradecer ainda, em especial, aos professores Gilmar Cordeiro e José Rubens, pelo apoio e por acreditarem na realização deste trabalho.

“Por isso não tema, pois estou com você; não tenha medo,
pois sou o seu Deus. Eu o fortalecerei e o ajudarei;
Eu o segurarei com a força e a justiça da minha
mão direita vitoriosa.”
(Isaías 41:10).

RESUMO

Estudos referente à mineração, demonstram que esta atividade se destaca entre as principais fontes econômicas em nosso País, sendo a exploração de minério de ferro, no estado de Minas Gerais, responsável por mais de 60% na cadeia produtiva brasileira. Essa atividade teve início com os colonizadores que buscavam pedras preciosas e, atualmente, com a exploração de minérios de menor valor agregado, é responsável por 5% do PIB nacional. Essa exploração possibilita o fornecimento de matéria-prima para diversos tipos de indústrias, mantendo uma relação direta e indireta com inúmeras empresas, fazendo da extração de minérios, uma das principais fontes de geração de empregos e bem-estar social no país. A exploração mineral à qual esse trabalho faz referência é a mineração a céu aberto, cujos equipamentos utilizados para sua realização, são diversos e de grande porte, tais como escavadeiras, carregadeiras, tratores, perfuratrizes e, principalmente, caminhões fora de via. Estes, estão submetidos a altas tensões cíclicas por transitarem em vias não pavimentadas transportando grandes quantidades de massa. A compreensão das tensões impostas ao chassi do caminhão fora de via, assim como a caracterização dos materiais utilizados na fabricação do mesmo, são fundamentais para a realização de estudos relacionados à fadiga estrutural do componente. Por meio de ensaios metalográficos e físico-químicos, bem como utilização de métodos computacionais, é possível entender, prever falhas e propor soluções para mitigar ou evitar a ocorrência de danos ocasionados por fadiga. Tais estratégias são utilizadas para contribuição no aumento da vida útil do componente e diminuição do risco às pessoas que estão expostas a tais falhas. Sendo assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento estrutural do chassi do caminhão fora de via, levando em consideração o ciclo operacional, compreendendo as tensões atuantes no caminhão e, por meio do método de análise por elementos finitos, sugerir melhorias para reduzir as tensões em pontos críticos.

Palavras-chave: Mineração. Fadiga. Chassi. Caminhão fora de via.

ABSTRACT

Researches about mining operations demonstrate that this activity stands out between the main economic sources in our country. The iron ore exploitation in the state of Minas Gerais represents more than 60% of the Brazilian productive chain. This activity began with the colonizers, who were looking for precious stones and today, with the exploitation of low added value minerals, it represents 5% of the national GDP. This exploitation enables to supply raw materials for various types of industries, keeping a direct and indirect relationship with many companies, making ore mining one of the main sources of job creation and social welfare in the country. The mineral exploitation to which this work refers to is the open pit mining, the equipment used are several and large such as excavators, loaders, tractors, drills and, mainly off-road trucks, which are subject to high cyclical stresses as they travel on unpaved roads carrying large amounts of weight. Both the understanding of the stresses imposed on the off-road trucks frames and the characterization of the materials used in its manufacture are fundamental for the accomplishment of studies related to the structural fatigue of the component. Using metallographic and physicochemical tests, as well as the use of computational methods, it is possible to understand, predict failures and propose solutions to mitigate or avoid the occurrence of damages caused by fatigue. Such strategies are used to increase the operating life of the component and to reduce the risk to people who are exposed to such failures. Therefore, this work was to evaluate the structural behavior of the off-road truck chassis performance, considering operational cycle, understanding the active tension, identifying the steel used in the off-road truck chassis manufacturing, through the method of finite element analysis, to suggest improvements to reduce tension at critical points using the finite element analysis method.

Keywords: Mining. Fatigue. Chassis. Off-road truck

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Índice de preço do minério de ferro (finos)	18
FIGURA 2 - Chassi e trem de força do caminhão fora de via	19
FIGURA 3 - Trincas no chassi do caminhão fora de via	20
FIGURA 4 - Fases da fadiga	23
FIGURA 5 - Crescimento da trica por fadiga	23
FIGURA 6 - Transporte de minério	24
FIGURA 7 - Ciclo de amplitude constante	25
FIGURA 8 - Ciclo de amplitude de tensão variável	26
FIGURA 9 - Curva S-N	27
FIGURA 10 - Curva S-N utilizando probabilidade de falha	27
FIGURA 11 - Representação esquemática de uma contagem de ciclo	28
FIGURA 12 - Danos causados numa história de tempo de um sinal e comparados com a curva do material obtendo a vida	29
FIGURA 13 - Método contagem de ciclos	30
FIGURA 14 - Região de uma junta soldada	31
FIGURA 15 - Comportamento das tensões residuais em uma junta soldada	32
FIGURA 16 - Representação esquemática da variação de tensões residuais transversais ao cordão de solda provenientes dos efeitos: a) contração (C); b) resfriamento superficial mais intenso (R); c) transformação de fase (T); d) C+R; e) C+R+T; f) C+T.	33
FIGURA 17 - Elevação das tensões próximo ao furo	34
FIGURA 18 - Análise de tensões em um corpo de prova	34
FIGURA 19 - Malha de elementos finitos	35
FIGURA 20 - Tipos de elementos finitos	36
FIGURA 21 - Extensômetro	37
FIGURA 22 - Análise de tensão e deslocamento – AISI 1045	38
FIGURA 23 - Locais perigosos para o piloto	40
FIGURA 24 - Deformações na estrutura tubular	40
FIGURA 25 - Chassi tipo escada	41
FIGURA 26 - Tensão de Von Mises no chassi tipo escada	42
FIGURA 27 - Chassi do veículo elétrico de pequeno porte	43
FIGURA 28 - Rigidez numérica e experimental	43
FIGURA 29 - Contorno de dano de fadiga no suporte do motor	44

FIGURA 30 - Avaliação da vida útil do eixo	45
FIGURA 31 - Frequência de vibração	46
FIGURA 32 - Frequência de vibração	47
FIGURA 33 - Carregamento estático - Tensão máxima	48
FIGURA 34 - Carregamento estático - Deformação	48
FIGURA 35 - Carregamento na barra lateral	49
FIGURA 36 - Chassi caminhão rodoviário	50
FIGURA 37 - Modelo da roda em 3D	51
FIGURA 38 - Análise numérica do entalhe V	52
FIGURA 39 - Elementos básicos da via permanente	54
FIGURA 40 - Limite de resistência à fadiga	55
FIGURA 41 - Presença de trincas em corpos de prova	57
FIGURA 42 - Fluxograma da metodologia	59
FIGURA 43 - Amostra de materiais	59
FIGURA 44 - Análise metalográfica do material laminado	61
FIGURA 45 - Análise metalográfica do material fundido	61
FIGURA 46 - Curva de fadiga-vida (S-N)	63
FIGURA 47 - Materiais utilizados na fabricação do chassi	65
FIGURA 48 - Ensaio por líquido penetrante	66
FIGURA 49 - Mapeamento de trincas	67
FIGURA 50 - Posicionamento dos sensores	68
FIGURA 51 - Variação de tensões – G18	68
FIGURA 52 - Caminhão fora de via	70
FIGURA 53 - Nuvem de pontos do chassi 793	70
FIGURA 54 - Modelo computacional chassi do caminhão fora de via	71
FIGURA 55 - Suspensões	72
FIGURA 56 - Âncora	72
FIGURA 57 - Tanque de combustível	73
FIGURA 58 - Motor diesel	73
FIGURA 59 - Apoio báscula	74
FIGURA 60 - Líquido de arrefecimento	74
FIGURA 61 - Conversor de torque	75
FIGURA 62 - Cabine de operação	75
FIGURA 63 - Cargas basculamento	76

FIGURA 64 - Material na báscula	76
FIGURA 65 - Reforços na coluna da cabine	77
FIGURA 66 - Reforço na coluna de sustentação da báscula	77
FIGURA 67 - Reforço longarina	78
FIGURA 68 - Coluna de apoio da cabine	79
FIGURA 69 - Coluna de apoio da báscula	80
FIGURA 70 - Apoio inferior da cabine	80
FIGURA 71 - Apoio da báscula	81
FIGURA 72 - Tensão ao bascular	82
FIGURA 73 - Apoio inferior da cabine – Com reforço	83
FIGURA 74 - Apoio da báscula – Com reforço	84
FIGURA 75 - Tensão ao bascular – Com reforço	84
FIGURA 76 - Simulação de fadiga – Sem reforço	85
FIGURA 77 - Simulação de fadiga – Com reforço	86

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Análise carga distribuída	39
TABELA 2 - Teste de impacto	39
TABELA 3 - Comparação de análises e resultados calculados	49
TABELA 4 - Resultados dos ensaios de tenacidade à fratura (K_{IC}) para os aços TFS e TFP	55
TABELA 5 - Resultado dos ensaios de fadiga para os aços TFS e TFP	55
TABELA 6 – Resultado da análise química do material laminado (% em peso)	60
TABELA 7 – Resultado da análise química do material fundido (% em peso)	60
TABELA 8 - Resultado do ensaio de tração aço laminado	62
TABELA 9 - Resultado do ensaio de tração aço fundido	62
TABELA 10 - Dados obtidos do ensaio de fadiga axial	63
TABELA 11 - Dados obtidos do ensaio de impacto - Material laminado	64
TABELA 12 - Dados obtidos do ensaio de impacto - Material fundido	64
TABELA 13 - Dados obtidos do ensaio de dureza - Material laminado	64
TABELA 14 - Dados obtidos do ensaio de dureza - Material fundido	65
TABELA 15 - Caracterização dos aços	65
TABELA 16 - Peso e capacidade caminhão fora de via	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
Al	Alumínio
ASTM	American Society for Testing and Materials
API	American Petroleum Institute
C	Carbono
C3D4	Elemento tetraedro com quarto nós
CAD	Computer-Aided Design
DOF	Degrees Of Freedom
Cr	Cromo
Cu	Cobre
EUA	United States of América
Fe	Ferro
Kg	Quilo
HB	Dureza Brinell
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
MPa	Mega Pascal
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
N	Newton
N	Nitrogênio
Ni	Níquel
Nm	Newton Metro
P	Fósforo
PIB	Produto Interno Bruto
S	Enxofre
SAE	Society of Automotive Engineers
Si	Silício
TFS	Teste Ferroviário Standard
TFP	Teste Ferroviário Premium
3D	Três dimensões

LISTA DE SÍMBOLOS LATINOS

cc	Cilindrada (cm ³)
D	Diâmetro (mm)
D ₁	Dano (adimensional)
F	Força (N)
h	Hora (adimensional)
Hz	Hertz (1/s)
J	Energia (kg.m ² /s ²)
K _{CL}	Fator de intensidade de tensão para fechamento de trinca (MPa.√m)
K _{gf}	Força (kg/cm ²)
K _{IC}	Tenacidade a fratura do material (MPa.m ^{1/2})
Km	Quilômetro (m)
L _o	Comprimento inicial (mm)
MEF	Método dos Elementos Finitos
MIB	Materials Institute of Brazil
mm	Milímetro
min	Minuto
n	Número de repetição (unit)
N	Número de ciclos (unit)
N _f	Número de ciclos (unit)
P	Probabilidade de falha
R	Razão de carregamento (MPa)
rot	Rotação (rpm)
S	Tensão (MPa)
S _L	Limite de resistência a fadiga (MPa)
S _{máx}	Tensão máxima (MPa)
°C	Grau Celsius (adimensional)
°	Ângulo (adimensional)
%	Porcentagem (adimensional)

LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS

ΔK_{th} (MPa. \sqrt{m})	Faixa do fator de intensidade de tensão da região do limiar do <i>threshold</i>
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão máxima (MPa)
$\sigma_{m\acute{i}n}$	Tensão mínima (MPa)
σ_m	Tensão média (MPa)
σ_{nom}	Tensão nominal (MPa)
σ_a	Tensão alternada (MPa)
σ	Tensão (MPa)
Σ	Somatório

SUMÁRIO

1.1 Justificativa	19
1.2 Objetivo geral.....	20
<i>1.2.1 Objetivos específicos.....</i>	<i>21</i>
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1 Fadiga	22
<i>2.1.1 Ciclos de tensão de fadiga.....</i>	<i>24</i>
<i>2.1.1.1 Ciclos de amplitude de tensão constante.....</i>	<i>24</i>
<i>2.1.1.2 Ciclos de amplitude de tensão variável.....</i>	<i>26</i>
2.2 Método da acumulação do dano	26
<i>2.2.1 Método de contagem de ciclos de tensão</i>	<i>29</i>
<i>2.2.1.1 Método Rainflow</i>	<i>30</i>
2.3 Influência da fadiga em juntas soldadas	30
<i>2.3.1 Defeitos de solda.....</i>	<i>30</i>
<i>2.3.2 Tensões residuais</i>	<i>31</i>
<i>2.3.3 Concentração de tensões</i>	<i>33</i>
2.4 Método dos elementos finitos	35
2.5 Extensometria.....	36
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	38
3.1 Análises estruturais.....	38
3.2 Análises de fadiga.....	52
4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL E NUMÉRICA.....	58
4.1 Etapa preparatória.....	59
<i>4.1.1 Análise química.....</i>	<i>60</i>
<i>4.1.2 Análise metalográfica.....</i>	<i>60</i>
<i>4.1.3 Ensaio de tração</i>	<i>62</i>
<i>4.1.4 Ensaio de fadiga.....</i>	<i>62</i>
<i>4.1.5 Ensaio de impacto</i>	<i>64</i>
<i>4.1.6 Ensaio de dureza.....</i>	<i>64</i>
4.2 Aços utilizados na fabricação do chassi do caminhão fora de via	65
4.3 Identificação e mapeamento de trincas	66
4.4 Análise extensiométrica.....	67
4.5 Referências do caminhão fora de via.....	69
<i>4.5.1 Levantamento dimensional do chassi.....</i>	<i>70</i>
4.6 Simulação numérica.....	71
<i>4.6.1 Dados da malha</i>	<i>71</i>
<i>4.6.2 Condições de restrição</i>	<i>72</i>
<i>4.6.3 Condições de carregamento</i>	<i>72</i>
<i>4.6.4 Elaboração de reforços estruturais.....</i>	<i>77</i>
<i>4.6.5 Simulação de fadiga</i>	<i>78</i>
5 ANÁLISE DE RESULTADOS	79
5.1 Análise das tensões na cabine de operação e apoio da báscula.....	79
5.2 Análise das tensões ao bascular	82
5.3 Análise das tensões com reforços estruturais.....	83

5.4 Análise do estudo de fadiga.....	85
6 CONCLUSÃO.....	87
7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	89
REFERÊNCIAS.....	90
ANEXOS	95

1 INTRODUÇÃO

O processo de mineração é atualmente uma das principais atividades econômicas do nosso país. Sua trajetória teve início juntamente com o descobrimento do Brasil, há mais de 500 anos, momento em que, inicialmente, o país vivenciava a extração de pedras preciosas (SOUZA, ALVES E PEREIRA, 2013).

A atividade de mineração é responsável por proporcionar à população uma considerável evolução do bem-estar e melhoria da qualidade de vida, atuando direta e indiretamente no dia a dia das pessoas. Por isso, a mineração é uma atividade que se faz presente em nosso país, gerando empregos, arrecadação de impostos e bem-estar social (SOUZA, ALVES E PEREIRA, 2013).

Segundo Souza (2001), a definição do método de lavra, mais apropriado para a exploração mineral, é determinante para o sucesso de qualquer empresa desse segmento. Assim como estudar os fatores que envolvem os custos de mineração e recobrimento de estéril são essenciais para definir se o processo de mineração será realizado a céu aberto ou de maneira subterrânea.

Situações como a estabilidade política de um país e questões sociais e geográficas podem influenciar diretamente no método de lavra. Por exemplo, mineração em regiões remotas não desperta o interesse de operários qualificados e de sua permanência no local, dessa forma, esse fator pode influenciar nos custos e produtividade.

Para realização da exploração mineral em minas a céu aberto e manutenções das condições operacionais das vias, se faz necessário a utilização de diversos equipamentos que podem ser divididos em cinco classes.

- a) Equipamentos de perfuração;
- b) Equipamentos de desmontes;
- c) Equipamentos de carga;
- d) Equipamentos de transporte;
- e) Equipamentos de apoio.

Informações do IBRAM (Instituto Brasileiro de Mineração) destaca o Brasil como o segundo maior produtor de minério de ferro do mundo, sendo o estado de Minas Gerais responsável por 67%, Pará 29,3% e outros 3,7%, da produção nacional.

No período de 2011 a 2017, o cenário econômico no setor de mineração passou por algumas turbulências, ocasionando uma forte queda no preço do minério de ferro, conforme apresentado na Figura 1, onde os valores que se encontravam a US\$190 a tonelada de minério com teor de 62% de ferro, chegou à US\$40 a tonelada, fator econômico preocupante para inúmeras empresas de mineração.

Figura 1 - Índice de preço do minério de ferro (finos)



Fonte: Vale (2017)

A forte queda nos preços do minério de ferro e o atual cenário econômico motivou inúmeras empresas de mineração a elaborarem estratégias para diminuir os custos de produção: otimização recursos, redução de gastos e investimentos em estudos para a prevenção de falhas nos equipamentos responsáveis pelo processo de mineração.

O caminhão fora de via na mineração a céu aberto é atualmente considerado um dos principais equipamentos, pois é responsável por transportar grandes quantidades de massa por longas distâncias, assim como flexibilidade para acompanhar a evolução das minas.

Pelo fato desses equipamentos ser de grande porte e possuir elevado peso, normalmente a locomoção é realizada em vias não pavimentadas, que em épocas de chuvas ficam extremamente críticas, passando a ser um desafio manter a mina em operação. Essa condição operacional, submete os caminhões a altos esforços cíclicos durante o ciclo operacional, que, por sua vez, faz com que alguns componentes venham a falhar por fadiga em um curto espaço de tempo.

Para Collins (1993), as falhas decorrentes deste fenômeno são acumulativas e resultam normalmente em falhas abruptas e sem sinais prévios visíveis. Outro ponto importante é que um componente, mesmo que deixado inativo por longos períodos de tempo, mantém o dano acumulado em sua estrutura e, retornando à operação, o processo de dano continua a ser acumulado podendo levar à falha.

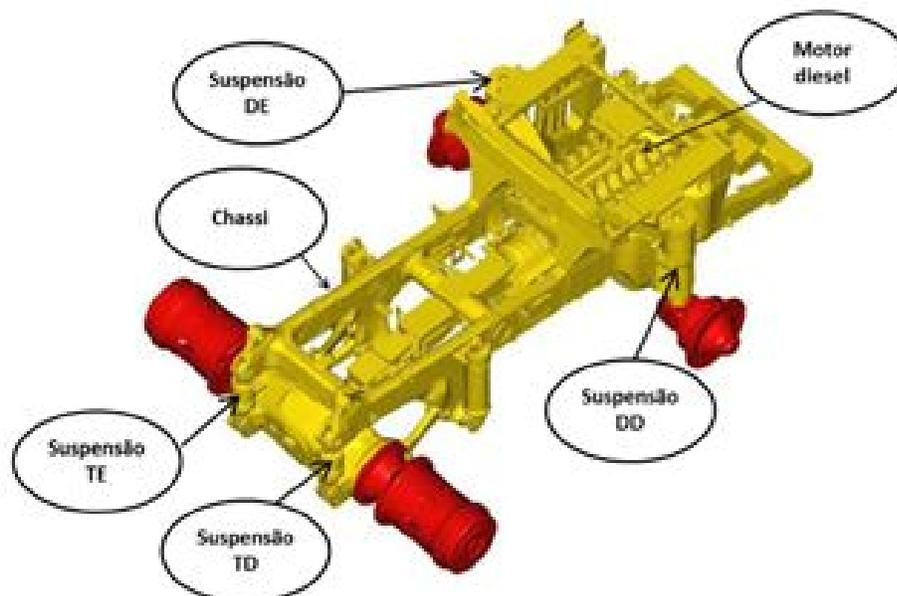
Neste contexto, o presente trabalho, busca estudar o comportamento estrutural do chassi do caminhão fora de via responsável pelo transporte de minério de ferro na mina de Brucutu, localizada em Minas Gerais, assim como caracterizar os materiais utilizados na fabricação do chassi e propor melhorias para reduzir as tensões em pontos críticos.

1.1 Justificativa

O chassi é o componente básico do equipamento que consiste de uma estrutura interna e é fabricado com materiais de alta resistência. Sendo responsável por suportar todas as cargas mecânicas que o equipamento está submetido, de forma a garantir a segurança e operação de todos os sistemas, (SOARES e outros, 2012).

Vários componentes são acoplados ao chassi, tais como: motor, sistema de freios, caixa de marcha, transmissão, sistema de suspensão e conversor de torque. Normalmente chamados trem de força, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Chassi e trem de força do caminhão fora de via



Fonte: Adaptado de VIEIRA, Clério Santos (2016, p. 58)

Segundo Lopes (2014), o bom desempenho de qualquer equipamento requer uma adequada rigidez do chassi, o que significa que a estrutura deve estar corretamente dimensionada para resistir à flexão, torção, impactos e consequentemente à fadiga.

No processo de mineração a céu aberto, os caminhões fora de via são responsáveis por movimentar grandes quantidades de cargas por longas distâncias e pistas irregulares. Essa característica operacional exige que os chassis sejam submetidos à alta tensão cíclica, ocasionando trincas por fadiga em vários pontos deste componente essencial para o desempenho do equipamento, conforme pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Trincas no chassi do caminhão fora de via



a) Berço do motor diesel

b) Apoio da báscula

Fonte: Fotos do autor

A realização desse estudo é justificada pelo fato da vida útil do caminhão fora de via está correlacionada à condição estrutural do chassi. Ou seja, minimizando o aparecimento de trincas, consequentemente será possível aumentar a vida útil do equipamento, que atualmente é de aproximadamente 60.000 horas de trabalho, assim como evitar falhas, acidentes e reduzir os custos associados ao reparo de trincas. Por fim, se espera que a realização desse estudo possa contribuir para realização de novas pesquisas direcionadas para melhorar a condição operacional dos equipamentos, dimensionamentos das estradas e vias de acesso à mina de céu aberto contribuindo para estudos em diversas áreas do processo de mineração.

1.2 Objetivo geral

O objetivo geral desse trabalho consiste em avaliar o comportamento estrutural do chassi do caminhão de grande porte, conhecido como caminhão fora de via, amplamente

utilizado no processo de mineração a céu aberto. Bem como identificar as tensões em que o chassi está submetido durante o ciclo operacional, fatores esses que são contribuintes para a ocorrência de falhas por fadiga.

1.2.1 Objetivos específicos

- a) Compreender as tensões atuantes no chassi do caminhão fora da via durante o ciclo operacional, e com a utilização da técnica de análise por elementos finitos, prever a possível formação de trincas;
- b) Propor melhorias na estrutura do equipamento para diminuir a concentração de tensão em pontos críticos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem por finalidade reunir conceitos teóricos e equações que auxiliam no estudo do comportamento das estruturas metálicas, assim como apresentar algumas teorias correlacionadas à fadiga que serão úteis para a realização desse trabalho.

2.1 Fadiga

ASTM E-1823 (1996), descreve o termo fadiga como um processo pelo qual mudanças progressivas e localizadas, de natureza irreversível, ocorrem no material sujeito a tensões ou deformações flutuantes. Esses esforços podem resultar em trincas ou na falha completa do material.

O termo “fadiga” é usado, porque esse tipo de falha normalmente ocorre após um longo período de tensão repetidas ou ciclos de deformação, (CALLISTER,2008).

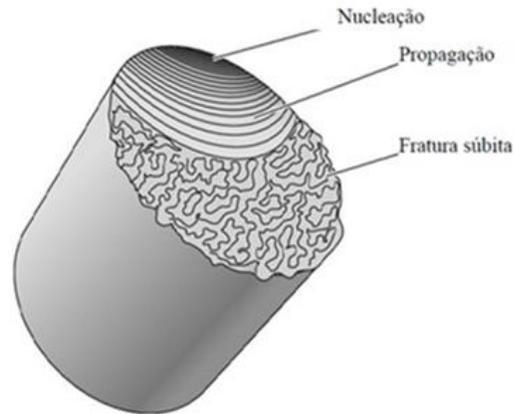
Dowling (1993) caracteriza a fadiga pela separação catastrófica de um componente mecânico em duas ou mais partes, resultante da aplicação de cargas de intensidade ou deformações que variam ao longo do tempo. Tendo origem de formação a nível microscópico e posterior propagação de uma ou mais trincas que se ramificam no material até a ocorrência da falha completa.

Para Vieira e outros (2016), os carregamentos cíclicos podem ser divididos em quatro categorias dependendo de sua fonte, sendo classificadas como:

- a) Cargas estáticas caracterizam por estarem continuamente presentes e não variarem ao longo do tempo;
- b) Cargas de trabalho, que variam ao longo do tempo em função da operação dos componentes;
- c) Cargas vibratórias, relativamente de alta frequência e são resultantes do ambiente de trabalho ou de efeitos secundários de funcionamento dos componentes como turbulência ou o atrito;
- d) Cargas acidentais, que são eventos considerados raros e que não ocorrem em circunstâncias normais de operação.

Para Branco (1999), o fenômeno da fadiga é composto por três fases: o início da fissura da fadiga ou nucleação, a propagação da fissura e a ruptura final conforme ilustrado na Figura 4.

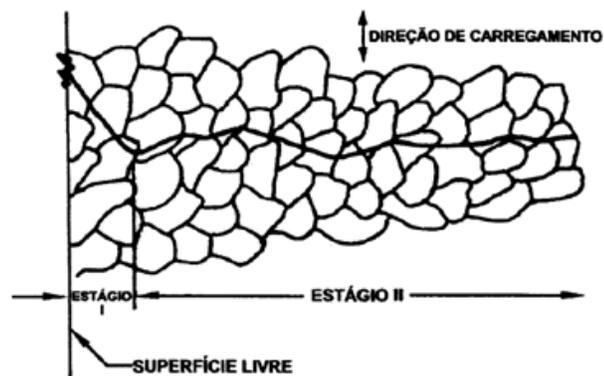
Figura 4 - Fases da fadiga



Fonte: Askeland (2008)

Falcão e outros (2002) descreve que uma vez ocorrido a nucleação, a trinca tende a crescer ao longo dos planos de deslizamento ativos, e seu início apresenta uma inclinação de aproximadamente 45° em relação ao eixo da máxima tensão de tração. Esse regime de propagação é denominado estágio I do crescimento da trinca, cuja penetração em um corpo de prova, raramente ultrapassa alguns décimos de milímetros. A trinca logo se acomoda e começa a seguir um curso perpendicular à direção da máxima tensão de tração. Esse modo de propagação é caracterizado como estágio II, em que a trinca continua a crescer até atingir o tamanho crítico, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Crescimento da trinca por fadiga



Fonte: Falcão e outros (2002)

Ellyin (1997) complementa descrevendo que a trinca irá crescer como resultado da deformação plástica cíclica sofrida pelo material, onde em materiais policristalinos, os contornos de grão frequentemente atuam como barreiras ao crescimento de micro trincas. Por outro lado, em altas temperaturas ou em meios corrosivos, os contornos de grãos atuam como fontes de nucleação e crescimento de trincas.

Para Hertzberg (1996), a maioria dos componentes mecânicos precisam resistir a inúmeras cargas aplicadas, inclusive com reversões de sentido, durante sua vida útil.

Neste contexto, é possível observar que os equipamentos móveis de mineração estão em sua maior parte do tempo submetidos a carregamentos dinâmicos, em especial os caminhões fora de via, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Transporte de minério



Fonte: Foto do autor

2.1.1 Ciclos de tensão de fadiga

Segundo Martins (2013) e Bader (2014), os ciclos de tensão de fadiga podem ser de amplitude constante ou variável. Os primeiros ocorrem normalmente em peças como máquinas rotativas, tais como eixos e engrenagens. Já as ondas dos navios, a vibração nas asas dos aviões e o tráfego em pontes são exemplos de solicitações de amplitude de tensão variável.

2.1.1.1 Ciclos de amplitude de tensão constante

Meinberg (2010) e Morais (2013) descrevem que, quando um componente é submetido a um carregamento cíclico de tensões, danos de fadiga são gerados através de um histórico de picos de tensão. Para isso, são utilizadas as curvas de Wohler, que podem ser constituídas de diferentes formas.

Um ciclo de carregamento pode ser definido por parâmetros obtidos através da tensão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$) e mínima ($\sigma_{m\acute{i}n}$).

Esses parâmetros são utilizados para caracterizar conjuntos de carregamentos para que possam ser comparáveis, onde se pode ter:

- a) Tensão média (σ_m) – Média aritmética entre a tensão máxima e tensão mínima, dada pela equação 1;

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n})}{2} \quad (1)$$

- b) Tensão alternada (σ_a) – Metade da diferença entre a tensão máxima e tensão mínima, dada pela equação 2;

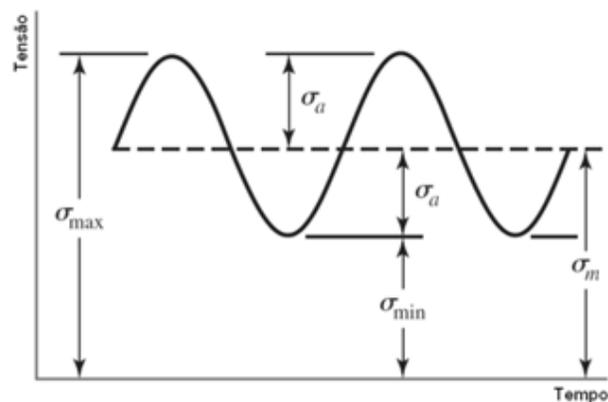
$$\sigma_a = \frac{(\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n})}{2} \quad (2)$$

- c) Razão de carregamento (R) – Razão entre a tensão mínima e tensão máxima, dada pela equação 3.

$$R = \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{\sigma_{m\acute{i}n}} \quad (3)$$

Na Figura 7, é possível observar uma forma de onda com ciclo de amplitudes constantes.

Figura 7 - Ciclo de amplitude constante

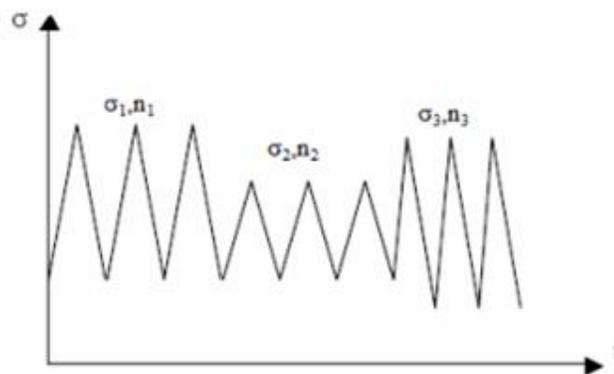


Fonte: Martins e outros (2013)

2.1.1.2 Ciclos de amplitude de tensão variável

A probabilidade de uma estrutura ou elemento estrutural estar sujeito a solicitações com a mesma amplitude de tensão é reduzida. Assim, a análise da fadiga se torna mais complexa, onde se faz necessário optar por uma simplificação, representando a solicitação real através de várias combinações de carregamentos constantes, conforme Figura 8.

Figura 8 - Ciclo de amplitude de tensão variável



Fonte: Martins e outros (2013)

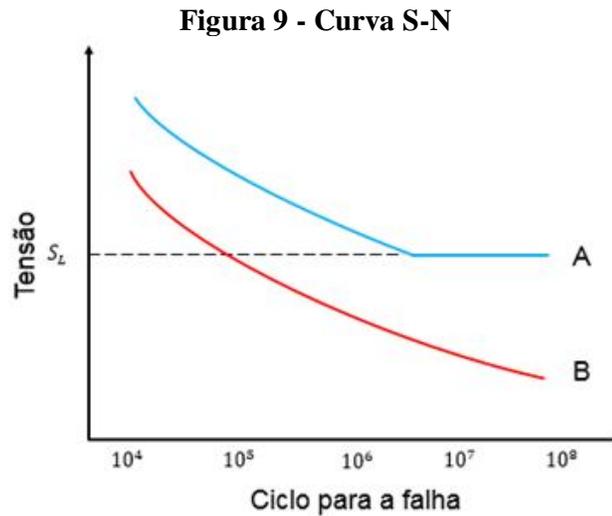
2.2 Método da acumulação do dano

Segundo Collins (1993), as teorias de danos acumulativos propostas por Palmgren e Miner, também conhecidas como teoria do dano linear, são utilizadas para cargas cíclicas de amplitude constante. Estas curvas são denominadas S-N, respectivamente as iniciais dos termos tensão, do inglês *stress* e do número de ciclos para a ocorrência da falha. São plotadas curvas de forma a identificar graficamente a vida de componentes sujeitos a cargas repetitivas. Curvas essas, que normalmente são plotadas com os dados da vida em uma escala logarítmica.

Para Martins (2013), o método de acumulação de dano consiste na determinação do nível de dano que um dado número de ciclos de tensão registrado provoca em um elemento estrutural.

Castro (2008) descreve que, quanto menor a tensão aplicada no material, maior será o número de ciclos suportado até a ocorrência da ruptura. Na Figura 9, é possível verificar que para os aços, a curva apresenta um patamar que corresponde ao limite de resistência à fadiga (S_L), curva A. Esse limite de fadiga representa o maior valor da amplitude da tensão alternada que não causará falha no material mesmo que seja infinito o número de ciclos.

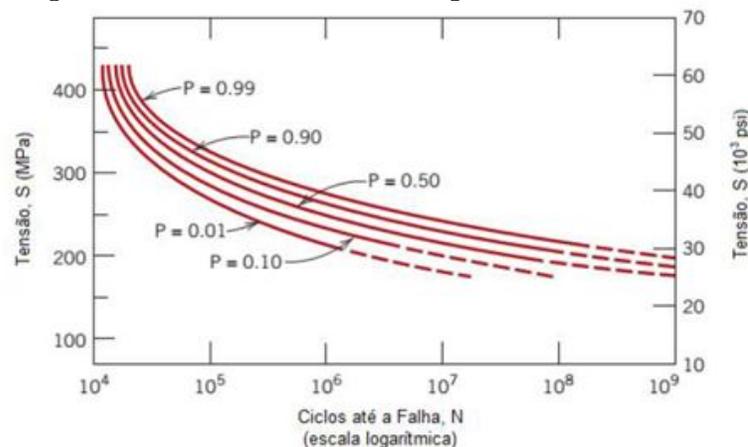
Callister (2007) e Morais (2013) descrevem que, a maioria das ligas não ferrosas (alumínio, cobre, magnésio) não possui limite de resistência à fadiga, conforme visualizado na curva B, nestes casos, a curva S-N continua sua tendência decrescente com o aumento do número de ciclos. Portanto, a fadiga irá ocorrer independente da magnitude da tensão.



Fonte: Adaptado Castro (2008)

Devido à natureza probabilística da fadiga, técnicas estatísticas estão sendo desenvolvidas para determinar o comportamento da fadiga em termos de probabilidades. Uma destas técnicas é a representação das curvas S-N de um dado material com várias curvas, sendo que cada uma representa uma probabilidade de falha. Na Figura 10 a seguir, é possível visualizar esta técnica, onde P é a probabilidade de falha:

Figura 10 - Curva S-N utilizando probabilidade de falha



Fonte: Adaptado Castro (2008)

Segundo Meinberg e outros (2010), a regra de acúmulo de danos foi desenvolvida por Palm Green em 1924 e depois aperfeiçoada por Miner em 1945. Comumente chamado de Regra de Miner, esse método tem como objetivo determinar o dano que um material acumula sobre determinadas condições de carregamentos repetidos e variados. A Regra de Miner é descrita pela equação 4, onde:

$$\text{Razão de ciclo} = \frac{n}{N} \quad (4)$$

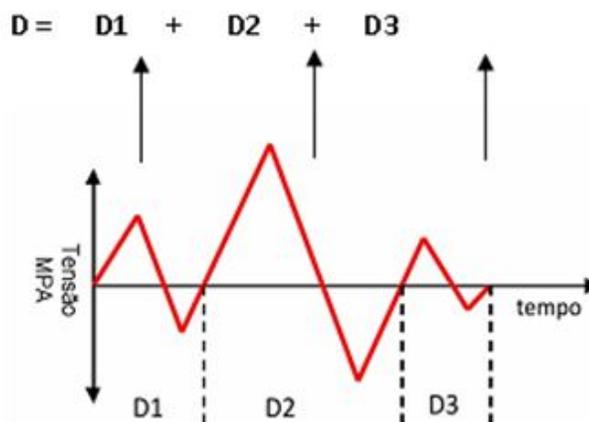
sendo n o número de ciclos para cada nível de tensão σ e N é a vida esperada em fadiga em um ciclo de tensão σ .

A fração de dano D é definida como a fração de vida em fadiga usada por um ou uma série de eventos. A falha da teoria de acúmulo de dano assume que a falha irá ocorrer quando o número de danos for ≥ 1 , sendo expressada pela equação 5.

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \geq 1 \quad (5)$$

Após a medição experimental, o sinal temporal é dividido em ciclos. Cada ciclo contado causa um dano, conforme demonstrado na Figura 11.

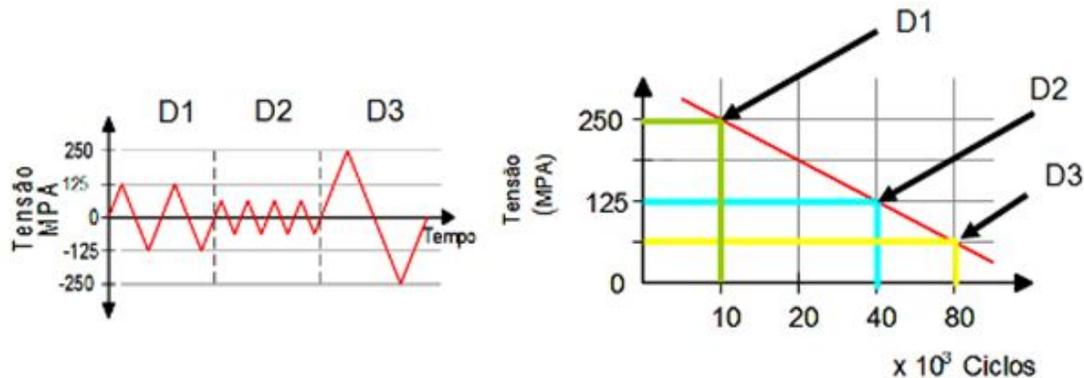
Figura 11 - Representação esquemática de uma contagem de ciclo



Fonte: Meinberg e outros (2010)

Neste caso, a fração de dano causado é comparada com a curva de fadiga do material e somada aos outros valores de dano conforme Figura 12.

Figura 12 - Danos causados numa história de tempo de um sinal e comparados com a curva do material obtendo a vida



Fonte: Meinberg e outros (2010)

Em seguida, se identifica o número de ciclos necessários para causar a falha de uma determinada peça.

Assim, para se chegar à vida estimada de um material, pode-se fazer uso da equação 6, onde:

$$Vida = \frac{1}{\sum D_i} \quad (6)$$

2.2.1 Método de contagem de ciclos de tensão

Segundo Martins (2013), o registro temporal das amplitudes de tensão, na maioria das vezes, não apresenta uma forma harmônica, mas sim uma forma aleatória. Como consequência dessa situação, a obtenção da variação de tensão em um dado ponto da estrutura, bem como o seu respectivo ciclo, se revela uma tarefa complicada. Neste contexto, métodos de contagem de ciclos de tensões foram desenvolvidos para possibilitar resolver estes problemas.

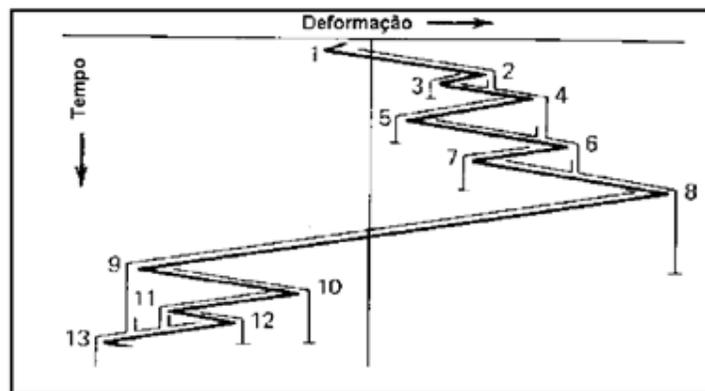
Ariduru (2004) descreve que os métodos de contagem de ciclos foram inicialmente desenvolvidos para o estudo de dano de fadiga em estruturas sujeitas a cargas dinâmicas variantes. O objetivo era, através destes métodos, caracterizar um elemento em serviço, para comparar com os testes de laboratório de amostras e assim estimar a vida de fadiga. Métodos como “*Level crossing*”, “*Peak*”, “*Simple Range*”, “*Range Pair*” e “*Rainflow*” foram métodos de contagem de ciclos desenvolvidos, baseados nas amplitudes de tensão ou deformação. Atualmente o método *Rainflow* é um dos métodos preferidos e amplamente utilizado devido ao seu sucesso ao longo dos anos.

2.2.1.1 Método Rainflow

O método *Rainflow* de contagem de ciclos foi inicialmente proposto por M. Matsuishi e T. Endo, em 1968, para contar os ciclos e meios ciclos de sinais de deformação no tempo. O método de contagem é baseado no comportamento tensão-deformação do material.

Segundo Petracconi (2008), a contagem dos ciclos através do “*Rainflow*” é iniciada provocando virtualmente “quedas/fluxos de chuva” sucessivamente dentro de cada pico (máximo) ou vale (mínimo), como pode ser observado na Figura 13.

Figura 13 - Método contagem de ciclos



Fonte: Petracconi (2008)

2.3 Influência da fadiga em juntas soldadas

A condição de fadiga em estruturas ou componente qualquer é dependente da nucleação de trincas e propagação das mesmas, sendo influenciadas por uma série de fatores como o estado estrutural do material e suas propriedades mecânicas, além de condições experimentais, como razão de carga, frequência, temperatura, presença de meios corrosivos, dentre outros fatores. Em se tratando de estruturas soldadas, além dos fatores mencionados, a propagação da fadiga pode ser gerada em decorrência do processo ou método utilizado para realizar a solda, onde se podem destacar as tensões residuais, alteração na microestrutura e morfologia das fases, (RIBEIRO, 2011).

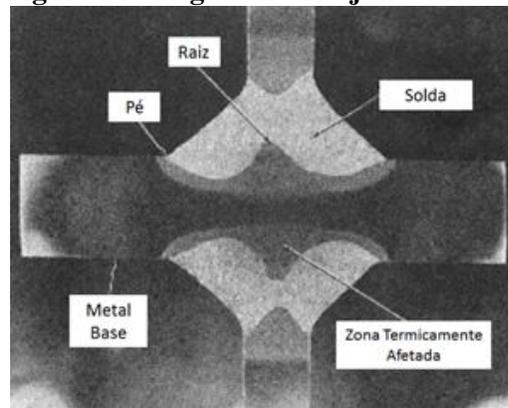
2.3.1 Defeitos de solda

Segundo Ribeiro e outros (2011), os defeitos ou discontinuidades no processo de soldagem mais comuns são: porosidades, inclusões de escória, fusão incompleta e mordeduras. Que podem influenciar significativamente na fadiga do material, pois na maioria dos casos, eles conduzem a uma concentração de tensão elevada, acelerando o crescimento de trincas por fadiga.

Mansur e outros (2011) complementa descrevendo que o processo de solda introduz tensões residuais devido a geometria resultante da fusão do material soldado e de seu resfriamento heterogêneo. Além da alteração na microestrutura e da composição química do material na ZTA (Zona Termicamente Afetada), introduzida pela soldagem, também ocorre o efeito da descontinuidade dos passes e a formação de bolhas, assim como vazios que podem contribuir para a nucleação de trincas, reduzindo a resistência à fadiga.

Normalmente, em uma estrutura soldada, submetida a carregamento cíclico, o início da trinca se dá na “raiz” ou no “pé” da solda conforme apresentando na Figura 14, onde se observa três regiões bem definidas: o metal base, o material da solda e a ZTA. Essas regiões possuem diferentes microestruturas, tensões residuais, defeitos e propriedades mecânicas, Goes (2010).

Figura 14 - Região de uma junta soldada



Fonte: Goes e outros (2010)

2.3.2 Tensões residuais

De acordo com Masubushi (1980), tensões residuais são as tensões que podem existir em um corpo se todas as cargas externas forem removidas. Podendo ocorrer quando um corpo é sujeito a mudanças bruscas e não uniformes de temperatura, conhecidas como tensões térmicas, devido a transformações de fase ou efeitos mecânicos que resultem em deformações plásticas.

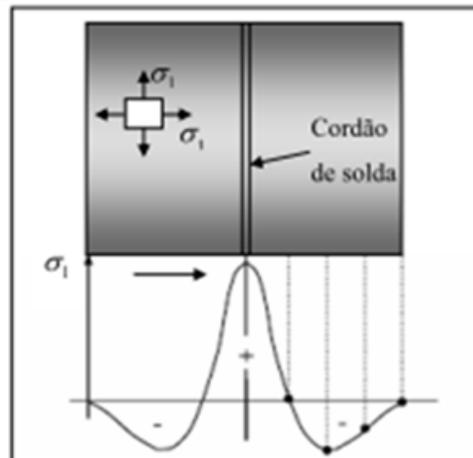
A tensão residual no processo de soldagem pode ser dividida em três modelos:

- a) Tensões de restrição, que são caracterizadas pelo processo ao qual o metal base é submetido ao aquecimento e resfriamento em seguida, ocasionando expansões térmicas e contrações do material;
- b) Tensões microestruturais, que estão correlacionados à transformação micro estrutural e o tempo em que elas ocorrem, sendo de fundamental importância para este tipo de tensão residual;
- c) Tensões de espessura, que se referem ao gradiente de resfriamento ao longo da espessura da chapa soldada, influenciando diretamente a produção de tensões residuais.

Cofiño e outros (2008) descrevem que, as tensões residuais apresentam caráter elástico, assim, o valor máximo que estas tensões podem atingir é a tensão de escoamento local do material. Também se define as tensões residuais como sendo ordinárias, ou seja, uma tensão trativa irá se somar com outra tensão trativa, ou ainda, uma tensão trativa irá se subtrair com outra tensão compressiva e vice-versa.

Um padrão típico de tensões residuais longitudinais macroscópicas, encontrado em chapas finas soldadas, está apresentado na Figura 15. Onde é apresentado o valor máximo de tensão trativa no cordão de solda e redução deste valor, na medida em que se afasta do cordão, até que a tensão se torne compressiva, para manter o equilíbrio dos carregamentos internos, (COFIÑO, 2008).

Figura 15 - Comportamento das tensões residuais em uma junta soldada



Fonte: Cofiño e outros (2010)

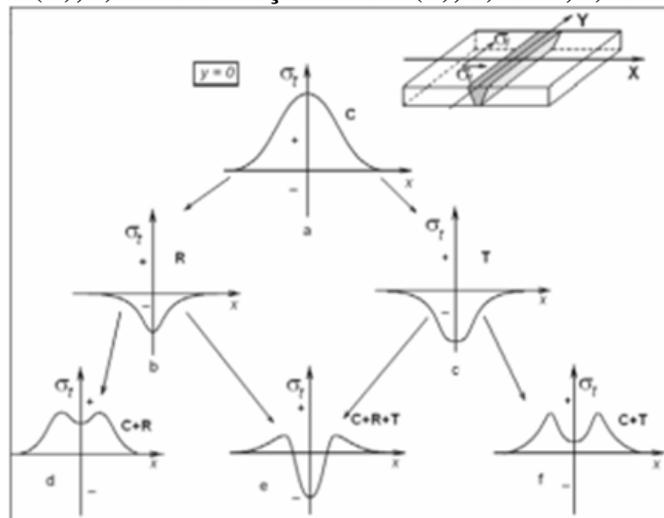
Em busca de minimizar os impactos das tensões residuais, Aggen e outros (1998) descreve que, quando uma estrutura contendo tensões residuais é submetida a tensões tratativas, alterações nas tensões residuais são observadas. Fato que, se a tensão aplicada alcançar o limite de escoamento do material, a tensão residual não terá mais efeito.

Outro método para alívio de tensões a ser utilizado pode ser o térmico, de modo que a estrutura soldada é aquecida a temperaturas e tempos adequados, de acordo com o material e sua espessura, e resfriado lentamente.

Segundo Esteves (2015), as tensões residuais provenientes da soldagem são tensões residuais internas em equilíbrio, que permanecem na estrutura após a realização de uma operação desta magnitude. Essas tensões são geradas por escoamentos parciais localizados, que ocorrem durante o ciclo térmico de soldagem, e podem surgir, tanto no metal depositado, zona termicamente afetada e/ou metal base próximo ao cordão de solda, com variação significativa no seu valor absoluto, quanto em tensões de compressão, como tensões de tração.

Essas tensões podem surgir devido ao resfriamento rápido da peça, resfriamento superficial e transformação de fases, conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 16 - Representação esquemática da variação de tensões residuais transversais ao cordão de solda provenientes dos efeitos: a) contração (C); b) resfriamento superficial mais intenso (R); c) transformação de fase (T); d) C+R; e) C+R+T; f) C+T.



Fonte: Esteves e outros (2015)

2.3.3 Concentração de tensões

Quando um gradiente de tensão ocorre em uma área localizada, da estrutura, a alta tensão conduz a uma concentração de tensões (YOUNGS, 1989).

Anderson (2004) ressalta que uma descontinuidade geométrica no corpo, como um furo ou um entalhe, resulta em uma distribuição de tensões não uniforme na vizinhança da descontinuidade. Em alguma região próxima à descontinuidade, as tensões serão superiores à média de tensões distantes da mesma.

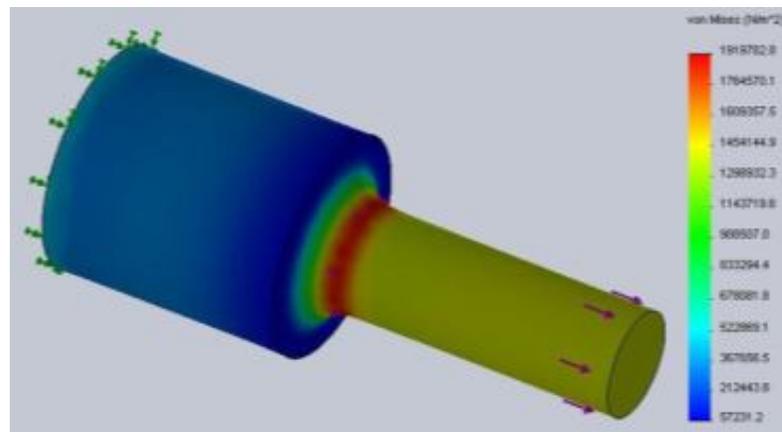
Para Pilkey (2008), a presença de ressaltos, sulcos, furos, chanfros, ranhuras e assim por diante, resulta em modificações da distribuição de tensões, ocasionando elevações localizadas de tensões. Essa elevação de tensões localizada é conhecida como concentração de tensões e pode ser medida pelo fator de concentração de tensões. Na Figura 17, pode-se observar um exemplo de concentração de tensão próximo ao furo.



Fonte: Lara (2016)

Morais (2013) complementa Pilkey (2018) descrevendo que as tensões existentes em concentradores de tensão podem ser determinadas por métodos experimentais ou por métodos avançados de análise, incluindo o método de elementos finitos, conforme ilustrado na Figura 18.

Figura 18 - Análise de tensões em um corpo de prova

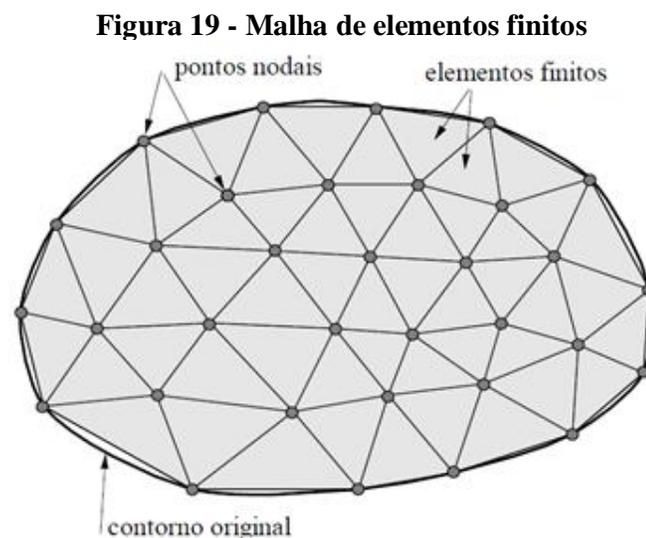


Fonte: Moraes (2013)

2.4 Método dos elementos finitos

Segundo Pereira e outros (2012), o início do desenvolvimento do Método dos Elementos Finitos (MEF) ocorreu no final do século XVII, quando Gauss propôs a utilização de funções de aproximação para aplicação em soluções de problemas matemáticos. Por mais de um século, diversos matemáticos desenvolveram teorias e técnicas analíticas para a solução de problemas, porém pouco se evoluiu devido à dificuldade e limitação que havia na época para o processamento de equações algébricas. O desenvolvimento prático deste método ocorreu apenas muitos anos mais tarde devido aos avanços tecnológicos, por volta de 1950, com a advento da computação.

Para Souza (2003), o Método dos Elementos Finitos (MEF) consiste em diferentes métodos numéricos que aproximam a solução de problemas de valor de fronteira descritos, tanto por equações diferenciais ordinárias quanto por equações diferenciais parciais. Isso se dá através da subdivisão da geometria do problema em elementos menores e de geometria simples, chamados elementos finitos, nos quais a aproximação da solução exata pode ser obtida por interpolação de uma solução aproximada. A divisão do domínio (meio contínuo) do problema em sub-regiões de geometria simples (formato triangular, quadrilateral, cúbico, etc.), pode ser melhor observado na malha de elementos finitos representado na Figura 19.



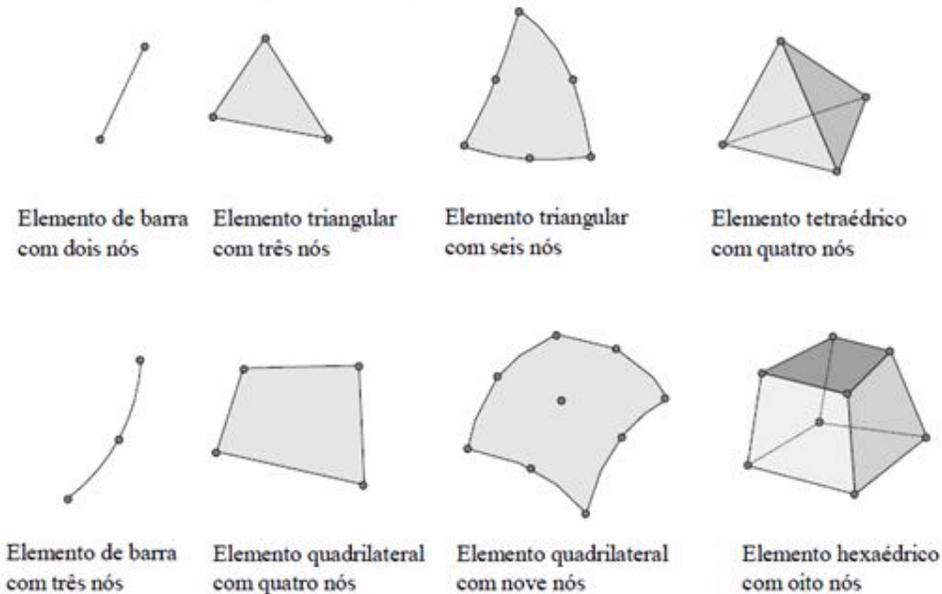
Fonte: Souza (2013)

Os elementos finitos utilizados na discretização (subdivisão) do domínio do problema são conectados entre si através de determinados pontos, denominados nós ou pontos nodais. Ao

conjunto de elementos finitos e pontos nodais, dá-se, usualmente o nome de malha de elementos finitos.

Diversos tipos de elementos finitos já foram desenvolvidos. Estes apresentam formas geométricas diversas em função do tipo e da dimensão do problema. A Figura 20 apresenta a geometria de alguns desses tipos de elementos finitos.

Figura 20 - Tipos de elementos finitos



Fonte: Souza (2013)

A precisão do método depende da quantidade de nós e elementos, assim como a determinação do tamanho e tipo dos elementos presentes na malha. Um dos aspectos mais importantes do MEF diz respeito a sua convergência. Embora se trate de um método aproximado, é possível demonstrar que uma malha é consistente, à medida que o tamanho dos elementos finitos tende a zero, e conseqüentemente, a quantidade de nós tende a infinito, a solução obtida converge para a solução exata do problema.

Ou seja, quanto menor for o tamanho e maior for o número de elementos em uma determinada malha, mais precisos serão os resultados da análise.

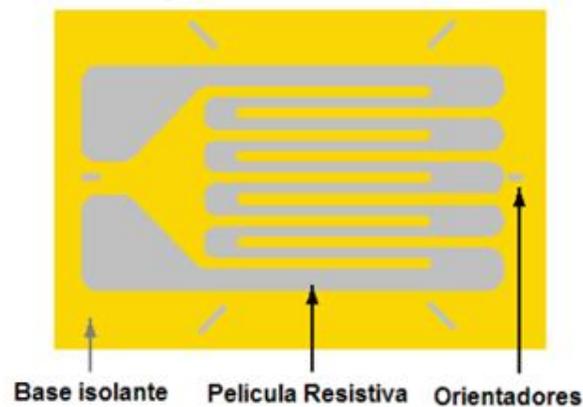
2.5 Extensometria

Segundo Lara (2016), extensometria é uma metodologia utilizada para a medição experimental de deformações e, a partir dela, obtenção das tensões atuantes em um determinado corpo de prova.

Meinberg (2010) complementa descrevendo que as tensões atuantes em componentes podem ser medidas, entre outras técnicas, através de extensômetros e acelerômetros.

O extensômetro é formado por um dispositivo resistivo em forma de película aplicada sobre uma base isolante, este componente é aplicado com a utilização de adesivos em um determinado ponto de investigação na peça. Ele é formado de uma parte isolante chamada de base, onde há fixado uma camada resistiva no formato desejado, segundo determinada aplicação. As marcas inscritas na base do extensômetro são chamados de orientadores e servem para facilitar seu posicionamento na peça a ser ensaiada, conforme se observa na Figura 21.

Figura 21 - Extensômetro



Fonte: Meinberg e outros (2010)

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

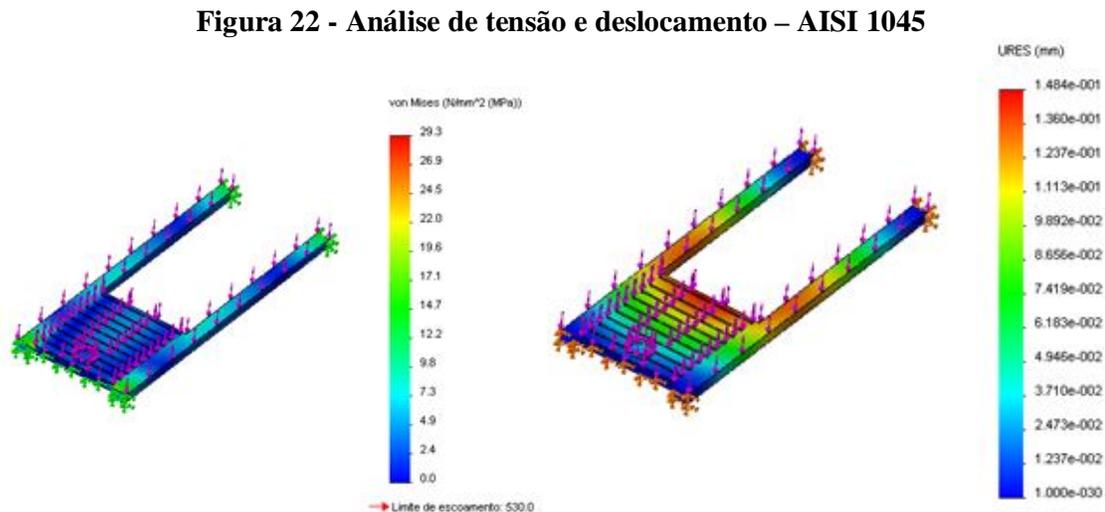
Este capítulo tem por finalidade apresentar estudos correlacionados ao comportamento estrutural em chassis de diversos equipamentos, onde com a utilização de ferramentas computacionais foi possível compreender o comportamento da estrutura após aplicação dos carregamentos.

3.1 Análises estruturais

Segundo Ost e outros (2011), para se realizar o desenvolvimento de um chassi é necessário ter conhecimentos na área de estruturas, carregamentos, suporte e ancoragem dos pontos de fixação dos subsistemas do veículo, assim como o valor de rigidez do chassi, que pode ser obtido por meio do conhecimento adquirido em solicitações extremas provenientes de condições de trabalho ou ensaios realizados.

Ost e outros (2011) realizaram a modelagem do chassi de uma transplantadora com a utilização do *software* Solidworks. O estudo teve como objetivo identificar entre os materiais AISI 1020, AISI 1045, ASTM 36 e liga de alumínio 1060, qual o mais apropriado para a fabricação do equipamento. Para isso, foi utilizada uma carga de 2000N para a análise, valor este, igual ao peso bruto total do equipamento.

Na Figura 22, é possível verificar a distribuição das tensões e deslocamento no chassi da transplantadora, ao utilizar o aço AISI 1045.



Fonte: Ost e outros (2011, p. 6)

OST e outros (2011) também realizaram testes de impacto à estrutura da transplantadora, com o objetivo de compreender como a estrutura poderá comportar-se, caso seja submetida a algum impacto, para realização do teste foi utilizado uma força de 3000N. Onde nas Tabelas 01 e 02, verifica-se os valores consolidados referentes à realização dos testes carga distribuída e impacto, respectivamente.

Tabela 1 - Análise carga distribuída

Material	Limite de escoamento (MPa)	Valor máximo de tensão (MPa)	Descolamento máximo
AISI 1020	351,6	29,3	0,1521
AISI 1045	530,0	29,3	0,1484
ASTM A36	250,0	29,9	0,1520
Alumínio 1060	27,6	28,6	0,4410

Fonte: Adaptado Ost e outros (2011, p. 10).

Tabela 2 - Teste de impacto

Material	Limite de escoamento (MPa)	Valor máximo de tensão (MPa)	Descolamento máximo
AISI 1020	351,6	157,2	0,4557
AISI 1045	530,0	157,2	0,4446
ASTM A36	250,0	157,6	0,4460
Alumínio 1060	27,6	156,6	0,1319

Fonte: Adaptado Ost e outros (2011, p. 11)

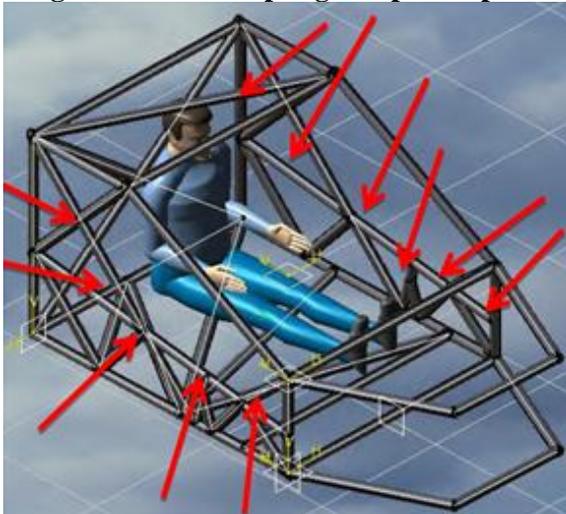
Ost e outros (2011) demonstra em seu estudo que o único material que não se recomenda aplicar ao caso da transplantadeira de mudas é a liga de alumínio 1060, pois não apresentou resultados satisfatórios, onde o limite de escoamento do material foi ultrapassado em vários pontos. No entanto, dos demais materiais testados (AISI 1020, AISI 1045 e ASTM A36) é possível optar por aquele que apresentar o menor custo de fabricação.

Pereira (2012) teve a oportunidade de analisar o comportamento estrutural do chassi tubular fabricado do material cromo molibdênio aço SAE 4130, aplicado a um veículo de *stock-car*, no qual são submetidos a impactos laterais, impactos esses, considerados os mais perigosos para a integridade física do piloto. Para a realização do estudo, utilizou-se o *software* Catia VR R20 para fazer o modelo, e o *software* Abaqus, para a análise numérica.

Pereira (2012) define impacto lateral como sendo as colisões do lado do veículo capazes de imprimir ao ocupante uma aceleração que o afasta do ponto de impacto, podendo levá-lo a colidir com outras partes do veículo. Essa situação pode resultar em lesões semelhantes às do impacto frontal, mas, além destas, podem ocorrer lesões de compressão do tronco e de pelve do lado da colisão.

Na Figura 23, são apresentados os locais mais perigosos para o piloto, em caso de acidentes.

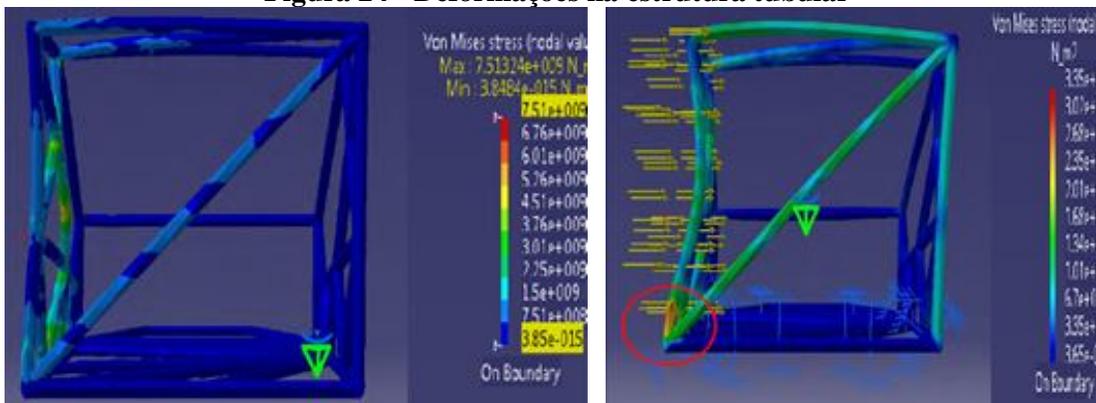
Figura 23 - Locais perigosos para o piloto



Fonte: Pereira, Bani Valério Alves (2012, p. 76)

Pereira (2012) observou em sua análise que, ao aplicar uma força concentrada de 4585,00N na lateral da estrutura, o resultado da tensão máxima encontrado foi de 7513,24 MPa. E ao aplicar essa mesma força de forma distribuída na estrutura, a tensão máxima encontrada foi de 3350MPa, conforme apresentando na Figura 24 (a-b). Sendo assim, foi possível concluir que a estrutura não irá resistir aos impactos laterais, visto que a resistência do material utilizado (cromo molibdênio) é de 590MPa à 760MPa.

Figura 24 - Deformações na estrutura tubular



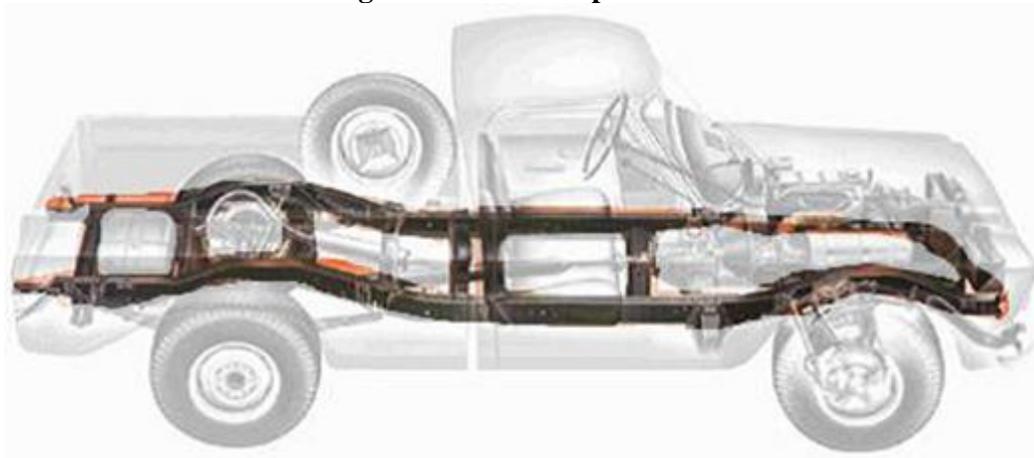
a) Carga concentrada – Vista esquerda

b) Carga distribuída - Vista direita

Fonte: Pereira, Bani Valério Alves (2012, p. 85-91)

Segundo Furtado e outros (2013), o chassi tipo escada é uma estrutura onde o chassi é separado da carroceria. Possui como vantagem a flexibilidade de aplicações, com a possibilidade de montar, sobre o mesmo chassi, diversos tipos de carroceria diferentes. Esse modelo de chassi se assemelha à forma de uma escada, sendo constituído por duas vigas longitudinais, que acompanham todo o comprimento do veículo, conhecidas como longarinas, ligadas entre si, por inúmeras vigas transversais, conhecidas como transversinas. Devido a esta característica, costuma ser muito utilizado em veículos comerciais leves, como pick-ups e em veículos de carga pesados, como caminhões, conforme ilustrado na Figura 25.

Figura 25 - Chassi tipo escada



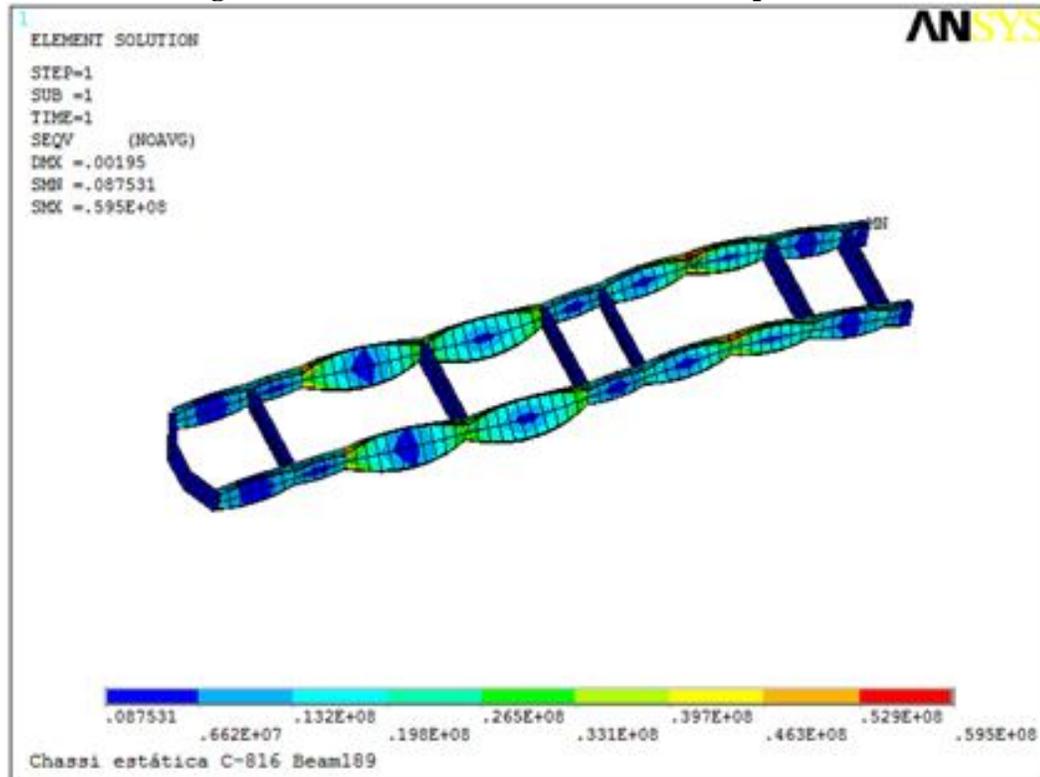
Fonte: Furtado e outros (2013)

A utilização de seções fechadas do tipo “C” nas longarinas e transversinas oferece maior rigidez à estrutura, porém dificulta a sua recuperação quando ocorre alguma avaria. Sendo assim a utilização de tubos retangulares é mais predominante nesse tipo de estrutura, pois para mesma espessura de parede e sob carregamento puro de flexão, um tubo retangular apresenta maior rigidez que o tubo circular.

Neste contexto, Furtado (2013) realizou estudos referente ao comportamento estrutural do chassi do caminhão modelo Cargo C-816, com a utilização do *software* Ansys, onde foi realizado simulações referente ao comportamento estático e dinâmico da estrutura.

A partir da análise estática, foi possível perceber que o chassi respondeu bem aos esforços aplicados, onde a tensão máxima obtida, 59MPa, foi menor que a tensão de escoamento do material (600MPa-720MPa) e a estrutura sofreu poucos deslocamentos, conforme apresentado na Figura 26.

Figura 26 - Tensão de Von Mises no chassi tipo escada



Fonte: Furtado e outros (2013)

Para a realização da análise dinâmica, foi realizado teste referente à análise modal, análise harmônica e análise transiente. Os resultados encontrados foram satisfatórios e se mantiveram dentro dos limites aceitáveis. Furtado (2013) reitera no final de seu estudo que o *software* demonstrou uma ferramenta eficiente para análise estrutural de chassi tipo escada.

Soares e outros (2012) tiveram como objetivo avaliar a rigidez teórica do chassi de um veículo elétrico com relação à rigidez experimental, para isso, utilizou o *software* Solidworks na realização dos estudos.

Segundo Soares e outros (2012), o veículo foi projetado para trafegar fora das vias urbanas, sendo assim, destinado para ambientes universitários ou empresariais. Esse veículo foi projetado para apenas um ocupante, onde a alimentação é proveniente de uma bateria automotiva, e possui o peso total do veículo com condutor estimado em 1500 N, e pode alcançar a velocidade máxima de aproximadamente 30 km/h. Na Figura 27, é possível verificar o desenvolvimento do projeto.

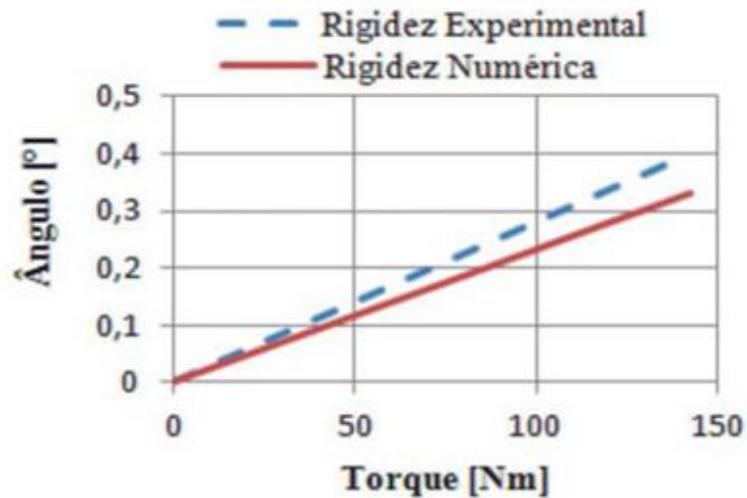
Figura 27 - Chassi do veículo elétrico de pequeno porte



Fonte: Soares (2012)

Após aplicação de forças em pontos específicos do chassi e coleta das informações referentes à rigidez torcional no método numérico e computacional, Soares e outros (2012) pode concluir que a rigidez do modelo numérico foi aproximadamente 22% maior que a rigidez medida experimentalmente, conforme apresentando na Figura 28. Essa diferença foi atribuída às tensões residuais nas regiões soldadas, como as próprias costuras dos tubos, omitidas durante a simulação, e também, à dificuldade de reproduzir exatamente as condições de contorno do processo experimental.

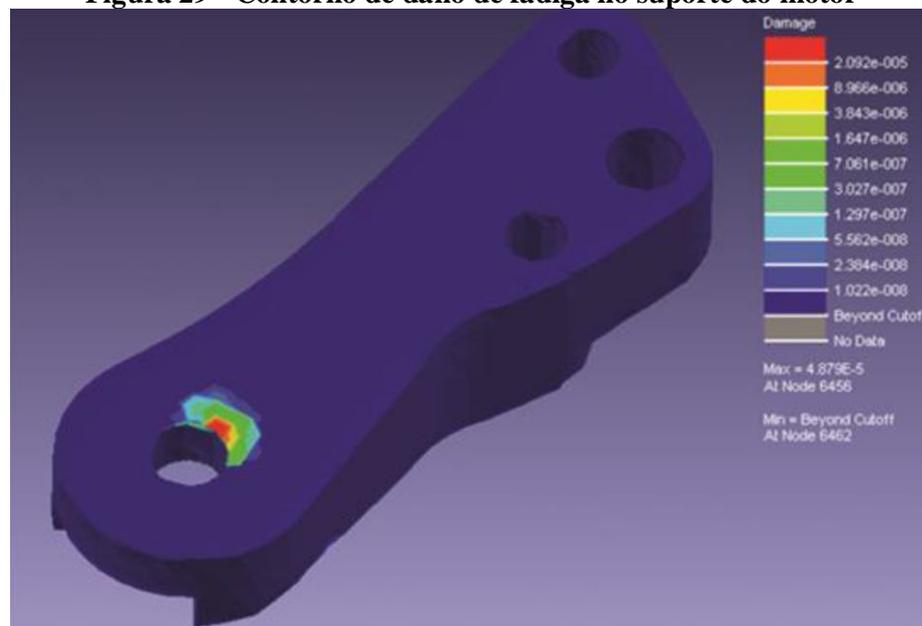
Figura 28 - Rigidez numérica e experimental



Fonte: Soares (2012)

Zakaria e outros (2014) avaliou em seu estudo o comportamento do sinal de tensão de fadiga imposto ao suporte do motor de um automóvel de 1300 cc, onde durante o deslocamento em uma superfície de área residencial e uma estrada rodoviária a uma velocidade constante de 15-25Km/h e 80-90Km/h respectivamente, foi possível medir os sinais de deformação com a utilização dos “*strain-gages*”. Para realização do estudo foram utilizados três modelos de dano de fadiga diferentes: *Coffin-Manson*, *Smith-Watson-Topper* e *Morrow*. O modelo tridimensional da peça foi desenhado utilizando o *software* Catia e então exportado para o *software* de elementos finitos comercial, onde foram realizadas as análises estruturais do componente, conforme ilustrado na Figura 29.

Figura 29 - Contorno de dano de fadiga no suporte do motor



Fonte: Zakaria e outros (2014)

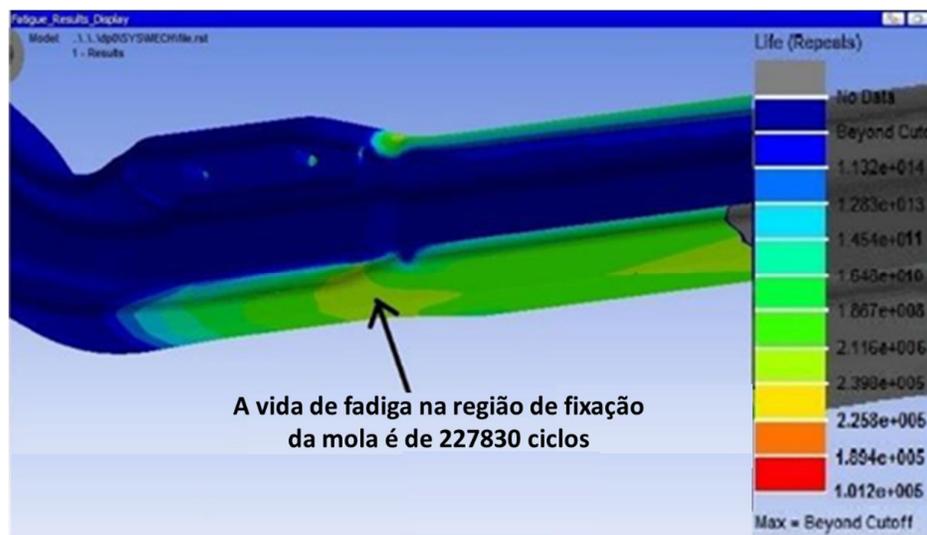
Zakaria e outros (2014) concluíram em seus estudos que os valores de danos do suporte se mostraram significativamente mais elevados quando submetidos aos sinais da tensão residencial da área em comparação com o sinal de tensão rodoviária para os três modelos de vida útil da tensão de fadiga, *Coffin-Manson*, *Smith-Watson-Topper* e *Morrow*. Uma vez que existe uma relação estreita entre os sinais de tensão de fadiga, os valores de comportamento do sinal e o dano de fadiga de um suporte de montagem do motor, sugerindo assim que o dano do suporte de montagem do motor pode ser monitorado, diretamente, pelo comportamento dos sinais de tensão de fadiga.

Hemant e outros (2016) teve como objetivo em seu estudo avaliar a fadiga e estimar a vida útil do eixo dianteiro de um caminhão quando submetido a carregamentos verticais e frenagens. Para realização do estudo foi utilizado o *software* Ansys NCODE Desing Life.

Segundo Hemant e outros (2016), o eixo dianteiro do caminhão é responsável por suportar aproximadamente 35% do peso total do veículo, onde o principal dano do componente está associado à fadiga, devido a cargas flutuantes que atuam no componente em decorrência de pistas irregulares.

Para criação do modelo, foi utilizado o *software* UNIGRAPHICS, e para avaliar a vida do eixo, foi utilizado o *software* NCODE, conforme ilustrado na Figura 30.

Figura 30 - Avaliação da vida útil do eixo



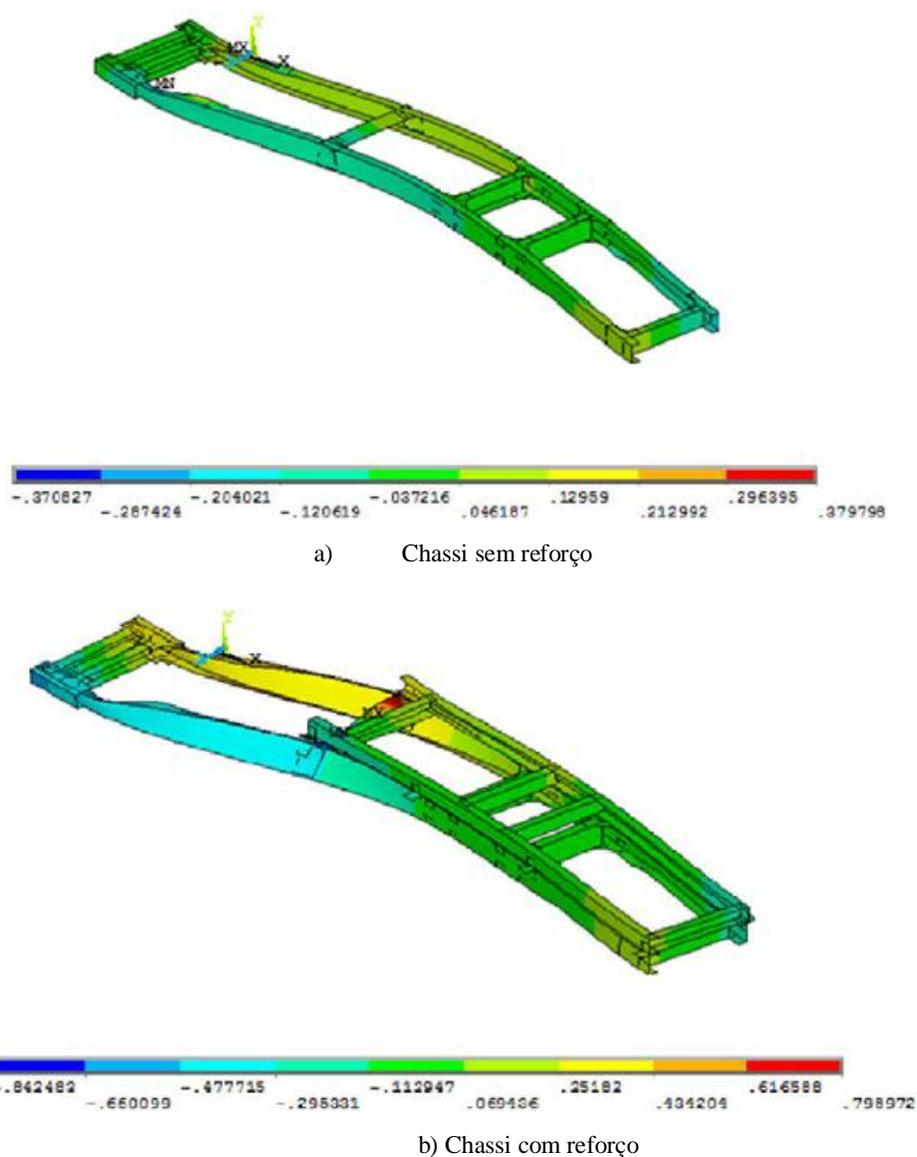
Fonte: Hemant e outros (2016)

A pós realização das simulações numéricas, referentes à aplicação de cargas verticais, foi possível encontrar a vida de fadiga maior que 2×10^5 ciclos, e aplicação de carga vertical associada a frenagem, valores superiores à 4×10^3 ciclos. Hemant e outros (2016) concluíram que o dimensionamento do eixo foi considerado seguro para condição operacional.

Hadipour (2011) realizou estudos em busca de verificar a influência vibracional no chassi do caminhão de seis toneladas responsável pela limpeza urbana no Irã (País no médio oriente), segundo ele, esses caminhões normalmente recebem modificações no chassi para suportar sobrecargas, e muitas vezes fatores como adequação do feixe de molas e fortalecimento das molas são desprezados durante essas modificações.

Para Hadipour (2011) sempre que a frequência natural de vibração de uma máquina ou estrutura coincide com a frequência da excitação externa, ocorre um fenômeno conhecido como ressonância, o que leva ao excesso de deflexões e pode ocasionar falhas prematuras. Na Figura 31, é possível observar aumento da frequência de vibração após instalação do chassi adicional à estrutural original do caminhão.

Figura 31 - Frequência de vibração



Fonte: Hadipour (2011)

Hadipour (2011) pode concluir em seu estudo que a vibração apresentou valores abaixo de 40 Hz, onde a frequência no chassi principal variou de 7,219Hz a 38,475 Hz e, para o chassi modificado, variou de 9,462Hz a 39,042 Hz, não ocasionado assim problemas ao equipamento analisado.

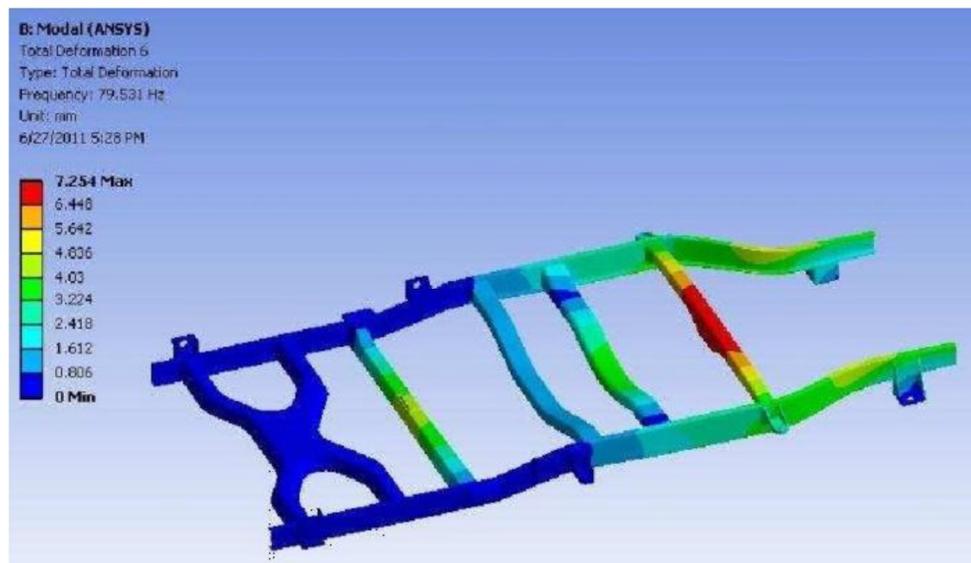
Renuke (2012) complementa Hadipour (2011) descrevendo que, quando o veículo trafega ao longo da estrada, o chassi encontra-se submetido às forças dinâmicas causadas pela rugosidade da estrada, motor, transmissão e demais componentes.

Neste contexto, Renuke (2012) teve como objetivo em seu estudo, avaliar a influência da vibração na estrutura de um veículo de passageiros, modelo wagonR, com a utilização do *software* Ansys.

Segundo Renuke (2012) existem dois tipos de vibrações, que são as vibrações globais e locais. A vibração global significa que toda a estrutura do chassi encontra-se vibrando enquanto a vibração local significa que a vibração está localizada e apenas uma parte do chassi do veículo está vibrando.

Na Figura 32 é possível observar a maior frequência de vibração, 79,531Hz, encontrada durante as simulações realizadas por Renuke.

Figura 32 - Frequência de vibração

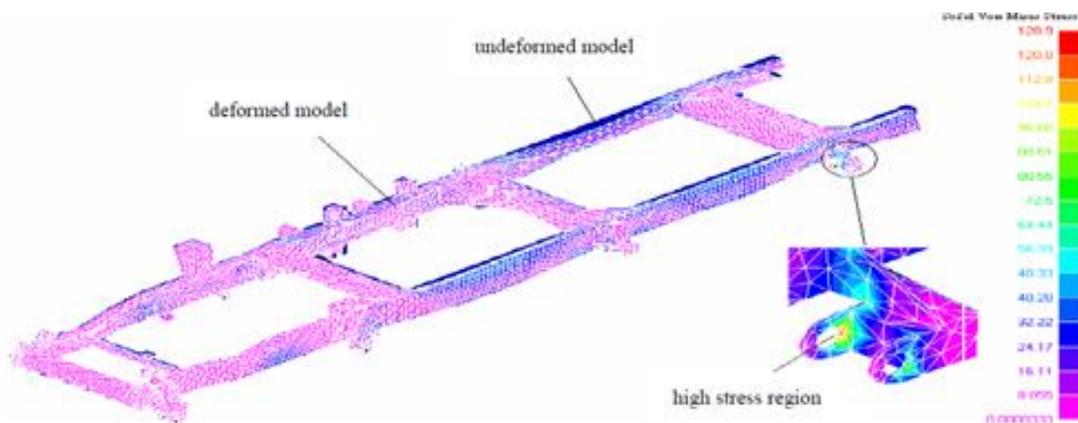


Fonte: Renuk (2012)

Renuke (2012) descreve que as frequências encontradas variaram de 42,423Hz à 79,531Hz, valores inferiores à 100Hz. O autor ressalta que, diminuindo o comprimento do chassi, pode-se aumentar a rigidez do chassi, evitando assim o fenômeno de ressonância.

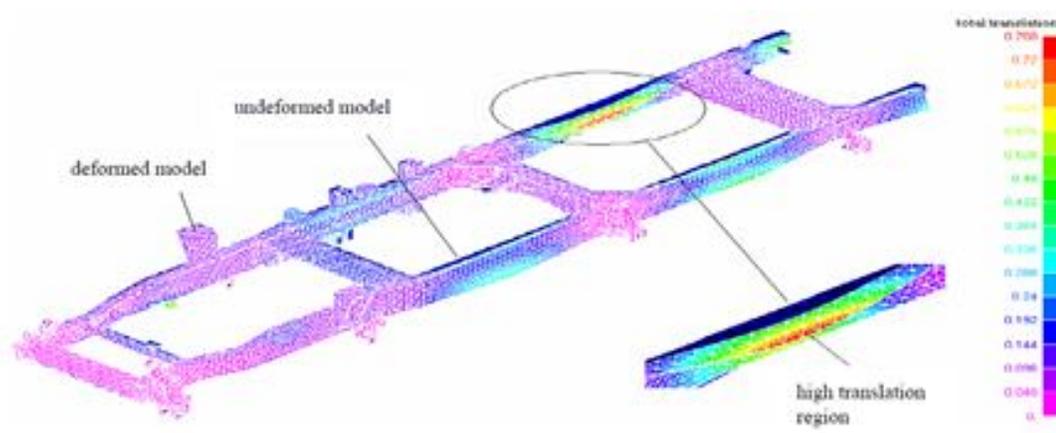
Segundo Fui (2007), os chassis dos caminhões *off-road* possuem as mesmas características de projetos desenvolvidos a mais de 30 anos. Em busca de entender o comportamento do chassi de um caminhão com capacidade para transportar 2500kg. Fui (2007) avaliou o comportamento da estrutura fabricada com o aço AISI 4130, quando submetido a carregamentos estático linear ao logo das longarinas, onde nas Figuras 33 e 34 foi possível observar as tensões e deformações máximas encontradas no modelo, respectivamente.

Figura 33 - Carregamento estático - Tensão máxima



Fonte: Fui (2007)

Figura 34 - Carregamento estático - Deformação

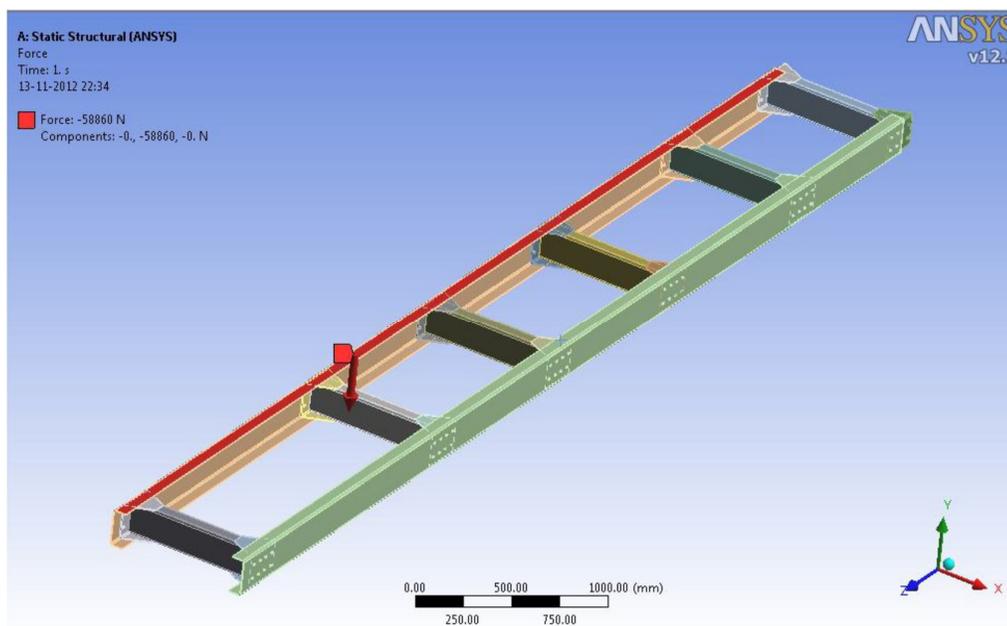


Fonte: Fui (2007)

Fui (2007) pode concluir que a tensão máxima encontrada foi de aproximadamente 128MPa próximo a fixação das suspensões e deformação máxima de 0,768mm. Assim como as seis primeiras frequências naturais do chassi do caminhão abaixo de 100 Hz, com variação de 16,24Hz à 61,64 Hz, sendo estes valores, aceitáveis para o projeto do caminhão.

Tushar (2013) investigou a tensão de fadiga e deformação no chassi do caminhão EICHER 11.10, com a utilização do *software* Ansys. Para realização do estudo, foi considerado o carregamento estático de 10000Kgf distribuído ao longo de toda estrutura do equipamento, conforme apresentado na Figura 35.

Figura 35 - Carregamento na barra lateral



Fonte: Tushar (2013)

Após realização da simulação numérica, Tushar (2013) pode concluir que as tensões de cisalhamento e deformações geradas são menores do que o valor permitido, de modo que o projeto é seguro, conforme pode ser observado na Tabela 03.

Tabela 3 - Comparação de análises e resultados calculados

Material	Resultado da análise	Resultado calculado	Variação percentual
Tensão de cisalhamento (MPa)	100,13	95,43	4,79%
Deformação (mm)	2,8776	2,85	0,9684

Fonte: Tushar (2013)

Segundo Tushar (2013) essa variação no percentual foi causada pela simplificação do modelo e incerteza do cálculo numérico.

Singh (2016) teve como objetivo em seus estudos avaliar as tensões impostas ao chassi do caminhão rodoviário, conforme ilustrado na Figura 36, assim como propor redução de peso com a substituição do aço utilizado na construção do componente.

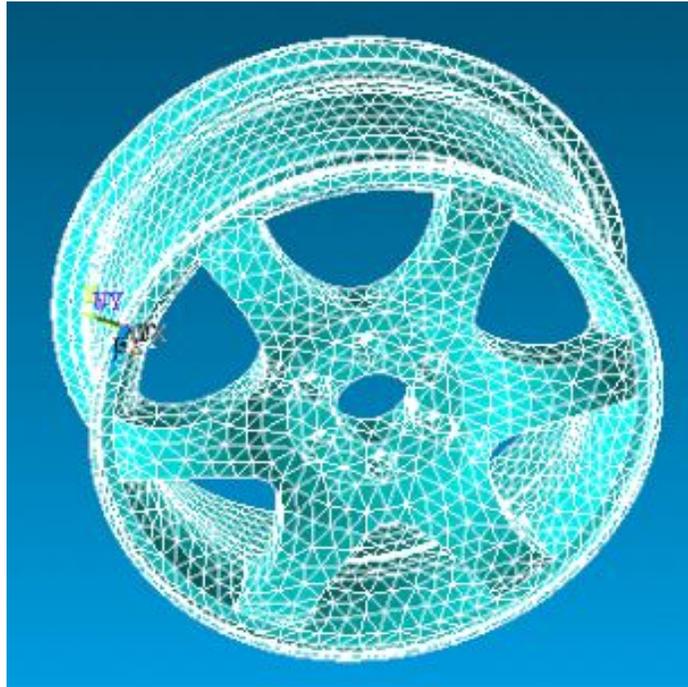
Figura 36 - Chassi caminhão rodoviário



Fonte: Singh (2016)

Singh (2016) descreve que o modelo anterior da estrutura do chassi, foi fabricado utilizando aço com resistência ao escoamento de 250MPa e massa aproximada de 597,6 Kg. Ao realizar as simulações numéricas no *software* Ansys Workbench 15.0, e utilizando o aço com resistência ao escoamento de 310MPa e massa 593,9Kg, foi possível obter redução de 0,63% no peso da estrutura, assim como, redução das tensões no modelo estudado.

Janardhan (2014) objetivou avaliar a fadiga radial de uma roda de liga leve onde foi possível encontrar o número de ciclos em que poderá ocorrer a falha da roda. Para isso, foi utilizado o *software* ANSYS para realização dos estudos, onde foi aplicado uma carga de 2500N e uma pressão de 0,207N/mm² na superfície externa do objeto em estudo. Segundo Janardhan (2014), a roda deve passar por três tipos de testes antes de entrar em produção, sendo eles o teste de fadiga em curva, teste de fadiga radial e teste de impacto. Para elaboração da malha, foi utilizado o SOLID 45, totalizando 9998 elementos e 991 nós no sólido, conforme ilustrado na Figura 37.

Figura 37 - Modelo da roda em 3D

Fonte: Janardhan (2014)

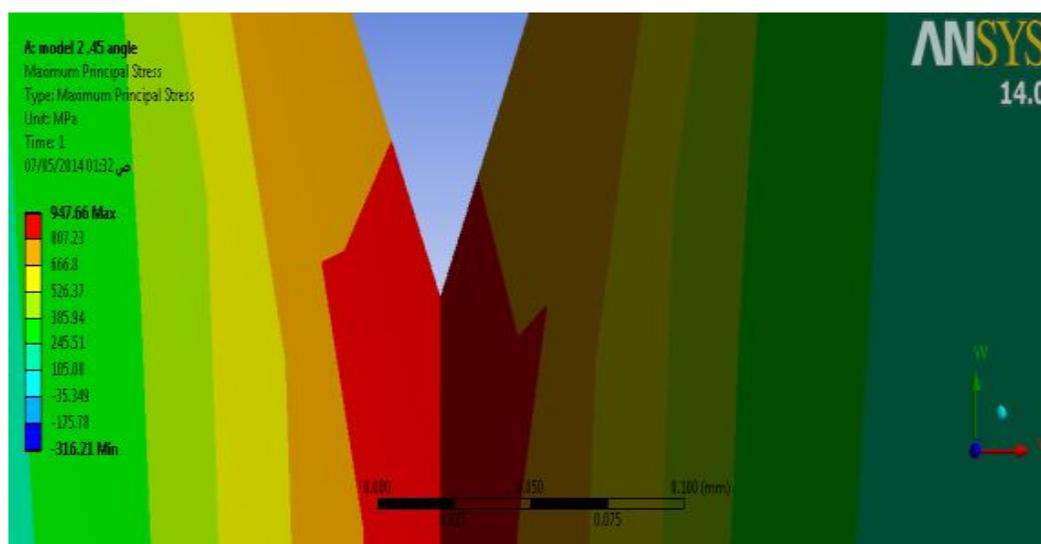
Após determinação das condições de contorno e aplicação das cargas na roda de liga de alumínio A356.0-T61, foi possível identificar a tensão máximo de fadiga de 9.205×10^6 Pa e tensão mínima de fadiga de $0,041 \times 10^6$ Pa, deformação de 0.515×10^{-1} mm e vida infinita à 1.0×10^9 ciclos. Janardhan (2014) concluiu o estudo descrevendo que a mesma análise pode ser realizada com a utilização de materiais alternativos, aplicando cargas em diferentes áreas da roda, realizando, assim, estudos para redução de peso e aumento da vida útil.

Bhavi (2017) realizou testes destrutivos em engrenagens cônicas novas e usadas, atualmente aplicados na caixa de engrenagem de um diferencial automotivo com o propósito de coletar e analisar os espectros de vibração e do som durante a operação até a ocorrência da falha. Durante a realização dos testes foi observado sinais de impacto na superfície do dente da engrenagem após 3×10^6 , devido fadiga de superfície, e em $7,2 \times 10^6$ ciclos, houve a falha de um dente da engrenagem do pinhão, resultando, assim, picos nas vibrações e níveis de som.

Bhavi (2017) concluiu em suas análises que o ruído e as vibrações foram baixas para o novo conjunto de engrenagens e aumentaram consideravelmente para os pares de engrenagens usadas e houve um aumento maior do ruído e vibração para o par de engrenagens danificadas. Diante do estudo dos espectros, foi possível conhecer o estado do par de engrenagem cônicas e, também, prever a falha durante a operação.

Segundo Bader (2014), o termo “entalhe”, em um sentido amplo, é usado para se referir a qualquer descontinuidade em forma ou não uniformidade em um material como as roscas em forma de V em parafusos, porcas, eixo, arranhões, filetes e descontinuidades na geometria, que pode contribuir para a redução na vida útil do componente. Em busca de avaliar o efeito da forma de entalhe V na vida de fadiga, Bader (2014) confeccionou inúmeros corpos de prova do aço médio carbono AISI 1037, com entalhes circunferenciais de 30°, 45° e 90°, com profundidade de entalhe variando de 0,5mm à 2 mm. Esses materiais foram submetidos à ensaios de flexão e fadiga, onde, após coleta de dados, foi utilizado o *software* Ansys versão 14, para realização do estudo número, conforme apresentado na Figura 38.

Figura 38 - Análise numérica do entalhe V



Fonte: Bader (2017)

Bader (2017) conclui que, a maior concentração de tensão está associada na orientação de menor ângulo, enquanto o limite de resistência à fadiga, será mais elevado com o aumento da orientação do ângulo de entalhe. Também foi possível observar o erro de 9% entre as análises analíticas com relação a análise numérica com o uso do MEF.

3.2 Análises de fadiga

De acordo com Moraes (2013), fadiga pode ser definido como uma redução gradual da capacidade de carga do componente em consequência do avanço quase infinitesimal das fissuras que se formam no seu interior.

Dowling (1993) descreve que o fenômeno da fadiga pode ser caracterizado pela separação catastrófica de um componente mecânico em duas ou mais partes, resultante da aplicação de cargas de intensidade ou deformações que variam no tempo. A origem de tais falhas é a formação a nível microscópico e posterior propagação de uma ou mais trincas que se ramificam no material até a ocorrência da falha completa.

Para Mohamed (2013), a importância do estudo da fadiga decorre diretamente da necessidade em investigar a resposta do componente à tensão cíclica dos metais e suas ligas, onde há interesses dos estudiosos em desenvolver mecanismos para explicar como as microestruturas podem levar à característica de deformação e fratura, adquirindo informações quantitativas para prever a vida de componentes.

Percebe-se, neste contexto, a busca em evitar ou minimizar modos de falhas correlacionados à fadiga, pesquisas comprovantes de que, atualmente, inúmeros estudos estão direcionados para esse assunto.

Nascimento (2016) teve como objetivo em seu estudo, avaliar o efeito do tratamento criogênico sobre a resistência à fadiga de um dos aços mais usados na indústria petrolífera, o aço API 5L Grau B, esse aço possui baixo teor de carbono aliado a pequenos teores de nióbio, titânio e/ou vanádio, elementos que apresentam uma característica especial durante a conformação a quente.

Segundo Nascimento (2016), o tratamento criogênico foi um dos primeiros métodos utilizados para eliminar a austenita retida, presente nos aços temperados. Este tratamento, consiste na utilização de uma caixa revestida de cobre e isolada externamente com aço, sendo depositado no espaço esses dois materiais, o dióxido de carbono sólido (gelo seco) ou outras substâncias como etano, etileno e freon, obtendo assim temperaturas entre -80°C e -100°C .

Após realização dos ensaios de fadiga axial, Nascimento pôde observar pouca influência no limite de resistência à fadiga dos aços testados conforme apresentando abaixo:

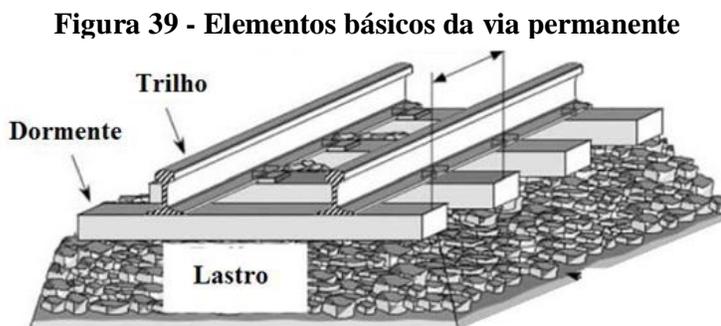
- a) 183 ± 3 MPa – Corpos de prova sem tratamento;
- b) 184 ± 7 MPa – Corpos de prova com Tratamento Criogênico.

No entanto, com a utilização do tratamento criogênico, observou-se influência no ganho de vida para fadiga em alto ciclos a baixa tensões. Onde há uma tensão de 180 MPa, a vida em fadiga do aço passou de $2,00\text{E}+06$ ciclos, sem tratamento, para $3,23\text{E}+06$ ciclos, um aumento na vida de 61%, com o tratamento. Ou seja, mesmo com o limite de resistência à fadiga

praticamente inalterado após o tratamento criogênico, a uma mesma tensão, houve um ganho expressivo na vida em fadiga.

Segundo Moreira e outros (2015), os trilhos são os componentes da indústria ferroviária mais susceptíveis às falhas devido às altas pressões de contato das rodas em regime de carregamento cíclico. As tensões residuais, tensões de carregamento e descontinuidades decorrentes do processo de fabricação, podem contribuir para o aumento da amplitude do estado de tensões, levando, assim, ao aparecimento de trincas que se propagam até ao colapso estrutural.

Para Sumant (2013), a condição de contato entre a roda e o trilho envolve uma combinação de rolamento e contato deslizante, onde os danos materiais que se desenvolvem como resultado desse contato se referem às condições em que há perda de material (desgaste) e desenvolvimento de trincas na superfície. Na Figura 39, é possível observar os elementos básicos de uma via permanente.



Fonte: Moreira (2015)

Neste contexto, Moreira (2015) utilizou os conceitos da mecânica da fratura para avaliar a tenacidade à fratura e a propagação de trincas ocasionadas por fadiga em trilhos provenientes do Japão e China, para isso os trilhos foram classificados como *Premium* e *Standard* respectivamente, onde informações desse estudo subsidiariam a empresa desenvolver propostas para inspeção e substituição de trilhos, baseado no cálculo do tamanho da trinca e análise de vida remanescente.

Dentre as análises realizadas para caracterizar o material utilizado na fabricação dos trilhos (análise microestrutural, ensaio de dureza, ensaio de tração, ensaio de tenacidade à fratura, ensaio de impacto e ensaio de propagação de trincas), Moreira (2015) pode concluir que, o trilho *Premium* apresentou pior desempenho no ensaio de tenacidade à fratura, como

visto na Tabela 04, e ensaio de propagação de trincas conforme apresentando na Tabela 05, apresentadas abaixo.

Tabela 4 - Resultados dos ensaios de tenacidade à fratura (K_{IC}) para os aços TFS e TFP

Trilho Ferroviário <i>Standard</i>	K_{IC} (MPa.m ^{1/2})	Trilho Ferroviário <i>Premium</i>	K_{IC} (MPa.m ^{1/2})
Standard - 1	39,03	Premium - 1	37,5
Standard - 2	39,55	Premium - 2	38,1
Standard - 3	38,57	Premium - 3	37,3
Standard Médio	39,05 ± 0,5	Premium Médio	37,6 ± 0,5

Fonte: Adaptado Moreira (2015)

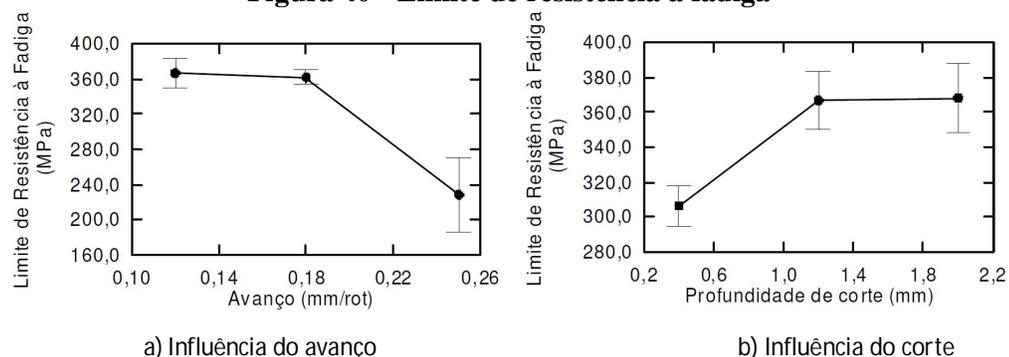
Tabela 5 - Resultado dos ensaios de fadiga para os aços TFS e TFP

Trilho Ferroviário	ΔK_{th} (MPa.√m)	K_{IC} (MPa.√m)
Standard	9,04 ± 0,27	4,63
Premium	7,96 ± 0,38	4,08

Fonte: Adaptado Moreira (2015)

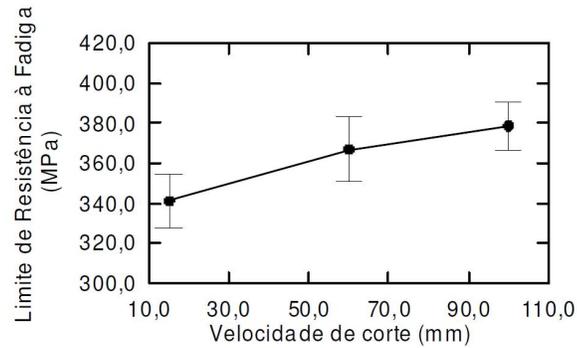
Atualmente, vários estudos descrevem que a resistência à fadiga de um componente pode ser alterada por fatores como integridade superficial, composição química, tipos de carregamentos ao qual o componente está submetido, geometria e condição do ambiente de trabalho. Lopes (2006) analisou em sua pesquisa, a influência do processo de usinagem na resistência à fadiga dos aços, especificamente foi avaliado a influência do avanço, profundidade e velocidade de corte na resistência a fadiga em corpos de prova do aço AISI 4140, conforme ilustrado na Figuras 40.

Figura 40 - Limite de resistência à fadiga



a) Influência do avanço

b) Influência do corte



c) Influência do corte

Fonte: Lopes (2006)

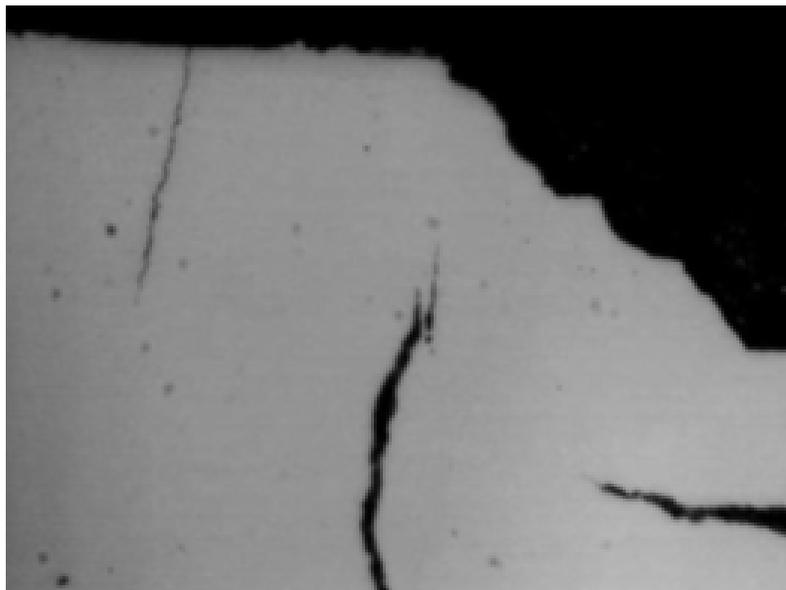
Lopes (2006) pode concluir que o aumento da velocidade de corte e profundidade ocasionou aumento na resistência à fadiga. Contrário ao aumento do avanço, pois gerou redução à resistência à fadiga dos corpos de prova em teste.

Neste contexto, relacionado à fadiga proveniente da condição de acabamento, Gomes (2015) realizou estudos condizentes à influência da rugosidade superficial na fadiga de alto ciclo (giga ciclos), do aço AISI 4140, onde foram realizados experimentos de fadiga à temperatura ambiente com tensão próximo de zero, em uma máquina de teste de fadiga rotativa do tipo de momento de flexão constante.

Segundo Gomes (2015), estudos recentes mostraram que os testes de fadiga na vida super longa mostraram que os materiais metálicos exibem uma diminuição da resistência à fadiga após 10^7 ciclos. Portanto, o conceito de vida segura com base no critério de vida infinita não deve ser usado porque as curvas S-N não têm um nível horizontal como se pensava anteriormente, pois nucleação em fadiga de ciclo ultra-alto tende a ocorrer dentro do material de inclusões, poros, heterogeneidades micro estruturais e outros defeitos internos.

Entre os testes realizados por Gomes (2015) destaca-se a análise micrográfica, onde foi possível observar que os corpos de prova testado por fadiga não falharam até atingir a vida de 1×10^8 ciclos, no entanto foi observado fissuras na superfície e interior de várias amostras, conforme ilustrado na Figura 41.

Figura 41 - Presença de trincas em corpos de prova



Fonte: Gomes (2015)

Gomes (2013) descreve em seu estudo que, se o ensaio não fosse interrompido, ocorreria a fratura do material, concluindo que não há vida infinita de fadiga, pois o material pode falhar por fadiga, mesmo no regime de vidas super longas.

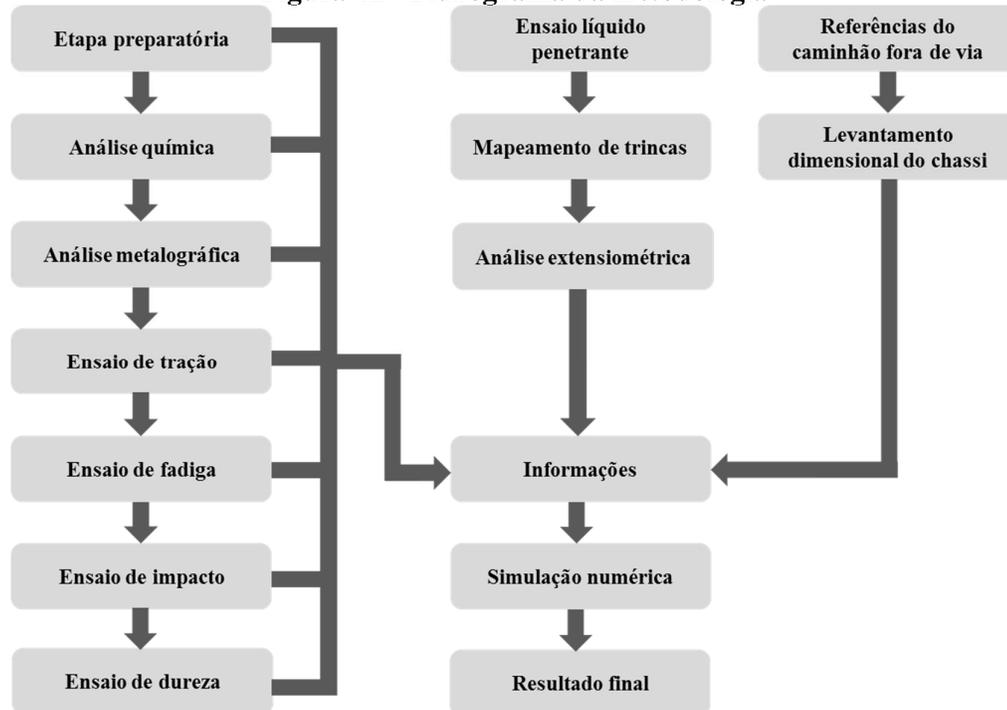
4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL E NUMÉRICA

Os caminhões fora de via, são amplamente utilizados em minas de exploração mineral a céu aberto, sendo responsáveis pela movimentação de grande quantidade de massa. Esses equipamentos são constituídos de um chassi fabricado com a utilização de aços laminados e fundidos, resistentes à altas tensões cíclicas durante o ciclo operacional, que se inicia na frente de lavra e termina nos britadores ou depósitos específicos ao logo na mina. Normalmente, esses trajetos são realizados em vias não pavimentadas, o que contribui para o aparecimento de trincas por fadiga ao longo da estrutura do chassi.

Para que se avalie o comportamento estrutural e seja realizado o estudo de tensões no chassi do caminhão fora de via, durante o ciclo operacional na mina de Brucutu localizada no estado de Minas Gerais.

Em busca de identificar quais as características dos aços utilizados para fabricação do chassi do caminhão fora de via, foram realizados ensaios físico-químicos em amostras dos aços em laboratórios especializados em análise de materiais. Para realização da coleta e avaliação das tensões em pontos específicos do chassi, extensômetros e acelerômetros foram fixados ao longo da estrutura, onde os dados foram coletados durante quatro ciclos operacionais. Para realização do levantamento dimensional do chassi, utilizou-se o Scanner 3D. Essas informações serviram de entrada para realização da modelagem numérica utilizando programa de elementos finitos *Hyperworks e Abaqus*. As correlações desses dados foram transformadas em informações que nos permitirá sugerir melhorias para reduzir as tensões em pontos críticos e aumentar a vida útil do componente, assim como prever falhas e acidentes. Essas atividades podem ser observadas no fluxograma da Figura 42.

Figura 42 - Fluxograma da metodologia



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

4.1 Etapa preparatória

A etapa preparatória iniciou no recolhimento de amostras dos aços utilizados na fabricação do chassi do caminhão fora de via, onde foram direcionados para preparação dos corpos de prova e realização de testes físico-químico em laboratórios especializados do MIB (*Materials Institute of Brazil*) e WELDING. As amostras foram retiradas de um chassi do mesmo modelo do equipamento que se encontrava em processo de descarte, Figura 43.

Figura 43 - Amostra de materiais



Fonte: Fotos do autor

4.1.1 Análise química

A análise química nas amostras dos materiais foi realizada via espectrometria de emissão óptica por centelha, utilizando a máquina Spectro MAXx, do laboratório de ensaios e análises de materiais da WELDING, localizada em Sertãozinho, São Paulo. Nas Tabelas 06 e 07 é possível observar os resultados das análises químicas dos materiais laminado e fundido respectivamente.

Tabela 6 – Resultado da análise química do material laminado (% em peso)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al
0,138	0,204	1,18	0,034	0,007	0,018	0,012	0,004	0,006	0,021

Fonte: WELDING (2016)

Tabela 7 – Resultado da análise química do material fundido (% em peso)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al
0,181	0,182	0,882	0,030	0,008	0,055	0,154	0,021	0,370	0,006

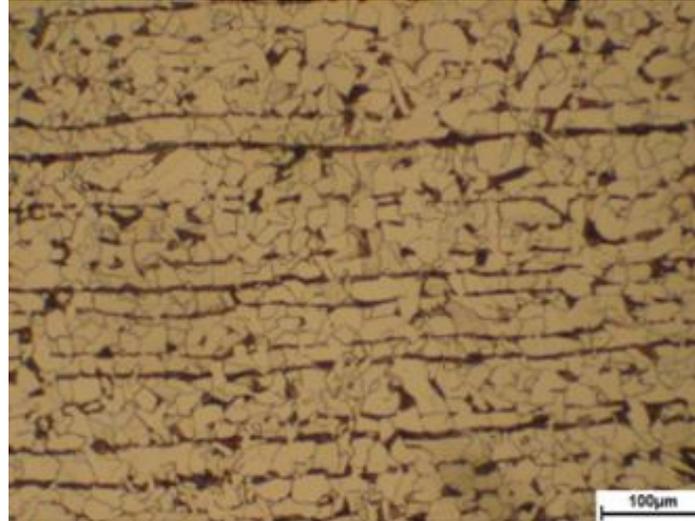
Fonte: WELDING (2016)

4.1.2 Análise metalográfica

Para realização da análise metalográfica, foi utilizado o microscópio metalográfico modelo Vision TIM5, no qual permite uma ampliação em até 1000 vezes, disponível no laboratório WELDING.

Na Figura 44, é possível observar a imagem da análise metalográfica, realizada a partir da amostra do material laminado, com reagente nital 3%, onde a amostra apresenta matriz ferrítica com cerca de 20%, de perlita lamelar com tamanhos de grã ferríticos de tamanhos 6 e 7 predominantes, conforme norma ASTM E 112-13. Apresenta também textura bandeada, característica microestrutura típica de aço baixo carbono, laminado e normalizado.

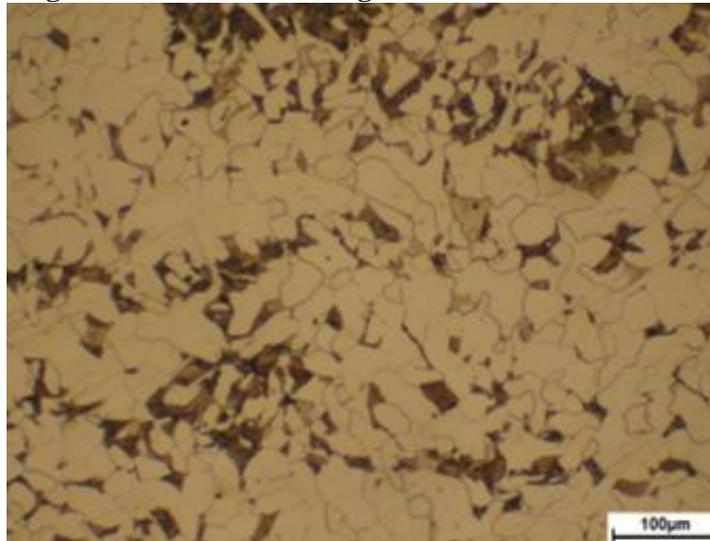
Figura 44 - Análise metalográfica do material laminado



Fonte: WELDING (2016)

Seguindo o mesmo processo metalográfico, a amostra do material fundido também foi submetido ao mesmo tipo de análise do material laminado, onde, ao realizar o processo de análise metalográfica com reagente nital 3%, foi verificado que o material apresenta matriz ferrítica com cerca de 15%, de perlita lamelar de composição, apresentando grãos ferríticos de tamanhos 6 predominantes, conforme norma ASTM E 112-13, microestrutura típica de aço baixo carbono, fundido e normalizado, demonstrado na Figura 45.

Figura 45 - Análise metalográfica do material fundido



Fonte: WELDING (2016)

4.1.3 Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram realizados no *Materials Institute of Brazil* (MIB) localizado em São Carlos, São Paulo. Onde para realização dos testes foi utilizado a máquina modelo Instron 2382, com capacidade de 100KN. O controle de deslocamento será de 0,7mm/min até o escoamento, 6,0mm/min até a fratura, $L_0=4D=25\text{mm}$, tendo a geometria e dimensões dos corpos de prova fabricados de acordo com norma ASTM E8/E8M-15a.

Esses ensaios tiveram como objetivo, avaliar as propriedades dos corpos de prova à temperatura ambiente das amostras coletadas no chassi do caminhão fora de via. Foram obtidos resultados referentes à tensão de escoamento, resistência à tração, alongamento total e redução da área transversal do corpo de prova. Esses resultados podem ser observados nas Tabelas 08 e 09 do material laminado e fundido, respectivamente.

Tabela 8 - Resultado do ensaio de tração aço laminado

Limite Resistência	Limite Escoamento	Alongamento	Redução de Área
488 MPa	339 MPa	31%	73%

Fonte: MIB (2015)

Tabela 9 - Resultado do ensaio de tração aço fundido

Limite Resistência	Limite Escoamento	Alongamento	Redução de Área
509 MPa	331 MPa	28%	63%

Fonte: MIB (2015)

4.1.4 Ensaio de fadiga

O ensaio de fadiga axial foi realizado no aço fundido, segundo as diretrizes da norma ASTM E466-15. Esses ensaios foram conduzidos até a fratura final ou até atingir um *run-out* definido, em 2 milhões de ciclos, à temperatura ambiente de 23°C, sob frequência de 40Hz, controle de carga e $R=0,1$. Para realização dos ensaios de fadiga foi utilizado a máquina de ensaio de fadiga ElectroPuls E10000 Linear. Assim como os ensaios de tração, esses ensaios de fadiga foram realizados no *Materials Institute of Brazil* (MIB), localizado em São Carlos, São Paulo.

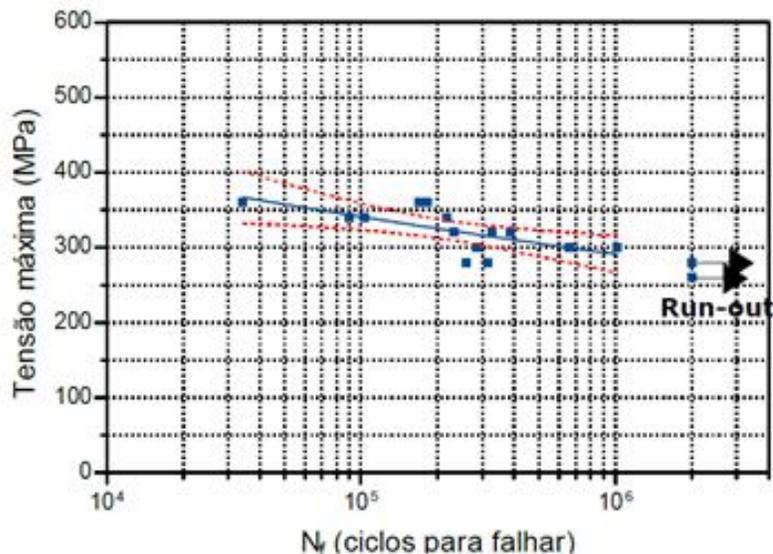
Na Tabela 10, é possível verificar os resultados das tensões e seus respectivos número de ciclos até a ocorrência na falha.

Tabela 10 - Dados obtidos do ensaio de fadiga axial

Identificação da Amostra	$S_{m\acute{a}x}$ (MPa)	N_f (ciclos)
MIB-15-0727	360	169541
	360	34145
	360	181250
	340	103302
	340	216968
	340	89543
	320	384727
	320	327106
	320	230048
	300	1012655
	300	282296
	300	657288
	280	313797
	280	258804
	280	2.106 (<i>run-out</i>)
	260	2.106 (<i>run-out</i>)
260	2.106 (<i>run-out</i>)	

Fonte: Adaptado MIB (2015)

Na figura 46 estão representados, de forma gráfica, os resultados dos testes de fadiga.

Figura 46 - Curva de fadiga-vida (S-N)

Fonte: Adaptado MIB (2015)

4.1.5 Ensaio de impacto

Os ensaios de impacto foram realizados em corpos de prova dos materiais laminado e fundido, utilizando uma máquina de impacto modelo Time JB300, com martelo de 300J. Foram realizados testes de impacto Charpy, tipo A, à temperatura de 23°C, conforme ASTM E23-12c, no laboratório MIB em São Carlos, São Paulo. Onde os resultados estão compilados nas Tabelas 11 e 12 a seguir.

Tabela 11 - Dados obtidos do ensaio de impacto - Material laminado

Identificação da Amostra	Medidas (J)	Média (J)
MIB-15-0728-002	196	216
MIB-15-0728-003	226	
MIB-15-0728-004	226	

Fonte: Adaptado MIB (2015)

Tabela 12 - Dados obtidos do ensaio de impacto - Material fundido

Identificação da Amostra	Valores (J)	Média (J)
MIB-15-0727-002	46	52
MIB-15-0727-003	54	
MIB-15-0727-004	56	

Fonte: Adaptado MIB (2015)

4.1.6 Ensaio de dureza

Para a realização dos ensaios de dureza nos materiais laminado e fundido, foi utilizado uma máquina modelo HR150, onde foram obtidas informações referentes à dureza em Rockwell C, após aplicação de uma carga de 150Kgf, seguindo a norma ASTM E18-15. Esses testes foram realizados no laboratório MIB em São Carlos, São Paulo.

Nas Tabelas 13 e 14 estão representadas as durezas médias obtidas durante a realização dos testes.

Tabela 13 - Dados obtidos do ensaio de dureza - Material laminado

Identificação da Amostra	Tipo	Medidas	Média	Média HB
MIB-15-0727	HRB	84	83,4	160
		83		
		83		
		84		
		83		

Fonte: Adaptado MIB (2015)

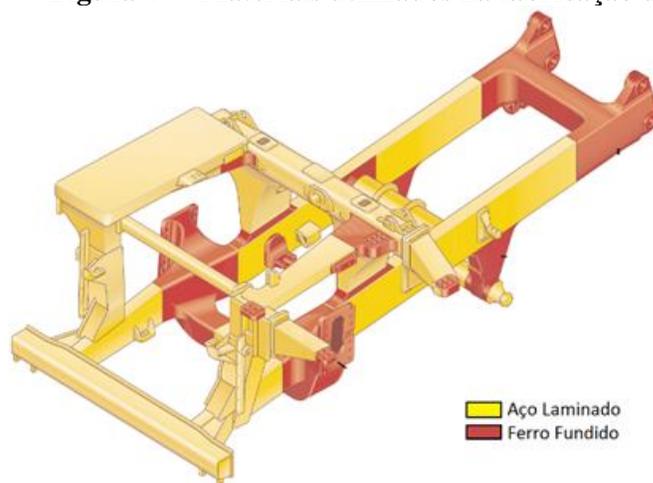
Tabela 14 - Dados obtidos do ensaio de dureza - Material fundido

Identificação da Amostra	Tipo	Medidas	Média	Média HB
MIB-15-0727	HRB	79	79	147
		80		
		78		
		78		
		80		

Fonte: Adaptado MIB (2015)

4.2 Aços utilizados na fabricação do chassi do caminhão fora de via

Os chassis, normalmente, são fabricados com materiais de alta resistência, sendo capazes de suportar elevadas cargas e tensões cíclicas. No caso de caminhões fora de via, essa situação não é diferente. Na Figura 47, observa-se a utilização de materiais laminados e fundidos.

Figura 47 - Materiais utilizados na fabricação do chassi

Fonte: Adaptado Caterpillar (2002)

A pós realização dos ensaios metalográficos e físico-químicos nas amostras, foi possível enquadrá-los como similar ao especificado pela norma ASTM A 36, para o aço laminado e SAE 1021, para o aço fundido, conforme simplificado na Tabela 15.

Tabela 15 - Caracterização dos aços

Material	Tensão de escoamento	Tensão de resistência	Denominação
Aço Laminado	339 MPa	488 MPa	ASTM A36
Aço Fundido	331 MPa	509 MPa	SAE 1021

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

É possível observar acima, que os aços estruturais utilizados na fabricação do chassi do caminhão fora de via, são aços comuns e de média resistência mecânica.

4.3 Identificação e mapeamento de trincas

Para identificação e quantificação das trincas existentes ao longo do chassi do caminhão fora de via, foi utilizada a técnica de ensaio por líquido penetrante. Aplicando o removedor E59, líquido penetrante visível VP31 e revelador não aquoso D71 fabricados pela Metal-Chek, conforme ilustrado na Figura 48.

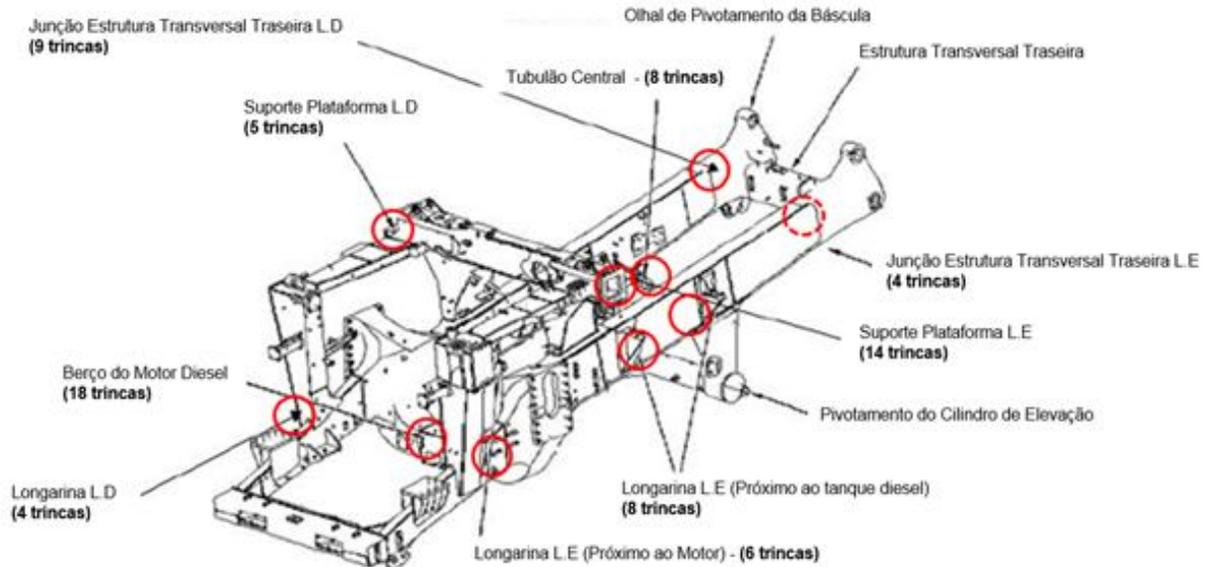
Figura 48 - Ensaio por líquido penetrante



Fonte: Fotos do autor

Após concluir o ensaio por líquido penetrante, foi possível identificar os locais onde estão concentrados o maior número de trincas, Figura 49 e, assim, começar a entender onde estão localizadas as maiores tensões e pontos frágeis do chassi do caminhão fora de via. Essas informações foram essenciais para auxiliar na fixação dos extensômetros elétricos (*Strain Gauge*), permitindo assim coletar informações mais confiáveis durante o ciclo operacional do equipamento.

Figura 49 - Mapeamento de trincas



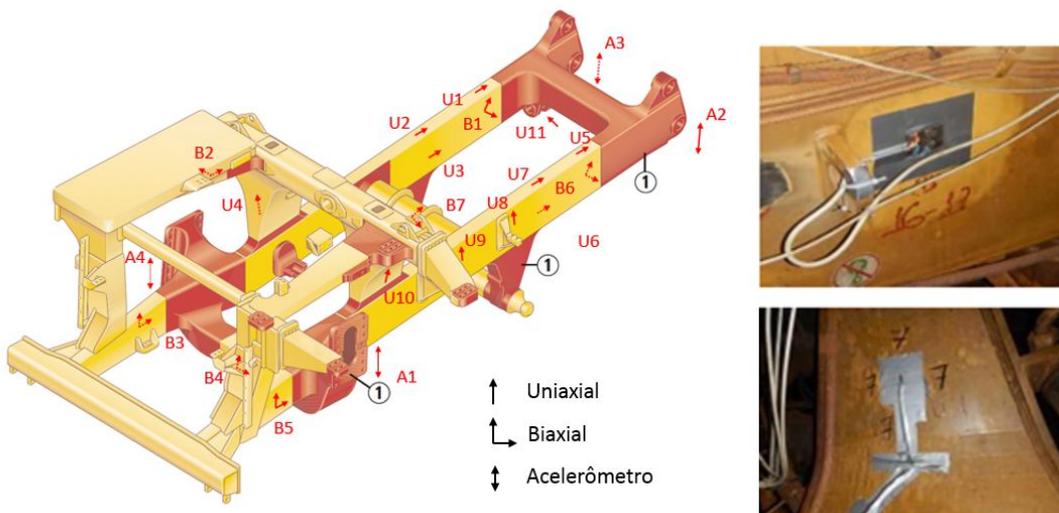
Fonte: Adaptado Caterpillar (2013)

4.4 Análise extensiométrica

A análise extensiométrica foi realizada pela empresa especializada CALTRA, onde, para realização do levantamento de informações, foi utilizado o condicionador de sinais ADS 2000, fabricado pela Lynx, com duas placas de 16 sinais cada, extensômetros Kyowa, *laptop* Dell e placa controladora Lynx modelo AD 2122.

Com a utilização de sensores, foi possível obter uma análise quantitativa da distribuição de deformação sob condições reais de operação. Para realização da análise extensiométrica, foi utilizado mão de obra especializada, onde o chassi do caminhão fora de via foi instrumentado com fixação de extensômetros e acelerômetros de modo a ser possível coletar as informações referentes às tensões atuantes no chassi, durante o ciclo operacional. A Figura 50 representa os locais mapeados para instalação do sistema, usando como referência o quantitativo de trincas identificadas pelo ensaio de líquido penetrante.

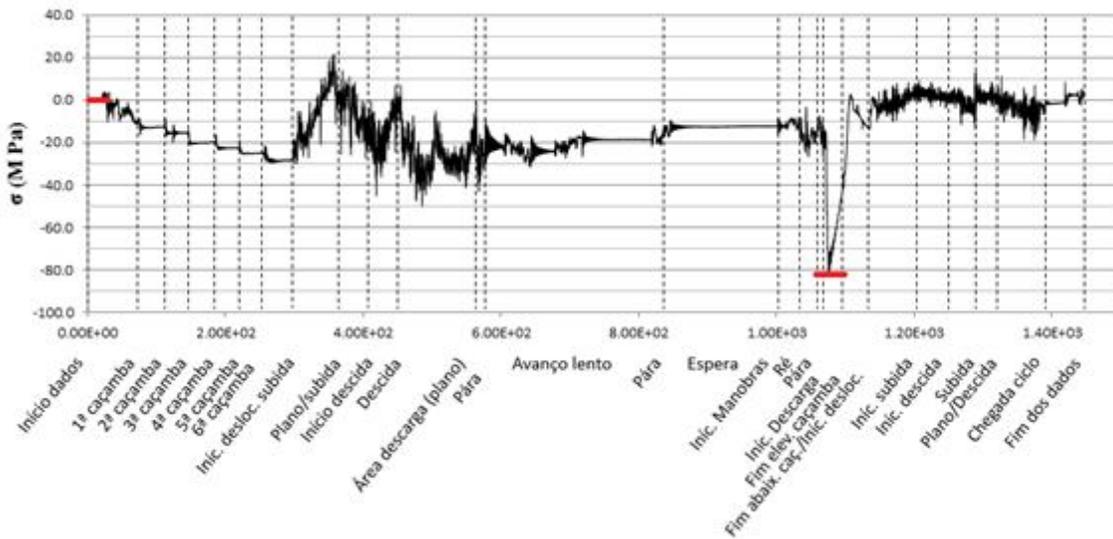
Figura 50 - Posicionamento dos sensores



Fonte: Elaborado pelo autor

Foram realizados quatro ciclos operacionais completos, partindo da frente de lavra até o britador, onde o caminhão instrumentado foi conduzido de modo mais crítico possível, pelo instrutor de operação de mina. Durante a realização dos ciclos operacionais, foi possível coletar as variações das tensões nos pontos mapeados durante todo o processo operacional. Na Figura 51, é possível observar uma variação de -83MPa do extensômetro G18.

Figura 51 - Variação de tensões – G18



Fonte: CALTRA (2016)

4.5 Referências do caminhão fora de via

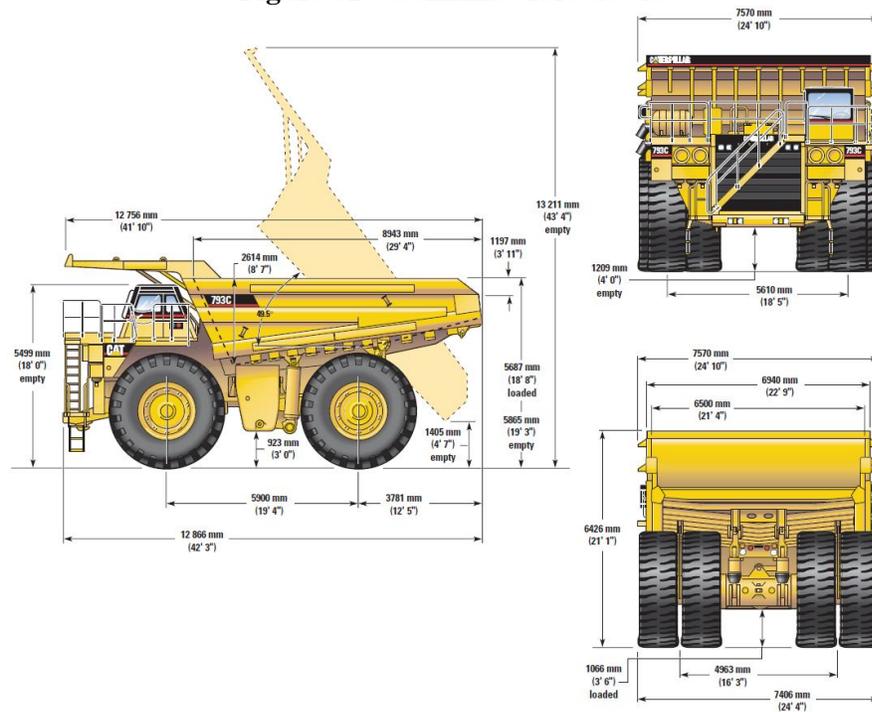
Os dados técnicos do caminhão fora de via, tiveram como referência as informações disponibilizadas em catálogos e manuais do fabricante Caterpillar, onde foram extraídas informações referentes à capacidade, dimensões principais e pesos dos principais componentes do caminhão modelo 793C.

Na Tabela 16 estão representados alguns dados referentes aos pesos e capacidades do caminhão fora de via. Já na Figura 52, é possível verificar as dimensões principais do equipamento em estudo.

Tabela 16 - Peso e capacidade caminhão fora de via		
MODELO	CAT 793C	
Acionamento		
Quantidade de motores	1	Unid.
Potência total	1715	Kw
Potência total	2300	Hp
Peso e capacidade		
Peso bruto operacional	384.000	Kg
Peso vazio (sem báscula)	114.300	Kg
Peso total da caçamba (estrutura e revestimento)	33.189	Kg
Capacidade tanque combustível	4.731	L
Peso tanque combustível vazio	2.093	Kg
Peso motor diesel vazio	8.471	Kg
Peso do óleo lubrificante do motor diesel	250	Kg
Peso do radiador	1.205	Kg
Peso do conversor de torque	973	Kg
Peso da cabine de operação	1.814	Kg
Peso tanque de óleo de freio e elevação	1.436	Kg
báscula		
Peso cilindro de elevação (cada)	1.150	Kg
Capacidade de líquido de arrefecimento	684	L
Carga de material transportável	232.711	Kg
Fluido do diferencial	662	L
Dados de operação		
Velocidade máxima	51.3	m/s
Peso transportável	232.711	Kg
Pneu utilizado		
Modelo	40.00R57	

Fonte: Adaptado Caterpillar (2013)

Figura 52 - Caminhão fora de via

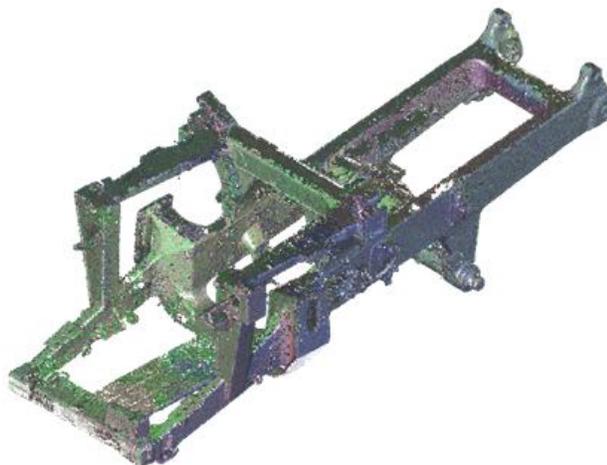


Fonte: Adaptado Caterpillar (2012)

4.5.1 Levantamento dimensional do chassi

Para realização do levantamento dimensional do chassi, foi utilizado o método Laser Scanner 3D, da Faro Focus 3D. Esse equipamento gerou uma nuvem de pontos, onde foi possível ser visualizada pelo *software* Navisworks Freedom, conforme apresentado na Figura 53.

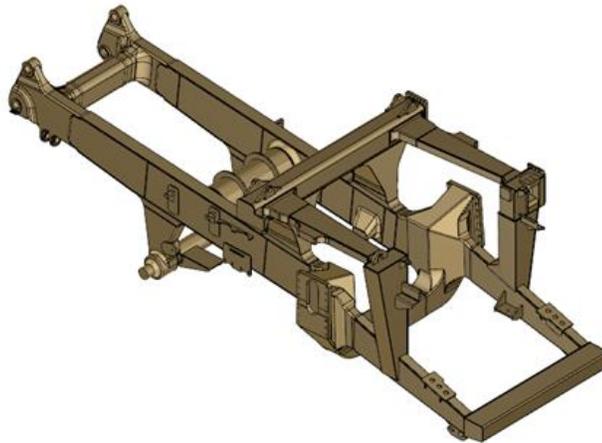
Figura 53 - Nuvem de pontos do chassi 793



Fonte: CALTRA (2016)

Após tratar a nuvem de pontos no *software* AutoDesk ReCAP360, foi possível criar a geometria do modelo computacional com alta precisão de detalhamento do chassi no *software* SolidWorks, conforme apresentado na Figura 54, onde é possível convertê-lo em diversos formatos, possibilitando assim, a realização de análise por elementos finitos em diversas ferramentas computacionais. Essa atividade foi realizada em campo com a utilização do conhecimento técnico da empresa CALTRA.

Figura 54 - Modelo computacional chassi do caminhão fora de via



Fonte: CALTRA (2016)

4.6 Simulação numérica

Para a realização da simulação numérica no chassi do caminhão fora de via, foi utilizado o *software* *HyperMesh* como pré-processador, onde foram geradas as malhas com elementos bidimensionais na região de solda, elementos tridimensionais nos demais materiais fundido e laminado e reforços estruturais, assim como aplicação das restrições e condições de carregamentos impostas ao modelo.

No primeiro momento, foi realizado uma calibração do modelo 3D correlacionando às tensões encontradas na análise extensiométrica, com o modelo computacional. Após a calibração do modelo, foi realizado análise estática de tensões utilizando o *Solver Abaqus* versão 6.14, onde se verificou os resultados nos pós processador *Hyperview* versão 14.

4.6.1 Dados da malha

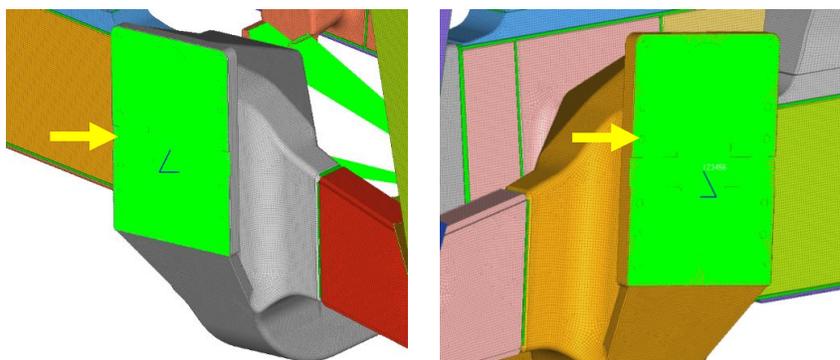
Ao utilizar *software* *HyperMesh*, foi possível criar a malha do modelo do chassi do caminhão fora de via, contendo 20.339.506 elementos com tamanho médio de 10mm, sendo o

menor elemento com 1,62mm. Dos quais a maioria dos elementos são elementos C3D4 (18.635.262 elementos) e PYRAMID5 (1.693.309 elementos), foi contabilizado 4707817 nós e 29 elementos falharam jacobiano.

4.6.2 Condições de restrição

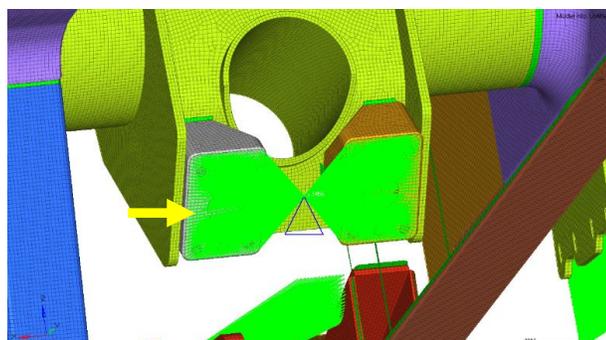
As restrições foram aplicadas nas suas suspensões conforme ilustrado na Figura 55 e no ponto de apoio da âncora conforme ilustrado na Figura 56 utilizando o elemento de corpo rígido RBE3 (*Rigid Body Elements*) restringindo os DOF (*Degrees Of Freedom*) conforme apresentado na Figura 56.

Figura 55 - Suspensões



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 56 - Âncora



Fonte: Elaborado pelo autor

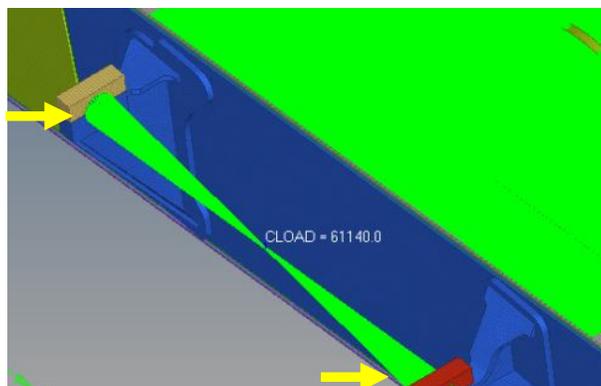
4.6.3 Condições de carregamento

Foram realizados carregamentos estáticos em alguns pontos específicos tais como:

- a) Tanque de combustível;
- b) Motor diesel;
- c) Báscula;
- d) Sistema de arrefecimento;
- e) Conversor de torque;
- f) Cabine de operação;
- g) Carregamento de massa.

Na Figura 57 observa-se o carregamento realizado no suporte do tanque de combustível com carga total de 61140Kgf (estrutura e diesel).

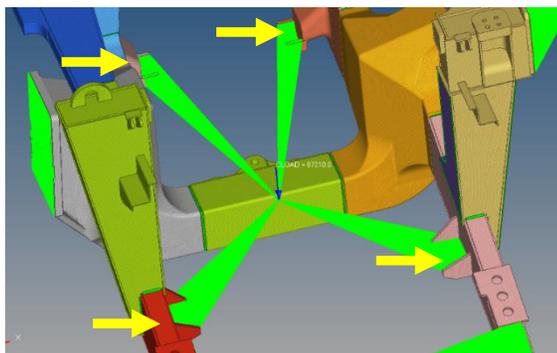
Figura 57 - Tanque de combustível



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 58 observa-se o carregamento realizado no suporte do motor diesel com carga total de 87210Kgf.

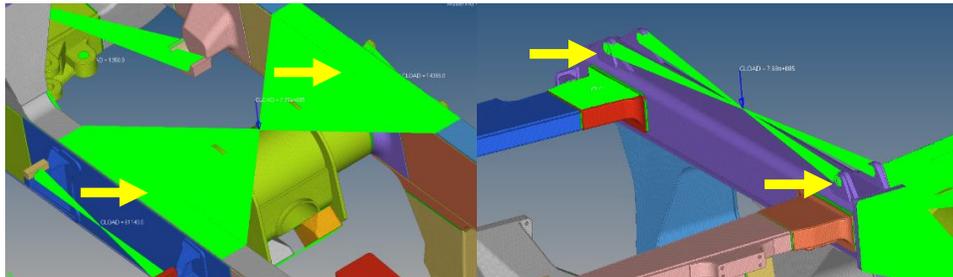
Figura 58 - Motor diesel



Fonte: Elaborado pelo autor

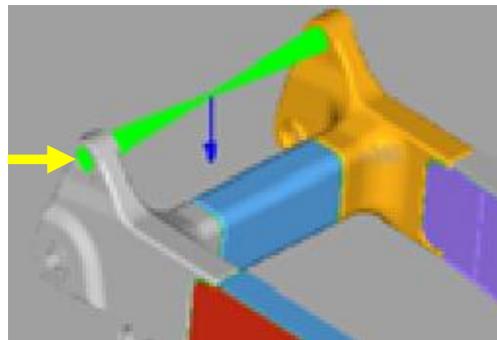
Na Figura 59 observa-se o carregamento realizado nos suportes da balança vazia com carga total de 331890Kgf (estrutura e revestimento).

Figura 59 - Apoio balança



a) Carga na longarina

b) Carga na travessa

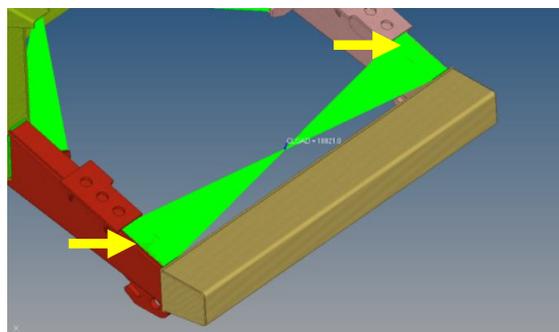


c) Carga no apoio traseiro

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 60 observa-se o carregamento realizado no suporte do sistema de arrefecimento com carga total de 18821Kgf (radiador e líquido).

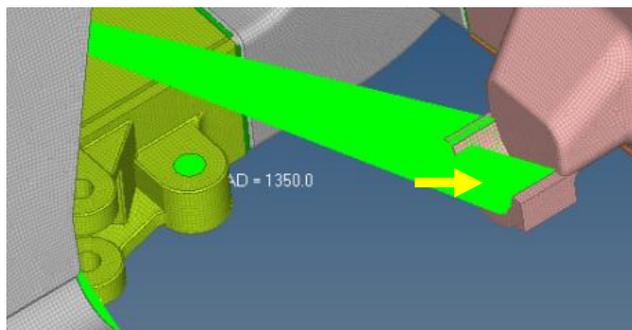
Figura 60 - Líquido de arrefecimento



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 61 observa-se o carregamento realizado no conversor de torque com carga total de 1350Kgf.

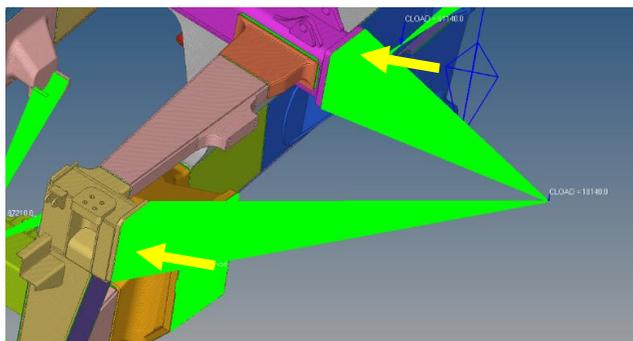
Figura 61 - Conversor de torque



Fonte: Elaborado pelo autor

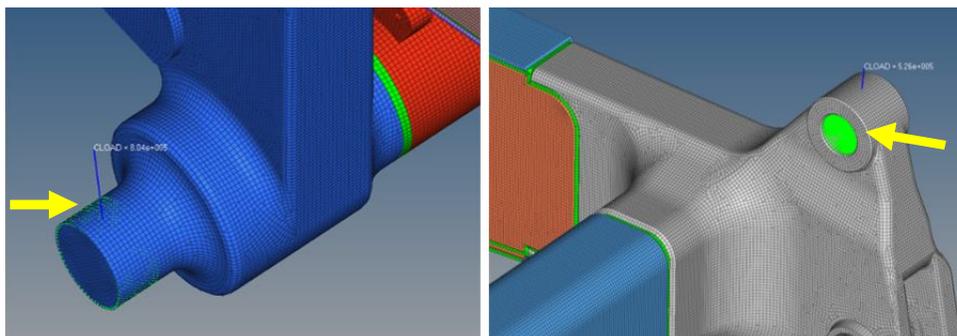
Para realizar o carregamento da cabine de operação, foi aplicado uma carga de 18140Kgf distante dos pontos de modo a gerar esforços de momento nos contatos conforme, Figura 62.

Figura 62 - Cabine de operação



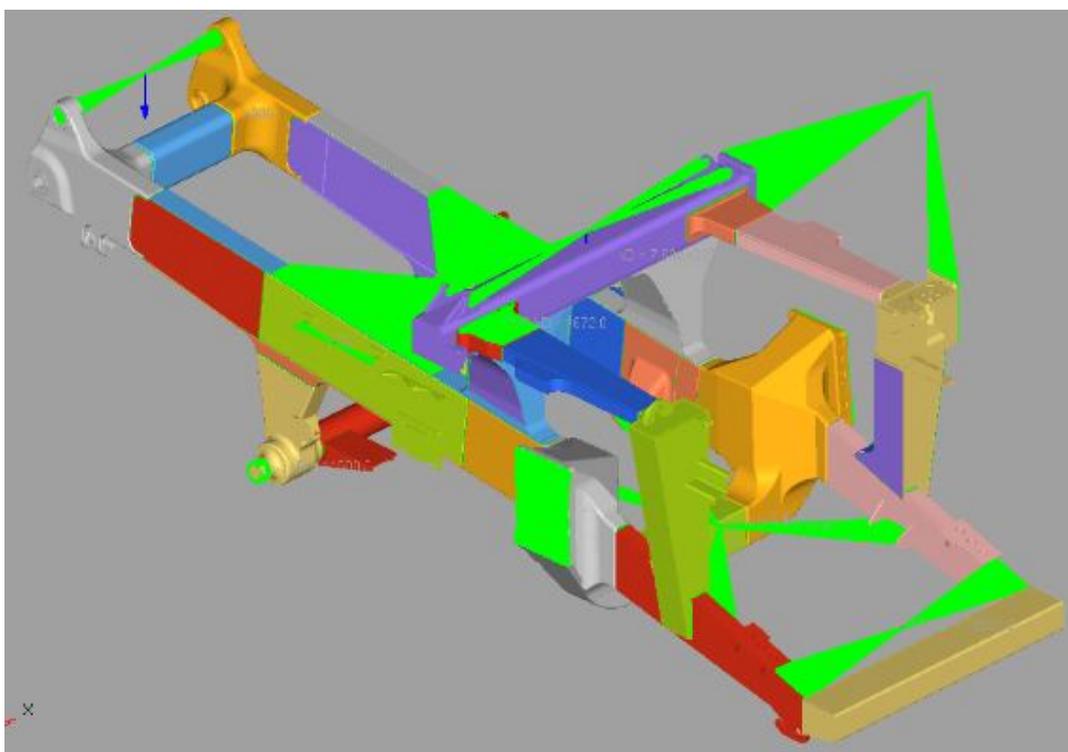
Fonte: Elaborado pelo autor

Para realizar a simulação do basculamento da massa transportada foi considerado carga centralizada na báscula contendo 266 Tf (báscula e produto), carga em cada cilindro de elevação com 80361,5Kgf e em cada articulação traseira com carga de 52588Kgf conforme ilustrado na Figura 63.

Figura 63 - Cargas basculamento

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 64 observa-se o todos os carregamentos e restrições aplicadas na estrutura do chassi do caminhão fora de via.

Figura 64 - Material na báscula

Fonte: Elaborado pelo autor

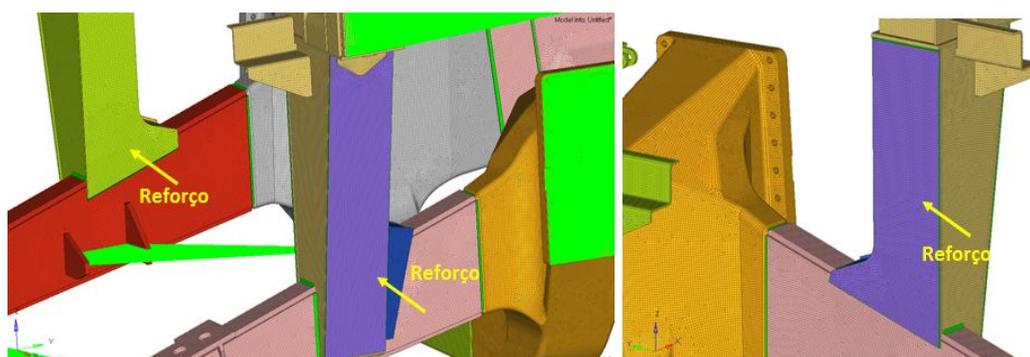
Após finalizar a aplicação de todas as condições de contorno no modelo, o mesmo foi processado utilizando o *Solver Abaqus* versão 6.14 considerando carregamentos estáticos e ao efetuar o basculamento da massa transportada.

4.6.4 Elaboração de reforços estruturais

Visando reduzir as tensões em nos pontos críticos, foram projetados alguns reforços estruturais levando em consideração a utilização de chapas com 12 milímetros de espessura seguindo a conformação das peças do chassi.

Para criação dos reforços foi utilizado a função *offset* na superfície existente, onde as peças foram fixadas por solda à estrutura existente. Na Figura 65 é possível visualizar os reforços realizados na coluna de sustentação da cabine.

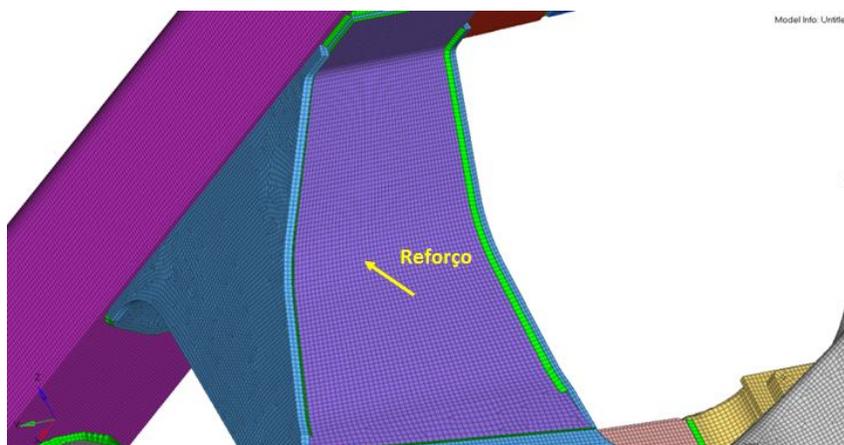
Figura 65 - Reforços na coluna da cabine



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 66 observa-se o reforço realizado na região inferior da coluna de sustentação da balança.

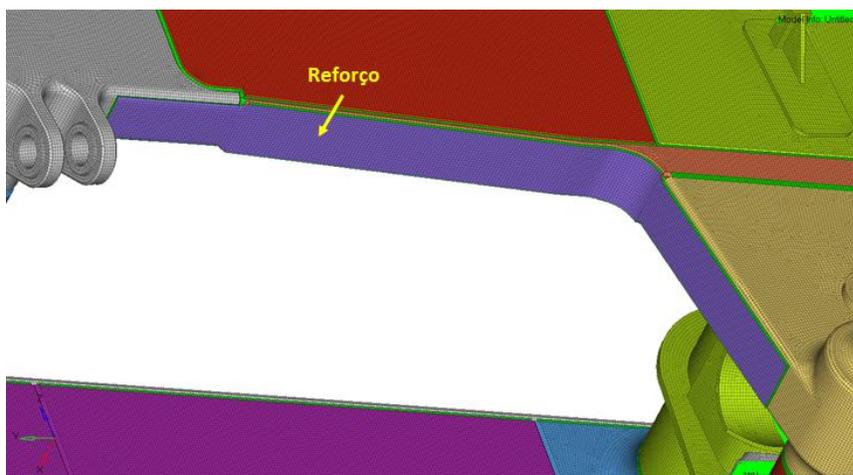
Figura 66 - Reforço na coluna de sustentação da balança



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 67 observa-se o reforço realizado na região inferior da longitudinal próxima ao mancal de apoio da balsa.

Figura 67 - Reforço longitudinal



Fonte: Elaborado pelo autor

4.6.5 Simulação de fadiga

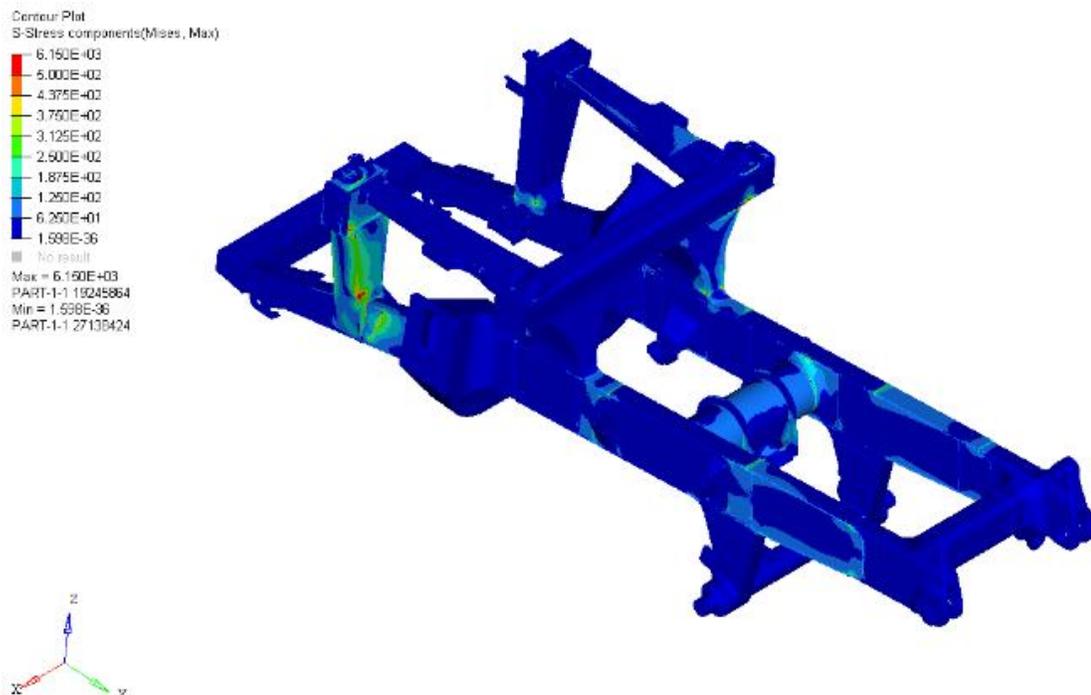
Para realização do estudo de fadiga, foi priorizado a região traseira da estrutura do chassi para análise. Os resultados dos carregamentos estáticos (sem bascular) e basculando, foram importados para o *software* Virtual Lab versão 13.2, assim como as curvas de fadiga dos materiais utilizados na fabricação do componente. Essas informações permitiram ao *software* gerar as tensões médias e alternadas que foram utilizadas para calcular previsibilidade da vida à fadiga.

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 Análise das tensões na cabine de operação e apoio da balança

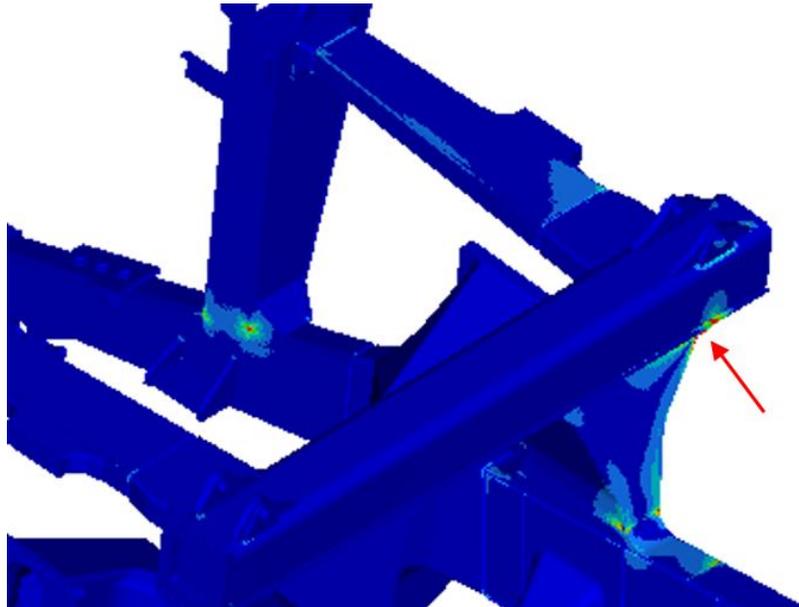
Ao observar os resultados do carregamento estático (sem bascular), foi identificado que o modelo apresentou duas regiões críticas para o carregamento aplicado, localizados na coluna de apoio da cabine de operação com 540MPa, conforme ilustrado na Figura 68, e na coluna de apoio da balança com 604MPa, conforme ilustrado na Figura 69.

Figura 68 - Coluna de apoio da cabine



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 69 - Coluna de apoio da balança



Fonte: Elaborado pelo autor

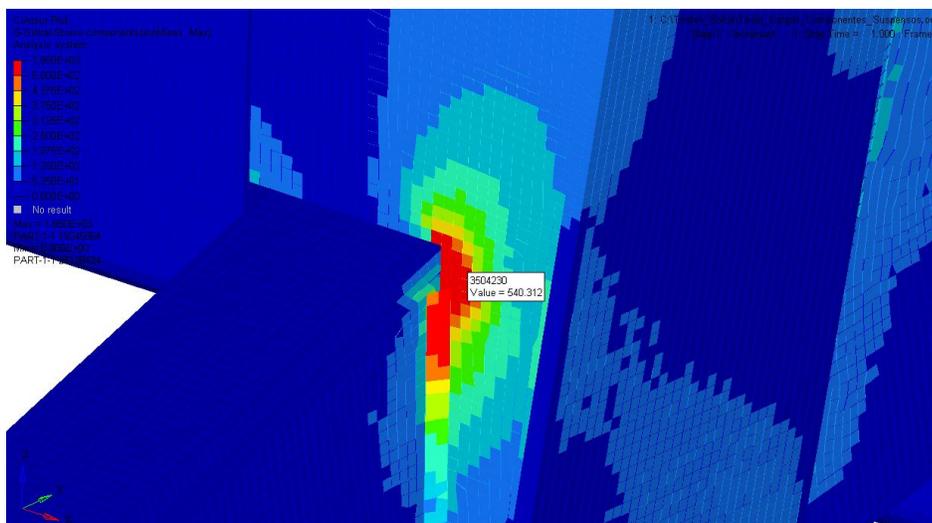
Ao analisar a alta tensão na região inferior da coluna de sustentação da cabine foi observado a ausência do apoio de modo uniforme da coluna no chassi, assim como ausência de solda em toda linearidade da peça conforme observa-se na Figura 70.

Figura 70 - Apoio inferior da cabine



a) Trincas identificadas em campo

b) Desenho CAD

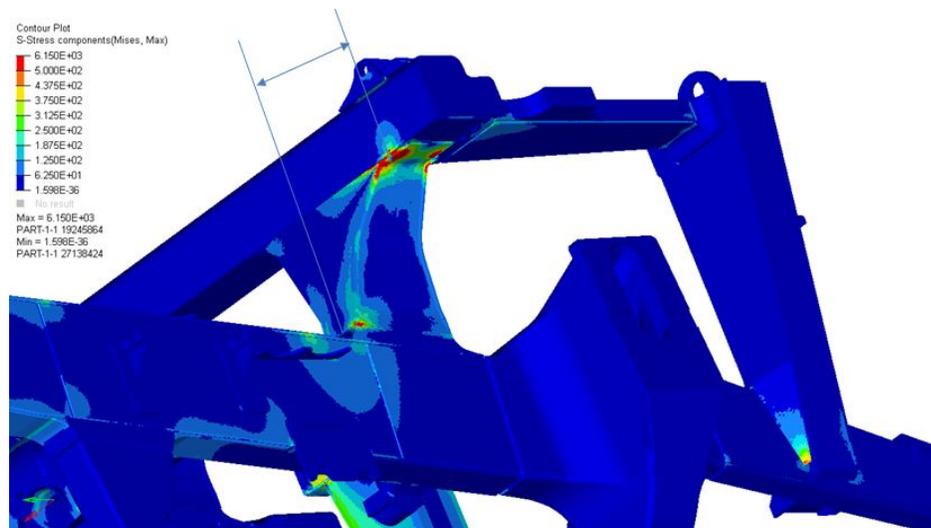


c) Ponto de tensão

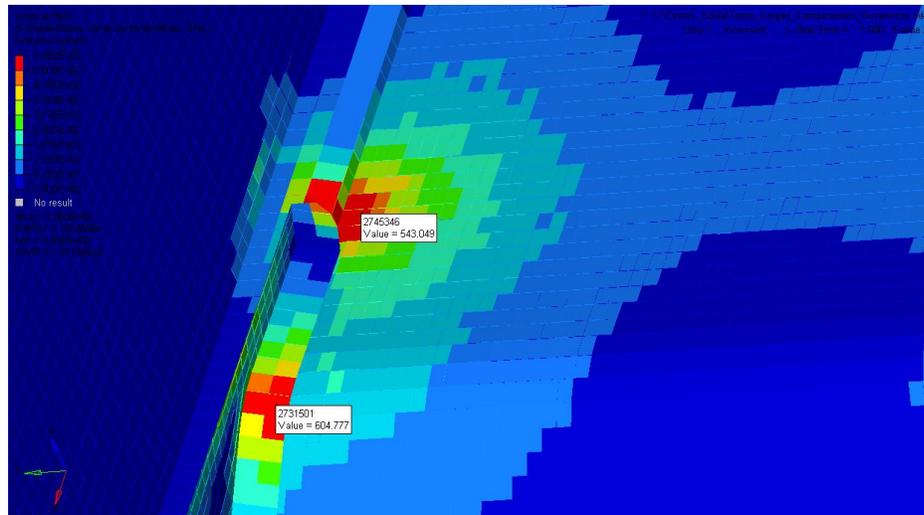
Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 71 é possível observar o ponto de alta tensão na região inferior do apoio da báscula, assim como o desalinhamento do ponto de apoio da báscula com relao as longarinas do chassi.

Figura 71 - Apoio da báscula



a) Ponto de apoio da báscula (desalinhamento)



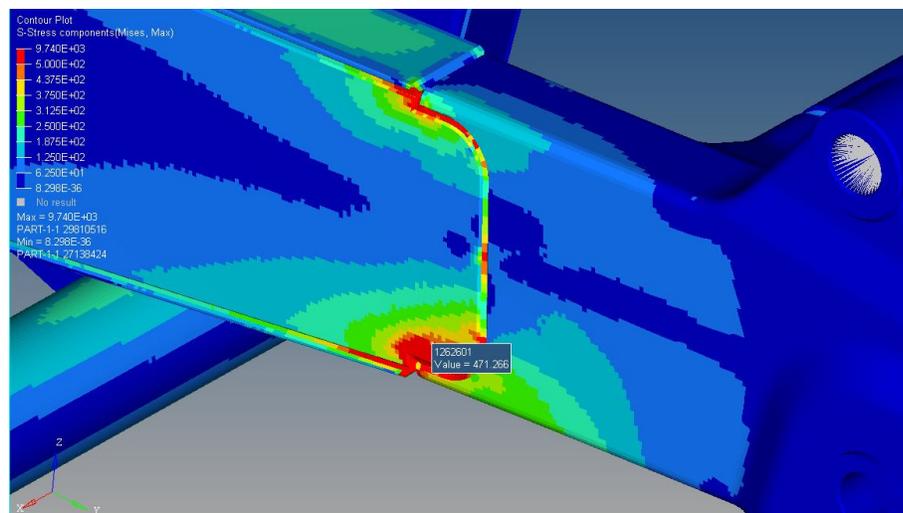
c) Ponto de tensão

Fonte: Elaborado pelo autor

5.2 Análise das tensões ao bascular

Foi possível observar na análise extensiométrica realizada durante o ciclo operacional, que o momento de maior tensão no chassi do caminhão fora de via ocorre durante o início do basculamento da massa transportada. Diante dessa situação, foi realizado a simulação numérica do basculamento, onde é possível observar na Figura 72, que a solda entre o material laminado e fundido localizada na região traseira do chassi, apresentou altas tensões (471MPa), o que pode refletir em provável ocorrência de formação de trincas por fadiga nesse local.

Figura 72 - Tensão ao bascular





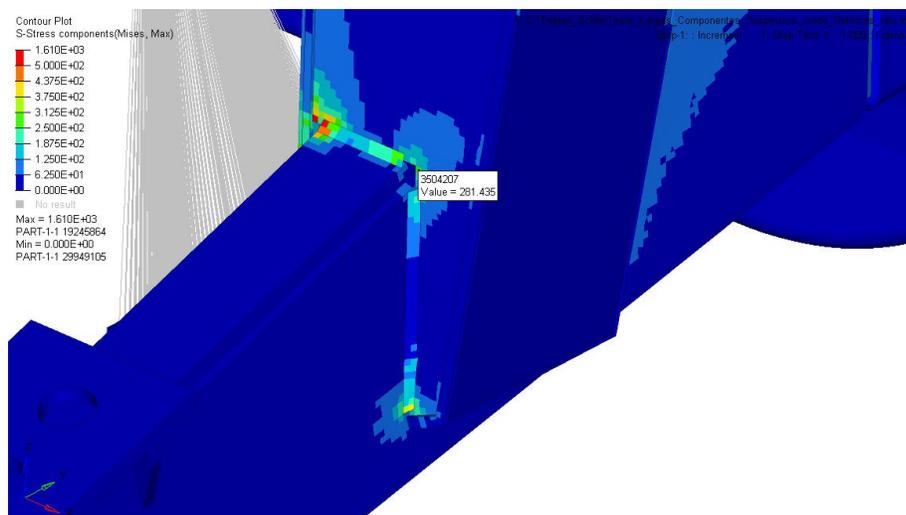
Fonte: Elaborado pelo autor

5.3 Análise das tensões com reforços estruturais

Após criação dos reforços estruturais, o modelo foi novamente processado para verificar os resultados das tensões.

Na Figura 73 é possível observar a redução de 47,9% da tensão no ponto inferior da coluna de sustentação da cabine de operação, apresentando pós reforço 281MPa.

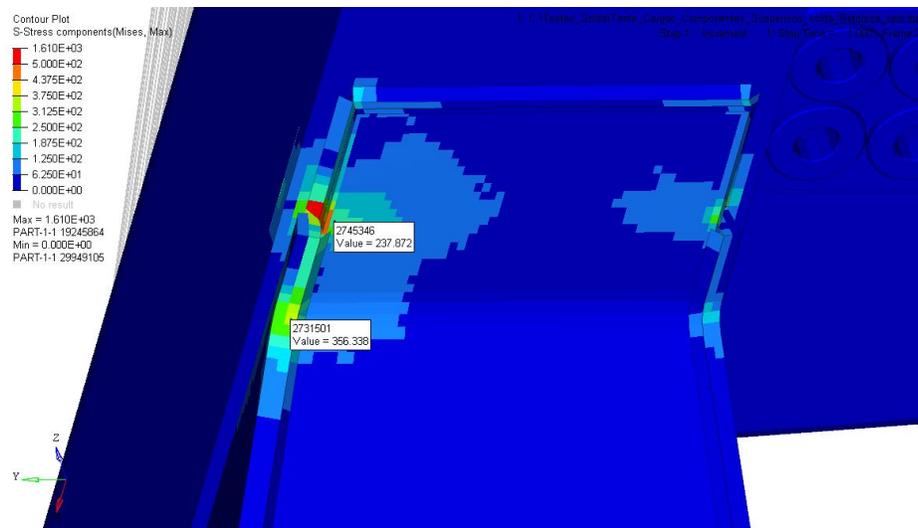
Figura 73 - Apoio inferior da cabine – Com reforço



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 74 é possível observar a redução de 56,2% no ponto superior e 41,1% no ponto inferior da tensão da região analisada na coluna de sustentação da balança, apresentando pós reforço 237MPa e 356MPa respectivamente.

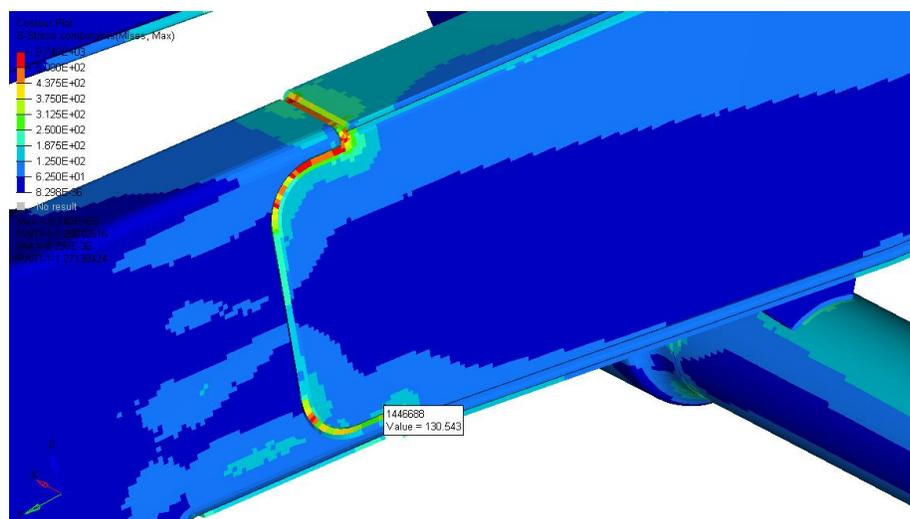
Figura 74 - Apoio da balança – Com reforço



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 75 é possível observar redução de 72,3% na região inferior da longarina quando se realiza o basculamento do material, apresentando pós reforço 130MPa.

Figura 75 - Tensão ao bascular – Com reforço



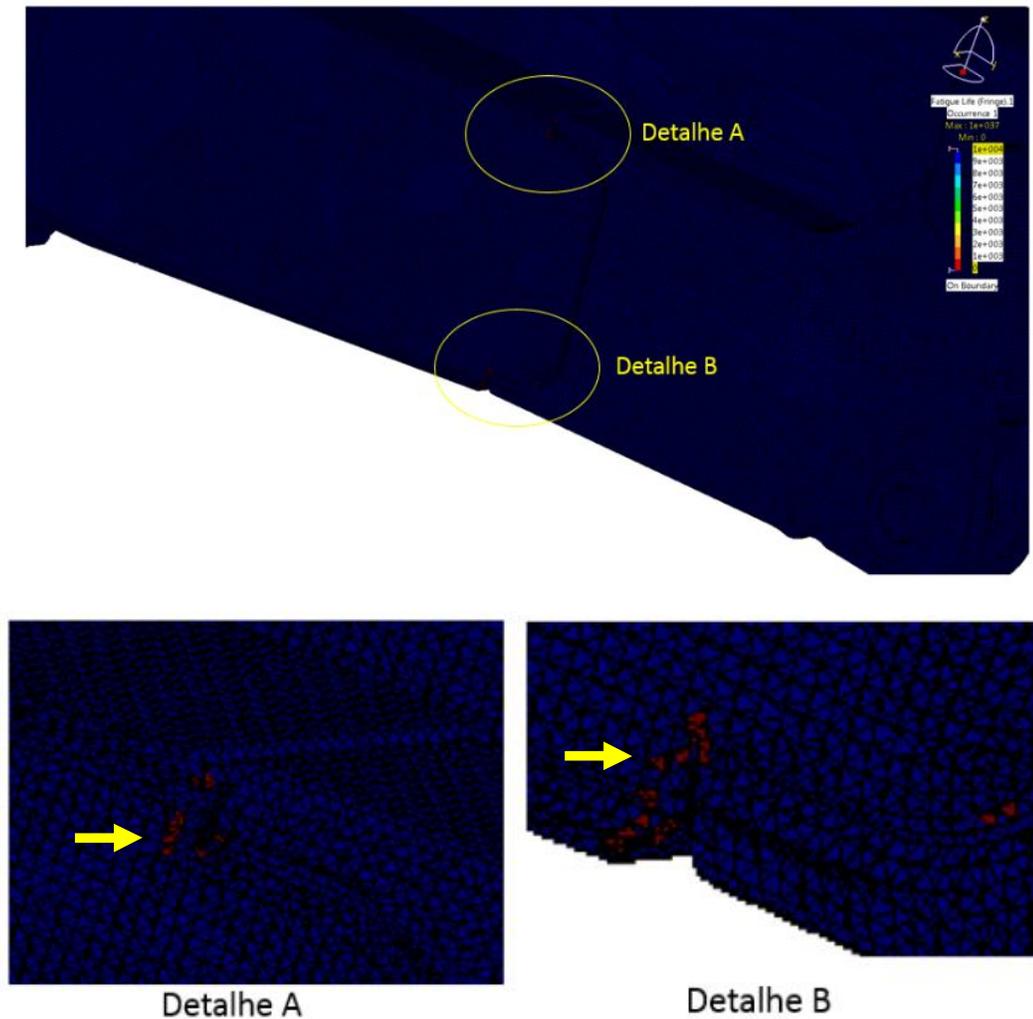
Fonte: Elaborado pelo autor

5.4 Análise do estudo de fadiga

Para realização do estudo de fadiga foi priorizado a região traseira do chassi devido este local ter apresentado ponto de maior tensão durante o ciclo operacional, também, por ser uma região onde encontra-se a junção de dois materiais diferentes (laminado e fundido). Foram realizados dois testes, o primeiro sem reforço estrutural e o segundo com reforço estrutural.

Ao realizar a simulação de fadiga sem reforço estrutural, é possível observar na Figura 76, pontos com vida próxima de zero.

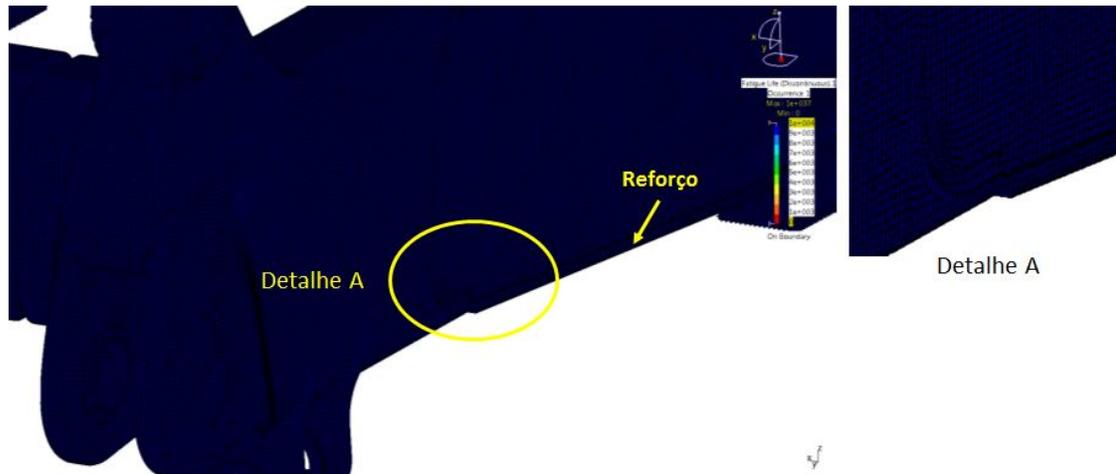
Figura 76 - Simulação de fadiga – Sem reforço



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 77 observa-se a simulação de fadiga no chassi com a aplicação do reforço estrutural, onde a vida mínima de fadiga apresentou igual a $10e^4$ ciclos.

Figura 77 - Simulação de fadiga – Com reforço



Fonte: Elaborado pelo autor

6 CONCLUSÃO

Conclui-se que os resultados obtidos a partir dos ensaios físico-químicos, realizados nas amostras dos aços utilizados na fabricação do chassi, permitiu classificá-los como ASTM A36 e SAE 1021, o que demonstrou que eles se referem à materiais comuns, de média resistência mecânica e são amplamente utilizados nas indústrias.

Após instrumentação do caminhão, com a utilização de extensômetros e acelerômetros, foi possível entender as reais tensões pelas quais o chassi está submetido durante o ciclo operacional, tendo o momento de maior tensão, o basculamento das cargas transportadas que apresentou valores próximos à 83MPa.

A elaboração do desenho com a utilização do Scanner 3D e *software* SolidWorks possibilitou a identificação de detalhes que, normalmente, são difíceis de ser observados sem a utilização de ferramentas especiais, permitindo assim, a realização de simulações mais assertivas.

Ao realizar a simulação do carregamento estático (sem bascular), percebeu-se falha de projeto, pois não houve fixação correta do apoio da coluna da cabine ao chassi. Assim como ponto de melhoria referente à centralização do apoio da báscula em relação às longarinas do chassi, minimizando a tensão causada pelo momento fletor na estrutura.

Durante a simulação de basculamento, observou-se um ponto de alta tensão na região traseira do chassi entre a união dos dois materiais diferentes, o que possibilita o surgimento de trincas no local.

A criação de reforços estruturais, permitiu diminuir a alta tensão na coluna de sustentação da cabine de 540MPa para 281MPa. Na coluna de sustentação da báscula, a redução da tensão foi de 604MPa e 543MPa para 356MPa e 237MPa, respectivamente. Já na região traseira do chassi, durante o basculamento, a redução da tensão foi de 471MPa para 130MPa, comprovando assim, que pequenas alterações no projeto, podem trazer ótimos resultados.

O estudo de fadiga na região priorizada do chassi, apresentou pontos frágeis com o surgimento de falhas por fadiga, com vida próxima de zero, antes da aplicação do reforço estrutural. Após realização do reforço, a estrutura apresentou vida mínima de fadiga igual a $10e^4$ ciclos. Para aplicação desses reforços, foram utilizadas chapas de aço com 12mm de espessura.

É relevante ressaltar aqui os impactos que o processo de soldagem pode ocasionar na estrutura, tanto na condição real de fabricação, quanto em simulações pelo método de elementos

finitos. Essas condições tendem a diminuir a vida do componente ou induzir à erros durante os estudos.

7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, sugere-se a realização de estudos, levando em consideração a substituição do material utilizado na fabricação do chassi, sem alterar a conformabilidade do metal. Assim como a realização de estudos de fadiga em toda estrutura do chassi, levando em consideração a descentralização das cargas transportadas, condições irregulares das vias e condições de amortecimento, tais como sistema de suspensão e pneus, o que pode contribuir na diminuição, considerável, dos casos de falhas ocasionados por fadiga no chassi dos caminhões fora de via.

REFERÊNCIAS

ASTM E-112-13. **Standard Test Methods for Determining Average Grain Size.** 2013.

ASTM E18-15. **Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials.** 2015.

ASTM E-1823-96. **Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing.** 1996.

ASTM E/E8M-15a. **Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.** 2015.

ASTM E23-12c. **Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.** 2012.

ASTM E466-15. **Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Material.** 2015.

AGGEN, G.; AKSTENS, Frank W.; ALLEN, C. Michael; AVERY, H. S.; BABU, P.; BAYER, Alan M.; BELLO, Felix; BHAT, Shrikan P; AMERICAN SOCIETY FOR METALS INTERNATIONAL. **ASM Handbook:** v 6: Welding, Brazing, and Soldering. USA: ASM International. 1998.

ANDERSON, Ted L., **Fracture mechanics: Fundamentals and applications.** 3rd Edition, CRC Press, USA, 2004.

ARIDURU, S. **Fatigue life calculation by rainflow cycle counting method.** 2004. 136p. Master of Science Thesis. The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, Çankaya Ankara, Turquia, 2004.

ASKELAND, Donald R.; WRIGHT, Wendelin J. **Ciência e engenharia dos materiais.** 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2008.

BADER, Qasim. Effect of V notch shape on fatigue life in steel beam made of AISI 1037. **Journal of Engineering Research and Application**, v. 4, p. 39-46, June 2014.

BHAVI, Iresh e outros. Determination of fatigue life of spiral bevel gears used in automotive differential gearbox. **Journal of Engineering Research and Application**, v. 7, p. 49-52, June 2017.

BRANCO, Moura C., Augusto Fernandes, Paulo Tavares de Castro. **Fadiga de estruturas soldadas.** 5. ed. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1999.

CALLISTER, Jr. William D. **Materials science and engineering: An introduction.** 7. ed. New York: John Wiley, 2008.

CALTRA. **Análise mecânica e estrutural dos equipamentos de mina aos complexos de Itabira, Mariana e Minas Centrais.** VALE, Itabira, 2016.

CASTRO, Márcio Schneider de. **Uma metodologia para melhoria da rigidez torcional de componentes estruturais automotivos**. 2008. 129f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

CATERPILLAR. **A Reference guide to surface mining applications** – Field Guide 2013. Peoria: 2013.

CATERPILLAR. **Cat® Road Analysis Control (RAC) for Cat 785C, 789C, 793C and 797B Mining Trucks**. 2002.

CATERPILLAR. **Systems operation general information: Road Analysis Control (RAC) For Off-Highway Truck/Tractors**, media number RENR2636-07, 2012.

COLLINS, Jack A. **Failure of materials in mechanical design: Analysis, prediction, prevention**. 2. ed. Columbus: John Wiley & Sons, 1993.

CONFÍÑO, Rachel Cristina. **Análise das tensões residuais em uma junta soldada em condição overmatch**. 2010. 82f. Trabalho de conclusão de curso. Centro Universitário da FEI. São Bernardo do Campo, 2010.

DOWLING, Norman E. **Mechanical behavior of materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture and Fatigue**. Blacksburg: Prentice Hall, 1993.

ELLYIN, F. **Fatigue damage, crack growth and life prediction**. London: Chapman & Hall, 1997.

ESTEVES, Marcela Correia. **Alívio das tensões residuais de soldagem por shot peening na construção naval**. 2015. 61f. Dissertação de Bacharelado – Engenharia Naval e Oceânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2015.

FALCÃO, César Augusto de Jesus. **Estudo do comportamento da fadiga de baixo ciclo em altas temperaturas do aço inoxidável AISI 420**. 2002. 138f. Tese (Doutorado) – Área de Ciências e Engenharia de Materiais de São Paulo. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

FUI, Teo Han; ROSLAND, Abd Rahman. Statics and dynamics structural analysis of a 4.5 ton truck chassis. **Jurnal Mekanikal**, N° 24, p. 56-67, December 2007.

FURTADO, Daniel Canongia. **Análise estrutural de chassi de veículos automotivos**. 2013. 88f. Dissertação de Bacharelado – Programa de Graduação em Engenharia Automotiva, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

GOES, Keurrie C. **Um modelo para previsão de vida à fadiga de juntas soldadas submetidas a carregamentos combinados**. Dissertação título de mestre em engenharia mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – São Paulo 2010.

GOMES, Daniel Januário e outros. Influence of surface roughness on ultra-high-cycle fatigue of AISI 4140 Steel. **Journal of Engineering Research and Application**, v. 5, p. 80-90, April 2015.

- HADIPOUR, Mousa e outros. A Study on the Vibrational Effects of Adding an Auxiliary Chassis to a 6-Ton Truck. **Journal of American Science**, v. 6, p. 1219-1226, Julho 2011.
- HEMANT, L Aghav; M, V, Walame. Stress analysis and fatigue analysis of front axle of heavy-duty truck using ANSYS Ncode Design Life for different loading cases. **Journal of Engineering Research and Application**, v. 6, p. 78-82, June 2016.
- HERTZBERG, Richard W. **Deformation and fracture mechanics of engineering materials**. 4. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 1996.
- JANARDHAN, J. Radial. Fatigue analysis of an alloy wheel. **Journal of Engineering Research and Application**, v. 4, p. 253-258, December 2014.
- LARA, Raquel Silva. **Análise de concentração de tensões em juntas soldadas**. 2016. 114f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- LOPES, Karina Stefania Souza. **Influência dos parâmetros de usinagem na resistência à fadiga de aços AISI 4140**. 2006. 163f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- LOPES, Pedro Samuel de Brito. **Análise estrutural do chassi de uma viatura fórmula livre FIA**. 2014. 120f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Mecânica, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, 2014.
- MANSUR, Tanius R. **Estudo das tensões residuais em juntas soldadas de materiais dissimilares e determinação dos limites de resistência à fadiga dos metais de base**. Soldag. Insp. São Paulo, Vol.16, N°3, p.274-284, 2011.
- MARTINS, Ana Filipa Pina Monteiro. **Análise de fadiga em juntas de tensão em estrutura offshore**. 2013. 133f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Especialização em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2013.
- MASUBUCHI, K. **Analysis of welded structures**. International Series on Material Science and Technology, Vol.33. MIT. EUA: Pergamon, 1980.
- MEINBERG, Gustavo Furtado. **Análise de danos de fadiga do encosto do baco posterior de um veículo de passageiros**. 2010. 104f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
- MIB, *Materials Institute of Brazil*. **Certificados**. Laudos N° MIB034915, MIB035015, MIB035115. São Carlos, São Paulo, 2015.
- MOHAMED, Aezeden. The effect of cooling rate on cyclic stress strain response of Al-2024. **Journal of Engineering Research and Application**, v. 3, p. 1116-1120, May 2013.

MORAES, Giovanni. **Sistema de Gestão de Riscos: Estudo de análise de riscos**. 1.ed. Gerenciamento Verde Editora e Livraria Virtual. Rio de Janeiro, p. 379. 2013.

MORAIS, Willy Ank de. Fadiga nos aços estruturais. **Revista do aço**, dezembro 2013. Disponível em: <www.revistadoaco.com.br/fadiga-nos-acos-estruturais/> Acesso em: 05 novembro 2017.

MOREIRA, Luiza Pessoa. **Efeito de características microestruturais na tenacidade à fratura e no crescimento de trinca por fadiga de aços perlíticos de aplicação ferroviária**. 2015. 105f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

NASCIMENTO, Alexandre Gomes. **Estudo comparativo da resistência à fadiga do aço API 5L grau B submetido a tratamento criogênico**. 2013. 78f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas, Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

NIELSEN, L. **Mechanical properties of polymers and composites**. USA: Marel Dekker Inc, v. 2, 1974.

OST, Ana Paula; KRAULICH, Claudia Vanessa; RIBAS, Guilherme; MANTOVANI, César. **Análise estrutural estática do chassi de uma transplantadora com base no emprego do software Solidworks Simulation**. 2011.12f. Semana Internacional das Engenharias da FAHOR. Faculdade Horizontina, 2011.

PEREIRA, Bani Valério Alves. **Análise estrutural de carro de corrida (stock-car) pelo método de elementos finitos**. 2012. 114f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Mecânica, Universidade de Taubaté, São Paulo, 2012.

PETRACCONI, César. **Análise comparativa do comportamento de fadiga do gancho reboque posterior de um veículo automotor**. 2008. 92f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

PILKEY, Walter D. **Peterson's Stress Concentration Factors**. 3rd edition, Wiley, 2008.

RENUKE, Pravin A. Dynamic Analysis Of A Car Chassis. **Journal of Engineering Research and Application**, v. 2, p. 955-959, December 2012.

RIBEIRO, Henrique Varella. **Estudo da propagação da trinca por fadiga em um aço de alta resistência e baixa liga após o processo de soldagem por centelhamento**. 2011. 109f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais. Escola de Engenharia de Lorena – São Paulo, 2011.

SINGH, Amrendra Kumar e outros. Design and analysis of chassis frame. **International Journal of Research and Engineering**, v. 3, April 2016.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos**. 5. ed. São Paulo: E. Blucher, 2014.

SOUZA, Júlio Cesar de. **Método de lavra à céu aberto**. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, p. 4, jan. 2001.

SOUZA, Remo Magalhães de. **O método dos elementos finitos aplicado ao problema de condução de calor**. 2003. 40f. Departamento de Engenharia Civil. Belém, 2003.

SOUZA, Iago Campos de; ALVES, Marcos Vinicius Ferreira; PEREIRA, Matias Pereira. **Avaliação de impacto ambiental na mineração**. 2013. 21f. Universidade do Estado do Pará, Pará, 2013.

SOARES, Fernando Souza; GERTZ, Luiz Carlos; CERVIERI, André; AIRES, Antônio Flávio Rodrigues; Silveira, Marília Amaral da. **Desenvolvimento de um chassi automotivo para um veículo elétrico de pequeno porte**. 2012, 12f. Revista de Iniciação Científica da ULBRA, 2012.

SUMANT, Patel; Dr. A.V. Goshil. Whell – Rail contact fatigue. **Journal of Engineering Research and Application**, v. 3, p. 980-983, March 2013.

TUSHAR, M. Patel; Dr. M.G. Bhatt; HARSHAD, D. Patel – Analysis and validation of Eicher 11.10 chassis frame using Ansys. **International Journal of Emerging Trends & Technology in Computer Science**, v. 2, April 2013.

VALE. **Índice de preço do minério de ferro (finos)**. Disponível em: <www.vale.com/brasil/PT/business/mining/iron-ore-pellets/Paginas/Iron-Ore-Indices.aspx> Acesso em: 14 janeiro 2018.

VIEIRA, Clério Santos. **Análise probabilística de vida útil de pneus aplicados em equipamentos de mineração: Tratamento de dados de supervisórios transmitidos via telemetria**. 2016. 94f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

WELDING. **Laboratório de ensaios e análises de materiais**. Certificados N° 16660781230, 16660781232, 16660781233. Sertãozinho, São Paulo, 2016.

YOUNGS, Warren C. BUDYNAS, Richard G. **Roark's formulas for stress and strain**. McGraw-Hill Book Co., 6ª ed., 1989.

ZAKARIA, Ariffin Kamarul e outros. Fatigue strain signal behaviour and damage assessment of an engine mount bracket. **Journal of Engineering Research and Application**, v. 73, p. 112-116, February 2014.

ANEXOS

WELDING

LABORATÓRIO DE ENSAIOS E ANÁLISES DE MATERIAIS
CERTIFICADO DE ANÁLISE DE MATERIAL
 Material Analysis Certificate

CERTIFICADO Nº
 Certificate No.
16660781232

O.S.: 16-2165

DATA: 18/07/2016
 Date

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA

Sample Identification

Nome/Identificação: Amostra de chapa de aço - Ident: 2A - 703C laminado.

Cliente: Caltra Projetos e Consultoria Ltda

Name/Identification

Customer:

Fornecedor: Não Declarado

Supplier:

Material / Norma (Declarado): Não Declarado

Material / Standard (Declared):

ANÁLISE QUÍMICA

Chemical Analysis

Composição (% peso) Composition (weight %)		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al		
Especificado: Standard Requirement	(min.) (max.)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Resultado: Result		0,138	0,204	1,18	0,034	0,007	0,018	0,012	0,004	0,005	0,021		

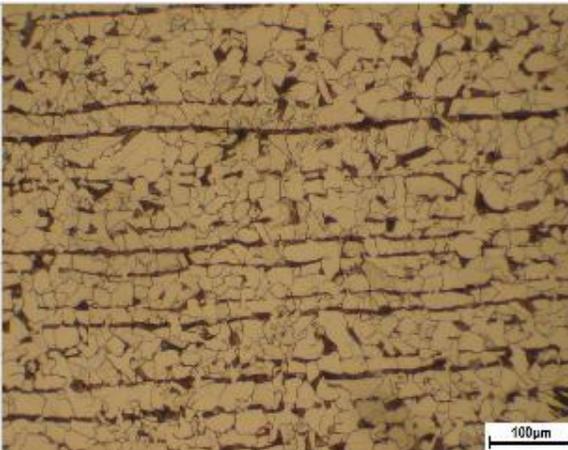
ENSAIOS MECÂNICOS

Mechanical Testing

Discriminação Discrimination	Especificado Standard Requirement	Resultado Result	Discriminação Discrimination	Especificado Standard Requirement	Resultado Result
Ensaio de Tração Tensile Test	Lim. Resistência Tensile Strength	488 MPa	Impacto Impact Test (Charpy)	-	-
	Lim. Escoamento Yield Strength	330 MPa	Dureza Hardness	-	-
	Alongamento Elongation	31 %	Camada Endurecida Measuring Hardened Case	-	-
	Redução de Área Reduction of Area	73 %	Achatamento Expansion	-	-

ANÁLISE METALGRÁFICA

Metallographic Analysis

Reagente Etching Reagent	Nital - 3%	
Matriz:	Ferrítica com cerca de 20% de perlita lamelar.	
Tamanho de Grãos:	Grãos ferríticos de tamanhos 6 e 7 predominantes, conforme norma ASTM E 112-13.	
Particularidades:	Apresenta textura bandeada.	
Caracterização:	Microestrutura típica de aço baixo carbono, laminado e normalizado.	

OBSERVAÇÕES / CONCLUSÃO

Remarks

Conclusion

Através da análise metalúrgica realizada podemos enquadrar o material analisado como similar ao especificado na norma ASTM A 36.

Mário R. Pericariani
Mário R. Pericariani
 MSc Engenharia de Materiais
 Supervisor Laboratório
 Laboratory Supervisor
 CREA-SP nº 060.107.791-8

NORMAS APLICADAS / Referenced Standards

Análise química: PRO-LAB-012 / PRO-LAB-014 / PRO-LAB-017; Ensaio de Tração: PRO-LAB-005; Preparação de amostra para análise metalográfica: PRO-LAB-006; Análise metalográfica: PRO-LAB-008;

(Os resultados das análises e ensaios têm significação restrita e se aplicam não somente às amostras analisadas.)

Welding Inspeções, Engenharia e Análise de Materiais Ltda. São Joãozinho - SP - Tel.: +55 (16) 3513-8600 / Fax: (16) 3513-8620 - www.welding.com.br
 Este documento não pode ser cedido ou copiado sem prévia autorização da Welding FR-LAB-006-00

WELDING

LABORATÓRIO DE ENSAIOS E ANÁLISES DE MATERIAIS

CERTIFICADO DE ANÁLISE DE MATERIAL

CERTIFICADO Nº

Certificata N.º

16660781230

O.S.: 16-2165

DATA: 18/07/2016

Date

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA

Sample Identification

Nome/Identificação: Amostra de chapa de aço - Ident: 4 - 793C fundido.

Cliente: Caltra Projetos e Consultoria Ltda

Name/Identification

Customer:

Fornecedor: Não Declarado

Supplier:

Material / Norma (Declarado): Não Declarado

Material / Standard (Declared):

ANÁLISE QUÍMICA

Chemical Analysis

Composição (% peso) Composition (weight %)		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al		
Especificado: Standard Requirement	(min.) (max.)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Resultado: Result		0,181	0,182	0,882	0,030	0,008	0,055	0,154	0,021	0,370	0,006		

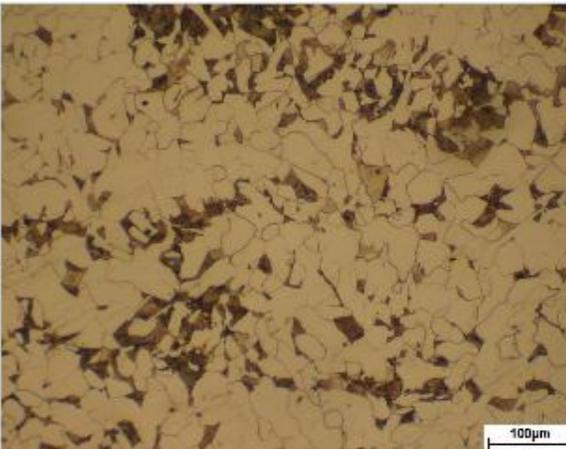
ENSAIOS MECÂNICOS

Mechanical Testing

Discriminação Discrimination	Especificado Standard Requirement	Resultado Result	Discriminação Discrimination	Especificado Standard Requirement	Resultado Result		
						Lim. Resistência Tensile Strength	Lim. escoamento Yield Strength
Lim. Resistência Tensile Strength	-	500 MPa	Impacto Impact Test (Charpy)	-	-		
Lim. Escoamento Yield Strength	-	331 MPa	Dureza Hardness	-	-		
Alongamento Elongation	-	28 %	Camada Endurecida Measuring Hardened Case	-	-		
Redução de Área Reduction of Area	-	63 %	Achatamento Expansion	-	-		

ANÁLISE METALGRÁFICA

Metallographic Analysis

Reagente Etching Reagent	Nital - 3%	
Matriz:	Ferrítica com cerca de 15% de perlita lamelar.	
Tamanho de Grãos:	Grãos ferríticos de tamanho 6 predominante, conforme norma ASTM E 112-13.	
Particularidades:	-	
Caracterização:	Microestrutura típica de aço baixo carbono, fundido e normalizado.	

OBSERVAÇÕES / CONCLUSÃO

Remarks

Conclusion

Através da análise metalúrgica realizada podemos enquadrar o material analisado como similar ao especificado na norma SAE 1021 Fundido.



Marcelo R. Pericarrari

MSc Engenharia de Materiais
Supervisor Laboratório
Laboratory Supervisor
CREA-SP nº 060.107.791-8

NORMAS APLICADAS / Referenced Standards

Análise química: PRO-LAB-012 / PRO-LAB-014 / PRO-LAB-017; Ensaio de Tração: PRO-LAB-005; Preparação de amostra para análise metalográfica: PRO-LAB-006; Análise metalográfica: PRO-LAB-008;

(Os resultados das análises e ensaios têm significação restrita e se aplicam tão somente às amostras analisadas.)

Welding Inspeções, Engenharia e Análise de Materiais Ltda. Sorocaba - SP - Tel.: +55 (16) 3513-8600 / Fax: (16) 3513-8620 - www.welding.com.br
Este documento não pode ser cedido ou copiado sem prévia autorização da Welding FR-LAB-006-00

WELDING

LABORATÓRIO DE ENSAIOS E ANÁLISES DE MATERIAIS
CERTIFICADO DE ANÁLISE DE MATERIAL
 Material Analysis Certificate

CERTIFICADO Nº
 Certificate No.
16660781233

O.S.: 16-2165
 DATA: 18/07/2016
 Date

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA

Sample Identification

Nome/Identificação: Amostra de chapa de aço - Ident 3 - 793C laminado.

Cliente: Caltra Projetos e Consultoria Ltda

Name/Identification

Customer:

Fornecedor: Não Declarado

Supplier:

Material / Norma (Declarado): Não Declarado

Material / Standard (Declared):

ANÁLISE QUÍMICA

Chemical Analysis

Composição (% peso) Composition (weight %)		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al		
Especificado: Standard Requirement	(min.) (max.)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Resultado: Result		0,001	0,103	1,42	0,033	0,007	0,148	0,006	0,026	0,319	0,032		

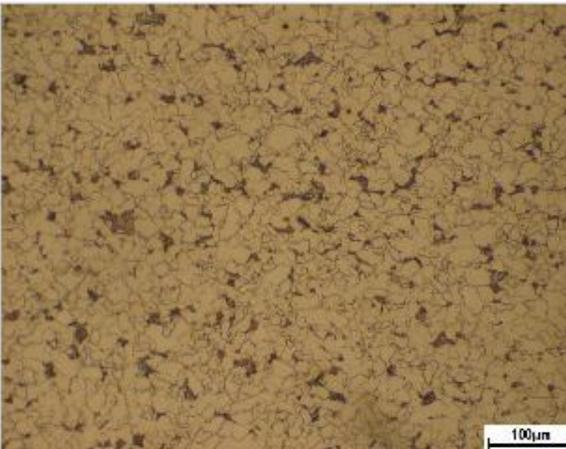
ENSAIOS MECÂNICOS

Mechanical Testing

Discriminação Discrimination	Especificado Standard Requirement	Resultado Result	Discriminação Discrimination	Especificado Standard Requirement	Resultado Result		
						Lim. Resistência Tensile Strength	Lim. Escoamento Yield Strength
Lim. Resistência Tensile Strength	-	509 MPa	Impacto Impact Test (Charpy)	-	-		
Lim. Escoamento Yield Strength	-	418 MPa	Dureza Hardness	-	-		
Aalongamento Elongation	-	32 %	Camada Endurecida Measuring Hardened Case	-	-		
Redução de Área Reduction of Area	-	77 %	Achatamento Expansion	-	-		

ANÁLISE METALGRÁFICA

Metallographic Analysis

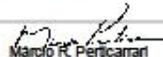
Reagente Etching Reagent	Nital - 3%	
Matriz:	Ferrítica com cerca de 10% de perlita em decomposição.	
Tamanho de Grãos:	Grãos ferríticos de tamanho 8 predominante, conforme norma ASTM E 112-13.	
Particularidades:	-	
Caracterização:	Microestrutura típica de aço baixo carbono, laminado, normalizado e revenido.	

OBSERVAÇÕES / CONCLUSÃO

Remarks

Conclusion

Através da análise metalúrgica realizada podemos enquadrar o material analisado como similar ao especificado pela norma ASTM A 36.


 Marcelo R. Pericarrari

MSc Engenharia de Materiais
 Supervisor Laboratório
 Laboratory Supervisor
 CREA-SP nº 060.107.791-8

NORMAS APLICADAS / Referenced Standards

Análise química: PRO-LAB-012 / PRO-LAB-014 / PRO-LAB-017; Ensaio de Tração: PRO-LAB-005; Preparação de amostra para análise metalográfica: PRO-LAB-006; Análise metalográfica: PRO-LAB-008;

(Os resultados das análises e ensaios têm significação restrita e se aplicam não somente às amostras analisadas.)

Welding Inspeções, Engenharia e Análise de Materiais Ltda. São Joãozinho - SP - Tel.: +55 (16) 3513-8600 / Fax: (16) 3513-8620 - www.welding.com.br
 Este documento não pode ser cedido ou copiado sem prévia autorização da Welding FR-LAB-006-00

CERTIFICADO

Nº MIB 0349-15



CLIENTE: Vale Minas
CONTATO: Sr. Ricardo Lara
ENDEREÇO: Serra do Esmeril, s/n - Mina Cauê- Itabira/MG, 35.900-900
Nº ORÇAMENTO: MIB-0151-15 Rev1, SPS 1489
DATA DE RECEBIMENTO AMOSTRA(S): 14/10/15
DATA DA REALIZAÇÃO ENSAIO/ANÁLISE: 14/10/15 a 26/10/15

CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAL

1. OBJETIVOS

Efetuar caracterização de material consistindo de análises química, micrográfica óptica, dureza e ensaios de tração e de impacto em amostra de chapa de aço.

2. IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA

Tabela 1: Identificação da amostra.

Identificação Vale	Identificação MIB
Amostra 4	MIB-15-0727



Nota : A amostragem relativa a este certificado é de responsabilidade do cliente. As amostras serão armazenadas no MIB pelo período de dois meses quando serão descartadas ou devolvidas ao cliente se solicitado pelo mesmo. Os documentos dos resultados gerados na execução do serviço ficarão armazenados no MIB pelo período de cinco anos a partir desta data.

Figura 1: Amostra recebida para análise.

3. METODOLOGIA

Tabela 2: Metodologia empregada

Análise	Descrição
Química	➤ Coquilhamento, espectrometria de emissão óptica por centelhamento.
Micrográfica óptica	➤ Corte, embutimento em baquelite, lixamento, polimento, ataque Nital
Dureza	➤ Rockwell C, carga 150kgf, ASTM E18-15.
Tração	➤ Máquina Instron 2382 (100 kN capacidade), controle de deslocamento, 0,7mm/min até o escoamento, 6,0mm/min até a fratura, $L_0=4D=25$ mm, geometria e dimensões dos CPS de acordo com norma ASTM E8/E8M-15a
Impacto	➤ Máquina Time JB300, martelo de 300J, Charpy, tipo A, 23°C, ASTM E23-12c.

CERTIFICADO
Nº MIB 0349-15



4. RESULTADOS

4.1 Análise química

Tabela 3: Análise química (% em peso). Valores médios de 3 análises.

Identificação MIB	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	W	V	Ti	Nb	Al	Cu	Fe
MIB-15-0727	0,25	0,42	0,87	0,012	0,022	0,22	0,14	0,08	ND	0,004	0,001	ND	0,036	0,18	Bal

ND = não detectado.

4.2 Análise de dureza

Tabela 4: Análise de dureza.

Identificação MIB	Tipo	Medidas					Média	Média (HB)*
MIB-15-0727	HRB	79	80	78	78	80	79	147

**Valores convertidos de acordo com ASTM A370-14 para fins de comparação.*

4.3 Análise micrográfica óptica

A análise micrográfica óptica da amostra indica uma microestrutura de ferrita e perlita, com tamanho de grão entre 7 e 8, com presença de defeitos (vazios) de fundição.

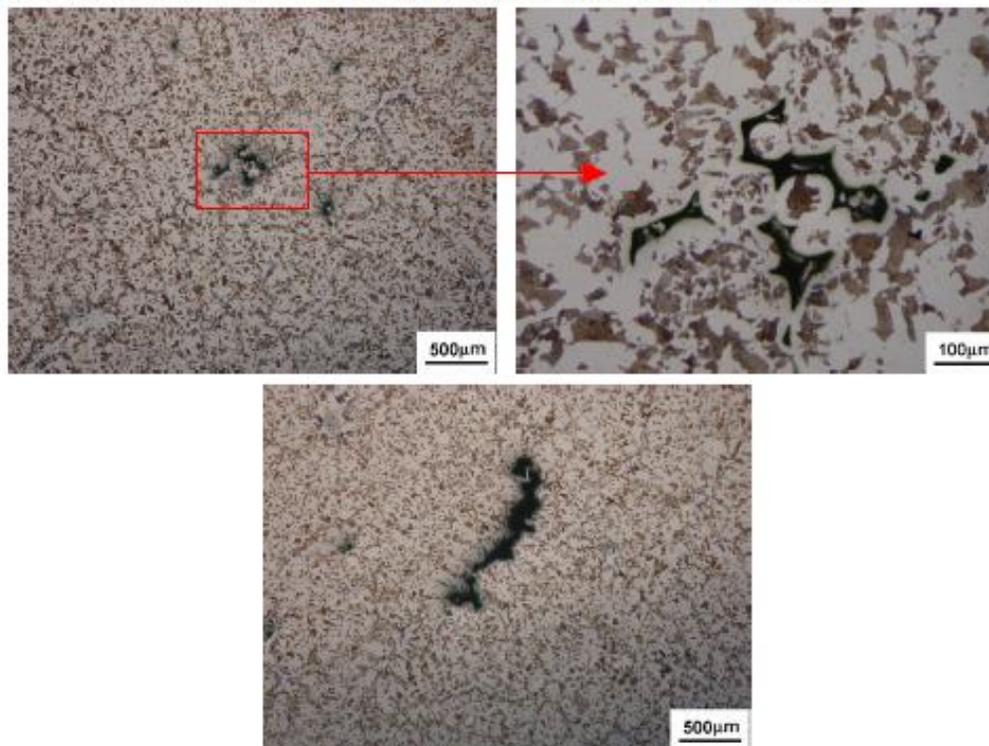


Figura 2: Micrografia óptica da amostra.

CERTIFICADO
Nº MIB 0349-15



4.3 Ensaio de tração

Tabela 5: Resultados dos ensaios de tração.

Identificação MIB	A (%)	RA (%)	S _e (MPa)	S _r (MPa)
MIB-15-0727-001	29,4	53,7	314,6	537,9

Legenda: Se = limite de escoamento, Sr = limite de resistência à tração, A = alongamento, RA = redução de área.

4.5 Ensaio de impacto

Tabela 6: Resultados dos ensaios de impacto.

Identificação MIB	Energia(J)	
	Valores	Média
MIB-15-0727-002	46	52
MIB-15-0727-003	54	
MIB-15-0727-004	56	

Marcelo Tadeu Milan

São Carlos, 26 de outubro de 2015

Responsável técnico, Crea: 5060714396, CRQ:04361901

Os resultados desta análise são aplicáveis somente às amostras analisadas e não devem ser estendidos a outras amostras ou situações fora do contexto do mesmo. Este certificado somente poderá ser reproduzido na íntegra. A reprodução parcial requer aprovação formal deste laboratório. O MIB não é responsável pelo uso ou interpretação indevidos que se possam fazer deste documento. O relatório enviado por meio eletrônico e é válido somente para informação.

-----**FIM DO CERTIFICADO**-----

CERTIFICADO

Nº MIB 0350-15



CLIENTE: Vale Minas
CONTATO: Sr. Ricardo Lara
ENDEREÇO: Serra do Esmeril, s/n - Mina Cauê- Itabira/MG, 35.900-900
Nº ORÇAMENTO: MIB-0151-15 Rev1, SPS 1489
DATA DE RECEBIMENTO AMOSTRA(S): 14/10/15
DATA DA REALIZAÇÃO ENSAIO/ANÁLISE: 14/10/15 a 17/11/15

ENSAIOS DE FADIGA AXIAL e de CTOD

1. OBJETIVOS

Efetuar ensaios de fadiga axial e de CTOD à temperatura ambiente em amostra de aço fundido.

2. IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA

A Tabela 1 e a Figura 1 apresenta a identificação e a amostra recebida para análise.

Tabela 1: Identificação da amostra.

Identificação Cliente	Identificação MIB
Amostra 4	MIB-15-0727

Nota : A amostragem relativa a este certificado é de responsabilidade do cliente. As amostras serão armazenadas no MIB pelo período de dois meses quando serão descartadas ou devolvidas ao cliente se solicitado pelo mesmo. Os documentos dos resultados gerados na execução do serviço ficarão armazenados no MIB pelo período de cinco anos a partir desta data.



Figura 1 Amostras recebidas para análise.

3. METODOLOGIA

Tabela 2: Metodologia empregada

Análise	Descrição
Fadiga	<ul style="list-style-type: none"> > Ensaios de fadiga axial, segundo as diretrizes da norma ASTM E466-15. Os ensaios foram conduzidos até a fratura final ou até se atingir um run-out definido em 2 milhões de ciclos. Os ensaios foram conduzidos à temperatura ambiente (23°C), sob frequência de 40Hz, controle de carga e R=0,1.
CTOD	<ul style="list-style-type: none"> > Ensaios de CTOD (Crack Tip Opening Displacement) a 23°C, de acordo com as diretrizes da norma ASTM E1820-15 em amostra de aço fundido. > Corpos de prova de seção retangular SE(B), W=2B=14mm, ensaiado sob flexão 3-pontos. > As pré-trincas foram introduzidas por meio de uma máquina TIME de 10ton de capacidade, sob

CERTIFICADO

Nº MIB 0350-15



controle de carga, $R=0,1$, com carga decrescente até a pré-trinca atingir um comprimento entre $0,45W-0,55W$, monitorado visualmente.

> Ensaios de CTOD conduzidos em máquina eletromecânica Instron 2382 (100 kN capacidade), controle de deslocamento, $1,0 \text{ mm/min}$, flexão 3 pontos, $\text{span } S=4W=56\text{mm}$, registrando-se os valores de carga em função da abertura da boca da trinca por meio de um clip gauge, acoplado aos corpos de prova.

> Após a execução dos ensaios, os corpos de prova foram submetidos ao tratamento de heat tinting, a 300°C por $1/2\text{h}$ para destacar a superfície de fratura. Posteriormente, as superfícies de fratura dos corpos de prova foram observadas e fotografadas em microscópio estereoscópico. Os valores de comprimento de pré-trinca em 9 posições ao longo da espessura do corpo de prova foram medidos com o auxílio do software Image J para a determinação do valor médio de comprimento de pré-trinca e critérios de validação do ensaio.

> As curvas de carga versus abertura da boca da trinca foram avaliadas por meio de software Instron Bluehill para a determinação de área plástica abaixo da curva A_p e os valores finais de CTOD na carga máxima (δ_m) foram determinados

4. RESULTADOS

4.1 Ensaios de fadiga axial – Curva SN

Tabela 3 Dados obtidos do ensaio de fadiga axial, $R=0,1$.

Amostra	$S_{m\acute{a}x}$ (MPa)	N_f (ciclos)
MIB-15-0727	360	169541
	360	34145
	360	181250
	340	103302
	340	216968
	340	89543
	320	384727
	320	327106
	320	230048
	300	1012655
	300	282296
	300	657288
	280	313797
	280	258804
	280	2.10^6 (run-out)
	260	2.10^6 (run-out)
260	2.10^6 (run-out)	

$S_{m\acute{a}x}$ = tensão máxima nominal aplicada, N_f = número de ciclos para falhar

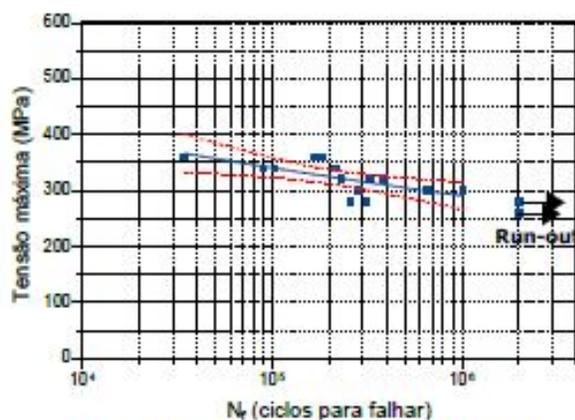


Figura 2 Curva de fadiga tensão-vida (S-N).

Instituto de Materiais Tecnológicos do Brasil Ltda, Parque Ecotec Damha 1, Av. Pedro Muszkat, SN
São Carlos - SP, 13565-543, milan@mib.eng.br, (16) 3376-1863, (16) 98143-0652

CERTIFICADO
Nº MIB 0350-15



São Carlos, 17 de Novembro de 2014

Marcelo Tadeu Milan

Responsável técnico, Crea: 5060714396, CRQ:04361901

Os resultados desta análise são aplicáveis somente às amostras analisadas e não devem ser estendidos a outras amostras ou situações fora do contexto do mesmo. Este certificado somente poderá ser reproduzido na íntegra. A reprodução parcial requer aprovação formal deste laboratório. O MIB não é responsável pelo uso ou interpretação indevidos que se possam fazer deste documento. O relatório enviado por meio eletrônico é válido somente para informação.

-----**FIM DO CERTIFICADO**-----

CERTIFICADO

Nº MIB 0351-15



CLIENTE: Vale Minas
CONTATO: Sr. Ricardo Lara
ENDEREÇO: Serra do Esmeril, s/n - Mina Cauê- Itabira/MG, 35.900-900
Nº ORÇAMENTO: MIB-0151-15 Rev1, SPS 1489
DATA DE RECEBIMENTO AMOSTRA(S): 14/10/15
DATA DA REALIZAÇÃO ENSAIO/ANÁLISE: 14/10/15 a 26/10/15

CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAL

1. OBJETIVOS

Efetuar caracterização de material consistindo de análises química, micrográfica óptica, dureza e ensaios de tração e de impacto em amostra de chapa de aço.

2. IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA

Tabela 1: Identificação da amostra.

Identificação Vale	Identificação MIB
Amostra 3	MIB-15-0728



Figura 1: Amostra recebida para análise.

Nota : A amostragem relativa a este certificado é de responsabilidade do cliente. As amostras serão armazenadas no MIB pelo período de dois meses quando serão descartadas ou devolvidas ao cliente se solicitado pelo mesmo. Os documentos dos resultados gerados na execução do serviço ficarão armazenados no MIB pelo período de cinco anos a partir desta data.

3. METODOLOGIA

Tabela 2: Metodologia empregada

Análise	Descrição
Química	➤ Coquilhamento, espectrometria de emissão óptica por centelhamento.
Micrográfica óptica	➤ Corte, embutimento em baquelite, lixamento, polimento, ataque Nital
Dureza	➤ Rockwell C, carga 150kgf, ASTM E18-15.
Tração	➤ Máquina Instron 2382 (100 kN capacidade), controle de deslocamento, 0,7mm/min até o escoamento, 6,0mm/min até a fratura, $L_0=4D=25$ mm, geometria e dimensões dos CPs de acordo com norma ASTM E8/E8M-15a
Impacto	➤ Máquina Time JB300, martelo de 300J, Charpy, tipo A, 23°C, ASTM E23-12c.

Instituto de Materiais Tecnológicos do Brasil Ltda, Parque Ecotec Damha 1, Av. Pedro Muszkat, SN
São Carlos - SP, 13565-543, milan@mib.eng.br, (16) 3376-1863, (16) 98143-0652

CERTIFICADO Nº MIB 0351-15



4. RESULTADOS

4.1 Análise química

Tabela 3: Análise química (% em peso). Valores médios de 3 análises.

Identificação MIB	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	W	V	Ti	Nb	Al	Cu	Fe
MIB-15-0728	0,15	0,21	1,22	0,008	0,005	0,02	0,02	0,06	ND	0,045	0,001	ND	0,029	0,008	Bal

ND = não detectado.

4.2 Análise de dureza

Tabela 4: Análise de dureza.

Identificação MIB	Tipo	Medidas						Média	Média (HB)*
MIB-15-0728	HRB	84	83	83	84	83	83,4	160	

*Valores convertidos de acordo com ASTM A370-14 para fins de comparação.

4.3 Análise micrográfica óptica

A análise micrográfica óptica da amostra indica uma microestrutura de ferrita e perlita, com tamanho de grão entre 6 e 7.

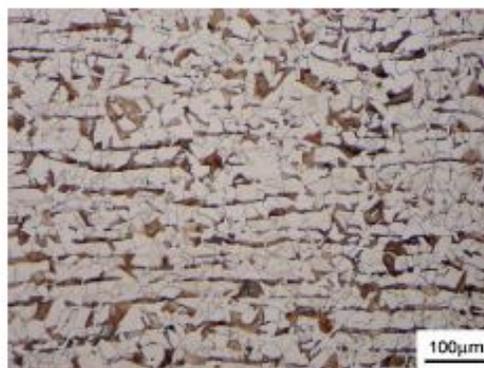


Figura 2: Micrografia óptica da amostra.

4.3 Ensaio de tração

Tabela 5: Resultados dos ensaios de tração.

Identificação MIB	A (%)	RA (%)	S _e (MPa)	S _r (MPa)
MIB-15-0728-001	34,2	74,7	378,8	526,8

Legenda: Se = limite de escoamento, Sr = limite de resistência à tração, A = alongamento, RA = redução de área.

Instituto de Materiais Tecnológicos do Brasil Ltda, Parque Ecotec Damha 1, Av. Pedro Muszkat, SN
São Carlos - SP, 13565-543, milan@mib.eng.br, (16) 3376-1863, (16) 98143-0652

CERTIFICADO Nº MIB 0351-15



4.5 Ensaio de impacto

Tabela 6: Resultados dos ensaios de impacto.

Identificação MIB	Energia(J)	
	Valores	Média
MIB-15-0728-002	196	216
MIB-15-0728-003	226	
MIB-15-0728-004	226	

São Carlos, 26 de outubro de 2015


Marcelo Tadeu Milan

Responsável técnico, Crea: 5060714396, CRQ:04361901

Os resultados desta análise são aplicáveis somente às amostras analisadas e não devem ser estendidos a outras amostras ou situações fora do contexto do mesmo. Este certificado somente poderá ser reproduzido na íntegra. A reprodução parcial requer aprovação formal deste laboratório. O MIB não é responsável pelo uso ou interpretação indevidos que se possam fazer deste documento. O relatório enviado por meio eletrônico é válido somente para informação.

-----FIM DO CERTIFICADO-----