



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO

Curso de Engenharia Mecânica

LEANDRO MARTINS CARNEIRO

**ANÁLISE ESTRUTURAL UTILIZANDO ELEMENTOS FINITOS PARA
APLICAÇÃO DE REFORÇO NA EXTREMIDADE DA VIGA EM VAGÕES DE
MINÉRIO TIPO GÔNDOLA DA VALE**

SÃO LUÍS/MA

2021

LEANDRO MARTINS CARNEIRO

**ANÁLISE ESTRUTURAL UTILIZANDO ELEMENTOS FINITOS PARA
APLICAÇÃO DE REFORÇO NA EXTREMIDADE DA VIGA EM VAGÕES DE
MINÉRIO TIPO GÔNDOLA DA VALE**

Monografia de graduação apresentada ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão - UEMA, como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Nunes Pereira
Coorientador: Me. Giovanni Augusto Ferreira Dias

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À
VERSÃO FINAL DA MONOGRAFIA
DEFENDIDA PELO ALUNO LEANDRO
MARTINS CARNEIRO E ORIENTADA
PELO PROF. DR. FLÁVIO NUNES
PEREIRA.



ASSINATURA DO(A) ORIENTADOR(A)

SÃO LUÍS/MA

2021

FICHA CATALOGRÁFICA

Carneiro, Leandro Martins.

Análise estrutural utilizando elementos finitos para aplicação de reforço na extremidade da viga em vagões de minério tipo gôndola da Vale / Leandro Martins Carneiro. – São Luís, 2021.

72 f

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2021.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Nunes Pereira.

Coorientador: Prof. Me. Giovanni Augusto Ferreira Dias.

1.Simulações. 2.Métodos dos Elementos Finitos. 3.Vagão. I.Título.

Elaborado por Giselle Frazão Tavares- CRB 13/665

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ANÁLISE ESTRUTURAL UTILIZANDO ELEMENTOS FINITOS PARA
APLICAÇÃO DE REFORÇO NA EXTREMIDADE DA VIGA EM VAGÕES DE
MINÉRIO TIPO GÔNDOLA DA VALE**

Autor: Leandro Martins Carneiro

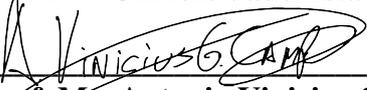
Orientador: Dr. Flávio Nunes Pereira

Coorientador: Me. Giovanni Augusto Ferreira Dias

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Monografia:



Prof. Dr. Flávio Nunes Pereira
UEMA – Universidade Estadual do Maranhão



Prof. Me. Antonio Vinicius Garcia Campos
UEMA – Universidade Estadual do Maranhão



Prof. Me. Carlos Ronyhelton Santana de Oliveira
UEMA – Universidade Estadual do Maranhão

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

São Luís/MA, 07 de dezembro de 2021

AGRADECIMENTOS

Inicialmente eu gostaria de agradecer a Deus, pois sem ele nada disso seria possível. À toda a minha família, que durante o processo da graduação e com todas as dificuldades que a vida acadêmica impõe estiveram comigo. Meus tios, tias, primos, primas e avós que sempre incentivaram e contribuíram para que esse sonho pudesse ser realizado. Agradeço imensamente a minha mãe Názia, que esteve sempre ao meu lado, e quando pensava que não ia conseguir tinha as melhores palavras de conforto, de incentivo e de amor. Sempre batalhando e correndo atrás de tudo que fosse necessário para que eu me tornasse o que sou hoje, me espelho sempre em você. Te amo muito. Ao meu pai Lewnardo, que foi a minha inspiração para seguir essa profissão, desde pequeno me mostrando a direção certa a seguir, sendo exemplo para os caminhos que percorri até aqui, e além de filho, eu virei seu fã, te amo pai. A minha irmã Letícia que gosto de tirar um pouquinho do sério, mas é tudo amor, minha verdadeira amiga, sempre juntos, o dia sempre fica mais legal com você perto, te amo demais. Ao meu irmão Rafa, que Deus colocou na minha vida e da minha família e tornou-se luz para nós, um exemplo de felicidade e amor, nunca pensei que amaria alguém assim, você veio para nos transformar completamente, te amo muito e para sempre cuidarei de você. Um agradecimento superespecial ao meu avô, José Ribamar, o nosso amado vô Zequinha, que esteve presente desde o início dessa caminhada, mas agora está vendo a conclusão desse sonho lá do céu. Muitas vezes ficou comigo até tarde da noite esperando terminar os estudos, dava conselhos sobre a vida, contando as suas incríveis histórias que, as vezes repetidas, sempre me trazia conhecimentos e aprendizados diferentes, sei que está muito feliz olhando aí de cima. Agradeço também a todos os meus amigos e pessoa muito importante que foram incríveis durante essa caminhada. Um agradecimento também para a equipe Bumba Meu Baja, que me deu uma bagagem gigante de conhecimentos técnico e práticos da engenharia durante o período que estive lá. Não poderia deixar de agradecer também a turma da Gerência de Vagões, em especial a Coordenação de Confiabilidade da Vale, a melhor confiabilidade do Brasil, que contribuíram muito para a minha formação profissional, podendo vivenciar junto dos melhores especialistas de Vagões do país os desafios da engenharia todos os dias durante o meu programa de estágio. Agradeço também ao professor Flávio Nunes por todo o apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

“Com grandes poderes vêm grandes responsabilidades.”

Tio Ben / Tia May (Stan Lee)

RESUMO

A análise dos eventos de falhas em vagões ocorridos na Estrada de Ferro Carajás (EFC) possibilita a verificação do recorrente aparecimento das quebras em Extremidades de Viga, que gera um fracionamento da composição ferroviária. Sendo assim, com o objetivo de diminuir a frequência dos eventos e aumentar a confiabilidade de operação dos vagões, o presente trabalho investiga a implementação de melhorias na extremidade da viga. O mapeamento das tensões atuantes foi verificado por análises computacionais utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF). Nas simulações realizadas foram utilizadas condições de contorno verificadas em campo e com base na norma AAR (*Association of American Railroad*) Seção C - Parte 2, Capítulo IV, que aponta os parâmetros necessários para todas as estruturas que compõe o vagão. Foram testados quatro modelos de reforço, o primeiro com uma chapa na horizontal posicionada na lateral da Extremidade da Viga, o segundo com duas chapas horizontais laterais, já o terceiro contou com o posicionamento de uma nervura, e por fim, foi realizado o último estudo com duas nervuras. O segundo modelo testado foi o escolhido, pois se mostrou mais eficiente na redução da média das tensões nas áreas mais críticas, provando-se eficiente para o objetivo proposto.

Palavras-chave: Simulações, Método dos Elementos Finitos, Vagão.

ABSTRACT

The analysis of the failure events in wagons that occurred on the Estrada de Ferro Carajás (EFC) makes it possible to verify the recurrent appearance of breaks at the Ends of Beams, which generates a fractioning of the railway composition. Thus, to reduce the frequency of events and increase the reliability of the wagons' operation, the present work investigates the implementation of improvements at the end of the beam. The mapping of the acting stresses was verified by computational analysis using the Finite Element Method (FEM). In the simulations carried out, boundary conditions verified in the field and based on the AAR (Association of American Railroad) Section C - Part 2, Chapter IV, standard were used, which indicates the necessary parameters for all the structures that make up the wagon. Four reinforcement models were tested, the first with a horizontal plate positioned on the side of Beam End, the second with two lateral horizontal plates, the third had the positioning of a rib, and finally, the last study was carried out with two ribs. The second tested model was chosen, as it proved to be more efficient in reducing the average of stresses in the most critical areas, proving to be efficient for the proposed objective.

Key Words: Simulations, Finite Element Method, Wagon.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Conjunto de Choque e Tração.....	15
Figura 1.2 – (a) Componente em pleno funcionamento (b) Ruptura da extremidade da viga.....	16
Figura 4.1 – Locomotiva projetada por George Stephenson.....	20
Figura 4.2 – Locomotiva A Baronesa em exposição.....	21
Figura 4.3 – Percurso da São Paulo Railway.....	22
Figura 4.4 – Mapa de extensão da EFC.....	23
Figura 4.5 – Virador de Vagão.....	24
Figura 4.6 – Vagão Gôndola.....	25
Figura 4.7 – Vagão Hopper.....	26
Figura 4.8 – Vagão Fechado.....	27
Figura 4.9 – Vagão Plataforma.....	27
Figura 4.10 – Vagão Tanque.....	28
Figura 4.11 – Estrutura do vagão.....	29
Figura 4.12 – Representação dos sistemas no vagão.....	29
Figura 4.13 – (a) Engate Fixo, (b) Engate Rotativo.....	30
Figura 4.14 – Dupla de vagões com descrição das Trações/Engates.....	31
Figura 4.15 – (a) Mandíbula, (b) Mandíbula Acoplada no Engate.....	32
Figura 4.16 – Haste Rígida formando uma dupla de vagões germinada.....	32
Figura 4.17 – (a) Aparelho de Choque e Tração (ACT), (b) Molas no ACT.....	33
Figura 4.18 – Estrado.....	34
Figura 4.19 – (a) Identificação do Espelho de viga e da Extremidade, (b) Montagem do Conjunto de Choque e Tração.....	35
Figura 4.20 – Descrição do funcionamento do Conjunto de Choque e Tração.....	36
Figura 4.21 – Malha dos Elementos Finitos.....	37
Figura 4.22 – Diferenciação de nós e elementos.....	38
Figura 4.23 – Elemento unidimensional.....	38
Figura 4.24 – Elemento quadrilateral e triangular.....	39
Figura 4.25 – Elemento hexaédrico e tetraédrico.....	39
Figura 4.26 – Fluxograma de Resolução do MEF.....	40
Figura 4.27 – Exemplo de singularidade.....	41

Figura 4.28 – Propriedades mecânicas do aço ASTM A-242.....	42
Figura 5.1 – Funcionamento durante tração do CCT.....	45
Figura 5.2 – Modelagem 3D da extremidade da viga	45
Figura 5.3 – Indicação da força adicionada no batente (a) e (b).....	47
Figura 5.4 – Suporte fixo adicionado na zona posterior (a), (b)	47
Figura 5.5 – Suporte fixo adicionado na zona superior	47
Figura 5.6 – Modelagem do Caso 2.....	48
Figura 5.7 – Modelagem do Caso 3.....	48
Figura 5.8 – Modelagem do Caso 4.....	49
Figura 5.9 – Modelagem do Caso 5.....	49
Figura 5.10 – Malha sem refino	49
Figura 5.11 – Malha refinada	50
Figura 5.12 – Refino de malha local na região de interesse.....	50
Figura 6.1 – Resultado obtido para a simulação do Caso 1 em perspectiva isométrica.....	51
Figura 6.2 – Perspectiva frontal do componente com altas tensões no batente.....	52
Figura 6.3 – Perspectiva posterior do componente com altas tensões no batente.....	52
Figura 6.4 – Análise interna da Extremidade da Viga para o Caso 1.....	53
Figura 6.5 – Malha utilizada na análise do Caso 2.....	54
Figura 6.6 – Resultados da análise do Caso 2.....	54
Figura 6.7 – Análise interna da Extremidade da Viga para o Caso 2.....	55
Figura 6.8 – Malha utilizada na análise do Caso 3.....	56
Figura 6.9 – Resultados da análise do Caso 3.....	56
Figura 6.10 – Análise interna da Extremidade da Viga para o Caso 3.....	57
Figura 6.11 – Malha utilizada na análise do Caso 4.....	58
Figura 6.12 – Resultados da análise do Caso 4.....	58
Figura 6.13 – Análise interna da Extremidade da Viga para o Caso 4.....	59
Figura 6.14 – Malha utilizada na análise do Caso 5.....	60
Figura 6.15 – Resultados da análise do Caso 5.....	60
Figura 6.16 – Análise interna da Extremidade da Viga para o Caso 5.....	61
Figura 6.17 – Definição das regiões de estudo.....	62
Figura 6.18 – Modelo experimental instalado para testes em campo.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Nomenclatura dos modelos.....	48
Tabela 6.1 – Tabela comparativa da Região 1.....	62
Tabela 6.2 – Tabela comparativa da Região 2.....	63
Tabela 6.3 – Tabela comparativa do percentual na Região 1.....	63
Tabela 6.4 – Tabela comparativa do percentual na Região 2.....	64

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Gráfico de Tensão x Deformação do material ASTM A-242 em comparação com os aços A490, A325 e A36.....	43
Gráfico 2 – Gráfico de redução das tensões na Região 1 (Autor, 2021)	64
Gráfico 3 – Gráfico de redução das tensões na Região 2 (Autor, 2021)	65

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AAR	<i>Association of American Railroad</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ACT	Aparelho de Choque e Tração
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CCT	Conjunto de Choque e Tração
CVRD	Companhia Vale do Rio Doce
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte
EFC	Estrada de Ferro Carajás
GDT	Vagão Gondola de descarga em viradores para bitola larga com peso bruto total de 119,5 ton
GDU	Vagão Gondola de descarga em viradores para bitola larga com peso bruto total de 143 ton
MAG	Metal Active Gas
MEF	Método dos Elementos Finitos
MIG	Metal Inert Gas
NBR	Norma Brasileira
TCF	Tração Fixa
TCFE	Tração Fixa com Engate
TCFF	Tração Fixa-Fixa
TCR	Tração Rotativa
THP	Trem Hora Parado
Ton	Toneladas
Kn	Kilonewton

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	OBJETIVOS.....	17
2.1	Geral.....	17
2.2	Específicos.....	17
3	JUSTIFICATIVA	18
4	REVISÃO TEÓRICA	20
4.1	Ferrovias No Brasil.....	21
4.2	A Estrada de Ferro Carajás (EFC).....	22
4.3	Vagões.....	24
4.3.1	Vagão Gôndola	25
4.3.2	Vagão Hopper.....	26
4.3.3	Vagão Fechado	26
4.3.4	Vagão Plataforma	27
4.3.5	Vagão Tanque.....	28
4.4	Conjunto De Choque E Tração (CCT).....	28
4.4.1	Engate	30
4.4.2	Mandíbula	31
4.4.3	Haste rígida.....	32
4.4.4	Aparelho de Choque e Tração (ACT).....	33
4.4.5	Estrado	33
4.4.6	Espelho de viga	34
4.4.7	Funcionamento do Conjunto de Choque e Tração (CCT)	35
4.5	Método Dos Elementos Finitos (MEF).....	36
4.5.1	Singularidade	41
4.6	Aço ASTM A-242	42
4.7	Critérios De Falha Para Carregamento Estático	42
4.7.1	Teoria da Energia de Distorção Máxima (Critério de von Mises)	44
5	METODOLOGIA..	45
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51
6.1	Resultados Caso 1 – sem chapa	51

6.2	Resultados Caso 2 – uma chapa	53
6.3	Resultados Caso 3 – duas chapas	55
6.4	Resultados Caso 4 – uma nervura.....	57
6.5	Resultados Caso 5 – duas nervuras.....	59
6.6	Comparação Entre Os Modelos.....	61
7	CONCLUSÃO	67
	REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

A empresa Vale, uma multinacional no ramo de mineração, utiliza-se de trens para realizar o transporte dos principais minerais para exportação. A Estrada de Ferro Carajás (EFC) opera com um dos maiores trens do mundo, apresentando uma composição com 330 vagões e 4 locomotivas (DIAS, 2011). A EFC estende-se desde o complexo minerador em Parauapebas, no Pará até o Terminal Marítimo da Ponta da Madeira, em São Luís, no Maranhão.

Na formação dos trens para transporte de minério, em sua maioria, são utilizados vagões do tipo gôndola. Esse tipo de vagão é separado em superestrutura e infraestrutura. Como superestrutura, são caracterizados os sistemas de truque e rodeiros e como infraestrutura tem-se o conjunto de choque e tração (Figura 1.1), sistema de freio, caixa de carga e o estrado (TRETIN, 2015).

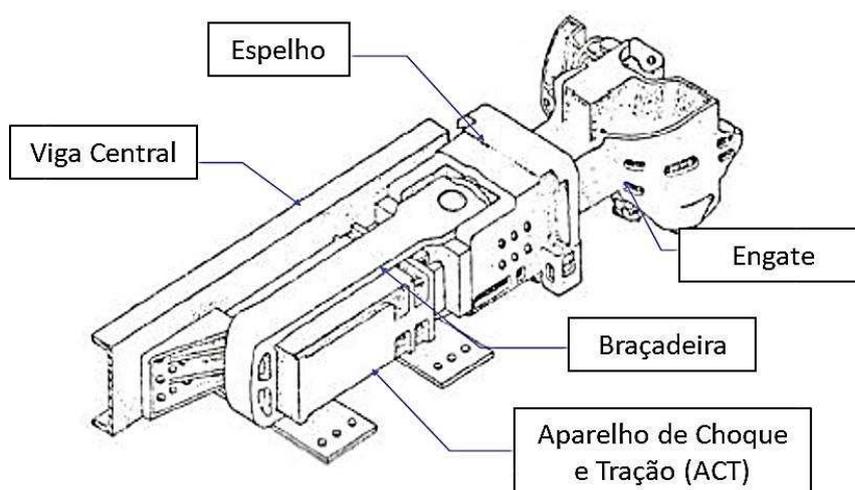


Figura 1.1 – Conjunto de Choque e Tração (Adaptado de Pimassoni, 2010).

Sendo assim, para garantir a produtividade e mitigar falhas, são acompanhados, pela Coordenação da Confiabilidade de Vagões, indicadores que mostram todo e qualquer evento que venha gerar impacto negativo na frota, diante disso, após análises recorrentes, foi verificado um modo de falha crítico na Extremidade da Viga, que está localizada nas extremidades dos vagões, onde o componente é submetido a cargas de tração e se rompe como visto na Figura 1.2 (b), fracionando a composição ferroviária e causando uma parada operacional do trem.

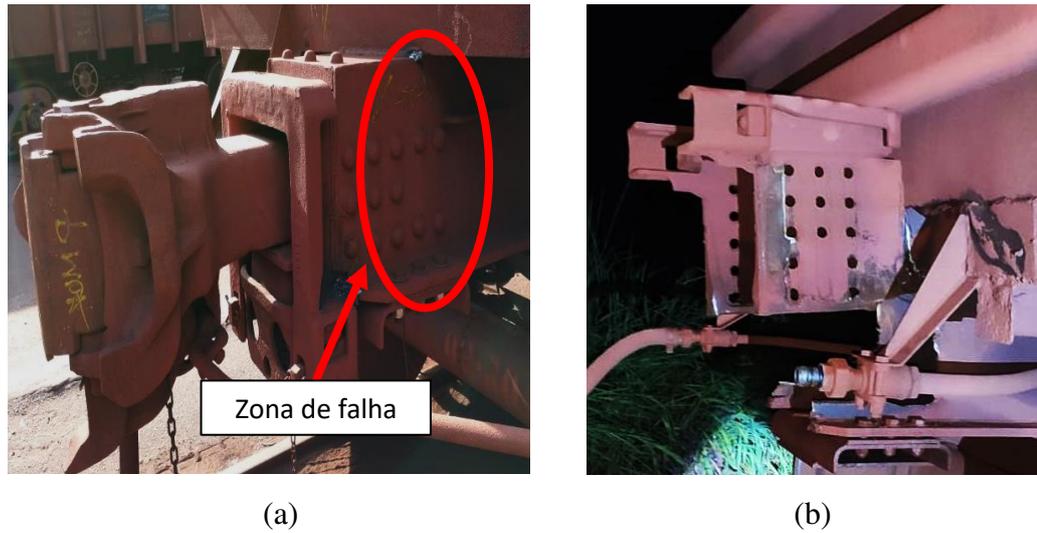


Figura 1.2 – (a) Componente em pleno funcionamento. (b) Ruptura da Extremidade da Viga (Autor, 2021).

Nesse sentido, a fim de mitigar e evitar a falha causada na extremidade da viga (Figura 1.2 (a)), busca-se estudar por meio do MEF (Método dos Elementos Finitos) as regiões que se concentram as altas tensões na estrutura, e propor um reforço estrutural para aumentar a sua confiabilidade na operação.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Este trabalho tem como objetivo fazer análise estrutural da extremidade da viga pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), investigando onde se concentram os pontos de alta tensão e a partir das análises propor reforços estruturais para o componente a fim de mitigar o modo de falha que provoca o rompimento da extremidade de viga e garantir uma maior confiabilidade operacional do vagão.

2.2 Específicos

- Revisar bibliograficamente o funcionamento da malha ferroviária brasileira, com ênfase na EFC, bem como os tipos de vagões existentes. Revisar a bibliografia da aplicação do MEF;
- Desenvolver a partir do desenho técnico 2D o modelo 3D da extremidade da viga em *software* CAD;
- Realizar análise estrutural do modelo 3D utilizando o MEF;
- Propor um reforço estrutural para a extremidade da viga.

3 JUSTIFICATIVA

Em uma companhia de grande porte é necessário que os gestores a todo momento tenham que tomar decisões sobre suas áreas, e para isso precisam de um conhecimento dos acontecimentos acerca de suas equipes, processos e operações. Nesse sentido, faz-se necessário a utilização de ferramentas que auxiliem os líderes nas tomadas de decisão críticas para o processo em que está inserido. Sendo assim, uma metodologia que proporciona esse esclarecimento e intercâmbio de informações entre as áreas é a metodologia de gestão visual, sendo o FMDS (*Floor Management Development*) uma delas implantadas nas operações da Vale.

O FMDS permite que seja exposto em quadros com gráficos, tabelas, entre outros métodos de análise de dados, informações de extrema importância para segurança, custo e produtividade em locais necessários na empresa, possibilitando assim a verificação de desvios e acelerando a atuação para solucionar os problemas encontrados.

Sendo assim, com o FMDS implantado, a Coordenação de Confiabilidade de vagões utiliza-o para acompanhamento de suas rotinas, sendo detalhado os eventos de falha e defeitos que ocorreram, mostrando o sistema afetado, componente que falhou e tempo de parada, sendo possível observar quais os sistemas contribuíram para o evento. Dentre os indicadores observados diariamente no FMDS pela Coordenação tem-se os de produtividade, como MKBF (*Mean Kilometer Between Failures*) responsável por medir a quilometragem média entre falhas e KMED que mede a quilometragem média entre falhas e defeitos. Além disso, Segundo Costa e Dias (2016), na Estrada de Ferro Carajás (EFC) é monitorado também o indicador chamado de THP (Trem Hora Parado) que faz o mapeamento do tempo que o trem fica parado por motivos de falha até recuperar a sua condição de operação novamente.

De acordo com o frequente e criterioso acompanhamento dos indicadores presentes no FMDS de Produtividade, foi observado que as falhas e defeitos envolvendo o rompimento da extremidade da viga, impactando de forma muito negativa no funcionamento da ferrovia, aparecendo com uma frequência alta, diminuindo o MKBF mensal, e com um alto THP, refletindo em atraso no transporte e perda de produtividade nas entregas no terminal portuário de Ponta da Madeira. Além disso, a observação de maior importância pontuada são os riscos de

danos para a segurança dos operadores que é extremamente alto, pois o fracionamento pode gerar acidentes catastróficos, como Souza (2017) afirma, descarrilamento é um dos possíveis.

Portanto, foi feito um levantamento dos eventos com rompimento da extremidade da viga nos últimos 2 anos e com um banco de dados fornecido pela Confiabilidade de Vagões foi possível observar um total de 7 eventos envolvendo o componente. Diante disso, com objetivo de diminuir a frequência ou mitigar as falhas ocorrentes na extremidade da viga, fez-se necessário o estudo do componente para propor um modelo de reforço, promovendo uma redução das tensões nas zonas críticas.

4 REVISÃO TEÓRICA

Por volta do século XIX a humanidade vivia um grande problema relacionado a transportes, seja de cargas, pessoas ou suprimentos em geral. Nesse sentido, segundo Borges (2011), o trem construído de ferro veio para propor soluções de deslocamento de cargas e pessoas de uma forma mais rápida e eficiente, revolucionando assim o cenário na Era Moderna, substituindo então as carruagens e demais meios transportadores utilizados anteriormente.

Com a Revolução Industrial por volta do século XVIII surgiram os primeiros motores a vapor e por consequência as máquinas que utilizavam o mesmo conceito, que foram inicialmente utilizadas no ramo da indústria têxtil. Posteriormente, a tecnologia foi imposta nos meios de transporte, surgindo barcos a vapor em meados de 1807 e a primeira locomotiva a vapor, chamada de Blucher, idealizada e projetada pelo inglês George Stephenson, (1741 - 1848) em 1814, representada na Figura 4.1 (CAVALCANTI, 2016).

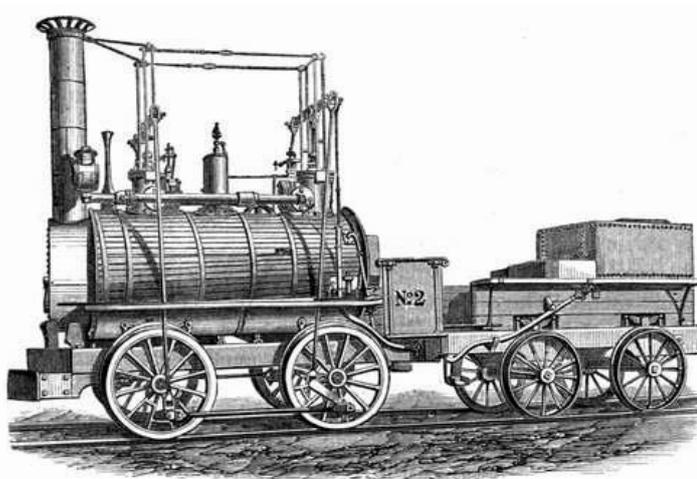


Figura 4.1 – Locomotiva projetada por George Stephenson (Nogueira, 2016).

Sendo assim, foi inaugurada em 1830 a primeira estrada de ferro do mundo, que fazia a ligação de duas grandes cidades da Inglaterra, sendo elas Manchester e Liverpool. No mesmo ano os Estados Unidos também implementaram uma estrada de ferro que conectava as cidades de Charleston e Hamburg, que estão localizadas na Carolina do Sul (BORGES, 2011).

Com a divulgação e implementação das estradas de ferro pelo restante do mundo os trens tornaram-se o maior ganho da revolução industrial, depois das máquinas a vapor, pois

ligara as cidades de uma maneira rápida e eficiente, aumentando assim o volume de cargas transportadas, demandando uma maior produção e desenvolvimento das fábricas, que aumentaram suas operações para atender a demanda, desenvolvendo-se cada vez mais no cenário mundial.

4.1 Ferrovias no Brasil

Segundo Costa (2019), o Brasil apresenta um certo pioneirismo no objetivo de implantar as ferrovias, pois segundo dados apresentados no Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte – DNIT em 2018, apresenta propostas de incentivo desde os anos 1828, pouco tempo depois da idealização dos Ingleses, porém, por falta das empresas observarem lucratividade no projeto, não teve avanço naquele momento.

De acordo com Diógenes (2002), a primeira ferrovia brasileira, incentivada por Irineu Evangelista de Sousa, mais conhecido como Visconde de Mauá não obteve sucesso, foi instalada no Rio de Janeiro, ligando Petrópolis ao porto de Mauá. Já Bicca e Cezar (2019), dizem que nessa linha férrea foi onde funcionou a primeira locomotiva a vapor no Brasil, batizada de “Baronesa”, construída por Ingleses no ano de 1852. Foi utilizada por 30 anos, porém, como pode ser visto na Figura 4.2, hoje já se encontra preservada em museu.



Figura 4.2 – Locomotiva A Baronesa em exposição (Amantes da Ferrovia, 2019).

Segundo Kako (2013), a ferrovia ligava as cidades de Santos e Jundiaí, ambas no estado de São Paulo conforme o percurso na Figura 4.3, com construção iniciada em 1860, e inaugurada por ingleses em 1967 tendo como idealizador também o Visconde de Mauá e seus sócios investidores a The São Paulo Railway Company Ltd.

Saes e Hespanhol (2012) complementam afirmando que foi a estrada de ferro mais rentável do Brasil, visava o transporte de café para os portos, fazendo assim a sua comercialização para o exterior. Borges (2011), diz que com a implantação da linha férrea houve um aumento significativo das exportações de café que era produzido naquela região do estado de São Paulo, fazendo com que o porto de Santos ultrapassasse o do Rio de Janeiro em volume de café exportado. Sendo assim, muito importante para o desenvolvimento econômico e social da região e do Brasil naquela época.



Figura 4.3 – Percurso da São Paulo Railway (Museus Ferroviários SP, 20__)

4.2 A Estrada de Ferro Carajás (EFC)

A Estrada de Ferro Carajás (EFC) é uma ferrovia que interliga a mina de minério de ferro em Carajás no Pará e o Porto de Ponta da Madeira em São Luís do Maranhão, possuindo

atualmente 892 quilômetros de extensão, como evidenciado na Figura 4.4. Teve a sua inauguração no dia 28 de fevereiro de 1985, e partiu de Carajás para São Luís com uma composição com 160 vagões, percorrendo 890 quilômetros fazendo o transporte de ferro e manganês (VALE, 2016).



Figura 4.4 – Mapa de extensão da EFC (Adaptado de Vale, 2016)

Segundo a Vale (2016), a EFC transporta cerca de 230 milhões de toneladas de minério de ferro por ano, contando com mais de 10 mil vagões e 217 locomotivas para realizar esse transporte. Além dos vagões de carga, a EFC também conta com o trem de passageiros, que transporta pelo menos 300 mil pessoas por ano, contando com um ambiente agradável e extremamente seguro. O percurso do trem de passageiros é de ida e volta entre São Luís (MA) e Parauapebas (PA) possuindo 15 pontos de parada em cidades do Maranhão e Pará.

Quando a composição chega no Terminal Portuário de Ponta da Madeira é necessário que haja o descarregamento dos vagões, e acontecem nos chamados Viradores de Vagões, ilustrado na Figura 4.5, onde eles são descarregados por duplas e que, segundo Trentin (2015), descarrega por volta de 170 toneladas por minuto, agregando muito no aumento de produtividade.

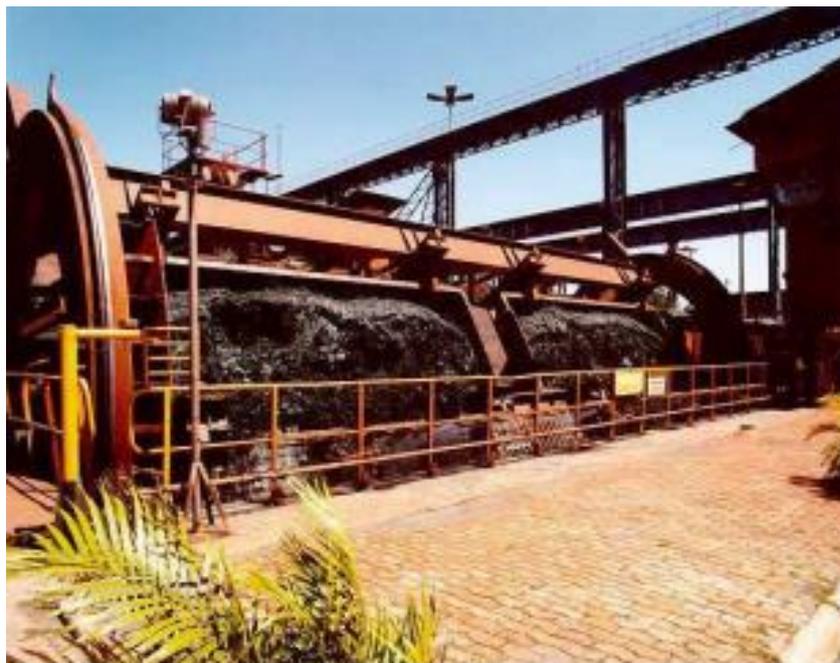


Figura 4.5 – Virador de Vagão (Barros, 2008).

4.3 Vagões

Para fazer o transporte de cargas e de passageiros, existem uma vasta quantidade de tipos de vagões ferroviários, sendo que cada um possui a sua determinada utilidade. De acordo com Oliveira (2019), no Brasil os principais tipos de vagão que atuam nas ferrovias nacionais são do tipo Gôndola e Hopper que, juntos, somam 80% dentre todos os tipos utilizados nas ferrovias brasileiras. Os vagões possuem um sistema de letras e números para serem identificados, no Brasil, segundo Belchior (2016), a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabeleceu as regras para a codificação pela norma NBR 11691, sendo necessário cada vagão apresentar o seguinte padrão:

- I. Letras, sendo as duas primeiras indicando o tipo e subtipo do vagão, a terceira fazendo a indicação do peso máximo suportado (tara + lotação);
- II. A utilização de 6 dígitos para a numeração, única no Brasil inteiro, sendo assim, possível para identificar a ferrovia;
- III. Utiliza-se também 1 dígito verificador, permitindo a rotina de cálculo rejeitarem erros de transcrição de dados;

IV. Por fim, é utilizado 1 letra opcional, que indicava a regional de onde o vagão estava lotado;

4.3.1 Vagão Gôndola

Os vagões tipo gôndola, apresentados na Figura 4.6, são uns dos mais utilizados no Brasil, ele é ideal para transporte de cargas que não precisam de proteção para fatores externos, visto que sua parte superior não apresenta proteção. Segundo Oliveira (2019), transportam produtos como granéis sólidos e produtos variados, que podem ser expostos. Na frota da Vale são utilizados os vagões tipos GDT e GDU, que pela norma NBR 11691 ao analisar a sigla, percebe-se que o G e D indicam que é um vagão gôndola para descarga nos Viradores de Vagão (car dumper), e a última letra diferencia os vagões entre si quanto a carga máxima suportada, o U tem um peso máximo admissível de 143 t, e o tipo T suportam até 119,5 t (BELCHIOR, 2016).



Figura 4.6 – Vagão gôndola (Autor, 2021).

4.3.2 Vagão Hopper

Assim como os vagões tipo gôndola, o tipo Hopper transporta também granéis, e/ou sólidos, porém, existe uma particularidade em sua estrutura, apresentando no seu assoalho um perfil tipo funil, que é possível perceber na Figura 4.7, para que haja o descarregamento do produto transportado, além disso, outro ponto de diferença com o tipo gôndola, conforme mostra Oliveira (2019), é a possibilidade de fechar a parte superior do vagão, fazendo com que ele possa transportar granéis que não podem ser expostos a fatores externos.



Figura 4.7 – Vagão Hopper (Autor, 2021).

4.3.3 Vagão Fechado

O modelo fechado de vagões, indicado na Figura 4.8, é para transporte de granéis sólidos, caixarias e encascados, segundo Oliveira (2019). Conforme Trentin (2015), transporta dos demais produtos que não podem possuir exposição externa.



Figura 4.8 – Vagão Fechado (Massa, 2020).

4.3.4 Vagão Plataforma

Utilizado para transporte de contêineres, peças que apresentam uma grande dimensão, madeira e até produto siderúrgico (OLIVEIRA, 2019). Um dos pontos positivos dos Vagões Plataforma, visto na Figura 4.9, é a possibilidade de fazer o carregamento e descarregamento por vários pontos do vagão.



Figura 4.9 – Vagão Plataforma (Massa, 2020).

4.3.5 Vagão Tanque

Para o transporte de cargas líquidas corrosivas ou não, gases, sendo a carga sob alta ou baixa pressão, como afirma Trentin (2015), são utilizados os vagões do tipo tanque, que em sua grande maioria possuem um formato cilíndrico, como é mostrado na Figura 4.10.



Figura 4.10 – Vagão Tanque (Autor, 2021).

4.4 Conjunto de Choque e Tração (CCT)

Os vagões podem ser divididos em estruturas e sistemas. Sendo assim, a estrutura do vagão pode ser dividida em infraestrutura e superestrutura, sendo que a infraestrutura engloba a parte de truque e rodeiro. Já a superestrutura contempla o aparelho de choque, freio, caixa de carga e estrado, de acordo com o fluxograma mostrado na Figura 4.11 e montagem representada no vagão vista na Figura 4.12.

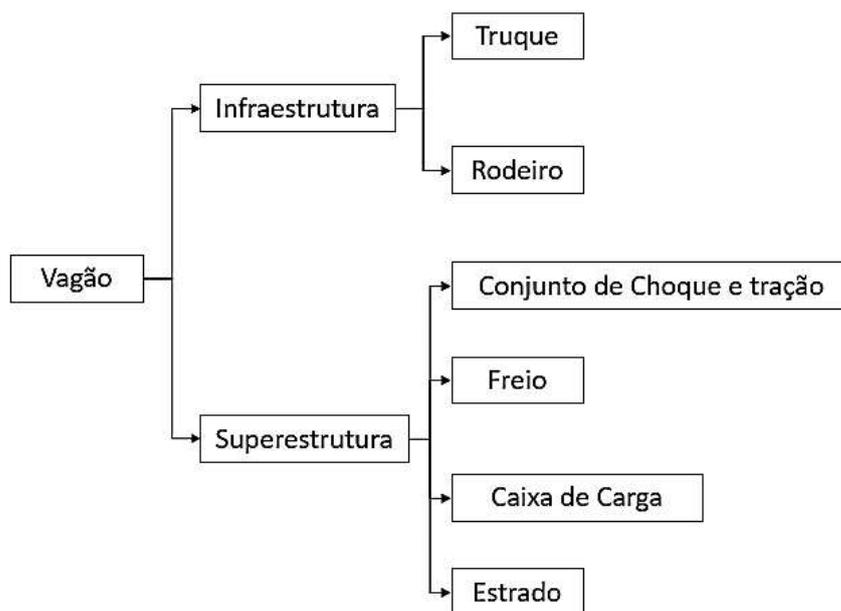


Figura 4.11 – Estrutura do vagão (Adaptado de Trentin, 2015).



Figura 4.12 – Representação dos sistemas no vagão (Oliveira, 2019).

O Conjunto de Choque e Tração (CCT) fica localizado nas cabeceiras dos vagões, possui a finalidade de permitir o acoplamento entre os veículos, podendo ser vagão-vagão ou locomotiva-vagão, gerando assim a formação da composição ferroviária (QUINTINO, 2008). E, segundo Belchior (2016), é o responsável por transferir com eficiência os esforços de tração e compressão ao longo do trem. De acordo com Souza (2017), o corpo do Conjunto de Choque e Tração (CCT) pode ser dividido em duas estruturas básicas: engate e o Aparelho de Choque e Tração (ACT).

4.4.1 Engate

Conforme Costa (2019), levando-se em consideração a composição física, ele apresenta um corpo fundido, mandíbula e demais componentes que agem no processo de travar e destravá-la. Tendo em vista que no processo de descarga dos vagões são utilizados os Viradores de Vagão, onde eles passam por um processo de giro, os veículos tipo GDT e GDU contam com dois tipos de engates, sendo eles o Engate Fixo e Engate Rotativo.

Os engates, fisicamente, se distinguem pelo formato da cauda que apresentam, sendo o Fixo apresentando uma cauda com um perfil retangular, conforme Figura 4.13 (a), enquanto o Rotativo apresenta a sua cauda arredondada, como mostra a Figura 4.13 (b).

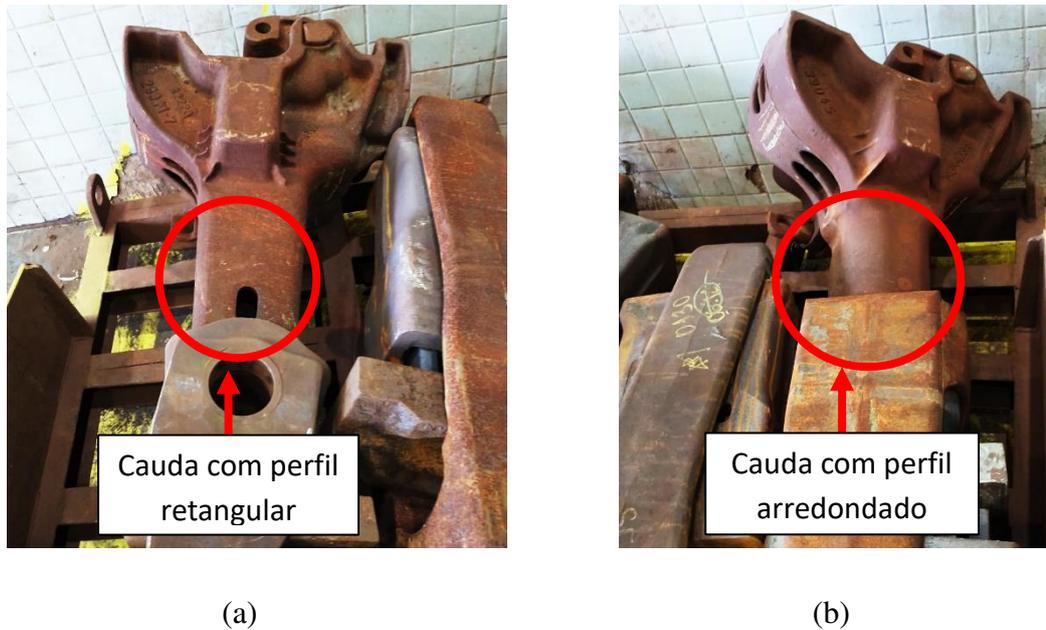


Figura 4.13 – (a) Engate Fixo, (b) Engate Rotativo (Autor, 2021).

Os vagões são acoplados de formando uma dupla germinada, ligada por uma haste fixa, a dupla é composta por um vagão com numeração ímpar e outro com numeração par. Os engates são especificados tecnicamente por siglas, como visto na Figura 4.14, é possível notar uma dupla de vagões e seus engates/trações identificados, sendo Tração/Engate Fixo com (TCFE) e a Tração/Engate Rotativo (TCR).

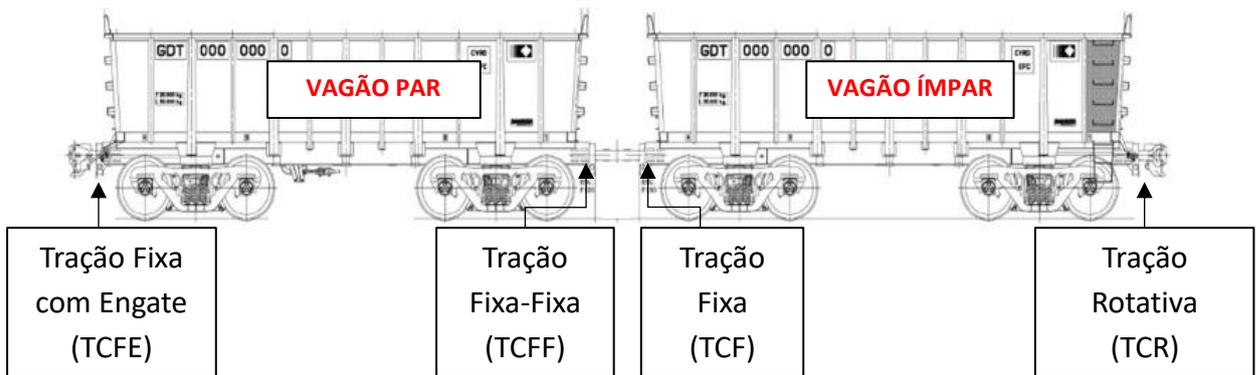


Figura 4.14 – Dupla de vagões com descrição das Trações/Engates (Adaptado de Valer, 2008).

4.4.2 Mandíbula

A mandíbula, ilustrada na Figura 4.15 (a) e (b), de acordo com o Valer (2008), é uma garra fixada ao corpo do engate e presa por um pino, tendo como função a realização do acoplamento entre os vagões. É o componente que sofre diretamente o impacto de acoplamento e os ajustes de folga dos engates.

Segundo Costa (2019), pode-se definir a mandíbula como a peça a ser sacrificada quando existe uma operação incorreta ou fora dos limites, pois na maioria das vezes é o primeiro componente a se romper, preservando o corpo do engate, visto que ele possui um alto custo, ao contrário da mandíbula, que é descrita como peça de reposição.

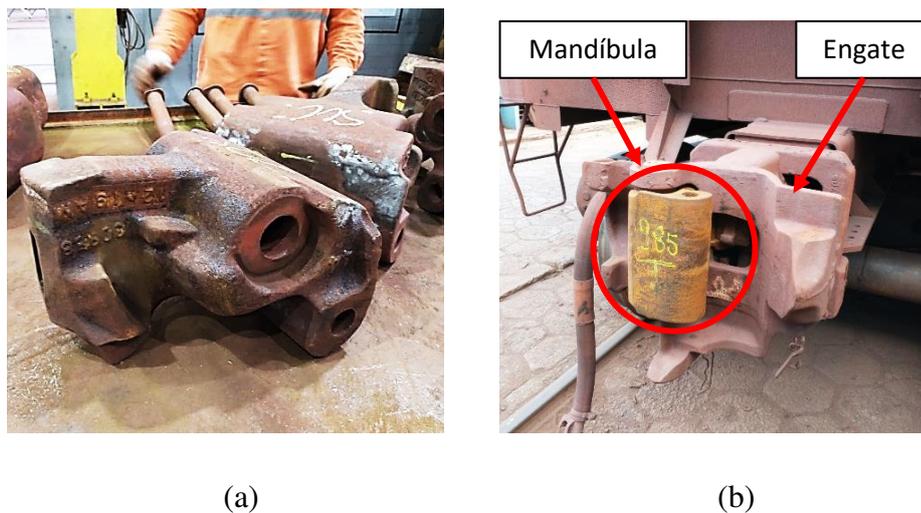


Figura 4.15 – (a) Mandíbula, (b) Mandíbula Acoplada no Engate (Autor, 2021).

4.4.3 Haste rígida

A haste rígida (Figura 4.16), também conhecida como haste de ligação, é um componente utilizado para fazer o acoplamento de dois vagões, formando assim uma dupla germinada. Nesse tipo de ligação entre os vagões, não é possível a operação de desengate das duplas.



Figura 4.16 – Haste Rígida formando uma dupla de vagões germinada (Autor, 2021).

4.4.4 Aparelho de Choque e Tração (ACT)

O Aparelho de Choque e Tração (ACT) visto na Figura 4.17 (a), segundo Souza (2017) é conhecido como o centro do Conjunto de Choque e Tração (CCT), e tem o objetivo de absorver a energia mecânica e amortecer os impactos gerados nas partidas e paradas do trem, através das molas presentes em sua composição, como mostra a Figura 4.17 (b).

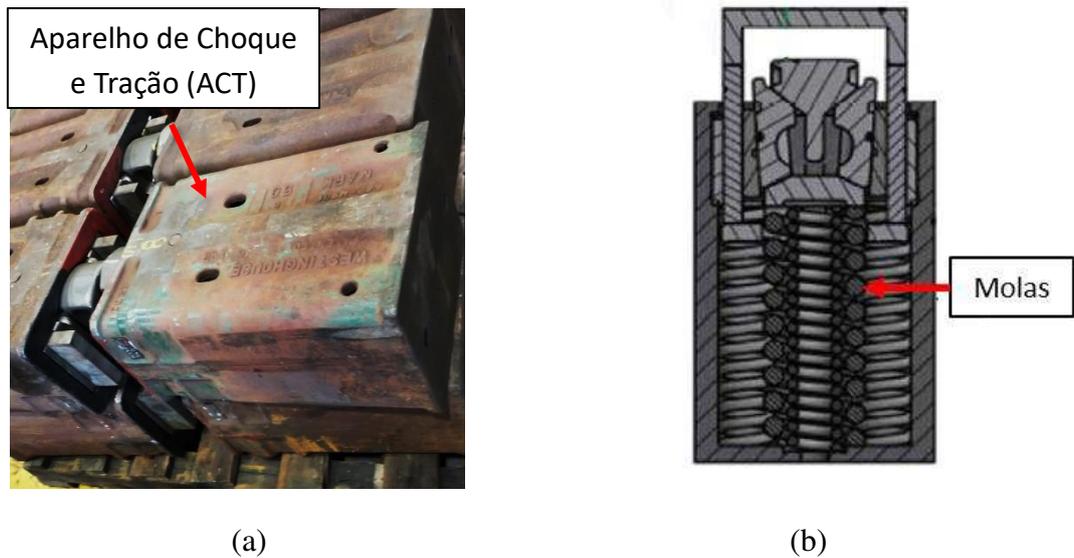


Figura 4.17 – (a) Aparelho de Choque e Tração (ACT), (b) Molas no ACT (Autor, 2021; Adaptado de Maxion, 2018).

4.4.5 Estrado

O Estrado (Figura 4.18), faz parte da infraestrutura do veículo, é responsável por distribuir os esforços provenientes da caixa do vagão. Segundo Costa e Dias (2016), é indispensável a utilização da extremidade da viga na montagem do Estrado, por ser a parte principal, e nela que é feito a montagem do sistema de choque e tração.

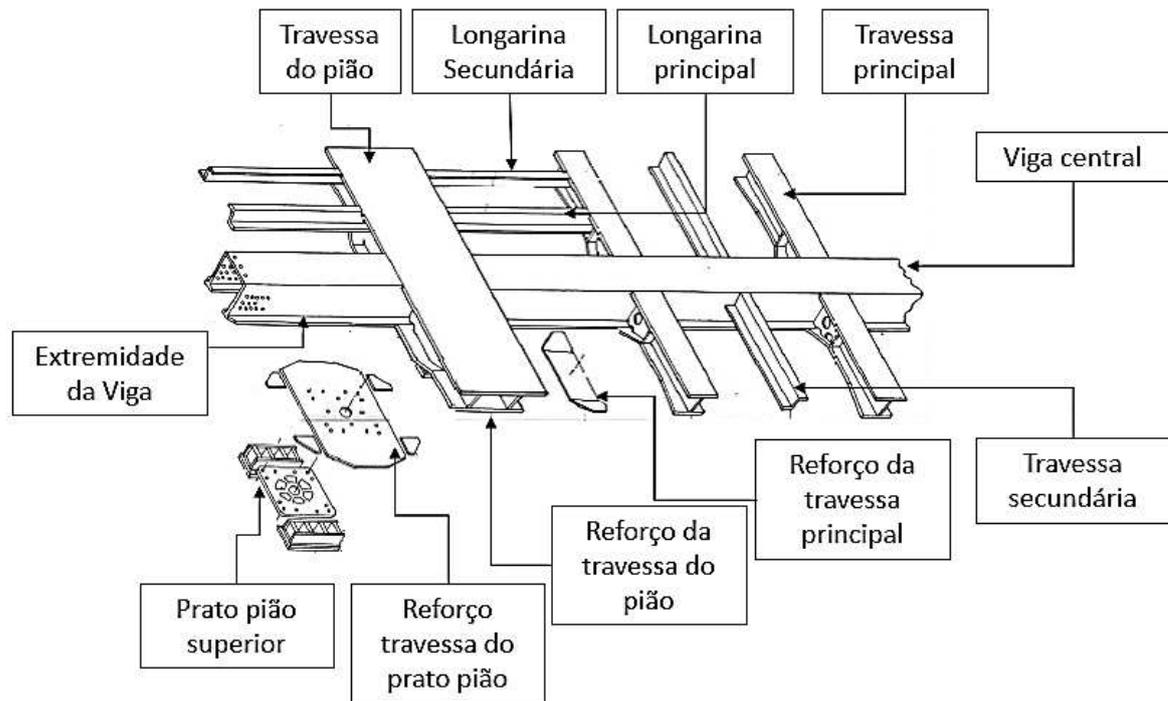


Figura 4.18 – Estrado (Adaptado de Pimassoni, 2010).

4.4.6 Espelho de viga

Segundo Costa e Dias (2016), o espelho da viga é soldado, por um processo de solda elétrica (MIG/MAG), na extremidade da viga. Logo após a execução deste processo é feito a montagem do Conjunto de Choque e Tração, conforme a Figura 4.19 (b) a seguir. Além de contar com o batente dianteiro, o espelho tem a função de fazer o suporte do engate, como é possível ver na Figura 4.19 (a).

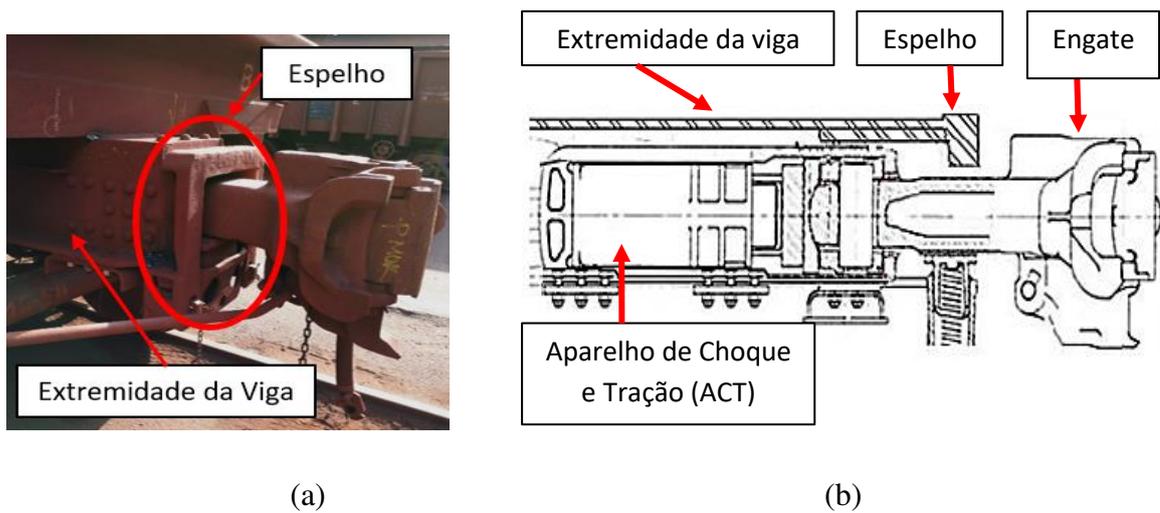


Figura 4.19 – (a) Identificação do Espelho de viga e da extremidade, (b) Montagem em do Conjunto de Choque e Tração (Autor, 2021; Adaptado de Pimassoni, 2010).

4.4.7 Funcionamento do Conjunto de Choque e Tração (CCT)

O Conjunto de Choque e Tração (CCT) é acionado para absorver tanto os esforços de tração como os de compressão, de acordo com a dinâmica de funcionamento da composição ferroviária. Quando o trem faz uma operação de tração, o engate é puxado e realiza a compressão do Aparelho de Choque e Tração (ACT) contra os batentes dianteiros. Por outro lado, quando o trem exerce uma força de compressão, o ACT é comprimido contra os batentes traseiros. Em posição de repouso, o ACT encontra-se em estado de centralização, sem exercer força nos batentes. Processo descrito na Figura 4.20.

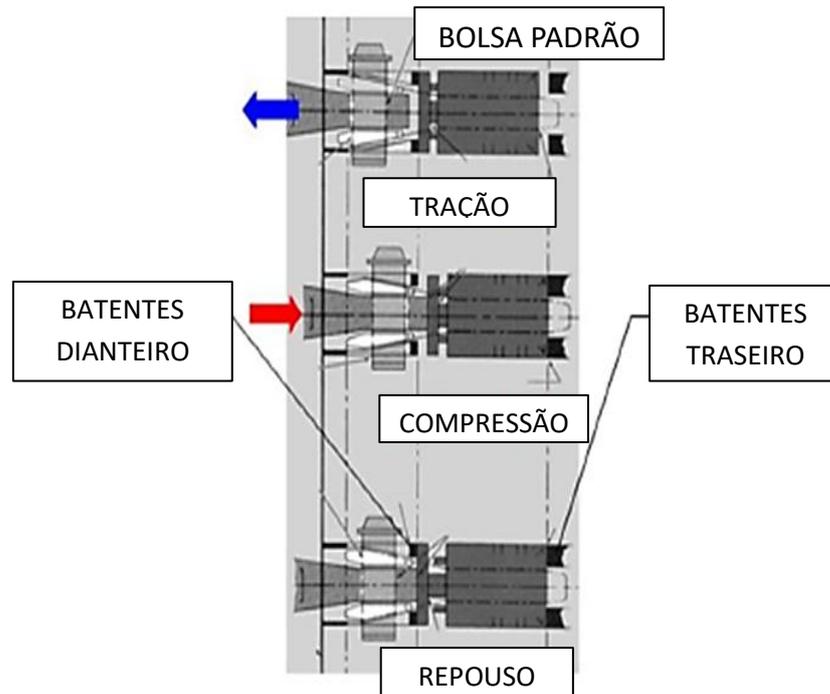


Figura 4.20 – Descrição do funcionamento do Conjunto de Choque e Tração (Adaptado de Rosa, 2012).

4.5 Método dos Elementos Finitos (MEF)

Na rotina de um engenheiro estão presentes inúmeros desafios de diferentes vertentes, e para conseguir solucioná-los utiliza-se de fórmulas, conhecimentos físicos, matemáticos e outros métodos de pesquisa acadêmica, porém, as resoluções analíticas possuem suas limitações, principalmente quando se trata de componentes e sistemas de alta complexidade.

Nesse sentido, como afirma Alves Filho (2012) os métodos analíticos clássicos nos permitem calcular soluções exatas sobre os principais pontos de uma análise estrutural, como tensões, deformações e deslocamentos, entretanto, tais soluções são conhecidas para casos limitados, que na maioria das vezes, não se aplicam nas condições de problemas reais. Portanto, buscando um método que pudesse ser aplicado abordando todos os tipos de estrutura e componentes, condições gerais de carregamento, entre outras condições de contorno, surge um caminho alternativo que é o Método dos Elementos Finitos (MEF).

O primeiro trabalho acadêmico utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) se deu em 1943, publicado por Richard Courant, considerado o pioneiro na utilização do método. Outro nome marcado pela divulgação da metodologia de resolução é o do professor O. C. Zienkiewicz, que publicou o seu livro em 1967, denominado “The Finite Element Methods for Engineering”, que gerou muitos seguidores por todo o mundo (VAZ, 2011).

O MEF, tem como princípio a discretização da peça em um número finito de elementos, possível de analisar na Figura 4.21, possibilitando as análises das propriedades mecânica dos componentes. Além das análises mecânicas, é possível fazer análises acerca de vibrações, durabilidade, oscilações dinâmicas e estudos térmicos (VALVERDE, 2021).

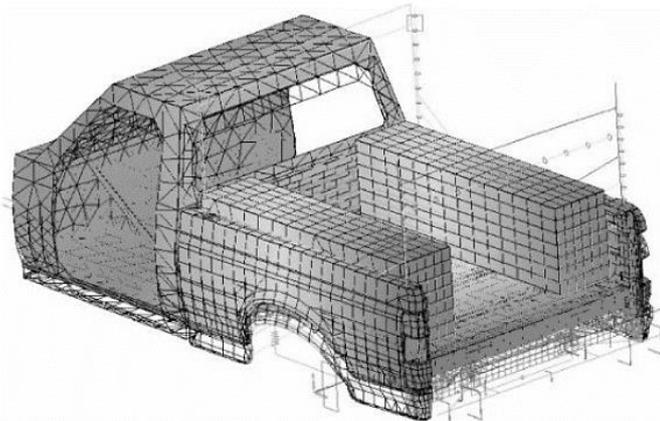


Figura 4.21 – Malha de elementos finitos (Alves Filho, 2012).

Um fator que é mais contribuinte na realização do estudo por MEF é a malha, que é composta por elementos e nós, mostrados na Figura 4.22. À medida que é feito o refino da malha, ou seja, é utilizado um maior número de nós e elementos o problema se torna melhor representado, tornando os resultados melhores e mais aproximados da realidade. Entretanto, com o alto refino exige mais capacidade do processamento do computador a ser utilizado, gerando uma certa demora na geração da malha e na resolução do problema estudado.

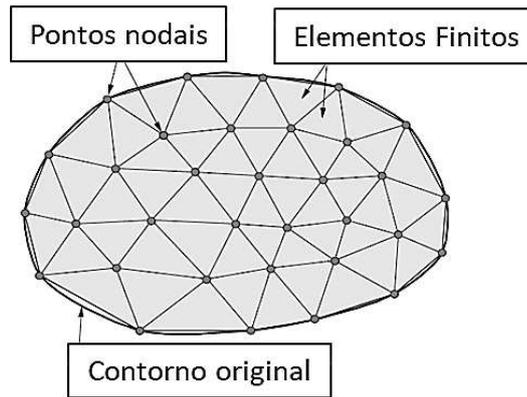


Figura 4.22 – Diferenciação de nós e elementos (Adaptado de Souza, 2003).

Segundo Lima Verde (2020) os elementos podem ser divididos em tipos classificados de acordo com o seu número de dimensões. Alves Filho (2012) afirma que o corpo contínuo se divide em certos elementos, com números finitos e são interligados por nós. Dentre as dimensões encontradas, inicialmente na Figura 4.23 é possível ver um elemento unidimensional, com 2 nós, encontrados em suas extremidades.

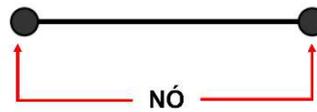


Figura 4.23 – Elemento unidimensional (Adaptado de Vaz, 2011).

Além do elemento unidimensional, para uma melhor discretização e representação dos problemas estudados, são utilizados os elementos bidimensionais, representados na Figura 4.24 por quadrilateral (possuindo quatro nós) e triangulares (contendo três nós), onde os nós estão representados pelos números de 1 a 4.

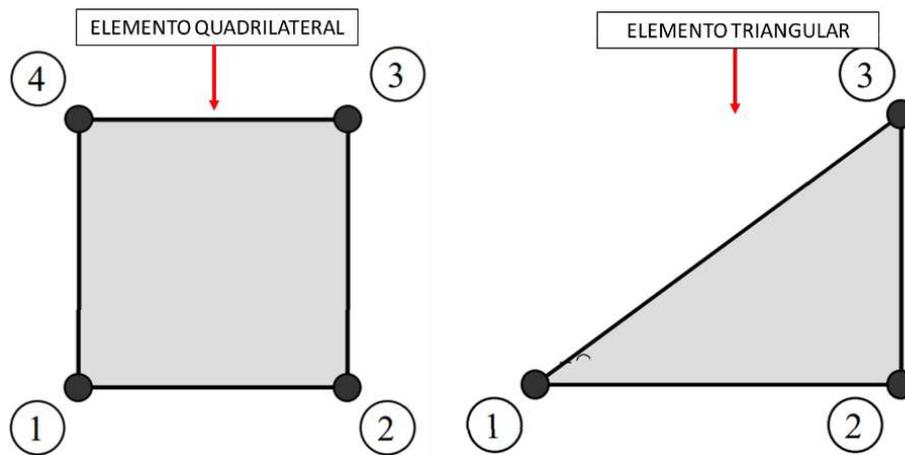


Figura 4.24 – Elemento quadrilateral e triangular (Adaptado de Vaz, 2011).

Além dos elementos com uma e duas dimensões existem também elementos com a possibilidade de discretizar o corpo de estudo em três dimensões, como é possível verificar na Figura 4.25, com elementos tetraédrico e hexaédrico.

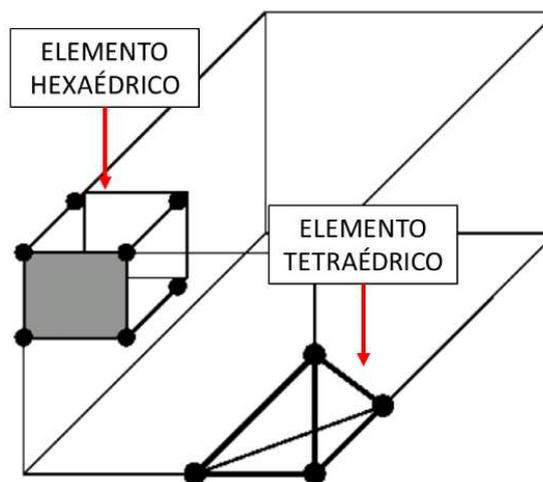


Figura 4.25 – Elemento hexaédrico e tetraédrico (Adaptado de Tretin, 2015).

Segundo Hutton (2004), a análise por elementos finitos divide-se em três etapas. Sendo elas de pré-processamento, processamento e pós-processamento. Na primeira etapa, é realizado a descrição do problema, onde desenvolve-se a geometria, define o tipo de malha e elementos a serem utilizados no estudo, as propriedades do material, as condições de contorno e as cargas que irão contribuir na análise, seguindo o fluxograma de análise na Figura 4.26.

Após as definições realizadas na etapa de pré-processamento é o momento de chegar aos resultados propostos no início do problema. Nessa etapa de processamento, o *software* utiliza de equações algébricas para resolver os sistemas. Podem ser calculados forças resultantes, tensões e problemas que utilizam fluxo de calor (HUTTON, 2004).

Por fim, a última etapa de pós-processamento é onde realizam-se a avaliação dos resultados obtidos. Os *softwares* presentes no mercado têm um vasto arsenal de modelos gráficos para apresentar os resultados, sendo possível a configuração de cores para áreas com máximas tensões, gráficos de propagação de calor, cálculo dos fatores de segurança, a plotagem da geometria deformada após aplicação dos esforços, dentre inúmeras outras opções para análise do problema (HUTTON, 2004).

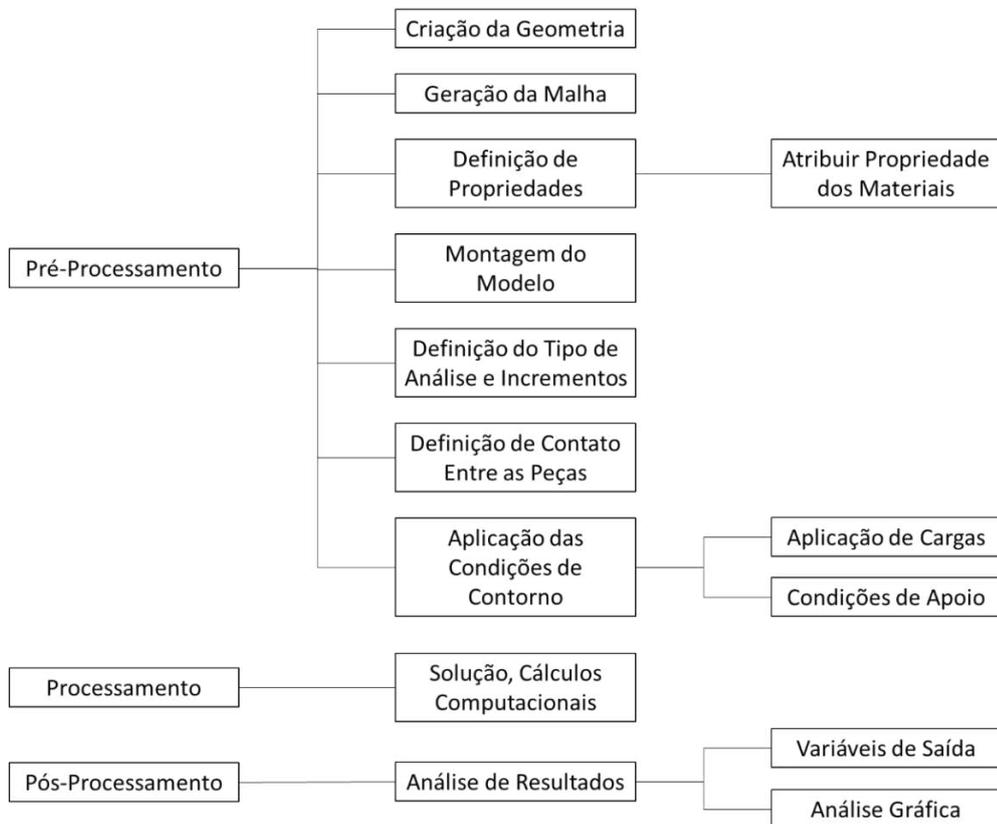


Figura 4.26 – Fluxograma de Resolução do MEF (Adaptado de Ferreira, 2016).

4.5.1 Singularidade

Quando se utiliza computacionalmente o método de elementos finitos para resolução de problemas existe uma inconsistência que se torna recorrente e comum, chamada de singularidade. Segundo Neto (2018), a singularidade ocorre quando a carga é aplicada em um elemento pequeno da estrutura e produz uma alta tensão que apesar do refino local da malha o valor só tende a aumentar, não sendo convergente.

A singularidade afeta também resultados próximos a ela como na Figura 4.27, porém não invalida o estudo desenvolvido, pois o princípio de *Saint-Venant* afirma que o efeito de distorção da tensão local permanece local e os resultados longe da zona afetada não sofrem influência, validando assim os resultados no restante do componente em análise (NETO, 2018).

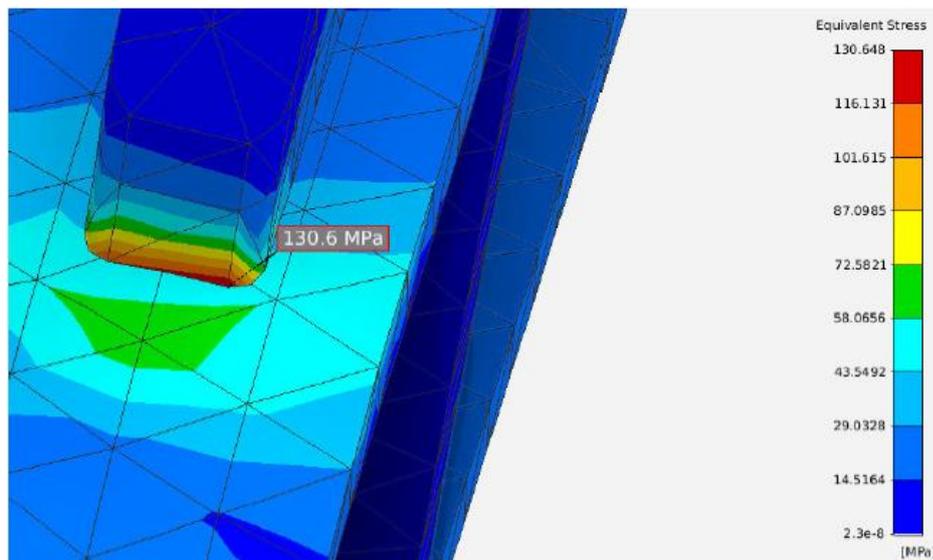


Figura 4.27 – Exemplo de singularidade (Neto, 2018).

Contudo, devem ser investigados pontos de tensão para analisar se é um problema de singularidade ou um real concentrador de tensão, podendo ser tendências da própria geometria do componente, como cantos vivos, região de contato entre na peça, entre outros (VERDE, 2020). Sendo assim, por apresentar uma tendência de falsa tensão em casos com a presença de singularidade, estuda-se os esforços nas zonas adjacentes.

4.6 Aço ASTM A-242

Segundo Trentin (2015), o aço ASTM A242, conhecido também como aço patinável, é comumente utilizado para a construção de componentes metálicos, seja em veículos ferroviários (vagões e locomotivas), estruturas de pontes, edifícios, mineração entre outros. A sua vasta utilização justifica-se pela sua alta resistência a corrosão atmosférica, visto que ele desenvolve uma camada de óxido protetora quando entra em contato com o ambiente.

Em sua composição apresenta elementos como Carbono (C), Manganês (Mn), Fósforo (P), Enxofre (S) e Cobre (Cu), com percentuais mostrados na Figura 4.28

Especificação	Grau	Faixa de Espessura (mm)	Composição Química (% em massa)								Propriedades Mecânicas					
			C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Outros	LE (Mpa) (3)	LR (Mpa) (3)	Alongamento		Dobramento	
												Espessura (mm)	BM (mm)	%	Direção	Calço
USI SAC	300	$6,00 \leq E \leq 101,60$	0,20 máx.	0,50–1,50	1,50 máx.	0,010–0,060	0,020 máx.	0,05–0,40	$\leq 0,60$		300 min.	400–550				
	350	$6,00 \leq E \leq 50,80$	0,25 máx.								350 min.	500–650			T	1,5E
ASTM-A242	Tipo 1	$6,00 \leq E \leq 19,50$								(1)	345 min.	480 min.	(2)	200	16	
		$6,00 \leq E \leq 38,10$	0,15 máx.	—	1,00 máx.	0,15 máx.	0,05 máx.	$> 0,20$	—		315 min.	460 min.				
		$6,00 \leq E \leq 101,60$									290 min.	435 min.				
ASTM-A588		$6,00 \leq E \leq 50,80$	0,20 máx.	0,15–0,50	0,75–1,35	0,040 máx.	0,05 máx.	0,20–0,40	0,40–0,70		345 min.	485 min.				

Figura 4.28 – Propriedades mecânicas do aço ASTM A-242 (AçoBrasil, 2018).

4.7 Critérios de falha para Carregamento Estático

Hibbeler (2010) afirma que na prática da engenharia existem quatro critérios de falhas que são utilizados com frequência, porém, a mesma teoria não se aplicará sempre a todos os materiais, pois eles se comportam de forma diferente quando se trata de materiais frágeis e dúcteis.

Para materiais dúcteis utiliza-se frequentemente a teoria da Tensão de Cisalhamento Máxima e a Teoria da Energia de Distorção Máxima, também conhecida como Critério de von

Mises. Enquanto para materiais frágeis utilizam-se as teorias da Tensão Normal Máxima e o Critério de Falha de Mohr.

Portanto, para adotar o critério de falha estática é necessário definir anteriormente a ductilidade do material utilizado para a construção da extremidade da viga. O material ASTM A-242 possui um limite de escoamento entre de 345 e 350 Mpa e de ruptura em variando entre 480Mpa e 500 Mpa, sendo assim, analisou-se o gráfico de Tensão x Deformação do material e obteve-se a conclusão de que ele se apresenta como um material dúctil, como mostra o Gráfico 1.

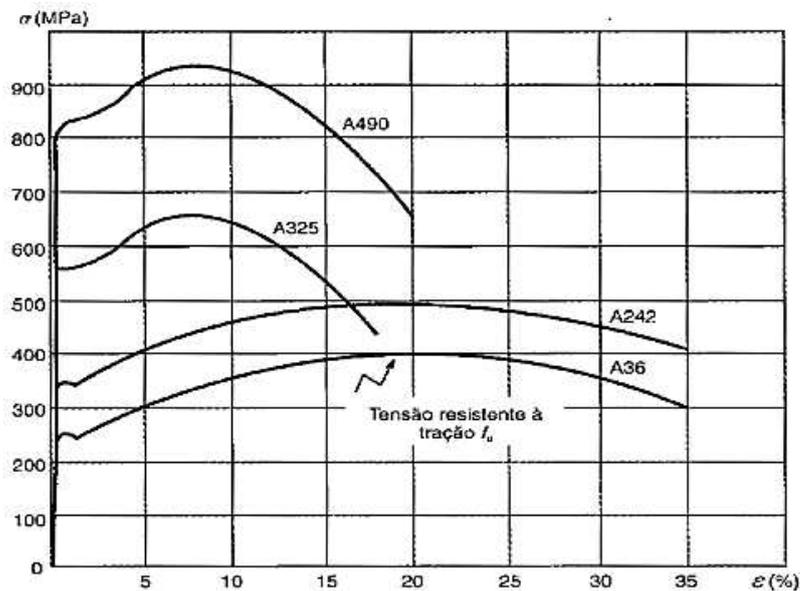


Gráfico 1– Gráfico de Tensão x Deformação do material ASTM A-242 em comparação com os aços A490, A325 e A36 (Silva, 2017).

O material ASTM A-242 é dúctil, sendo necessário definir o critério de falha para materiais dessa natureza e, segundo Verde (2020), quando o material é dúctil o escoamento se dá como o principal critério de falha. Na literatura consultada referente a análises computacionais de elementos ferroviários foi unânime a escolha pelo critério da tensão equivalente de von Mises.

De acordo Norton (2013), a energia de distorção é um bom meio para calcular tensões para materiais que apresentam uma boa ductilidade.

4.7.1 Teoria da Energia de Distorção Máxima (Critério de von Mises)

Norton (2013) afirma que quando no problema estudado envolvem-se tensões combinadas, sendo elas normais ou de cisalhamento no mesmo ponto, é conveniente fazer a definição de uma tensão que possa ser usada para representar a combinação das tensões. Sendo assim, esse procedimento nos permite utilizar para o tratamento de casos que contenham tensão multiaxial combinada a tensões de cisalhamento como se fossem devidos a um carregamento de tração pura. A teoria de Mises afirma que o escoamento do material dúctil começa a acontecer quando a tensão de von Mises em um determinado local do componente se iguala ao limite de tensão do material, que na maioria das vezes é representado pelo limite de escoamento do material.

A equação que rege a tensão, de acordo com Norton (2013) está representada na Equação 5.1.

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

Equação 5.1

Sendo que:

σ' representa a Tensão de von Misses;

σ são as tensões axiais que atuam em um ponto da estrutura;

τ representa as tensões cisalhantes que atuam em um ponto do componente;

As variáveis indicadas por “x” e “y” são para sinalizar as direções da seção da área do ponto de interesse para o cálculo.

5 METODOLOGIA

A fratura da extremidade da viga acontece no batente dianteiro e é possível perceber que a falha ocorre no processo de tração do trem, conforme a Figura 5.1, onde as setas em vermelho mostram que o engate é tracionado, comprimindo o Aparelho de Choque e Tração (ACT), exercendo a força nos batentes dianteiros, que junto da extremidade não suportam o esforço e fracionam o trem, causando a separação da composição.

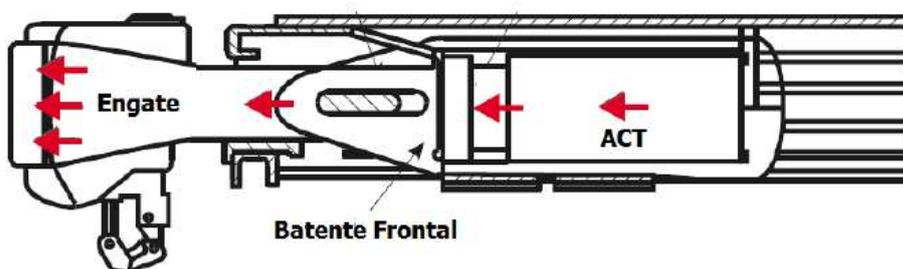


Figura 5.1 – Funcionamento durante tração do CCT (Adaptado de Souza, 2017).

Sendo assim, para utilizar o MEF em *softwares* de simulação, inicialmente foi realizada a modelagem da extremidade da viga utilizando o *software* Solidworks, para obter o modelo em 3D, alcançando a geometria mostrada na Figura 5.2.

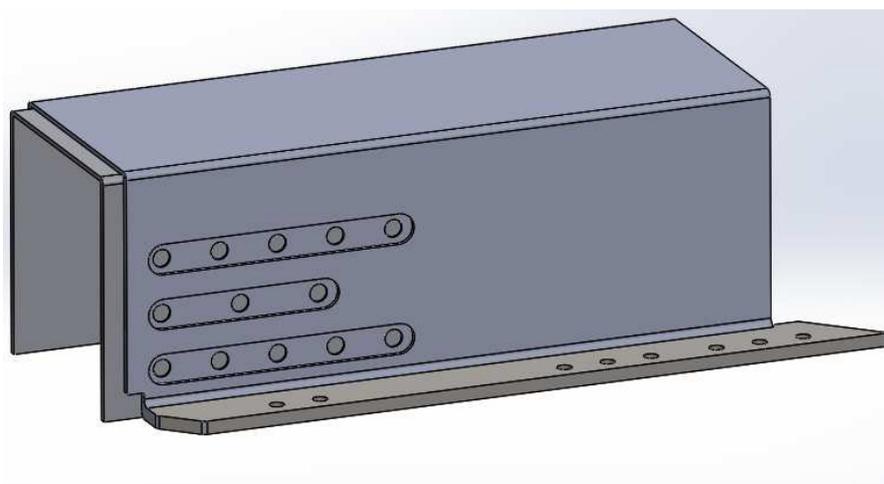


Figura 5.2 – Modelagem 3D da extremidade da viga (Autor, 2021).

O *software* escolhido para realizar as simulações computacionais foi o ANSYS, que é um sistema comercial que utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF) para desenvolver modelos numéricos e resultados gráficos para análise no campo da engenharia. É possível, através do ANSYS, a realização de diversos modelos de estudo, podendo ser problemas estruturais, de escoamento, problemas térmicos, entre outros.

Para os problemas estruturais, o *software* permite algumas análises, como análise estática, de flambagem, análise modal, análise harmônica, dinâmica transiente e por fim, a análise espectral (ABREU, 2016).

Para o estudo da extremidade da viga será realizada uma análise estática, pois segundo Abreu (2016) é possível determinar deslocamentos, tensões e deformações, sendo submetida a condição de uma carga estática.

No ambiente do ANSYS, antes de iniciar o processo de geração de malha foi realizado a importação do modelo 3D desenvolvido no Solidworks. No passo seguinte, foi adicionado o material ASTM A-242 na biblioteca do *software*, inserindo as suas características e propriedades mecânicas.

Observando o funcionamento do componente na dinâmica do vagão em campo, definiram-se então as condições de contorno mais adequadas para determinar no estudo e modelar da melhor forma possível o problema. O esforço de tração na extremidade da viga acontece na parte interna, nos batentes dianteiros, sendo assim, para definir a magnitude da força a ser aplicada consultou-se a norma AAR (*Association of American Railroad*) Seção C - Parte 2, Capítulo IV, que é responsável pelas especificações utilizadas para todos os vagões que operam no Brasil.

Após verificação na norma AAR, foi constatado que a especificação para esforços de tração é de 1.557 kN que foi aplicada no batente dianteiro conforme a Figura 5.3. Além da carga de tração, adicionou-se como condição um acessório de suporte fixo (Figura 5.4) na parte posterior e superior da extremidade da viga, pois são partes soldadas diretamente no vagão.

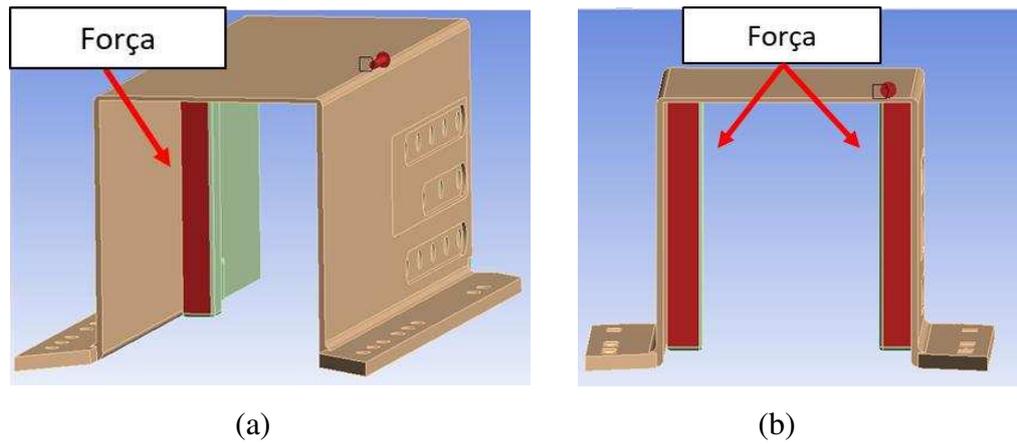


Figura 5.3 – Esforço adicionado no batente (a) e (b) (Autor, 2021).

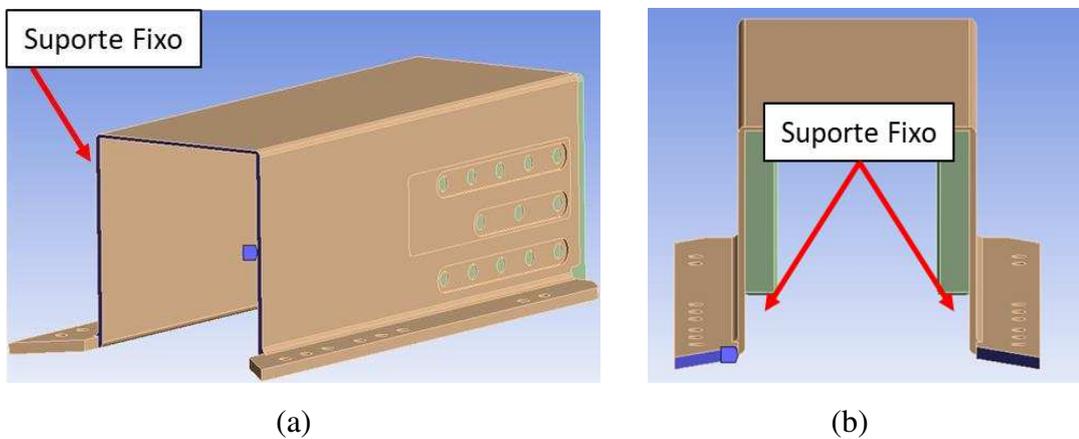


Figura 5.4 – Suporte fixo adicionado na zona posterior (a) e (b) (Autor, 2021).

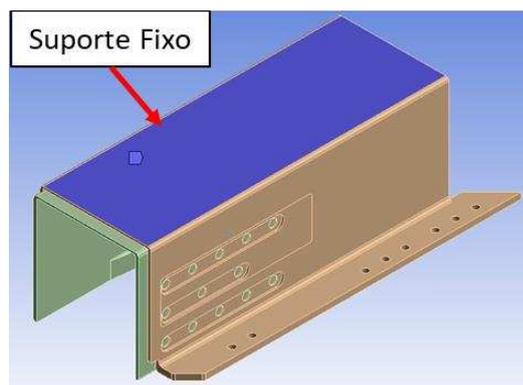


Figura 5.5 – Suporte fixo adicionado na zona superior (Autor, 2021).

Para definição do tipo de reforço e região a ser utilizado, foi feito um *brainstorming* e após as propostas do sugeridas foi definido então a utilização de chapas do aço ASTM A-242, com espessura de 3/8” soldadas na lateral da extremidade.

Portanto, os ensaios computacionais serão realizados na extremidade da viga em cinco configurações, sendo elas: sem chapa de reforço (Figura 5.2), com uma chapa de reforço (Figura 5.6), com duas chapas de reforço (Figura 5.7), com uma nervura (Figura 5.8) e por fim com duas nervuras (Figura 5.9). Para melhor organização e análise das simulações os modelos foram nomeados conforme a Tabela 5.1:

Tabela 5.1 – Nomenclatura dos modelos (Autor, 2021).

Modelo de reforço	Nomenclatura
Sem reforço	Caso 1
Uma chapa	Caso 2
Duas chapas	Caso 3
Uma nervura	Caso 4
Duas nervuras	Caso 5

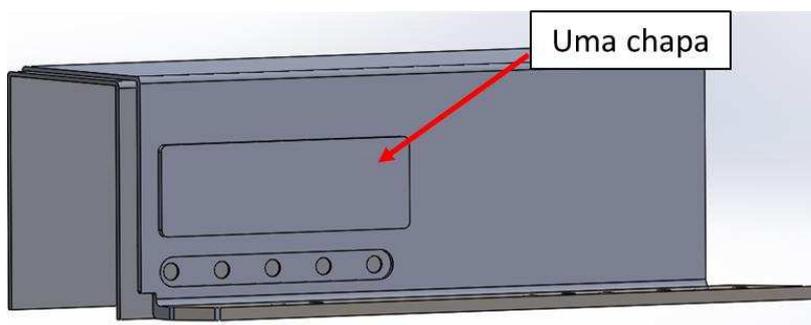


Figura 5.6 – Modelagem do Caso 2 (Autor, 2021).

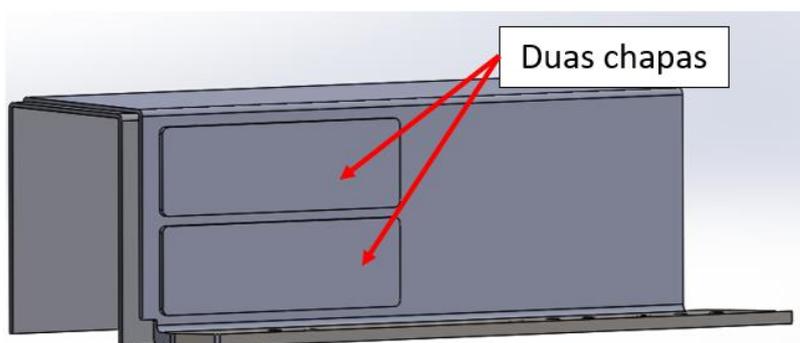


Figura 5.7 – Modelagem do Caso 3 (Autor, 2021).

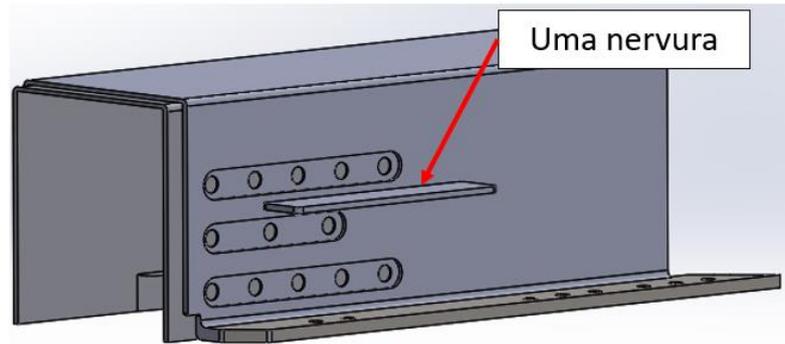


Figura 5.8 – Modelagem do Caso 4 (Autor, 2021).

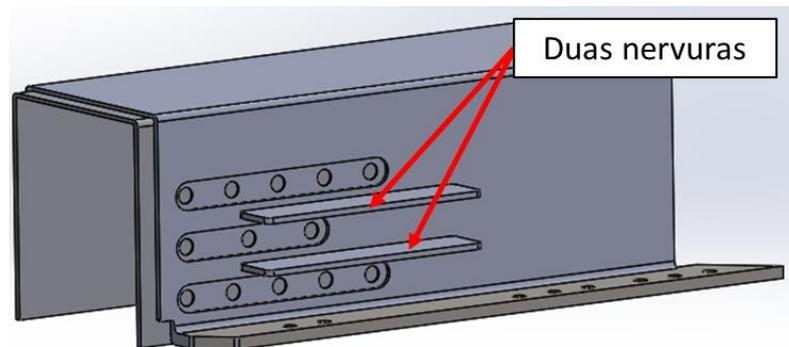


Figura 5.9 – Modelagem do Caso 5 (Autor, 2021).

Para definição da malha iniciou-se com elementos de 50mm (Figura 5.10) de tamanho, e o refinamento foi realizado diminuindo 5mm a cada análise. Na redução de 15mm para 10mm percebeu-se que o processamento computacional levou mais tempo para concretizar os resultados e as tensões não sofreram diferenças significativas.

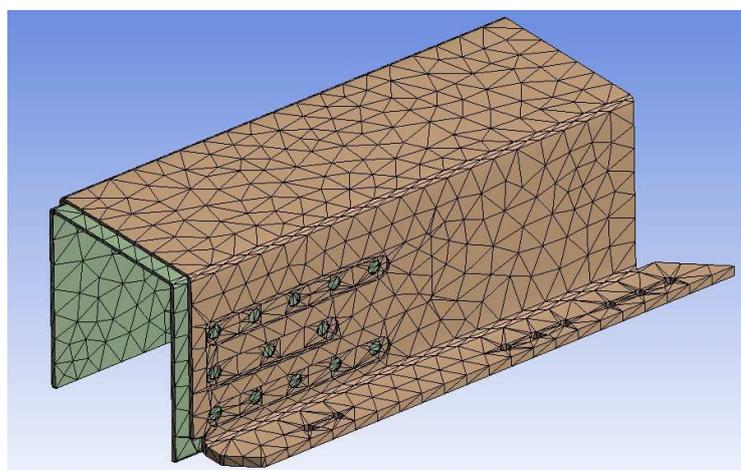


Figura 5.10 – Malha sem refino (Autor, 2021).

Portanto, optou-se por usar 15mm (Figura 5.11) que apresentou um tempo de resolução menor e resultados similares, além disso os elementos mostraram-se com boa qualidade e baixa deformação. Porém, foi analisado e percebido que um refino e controle de malha local seria necessário nas regiões de tensão mais crítica, sendo adicionado nos batentes elementos de 5 mm em suas faces, como mostra a Figura 5.12.

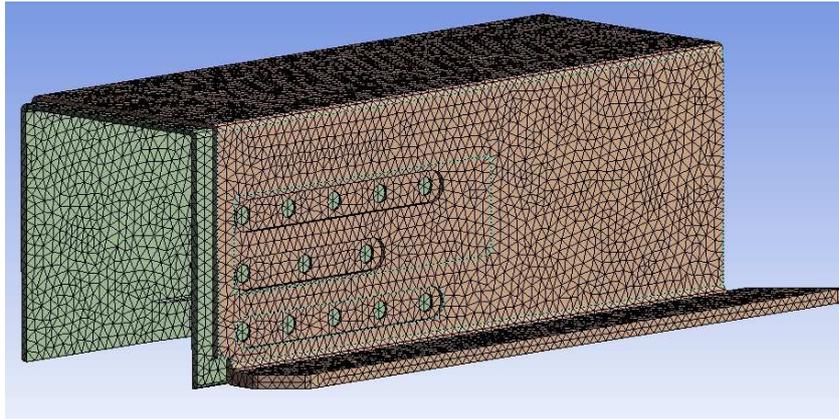


Figura 5.11 – Malha refinada (Autor, 2021).

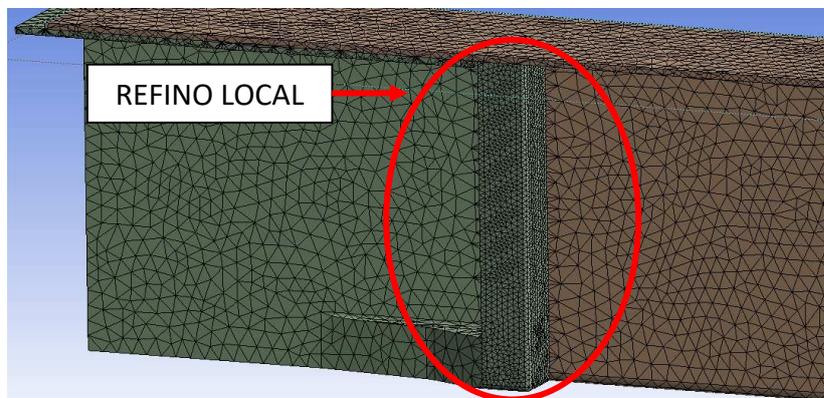


Figura 5.12 – Refino de malha local na região de interesse (Autor, 2021).

Na malha foram utilizados elementos tridimensionais, sendo eles o Tet10 e Hex20. O Tet10 é um elemento tetraédrico que contém em sua estrutura 10 nós. Já o Hex20, como o prefixo do nome sugere, possui um formato hexaédrico e apresenta um total de 20 nós, apesar de em algumas análises a sua resolução matemática computacionalmente demorar para ser processada, é um dos elementos mais utilizados.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Resultados Caso 1 – sem chapa

Com a definição dos parâmetros iniciais e condições de contorno para o estudo, foram realizadas as simulações computacionais obtendo-se os resultados da tensão equivalente de von Mises para o Caso 1, como mostra a Figura 6.1.

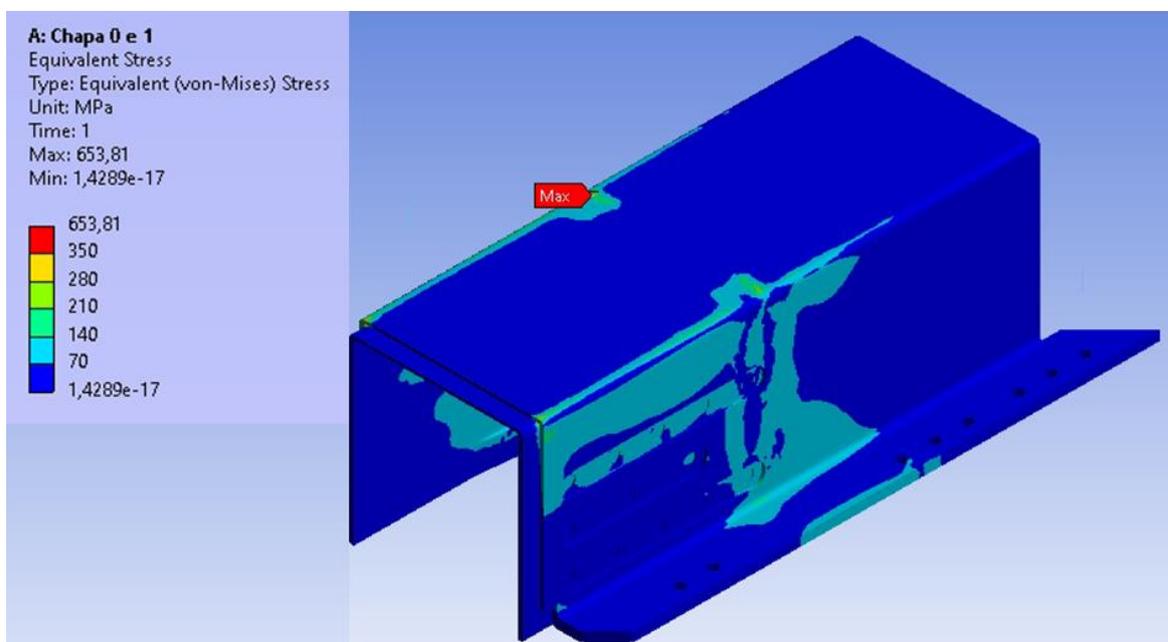


Figura 6.1 – Resultado obtido para a simulação do Caso 1 em perspectiva isométrica (Autor, 2021).

Na análise apresentada para a extremidade da viga é possível analisar que as zonas do componente que apresentam a tensão mais elevada estão na parte interna, nas proximidades dos batentes dianteiros (Figura 6.2). Foi possível observar pontos que a tensão excede o limite de escoamento e de ruptura definido pelo material, porém, pode-se caracterizar como ponto de singularidade, inconsistência comum quando se trata de elementos finitos, onde os valores da tensão, apesar do refino local de malha e remoção de arestas vivas presentes na geometria,

apresentam valores muito altos (Figura 6.3), tendendo ao infinito. Sendo necessário o estudo dos elementos adjacentes.

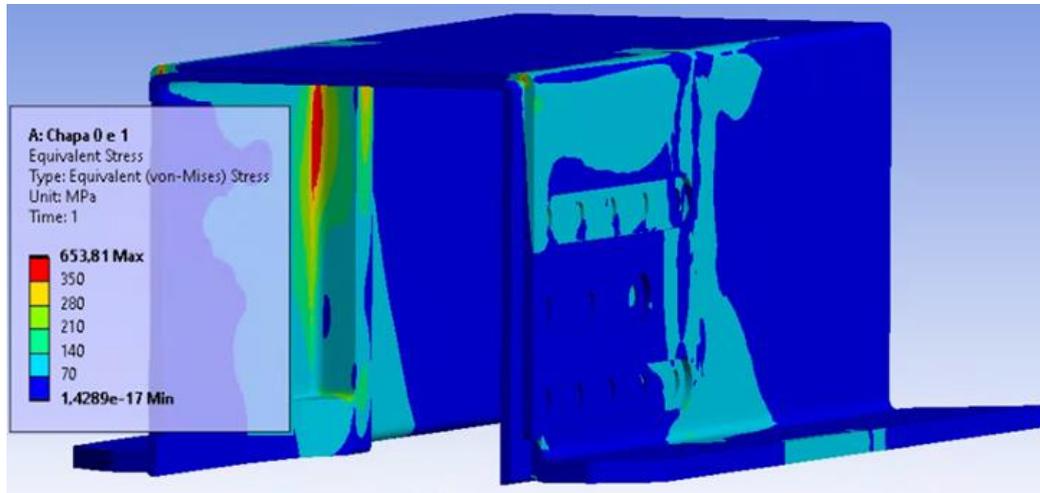


Figura 6.2 –Perspectiva frontal do componente com altas tensões no batente (Autor, 2021).

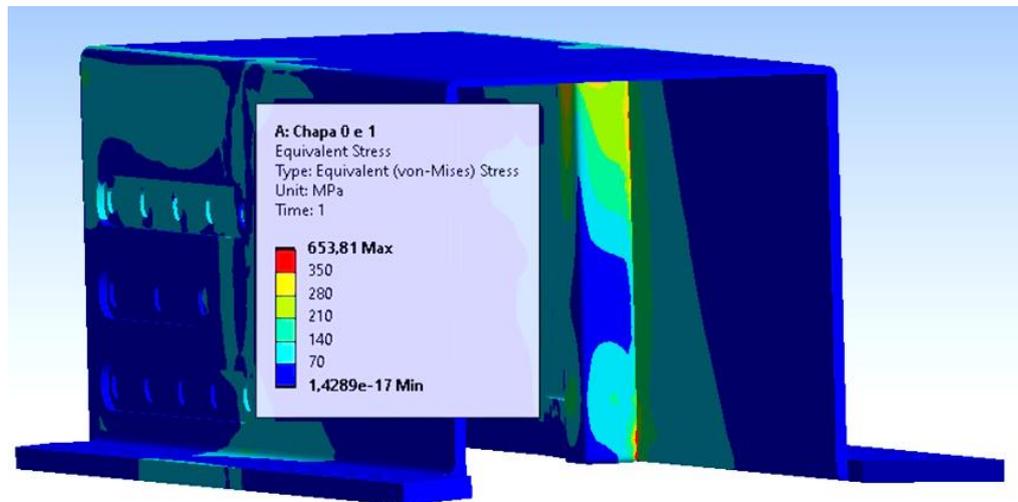


Figura 6.3 – Perspectiva posterior do componente com altas tensões no batente (Autor, 2021).

Sendo assim, para melhor visualizar os esforços nos batentes dianteiros, um plano de corte foi adicionado no estudo, possibilitando uma visão mais direta do componente. Além disso, a ferramenta “Probe”, do *software* foi utilizada para verificação dos valores locais, mostrados na Figura 6.4.

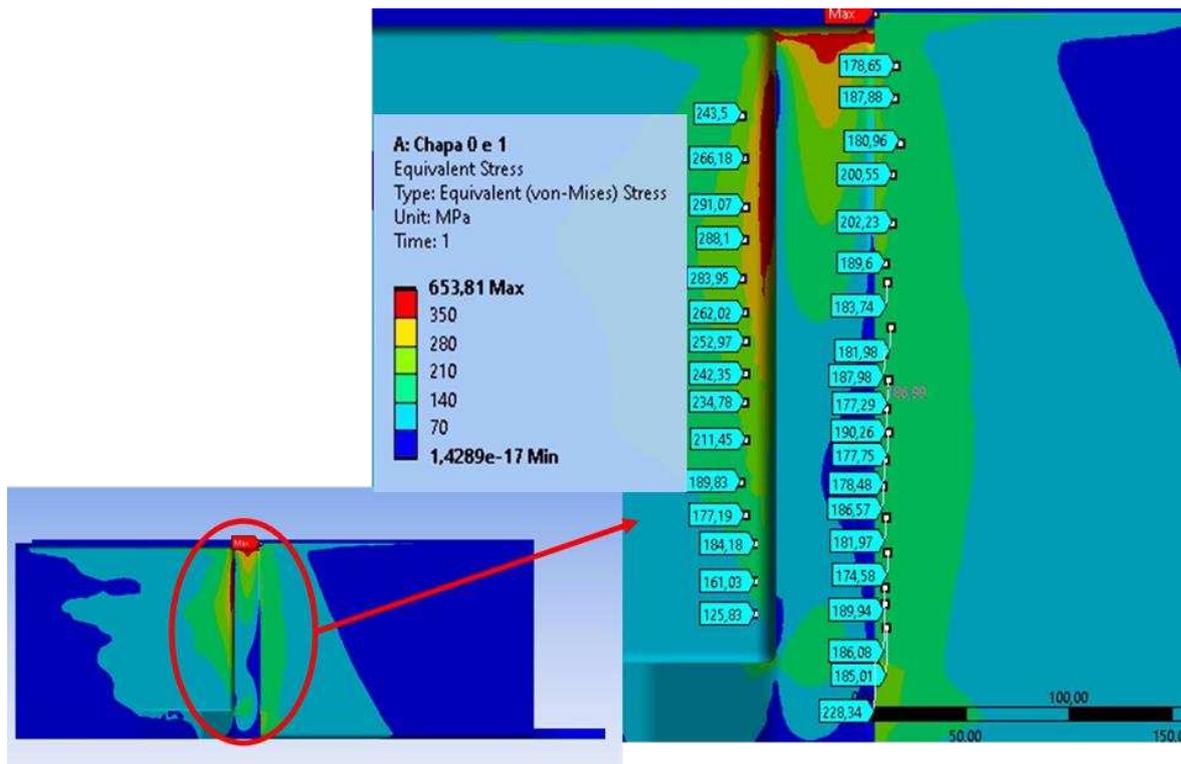


Figura 6.4 – Análise interna da extremidade da viga para o Caso 1 (Autor, 2021).

Observa-se que as tensões se concentram nos batentes, na região onde o componente falha quando está em operação real, evidenciando que estruturalmente o conjunto não apresenta uma boa performance quando solicitado, sendo então um fator contribuinte para os eventos ocorridos na extremidade da viga.

6.2 Resultados Caso 2 – uma chapa

Após a realização do estudo do Caso 1, foi verificado onde os pontos de alta tensão estão localizados, possibilitando assim o entendimento e avaliação correta de onde posicionar as chapas de reforço melhorando assim a resistência do componente. Nesse sentido, para prosseguimento da análise conforme proposto, foi adicionado uma chapa na lateral do modelo e utilizou-se os mesmos parâmetros de malha anteriormente aplicados, porém, com refino nas

chapas de reforço (Figura 6.5) e como resultado foi observado a magnitude das tensões de von Mises atuantes, como mostra a Figura 6.6.

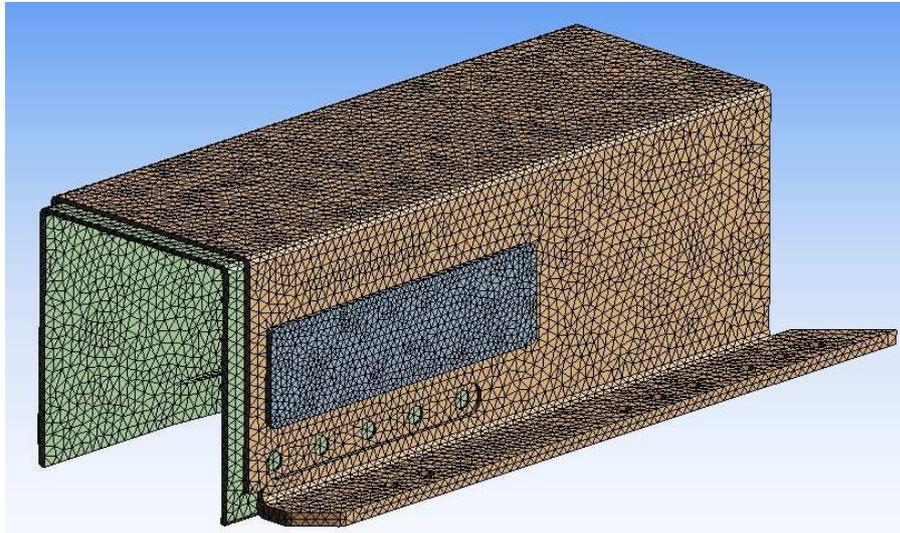


Figura 6.5 – Malha utilizada na análise do Caso 2 (Autor, 2021).

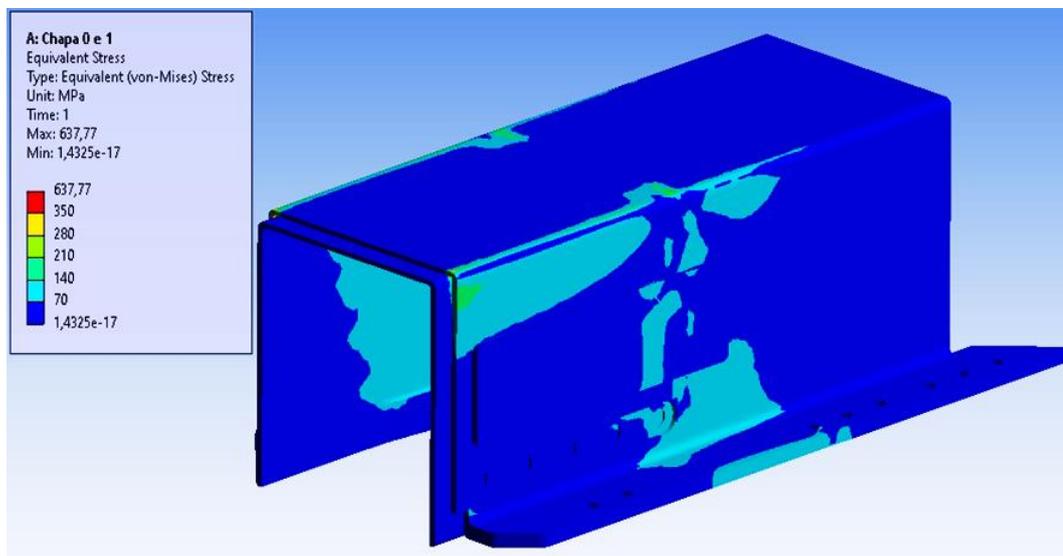


Figura 6.6 – Resultados da análise do Caso 2 (Autor, 2021).

Foi realizada a análise interna da extremidade da viga para o Caso 2, como mostra a Figura 6.7.

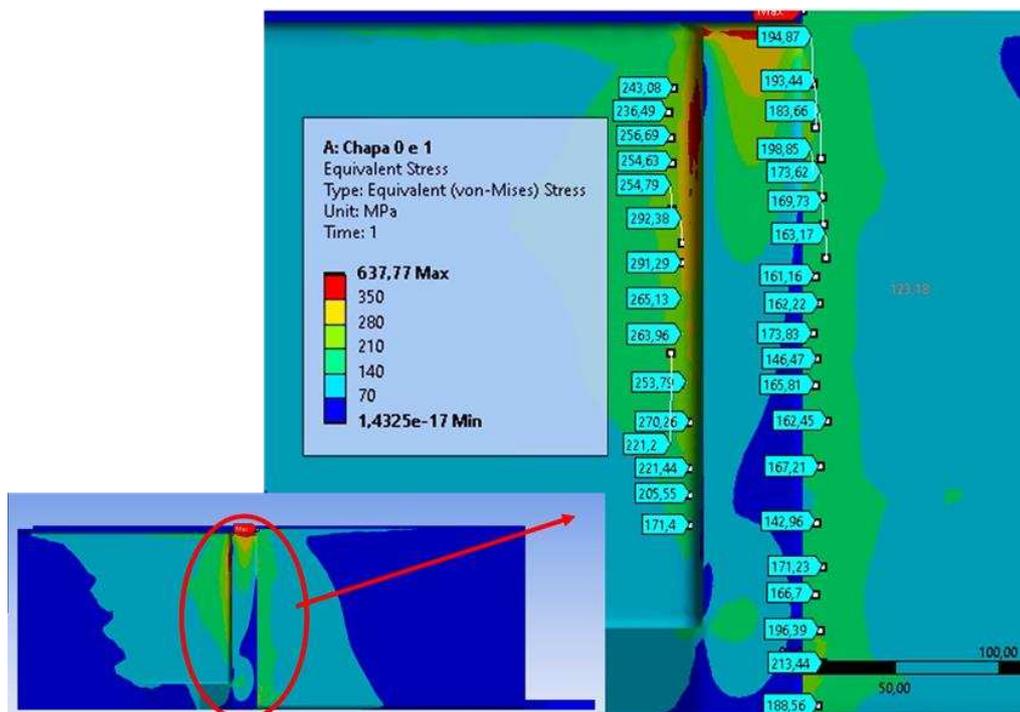


Figura 6.7 – Análise interna da extremidade da viga para o Caso 2 (Autor, 2021).

Após análise gráfica, verifica-se que no corte lateral efetuado assim como no estudo do Caso 1, o modelo apresentou uma melhora significativa nos resultados, como evidenciado na Figura 6.7 mostrada anteriormente, onde também foi utilizada a ferramenta “Probe” para verificar a tensão local.

6.3 Resultados Caso 3 – duas chapas

A fim de comparar qual solução atende melhor os requisitos desejados, estudou-se o modelo com a adição de duas chapas laterais (Caso 3), possibilitando a análise entre os modelos e gerando maior volume de dados para a tomada de decisão. A malha utilizada manteve as configurações definidas anteriormente como nos Casos 1 e 2 (Figura 6.8). Na análise externa do componente (Figura 6.9), percebe-se que há uma expressiva diminuição das tensões na faixa de 70Mpa até 210Mpa.

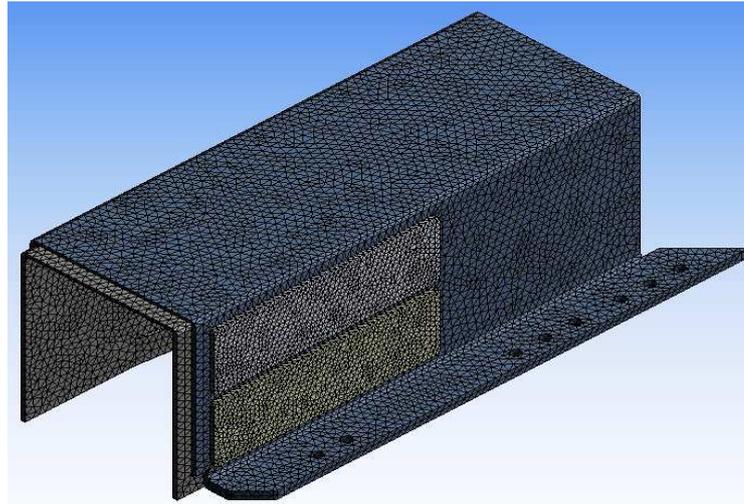


Figura 6.8 – Malha utilizada na análise do Caso 3 (Autor, 2021).

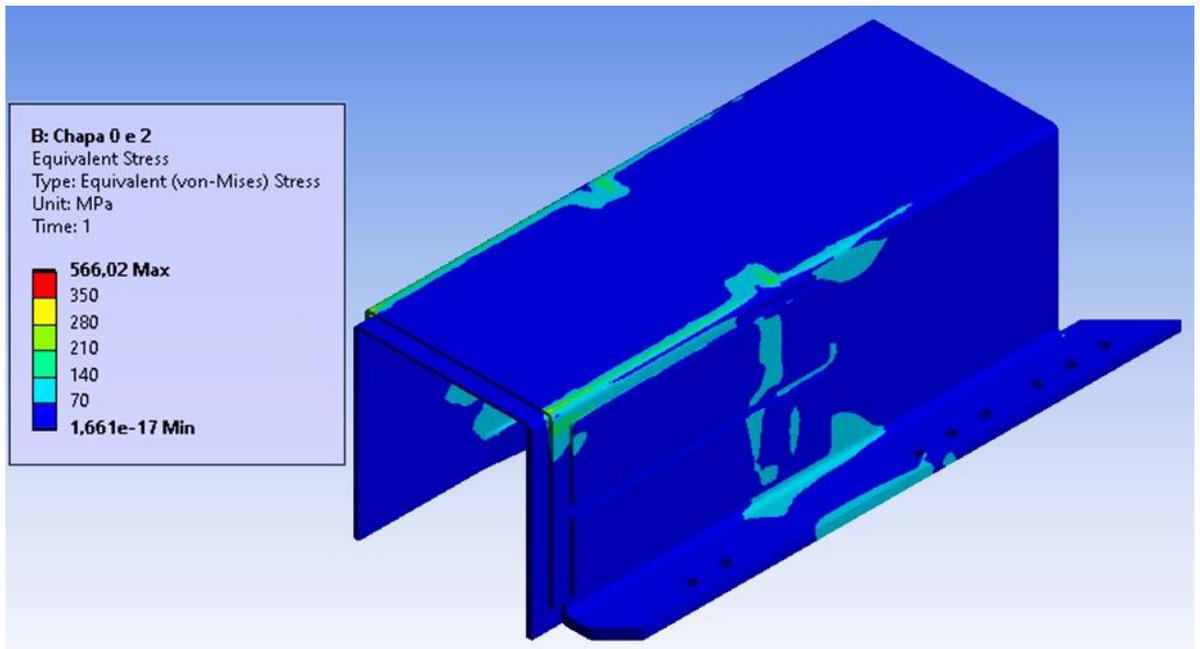


Figura 6.9 – Resultados da análise do Caso 3 (Autor, 2021).

No Caso 3 também se realizou a análise interna da extremidade da viga, como mostra a Figura 6.10.

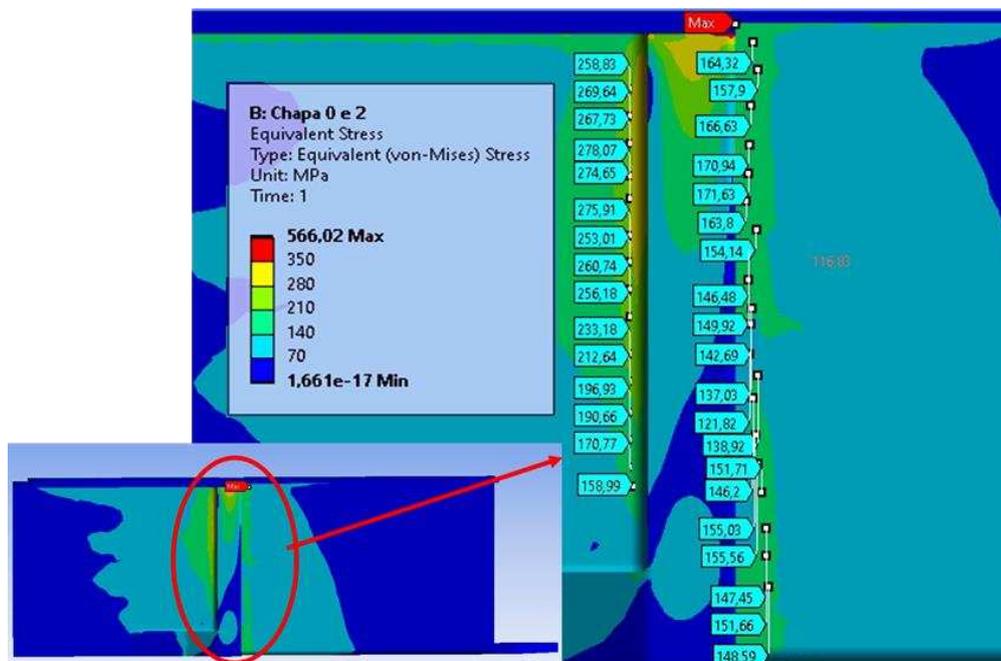


Figura 6.10 – Análise interna da extremidade da viga para o Caso 3 (Autor, 2021).

Na análise interna do componente, nas regiões estudadas, foi possível verificar que o modelo composto por duas chapas de reforço obteve uma melhor performance, mostrando nos resultados a diminuição da tensão de von Mises na zona crítica. Porém, para melhor comparar as hipóteses priorizadas no *brainstorming* prosseguiu-se com a análise dos modelos com nervuras.

6.4 Resultados do Caso 4 – uma nervura

No primeiro modelo com nervura, foi adicionado somente um reforço em cada lateral do componente para verificação da diminuição das tensões locais que provocaria tal modificação na peça. A malha para a análise não sofreu alteração em relação às simulações anteriores, possuindo também refino local nas nervuras adicionadas (Figura 6.11). Sendo assim, foi realizado a simulação computacional para a obtenção da tensão equivalente de von Mises, mostrada na Figura 6.12.

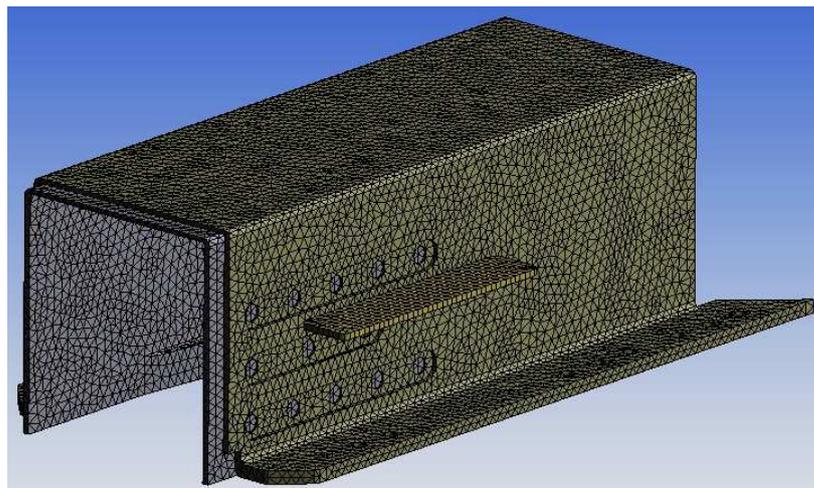


Figura 6.11 – Malha utilizada na análise do Caso 4 (Autor, 2021).

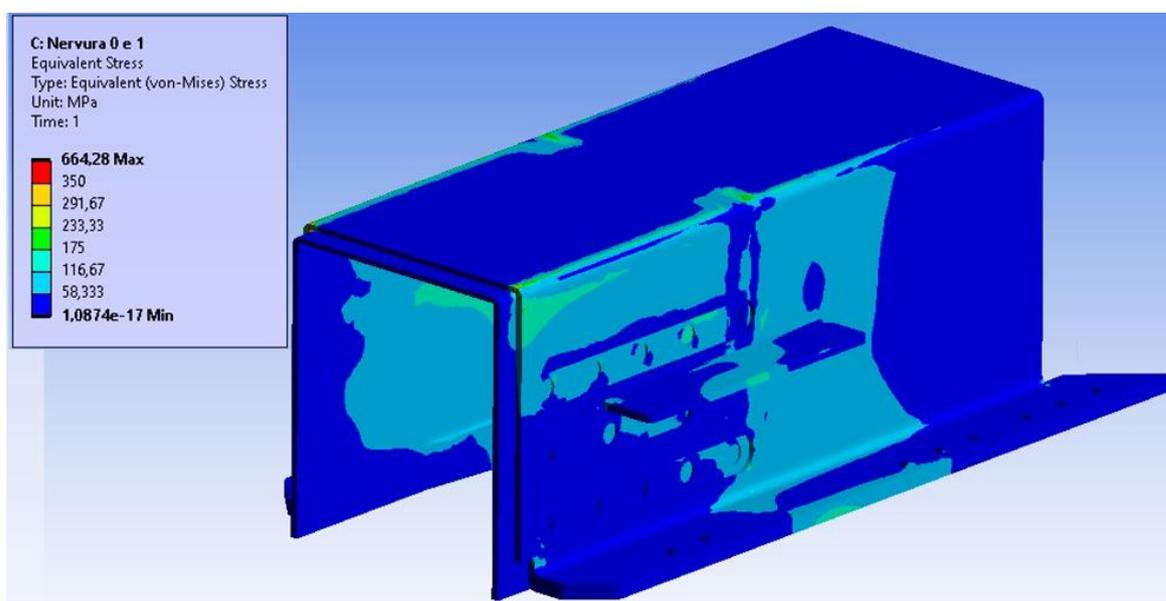


Figura 6.12 – Resultados da análise do Caso 4 (Autor, 2021).

Um plano de corte lateral também foi adicionado no estudo, possibilitado a visualização das tensões pontuais no interior do componente, como mostrada na Figura 6.13 para posterior comparação com os demais modelos ensaiados.

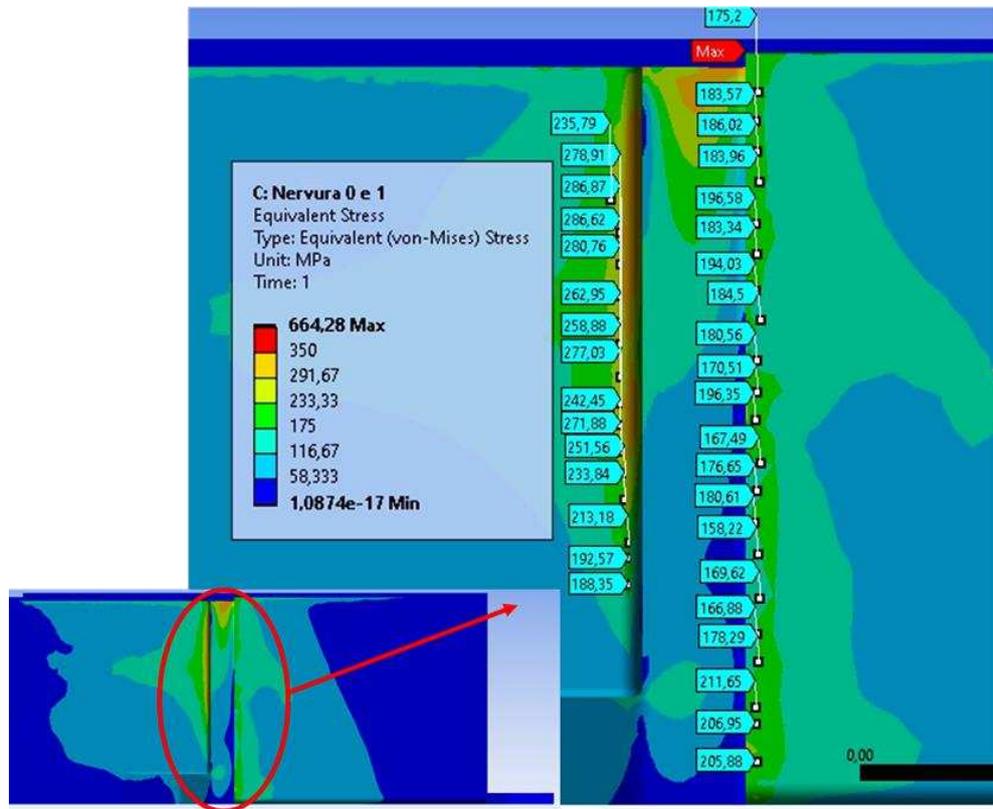


Figura 6.13 – Análise interna da extremidade da viga para o Caso 4 (Autor, 2021).

6.5 Resultados do Caso 5 – duas nervuras

Para finalizar as hipóteses inicialmente definidas, o último ensaio simula duas nervuras adicionadas lateralmente no modelo, com a malha mantendo os parâmetros dos casos anteriores (Figura 6.14). É possível perceber que na análise externa do componente a alteração estrutural não apresentou melhorias significativas em relação ao modelo anterior que contém uma nervura.

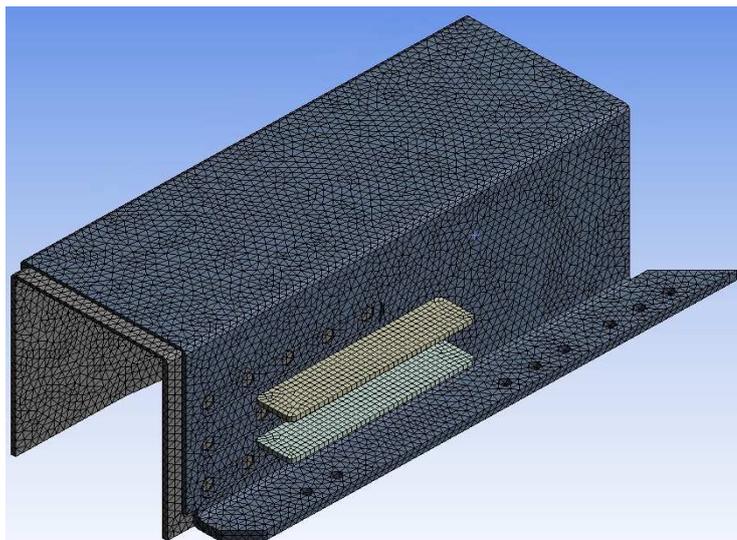


Figura 6.14 – Malha utilizada na análise do Caso 5 (Autor, 2021).

Como nos demais Casos, fez-se a análise dos resultados do Caso 5, como mostra a Figura 6.15.

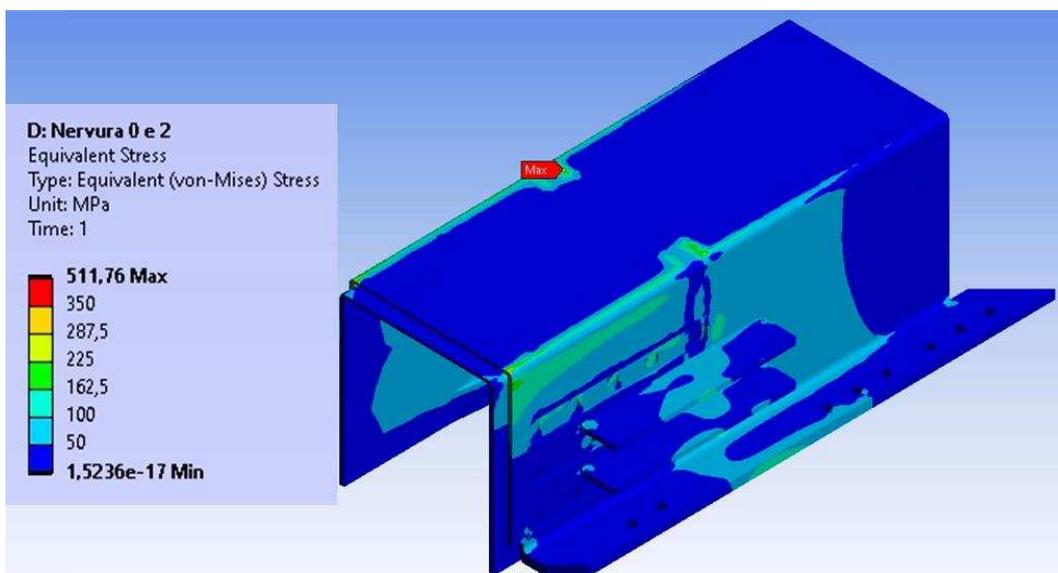


Figura 6.15 – Resultados da análise do Caso 5 (Autor, 2021).

Na análise com o plano de corte lateral adicionado não foi possível observar grande evolução em relação aos modelos simulados até então, com valores de tensão próximos aos

encontrados anteriormente, no entanto, para um melhor entendimento e visualização dos dados obtidos do estudo, será feita uma média dos valores coletados (Figura 6.16).

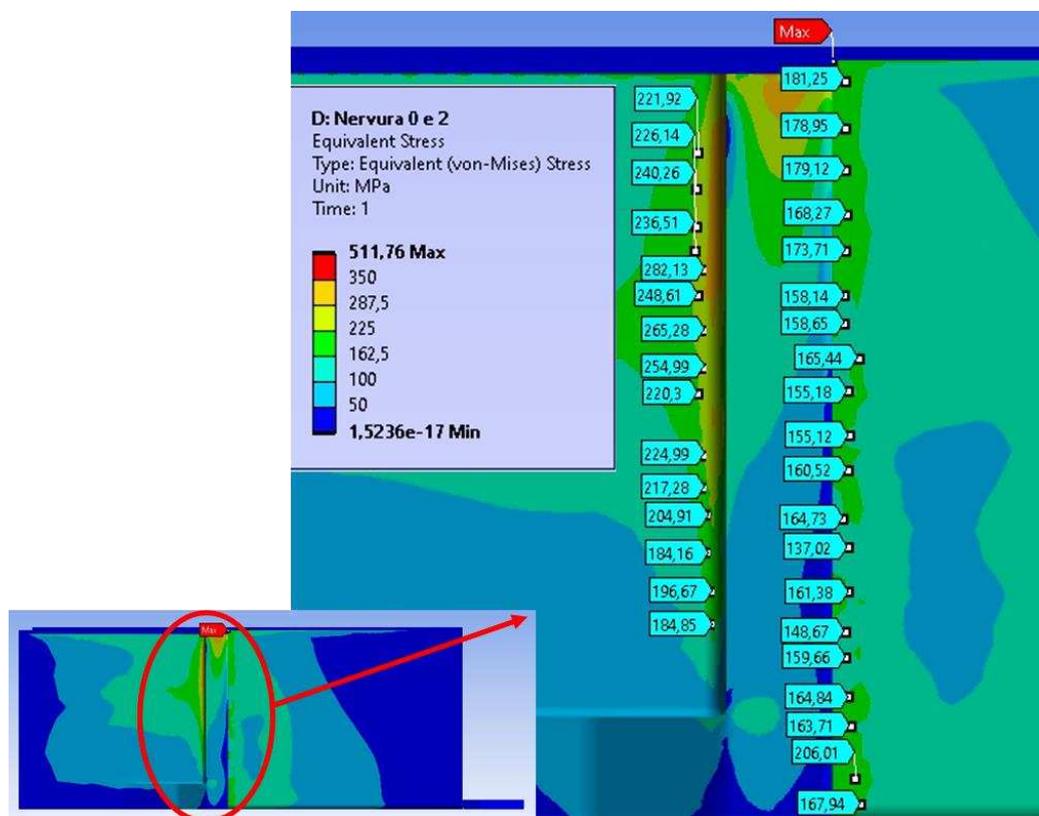


Figura 6.16 – Análise interna da extremidade da viga para o Caso 5 (Autor, 2021).

6.6 Comparação entre os modelos

A fim de garantir uma melhor visualização dos resultados e análise de dados para que a escolha do reforço seja da forma mais correta e coerente possível, foi gerado um quadro comparativo com os dados fornecidos pela ferramenta “Probe” do *software*. Sendo assim, dividiu-se a área de estudo em duas regiões, sendo a Região 1 definida como anterior ao batente e Região 2 definida como a região posterior ao batente (Figura 6.17). Para obter uma maior amostra dos resultados locais foram coletadas 20 tensões na Região 1, e 15 tensões na Região 2 e feito a média entre elas, sendo mostrado na Tabela 6.1 abaixo.



Figura 6.17 – Definição das regiões de estudo (Autor, 2021).

Tabela 6.1 – Tabela comparativa da Região 1 (Autor, 2021).

CASOS ESTUDADOS - REGIÃO 1				
CASO 1 - SEM CHAPA (MPa)	CASO 2 (MPa) - UMA CHAPA	CASO 3 - DUAS CHAPAS (MPa)	CASO 4 - UMA NERVURA (MPa)	CASO 5 - DUAS NERVURAS (MPa)
178,7	188,6	164,3	205,9	167,9
187,9	213,4	157,9	207,0	206,0
181,0	196,4	166,6	178,3	163,7
200,6	166,7	170,9	166,9	164,8
202,2	171,2	171,6	169,6	159,7
189,6	143,0	163,8	158,2	148,7
183,7	167,2	154,1	180,6	161,4
182,0	162,5	146,5	176,7	137,0
188,0	165,8	149,9	167,5	164,7
177,3	146,5	142,7	196,4	160,5
190,3	173,8	137,0	170,5	155,1
177,8	162,2	121,8	180,6	155,2
178,5	161,2	138,9	184,5	165,4
186,6	163,2	146,2	194,0	158,7
182,0	169,7	155,0	183,3	158,1
174,6	173,6	155,6	196,6	173,7
189,9	198,9	151,7	184,0	168,3
186,1	183,7	147,5	186,0	179,1
185,0	193,4	151,7	183,6	179,0
228,3	194,9	148,6	175,2	181,3
MÉDIA DOS VALORES (MPa) - REGIÃO 1				
187,5	174,8	152,1	182,3	165,4

Com a análise da tabela, foi possível perceber que entre a média dos modelos estudados o Caso 3 foi o mais eficiente na redução local da tensão de von Mises, apresentando a menor

tensão dentre os demais. Além disso, foi construído também uma tabela comparativa para a Região 2, que apresentam as tensões atuantes e coletadas da mesma forma como na Região 1 anteriormente analisado, mostradas na Tabela 6.2 a seguir.

Tabela 6.2 – Tabela comparativa da Região 2 (Autor, 2021).

CASOS ESTUDADOS - REGIÃO 2				
CASO 1 - SEM CHAPA (MPa)	CASO 2 - UMA CHAPA (MPa)	CASO 3 - DUAS CHAPAS (MPa)	CASO 4 - UMA NERVURA (MPa)	CASO 5 - DUAS NERVURAS (MPa)
125,8	171,4	159,0	188,4	184,9
161,0	205,6	170,8	192,6	196,7
184,2	221,4	190,7	213,2	184,2
177,2	270,3	196,9	233,8	204,9
189,8	253,8	212,6	251,6	217,3
211,5	264,0	233,2	242,5	225,0
234,8	265,1	256,2	271,9	220,3
242,4	291,3	260,7	277,0	255,0
253,0	292,4	253,0	258,9	265,3
262,0	254,8	275,9	263,0	248,6
284,0	254,6	274,7	280,8	282,1
288,1	256,7	278,1	286,6	236,5
291,1	236,5	267,7	286,9	240,3
266,2	221,2	269,6	278,9	226,1
243,5	243,1	258,8	235,8	221,9
MÉDIA DOS VALORES (MPa)				
227,6	246,8	237,2	250,8	227,3

Na comparação das médias da Região 2 observou-se que apresenta uma redução muito pequena na tensão atuante no Caso 5 em relação ao modelo sem chapas (Caso 1). Portanto, para avaliar a melhor alternativa, verificou-se também o percentual de aumento e/ou redução entre os casos estudados tanto para a Região 1 (Tabela 6.3) como para a Região 2 (Tabela 6.4), tomando sempre como base comparativa o Caso 1, pois ele é o modelo sem reforços.

Tabela 6.3 – Tabela comparativa do percentual na Região 1 (Autor, 2021).

% DE REDUÇÃO/AUMENTO DE TENSÕES - REGIÃO 1				
CASO 1 - SEM CHAPA (%)	CASO 2 - UMA CHAPA (%)	CASO 3 - DUAS CHAPAS (%)	CASO 4 - UMA NERVURA (%)	CASO 5 - DUAS NERVURAS (%)
-	-6,8	-18,9	-2,8	-11,8

Tabela 6.4 – Tabela comparativa do percentual na Região 2 (Autor, 2021).

% DE REDUÇÃO/AUMENTO DE TENSÕES - REGIÃO 2				
CASO 1 - SEM CHAPA (%)	CASO 2 - UMA CHAPA (%)	CASO 3 - DUAS CHAPAS (%)	CASO 4 - UMA NERVURA (%)	CASO 5 - DUAS NERVURAS (%)
-	8,42	4,20	10,17	-0,2

Para análise das tabelas 6.3 e 6.4 é necessário compreender que o sinal negativo apresentado indica que houve uma redução da tensão. Sendo assim, na Região 1 comprova-se que o Caso 3 apresenta um melhor percentual de diminuição na média das tensões, com aproximadamente 19%, possível de analisar no Gráfico 2 também. Já na Região 2 o Caso 5 obteve uma melhora quase nula, com cerca de 0,2%, visto no Gráfico 3, provocando uma discussão sobre qual deve ser o modelo escolhido, levando em consideração os valores obtidos nas duas regiões estudo.

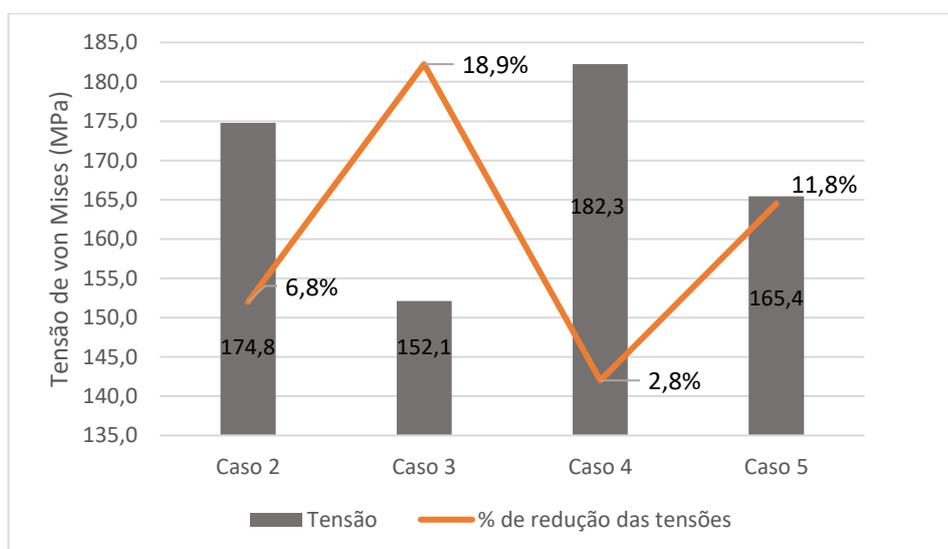


Gráfico 2 – Gráfico de redução das tensões na Região 1 (Autor, 2021).

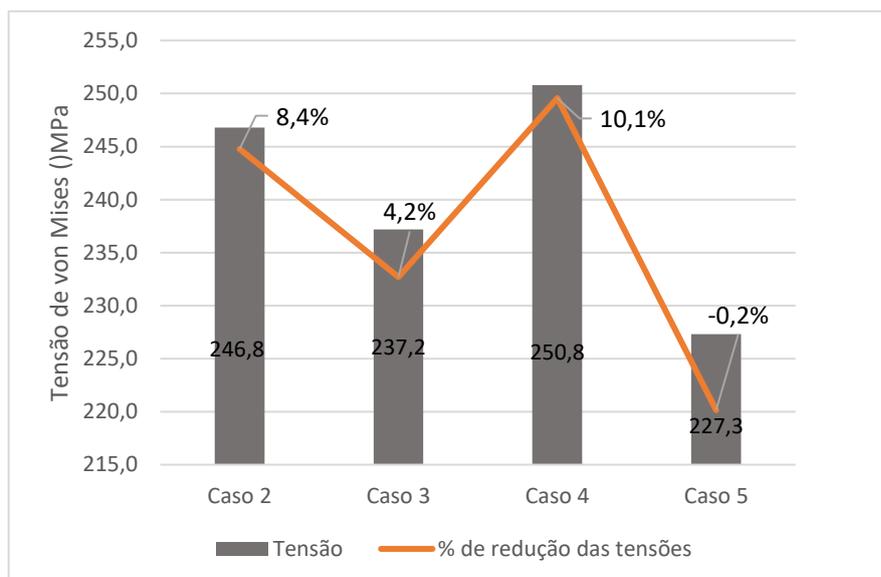


Gráfico 3 – Gráfico de redução das tensões na Região 2 (Autor, 2021).

Em posse das comparações percentuais, fez-se também uma análise em campo com os dados obtidos através dos registros de acontecimentos de falhas e eventos de ruptura da extremidade de viga. Após levantamento das informações com fotografias e Relatórios de Análise de Falhas (RAF), verificou-se que em todos os casos dos dois últimos anos da companhia (2020 e 2021) o rompimento ocorreu na Região 1 da extremidade, não sendo observados desvios críticos na Região 2.

Além disso, na decisão levou-se em consideração também o percentual de redução do Caso 3 na região 1 que foi muito expressivo em relação aos demais. Sendo assim, optou-se pelo modelo que apresenta duas chapas laterais (Caso 3) mesmo que apresente um percentual de aumento mínimo de 4,2% (o menor aumento entre os casos) na tensão média da Região 2.

A partir das melhorias na redução das tensões atuantes apresentadas pelas simulações computacionais, o Caso 3 foi escolhido dentre os demais, possibilitando a realização de três modelos experimentais como o da Figura 6.18 para avaliar em campo a eficiência do reforço adotado, mapeando os vagões em que foram instalados os reforços para verificação posterior quanto à integridade estrutural do componente.



Figura 6.18 – Modelo experimental instalado para testes em campo (Autor, 2021)

7 CONCLUSÃO

A monografia apresentada demonstrou a eficiência no estudo numérico para a proposta de reforço a ser adicionada na extremidade de viga de um vagão tipo gondola utilizando ferramentas de simulação computacional.

Através do *software* CAD foi possível realizar a modelagem do componente estudado e utilizá-la para avaliações computacionais no presente estudo e para análises posteriores.

Utilizando o MEF (Método dos Elementos Finitos) foi possível perceber os diferentes efeitos ocasionados nos modelos utilizados para reforçar a estrutura, sendo o modelo com duas chapas escolhido por reduzir em aproximadamente 19% da tensão média na região de interesse, sendo essa, a área anterior dos batentes dianteiros, considerado no trabalho como Região 1, comprovando-se teoricamente eficiente para as operações.

Contudo, por conta da Região 2 apresentar somente o aumento de 4,2% no Caso 3 escolhido, faz-se necessário o direcionamento para as equipes de manutenção observarem a região apontada quando o vagão passar por inspeções e planos de manutenção, a fim de avaliar a integridade do componente.

Para trabalhos futuros fica a sugestão de acompanhamento da performance em campo dos componentes experimentalmente instalados, para que haja uma comparação com o estudo numérico aqui aplicado. Além disso, a realização de um estudo computacional de fadiga com dados de vagões instrumentados na EFC (Estrada de Ferro Carajás).

REFERÊNCIAS

AAR. Association of American Railroads. 2021. Disponível em: <https://www.aar.org/>. Acesso em: 21 set. 2021.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11691**: vagão ferroviário - classificação, identificação e marcação. Rio de Janeiro, 2015.

OLIVEIRA, L. de. **Método para projeto de vagões ferroviários**. 2019. 160 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Mecânicas) - Programa de Engenharia e Ciências Mecânicas, Universidade Federal de Santa Catarina, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/220050/PPCM0050-D.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 21 set. 2021.

AMANTES DA FERROVIA. **A Baroneza**: O Primeiro Trem do Brasil. Clube Amantes da Ferrovia, 2019. Disponível em: <https://amantesdaferrovia.com.br/blog/a-baroneza-o-primeiro-trem-do-brasil>. Acesso em: 21 set. de 2021.

ABREU, J. F. **Estudo computacional via ANSYS de vigas, arco e anéis com restrições de contato impostas por bases elásticas**. 2016. 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, 2016. Disponível em: https://www.propec.ufop.br/uploads/propec_2016/teses/arquivos/dissertacao-joao-felipe-a-c-de-abreu-rev6.pdf. Acesso em: 21 set. 2021.

AÇOBRIL. **Chapas de Aço Carbono – USI SAC 300/350**. Disponível em: AÇOBRIL: <http://www.acobril.com.br/wp-content/uploads/2018/07/USI-SAC-350.pdf>. Acesso em: 20 novembro de 2021.

ALVES FILHO, A. **Elementos Finitos A Base da Tecnologia CAE**. São Paulo: ed Érica Ltda, 2012.

BARROS, A. L. **Distribuição horária de lotes de vagões GDE para carregamento de minério na EFVM**. 2008. 52 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Transportes Ferroviário de Carga) - Instituto Militar de Engenharia, 2008. Disponível em: <http://transportes.ime.eb.br/etfc/monografias/MON041.pdf>. Acesso em: 23 set. 2021.

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R. **Resistência dos materiais**. São Paulo: McGraw-Hill, 1989.

BELCHIOR, C. M. **Desenvolvimento de aço baixa liga para componentes do sistema de choque e tração em vagões ferroviários**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade de São Paulo, 2016. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/97/97134/tde-20112017-132253/pt-br.php>. Acesso em: 26 nov. 2021.

BICCA, R. R.; CEZAR, L. L. **A VFRGS e suas ferrovias padronizadas dos anos 30 e 40. 5a Semana Integrada UFPEL**, 2019. Disponível em: <http://repositorio.ufpel.edu.br:8080/handle/prefix/6118>. Acesso em: 26 nov. 2021.

BORGES, B. G. Ferrovia e modernidade. **Revista UFG**, v. 13, n. 11, 2011.

BUDYNAS, R. G.; NISBETH, J. K. **Elementos de Máquinas de Shigley**. Porto Alegre: McGraw Hill Brasil, 10ª Edição. 2016.

CAVALCANTI, A. L. **A importância do transporte ferroviário para abertura de novos horizontes**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Administração) - Faculdade de Administração da Faceli, 2016. Disponível em: https://www.academia.edu/38960430/A_IMPORT%C3%82NCIA_DO_TRANSPORTE_FERROVI%C3%81RIO_PARA_ABERTURA_DE_NOVOS_HORIZONTES. Acesso em: 25 out. 2021.

COSTA, C. T. **Análise comparativa entre parâmetros de fabricação de mandíbulas por meio da redução de sucateamento**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual do Maranhão, 2019.

COSTA, Paulo Sergio; DIAS, Giovanni Augusto Ferreira. **Aplicação do método dos elementos finitos para análise estruturais da extremidade da viga de vagões tipo gôndola aplicados na estrada de ferro carajás**. 2016.

DIAS, G. A. **Avaliação de desempenho em vagões ferroviários baseado nos parâmetros do sistema de preditivo wayside: um estudo de caso**, 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual do Maranhão, 2011.

DIÓGENES, G. S. **Uma contribuição ao estudo dos indicadores de desempenho operacional de ferrovias de carga: o caso da companhia ferroviária do Nordeste-CFN**. Rio de Janeiro, RJ, COPPE/UFRJ, M. Sc., Engenharia de Transportes, 2002.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Ferrovias pelo Mundo**. 2019. Disponível em: www.dnit.gov.br. Acesso em: 21 set. 2021.

FERREIRA, M. R. **Análise não Linear por Elementos Finitos de Vigas de Betão Armado à Torção**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade da Beira Interior, 2016.

FERREOCLUBE. **EFC - Estrada de Ferro Carajás**. 20 abr. 2016. Disponível em: <http://www.ferreooclube.com.br/2016/04/20/efc-estrada-de-ferro-carajas/>. Acesso em: 21 set. 2021.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. São Paulo, Pearson, 2010, 637p.

HUTTON, D. V. **Fundamentals of finite element analysis**. McGraw-hill, 2004.

KAKO, I. S. **O papel dos trilhos na estruturação territorial da cidade de São Paulo de 1867 a 1930**. 2013. Tese (Doutorado em Geografia) - Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, 2013.

LANG, A. E. **As ferrovias no brasil e avaliação econômica de projetos: uma aplicação em projetos ferroviários**. 2007. Dissertação (Mestrado em Transportes) - Universidade de Brasília, 2007.

MASSA PESAGEM E AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL. **Tipos de vagões de trem: quais são os principais**. 2 jun. 2020. Disponível em: <https://massa.ind.br/tipos-de-vagoes-de-trem/>. Acesso em: 28 set. 2021.

MAXION, Greenbrier. **Manual de Operação e Manutenção Choque e Tração GDU: Jardim São Camilo - Hortolândia – SP**, 2018

MUSEUS FERROVIÁRIOS. **Antigas Companhias: São Paulo: Railway**. Disponível em: <http://museusferroviarios.net.br/antigas-companhias/sao-paulo-railway/>. Acesso em: 29 set. 2021.

NETO, A. A. S. **Projeto e Análise Estrutural de uma Barra de Carga para uma Oficina Mecânica**. UFC. Fortaleza, 2018.

NOGUEIRA, P. **O caminho de ferro**. 2016. Disponível em: <https://historiaschistoria.blogspot.com/2016/10/o-caminho-de-ferro.html>. Acesso em: 29 set. 2021.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas: uma abordagem integrada**. 4^a ed. Ed. Bookman. 2013.

OLIVEIRA, L. de. **Método para projeto de vagões ferroviários**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Mecânicas) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.

PIANESSO, L. H. **Influência do tipo de válvula de controle no tempo de frenagem de vagões**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Ferroviária e Metroviária) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.

PIAZZE, M. A. **Análise e verificação do projeto de uma barra de carga após falha utilizando método por elementos finitos**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Juiz de Fora, 2014.

RODRIGUES, E. G.; PINHEIRO, M. H. **Estudo de Caso de Quebra de Trens de Transporte de Minério de Ferro da Ferrovia Estrada de Ferro Carajás (EFC)**. Revista Acta Brazilian Science. São Luís, Ma, Brazil, 2014.

ROSA, E. da. **Análise de resistência mecânica**. Santa Catarina, 2002.

ROSA, P.M. **Sistemas de Choque e Tração**. Hortolândia, 2012. Disciplina ministrada na Pós-Graduação em Engenharia Ferroviária na AmstedMaxion. 2012.

SAES, A. M.; HESPANHOL, G. C. Ferrovias, capitalismo e história econômica. **O Lince, tem o que ler**, São Paulo, n. 47, out. 2012. Disponível em: <http://www.jornalolince.com.br/2012/out/focus/4722-ferrovias-capitalismo-e-historia-economica>. Acesso em: 21 set. 2021.

SILVA, R. E. **Projeto de galpão em estrutura metálica: consumo de aço em soluções com perfis laminados e conformados a frio**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, 2017.

SOUZA, A. F. de. **Análise da influência das folgas dos CCTs nos choques de composições ferroviárias**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ferroviária e Metroviária) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.

SOUZA, Remo Magalhães de. **O método dos elementos finitos aplicado ao problema de condução de calor**. 2003. Disponível em: <http://www.inf.ufes.br/~luciac/fem/livros-fem/ApostilaElementosFinitosNiCAE.pdf>. Acesso em: 29 set. 2021.

TRENTIN, F. **Verificação estrutural utilizando o MEF em perfis na construção de vigas centrais em vagões ferroviários do tipo gôndola**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia) - Universidade de Caxias do Sul, 2015.

VALE. **Conheça a história da balzaquiana Estrada de Ferro Carajás**. 4 mar. 2016. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/conheca-historia-balzaquiana-estrada-de-ferro-carajas.aspx>. Acesso em: 21 set. 2021.

VALE. **Estrada de Ferro Carajás: o caminho onde passa a nossa riqueza**. 2016. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/pt/initiatives/innovation/carajas-railway/paginas/default.aspx>. Acesso em: 21 set. 2021.

VALER. **Sistema de Vagões**. Belo Horizonte: Id Projetos Educacionais, 2008.

VALVERDE, V. G. **Projeto do sistema de direção para um veículo baja SAE**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual do Maranhão, 2021.

VERDE, D. F. **Projeto e análise de um dispositivo para içamento de cavaletes utilizando o método de elementos finitos**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual do Maranhão, 2020.