

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

VITOR PENA DE ALMEIDA

DESENVOLVIMENTO DE UM METODOLOGIA PARA ANÁLISE ESTRUTURAL
LINEAR DO CONJUNTO DE CHOQUE E TRAÇÃO DE VAGÕES FERROVIÁRIOS

Joinville

2025

VITOR PENA DE ALMEIDA

DESENVOLVIMENTO DE UM METODOLOGIA PARA ANÁLISE ESTRUTURAL
LINEAR DO CONJUNTO DE CHOQUE E TRAÇÃO DE VAGÕES FERROVIÁRIOS

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

Orientador: Dr. Thiago Pontin Tancredi

Joinville

2025

VITOR PENA DE ALMEIDA

DESENVOLVIMENTO DE UM METODOLOGIA PARA ANÁLISE ESTRUTURAL
LINEAR DO CONJUNTO DE CHOQUE E TRAÇÃO DE VAGÕES FERROVIÁRIOS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval no Curso Naval, do Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville (SC), 01 de Julho de 2025.

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente

Thiago Pontin Tancredi

Data: 13/08/2025 21:14:32-0300

CPF: ***.799.268-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Dr. Thiago Pontin Tancredi
Orientador/Presidente
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Vitor Takashi Endo
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Yesid Ernesto Asaff Mendoza
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho à minha família e amigos.

RESUMO

As estruturas são sistemas projetados para suportar e transmitir os efeitos de carregamentos externos. A falha desses sistemas pode representar riscos à vida humana, gerar perdas econômicas significativas e comprometer a disponibilidade de produtos e serviços. Considerando-se as falhas recorrentes observadas nos componentes do Conjunto de Choque e Tração de vagões ferroviários, intensificadas pelo aumento do comprimento e do peso dos trens, propõe-se o desenvolvimento de uma metodologia capaz de analisar, com elevada precisão, o comportamento mecânico de tal equipamento por meio de uma análise estrutural linear estática. Embora tal sistema apresente um comportamento altamente não linear, essa abordagem busca reduzir significativamente o custo computacional das análises e viabilizar investigações futuras mais avançadas sobre a integridade estrutural do equipamento. Os modelos digitais utilizados neste estudo, foram desenvolvidos por meio do escaneamento 3D de peças reais retiradas diretamente da linha de produção, a fim de capturar com precisão eventuais detalhes geométricos que poderiam comprometer a integridade estrutural

Palavras-chave: Integridade estrutural; elementos finitos; escaneamento 3D.

ABSTRACT

Structures are systems designed to withstand and transmit the effects of external loads. Failure of these systems can pose risks to human life, result in significant economic losses, and compromise the availability of products and services. Considering the recurring failures observed in the components of the Coupling and Draft Gear Assembly of freight railcars, aggravated by the increased length and weight of trains, this study proposes the development of a methodology capable of accurately analyzing the mechanical behavior of such equipment through a linear static structural analysis. Although this system exhibits highly nonlinear behavior, this approach aims to significantly reduce the computational cost of the analyses and enable more advanced future investigations into the structural integrity of the equipment. The digital models used in this study were developed through 3D scanning of actual components taken directly from the production line, in order to accurately capture any geometric details that could compromise structural integrity.

Keywords: Structural integrity; finite elements; 3D scanning

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo de elementos finitos simplificado.....	18
Figura 2 – Trem de Carga Geral.....	19
Figura 3 – Trem unitário.....	20
Figura 4 – Componentes do CCT.....	21
Figura 5 – Sistema de travamento lateral do Engate tipo F.....	22
Figura 6 – Região de contato entre o Engate e a Mandíbula.....	23
Figura 7 – Movimento vertical da Castanha.....	24
Figura 8 – Acoplamento realizado com dois engates tipo E.....	25
Figura 9 – Abertura e fechamento das folgas entre as cabeças dos engates.....	25
Figura 10 – ACT Mark-5.....	26
Figura 11 – Estrutura interna do ponteira.....	26
Figura 12 – Funcionamento do CCT sobre esforço de compressão.....	27
Figura 13 – Representação esquemática do funcionamento do ATC.....	27
Figura 14 – Funcionamento do CCT sobre esforço de tração.....	28
Figura 18 – Funcionamento do CCT rotativo.....	31
Figura 19 – Montagem da braçadeira rotativa.....	31
Figura 20 – Propriedades mecânicas do componente fundido.....	32
Figura 21 – Propriedades mínima do (a) pino de conexão e (b) do pino da mandíbula.....	32
Figura 23 – Etapas do processo de engenharia reversa.....	39
Figura 24 – Scanner portátil HandySCAN 307.....	40
Figura 26 – Laser do HandySCAN 307.....	41
Figura 27 – Fluxograma de conversão dos dados do escaneamento em malha poligonal....	42
Figura 28 – Fluxograma geral de uma análise MEF.....	44
Figura 29 – Equilíbrio entre a densidade de malha e a precisão dos resultados.....	45
Figura 30 – Tipos de elementos finitos mais comuns disponíveis em softwares CAE.....	46
Figura 31 – Síntese das métricas de qualidade de malha fornecidas pelo ANSYS.....	48
Figura 32 – Fluxograma para definição das condições de contorno.....	50
Figura 33 – Detecção de contato por meio dos pontos de Gauss.....	52
Figura 34 – Esquema de formulação.....	52
Figura 35 – Representação esquemática dos elementos de contato.....	53
Figura 37 – Modelo Físico dos componentes estudados.....	56
Figura 38 – Modelo Físico dos componentes estudados.....	57
Figura 39 – Digitalização da mandíbula.....	58
Figura 40 – Geração da malha poligonal no VXscan.....	58
Figura 41 – Estrutura da malha poligonal e da nuvem de pontos.....	59
Figura 42 – Comparação entre diferentes parâmetros de resolução da digitalização.....	59
Figura 43 – Malha poligonal contida em caixa para medições.....	61
Figura 44 – Engate Rotativa submetido ao processo de corte.....	61
Figura 45 – Digitalização de uma das partes do Engate rotativo.....	62
Figura 46 – Escaneamento de partes da haste rotativa do engate.....	62

Figura 47 – Remoção de dados indesejados do escaneamento.....	63
Figura 48 – Identificação dos pontos de correspondência entre as malhas.....	64
Figura 49 – Procedimento de alinhamento e fusão de malhas.....	64
Figura 50 – Estrias resultantes do atrito com a lateral da lâmina.....	65
Figura 51 – Resultado da fusão das malhas do engate rotativo.....	65
Figura 52 – (1) Espaço vazio, (2) Segmento de malha fundido e (3) Resultado.....	66
Figura 53 – Malha resultante que representa a estrutura da mandíbula.....	66
Figura 54 – Exemplo de uma falha do tipo pequeno espaço vazio.....	67
Figura 55 – Exemplos de grandes espaços vazios.....	68
Figura 56 – Processo de correção manual da malha do ponteira.....	68
Figura 57 – Exemplo de triângulos anômalos em uma malha poligonal.....	69
Figura 58 – Exemplo de aplicação da ferramenta Desfigurar.....	70
Figura 59 – Malha resultante após o processo de limpeza.....	70
Figura 60 – Sistema multicorpos resultante.....	71
Figura 61 – Contato entre a mandíbula e a castanha.....	71
Figura 62 – Sistema multicorpos no Static Structural do ANSYS.....	72
Figura 63 – Visualização dos componentes internos após importação.....	72
Figura 64 – Propriedades mecânicas do ferro fundido cinzento.....	73
Figura 65 – Malha resultado do processo de discretização.....	74
Figura 66 – Malha resultado do processo de discretização.....	75
Figura 67 – Vista interna dos elementos internos da malha resultante.....	75
Figura 68 – Métricas de qualidade.....	76
Figura 69 – Avaliação da qualidade da malha com base no Skewness.....	77
Figura 70 – Diagrama de corpo livre referente ao cenário 1.....	78
Figura 71 – Diagrama de corpo livre referente ao cenário 2.....	79
Figura 72 – Aplicação das CC referentes ao cenário 1 no Ansys.....	79
Figura 73 – Dados técnicos do vagão gôndola GDU.....	79
Figura 74 – Campo de tensões obtido na análise referente ao primeiro cenário.....	82
Figura 75 – Campo de tensões obtido na análise referente ao segundo cenário.....	83
Figura 76 – Regiões com concentração de tensões nas mandíbulas.....	85
Figura 77 – Regiões com concentração de tensões na braçadeira fixa.....	86
Figura 78 – Regiões com concentração de tensões na braçadeira rotativa.....	87
Figura 79 – Regiões com concentração de tensões no engate rotativo.....	88
Figura 80 – Regiões com concentração de tensões no engate fixo.....	89
Figura 81 – Concentração de tensões por defeito de fundição na mandíbula.....	90
Figura 83 – Áreas críticas da mandíbula não previstas na norma ABNT NBR 16087.....	90
Figura 84 – Elemento infinitesimal de material submetido a um estado geral de tensões.....	97
Figura 85 – Variação das tensões em função do ângulo da seção inclinada.....	98
Figura 86 – Transformação do estado geral de tensão.....	98
Figura 87 – Círculo de Mohr.....	99
Figura 88 – Tensor de tensão (a) principal, (b) esférico e (c) principal média.....	101
Figura 89 – Mapa de cores obtido através da análise da não uniformidade da superfície...107	107
Figura 90 – Distribuição de erro entre o plano gerado e a superfície de corte.....	107
Figura 91 – Medição das folgas de uma das seções do engate rotativo.....	108

Figura 92 – Identificação dos corte efetuados nas peças ocas avaliadas.....	108
Figura 93 – Mapa de cores e histograma resultantes da análise de confiabilidade.....	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados da malha digitalizada e resolução da digitalização	60
Tabela 2 – Número de elementos e nós dos componentes do CCT fixo	77
Tabela 3 – Número de elementos e nós dos componentes do CCT rotativo	78
Tabela 4 – Percentual de nós cuja tensão excede os limites estabelecido	81
Tabela 5 – Espessura dos cortes corte efetuados na mandíbula	109
Tabela 6 – Espessura dos cortes corte efetuados no engate Fixo	110
Tabela 7 – Espessura dos cortes corte efetuados no engate rotativo	111
Tabela 8 – Avaliação do processo de suavização das malhas	113

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAR – Association of American Railroads
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ATC – Aparelho de Choque e Tração
CAD – Computer Aided Design
CAE – Computer Aided Engineering
CC – Condição de Contorno
CCT – Conjunto de Choque e Tração
CTJ – Centro Tecnológico de Joinville
ER – Engenharia Reversa
LabSIN – Laboratório de Simulação Naval
MEF – Método dos Elementos Finitos
NBR – Norma Brasileira
STL – Stereolithography
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
VV – Virador de Vagões

LISTA DE SÍMBOLOS

x, y, z – Coordenadas cartesianas

dx – Comprimento do elemento infinitesimal

dy – Largura do elemento infinitesimal

dz – Altura do elemento infinitesimal

σ_1 – Tensão principal

σ_2 – Tensão principal

σ_3 – Tensão principal

dU_t – Energia total de deformação elástica armazenada em elemento infinitesimal

ϵ_1 – Deformação específica normal

ϵ_2 – Deformação específica principal

ϵ_3 – Deformação específica normal

U_t – Energia total de deformação elástica armazenada em um corpo sólido

σ – Tensão normal

τ – Tensão de cisalhamento

ϵ – Deformação específica normal ou deformação

γ – Deformação por cisalhamento

E – Módulo de elasticidade

ν – Coeficiente de Poisson

$\epsilon_{Lateral}$ – Deformação lateral

ϵ_{axial} – Deformação axial

V – Volume

U_v – Energia de dilatação armazenada em um corpo sólido

U_d – Energia de distorção armazenada em um corpo sólido

U_t/V – Densidade de energia total de deformação elástica do material

U_v/V – Densidade de energia de dilatação

U_d/V – Densidade de energia de distorção

σ_m – Tensão principal média

e – Dilação

dV – Volume do elemento infinitesimal

ΔV – Variação de volume

G – Módulo de elasticidade por cisalhamento

σ_{eq} – Tensão equivalente de von mises

u – Deslocamento na direção x

v – Deslocamento na direção y

w – Deslocamento na direção z

$[D]$ – Matriz Constitutiva do material

$[L]$ – Operador diferencial matricial

$\{\sigma\}^{(e)}$ – Estado de tensão do elemento finito

$\{u\}^{(e)}$ – Campo de deslocamento do elemento finito

$\{N\}^{(e)}$ – Matriz de funções de forma do elemento finito

$\{u_i\}^{(e)}$ – Vetor de deslocamentos nodais do elemento finito

$\{F\}^{(e)}$ – Vetor de força nodais do elemento finito

$\{k\}^{(e)}$ – Matriz de rigidez do elemento finito

$\{b\}^{(e)}$ – Vetor de força de campo do elemento finito

$\{\bar{t}\}^{(e)}$ – Vetor de força de superfície do elemento finito

$\{f\}^{(e)}$ – Vetor de força concentrado nos nós do elemento finitos

$\{\delta u\}^{(e)}$ – Campo de deslocamento do elemento associado ao deslocamento virtual

$\{\delta \sigma\}^{(e)}$ – Estado de tensão associado ao deslocamento virtual

$\{\delta \epsilon\}^{(e)}$ – Campo de deformações associado ao deslocamento virtual

$\{\delta u_i\}^{(e)}$ – Vetor de deslocamento nodais virtual

$[B]^{(e)}$ – Matriz de deformação-deslocamento

$\{F\}$ – Vetor de carregamento externo no sistema global

$\{K\}$ – Matriz de rigidez global

F_{normal} – Força normal

K_{normal} – Rigidez de contato normal

X_P – Deslocamento relativo entre as superfícies

λ – Multiplicador de Lagrange

ξ, η, ζ – Coordenadas naturais

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1. OBJETIVOS.....	17
1.1.1. Objetivo Geral.....	17
1.1.2. Objetivo Específico.....	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1. COMPOSIÇÃO FERROVIÁRIA.....	19
2.2. CONJUNTO DE CHOQUE E TRAÇÃO.....	20
2.2.1. CONJUNTO DE CHOQUE E TRAÇÃO.....	21
2.2.1.1. Funcionamento do Conjunto de Choque e Tração.....	27
2.2.2. CCT DO VAGÃO GDT, GDU E GDE.....	29
2.2.3. REQUISITOS PARA FABRICAÇÃO DOS COMPONENTES DO CCT.....	31
2.3. TEORIA DE FALHA.....	33
2.4. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	33
3. METODOLOGIA.....	39
3.1. PROCESSO DE ENGENHARIA REVERSA.....	39
3.1.1. Fase 1 do processo de engenharia reversa.....	40
3.1.2. Fase 2 do processo de engenharia reversa.....	43
3.2. ANÁLISE ESTRUTURAL.....	43
3.2.1. Fase de pré processamento.....	44
<u>3.2.1.1. Estudo de convergência da malha.....</u>	<u>46</u>
<u>3.2.1.2. Análise de qualidade da malha.....</u>	<u>47</u>
3.2.1.2.1. Métrica Element Quality.....	48
3.2.1.2.2. Métrica Jacobian Ratio.....	48
3.2.1.2.3. Métrica Aspect Ratio.....	49
3.2.1.2.4. Métrica Skewness.....	49
3.2.1.2.5. Métrica Maximum Corner Angle.....	49
<u>3.2.1.2. Condições de contorno.....</u>	<u>49</u>
3.2.1.2.1. Modo de detecção de contato.....	51
3.2.1.2.2. Algoritmo de detecção de contato.....	53
4. DESENVOLVIMENTO.....	56
4.1. DESENVOLVIMENTO DO MODELO DIGITAL.....	56
4.1.1. Processo de escaneamento das peças.....	57
4.1.2. Processo de reconstrução das malhas.....	63
<u>4.1.2.1. Processo de aprimoramento das malhas.....</u>	<u>67</u>
<u>4.1.2.2. Aplicação da função Limpar Malha.....</u>	<u>69</u>
<u>4.1.2.3. Aplicação da ferramenta Limpar Malha.....</u>	<u>71</u>
4.2.1. Definição dos materiais.....	73
4.2.2. Discretização do modelo multicorpos.....	73
4.2.3. Definição das condições de contorno.....	78

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	81
6. CONCLUSÃO.....	91
REFERÊNCIAS.....	92
ANEXO A – TEORIA DA ENERGIA DE DISTORÇÃO.....	97
ANEXO B – FORMULAÇÃO DO MEF NA FORMA GENERALIZADA.....	104
ANEXO C – ANÁLISE DOS DOS CORTES REALIZADOS COM SERRA-FITA... 	107
ANEXO D – ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DAS MALHAS POLIGONAIS.....	112

1. INTRODUÇÃO

Nas diversas áreas da engenharia, as estruturas são definidas como sistemas projetados para suportar e transmitir os esforços externos que nela atuam (Meriam; Kraige, 2011). Para que uma estrutura apresente uma alta integridade, segurança e confiabilidade, é fundamental que a geometria e os materiais de seus componentes sejam definidos com base nos resultados de uma análise estrutural (Hibbeler, 2013; Leet *et al.*, 2009).

Atualmente, devido à maior disponibilidade de *hardware* e *software* com elevado poder de processamento, as análises estruturais são normalmente realizadas por meio de métodos numéricos (Alves Filho *et al.*, 2022). Dentre eles, destaca-se o Método de Elementos Finitos (MEF), o qual normalmente é empregado por intermédio de simulações computacionais, conduzidas em *softwares* CAE (*Computer Aided Engineering*) (Alves Filho, 2013).

Diante da discussão apresentada, este trabalho propõe uma metodologia que permite mapear, por meio de uma análise estrutural linear realizada usando o MEF, a distribuição de tensões em componentes estruturais do Conjunto de Choque e Tração (CCT) de vagões ferroviários. Tais componentes são responsáveis pelo acoplamento seguro entre os veículos ferroviários adjacentes (Maxion, 2019). Ressalta-se que, devido à complexidade inerente desses sistemas e de seu comportamento altamente não linear, as análises MEF demandam elevado custo computacional.

A motivação deste estudo decorre do aumento na capacidade de carga dos vagões e no comprimento dos trens, estratégias adotadas para maximizar a eficiência energética e atender ao crescimento do transporte ferroviário (MRS, 2024; Rumo, 2023, 2024). No entanto, essas mudanças resultaram em condições de carregamento mais severas, provocando falhas recorrentes nos componentes do CCT, inclusive em regiões não identificadas em análises estruturais anteriores (Endo *et al.*, 2024; Ren *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2024).

Para garantir a qualidade e a confiabilidade das simulações numéricas, os modelos digitais foram obtidos por meio do processo de engenharia reversa, através do escaneamento tridimensional de peças reais retiradas diretamente da linha de produção. Este procedimento foi essencial não apenas para reproduzir fielmente a

geometria dos componentes, mas também para capturar detalhes que pudessem influenciar em sua integridade estrutural.

1.1. OBJETIVOS

Os objetivos do presente trabalho serão apresentados a seguir.

1.1.1. Objetivo Geral

Desenvolver e validar uma metodologia baseada no Método dos Elementos Finitos capaz de realizar uma análise linear do comportamento local e global do de um Conjunto de Choque e Tração sujeito a ação de uma carga estática de tração.

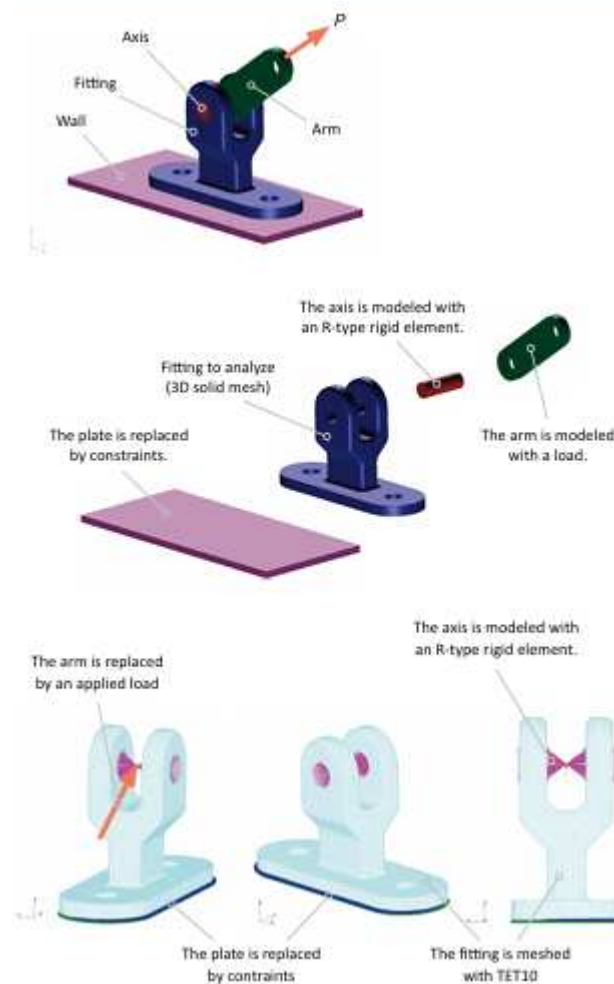
1.1.2. Objetivo Específico

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre os principais componentes do CCT, visando compreender suas funcionalidades e fornecer subsídios técnicos para a construção do modelo de elementos finitos;
- Desenvolver um modelo digital de cada componente analisados, assegurando-se um elevado grau de fidelidade geométrica em relação às suas respectivas estruturas físicas;
- Desenvolver um modelo de elementos finitos que representa de forma eficaz o comportamento dos componentes analisados;
- Identificar nos modelos numéricos as regiões sujeitas a concentrações de tensões;
- Validar os resultados obtidos por meio da comparação das regiões críticas identificadas, utilizando-se informações técnicas disponíveis na literatura sobre os componentes do CCT.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O modelo de elementos finitos é uma representação matemática idealizada de um sistema físico. No contexto de um problema estrutural, seu objetivo é analisar o comportamento da estrutura sob uma determinada excitação. Para viabilizar a solução de problemas complexos, esse modelo pode diferenciar do sistema físico em estudo, como ilustrado na Figura 1 (Kim; Sankar, 2009).

Figura 1 – Modelo de elementos finitos simplificado



Fonte: Madier (2020, p. 228).

Nesse contexto, a formulação conceitual do problema é fundamental para a construção do modelo de elementos finitos (Alves Filho *et al.*, 2022). Portanto, o presente capítulo inicia-se com a caracterização de uma composição ferroviária,

seguida pelo detalhamento dos componentes do CCT. Por fim, abordam-se os princípios da teoria de falhas adotada neste estudo e a fundamentação do MEF.

2.1. COMPOSIÇÃO FERROVIÁRIA

As composições ferroviárias, comumente denominadas como trens, são definidas como um conjunto de veículos acoplados entre si, que se deslocam sobre os trilhos da via permanente de uma ferrovia (Martins, 2020; Ribeiro; Rosa, 2016). Em geral, tais composições são formadas por uma ou mais locomotivas e por uma série de vagões de carga e/ou carros de passageiros (Nabais, 2004; Santos, 2019).

As Locomotivas são classificadas como veículos ferroviários dotados de motores, cuja função é gerar a força necessária para movimentar o trem (Santo, 2019). Por sua vez, os vagões e carros, destinam-se exclusivamente ao transporte de cargas e passageiros, e são rebocados pela locomotiva durante o deslocamento da composição (Nabais, 2004).

Os trens classificam-se em três categorias: *cargueiros*, compostos somente por vagões; *passageiros*, formados apenas por carros; e *mistos*, constituídos tanto por vagões quanto por carros (Nabais, 2004). Os trens cargueiros subdividem-se em *de carga geral* (Figura 2), utilizados para o transporte simultâneo de diferentes tipos de produtos para vários clientes; e *unitários* (Figura 3), destinados ao transporte de um único tipo de mercadoria para um único cliente (Duarte, 2021).

Figura 2 – Trem de Carga Geral¹



Fonte: Sheehan (2021).

¹SHEEHAN, M. **Locomotive awareness and response**. Aurora: BNSF Railway, 2021. Disponível em: <https://www.bnsfhazmat.com/wp-content/uploads/2021/02/Locomotive-Awareness-and-Response-online.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2025.

Figura 3 – Trem unitário²

Fonte: Mendes (2022).

Os trens unitários são caracterizados como *heavy haul*, pois são formados por mais de 100 vagões e transportam mais de 5 mil toneladas de carga (Santos, 2021). Essas operações são voltadas à exportação e a comercialização de *commodities* em mercados competitivos, pois viabilizam o transporte de grandes lotes de mercadoria homogêneas por longas distâncias (Alvarenga; Novaes, 2000; Santos, 2021).

2.2. CONJUNTO DE CHOQUE E TRAÇÃO

Nesta seção, será detalhado o modelo de CCT aplicado aos trens unitários do tipo *heavy haul*. Essa abordagem justifica-se pelas características dessas composições, uma vez que a magnitude dos esforços longitudinais transmitidos ao longo do trem está diretamente relacionada ao número de vagões e ao peso da carga transportada (Barbosa, 1993).

Ademais, nesta seção também serão fundamentados os modelos de CCT empregados nos vagões gôndola dos tipos GDT, GDU e GDE, utilizados em

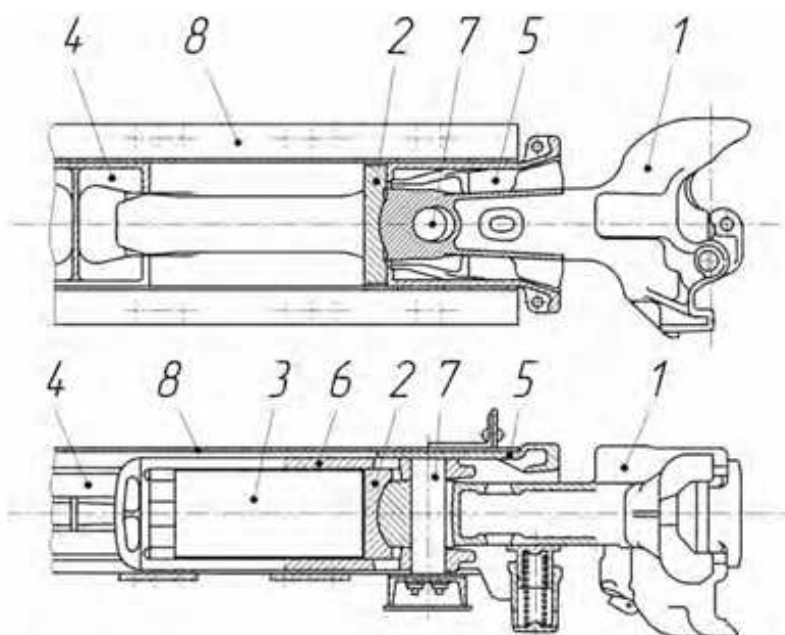
² Mendes, V. Rumo começa obra ferroviária de mais de 700 km no Mato Grosso. **CNN Brasil**. São Paulo, 9 nov. 2022. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/economia/investimentos/rumo-comeca-obra-ferroviaria-de-mais-de-700-km-no-mato-grosso/> Acesso em: 21 jun. 2026.

composições *heavy haul* destinadas ao transporte de minério de ferro, que, segundo ANTF (2025), é a principal mercadoria movimentada pelo modal ferroviário no Brasil.

2.2.1. CONJUNTO DE CHOQUE E TRAÇÃO

De acordo com Steed e Kimpton (2015), os vagões empregados em composições ferroviárias do tipo *heavy haul* são, predominantemente, equipados com o CCT com *Engate Automático do tipo F*. Conforme representado na Figura 4, esse sistema é instalado no interior do *Ponteira*³ (8), componente estrutural que corresponde à extremidade da viga central do vagão (Orlova *et al.*, 2020). Além disso, tal modelo de CCT é formado por diversos componentes estruturais, entre os quais destacam-se: o *Engate* (1), a *Cruzeta* (2), o *Aparelho de Choque e Tração* (3), a *Braçadeira* (6) e o *Pino de Conexão* (7) (Santos, 2019).

Figura 4 – Componentes do CCT



Fonte: Orlova *et al.* (2020, p. 94).

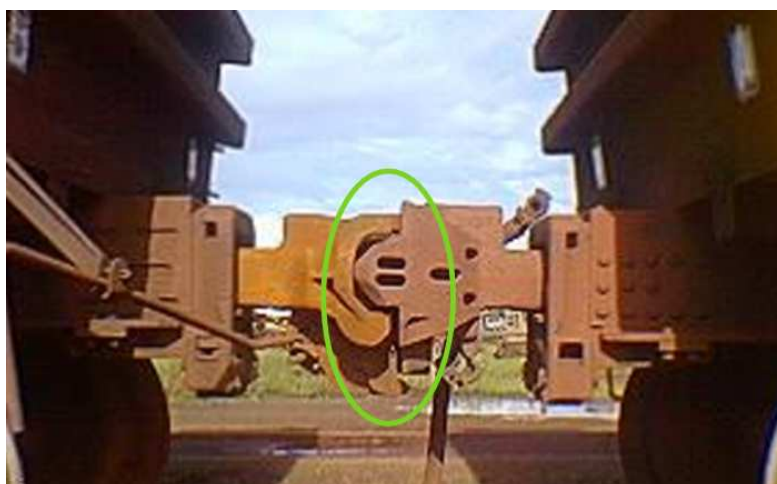
A Figura 4 ilustra a presença de uma folga entre o pino de conexão e o furo da haste do engate, possibilitada pelo formato oblongo e pela superfície interna curva do orifício. Essa característica proporciona múltiplos graus de liberdade ao engate, o que contribui para uma maior estabilidade lateral das composições

³ Termo em inglês conforme Orlova *et al.* (2020): Center Sill.

ferroviárias em curvas verticais e horizontais acentuadas. Além disso, essa folga permite o acoplamento entre vagões de diferentes alturas (Santos, 2019).

A geometria do corpo do engate tipo F incorpora também um sistema de travamento lateral (*interlock*) (Figura 5). Segundo Santos (2019), esse sistema é projetado para impedir o movimento vertical relativo entre as cabeças dos engates e, conseqüentemente, prevenir o desacoplamento acidental durante as operações ferroviárias.

Figura 5 – Sistema de travamento lateral do Engate tipo F

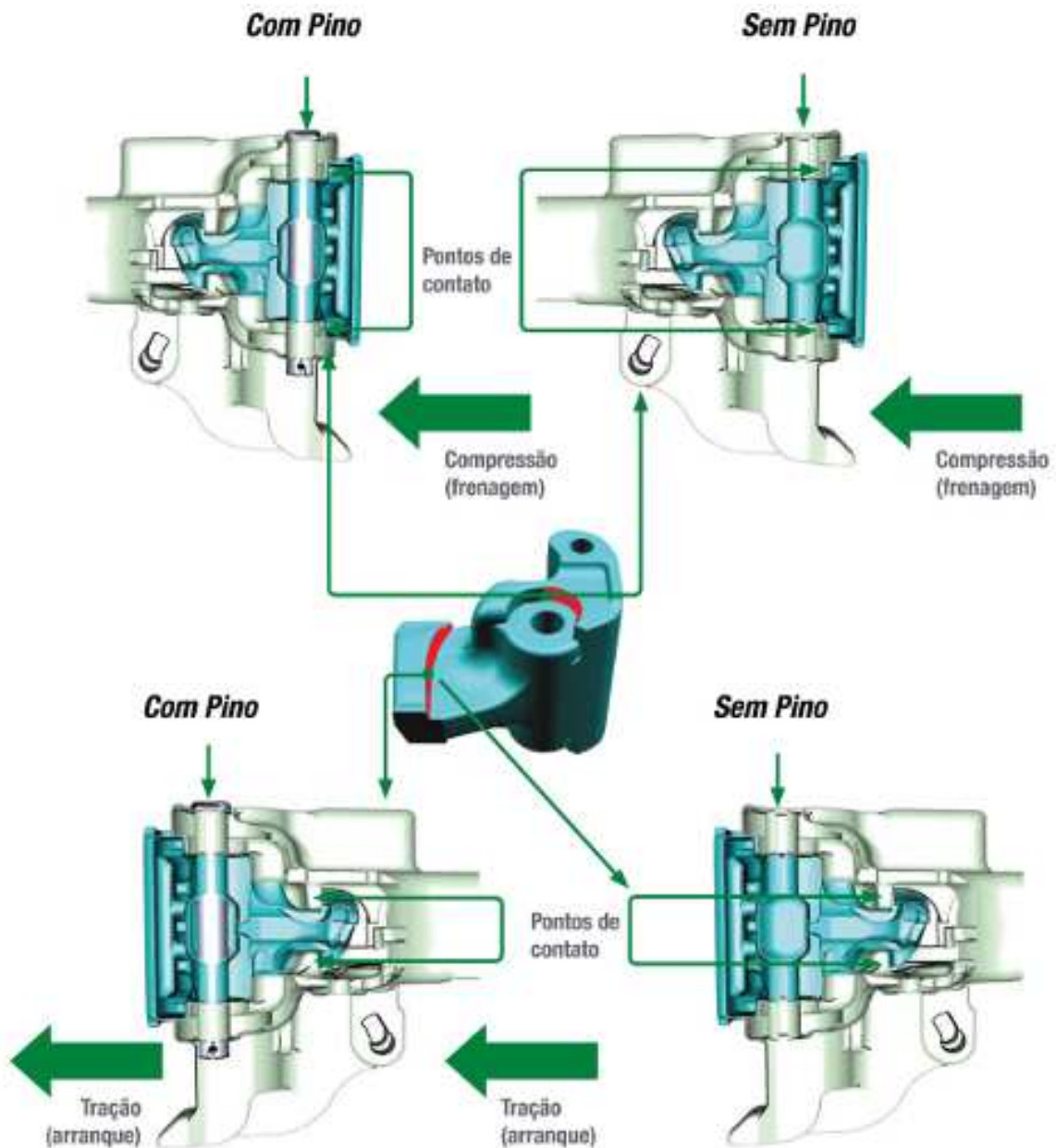


Fonte: Adaptada de Santos (2019, p. 57).

O engate é um subsistema estrutural cuja função é conectar os veículos ferroviários adjacentes, sendo o acoplamento físico entre eles efetivado por meio da *Mandíbula* (Barbosa, 1993; Valer, 2008). A mandíbula atua como um fusível do CCT, uma vez que é projetada como uma peça de reposição, destinada a ser sacrificada durante as operações do trem, caso algum componente do sistema apresente risco de falha (Santos, 2019).

Essa abordagem é adotada pela facilidade de substituição da mandíbula, uma vez que ela é fixada ao corpo do engate por meio do *Pino da Mandíbula* (Santos, 2019). A função desse pino restringe-se a auxiliar na rotação da mandíbula, de modo a viabilizar o acoplamento e o desacoplamento entre veículos adjacentes, visto que o mesmo caracteriza-se como o elemento estrutural mais frágil do CCT (Yadav; Vyas, 2023). Em decorrência dessa característica, a transmissão dos esforços longitudinais aplicados à mandíbula para o engate ocorre por contato direto entre esses componentes (Figura 6) (Maxion, 2019).

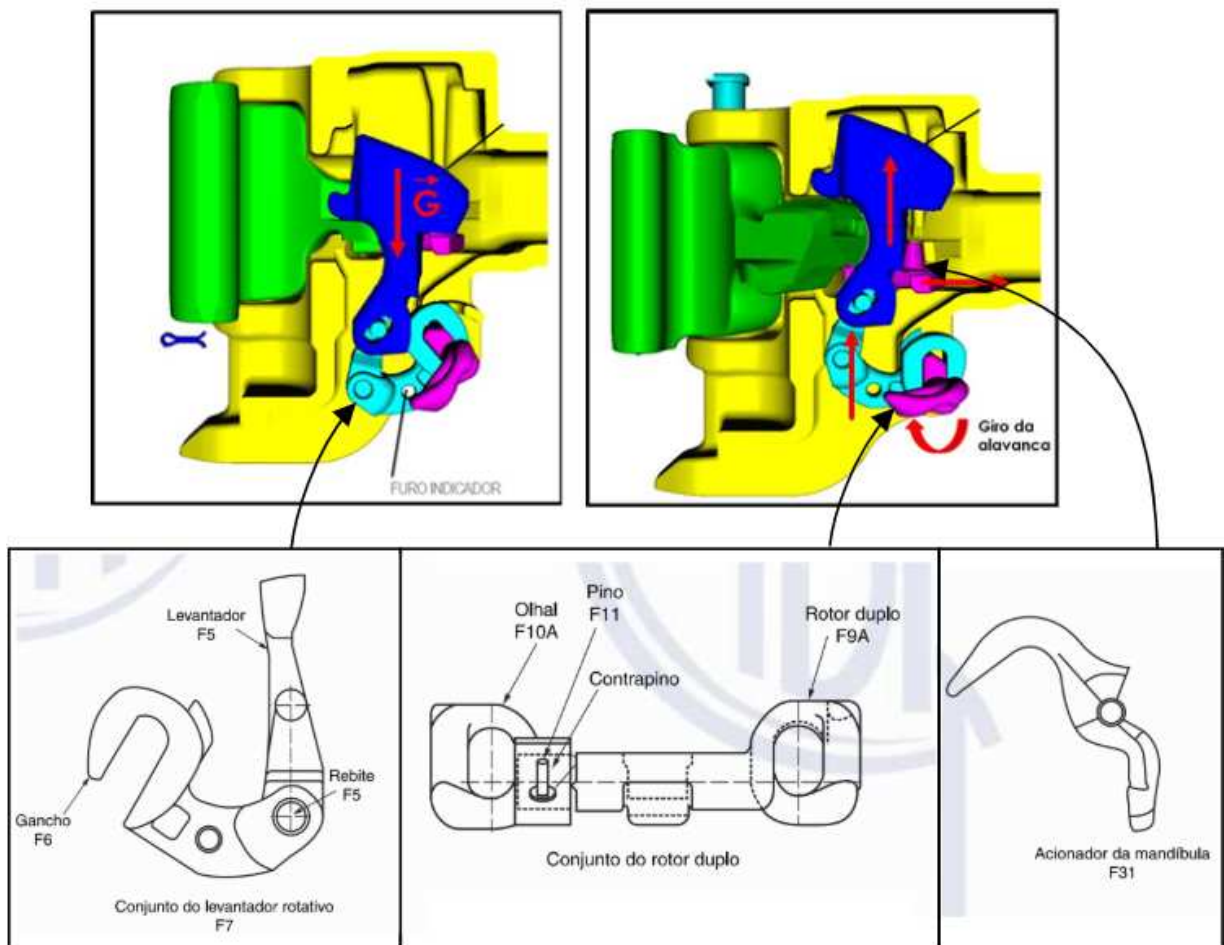
Figura 6 – Região de contato entre o Engate e a Mandíbula



Fonte: Maxion (2019, p. 73).

Tendo em vista que a força de tração atuante na mandíbula caracteriza-se como um carregamento excêntricos, o subsistema estrutural do engate é composto por uma *Castanha*, a qual tem como função travar a rotação da mandíbula durante a aplicação da carga de tração (Santos, 2019; Yadav; Vyas, 2023). Destaca-se que o subsistema estrutural do engate também é formado pelo *Acionador da Mandíbula*, pelo *Conjunto Levantador Rotativo* e pelo *Conjunto Rotor Duplo*, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Movimento vertical da Castanha



Fonte: Compilado pelo autor a partir de Maxion(2019, p. 48) e ABNT (2012a, p.19).

Nesse contexto, a castanha desempenha um papel relevante no processo de desacoplamento automático dos veículos, uma vez que seu deslocamento vertical aciona o mecanismo do acionador da mandíbula, promovendo-se a abertura da mandíbula (Valer, 2008). Conforme evidenciado na Figura 7, esse movimento vertical é gerado pelo conjunto levantador rotativo, o qual é ativado pelo giro do rotor duplo (ABNT, 2012a).

A adoção do engate tipo F nos trens *heavy haul* também é justificada, em razão das características geométricas de seu corpo, as quais proporcionam uma menor folga longitudinal entre as cabeças dos engates acoplados (Nabais, 2004). Essa vantagem, torna-se ainda mais significativa quando comparada ao acoplamento realizado por meio do *Engate Automático tipo E* (Figura 8), amplamente utilizado em trens de carga geral (Santos, 2019).

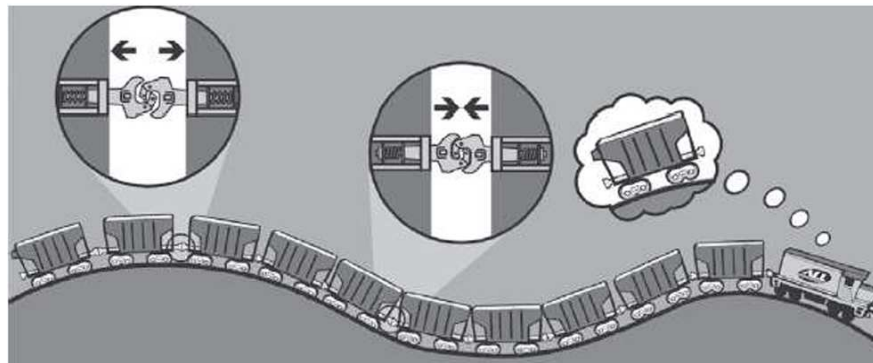
Figura 8 – Acoplamento realizado com dois engates tipo E⁴



Fonte: Maurício (2018).

A folga existente entre as cabeças dos engates é projetada com o propósito de permitir o movimento relativo entre os veículos ferroviários adjacentes, permitindo que a(s) locomotiva(s) vença(m) gradualmente a inércia do comboio durante as operações de arranque (Barbosa, 1993; Brina, 1982). Contudo, em razão da abertura e do fechamento dessa folga durante o movimento do trem (Figura 9), a transmissão dos esforços longitudinais pode ocorrer sob a forma de impactos (ou choques) (Barbosa, 1993; Hungria, 2017)

Figura 9 – Abertura e fechamento das folgas entre as cabeças dos engates



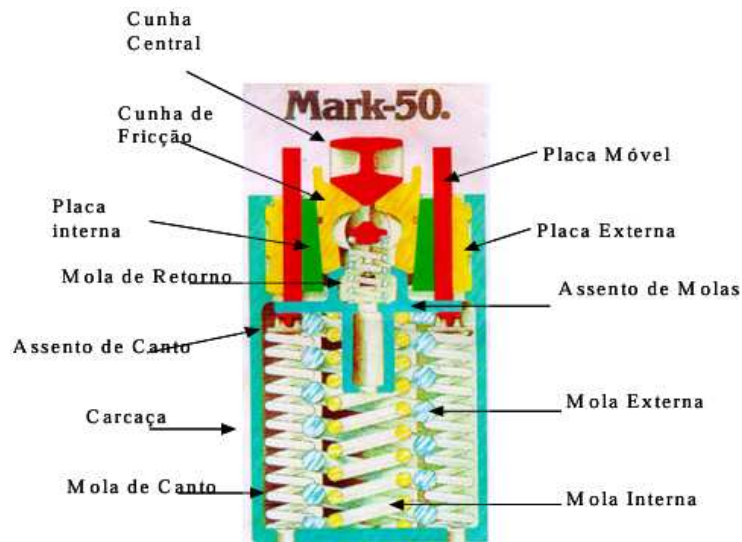
Fonte: Hungria (2017, p. 152).

Com o objetivo de preservar a integridade estrutural dos vagões e proteger a carga transportada contra eventuais choques prejudiciais, a norma AAR M-901-E estabelece a adoção do modelo Mark-5 do Aparelho de Choque e Tração (ACT) nos trens *heavy haul*. Conforme ilustrado na Figura 10, esse componente caracteriza-se como um subsistema estrutural do CCT, composto por um conjunto de molas helicoidais, responsáveis por amortecer os impactos e restaurar o sistema à sua

⁴ MAURICIO, P. Engates de folga controlada. **Blog Paulo Maurício Ferrovia**, 21 jul. 2018. Disponível em: <https://paulomauricioferrovia.com.br/2018/07/21/engates-de-folga-controlada/>. Acesso em: 21 jun. 2025.

posição original, além de três cunhas de atrito seco, cuja função é dissipar a energia do impacto na forma de calor (Borba, 2011; Maxion, 2019).

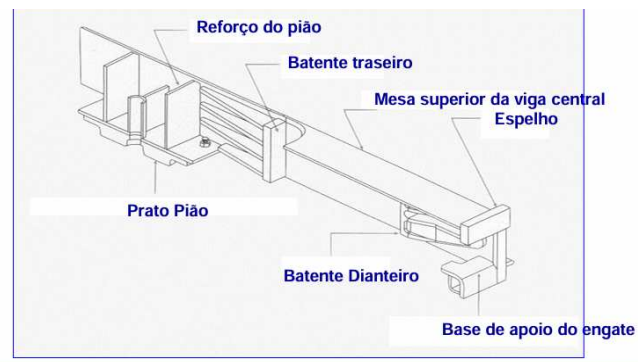
Figura 10 – ACT Mark-5



Fonte: Santos (2019, p.7)

A braçadeira atua como o componente estrutural responsável por conectar ACT ao engate (ABNT, 2012). A cruzeta, por sua vez, tem a função de transferir os esforços de tração à longarina central do vagão, uma vez que se apoia diretamente nos batentes dianteiros do ponteira (Figura 11) (Wabtec Corporation, 2003).

Figura 11 – Estrutura interna do ponteira



Fonte: Santos (2019, p.59).

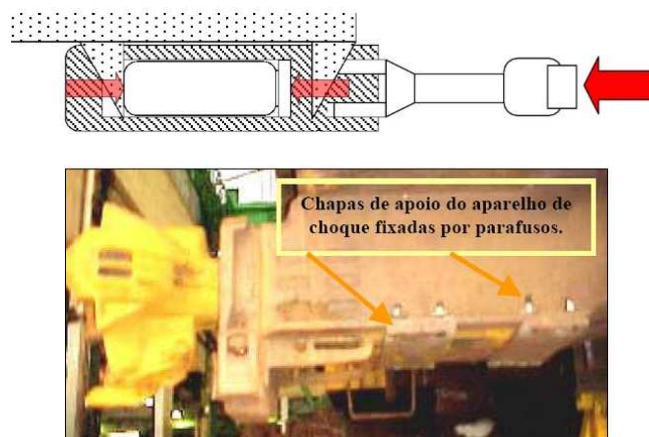
Ao longo deste texto, foram apresentados os principais componentes do Conjunto de Choque e Tração e seu funcionamento. Com o objetivo de

complementar essa descrição, a seção subsequente abordará o comportamento dinâmico associado à atuação desse sistema estrutural.

2.2.1.1. Funcionamento do Conjunto de Choque e Tração

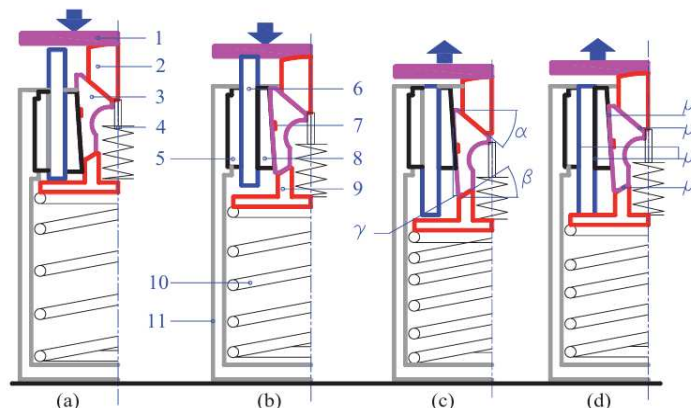
Quando um carregamento de compressão atua sobre o engate, esse componente empurra a braçadeira por meio do pino de conexão. Em seguida, a braçadeira desliza sobre as chapas de apoio (fixadas ao ponteira) e comprime o ACT contra os batentes traseiros, através da cruzeta, como esquematizado na Figura 12 (Santos, 2019). Após a deformação total do Aparelho de Choque e Tração, as molas interna e externa impulsionam o assento e a chapa móvel, o que faz o engate retornar à posição inicial (Figura 13) (Cole, 2020).

Figura 12 – Funcionamento do CCT sobre esforço de compressão



Fonte: Compilado pelo autor a partir de Wagner *et al.* (2020, p. 136) e Santos (2019, p.85).

Figura 13 – Representação esquemática do funcionamento do ATC

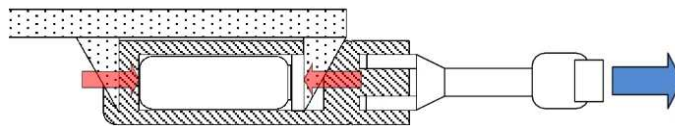


Fonte: Cole (2020, p. 498).

Nesse cenário, a energia do impacto é parcialmente dissipada pelo amortecimento gerado pelo atrito seco entre a chapa móvel e as placas estacionárias, até que a força restauradora das molas seja superada pela força de atrito (Inman, 2018; Maxion, 2019). Esse processo é fundamental, pois impede que as molas impulsionem o engate com uma força de magnitude equivalente ao carregamento inicial provocado pelo choque (Borba, 2011).

Quando o engate é tracionado, tal esforço é transmitido à braçadeira por meio do pino de conexão. Nessa condição, a braçadeira comprime a carcaça do ACT contra a cruzeta (Figura 14) (Santos, 2019). Posteriormente, com o alívio do carregamento externo, o reposicionamento do engate ocorre unicamente pela ação da força restauradora do conjunto de molas (Barbosa, 1993).

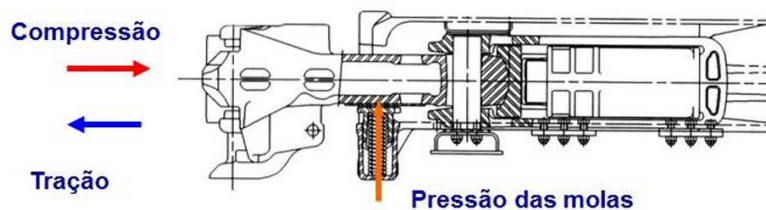
Figura 14 – Funcionamento do CCT sobre esforço de tração



Fonte Wagner *et al.* (2020, p. 136).

A fim de evitar o desgaste da seção inferior da haste do engate, causado pelo atrito com o suporte flexível (Figura 15), o engate possui uma chapa de proteção. (Valer, 2008). Além disso, devido ao sistema de travamento lateral, esse o suporte flexível exerce uma força vertical capaz de compensar as imperfeições da via permanente e as variações de altura entre os vagões (Figura 15) (Santos, 2019).

Figura 15 – Apoio flexível e condições de carregamento



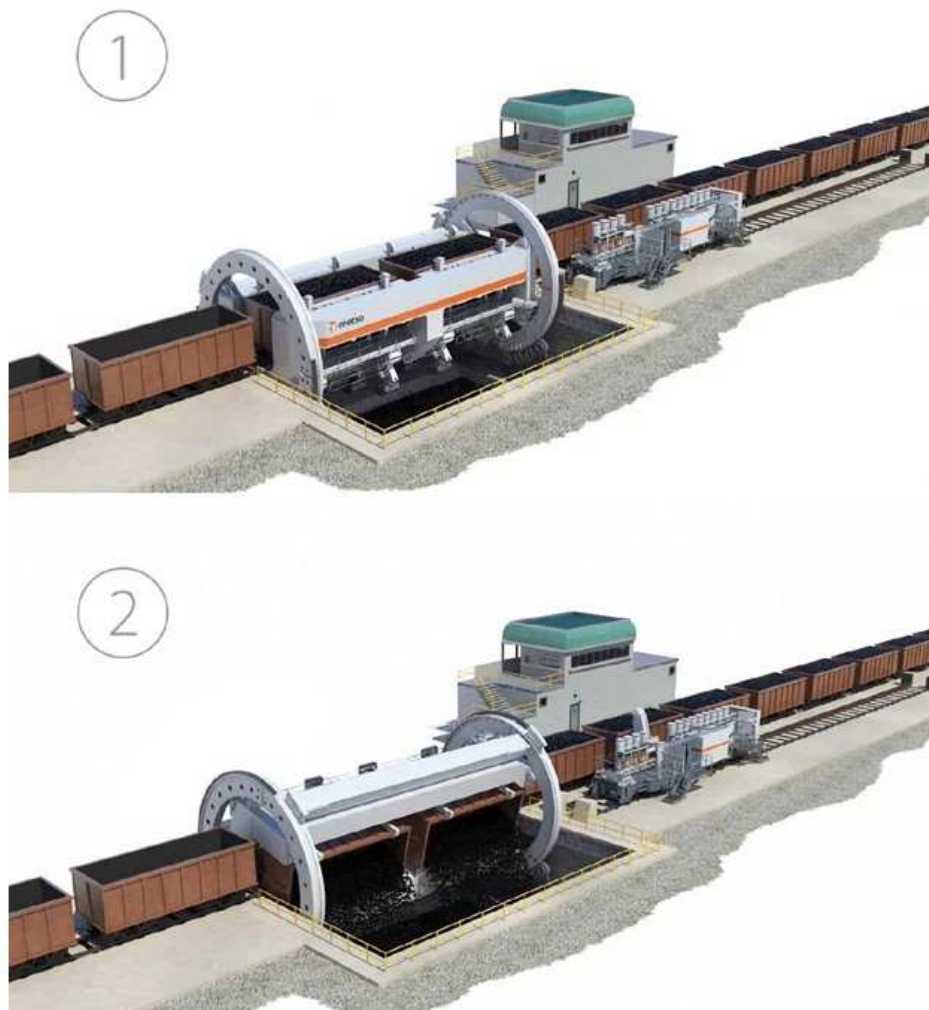
Fonte: Santos (2019, p.64).

Dando continuidade ao estudo do Conjunto de Choque e Tração, a seção subsequente descreve sua aplicação em composições ferroviárias destinadas ao transporte de minério de ferro.

2.2.2. CCT DO VAGÃO GDT, GDU E GDE

Os vagões gôndola dos tipos GDT, GDU e GDE são projetados para serem basculados em até 180° através de sistemas de descarga rápida, denominados Viradores de Vagões (VV) ou *Car Dumpers* (Figura 16) (Nabais, 2004). Para que essa operação ocorra sem desacoplar o trem, a cabeceira A dos vagões de numeração par é equipada com um CCT dotado do modelo fixo do engate tipo F, enquanto a cabeceira B dos vagões de numeração ímpar recebe um CCT equipado com o modelo rotativo, tal como destacado na Figura 17 (Costa, 2019).

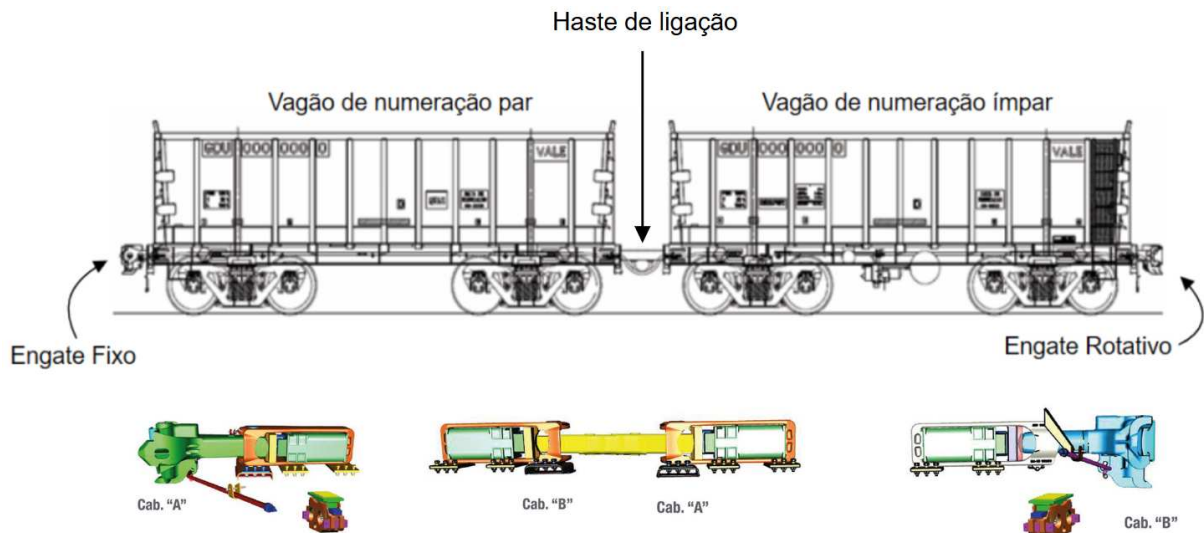
Figura 16 – Viradores de Vagões⁵



Fonte: Metso (2025).

⁵VIRADOR de vagões. **Metso**. Disponível em: <https://www.metso.com/pt/mineracao/manuseio-de-material/viradores-de-vagoes/>. Acesso em: 21 jun. 2025.

Figura 17 – Acoplamento entre duas duplas de vagões GDU



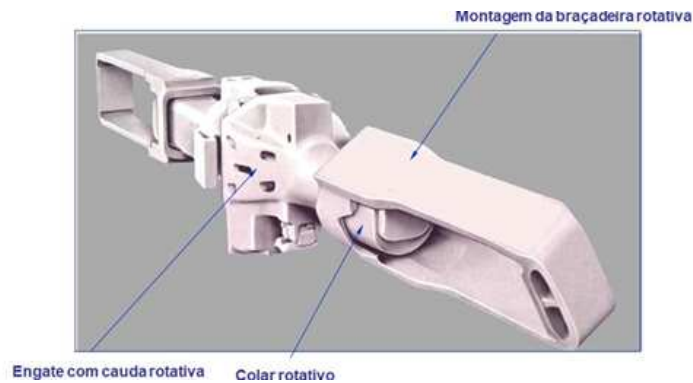
Fonte: Compilado pelo autor a partir de Maxion(2019, p. 20), Maxion(2019, p. 21) e Maxion(2017b).

Observa-se na Figura 17, que os vagões são geminados por uma *Haste de Ligação*. Esse processo decorre a fim de minimizar as folgas existentes ao longo do trem e, conseqüentemente, reduzir os carregamentos de choques (Barbosa, 1993; Santos, 2019).

Essa redução é crucial, pois cada impacto gera ondas de tensão que se propagam ao longo da composição e podem se sobrepor durante choques simultâneos, resultando em tensões locais de elevada magnitude (Collins *et al.*, 2019; Todesco, 2010). Ademais, segundo os princípios do impulso e da quantidade de movimento, os carregamentos de impacto tendem a apresentar grande intensidade, uma vez que as colisões ocorrem em um curto intervalo de tempo (Gray *et al.*, 2014).

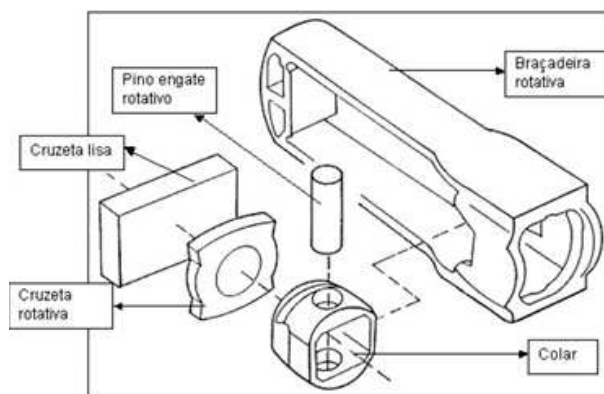
Os modelos rotativo e fixo do engate tipo F possuem características semelhantes, diferenciando-se apenas pela geometria de suas hastes, sendo a do modelo rotativo arredondada para acomodar o Colar e, viabilizar a rotação do vagão (Figura 18) (Santos, 2019; Nabais, 2004). Ressalta-se, que esse componente tem como função acomodar o pino de conexão e transmitir os esforços de tração do pino para a braçadeira rotativa (Figura 19) (Belchior, 2016). Ademais, vale ressaltar que, para viabilizar o giro do Colar no interior da braçadeira, é introduzida uma folga livre significativa entre ambos os elementos (Simson, 2015).

Figura 18 – Funcionamento do CCT rotativo



Fonte: Santos (2019, p.63).

Figura 19 – Montagem da braçadeira rotativa



Fonte: Santos (2019, p.71).

Para complementar a revisão bibliográfica sobre os principais componentes do CCT, a próxima seção apresenta os requisitos técnicos e normativos que orientam a seleção dos materiais empregados na fabricação de tais peças.

2.2.3. REQUISITOS PARA FABRICAÇÃO DOS COMPONENTES DO CCT

Conforme especificado nas normas ABNT NBR 16087 e ABNT NBR 16086, os modelos fixo e rotativo do engate tipo F, assim como a braçadeira, a castanha, a mandíbula, a cruzeta e o colar, devem ser fabricados em aço fundido grau E, temperado e revenido (ABNT, 2012a, ABNT, 2012b; Maxion, 2019). Além disso, as propriedades mecânicas do material desses componentes devem atender aos requisitos estabelecidos pela norma ABNT NBR 16088 (Figura 20), os quais estão alinhados com as especificações da norma AAR M-201 (ABNT, 2012a; ABNT, 2012b; ABNT, 2012c).

Figura 20 – Propriedades mecânicas do componente fundido

Propriedade	Grau A		Grau B	Grau B+	Grau C	Grau D	Grau E
	Não recozido	Recozido ou normalizado					
Resistência à tração MPa	414	414	483	552	621	724	827
Limite de escoamento MPa	207	207	262	345	414	586	690
Alongamento em 50,8 mm %	22	26	24	24	22	17	14
Redução de área %	30	38	36	36	45	35	30

Fonte: ABNT (2012c, p. 6).

Por outro lado, o acionador da mandíbula, o levantador, o gancho, o olhal e o rotor duplo devem ser fabricados em aço fundido grau B, conforme especificado na norma ABNT NBR 16086 (ABNT, 2012a). Os materiais desses componentes devem cumprir os requisitos mecânicos estabelecidos na norma ABNT NBR 16088 (ABNT, 2012a).

A norma ABNT NBR 15811:2010 estabelece que o pino de conexão, fixo ou rotativo, deve ser fabricado em aço grau 1060, cujas propriedades mecânicas mínimas estão descritas na Figura 21a (ABNT, 2010). Ademais, a mesma norma especifica que o pino da mandíbula deve ser forjado e atenda às propriedades mínimas indicadas na Figura 21b (ABNT, 2010)

Figura 21 – Propriedades mínima do (a) pino de conexão e (b) do pino da mandíbula

Resistência à tração	Limite de escoamento	Alongamento	Redução de área
ksi	ksi	%	%
135	75,2	18,5	44,8

(a)

Resistência a tração	Limite de escoamento	Alongamento	Redução de área
ksi	ksi	%	%
146	90	16,5	46,2

(b)

Fonte: (a) e (b) ABNT (2010, p. 2).

As seções anteriores conceituaram os principais componentes do CCT a fim de fornecer subsídios para a construção do modelo de elementos finitos. Tendo em vista que a confiabilidade desse modelo depende da compreensão teórica dos métodos de análise, na próxima seção descrevem-se os princípios da teoria de falhas adotada neste estudo.

2.3. TEORIA DE FALHA

Para os propósitos deste trabalho, adotou-se a teoria da energia de distorção, a qual é mais adequada para a análise de falha de materiais dúcteis (Budynas; Nisbett, 2015). Tal abordagem se justifica pelo fato da tensão equivalente de von Mises ser o método mais usual para representar campos de tensões em peças analisadas utilizando o MEF, pois facilita a identificação das regiões críticas da estrutura (Mandier, 2020).

A tensão equivalente de von Mises é uma grandeza escalar que quantifica a intensidade do estado de tensões em cada ponto de uma estrutura. Conforme pode ser visto no Anexo A, a teoria da energia de distorção considera que as tensões normais e de cisalhamento são equivalentes a uma única tensão uniaxial de tração (Norton, 2013). Para um estado geral de tensão, a tensão equivalente de von Mises é formulada pela equação (1):

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]^{1/2} \quad (1)$$

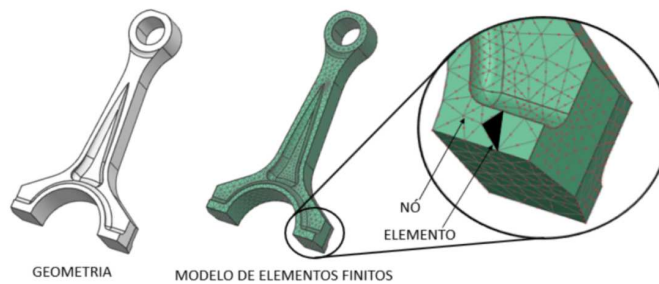
Considerando-se que o *software* CAE calcula a tensão de von Mises com base nos princípios da mecânica do contínuo (Mandier, 2020), a próxima seção abordará a fundamentação matemática do Método dos Elementos Finitos, com o objetivo de demonstrar como esse método calcula o estado de tensão.

2.4. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

No contexto da análise estrutural, o Método dos Elementos Finitos caracteriza-se como um método numérico empregado para determinar uma solução aproximada para o comportamento de um sistema contínuo submetido à ação de

carregamentos externos ou à variações de temperatura (Fish; Belytschko, 2009). Para isso, conforme ilustrado na Figura 22, o domínio da estrutura é dividido em subdomínios menores de geometria simples, chamados de elementos finitos, convertendo-o em um sistema discreto com número finito de graus de liberdade (Madier, 2020)

Figura 22 – Discretização da malha de elementos finitos⁶



Fonte: JL Engenharia & Software (2021).

As tensões em cada ponto do componente analisado são obtidas a partir do campo de deslocamento de cada elemento finito, o qual é aproximado pela interpolação dos deslocamentos nodais correspondentes (Dias *et al.*, 2007). Esses deslocamentos são calculados ao resolver um sistema de equações diferenciais na forma matricial, formulado com base nas condições de equilíbrio de cada elemento (Alves Filho, 2013).

Para fundamentar esse processo, considera-se um elemento finito e submetido à um estado geral de tensão. Portanto, a partir da lei de Hooke generalizada, as tensões normais e de cisalhamento atuando em qualquer ponto no interior do elemento podem ser obtidas pela Equação (2):

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} \cdot \begin{Bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1-\nu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

⁶JL ENGENHARIA & SOFTWARE. O que é Análise de Elementos Finitos (FEA)? **JL Engenharia & Software**, 12 nov. 2021. Disponível em: <https://jles.com.br/2021/11/12/analise-de-elementos-finitos/>. Acesso em: 21 jun. 2025.

Sendo que as deformações em qualquer ponto do elemento são expressas pelas Equações (3) a (8):

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3)$$

$$\epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (4)$$

$$\epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (5)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (6)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \quad (7)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \quad (8)$$

Substituindo-se as Equações (3) a (8) na Equação (2) e admitindo-se que os dois primeiros termos do lado direito da Equação (2) correspondem a matriz constitutiva do material $[D]$, tem-se que:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = [D] \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} \quad (9)$$

Posteriormente, levando em consideração que o segundo termo do lado direito da Equação (9) representa um operador diferencial matricial $[L]$, obtém-se:

$$\{\sigma\}^{(e)} = [D] \cdot [L] \cdot \{u\}^{(e)} \quad (10)$$

Assumindo que o campo de deslocamento do elemento pode ser aproximado pela Equação (11):

$$\{u\}^{(e)} \approx [N]^{(e)} \cdot \{u_i\}^{(e)}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (11)$$

onde $\{u_i\}^e$ é o vetor contendo os deslocamentos nodais e $[N]^{(e)}$ é a matriz de funções de forma do elemento finito. Substituindo a Equação (11) na Equação (10), encontra-se:

$$\{\sigma\}^{(e)} = [D] \cdot [L] \cdot [N]^{(e)} \cdot \{u_i\}^{(e)} \quad (12)$$

Também é importante estabelecer que a matriz de deformação-deslocamento $[B]$ é definida pela Equação (13):

$$[B] = [L] \cdot [N]^{(e)} \quad (13)$$

Logo, substituindo-se a Equação (13) na Equação (12), tem-se:

$$\{\sigma\}^{(e)} = [D] \cdot [B] \cdot \{u_i\}^{(e)} \quad (14)$$

Para determinar $\{u_i\}^e$, em uma análise estrutural linear estática, o MEF considera uma relação linear entre as forças e os deslocamentos nodais do elemento. Para a obtenção dessa relação em problemas multidimensionais, emprega-se, usualmente, o princípio da energia potencial mínima, também denominado de princípio do trabalho virtual, cujo detalhamento é apresentado no Anexo B. Como resultado desse procedimento, obtém-se o sistema de equações na forma matricial, expresso pela Equação (15):

$$\{F\}^{(e)} = [k]^{(e)} \cdot \{u_i\}^{(e)} \quad (15)$$

onde, $[k]^e$ é a matriz de rigidez do elemento e $\{F\}^e$ é o vetor contendo as forças nodais, sendo ambos determinados pelas Equações (16) e (17):

$$\{F\}^{(e)} = \int_V \left(([N]^{(e)})^T \cdot \{b\}^{(e)} \right) \cdot dV + \int_S \left(([N]^{(e)})^T \cdot \{\bar{t}\}^{(e)} \right) \cdot dS + \{f\}^{(e)} \quad (16)$$

$$[k]^e = \int_V ([D] \cdot [B] \cdot ([B])^T) \cdot dV \quad (17)$$

onde na Equação (16), $\{b\}^{(e)}$, $\{\bar{t}\}^{(e)}$, $\{f\}^{(e)}$ representam, respectivamente, os vetores de força de campo, força de superfície e força concentrada nos nós.

Para determinar os deslocamentos nodais no sistema global, considera-se que a matriz de rigidez global e o vetor de carregamentos externos são definidos pelas Equações (18) e (19):

$$\{F\} = \sum_{e=1}^N \{F\}^{(e)} \quad (18)$$

$$\{K\} = \sum_{e=1}^N \{K\}^{(e)} \quad (19)$$

Consequentemente, os deslocamentos nodais do sistema global são obtidos por meio da resolução do sistema de equações diferenciais, representado pela Equação (20):

$$\{F\} = [K] \cdot \{u_i\} \quad (20)$$

Vale ressaltar que a equação (20) é empregada na solução de problemas lineares, uma vez que, mantendo-se constante a matriz de rigidez global, os deslocamentos nodais variam proporcionalmente à intensidade das forças externas

aplicadas. Em contrapartida, em problemas não lineares, a matriz de rigidez global passa a depender dos próprios deslocamentos nodais, de modo que a Equação (20) assume a seguinte forma:

$$\{F\} = [K(u_i)] \cdot \{u_i\} \quad (21)$$

A solução de problemas não lineares requer a adoção de métodos numéricos iterativos, os quais recalculam a matriz de rigidez e formulam um novo sistema de equações a cada iteração, com o objetivo de determinar os deslocamentos nodais. Diferentemente do que ocorre na Equação (20), a Equação (21) não permite a obtenção direta dos deslocamentos por meio de uma simples inversão da matriz de rigidez global, uma vez que o vetor de deslocamentos nodais não é previamente conhecido (Bartoli, 2023; Madier, 2020).

3. METODOLOGIA

Neste capítulo, apresenta-se a metodologia adotada para o desenvolvimento deste trabalho. No capítulo subsequente serão descritas as etapas de execução da metodologia proposta.

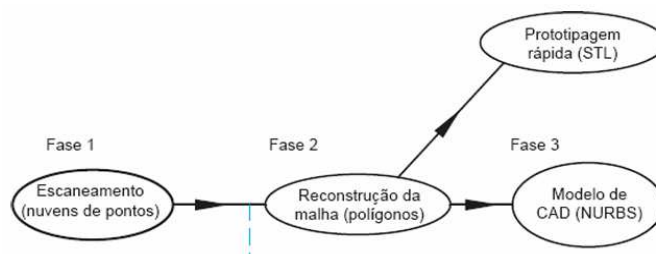
A primeira fase consistiu na elaboração dos modelos digitais de cada componente do CCT, por meio da aplicação de técnicas de engenharia reversa. Em seguida, foi realizada uma análise estrutural linear estática utilizando o MEF, por meio de simulações numéricas conduzidas em um *software* comercial CAE.

Cabe destacar que as licenças dos programas empregados no desenvolvimento desta metodologia foram disponibilizadas pelo Laboratório de Simulação Naval da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Tecnológico de Joinville.

3.1. PROCESSO DE ENGENHARIA REVERSA

Segundo Leake e Borgerson (2015), o processo de engenharia reversa é aplicado em três etapas distintas (Figura 23): a digitalização da superfície do objeto físico; a reconstrução e o aprimoramento da malha poligonal resultante; e a geração do modelo CAD (*Computer-Aided Design*) com base em superfícies NURBS (*Non-Uniform Rational B-Splines*).

Figura 23 – Etapas do processo de engenharia reversa



Fonte: Leake e Borgerson (2015).

Nesse contexto, destaca-se, que a aplicação desse processo para a aquisição de um modelo digital destinado à análise MEF pode ser concluída na segunda fase (CREAFORM, 2014). Isso ocorre porque, ao término dessa etapa, obtém-se um

arquivo STL (*StereoLithography*) que representa a geometria de tal modelo, o qual é compatível com a maioria dos *softwares* de simulação CAE (CREAFORM, 2014; Leake; Borgerson, 2015).

3.1.1. Fase 1 do processo de engenharia reversa

Para a primeira fase do processo engenharia reversa, utilizou-se o *scanner* portátil HandySCAN 307, com o intuito de desenvolver um modelo digital que representasse fielmente cada peça analisada. Esse equipamento foi cedido pelo Laboratório de Metrologia e Qualidade Industrial da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Tecnológico de Joinville.

A escolha desse dispositivo justifica-se por sua capacidade de fornecer resultados com elevado nível de repetibilidade e detalhamento, independentemente da experiência do operador. Além disso, conforme ilustrado na Figura 24, o HandySCAN 307 é equipado com sensores ópticos de alta resolução, os quais permitem alcançar uma precisão máxima de 0,04 mm, com taxa de medição de até 480 mil pontos por segundo e resolução variando entre 0,05 mm e 0,1 mm (CREAFORM, 2022).

Figura 24 – *Scanner* portátil HandySCAN 307



Fonte: CREAFORM (2022).

As câmeras do HandySCAN 307 registram as deformações geradas por sete feixes de laser vermelho cruzados, projetados sobre a superfície do objeto (Figura 26). Com base nessas informações, o equipamento calcula sua distância até a peça e determina as coordenadas espaciais de cada ponto da superfície digitalizada (CREAFORM, 2023).

Figura 26– Laser do HandySCAN 307⁷



Fonte: 3D Device (2023).

Para garantir a eficiência desse processo, o *scanner* emprega um sistema de autoposicionamento baseado em um referencial dinâmico, formado por *alvos retrorefletores adesivos*, fixados manualmente na peça ou próximo a ela (CREAFORM, 2022). Esses alvos permitem que, no início do escaneamento, o *scanner* determine sua posição espacial em relação ao objeto e estabeleça um sistema de coordenadas que servirá como referência para a digitalização (CREAFORM, 2022).

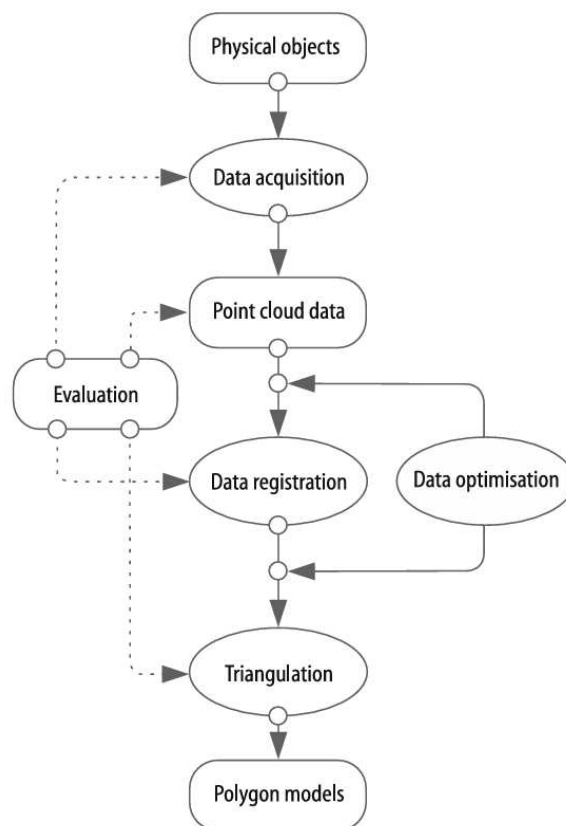
Assim, as coordenadas dos pontos da superfície são calculadas por meio da técnica de triangulação, pois as câmeras do equipamento detectam a luz dos lasers incidentes em, no mínimo, seis alvos simultaneamente durante o processo de escaneamento (CREAFORM, 2022; Leake; Borgerson, 2015).

Durante o processo de escaneamento, o *scanner* transmite, em tempo real, os dados coletados para um computador por meio da conexão USB. Esses dados são processados automaticamente pelo *software* VXscan, o qual integra a plataforma VXelements, desenvolvida pela fabricante do equipamento (CREAFORM, 2022).

⁷ 3D DEVICE, Scanner 3D Creaform Hadyscan 307. **Alexeygrek Studio**. 2023. Disponível em: <https://3ddevice.com.ua/en/product/3d-scanner-creaform-handyscan-307/>. Acesso em: 21 jun. 2025.

Conforme ilustrado na Figura 27, o algoritmo do *software* de engenharia reversa captura as informações digitalizadas, gerando uma nuvem de pontos, a partir da qual é estruturada uma malha poligonal tridimensional. Nesse processo, conjuntos de três pontos adjacentes são identificados e conectados para formar elementos triangulares de superfície, que, por sua vez, são interligados por seus vértices e arestas para compor uma malha estruturada (Raja; Fernandes, 2008).

Figura 27 – Fluxograma de conversão dos dados do escaneamento em malha poligonal



Fonte: Raja e Fernandes (2008, p. 55).

O processo de otimização da nuvem de pontos consiste na aplicação de um filtro que remove valores atípicos, preservando os dados que se mantêm dentro da faixa de tolerância estabelecida (CREAFORM, 2022). Além disso, durante a aquisição dos dados, podem surgir erros numéricos que resultam no posicionamento incorreto de pontos em determinadas regiões, bem como na sobreposição de pontos em áreas escaneadas múltiplas vezes (Raja; Fernandes, 2008).

3.1.2. Fase 2 do processo de engenharia reversa

Concluída a etapa de digitalização dos componentes, inicia-se a segunda fase do processo de engenharia reversa, com a transferência dos modelos poligonais do *software* VXscan para o *software* VXmodel, também integrado à plataforma VXelements. Nessa etapa, é realizada o aprimoramento da malha poligonal por meio de procedimentos como: combinação de múltiplos conjuntos de dados, remoção de anomalias, redução de ruídos, preenchimento de vazios, eliminação de irregularidades e suavização de contornos (Leake; Borgerson, 2015; Raja; Fernandes, 2008).

Esses procedimentos são fundamentais, pois, ao escanear peças com geometrias complexas, podem surgir falhas devido à oclusão, causada pela incapacidade do algoritmo de fotogrametria do *scanner* em capturar superfícies sombreadas, uma vez que parte do objeto bloqueia a luz do laser (Leake; Borgerson, 2015). Além disso, para mitigar esse problema, torna-se muitas vezes necessário realizar a digitalização desses componentes por meio de múltiplos processos de escaneamento (Raja; Fernandes, 2008).

Adicionalmente, tais procedimentos são de grande relevância, visto que asseguram a precisão dos resultados obtidos nas simulações computacionais. Isso ocorre porque a geometria CAD deve ser preparada para gerar uma malha de elementos finitos o mais regular possível, minimizando distorções e erros que possam comprometer a qualidade do modelo discretizado (Alves Filho *et al.*, 2022).

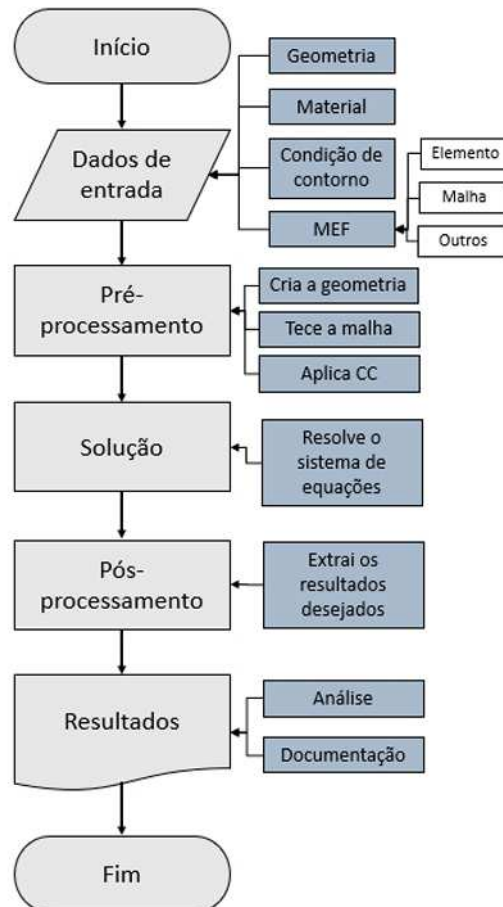
Nesse contexto, a limpeza da geometria do modelo digital torna-se indispensável, uma vez que tal processo remove características geométricas que elevam o custo computacional da análise MEF, sem impactar na precisão dos resultados (Madier, 2020). Além disso, o refinamento e a suavização da malha poligonal são essenciais para eliminar imperfeições geométricas que podem aumentar o tempo de processamento, o qual é proporcional ao quadrado do número de graus de liberdade da malha de elementos finitos (Madier, 2020).

3.2. ANÁLISE ESTRUTURAL

A Figura 28 apresenta um fluxograma genérico das etapas envolvidas em uma análise estrutural realizada com o Método dos Elementos Finitos. Ressalta-se

que a metodologia descrita neste trabalho para a análise dos componentes do CCT segue as etapas representadas nesse fluxograma.

Figura 28 – Fluxograma geral de uma análise MEF



Fonte: Bartoli (2023, p. 41).

A fase de pré-processamento envolve a discretização dos modelos digitais dos componentes a serem avaliados, bem como a aplicação das condições de contorno correspondentes ao problema (Alves Filho *et al.*, 2022). Já a fase de solução, consiste na resolução do sistema de equações (20), enquanto a fase de pós-processamento abrange a verificação, extração e documentação dos resultados obtidos (Bartoli, 2023).

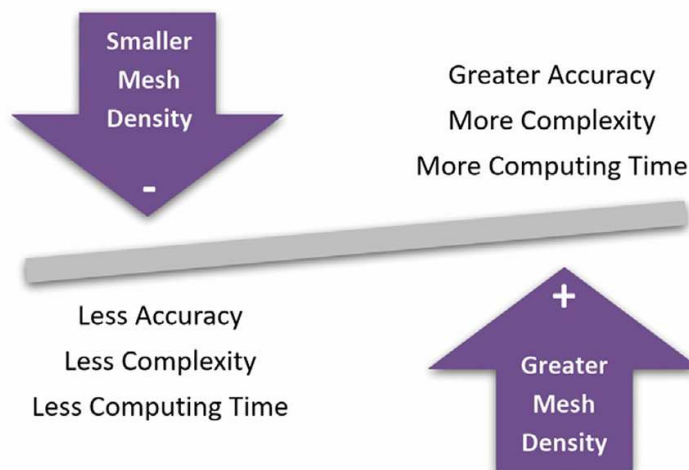
3.2.1. Fase de pré processamento

Conforme apresentado na Figura 44, para realizar a etapa de pré-processamento, é essencial fornecer ao *software* as informações geométricas da

estrutura, bem como as propriedades mecânicas dos materiais envolvidos. Além disso, é imprescindível especificar o tipo de elemento finito a ser utilizado e a densidade da malha a ser empregada.

Para assegurar a qualidade dos resultados obtidos nas simulações numéricas, torna-se importante que, no processo de refinamento, seja estabelecido um equilíbrio entre a precisão dos resultados e o custo computacional associado à análise MEF (Figura 29) (Madier, 2020). Isso ocorre porque uma malha muito grosseira tende a gerar resultados imprecisos, enquanto uma malha fina pode apresentar resultados precisos, mas elevado custo computacional devido ao grande número de graus de liberdade envolvidos (Kim e Sankar, 2009).

Figura 29 – Equilíbrio entre a densidade de malha e a precisão dos resultados



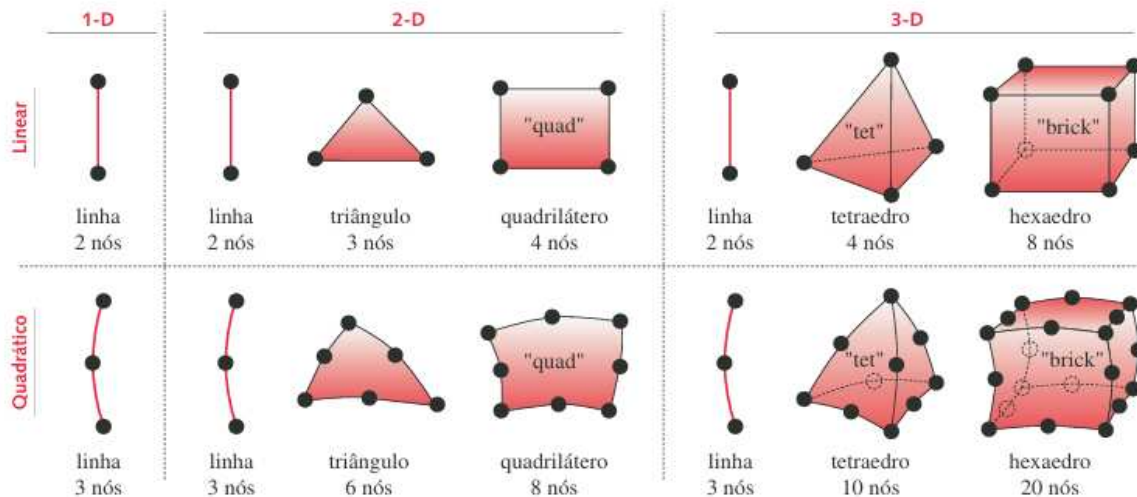
Fonte: Madier (2020, p.160).

Para atingir esse equilíbrio, uma das estratégias consiste na utilização de elementos de ordem superior, visto que eles representam com maior fidelidade os contornos de peças com geometria complexa e promovem uma maior precisão nos resultados (Hutton, 2004). Entretanto, deve-se considerar que sua aplicação pode impactar no tempo de processamento da análise (Norton, 2013).

No contexto apresentado, a Figura 30 apresenta os tipos de elementos finitos mais comumente disponíveis em *softwares* CAE. Ressalta-se que os elementos lineares utilizam funções de forma de primeira ordem, enquanto os elementos quadráticos empregam-se funções de forma de segunda ordem (Fish; Belytschko, 2007). Dentre esses, o elemento tetraédrico de segunda ordem (TET10) destaca-se

por representar com maior precisão geometrias tridimensionais curvas (Dias *et al.*, 2010).

Figura 30 – Tipos de elementos finitos mais comuns disponíveis em softwares CAE



Fonte: Norton (2013, p.486).

A precisão dos resultados obtidos está diretamente associada à qualidade e à densidade da malha empregada, enquanto o tempo de processamento da análise é proporcional ao quadrado do número de graus de liberdade do modelo discretizado (Madier, 2020). Dessa forma, torna-se imprescindível que, durante o processo de refinamento, a densidade da malha seja estabelecida com base em um estudo de convergência, cuja metodologia será apresentada na seção subsequente.

3.2.1.1. Estudo de convergência da malha

Sob a perspectiva numérica, considera-se que a convergência da malha é atingida quando o refinamento dos elementos não induz variações significativas nos resultados obtidos (Madier, 2020). No âmbito da análise estrutural, o estudo de convergência de malha é fundamental para a definição da malha a ser empregada, uma vez que esse processo assegura que a discretização represente, com fidelidade, as regiões críticas da estrutura analisada (Madier, 2020).

Em situações nas quais a solução exata do problema não é conhecida, o estudo de convergência torna-se imprescindível para assegurar a confiabilidade dos resultados das simulações numéricas (Kim; Sankar, 2009). Dessa forma, tal análise

deve ser conduzida em regiões que apresentem concentrações de tensão, a fim de garantir que o processo de refinamento represente adequadamente as regiões críticas da estrutura (Madier, 2020).

Na prática, esse procedimento deve ser conduzido até que a diferença entre os resultados consecutivos, nas regiões de alta tensão, seja inferior a 5% (Madier, 2020). Ressalta-se, que ao longo desse estudo, é essencial monitorar a variação do campo de tensão (Madier, 2020).













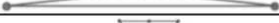






Para garantir que a malha gerada seja a mais regular possível, evitando distorções e inconsistências que possam comprometer a precisão dos resultados das simulações numéricas, é fundamental que verificar a qualidade da malha gerada (Alves Filho et al., 2022). Concluído esse processo, devem ser definidas as condições de contorno para que o *software* resolva o sistema de equações (20).

Considerando- a importância de ambos os procedimentos, as metodologias correspondentes serão apresentadas nas seções seguintes. Por fim, destaca-se que para a análise estrutural MEF dos componentes do CCT realizada neste trabalho utilizou o *software* Ansys Mechanical, reconhecido como um dos principais *solvers* de elementos finitos para simulações estruturais (Ansys, 2024).

3.2.1.2. Análise de qualidade da malha

A qualidade de uma malha é diretamente influenciada tanto pelo arranjo dos elementos finitos quanto pela qualidade individual de cada elemento, sendo essa última associada à sua forma geométrica e ao grau de distorção apresentado (Azevedo, 2016). Para a avaliar tal qualidade, é usual que as seguintes métricas sejam adotadas: *Element Quality*, *Aspect Ratio*, *Jacobian Ratio*, *Warping Factor*, *Parallel Deviation*, *Maximum Corner Angle*, *Skewness* e *Orthogonal Quality* (Azevedo, 2016). A Figura 31 apresenta alguns desses indicadores, conforme disponibilizado pelo manual do *software* Ansys.

Figura 31 – Síntese das métricas de qualidade de malha fornecidas pelo ANSYS⁸

Metric	Best		Worst
Element Quality	1		0
Aspect Ratio - Triangle	1 		20 
Aspect Ratio - Quadrilaterals	1 		20 
Jacobian Ratio	1	10	
Warping Factor - Shell	0 		5 
Warping Factor - Brick	0 		0.4 
Parallel Deviation	1 		170 
Maximum Corner Angle - Triangular	60° 		165° 
Maximum Corner Angle - Quadrilateral	90° 		180° 
Skewness - Triangular	0 		1 
Skewness - Quadrilateral	0 		1 
Orthogonal Quality	1		0

Fonte: özgün (2023).

Nesse contexto, nas seções seguintes são discutidas as principais métricas empregadas na avaliação da qualidade de malhas constituídas exclusivamente por elementos tetraédricos de segunda ordem (TET10).

3.2.1.2.1. Métrica *Element Quality*

A métrica *Element Quality* para um elemento sólido pode ser avaliada pela razão entre o volume e a raiz cúbica da soma dos quadrados dos comprimentos de das arestas do elemento. Esse critério gera valores entre 0 e 1, sendo que 1 representa um elemento ideal, enquanto 0 indica um elemento com volume nulo ou negativo (Ansys, 2024).

3.2.1.2.2. Métrica *Jacobian Ratio*

⁸ÖZGÜN. Ansys Mesh Metrics Explained. **Mechead**. 15 dez. 2023. Disponível em: <https://www.mechead.com/mesh-quality-checking-ansys-workbench/>. Acesso em: 21 jun. 2025.

A métrica *Jacobian Ratio*, calculada nos nós de canto, quantifica a distorção geométrica local de elementos de ordem superior durante o mapeamento entre o espaço paramétrico e o espaço global. Valores próximos a 1 indicam uma boa qualidade do elemento (Ansys, 2024).

3.2.1.2.3. Métrica *Aspect Ratio*

Para o elemento tetraédrico, a métrica *Aspect Ratio* é calculada a partir da relação entre a maior aresta e a menor altura do elemento. Portanto, o elemento regular possui uma razão de aspecto próximo de 1 (Ansys, 2024).

3.2.1.2.4. Métrica *Skewness*

A métrica *Skewness* é uma das principais medidas de qualidade da malha, pois avalia o quanto a forma de um elemento se desvia de sua geometria ideal. Nessa escala, o valor 0 representa um elemento perfeitamente regular, enquanto valores mais elevados indicam maiores distorções geométricas (Ansys, 2024).

3.2.1.2.5. Métrica *Maximum Corner Angle*

A métrica *Maximum Corner Angle* corresponde ao maior ângulo formado entre as faces adjacentes de um elemento, sendo medida a partir de um nó de canto no espaço tridimensional. Em elementos triangulares, o valor ideal para esse ângulo é 60° (Ansys, 2024).

Nesse contexto, ressalta-se que elementos com ângulos excessivamente obtusos entre as arestas podem introduzir distorções geométricas na malha, comprometendo a qualidade da solução numérica e dificultando a convergência do Método dos Elementos Finitos (EngMorph, 2021)

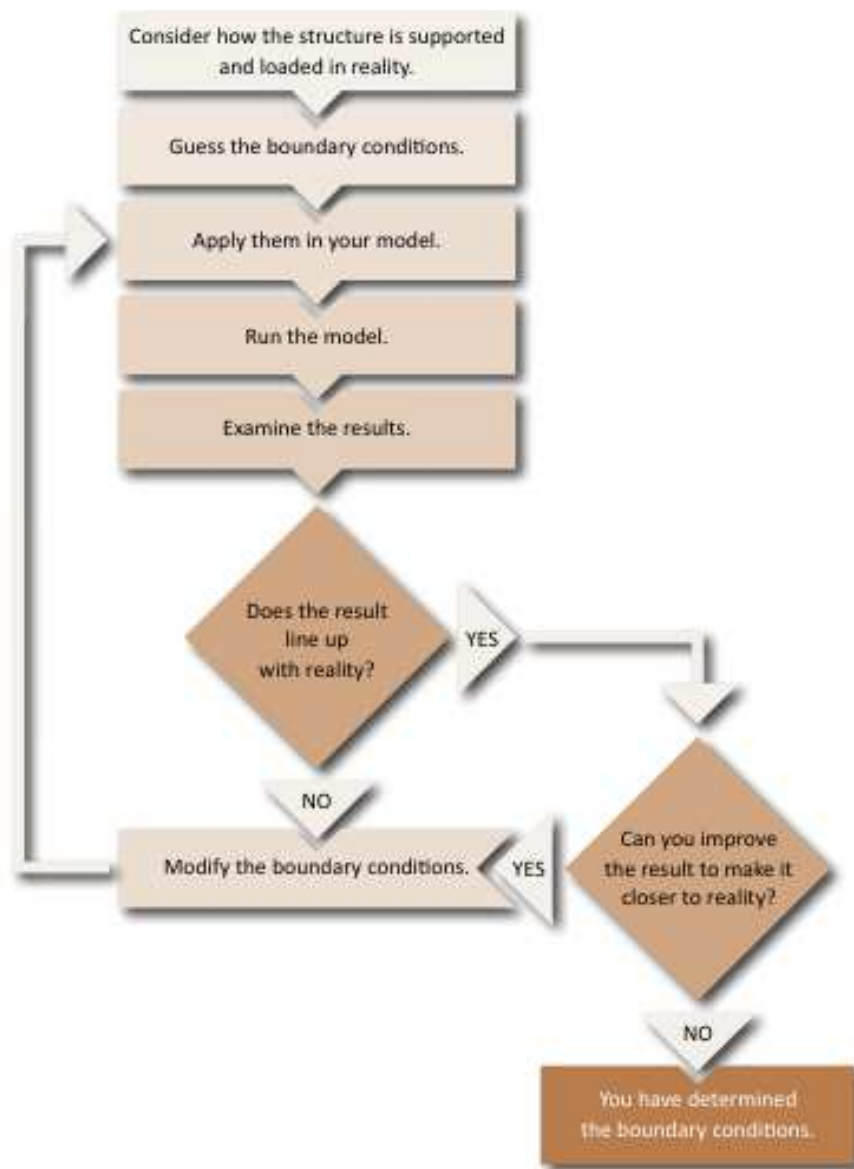
3.2.1.2. Condições de contorno

Uma condição de contorno (CC) pode ser classificada em três tipos: carregamento, deslocamento e contato. Sendo que a correta definição de cada condição é fundamental para garantir que a solução obtida por meio do MEF

represente com fidelidade o comportamento real do modelo analisado, visto que tais condições exercem influência significativa sobre os resultados de uma simulação numérica (Madier, 2020).

As condições de contorno podem ser modeladas por meio de diferentes estratégias, com o objetivo de simplificar a análise e viabilizar a convergência (Kim; Sankar, 2009). No entanto, é fundamental garantir que essas estratégias representem de forma realista as condições reais do componente a ser analisado (Madier, 2020; Norton, 2013). A Figura 32 apresenta um fluxograma que orienta o processo de determinação das condições de contorno.

Figura 32 – Fluxograma para definição das condições de contorno



Fonte: Madier (2020, p. 230).

As condições de contorno de carregamento podem ser caracterizadas como forças concentradas nos nós, carregamentos distribuídos e forças de corpo (Madier, 2020).

Por sua vez, as condições de contorno de deslocamento referem-se às restrições impostas aos graus de liberdade de translação e/ou rotação do sistema (Kim; Sankar, 2009). Tais condições devem ser definidas de forma a gerar deformações e não movimentos de corpo rígido (Madier, 2020). Caso contrário, em uma análise linear estática, a matriz de rigidez global torna-se singular, o que resulta em erro durante a resolução do sistema de equações (20) (Kim; Sankar, 2009).

Já as condições de contorno de contato devem ser estabelecidas com rigor, pois essas determinam o tipo de análise a ser realizada (Madier, 2020). Nesse contexto, vale destacar que o *software* Ansys oferece uma variedade de tipos de contato entre os corpos. Sendo que, de acordo com o Ansys (2024), os principais tipos de contato disponíveis são: *Bonded*, *No Separation*, *Frictionless*, *Rough* e *Frictional*. Os contatos *Bonded* e *No Separation* permitem a realização de uma análise linear, uma vez que desconsideram os efeitos de atrito e impedem a separação entre os corpos (Ansys, 2024). Além disso, no contato *Bonded*, assume-se que os corpos estão soldados entre si, pois essa opção também restringe o deslizamento relativo entre as superfícies de contato (Azevedo, 2016).

Para a correta implementação dos diferentes tipos de contato em simulações numéricas, é essencial configurar tanto o método de detecção de contato quanto o algoritmo de resolução correspondente. Nesse contexto, as seções subsequentes apresentam as principais metodologias utilizadas na modelagem de contatos lineares utilizadas pelo *software* Ansys.

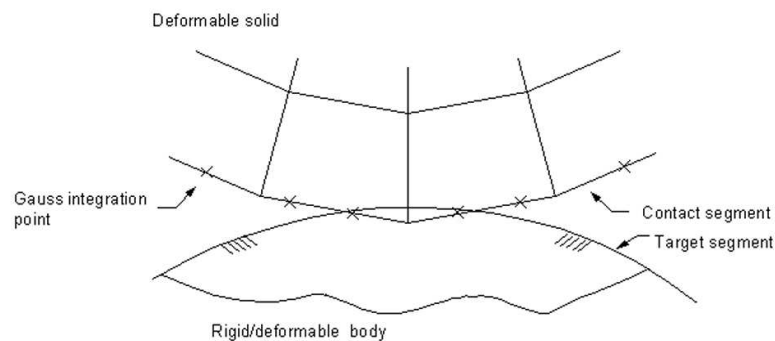
3.2.1.2.1. Modo de detecção de contato

No Ansys, os modos de detecção de contato disponíveis são: *nó-nó*, *nó-superfície* e *superfície-superfície* (Madenci; Guven, 2006). O primeiro modo exige que a interação por contato entre corpos discretizados ocorra por meio de nós com coordenadas coincidentes, o que requer malhas compatíveis entre os corpos (Madenci; Guven, 2006; Madier, 2020).

Em contrapartida, o segundo e o terceiro modo oferecem maior flexibilidade, pois permitem a modelagem de contatos entre malhas não compatíveis (Madenci; Guven, 2006). Além disso, o modo superfície–superfície é ideal para a modelagem de contato entre superfícies irregulares, pois promove uma distribuição mais suave e contínua da pressão de contato ao longo da interface entre os corpos (Madier, 2020).

Nos modos nó–superfície e superfície–superfície, as superfícies de contato são classificadas como escrava e mestra (Madenci; Guven, 2006). No primeiro caso, as forças de contato são transmitidas pelos nós dos elementos escravos, enquanto no segundo, a transferência de carga ocorre por meio dos pontos de Gauss (Figura 33) sendo que, de acordo com Ansys (2009), essa última abordagem proporciona resultados mais precisos.

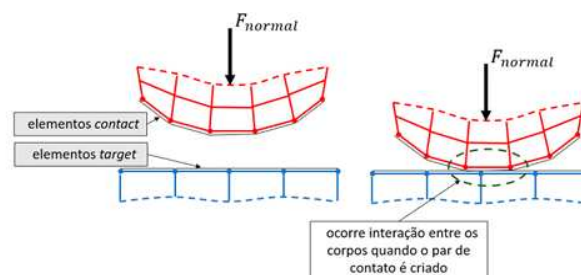
Figura 33 – Detecção de contato por meio dos pontos de Gauss



Fonte: Ansys (2009, p. 39).

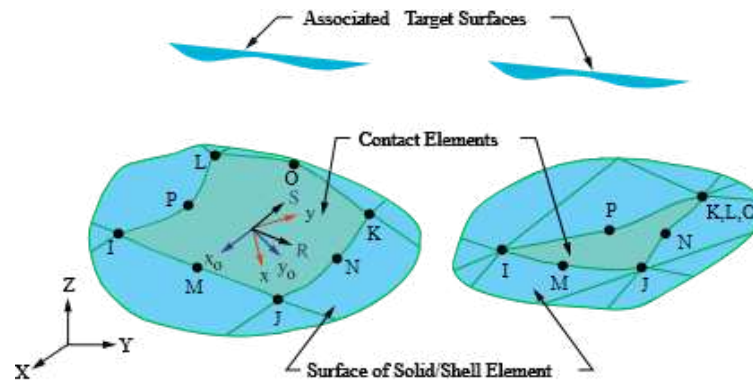
No Ansys, a superfície escrava é denominada *Contact*, enquanto a superfície mestra é referida como *Target* (Figura 34) (Ansys, 2009). Ambos os elementos apresentam o mesmo formato das faces dos elementos finitos sobre os quais se sobrepõem na região de contato, como ilustrado na Figura 35 (Ansys, 2009).

Figura 34 – Esquema de formulação



Fonte: Bartoli (2023, p. 51).

Figura 35 – Representação esquemática dos elementos de contato



Fonte: Ansys (2025, p. 564).

Para evitar erros numéricos durante a simulação, é essencial que a superfície *Contact* seja atribuída ao corpo com menores dimensões (Madier, 2020). Ansys (2009) recomenda o uso da ferramenta *Trim Contact* para remover os elementos que, sabidamente, não estão efetivamente em contato, diminuindo o custo computacional da simulação.

Caso a definição convencional não seja viável, recomenda-se a criação de dois pares de contato, em que ambas as superfícies são simultaneamente consideradas como escrava e mestra (Ansys, 2009; Mandier, 2020). No *software* Ansys, essa configuração é denominada *Symmetric*, enquanto a abordagem com apenas um par de contato recebe a designação *Asymmetric* (Ansys, 2009).

O *software* Ansys oferece diversos métodos de detecção de contato para ambos os modos. No modo nó-superfície, estão disponíveis os métodos *Nodal-Normal From Contact* e *Nodal-Normal From Target*. Já no modo superfície-superfície, os métodos incluem *On Gauss Point*, *Nodal-Projected Normal From Contact* e *Nodal-Dual Shape Function Projection* (Ansys, 2009).

3.2.1.2.2. Algoritmo de detecção de contato

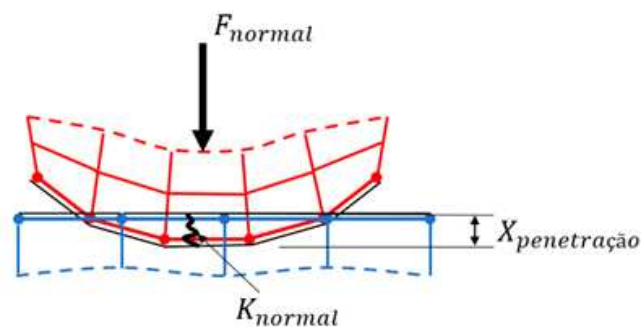
A intensidade das forças de contato são calculadas com base na penetração virtual dos nós escravos (ou dos pontos de Gauss) na superfície mestra, calculada por meio de algoritmos específicos para a detecção de contato. Tais algoritmos calculam, primariamente, a distância entre as superfícies escrava e mestra para verificar se o contato está aberto ou fechado (Madier, 2020).

Caso o contato esteja fechado, o algoritmo aplica às forças de reação em cada corpo, calculando tais carregamentos com base na rigidez das superfícies de contato. Por outro lado, se o contato estiver aberto, nenhuma força de reação é aplicada sobre as superfícies (Madier, 2020).

No software Ansys, os algoritmos utilizados para detecção de contato incluem: *Pure Penalty*, *Augmented Lagrange*, *Normal Lagrange*, *MPC* e *Beam*. Dentre eles, o método *Augmented Lagrange* se destaca, sendo derivado do algoritmo *Pure Penalty* (Ansys, 2024).

O algoritmo *Pure Penalty* impõe uma rigidez artificial na interface de contato com o objetivo de impedir a penetração entre os corpos (Bartoli, 2023). Essa rigidez é representada pela introdução de uma mola fictícia na região onde há possibilidade de contato, como ilustrado na Figura 36 (Alves Filho, 2012).

Figura 36 – Representação esquemática da formulação do algoritmo *Pure Penalty*



Fonte: Bartoli (2023, p. 52)

Aplicando-se a terceira lei de Newton na região de contato, as forças de contato resultantes são iguais à força normal F_{normal} , onde segundo Bartoli (2023), tal carregamento é proporcional ao deslocamento relativo X_P entre as superfícies em contato e à rigidez de contato normal K_{normal} , ou seja:

$$F_{normal} = K_{normal} \cdot X_P \quad (22)$$

Para evitar erros numéricos, é essencial que nem os nós escravos nem os pontos de Gauss ultrapassem a superfície mestra (Madier, 2020). No entanto, o algoritmo *Pure Penalty* apresenta limitações na busca por uma solução precisa, pois, a tentativa de eliminar totalmente a penetração pode resultar em uma rigidez artificial

excessivamente elevada (Bartoli, 2023). Quando essa rigidez tende ao infinito, a estabilidade numérica do sistema pode ser comprometida, dificultando a convergência da solução (Alves Filho, 2012).

Para resolver essa limitação, o algoritmo *Augmented Lagrange* introduz um multiplicador de Lagrange λ à equação do método de *Pure Penalty*, com o intuito de melhorar a convergência da solução (Bartoli, 2023). Pois, esse termo adicional permite controlar a penetração com mais precisão, sem introduzir uma rigidez excessiva ao modelo (Bartoli, 2023). Dessa forma, a Equação 22 pode ser reescrita como:

$$F_{normal} = (K_{normal} \cdot X_P) + \lambda \quad (23)$$

Em ambos os algoritmos, é imprescindível que o usuário defina manualmente o valor da rigidez de contato a ser utilizada (Bartoli, 2023). Caso esse parâmetro não seja especificado, o programa adotará um valor padrão, o que pode comprometer a precisão dos resultados (Bartoli, 2023). Além disso, para evitar erros significativos no comportamento local da região de contato, é fundamental assegurar que a penetração da superfície escrava na superfície mestra permaneça dentro dos limites da tolerância especificada (Madier, 2020).

O algoritmo *Normal Lagrange* introduz um grau de liberdade (GDL) adicional para garantir a compatibilidade nas condições de contato entre os corpos. Diferentemente dos métodos baseados em penalidade, esse algoritmo determina a magnitude da força de contato diretamente a partir do valor associado a esse GDL adicional (Bartoli, 2023).

O algoritmo *Normal Lagrange* pode apresentar dificuldades de convergência e provocar um aumento significativo no tempo de processamento da análise MEF (Bartoli, 2023). Pois, durante a simulação, existe a tendência do contato oscilar entre os estados de abertura e fechamento, sem atingir uma estabilização adequada (Carvalho, [2025?]).

4. DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo, são apresentadas as etapas de desenvolvimento realizado com base na metodologia apresentada anteriormente. Inicialmente, descreve-se o processo de criação do modelo digital de cada componente estrutural analisado. Posteriormente, detalha-se a elaboração do modelo de elementos finitos.

4.1. DESENVOLVIMENTO DO MODELO DIGITAL

Nesta seção, descreve-se a aplicação do processo de engenharia reversa, o qual envolveu o desenvolvimento do modelo digital para cada componente dos CCTs de vagões gôndola GDU. As Figuras 37 e 38 apresentam alguns dos modelos físicos utilizados nesse processo.

Figura 37 – Modelo Físico dos componentes estudados



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 38 – Modelo Físico dos componentes estudados



Fonte: Autoria própria (2025).

A adoção desse procedimento justifica-se pelos custos envolvidos e pelo tempo de execução do processo de engenharia reversa, visto que os modelos digitais obtidos servirão de base para análises futuras. Para os propósitos do presente estudo, o modelo de elementos finitos foi representado apenas com os componentes considerados relevantes para a análise proposta.

Desse modo, os sistemas multicorpos elaborados para os CCTs fixo e rotativo foram constituídos pelos seguintes componentes: Engate, Mandíbula, Castanha, Braçadeira e Pino de Conexão. No modelo do CCT rotativo, inclui-se ainda o Colar. Em contrapartida, tanto o Aparelho de Choque e Tração quanto a Cruzeta foram desconsiderados da modelagem, em virtude do comportamento não linear dos elementos elásticos do ACT.

4.1.1. Processo de escaneamento das peças

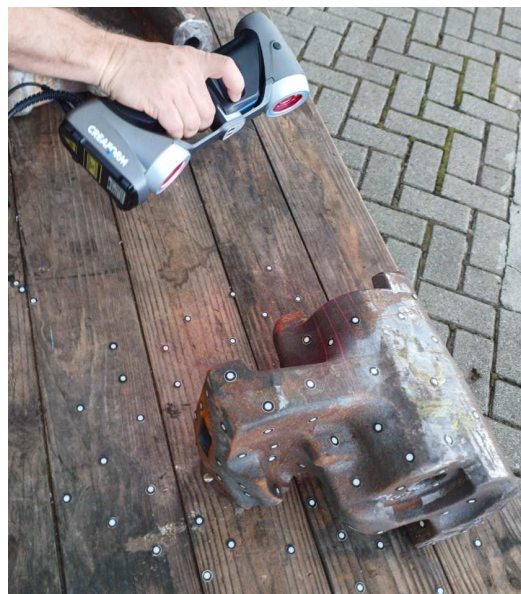
Antes de se iniciar a digitalização dos componentes, procedeu-se à calibração do *scanner* HandySCAN 307, utilizando-se o *software* VXscan. Essa etapa é

essencial, pois alterações no ambiente ou a baixa qualidade da superfície podem comprometer a precisão dos dados coletados pelo equipamento.

Durante o processo de digitalização, os alvos foram preferencialmente fixados em regiões planas das superfícies, respeitando-se uma distância máxima de 3 mm entre os marcadores e as bordas da peça. Essa estratégia visou minimizar distorções nas extremidades das peças, considerando que o algoritmo do *software* VXscan foi configurado para preencher automaticamente os espaços ocupados pela presença dos alvos na malha poligonal.

Nesse contexto, a Figura 39 ilustra o processo de digitalização de uma das mandíbulas, enquanto a Figura 40 exhibe, na tela do notebook, a geração em tempo real da malha poligonal desse componente. A Figura 41, por sua vez, detalha uma região ampliada dessa malha e a respectiva nuvem de pontos.

Figura 39 – Digitalização da mandíbula



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 40 – Geração da malha poligonal no VXscan



Fonte: Autoria própria (2025).

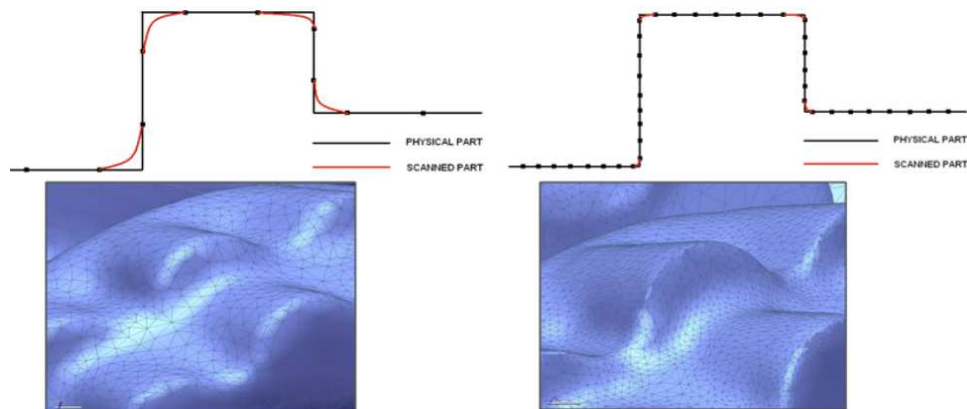
Figura 41 – Estrutura da malha poligonal e da nuvem de pontos



Fonte: Autoria própria (2025).

A Figura 42 demonstra que a resolução de digitalização impacta diretamente o comprimento das arestas que constituem cada face da malha poligonal. À esquerda, é apresentada uma malha gerada com baixa resolução, enquanto à direita, uma com alta resolução. Desse modo, uma resolução superior permite representar os componentes digitalizados com maior precisão, visto que viabiliza a captura de um maior nível de detalhe.

Figura 42 – Comparação entre diferentes parâmetros de resolução da digitalização



Fonte: Autoria própria (2025).

Portanto, devido às diferentes dimensões das peças digitalizadas, foram adotadas resoluções distintas para o escaneamento de cada componente. Essa escolha teve como objetivo viabilizar a captura de detalhes significativos para as análises MEF e, ao mesmo tempo, permitir que as simulações fossem realizadas em um tempo de processamento razoável. Tal abordagem justifica-se, pelo fato de que a

quantidade de triângulos na malha resultante influencia diretamente o tamanho do arquivo STL.

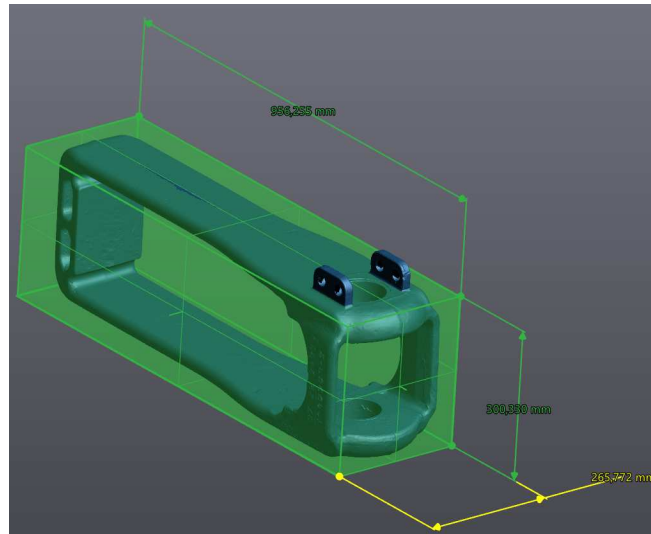
A Tabela 1 apresenta os dados referentes às dimensões dos componentes analisados neste estudo, juntamente com a resolução de digitalização utilizada no processo de escaneamento e o respectivo tamanho do arquivo STL. Devido à complexidade geométrica das peças, os dados das dimensões de cada componente foram obtidos considerando-se que cada malha estava contida em uma caixa retangular, conforme ilustrado na Figuras 43.

Tabela 1 – Dados da malha digitalizada e resolução da digitalização

Nome da peça	Valores aproximados			Resolução [mm]	Tamanho do arquivo STL [MB]
	Comprimento [mm]	Largura [mm]	Altura [mm]		
Braçadeira Rotativa	956,255	265,772	300,330	0,5	315
Braçadeira Fixa	1006,859	289,953	299,861	0,5	550
Colar	254,286	169,720	254,286	0,3	237
Engate fixo	972,047	575,294	502,575	0,5	482
Engate Rotativa	950,142	578,779	511,493	0,5	447
Mandíbula	296,779	223,631	280,919	0,3	239
Castanha	90,725	90,162	303,920	0,3	69,5
Pino da Mandíbula	353,638	53,409	52,594	0,3	42,4
Pino de Conexão Fixo	54,007	54,329	354,651	0,3	78,5

Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 43 – Malha poligonal contida em caixa para medições



Fonte: Autoria própria (2025).

Em virtude da complexidade geométrica e das dimensões de alguns dos componentes analisados, tornou-se necessária a realização de múltiplas digitalizações das superfícies externas, a fim de assegurar a captura integral das geometrias estudadas. Para viabilizar a integração das diferentes séries de dados obtidas nesses processos, todos os escaneamentos foram realizados com a mesma resolução.

Além disso, como algumas das peças analisadas apresentam cavidades internas que não podem ser escaneadas pelo HandySCAN 307, optou-se por seccioná-las por meio de corte com serra-fita, conforme ilustrado na Figura 44. A Figura 44 também apresenta uma das peças já cortadas por esse procedimento.

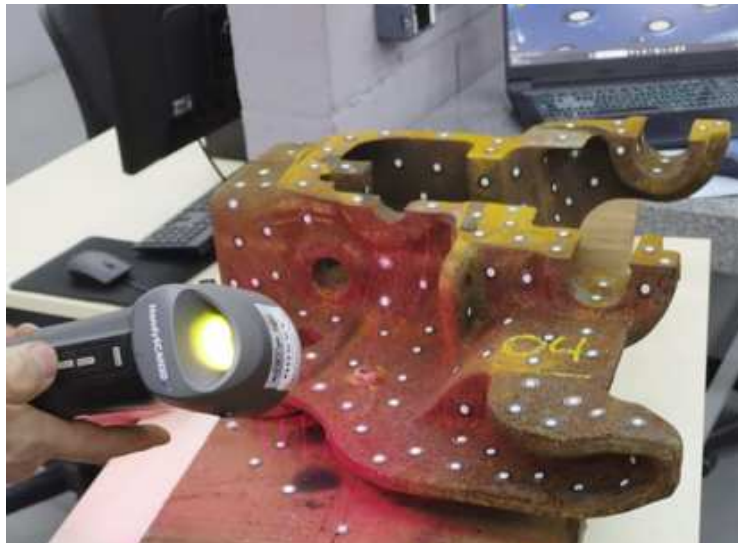
Figura 44 – Engate Rotativa submetido ao processo de corte



Fonte: Autoria própria (2025).

As Figuras 45 e 46 ilustram o processo de escaneamento realizado para cada fragmento. A aquisição dos dados foi dividida em duas etapas independentes, cada uma dedicada à digitalização de um dos lados dos elementos. Essa abordagem teve como objetivo facilitar a posterior integração das nuvens de pontos obtidas com aquelas geradas durante o escaneamento das superfícies externas dos componentes.

Figura 45 – Digitalização de uma das parte do Engate rotativo



Fonte: Autoria própria (2025).

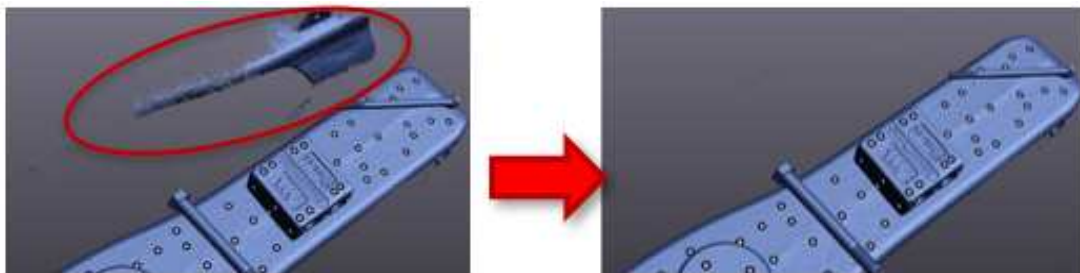
Figura 46 – Escaneamento de partes da haste rotativa do engate



Fonte: Autoria própria (2025).

Na etapa final da primeira fase do processo de engenharia reversa, realizou-se a remoção dos dados indesejados provenientes da digitalização de elementos não pertencentes à peça, como partes do ambiente ou de outros objetos, como destacado na Figura 47. Com o intuito de otimizar o tempo de escaneamento, múltiplos componentes foram digitalizados simultaneamente, o que também pode ser observado na Figura 47. Em razão disso, nessa etapa também foi realizada a separação dos dados correspondentes a cada componente.

Figura 47 – Remoção de dados indesejados do escaneamento



Fonte: Autoria própria (2025).

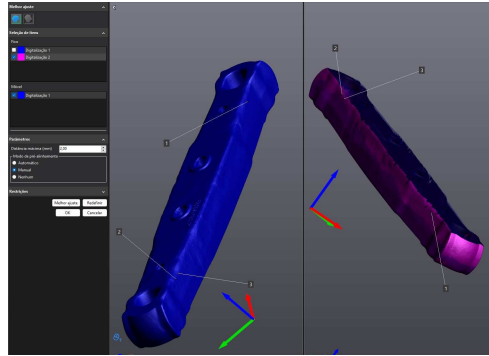
Concluída a aquisição dos dados geométricos de cada elemento, deu-se início à segunda fase do processo de engenharia reversa, cujos procedimentos são descritos na seção seguinte. Nessa etapa, todas as malhas poligonais correspondentes às peças foram importadas para o *software* VXmodel, com o objetivo de reconstruir integralmente os respectivos modelos digitais.

4.1.2. Processo de reconstrução das malhas

Para a construção de um modelo digital que represente integralmente cada componente, procedeu-se, em primeiro lugar, ao alinhamento das malhas correspondentes a cada fragmento da peça. Essa etapa tem por finalidade viabilizar a fusão das distintas séries de dados obtidas durante o escaneamento dos objetos.

Destaca-se, que o alinhamento das malhas poligonais foi executado automaticamente pelo *software* VXmodel. Para assegurar um ajuste ótimo entre as diferentes séries de dados, realizou-se previamente um pré-alinhamento, no qual foram fornecidos ao programa três pontos correspondentes entre as superfícies (Figura 48).

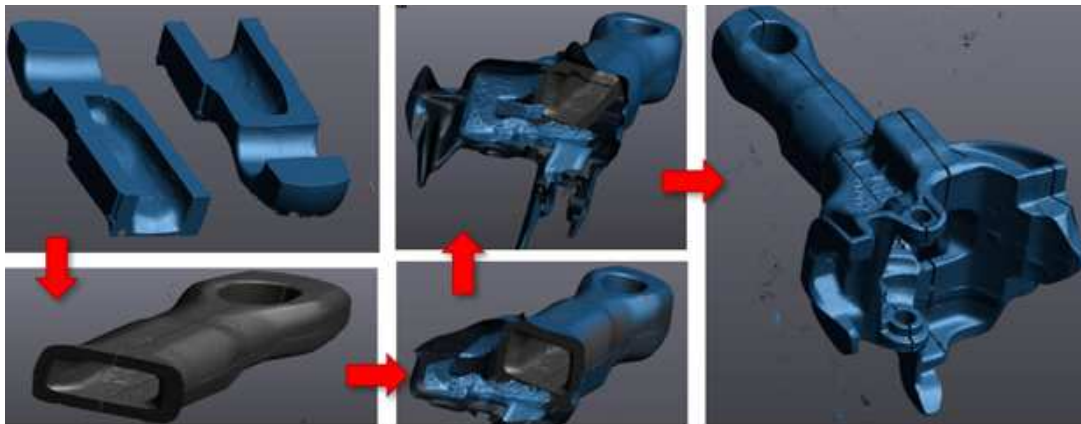
Figura 48 – Identificação dos pontos de correspondência entre as malhas



Fonte: Autoria própria (2025).

Posteriormente, as malhas poligonais foram fundidas usando a função *Fundir* do *software* VXmodel. Para os componentes ocios, a reconstrução iniciou-se com a geração das malhas correspondentes às regiões seccionadas, as quais, na sequência, foram alinhadas aos dados oriundos do escaneamento das superfícies externas. A Figura 49 exemplifica a aplicação desse procedimento na modelagem do engate rotativo.

Figura 49 – Procedimento de alinhamento e fusão de malhas



Fonte: Autoria própria (2025).

A Figura 49 evidencia a presença de diversas folgas entre as malhas correspondentes às diferentes partes segmentadas da peça. Essas lacunas são decorrentes do processo de corte com serra-fita, que promove a remoção de material na forma de cavacos oriundos da ação dos dentes da lâmina durante o avanço da serra. Para ilustrar esse fenômeno, a Figura 50 apresenta as estrias deixadas pela lâmina ao longo do processo de seccionamento.

Figura 50 – Estrias resultantes do atrito com a lateral da lâmina



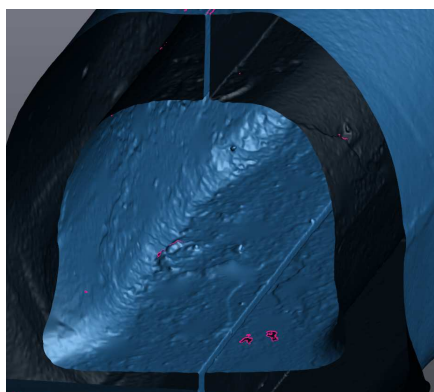
Fonte: Autoria própria (2025).

Durante o avanço da serra-fita, podem surgir irregularidades na superfície de corte, decorrentes de imperfeições nos dentes da lâmina ou da remoção inadequada de cavacos. Para quantificar esses efeitos, foram utilizadas as ferramentas de controle de qualidade disponíveis no *software* VXmodel, conforme descrito no Anexo C.

Na sequência, realizou-se a avaliação da espessura das folgas entre as superfícies de corte, com o objetivo de caracterizar as discontinuidades geradas durante o processo de seccionamento. Esse procedimento também está documentado no Anexo C.

Concluída essa etapa, procedeu-se à fusão das malhas, conforme ilustrado na Figura 51. Observa-se, na mesma imagem, que a presença das folgas entre as superfícies de corte impossibilitou a geração de uma superfície completamente contínua que representasse fielmente a geometria original do componente.

Figura 51 – Resultado da fusão das malhas do engate rotativo

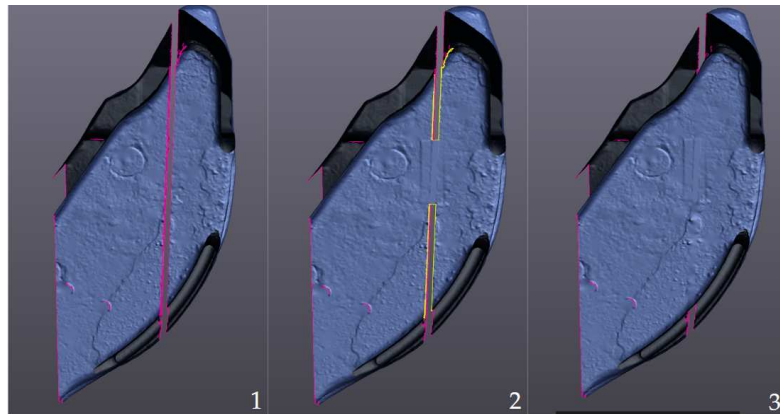


Fonte: Autoria própria (2025).

Diante dessa limitação, optou-se por remover as regiões adjacentes às superfícies de corte nas malhas resultantes. Em seguida, com o objetivo de viabilizar a união entre os fragmentos, empregou-se a ferramenta *Preencher Furos* do software *VXmodel*, a qual permite a geração de elementos triangulares nos espaços vazios delimitados por contornos fechados.

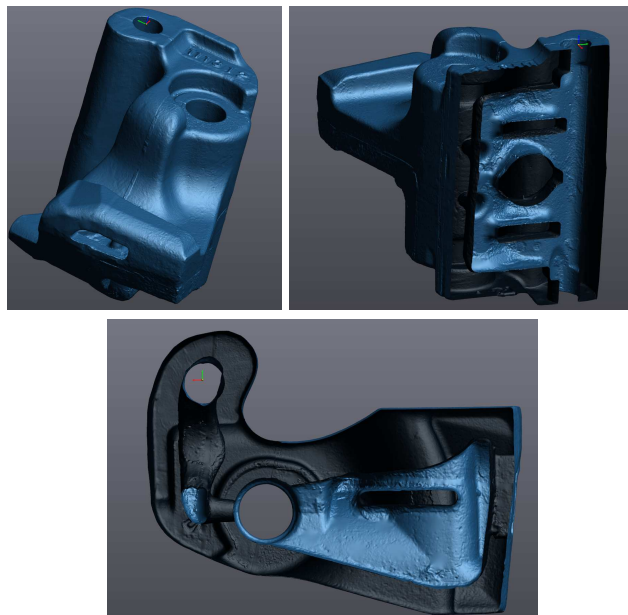
Para isso, pequenas porções de malha foram inseridas nas regiões planas localizadas entre as extremidades das folgas. A Figura 52 ilustra esse procedimento, enquanto a Figura 53 apresenta o resultado da malha gerada para uma das mandíbulas

Figura 52 – (1) Espaço vazio, (2) Segmento de malha fundido e (3) Resultado



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 53 – Malha resultante que representa a estrutura da mandíbula



Fonte: Autoria própria (2025).

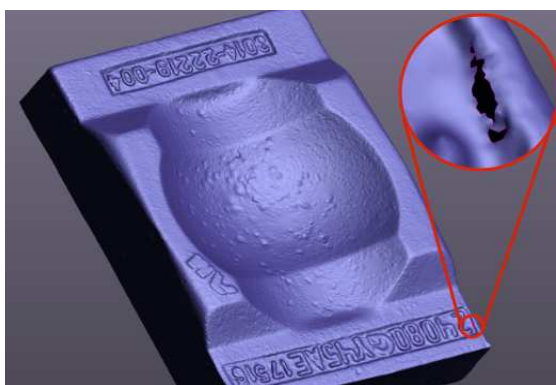
Após a geração das malhas que descrevem integralmente a estrutura de cada componente, aplicaram-se diversos métodos de aprimoramento e edição de malha disponíveis no *software* VXmodel. Essa etapa mostrou-se indispensável, pois a presença de ruídos nas superfícies poderia comprometer a qualidade dos modelos digitais. Tais procedimentos serão detalhados nas seções seguintes.

4.1.2.1. Processo de aprimoramento das malhas

O aprimoramento das malhas teve início com o preenchimento dos espaços vazios gerados por falhas de oclusão durante o processo de escaneamento, as quais foram atribuídas à complexidade geométrica das peças. Esses vazios foram classificados em *pequenos* ou *grandes*, de acordo com o nível de reparo exigido.

A Figura 54 mostra uma falha classificada como pequenos espaços vazios presente no modelo escaneado da cruzeta. Ressalte-se que a correção dessas regiões foi executada automaticamente no *software* VXmodel, por meio da função *Preencher Furos*.

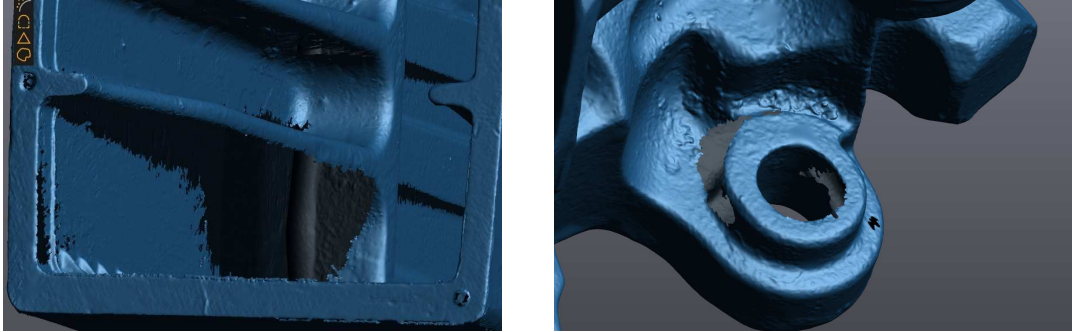
Figura 54 – Exemplo de uma falha do tipo pequeno espaço vazio



Fonte: Autoria própria (2025).

Para exemplificar uma falha do tipo grandes espaços vazios, a Figura 55 apresenta esse tipo de falha observada nas malhas correspondentes ao ponteira (a esquerda) e a um dos engates (a direita). Devido às dimensões dessas lacunas, optou-se pela restauração manual das malhas, uma vez que observou-se que a utilização da ferramenta *Preencher Furos* resultava em superfícies incompatíveis com a geometria real das peças.

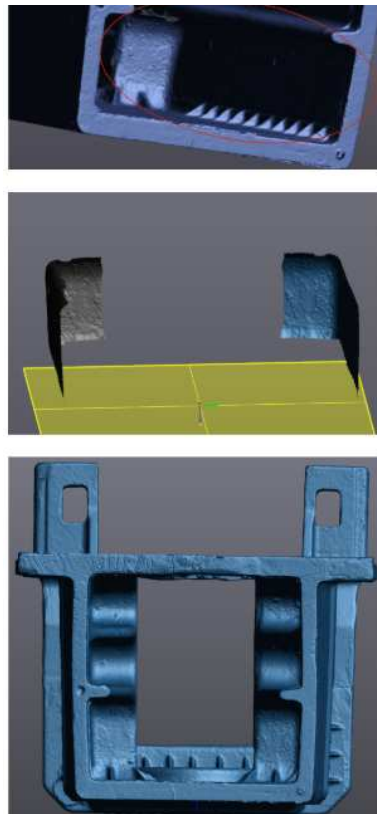
Figura 55 – Exemplos de grandes espaços vazios



Fonte: Autoria própria (2025).

Para ilustrar esse procedimento, a Figura 56 apresenta a reconstrução da região não escaneada da ponteira. Durante essa etapa, em razão da simetria do componente, duplicou-se o trecho digitalizado da malha e, em seguida, realizou-se o espelhamento da cópia gerada. Na sequência, procedeu-se ao alinhamento dessa nova região à malha original.

Figura 56 – Processo de correção manual da malha do ponteira



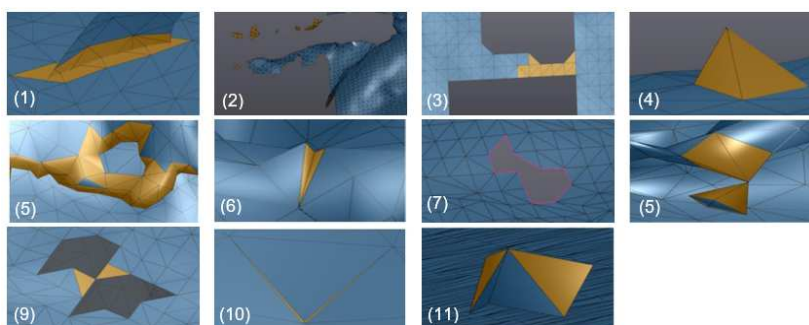
Fonte: Autoria própria (2025).

A etapa subsequente do processo de aprimoramento das malhas poligonais constituiu na execução dos procedimentos de limpeza realizados com as funções *Limpar Malha*, *Suavizar Malha* e *Desfigurar*, disponibilizadas pelo software VXmodel. A aplicação desses recursos será abordada nas seções subsequentes.

4.1.2.2. Aplicação da função *Limpar Malha*

O processo de limpeza dos modelos poligonais teve início com a aplicação da ferramenta *Limpar Malha*, que realizou a remoção automática de triângulos anômalos, similares àqueles ilustrados na Figura 57.

Figura 57 – Exemplo de triângulos anômalos em uma malha poligonal



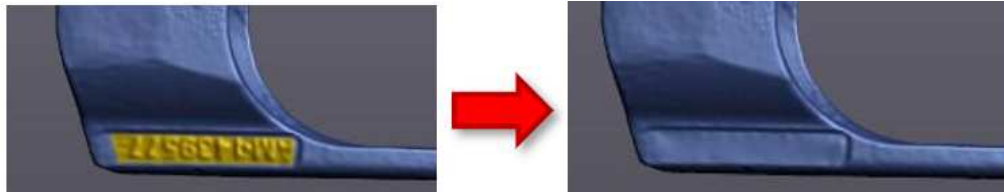
Fonte: Autoria própria (2025).

Na sequência, foi aplicada a ferramenta *Suavizar Malha*, com o objetivo de mitigar os ruídos e irregularidades presentes nos modelos poligonais. Tal procedimento revelou-se necessário em razão da alta precisão do scanner HandySCAN 307, que capturou com elevado grau de fidelidade as imperfeições dos modelos físicos, decorrentes tanto do processo de fabricação por fundição quanto da degradação provocada pela oxidação do material.

Considerando-se que o próprio processo de suavização pode introduzir erros geométricos nos modelos digitais dos componentes, procedeu-se à avaliação da confiabilidade das malhas suavizadas, cujo detalhamento encontra-se no Anexo D. Ressalta-se que, para essa análise, adotou-se como critério de aceitação que, no mínimo, 95% dos pontos estejam contidos no intervalo de tolerância de $\pm 0,20$ mm em relação a posição dos pontos originais.

Por fim, a etapa final do processo de limpeza das malhas consistiu na aplicação da função *Desfigurar*, utilizada para remover características geométricas irrelevantes à análise MEF, tais como as marcas de estampagem presentes nos componentes, conforme ilustrado na Figura 58

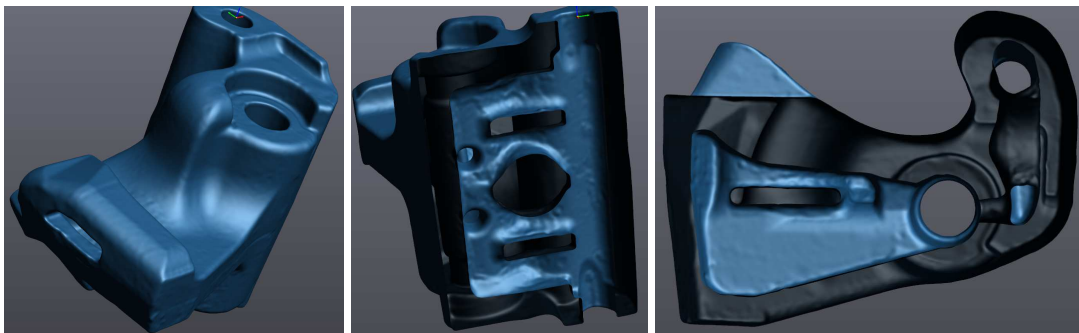
Figura 58 – Exemplo de aplicação da ferramenta Desfigurar



Fonte: Autoria própria (2025).

Esse procedimento viabilizou a remoção de características geométricas irrelevantes, reduzindo o custo computacional das simulações numéricas, além de eliminar elementos que poderiam induzir concentrações de tensões capazes de comprometer a confiabilidade dos resultados. Nesse contexto, a Figura 59 apresenta o resultado do processo de limpeza da malha aplicada ao modelo poligonal ilustrado na Figura 53.

Figura 59 – Malha resultante após o processo de limpeza



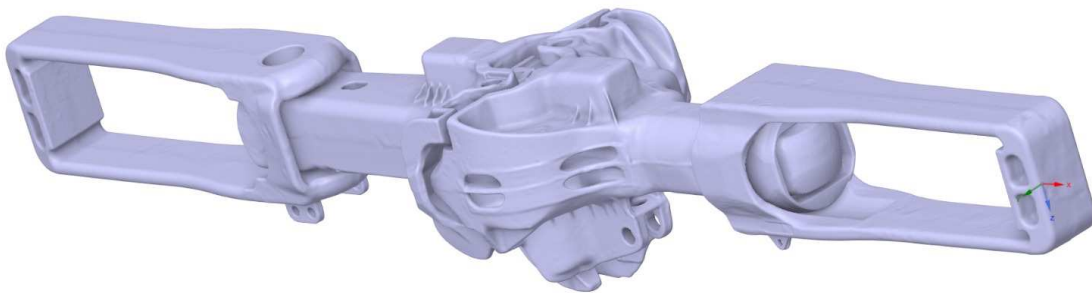
Fonte: Autoria própria (2025).

Concluída a geração dos arquivos STL correspondentes a cada peça digitalizada, deu-se início à montagem do sistema multicorpo representativo dos sistemas estruturais em estudo. Esse procedimento será detalhado na seção seguinte.

4.1.2.3. Aplicação da ferramenta *Limpar Malha*

Para a montagem do sistema multicorpo, os arquivos STL correspondentes aos modelos digitais dos componentes foram importados simultaneamente para o *software* Ansys SpaceClaim, pertencentes à plataforma Ansys Workbench. Esse procedimento possibilitou o posicionamento adequado de cada peça, de modo a reproduzir as interações entre os componentes. A Figura 60 apresenta o modelo resultante no ambiente do *SpaceClaim*.

Figura 60 – Sistema multicorpos resultante



Fonte: Autoria própria (2025).

Durante esse processo, as regiões de contato foram definidas com base em estudos bibliográficos e na análise dos modelos físicos empregados no processo de engenharia reversa. A Figura 61 ilustra essa avaliação, evidenciando o contato existente entre a mandíbula e a castanha.

Figura 61 – Contato entre a mandíbula e a castanha



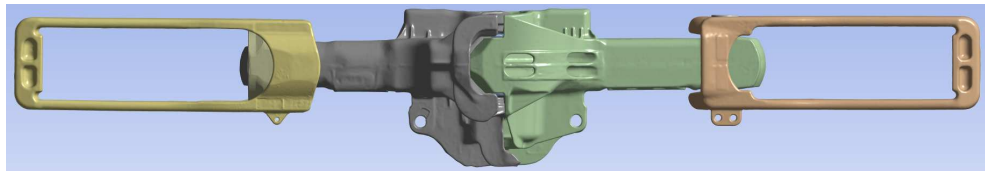
Fonte: Autoria própria (2025).

Para a realização das simulações numéricas, o sistema multicorpo foi importado para o ambiente *Static Structural* do Ansys Workbench. A seção subsequente descreve o processo de construção do modelo de elementos finitos nesse módulo.

4.2. DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

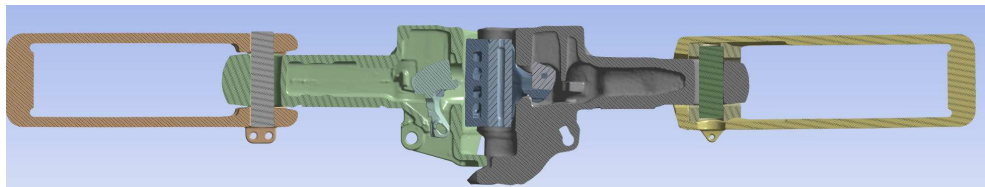
A Figura 62 exibe o sistema multicorpo já importado para o módulo *Static Structural* do Ansys Workbench, enquanto a Figura 63 apresenta uma vista em corte longitudinal que permite a visualização das características internas do conjunto.

Figura 62 – Sistema multicorpos no Static Structural do ANSYS



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 63 – Visualização dos componentes internos após importação



Fonte: Autoria própria (2025).

De acordo com a metodologia adotada para a análise estrutural usando o Método dos Elementos Finitos, além das informações geométricas do sistema estrutural, é indispensáveis definir as propriedades mecânicas dos materiais envolvidos. Nesse contexto, a seção seguinte descreve as especificações dos materiais atribuídos aos componentes analisados.

Na sequência, serão apresentados o processo de discretização dos modelos digitais dos componentes analisados e a definição das condições de contorno que representam o problema físico em estudo, juntamente com as hipóteses adotadas para a implementação desses procedimentos.

4.2.1. Definição dos materiais

Diante da dificuldade em obter as propriedades mecânicas do aço fundido grau E e do aço grau 1060, adotou-se, como hipótese simplificadora, que os componentes analisados são fabricados em ferro fundido cinzento. As propriedades desse material, fornecidas pelo *software* Ansys Mechanical, estão apresentadas na Figura 64.

Figura 64 – Propriedades mecânicas do ferro fundido cinzento

Structural	
▼ Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	1,1e+05 MPa
Poisson's Ratio	0,28000
Bulk Modulus	83333 MPa
Shear Modulus	42969 MPa
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	1,1e-05 1/°C
Compressive Ultimate Strength	820,00 MPa
Compressive Yield Strength	0 MPa
Tensile Ultimate Strength	240,00 MPa
Tensile Yield Strength	0 MPa

Fonte: A autoria própria (2025).

A adoção de um material mais frágil como hipótese simplificadora em uma análise de tensões, revela-se uma abordagem adequada, pois pouco influencia a determinação do campo de tensões e representa um critério conservador para uma eventual análise de falha.

4.2.2. Discretização do modelo multicorpos

Tendo em vista que o elemento finito TET10 proporciona uma representação mais precisa das geometrias tridimensionais curvas, e favorece a convergência da análise MEF, optou-se por discretizar os componentes avaliados por meio de uma malha composta exclusivamente por esse tipo de elemento.

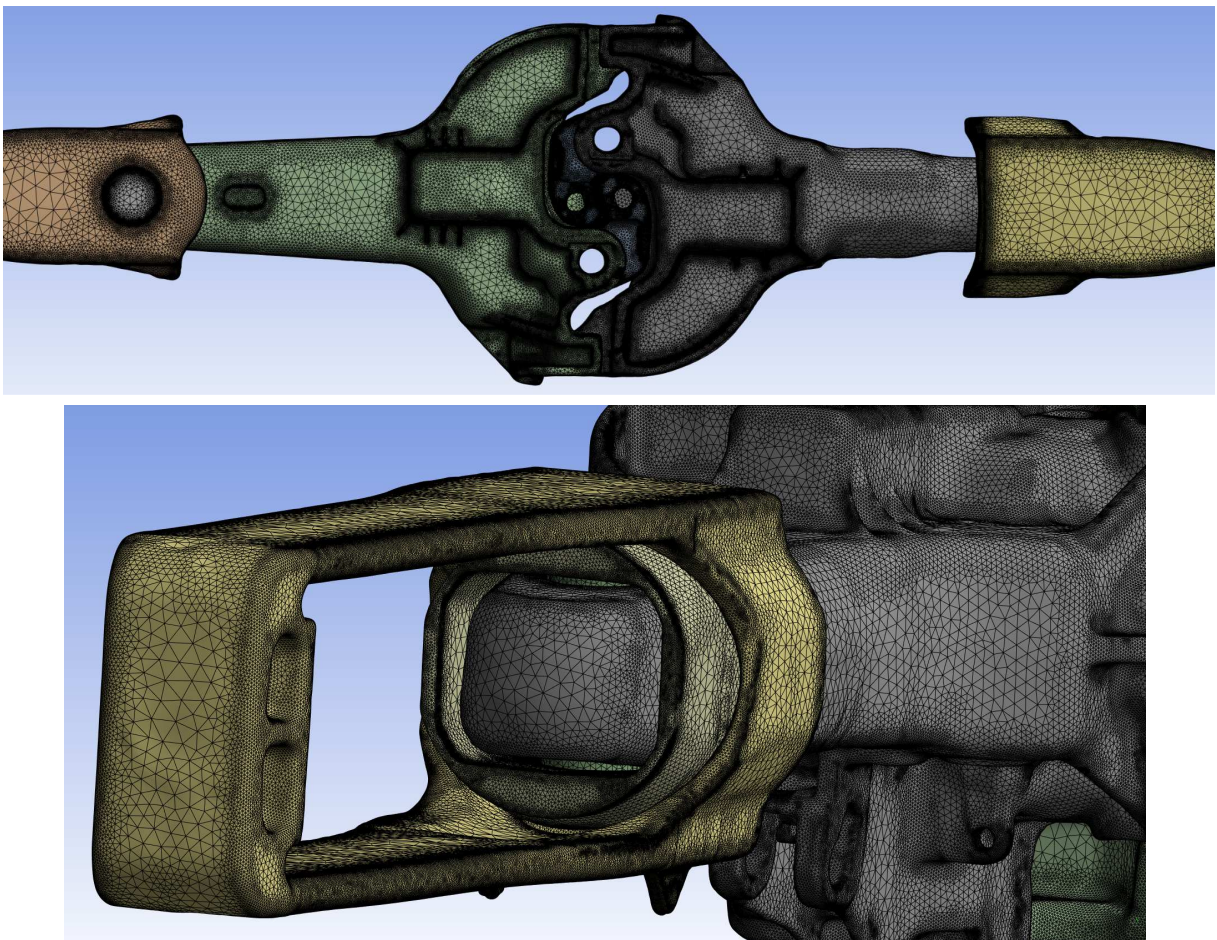
Em razão da complexidade geométrica das peças, procurou-se, durante o processo de refinamento das malhas, equilibrar a qualidade dos resultados obtidos com o custo computacional da análise. Para tanto, adotou-se, em cada componente,

uma malha fina nas regiões críticas, enquanto empregou-se uma malha relativamente grosseira nas áreas em que se espera uma distribuição mais uniforme das tensões.

Essa estratégia, baseou-se no princípio de Saint-Venant, que estabelece que a distribuição de tensões tende a se tornar uniforme em regiões distantes do ponto de aplicação das cargas, devido ao efeito de dissipação das tensões locais (Hibbeler, 2010). Além disso, para viabilizar o processo de refinamento, adotou-se o método *Patch Independent*, que executa automaticamente o refinamento local em regiões críticas dos modelos, preservando, sempre que possível, o tamanho global dos elementos (Ansys, 2024).

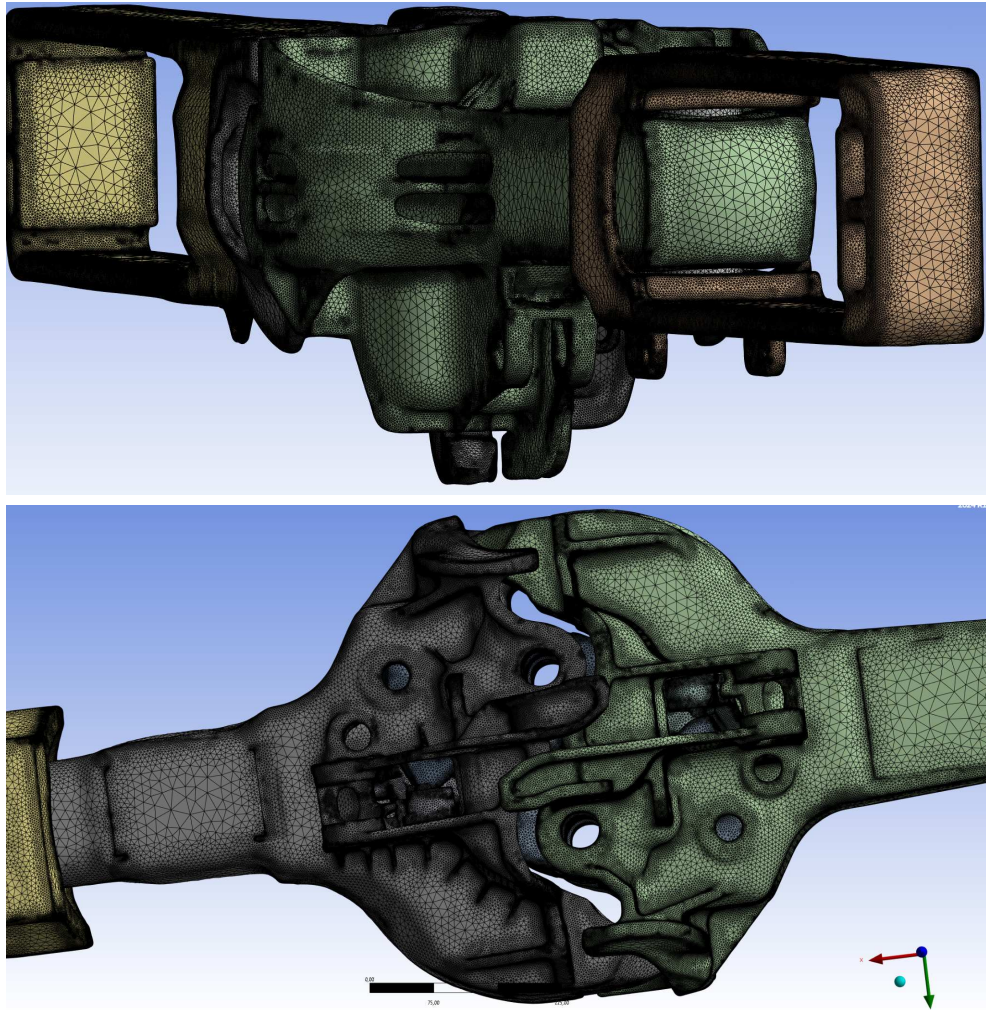
Para a definição da densidade das malhas, foram estabelecidos controles globais e locais de discretização, fundamentados em um estudo de convergência. As Figuras 65 e 66 apresentam a configuração das malhas obtidas ao término do processo de refinamento, enquanto a Figura 67 ilustra sua estrutura interna.

Figura 65 – Malha resultado do processo de discretização



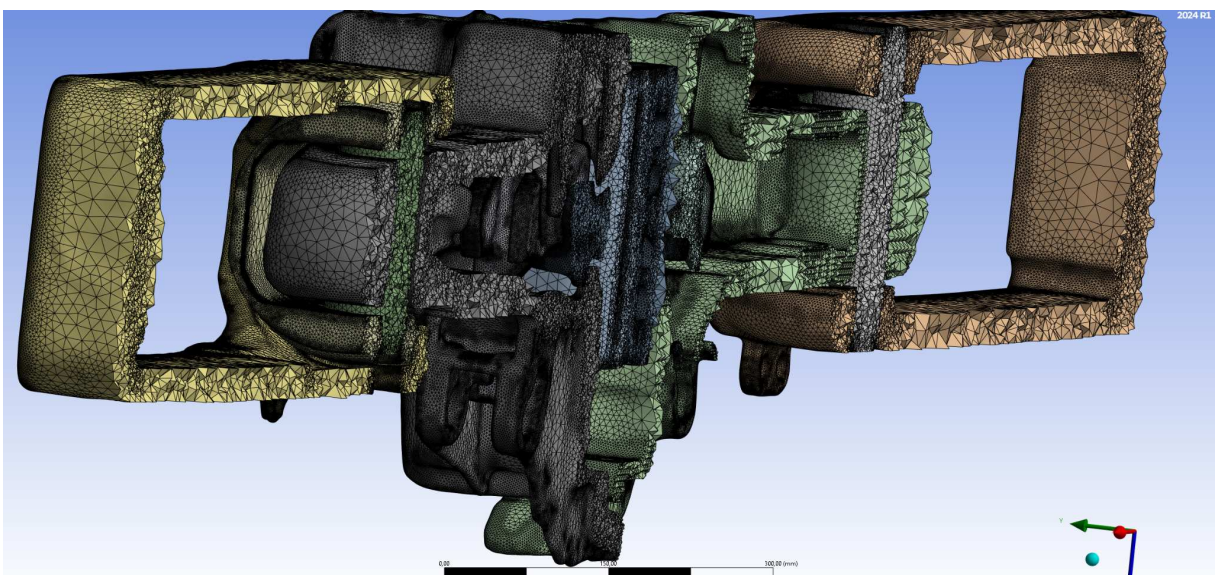
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 66 – Malha resultado do processo de discretização



Fonte: Autoria própria (2025).

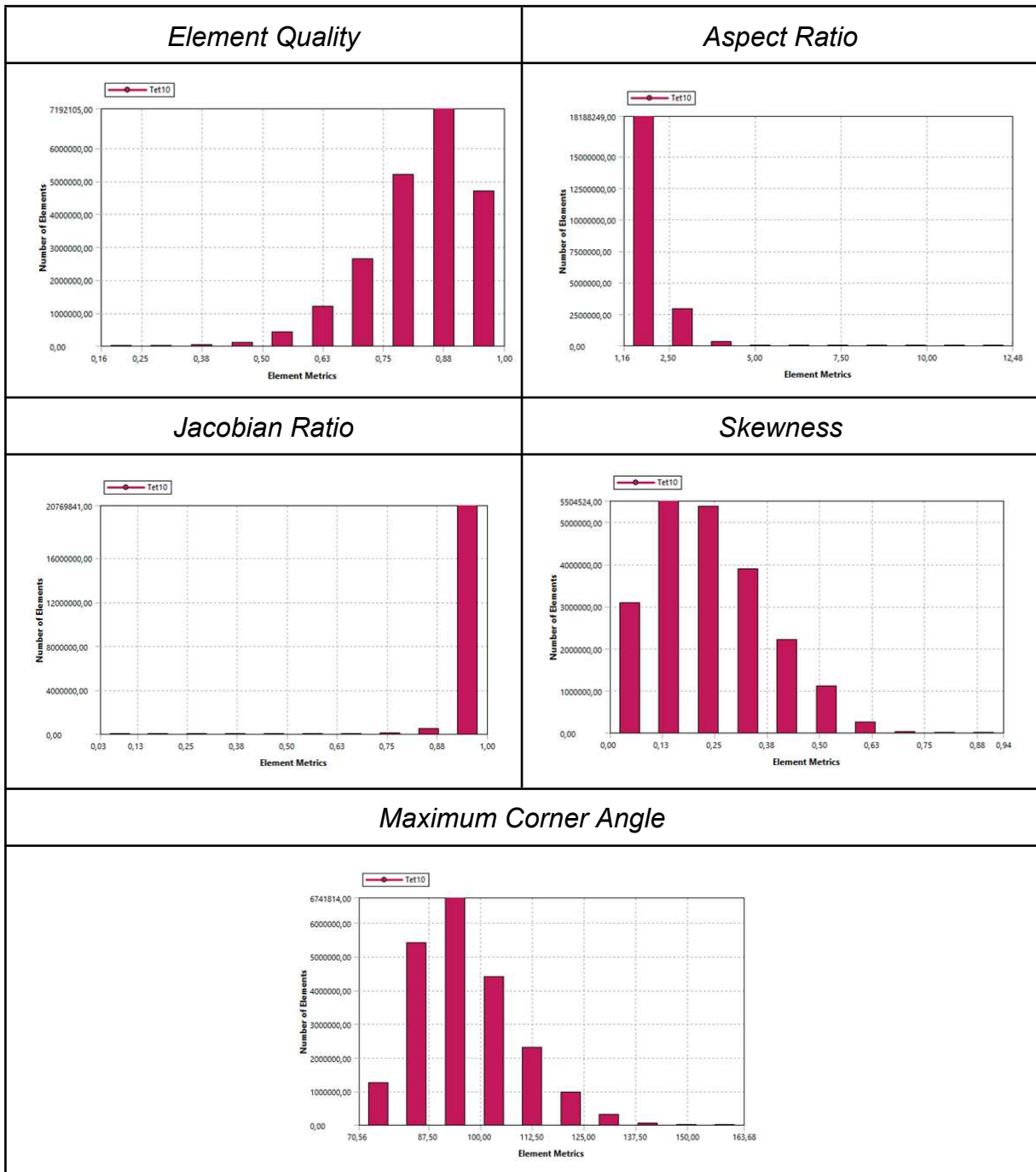
Figura 67 – Vista interna dos elementos internos da malha resultante



Fonte: Autoria própria (2025)

Observa-se na Figura 67 que as malhas resultantes apresentam qualidade visualmente satisfatória, caracterizada pela presença de, no mínimo, três elementos distribuídos ao longo da espessura das peças. Para avaliar quantitativamente a qualidade das malhas, na Figura 68 são apresentadas as principais métricas associadas aos elementos TET10 existentes no modelo.

Figura 68 – Métricas de qualidade



Fonte: Autoria própria (2025).

Conforme ilustrado na Figura 68, as malhas geradas para os componentes do sistema demonstram uma alta qualidade, evidenciada pelos valores máximos próximos de 1,0 obtidos nas métricas *Element Quality*, *Aspect Ratio* e *Jacobian Ratio*. Enquanto que o índice de *Skewness* atingiu aproximadamente 0,13, o que, de acordo com a tabela de classificação apresentada na Figura 69, corresponde a elementos de excelente qualidade. Já o parâmetro *Maximum Corner Angle* variou entre 87,5° e 100°, confirmando a adequada conformação geométrica da malha.

Figura 69 – Avaliação da qualidade da malha com base no Skewness

Value of Skewness	Cell Quality
1	degenerate
0.9 – <1	bad (sliver)
0.75 – 0.9	poor
0.5 – 0.75	fair
0.25 – 0.5	good
>0 – 0.25	excellent
0	equilateral

Fonte: özgün (2023).

Complementando as descrições apresentadas anteriormente, as Tabelas 2 e 3 apresentam os dados correspondentes a cada componente do CCT fixo e rotativo, respectivamente.

Tabela 2 – Número de Elementos e Nós dos componentes do CCT fixo

	Engate Fixo	Mandíbula	Braçadeira Fixa	Pino de conexão Fixo	Castanha
Nós	4365567	4603293	2811810	250437	910821
Elementos	2944267	3301850	1978586	174953	643009

Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 3 – Número de Elementos e Nós dos componentes do CCT rotativo

	Engate Rotativo	Mandíbula	Braçadeira Rotativa	Colar	Pino de conexão Rotativo	Castanha
Nós	1050930	4602164	3284963	206841	1501861	921779
Elementos	4872410	3300599	2316499	144435	1050930	650826

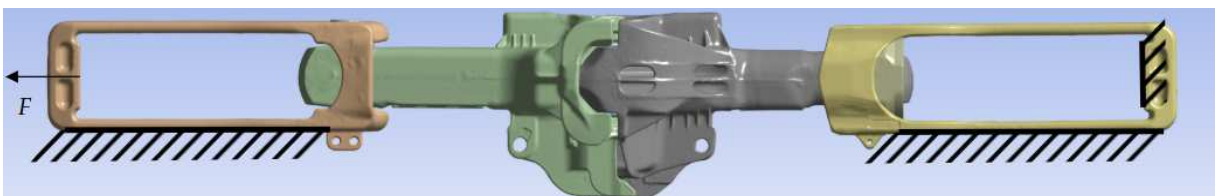
Fonte: Autoria própria (2025).

4.2.3. Definição das condições de contorno

Conforme apresentado na fundamentação teórica, para viabilizar as operações de descarga nos VV, as extremidades da dupla de vagões gôndola dos tipos GDT, GDU ou GDE são equipadas, respectivamente, com Conjuntos de Choque e Tração fixo e rotativo. Nesse contexto, para a modelagem das condições de contorno de carregamento e deslocamento do problema analisado, foram considerados dois cenários distintos, representando as possíveis condições de serviço às quais os CCTs podem ser submetidos durante as operações ferroviárias.

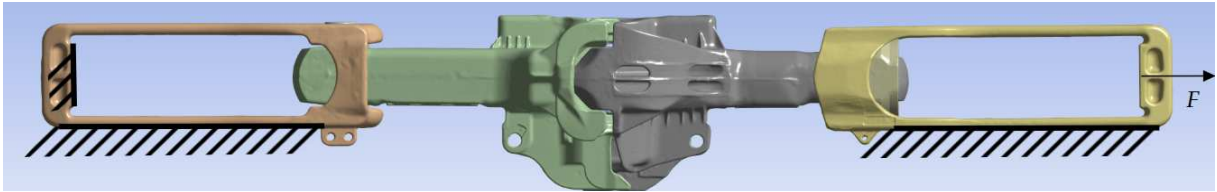
No primeiro cenário de CC, a braçadeira fixa é solicitada por um esforço axial, enquanto a braçadeira rotativa permanece engastada (Figura 70). Já no segundo cenário, a braçadeira rotativa é tracionada enquanto a braçadeira fixa permanece engastada (Figura 71). Em ambos os casos, considera-se que as braçadeiras estão apoiadas sobre as chapas de apoio.

Figura 70 – Diagrama de corpo livre referente ao cenário 1



Fonte: Autoria própria (2025).

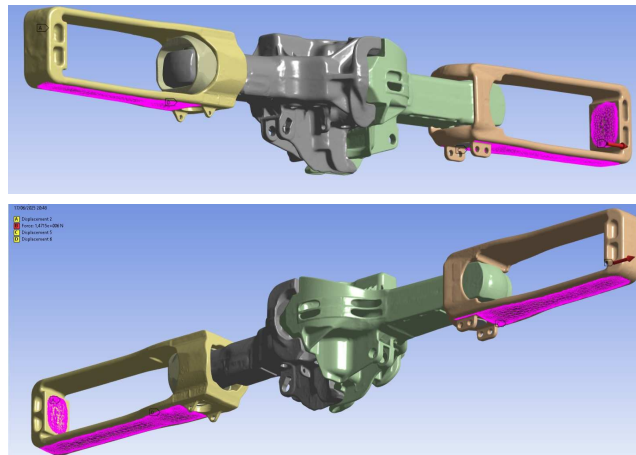
Figura 71 – Diagrama de corpo livre referente ao cenário 2



Fonte: Autoria própria (2025).

Para ilustrar a aplicação das condições de contorno no módulo Static Structural do software ANSYS, na Figura 72 são destacados em rosa os elementos seleccionados para a aplicação das CC correspondentes ao Cenário 1.

Figura 72 – Aplicação das CC referentes ao cenário 1 no Ansys



Fonte: Autoria própria (2025).

Para a definição da magnitude da força axial, considerou-se que esta fosse equivalente ao peso bruto máximo do vagão gôndola GDU, fabricado pela empresa Greenbrier Maxion (Figura 73). Tal hipótese justifica-se pelo fato desse tipo de vagão possuir uma maior capacidade de carga quando comparados aos demais modelos de vagões gôndola GD (Maxion, 2025).

Figura 73 – Dados técnicos do vagão gôndola GDU

WEIGHT / CAPACITY (ESTIMATED)		CURVE NEGOTIABILITY RADIUS	
LIGHT WEIGHT	21.000 KG	CURVE NEGOTIABILITY	80 M
GROSS RAIL LOAD	150.000 KG		
LOAD LIMIT	129.000 KG		
CUBIC CAPACITY	45 M ³		

Fonte: Maxion (2017b).

Para a definição das condições de contorno de contato, considerou-se a complexidade inerente ao sistema estrutural em análise. Assim, adotou-se a hipótese de contato *No Separation* em todas as interfaces do modelo multicorpos, o que permitiu a linearização do problema.

Ademais, em conformidade com a metodologia adotada, foi selecionado o método de detecção de contato *Normal From Contact*, e utilizou-se o algoritmo *Augmented Lagrange*, com o objetivo de equilibrar a precisão dos resultados e o custo computacional da análise.

Por fim, para viabilizar a aplicação simultânea dos dois cenários e condição de contorno em um único modelo de elementos finitos, definiu-se o comportamento *Symmetric* para todas as superfícies de contato. Além disso, visando à otimização do custo computacional das simulações numéricas, estabeleceu-se também um limite de 0,1 mm para a função *Trim Contact*.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para avaliar os resultados deste estudo, este capítulo analisa os campos de tensão equivalente de von Mises obtidos na etapa de pós-processamento da análise MEF. Para a interpretação dos resultados, adotou-se a abordagem proposta por Madier (2020), onde os resultados não devem ser avaliados apenas pelos contornos de tensão apresentados nos gráficos, mas também pela localização dos nós com maiores magnitudes dentro das regiões críticas.

Em razão da complexidade geométrica dos componentes, considerou-se a possibilidade de ocorrência de erros numéricos, os quais poderiam comprometer a precisão dos resultados em determinadas regiões. Assim, para assegurar uma maior confiabilidade às soluções obtidas, avaliou-se a porcentagem de nós cujos valores de tensão ultrapassaram os limites previamente estabelecidos.

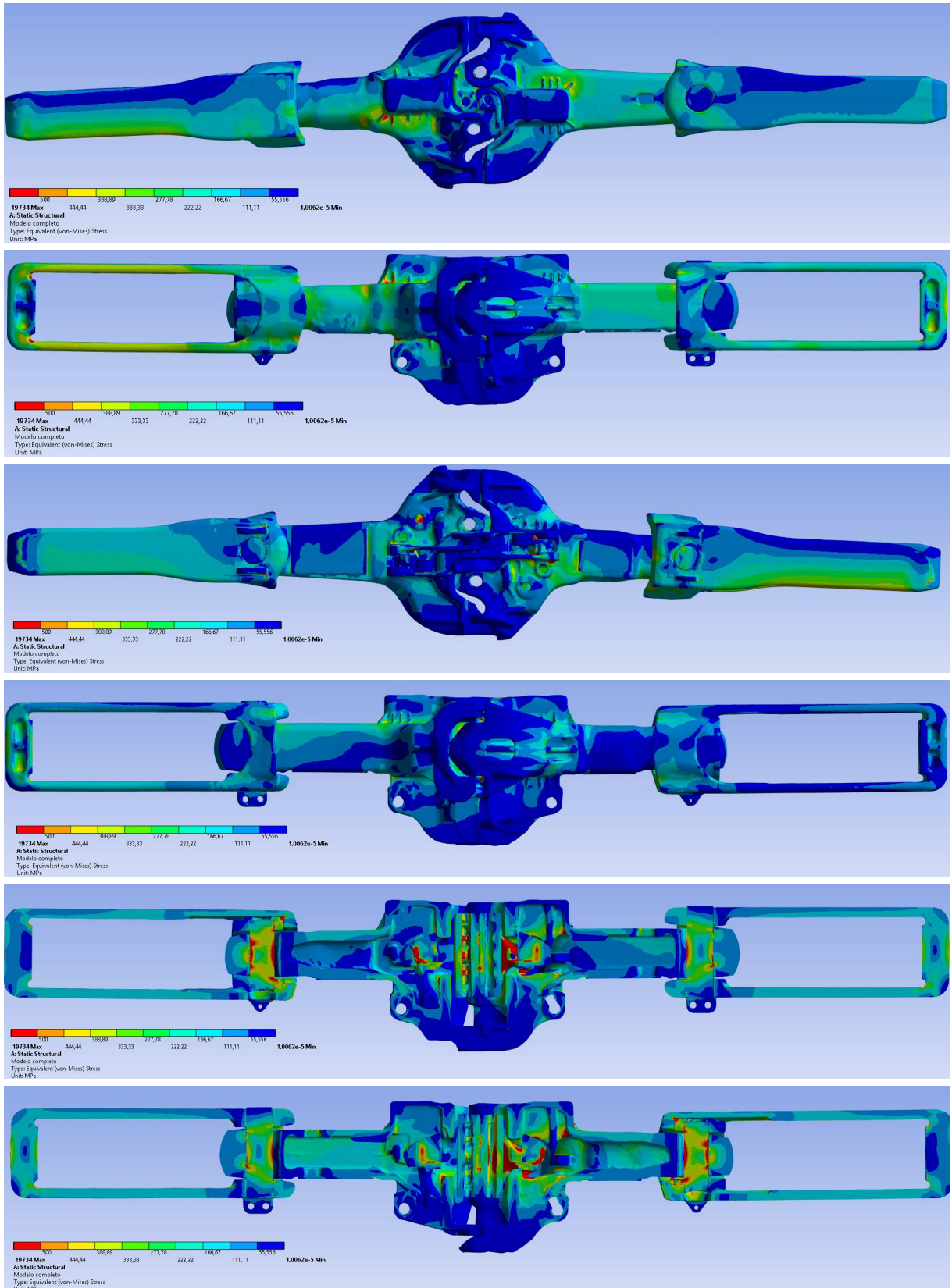
Nesse contexto, a Tabela 4 apresenta a porcentagem de nós que excederem os limites definidos. Já as Figuras 74 e 75 apresentam o campo de tensões de von Mises ao longo do sistema multicorpos analisado, tanto no primeiro, quanto no segundo cenário de CC.

Tabela 4 – Percentual de nós cuja tensão excede os limites estabelecido

Limite	Condição de contorno 1	Condição de contorno 2
0 MPa	100,00 %	100,00 %
300 MPa	11,48 %	2,71 %
500 MPa	2,71%	0,50 %
600 MPa	1,55 %	0,30%
700 MPa	0,96%	0,20 %
800 MPA	0,65 %	0,14 %
1000 MPa	0,34 %	0,07 %
2000 MPa	0,04 %	0,01 %

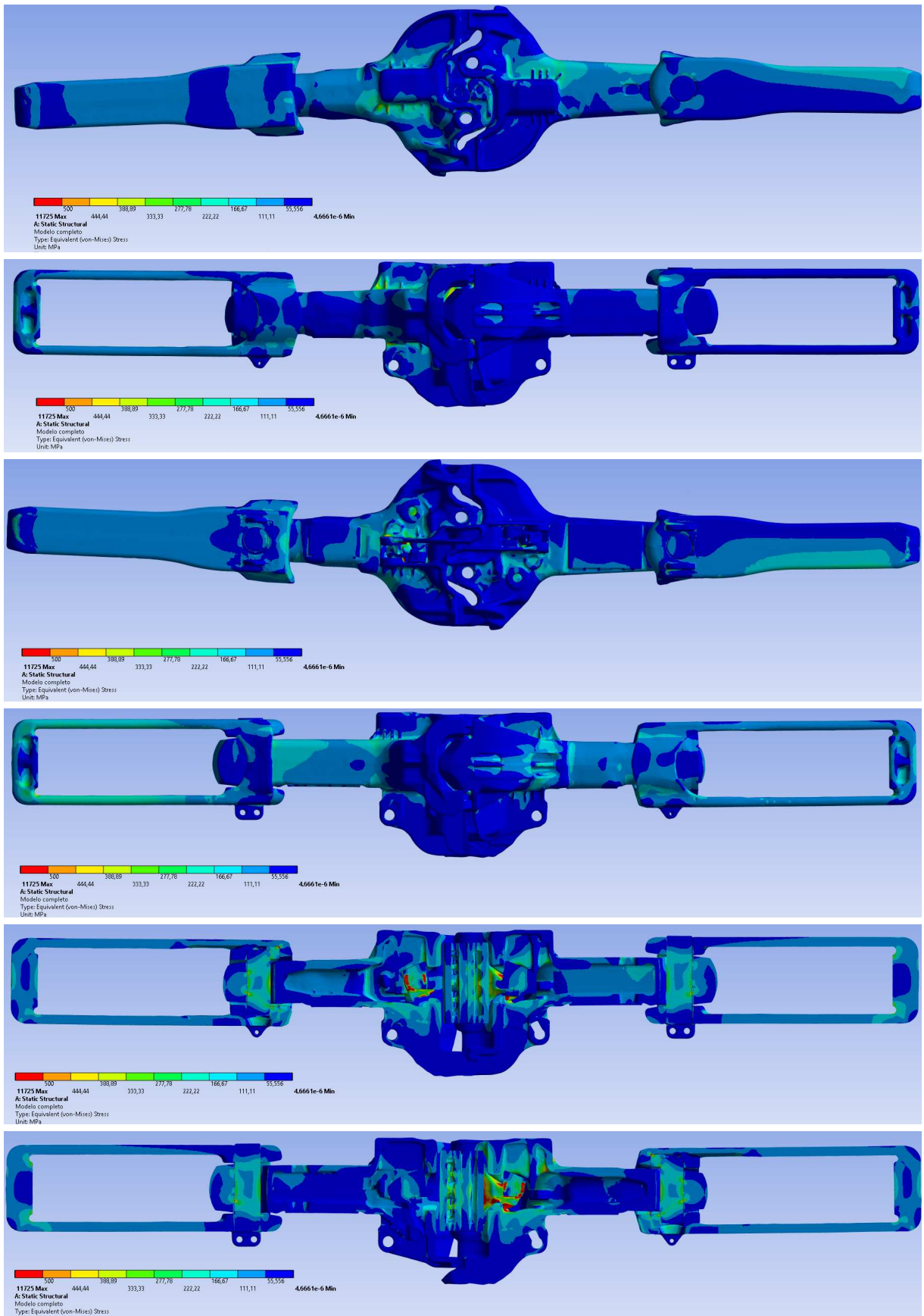
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 74 – Campo de tensões obtido na análise referente ao primeiro cenário



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 75 – Campo de tensões obtido na análise referente ao segundo cenário



Fonte: Autoria própria (2025).

Observa-se, na Tabela 4, que o primeiro cenário de condições de contorno apresentou níveis de tensão superiores aos obtidos no segundo cenário. Assim, para a validação dos resultados, proceder-se-á à comparação entre as áreas de concentração de tensão identificadas no primeiro cenário e as regiões críticas descritas na literatura.

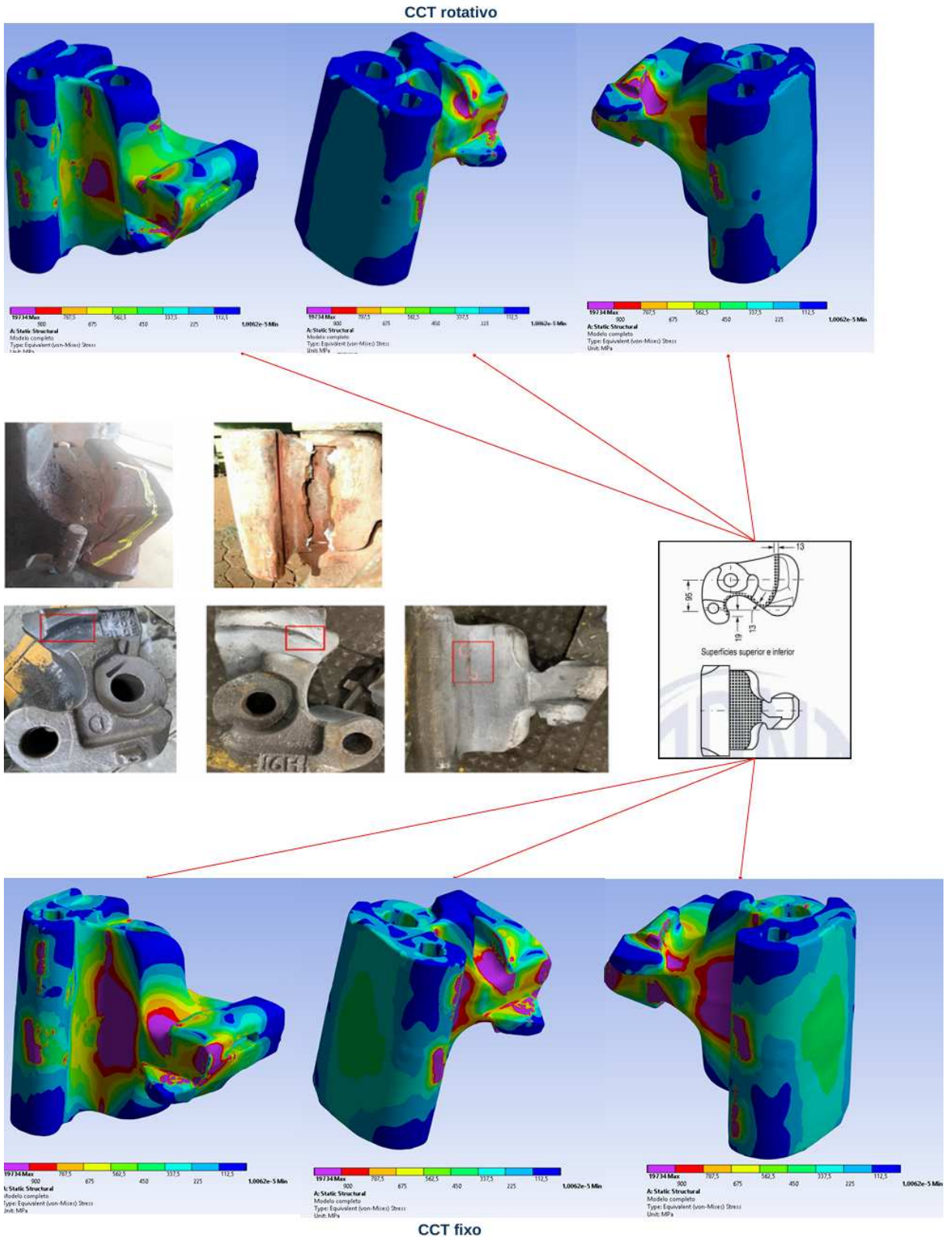
Para este estudo, considerou-se as regiões críticas dos componentes analisados, conforme especificado pela norma ABNT NBR 16087. Ademais, os resultados obtidos foram comparados às áreas que apresentaram falhas em componentes reais, conforme evidenciado em imagens disponíveis na literatura técnica referente aos CCTs.

Ressalta-se, que tais imagens foram incluídas considerando-se que, na maioria dos casos, as falhas nesses componentes ocorrem predominantemente em decorrência de desgaste, fadiga ou impacto. Essa abordagem mostra-se adequada, visto que em materiais dúcteis submetidos a carregamentos variáveis, as trincas tendem a se iniciar em regiões sujeitas a escoamento local, devido à concentração de tensões (Norton, 2013).

As Figuras 76 a 80 apresentam os campos de tensão obtidos para cada um dos componentes analisados neste estudo. Em todas as figuras, a escala de cores foi ajustada de forma a viabilizar uma visualização mais precisa das áreas que apresentam concentração de tensões.

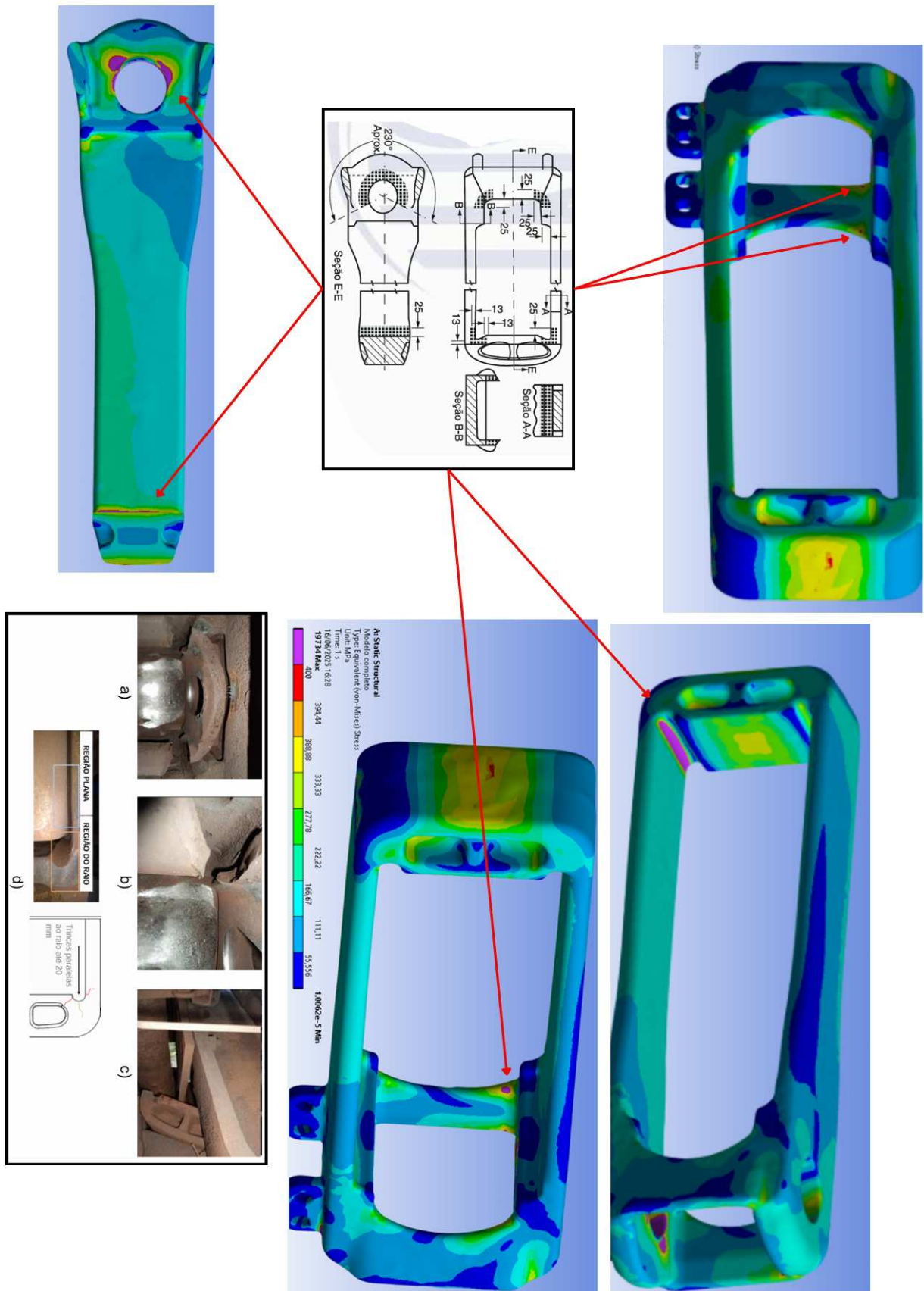
Nesse contexto, ressalta-se que, nas imagens referentes ao engate fixo, foi mantida a mesma escala de cores utilizada nas Figuras 74 e 75. Já nas imagens do engate rotativo e das duas braçadeiras, a escala de cores foi modificada para facilitar a visualização das regiões que apresentaram falhas, conforme observado nas imagens disponíveis na literatura. Por fim, na imagem das duas mandíbulas, a escala de cores também foi alterada, uma vez que o campo de tensões desse componente apresentou valores significativamente mais elevados em comparação aos demais.

Figura 76 – Regiões com concentração de tensões nas mandíbulas



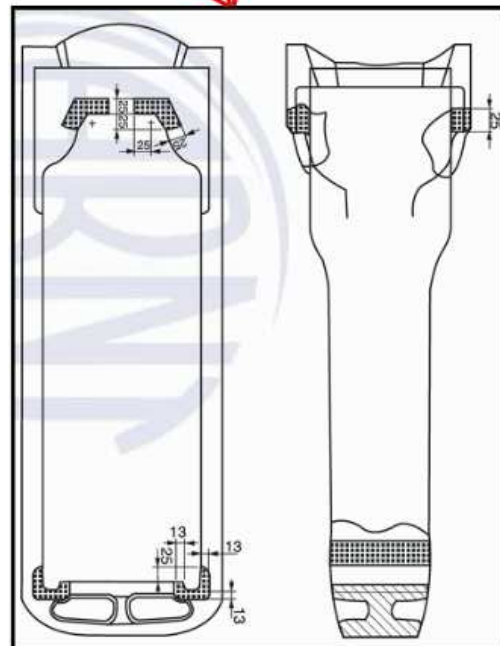
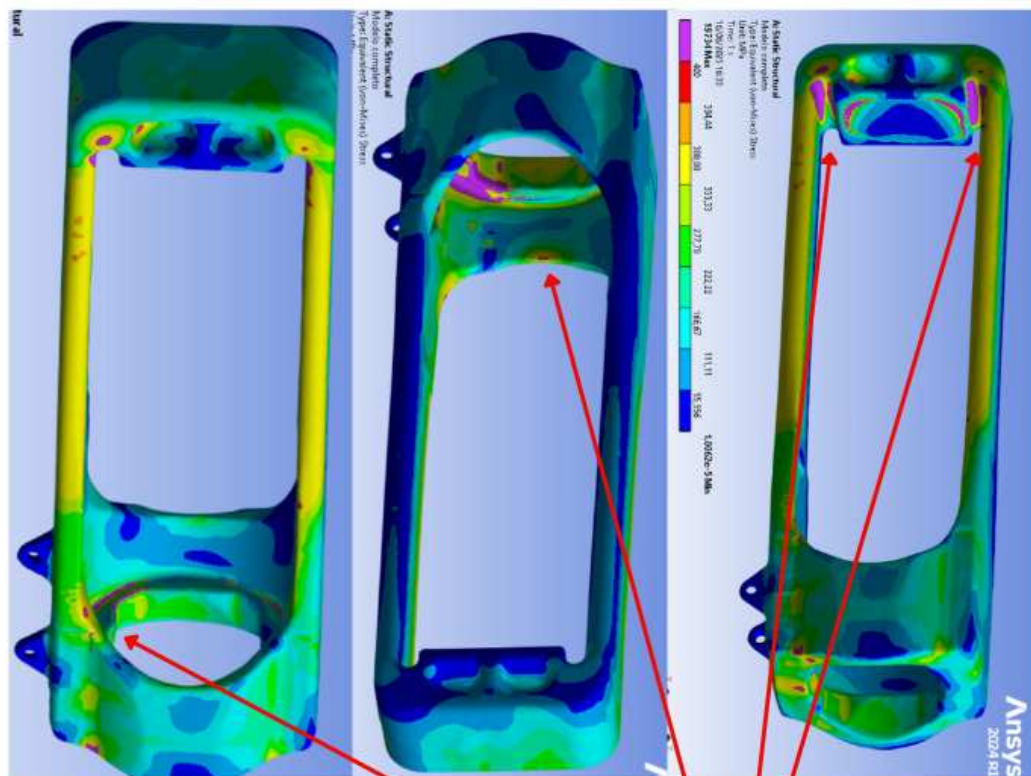
Fonte: Compilado pelo autor a partir de ABNT (2012b, p. 22), Lyra (2010) e Wang *et al.* (2024 p.3).

Figura 77 – Regiões com concentração de tensões na braçadeira fixa



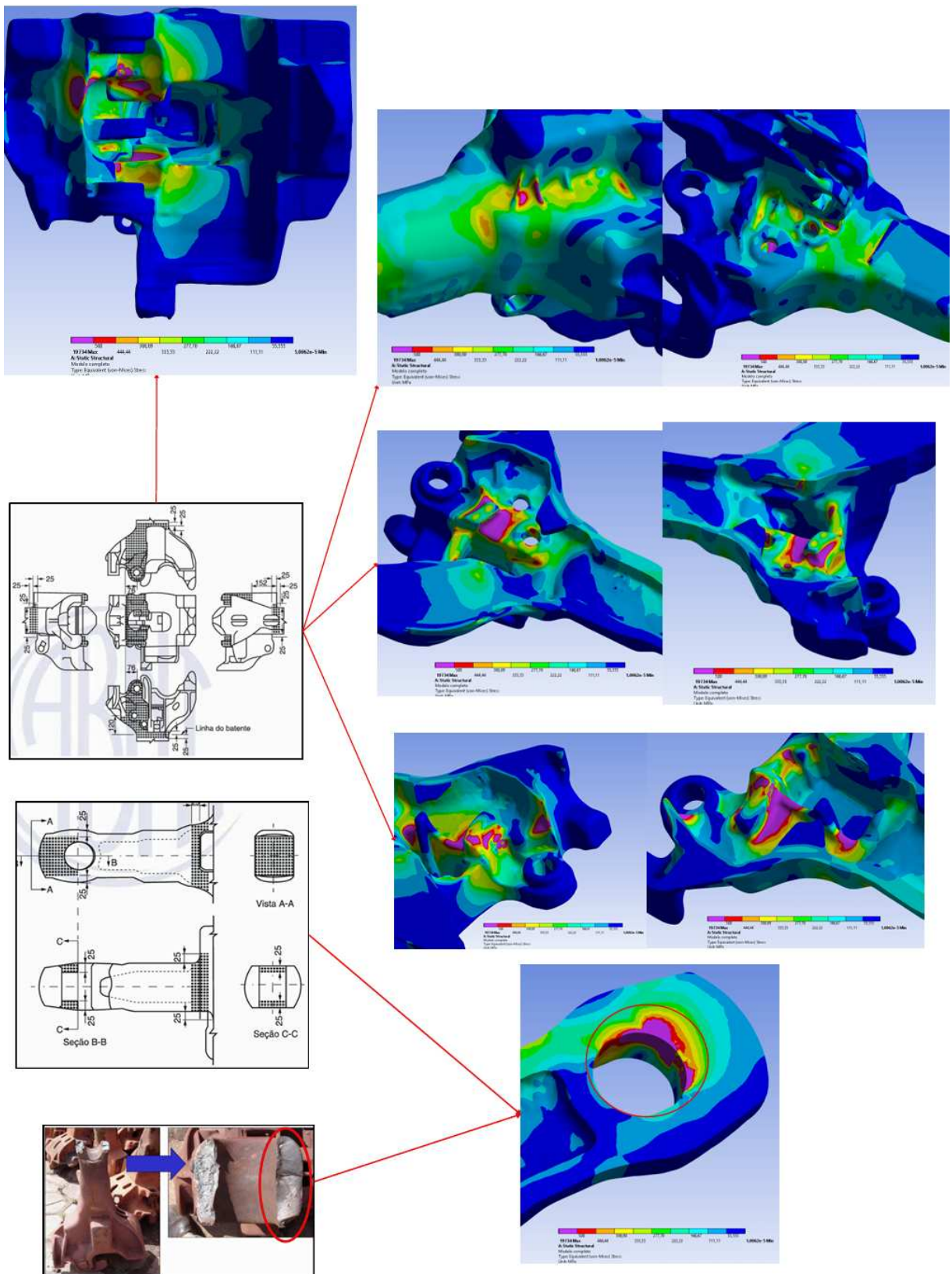
Fonte: Compilado pelo autor a partir de ABNT (2012b, p. 20) e Lyra (2010).

Figura 78– Regiões com concentração de tensões na braçadeira rotativa



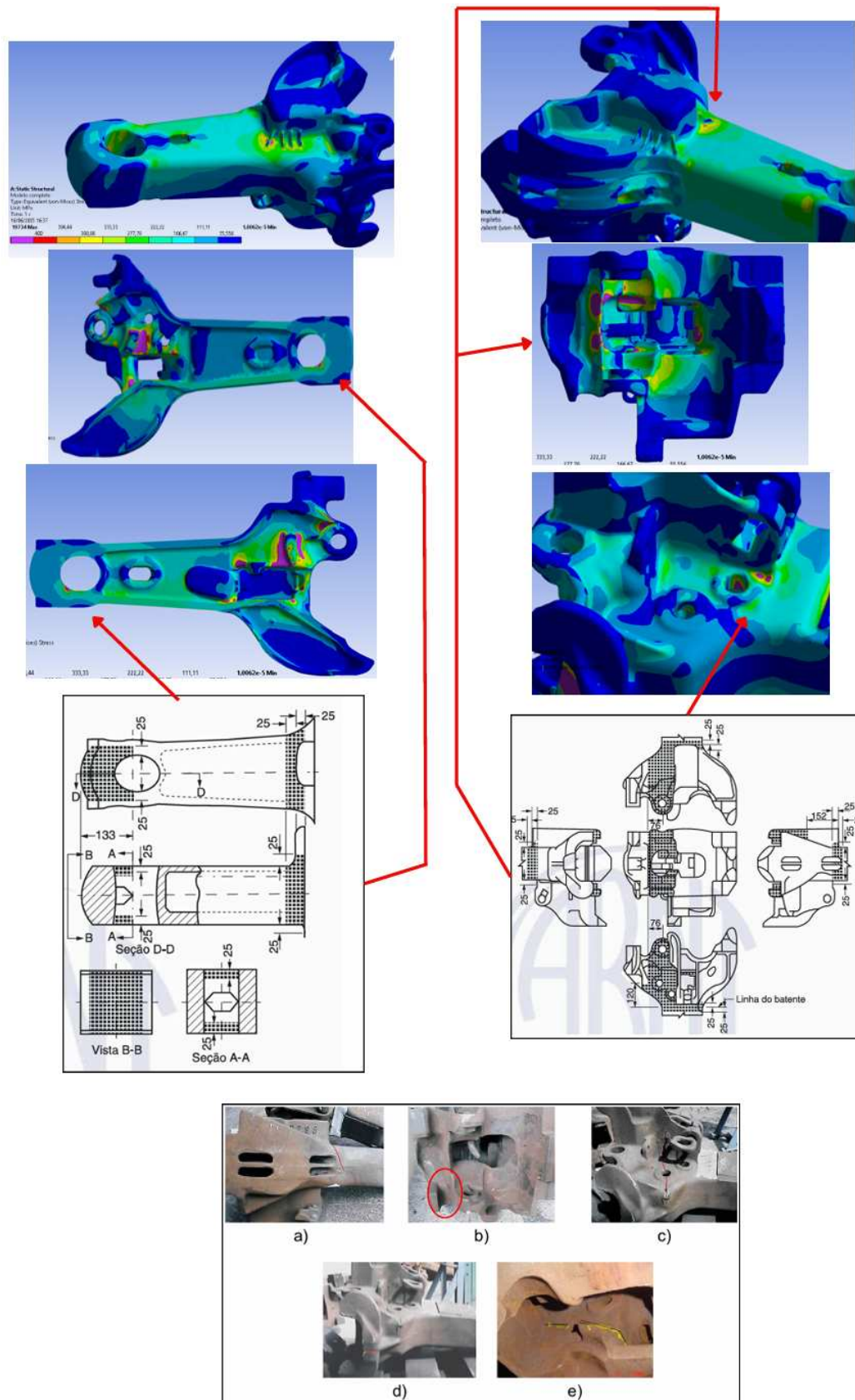
Fonte: Compilado pelo autor a partir de ABNT (2012b, p. 23) e Lyra (2010).

Figura 79 – Regiões com concentração de tensões no engate rotativo



Fonte: Compilado pelo autor a partir de ABNT (2012b, p. 25), ABNT (2012b, p.21) e Santos (2019, p. 82).

Figura 80 – Regiões com concentração de tensões no engate fixo



Fonte: Compilado pelo autor a partir de ABNT (2012b, p. 25), ABNT (2012b, p.21), VLI ([20--?], p. 191), VLI ([20--?], p. 192), VLI ([20--?], p. 193) e VLI ([20--?], p. 193)

Durante a fase de pós-processamento da análise MEF, foi identificada uma região de concentração de tensões em uma das mandíbulas, a qual está associada à presença de defeitos de fundição localizados nessa área. A Figura 81 ilustra esses resultados, apresentando tanto o modelo de elementos finitos quanto o trecho correspondente da peça digitalizada.

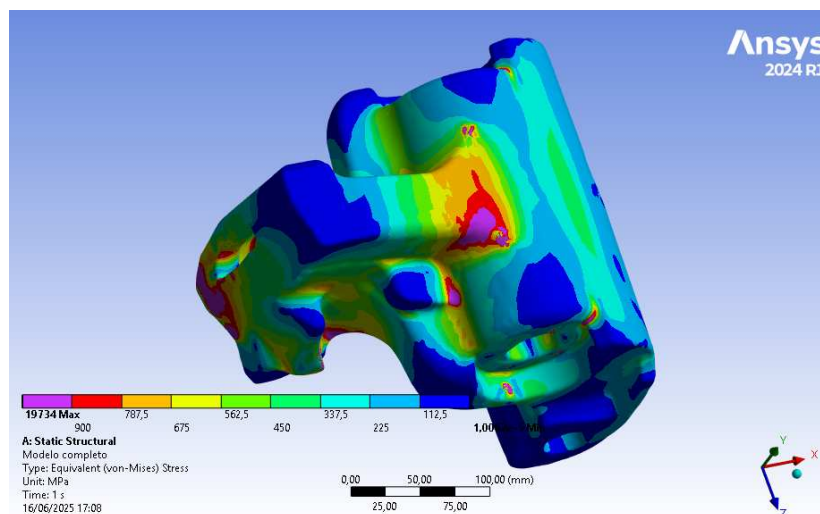
Figura 81 – Concentração de tensões por defeito de fundição na mandíbula



Fonte: Autoria própria (2025).

Além disso, em ambas as mandíbulas, foram identificadas regiões críticas significativas que não são contempladas pela norma ABNT NBR 16087. A Figura 82 apresenta um exemplo representativo dessas regiões.

Figura 83 – Áreas críticas da mandíbula não previstas na norma ABNT NBR 16087



Fonte: Autoria própria (2025).

6. CONCLUSÃO

O presente estudo desenvolveu e avaliou uma metodologia para a análise linear do comportamento local e global de um Conjunto de Choque e Tração (CCT) submetido a carregamento longitudinal estático de tração, a qual utiliza o Método dos Elementos Finitos. Para isso, foi elaborado um modelo de elementos finitos, estruturado em um sistema multicorpos, composto apenas pelos componentes mais relevantes para os objetivos deste trabalho.

Para construção desse sistema, realizou-se uma revisão bibliográfica sobre os principais componentes do CCT, visando compreender suas funcionalidades. Além disso, para assegurar a qualidade e a confiabilidade dos resultados das simulações numéricas, os modelos digitais foram desenvolvidos com um elevado grau de fidelidade em relação aos seus correspondentes físicos digitalizados.

Embora este estudo considere que os componentes são fabricados com um material distinto daquele empregado na produção das peças reais, os resultados obtidos demonstraram a eficácia da metodologia proposta, uma vez que as regiões identificadas com concentrações de tensão na estrutura de cada componente, encontram-se localizadas dentro das regiões críticas especificadas pela norma ABNT NBR 16087.

Considerando-se ainda as atuais condições de carga empregadas nas ferrovias, o presente estudo identificou regiões de concentração de tensões nas estruturas avaliadas, situadas em áreas ainda não mencionadas na literatura. Entre essas, destacam-se aquelas relacionadas a defeitos oriundos do processo de fundição das peças.

Diante do aumento da capacidade de carga dos vagões e do comprimento das composições ferroviárias, a aplicação da metodologia proposta poderá ser aprofundada em estudos futuros voltados à integridade estrutural do CCT, como análise dinâmica e estimativa da vida em fadiga. Recomenda-se ainda uma avaliação referente à influência das propriedades dos materiais nos campos de tensões dos componentes do CCT, de forma a assegurar uma maior confiabilidade dos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

- ALVARENGA, A. Carlos; NOVAIS, A. G. N. **Logística aplicada: suprimento e distribuição física**. 3. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 2000.
- ALVES FILHO, A. **Elementos finitos a base da tecnologia CAE**. 6. ed. São Paulo: Érica, 2013.
- ALVES FILHO, A. **Elementos finitos a base da tecnologia CAE: Análise não linear**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2012.
- ALVES FILHO, A.; WALBER, M.; MEIRA, A. **Desenvolvimento de produtos utilizando simulação virtual**. 1. ed. Rio de Janeiro: Altabooks, 2022.
- ANSYS, Inc. **Element Reference**. Canonsburg: SAS IP, 2025.
- ANSYS, Inc. **Contact technology guide**. Canonsburg: SAS IP, 2009.
- ANSYS, Inc. **Mechanical Object Reference**. Canonsburg: SAS IP, 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15811:2010**. Vagão ferroviário – Engates, braçadeira e haste de ligação – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16086**. Vagão ferroviário – Engates, braçadeira e haste de ligação – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16087**. Vagão ferroviário – Sistema de Choque e Tração – Componentes e conjuntos de engates automáticos, hastes de ligação e braçadeiras. Rio de Janeiro: ABNT, 2012b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16088**. Vagão ferroviário – Componentes fundidos – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012c.
- BARBOSA, R. S. **Estudo da dinâmica longitudinal do trem**. 1993. 179 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993.
- BARTOLI, M. G. D. **Mecânica da fratura, elementos finitos e não linearidade estrutural – Estudo de caso: utilizando o software Ansys®**. São Paulo: Dialética, 2023.
- BEER, F. P. *et al.* **Mecânica dos materiais**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.
- BELCHIOR, C. M. **Desenvolvimento de Aço Baixa Liga para Componentes do Sistema de Choque e Tração em Vagões Ferroviários**. 2016. 160f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de Lorena, 2016

BORBA, J. L. **Mecânica de Locomotivas**. 2011. 602f. Apostila (Pós Graduação em Engenharia Ferroviária) - Instituto de Educação Continuada, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2011

BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de máquinas de Shigley: Projeto de Engenharia Mecânica** . 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais**. 8. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2012.

CARVALHO, R. Formulações de Contato – Método dos Elementos Finitos. **Lure Engenharia**, [2025?]. Disponível em: <https://lureengenharia.com.br/formulacoes-de-contato-metodo-dos-elementos-finitos/>. Acesso em: 21 jun. 2025.

COLE, C. Longitudinal train dynamics and vehicle stability in train operations. In: IWNIICKI, A. et al. (Orgs.). **Handbook of railway vehicle dynamics**, 2020. p. 457–520.

COLLINS, J. A.; BUSBY, H.; STAAB, G. **Projeto de elementos de máquina**. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2019.

COSTA, J. **Análise comparativa entre parâmetros de fabricação de mandíbulas por meio da redução de sucateamento**. 2019. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2011.

CREAFORM. **HADYSCAN3D silver series escâneres 3D profissionais aprovados pelo mercado a um preço acessível**. São Paulo: AMETEK do Brasil, 2022.

CREAFORM. **Manual do usuário**. Québec: Creaform, 2022.

CREAFORM. **Reverse engineering of physical objects: teaching manual**. Québec: Creaform, 2014.

DIAS, F. T. *et al.* **Método dos Elementos Finitos: Técnicas de Simulação Numérica em Engenharia**. Lisboa: ETEP - Edições Técnicas e Profissionais, 2010.

DUARTE, D. R.,. **Desenvolvimento de um modelo de otimização para o Planejamento de Trens de Carga Geral**. 2021. 49 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

ENDO, V. *et al.*; Modelo de contato simplificado para análise estrutural de Conjunto de Choque e Tração (CCT) usando MEF. In: VII Simpósio de Engenharia Ferroviária, **Anais...** Campinas, 13 e 14 de maio de 2024. Disponível em: [https://www.even3.com.br/anais/vii-simposio-de-engenharia-ferroviaria-410736/806678-modelo-de-contato-simplificado-para-analise-estrutural-de-um-conjunto-de-choque-e-tracao-\(cct\)-usando-mef](https://www.even3.com.br/anais/vii-simposio-de-engenharia-ferroviaria-410736/806678-modelo-de-contato-simplificado-para-analise-estrutural-de-um-conjunto-de-choque-e-tracao-(cct)-usando-mef). Acesso em: 18 dez. 2024

FISH, J.; BELYTSCHKO, T. **Um primeiro curso em elementos finitos**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2009.

- GERE, J. M.; GOODNO, B. I.. **Mecânica dos materiais**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 1978.
- GRAY, G. L. **Mecânica para Engenharia: dinâmica**. Porto Alegre: Bookman, 2014
- HIBBELER, R. C. **Análise das estruturas**. 8. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013.
- HIBBELER, R. C. **Estática: mecânica para engenharia**. 14. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2017.
- HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- HUTTON, D. V. **Fundamentals of finite element analysis**. 1. ed. New York: McGraw-Hill, 2004.
- INFORMAÇÕES do setor. **ANTF**, 2025. Disponível em: <https://www.antf.org.br/boletim-antf/>. Acesso em: 30 jul. 2025.
- INMAN, D. J. **Vibração mecânica**. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- JOHNSON, W. **Impact strength of materials**. London: Edward Arnold, 1972.
- KIM, N. H.; SANKAR, V. S. **Introdução à análise e ao projeto em elementos finitos**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2011.
- KOVALEV, R. et al. Simulation of longitudinal dynamics of a freight train operating through a car dumper. **Vehicle System Dynamics**, v. 54, p. 733-758, 2016.
- LEAKE, J. M.; BORGESON, J. L. **Manual de desenho técnico para engenharia: desenho, modelagem e visualização**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.
- LEET, M. K.; UANG, M. C.; GILBERT, M. A. **Fundamentos da análise estrutural**. 3. ed. Porto Alegre: AMGH, 2020.
- LYRA, L. S. **Live - CCT Conhecendo o Sistema de Choque e Tração**. Vitória: VALE Estrada de Ferro Vitória Minas. 2020. 88 Slides, color.
- MADENCI, E.; GUVEN, I. **The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS**. New York: Springer, 2006.
- MANDIER, D. **Practical finite element analysis for mechanical engineers**. 1. ed. Val- Morin: FEA Academy, 2020.
- MARTINS, T. S. **Melhoria na eficiência energética de trens de carga em ferrovias Hevy Haul - Estudo de caso da estrada de ferro Carajás**. 2020. 157 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória, 2020.
- MAXION, G. **GDT Vagão Gôndola: Boletim Técnico**. Hortolândia: GBMX, 2017a.
- MAXION, G. **GDU Vagão Gôndola: Boletim Técnico**. Hortolândia: GBMX, 2017b.

- Maxion, G. Gôndola. **GBMX**. Hortolândia, 2025. Disponível em: Arquivos Gôndola - GBMX. Acesso em: 21 jun. 2025.
- MAXION, G. **Manual de operação e manutenção Choque e Tração GDU**. Hortolândia: Maxion Greenbrier, 2019.
- MERIAM, J. L.; KRAIGE, L. G. **Mecânica para engenharia volume 1 - Estática**. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2009.
- Mesh quality parameters in finite element analysis. **Engmorph**. Disponível em: <https://www.engmorph.com/mesh-quality-parameters>. Acesso em: 21 jun. 2025.
- MRS. **Relatório de Sustentabilidade 2024**. Belo Horizonte: BH Press Comunicação e Sustentabilidade, 2024.
- NABAIS, R. J. S. **Manual básico da engenharia ferroviária**. São Paulo: Oficina de textos, 2014
- NORTON, R. L. **Projeto de máquina**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- ORLOVA, A. *et al.*; Design of unpowered railway vehicles. *In*: IWNICKI, A. *et al.* (Orgs.). **Handbook of railway vehicle dynamics**, 2020. p. 43–114.
- PASTOUKHOV, V. A.; VOORWALD, H. J. C. **Introdução à mecânica da integridade estrutural**. São Paulo: Editora da Universidade Estadual Paulista, 1995.
- PHILPOT, T. A. **Mechanics of Materials: An Integrated Learning System**. Rolla: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- POPOV, E. P. **Introdução à mecânica dos sólidos**. 7. ed. São Paulo: Cengage learning, 2010.
- RAJA, V; FERNANDES, K. J. **Reverse Engineering: An Industrial Perspective**. London: Springer-Verlag, 2008.
- REN, X. *et al.* Fracture mechanics based residual life prediction of railway heavy coupler with measured load spectrum. **International Journal of Fracture**, v. 234, p. 313–327, 2022.
- RIBEIRO, R. C. H; ROSA, R. A. **Estrada de ferro: projeto, especificação & construção**. Vitória : EDUFES, 2016.
- RUMO. **Relatório de sustentabilidade 2023**. São Paulo: Ricca sustentabilidade, 2023.
- RUMO. **Report green bond**. Curitiba: RUMO, 2024.
- SANTOS, G. F. **Módulo – Vagões, Carros de Passageiro e Trens Unidade – revisão 02**. 2019. Apostila (Pós-Graduação em Engenharia Ferroviária) - Faculdade Estácio de Sá, São Paulo, 2019.
- SANTOS, S. **Transporte ferroviário: história e técnicas**. 2. ed. Florianópolis: Edição do Autor, 2021.

SIMSON, S. Drawgear development in 30 000+ tonne train service. *In: Proceedings of International Heavy Haul Association conference (IHHA)*, 21-24 Jun. 2015, Perth, Australia, p. 9, Disponível em: <https://railknowledgebank.com/Presto/content/GetDoc.axd?ctlID=MTk4MTRjNDUtNWQ0My00OTBmLTIIYWUtZWVjM2U2OTE0ZDY3&rID=MjgxNQ==&pID=Nzkx&attchmnt=True&uSesDM=False&rldx=Mjg3NA==&rCFU=>. Acesso em: 1 jun. 2025

STEED, J.; KIMPTON, R. Improving the 10" head alliance coupler and Knuckle. *In: Proceedings of International Heavy Haul Association conference (IHHA)*, 21-24 Jun. 2015, Perth, Australia, p. 9, Disponível em: <https://railknowledgebank.com/Presto/content/GetDoc.axd?ctlID=MTk4MTRjNDUtNWQ0My00OTBmLTIIYWUtZWVjM2U2OTE0ZDY3&rID=MjgxMg==&pID=Nzkx&attchmnt=True&uSesDM=False&rldx=Mjg3MQ==&rCFU=>. Acesso em: 1 jun. 2025

TEDESCO, J. **Otimização do controle da dinâmica longitudinal do trem de carga equipado com um sistema de frenagem eletropneumático**. 2011. 85 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

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

VLI. **Manutenção Conjunto de Choque e Tração: Apostila do aluno**. Belo horizonte: Educação corporativa - Vli S.A. [20--?]. 197 p.

WABTEC CORPORATION. **Freight car draft arrangements**. Wilmerding: Wabtec Corporation, 2003. 21 p.

WAGNER, S.; COLE, C.; SPIRYAGIN, M. A review on design and testing methodologies of modern freight train draft gear system. **Railway Engineering Science**, v.29, p. 127–151, 2021.

WANG, C. *et al.* Remaining Useful Life for Heavy-Duty Railway Cast Steel Knuckles Based on Crack Growth Behavior with Hypothetical Distributions. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, v. 37, p. 77, 2024.

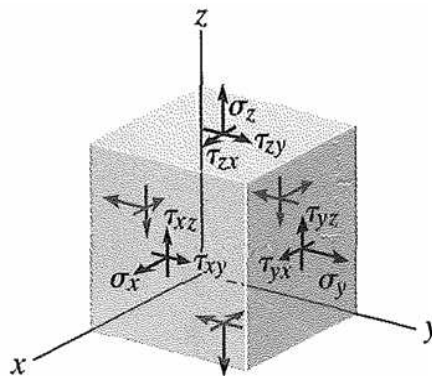
Yadav, O. P.; Vyas, N. S. The influence of AAR coupler features on estimation of in-train forces. **Railway Engineering Science**, v.31, p. 233–251, 2023.

ANEXO A – TEORIA DA ENERGIA DE DISTORÇÃO

Quando um corpo sólido sofre uma deformação elástica devido a um carregamento externo, a força aplicada realiza um *trabalho externo* sobre o objeto, o qual é medido como energia potencial (Hibbeler, 2017). Simultaneamente, os esforços internos, originados pela interação entre os átomos, para preservar a integridade estrutural, realizam-se um *trabalho interno*, conhecido como energia de deformação elástica, que é armazenada no material à medida que a estrutura se deforma (Philpot, 2013).

Para fundamentar esse último fenômeno, considera-se um elemento infinitesimal, que representa um pequeno volume de material na vizinhança de um ponto arbitrário no interior de uma estrutura submetida a um estado geral de tensão (Figura 84). Tal estado é caracterizado por três componentes de tensão normal σ_x , σ_y e σ_z e por seis componentes de cisalhamento τ_{xy} , τ_{yx} , τ_{yz} , τ_{zy} , τ_{zx} e τ_{xz} , onde $\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ e $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ (Hibbeler, 2010; Philpot, 2013).

Figura 84 –Elemento infinitesimal de material submetido a um estado geral de tensões

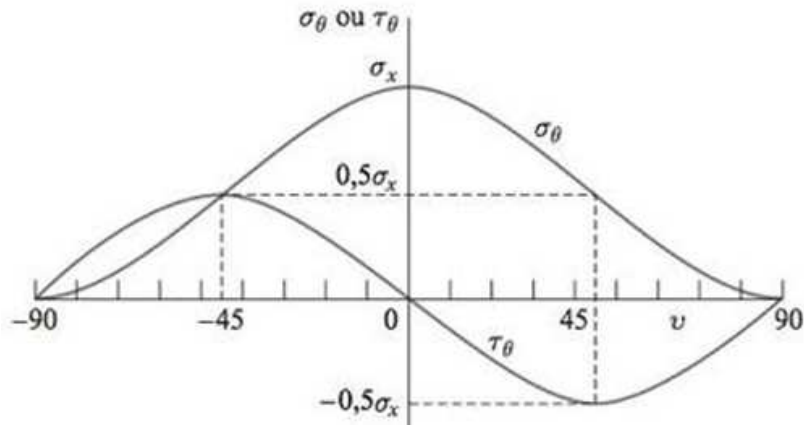


Fonte: Hibbeler (2010, p. 15).

No contexto apresentado, ressalta-se que, em uma estrutura real, as tensões podem manifestar-se em múltiplas seções inclinadas, caracterizadas por diferentes orientações (Gere; Goodno, 2010). Ademais, conforme ilustrado na Figura 85, as tensões normais e de cisalhamento variam em função da direção adotada no sistema de coordenadas, pois dependem do ângulo da superfície sobre a qual atuam

(Philpot, 2013). Dessa forma, para prevenir eventuais falhas estruturais, torna-se imprescindível a identificação das tensões máximas atuantes no corpo analisado (Norton, 2013).

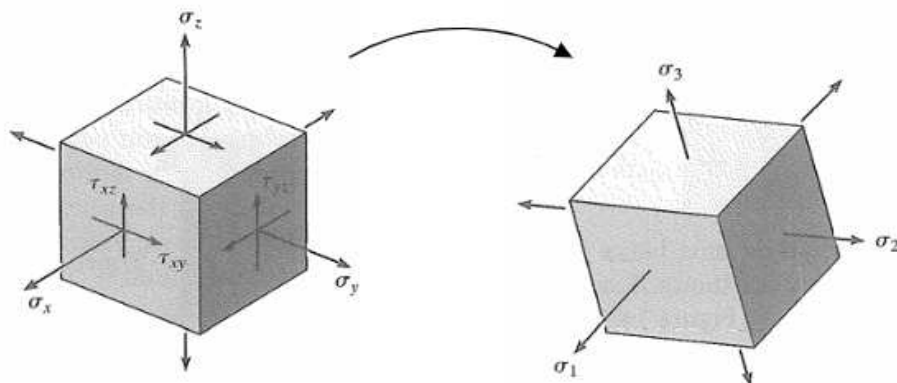
Figura 85 – Variação das tensões em função do ângulo da seção inclinada



Fonte: Gere e Goodno (2010, p. 109).

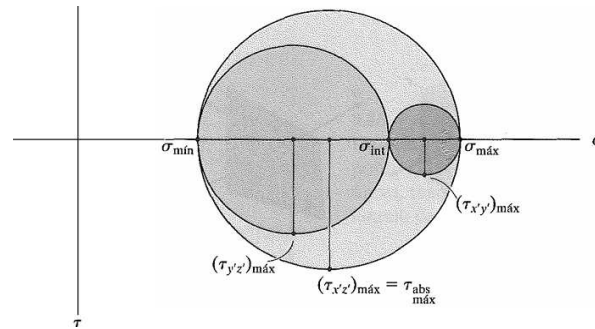
Para isso, considera-se que o estado geral de tensão pode ser convertido em um estado de tensão multiaxial definido pelas três tensões principais σ_1 , σ_2 e σ_3 (Figura 86), as quais atuam em três planos ortogonais onde as tensões de cisalhamento são nulas (Popov 1978). Enfatiza-se, que σ_1 representa a tensão normal máxima atuando no material, enquanto σ_3 a tensão normal mínima. Já σ_2 corresponde a uma tensão intermediária, conforme destacado no círculo de Mohr ilustrado na Figura 87.

Figura 86 – Transformação do estado geral de tensão



Fonte: Adaptado de Hibbeler (2010, p. 521)

Figura 87 – Círculo de Mohr



Fonte: Hibbeler (2010, p. 352).

A ação simultânea das três tensões principais sobre um elemento infinitesimal, induz a forças normais em cada face onde atuam, resultando-se em um alongamento ao longo de cada eixo principal. Levando em consideração que na mecânica, o trabalho realizado por uma força surge quando a mesma causa um deslocamento, a energia total de deformação elástica armazenada no elemento infinitesimal é dada pela soma do trabalho interno correspondente a cada componente de tensão, conforme a Equação (24):

$$dU_t = \sigma_1 \cdot dy \cdot dz \cdot \left(\frac{\epsilon_1 \cdot dx}{2} \right) + \sigma_2 \cdot dx \cdot dz \cdot \left(\frac{\epsilon_2 \cdot dy}{2} \right) + \sigma_3 \cdot dx \cdot dy \cdot \left(\frac{\epsilon_3 \cdot dz}{2} \right) \quad (24)$$

onde que ϵ_1 , ϵ_2 e ϵ_3 representam as deformações específicas principais e dx , dy e dz correspondem ao comprimento original de cada face do elemento.

Logo, rearranjando-se a Equação (24) e integrando ambos os lados da equação resultante, obtém-se que a energia total de deformação elástica armazenada na estrutura é dada pela Equação (25):

$$U_t = \iiint_V \left[\frac{1}{2} \cdot \epsilon_1 \cdot \sigma_1 + \frac{1}{2} \cdot \epsilon_2 \cdot \sigma_2 + \frac{1}{2} \cdot \epsilon_3 \cdot \sigma_3 \right] dx \cdot dy \cdot dz \quad (25)$$

No regime elástico, a maioria dos materiais empregados em estruturas de engenharia apresenta uma relação linear entre a tensão normal uniaxial aplicada e a deformação específica sofrida pelo corpo (Philpot, 2013). Essa relação é descrita pela a Lei de Hooke, a qual é definida por $\sigma = E \cdot \epsilon$, onde E o módulo de

elasticidade do material (Philpot, 2013). Ademais, segundo Gere e Goodno (2010), tais materiais também caracteriza-se por possui um módulo de elasticidade e um coeficiente de Poisson, $\nu = \epsilon_{Lateral}/\epsilon_{Axial}$, iguais em qualquer direção.

Portanto, considerando-se separadamente o efeito provocado por cada uma das tensões principais sobre o elemento infinitesimal e, com base no princípio da superposição, conclui-se que as deformações principais podem ser determinadas por meio das Equações (26), (27) e (28):

$$\epsilon_1 = \frac{1}{E}[\sigma_1 - \nu \cdot (\sigma_2 + \sigma_3)] \quad (26)$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{E}[\sigma_2 - \nu \cdot (\sigma_1 + \sigma_3)] \quad (27)$$

$$\epsilon_3 = \frac{1}{E}[\sigma_3 - \nu \cdot (\sigma_1 + \sigma_2)] \quad (28)$$

Logo, substituindo-se as Equações (26), (27) e (28) na equação (25), resolvendo-se a integral de volume e rearranjando a equação resultante, encontra-se que:

$$\frac{U_t}{V} = \frac{1}{2E} \cdot [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu \cdot (\sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_2 \cdot \sigma_3 + \sigma_3 \cdot \sigma_1)] \quad (29)$$

A Equação (29) descreve a *densidade de energia total de deformação elástica* do material. Além disso, por ser uma grandeza volumétrica, trata-se de uma propriedade intrínseca do mesmo, a qual não depende das dimensões do componente (Beer *et al.*, 2008).

Além disso, a teoria da energia de distorção, considera-se que a densidade de energia total de deformação elástica U_t , pode ser decomposta em duas parcelas: a primeira corresponde à energia de dilatação U_v , associada à variação de volume do material, e a segunda refere-se à energia de distorção U_d , relacionada à mudança em sua forma (Collins *et al.*, 2019). Assim, a densidade de energia total de deformação elástica pode ser expressa pela Equação (30):

$$\frac{U_t}{V} = \frac{U_v}{V} + \frac{U_d}{V} \quad (30)$$

Tendo em vista que o critério de falha de von Mises estabelece que o escoamento de um material inicia-se quando a densidade de energia de distorção em um ponto da estrutura, iguala-se à densidade de energia de distorção necessária para provocar o escoamento em um corpo de prova do mesmo material sob carregamento axial de tração ou compressão, isola-se U_d/V da Equação (30). Portanto:

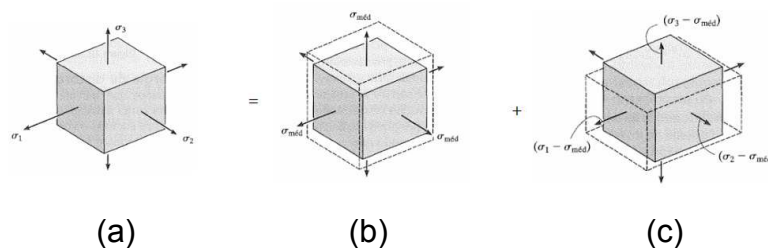
$$\frac{U_d}{V} = \frac{U_t}{V} - \frac{U_v}{V} \quad (31)$$

Em seguida, substituindo-se a Equação (29) na Equação (31), tem-se que:

$$\frac{U_d}{V} = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] - \frac{U_v}{V} \quad (32)$$

Conforme ilustrado na Figura 88, pelo princípio da superposição de tensões, o estado de tensão principal pode ser obtido pela soma de dois tensores de tensão: um tensor de tensão esférico (ou hidrostático), formado por uma tensão principal média σ_m atuando igualmente em todas as faces do elemento, e um tensor de tensão desviador, gerado pelas tensões remanescentes $\sigma_1 - \sigma_m$, $\sigma_2 - \sigma_m$ e $\sigma_3 - \sigma_m$ (Hibbeler, 2010; Popov, 1978). Ressalta-se que a energia de distorção está associada ao tensor desviador, enquanto o tensor esférico está relacionado a energia de dilatação (Hibbeler, 2010).

Figura 88 – Tensor de tensão (a) principal, (b) esférico e (c) principal média



Fonte: Adaptado de Hibbeler (2010, p. 390).

Para determinar, a densidade de energia de dilatação, considera-se a deformação específica resultante do estado de tensão esférico, são as mesmas em todas as direções, conforme a lei de hooke generalizada. Portanto, a dilatação provocada pela a ação de σ_m sob cada face do elemento infinitesimal pode ser expressa pela seguinte Equação (33):

$$e = \frac{\Delta V}{dV} = \frac{3 \cdot [1 - (2 \cdot \nu)]}{E} \cdot \sigma_m \quad (33)$$

Conseqüentemente, a densidade de energia de dilatação é dado pela Equação (34):

$$\frac{U_v}{V} = \frac{1}{2} \cdot \sigma_m \cdot e \quad (34)$$

Substituindo-se as Equação (33) na Equação (34), obtém-se que:

$$\frac{U_v}{V} = \frac{3 \cdot [1 - (2 \cdot \nu)]}{2E} \cdot (\sigma_m)^2 \quad (35)$$

Posteriormente, Levando em consideração à tensão principal média é definida pela Equação (36):

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (36)$$

Substituindo-se as Equações (36) na Equação (35) e reorganizando-se a equação resultante, encontra-se que:

$$\frac{U_v}{V} = \frac{(1 - 2 \cdot \nu)}{6 \cdot E} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 \quad (37)$$

Em seguida, substituindo-se as Equações (37) na Equação (32) e rearranjados-se a equação resultantes, obtém-se que:

$$\frac{U_d}{V} = \frac{(1 + \nu)}{6 \cdot E} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (38)$$

Considerando-se que o módulo de elasticidade por cisalhamento é definido pela Equação (39):

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \Rightarrow \frac{(1 + \nu)}{E} = \frac{1}{2G} \quad (39)$$

Portanto, substituindo-se as Equação (39) na Equação (38), tem-se que:

$$\frac{U_d}{V} = \frac{1}{12 \cdot G} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (40)$$

O critério de falha de von Mises postula que os materiais dúcteis falham quando a densidade de energia de distorção, calculada pela Equação (40), atinge ou excede o valor correspondente àquela armazenada em um corpo de prova submetido a tensão uniaxial, no instante que ele escoar. Assim, considerando-se que para um ensaio de tração, no escoamento, $\sigma_1 = \sigma_E$ e $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, a densidade de energia de distorção para o corpo de prova é dado pela Equação (41):

$$\frac{U_E}{V} = \frac{2}{12 \cdot G} \cdot (\sigma_E)^2 \quad (41)$$

Logo, igualando-se as Equações (40) e (41), obtém-se que:

$$\frac{1}{12 \cdot G} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] < \frac{2}{12 \cdot G} \cdot (\sigma_E)^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] < 2 \cdot (\sigma_E)^2 \Rightarrow$$

$$\sigma_{eq} < \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} \quad (42)$$

Portanto, para formular a teoria da energia de distorção, considera-se o lado direito da Equação (42) como uma tensão equivalente σ_{eq} para o estado de tensão multiaxial, a qual é denominada tensão equivalente de von Mises. Sendo assim:

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} \quad (43)$$

Em termo do estado geral de tensão, a tensão equivalente de von mises pode ser expressa pela equação (44):

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]^{1/2} \quad (44)$$

ANEXO B – FORMULAÇÃO DO MEF NA FORMA GENERALIZADA

Segundo Philpot (2012), o princípio do trabalho virtual estabelece que, quando um corpo em equilíbrio sofre um pequeno deslocamento (deslocamento virtual) que não altera significativamente sua geometria, pelo princípio da conservação da energia, o trabalho virtual realizado pelas forças externas é igual ao trabalho virtual realizado pelas forças internas, desde que as condições de contorno permaneçam inalteradas ao final da deformação gerada por esse deslocamento.

Com base nesse princípio, e considerando-se um campo de deslocamento $\{\delta u\}^{(e)}$ associado a um vetor de deslocamento nodais virtual $\{\delta u_i\}^{(e)}$, para o elemento finito e , obtém-se a seguinte equação:

$$\int_V \left([\delta\sigma]^{(e)} \cdot ([\delta\epsilon]^{(e)})^T \right) \cdot dV = \int_V \left(\{b\}^{(e)} \cdot \{\delta u\}^{(e)T} \right) \cdot dV + \int_S \left(\{\bar{t}\}^{(e)} \cdot \{\delta u\}^{(e)T} \right) \cdot dS + \{f\}^{(e)} \cdot \{\delta u_i\}^{(e)T} \quad (45)$$

Ressalta-se, que no lado esquerdo da Equação (45), a integral de volume representa a energia total de deformação elástica armazenada no elemento. Já no lado direito, a primeira integral corresponde ao trabalho realizado pelas forças de corpo, enquanto a segunda integral representa o trabalho realizado pelas forças de superfície. Por fim, o último termo do lado direito da Equação (45) representa o trabalho realizado pelas cargas concentradas aplicadas nos nós.

Posteriormente, Tendo em vista que o $\{\delta u\}^{(e)}$ pode ser aproximado pelo campo de deslocamento nodais virtual $\{\delta u_i\}^{(e)}$ através da Equação (46):

$$\{\delta u\}^{(e)} \approx [N]^{(e)} \cdot \{\delta u_i\}^{(e)}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (46)$$

Logo:

$$\{\delta\epsilon\}^{(e)} = [B] \cdot \{\delta u_i\}^{(e)} \quad (47)$$

$$\{\delta\sigma\}^{(e)} = [D] \cdot [B] \cdot \{\delta u_i\}^{(e)} \quad (48)$$

Portanto, substituindo-se as Equações (47) e (48) na equação (45) e rearranjar a equação resultante, obtém-se:

$$\int_V \left(([N]^{(e)})^T \cdot \{b\}^{(e)} \right) \cdot dV + \int_S \left(([N]^{(e)})^T \cdot \{\bar{t}\}^{(e)} \right) \cdot dS + \{f\}^{(e)} = \{\delta u_i\}^{(e)} \cdot \left\{ \int_V ([D] \cdot [B] \cdot ([B])^T) \cdot dV \right\} \quad (46)$$

Comparando as equações (46) e (20), conclui-se que:

$$\{F\}^{(e)} = \int_V \left(([N]^{(e)})^T \cdot \{b\}^{(e)} \right) \cdot dV + \int_S \left(([N]^{(e)})^T \cdot \{\bar{t}\}^{(e)} \right) \cdot dS + \{f\}^{(e)} \quad (52)$$

$$[k]^e = \int_V ([D] \cdot [B] \cdot ([B])^T) \cdot dV \quad (52)$$

Em complemento à discussão anterior, vale destacar que, segundo Madenci e Guven (2006), para um elemento finito tridimensional isoparamétrico definido em um sistema de coordenadas naturais ξ , η e ζ , a matriz de rigidez e o vetor de forças nodais resultam nas seguintes equações:

$$[k]^e = \int_V ([D] \cdot [B(\xi, \eta, \zeta)] \cdot ([B(\xi, \eta, \zeta)])^T) \cdot \det(J(\xi, \eta, \zeta)) \cdot d\xi \cdot d\eta \cdot d\zeta$$

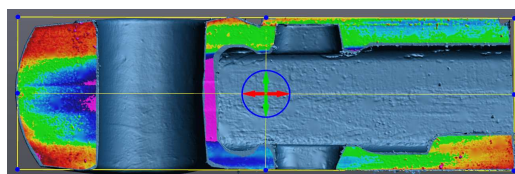
$$\{F\}^{(e)} = \int_V \left(([N]^{(e)})^T \cdot \{b(\xi, \eta, \zeta)\}^{(e)} \right) \cdot \det(J(\xi, \eta, \zeta)) \cdot d\xi \cdot d\eta \cdot d\zeta + \int_S \left(([N]^{(e)})^T \cdot \{\bar{t}(\xi, \eta)\}^{(e)} \right) \cdot \det(J(\xi, \eta, \zeta)) \cdot d\xi \cdot d\eta + \{f\}^{(e)}$$

ANEXO C – ANÁLISE DOS DOS CORTES REALIZADOS COM SERRA-FITA

Com o objetivo de quantificar as irregularidades presentes na superfície de corte resultante do processo realizado com serra-fita, foi definido um plano de referência sobre as superfícies digitalizadas. Em seguida, utilizou-se as ferramentas de controle de qualidade disponibilizadas pelo *software* VXmodel para calcular, de forma automatizada, a distância perpendicular de cada ponto da face em relação ao plano estabelecido.

Os resultados dessa avaliação são apresentados na Figura 89, por meio de um mapa de cores. A Figura 90, por sua vez, exibe o histograma correspondente à distribuição das discrepâncias mensuradas.

Figura 89 – Mapa de cores obtido através da análise da não uniformidade da superfície



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 90 – Distribuição de erro entre o plano gerado e a superfície de corte



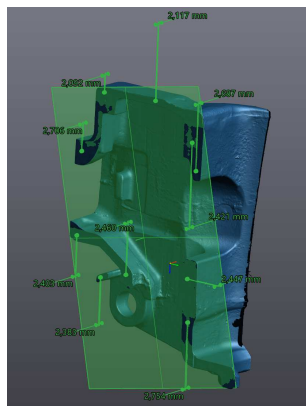
Fonte: Autoria própria (2025).

Constata-se, por meio do histograma ilustrado na Figura 90, que apenas 35,73% dos pontos da superfície estão a uma distância igual ou inferior a 0,1 mm do plano de referência. Além disso, os pontos localizados na região destacada em rosa

no mapa de cores apresentam uma distância superior a 0,5 mm em relação a esse plano.

Posteriormente, com o intuito de complementar essa avaliação, realizou-se a medição da espessura das folgas entre as malhas correspondentes a cada segmento da peça. Para isso, conforme ilustrado na Figura 91, foi definido um plano de referência em uma das faces, a partir do qual se mediu a distância perpendicular até dez pontos distribuídos sobre a superfície oposta.

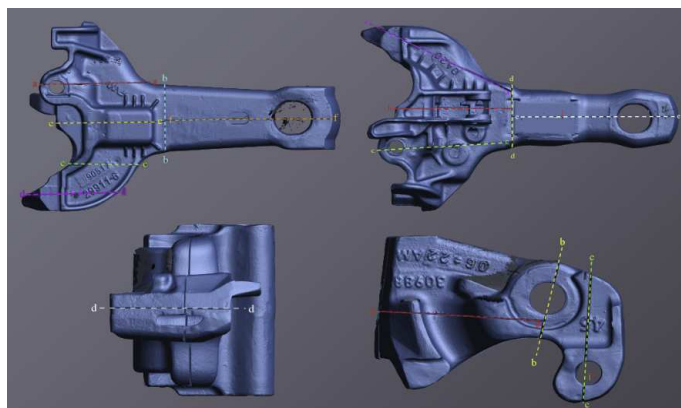
Figura 91 – Medição das folgas de uma das seções do engate rotativo



Fonte: Autoria própria (2025).

Com o intuito de documentar os dados obtidos durante o procedimento, os cortes executados em cada peça foram devidamente identificados. A Figura 92 ilustra o resultado desse processo aplicado aos componentes ocas analisados, enquanto as Tabelas 6 a 8 apresentam as informações coletadas para esses elementos.

Figura 92 – Identificação dos corte efetuados nas peças ocas avaliadas



Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 5 – Espessura dos cortes corte efetuados na mandíbula

Seção	a-a	b-b	c-c	d-d
Porcentagem de pontos localizados a uma distância de até 0,2 mm do plano [%]	48,79	100	100	100
Largura 1 [mm]	3,109	2,463	2,898	1,361
Largura 2 [mm]	0,581	1,527	2,756	1,462
Largura 3 [mm]	1,370	1,845	2,745	0,962
Largura 4 [mm]	1,102	0,608	2,170	1,354
Largura 5 [mm]	1,594	1,243	2,543	2,135
Largura 6 [mm]	1,228	1,496	2,574	2,799
Largura 7 [mm]	2,083	1,066	2,493	3,005
Largura 8 [mm]	1,839	2,111	2,425	2,315
Largura 9 [mm]	1,596	1,774	2,673	1,552
Largura 10 [mm]	2,592	2,280	1,848	2,043

Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 6 – Espessura dos cortes corte efetuados no engate Fixo

Seção	a-a	b-b	c-c	d-d	e-e	f-f
Porcentagem de pontos localizados a uma distância de até 0,2 mm do plano [%]	75,43	92,05	46,29	51,70	81,71	65,86
Largura 1 [mm]	2,183	2,515	2,145	2,119	2,421	2,536
Largura 2 [mm]	2,299	2,467	3,591	2,593	2,687	2,340
Largura 3 [mm]	2,612	2,410	1,731	2,680	2,117	2,561
Largura 4 [mm]	2,416	2,530	3,566	2,813	2,092	2,363
Largura 5 [mm]	1,734	2,450	3,324	2,399	2,706	2,414
Largura 6 [mm]	2,146	2,482	1,876	2,101	2,403	2,422
Largura 7 [mm]	2,560	2,163	1,541	2,704	2,403	2,500
Largura 8 [mm]	2,362	2,567	3,404	2,076	2,383	2,483
Largura 9 [mm]	2,300	2,054	2,099	1,720	2,754	0,870
Largura 10 [mm]	2,223	2,452	3,156	2,757	2,447	2,152

Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 7 – Espessura dos cortes corte efetuados no engate rotativo

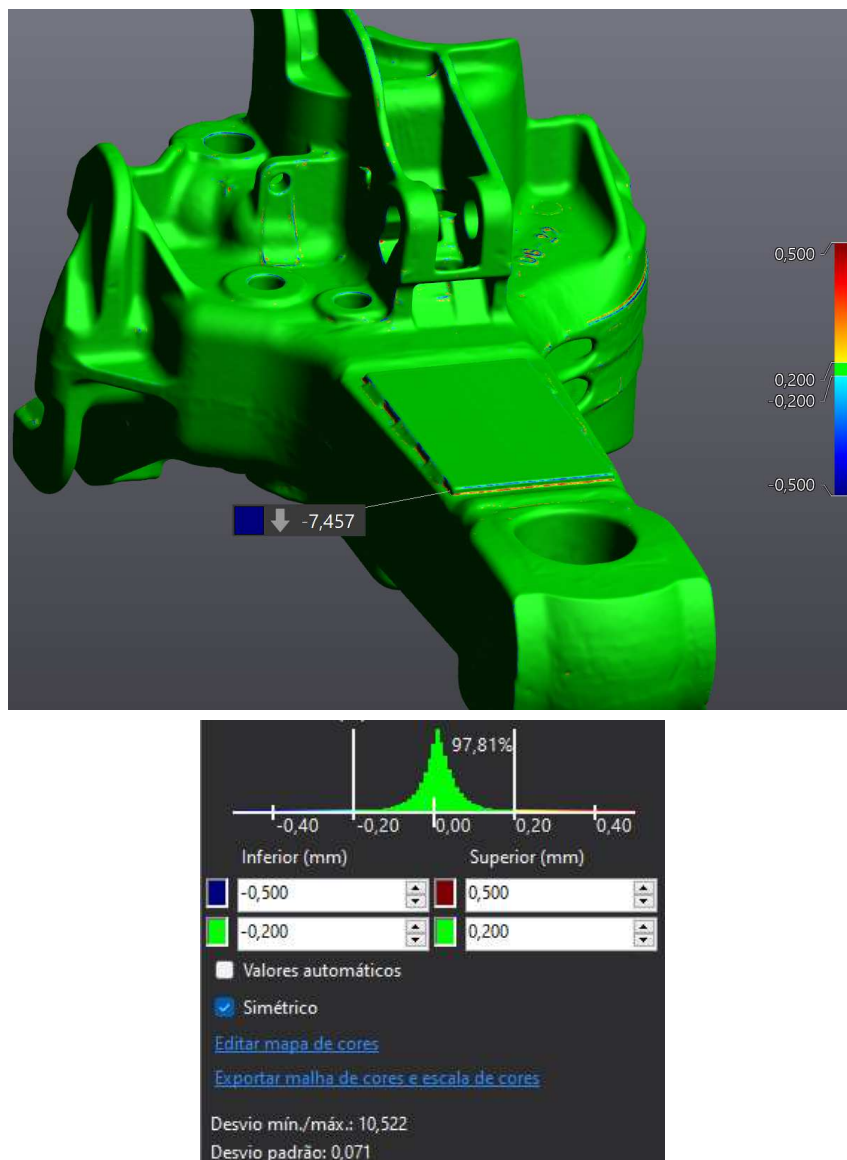
Seção	a-a	b-b	c-c	d-d	e-e
Porcentagem de pontos localizados a uma distância de até 0,2 mm do plano [%]	96,99	96,51	67,90	97,46	66,11
Largura 1 [mm]	2,336	2,276	2,240	2,586	2,202
Largura 2 [mm]	2,533	2,235	2,418	2,480	2,325
Largura 3 [mm]	2,489	2,622	2,611	2,615	2,450
Largura 4 [mm]	2,576	2,392	2,441	2,566	2,422
Largura 5 [mm]	2,310	2,335	2,327	2,668	2,235
Largura 6 [mm]	2,304	2,741	0,913	2,754	2,431
Largura 7 [mm]	2,033	2,310	2,713	2,647	2,199
Largura 8 [mm]	2,476	2,358	2,480	2,724	2,651
Largura 9 [mm]	2,531	2,364	2,144	2,830	2,885
Largura 10 [mm]	2,307	2,709	2,958	2,344	2,118

Fonte: Autoria própria (2025)

ANEXO D – ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DAS MALHAS POLIGONAIS

Para realizar a análise de confiabilidade das malhas suavizadas, foi definido, com base na resolução adotada durante o escaneamento, um limite máximo de erro de $\pm 0,5$ mm para o histograma de desvios, além de um intervalo de tolerância de $\pm 0,20$ mm, valor inferior à menor resolução utilizada na digitalização das peças. Nesse contexto, a Figura 93 apresenta o mapa de cores e o histograma correspondentes à análise de um dos componentes, enquanto a Tabela 9 sintetiza os resultados obtidos para os demais elementos avaliados neste estudo.

Figura 93 – Mapa de cores e histograma resultantes da análise de confiabilidade



Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 8 – Avaliação do processo de suavização das malhas

Nome da peça	Amplitude de tolerância	Desvio padrão	Erro	
			Máximo [mm]	Mínimo [mm]
Braçadeira Rotativa	7,436	0,037	0,797	-6,638
Braçadeira Fixa	2,231	0,053	1,130	-1,101
Castanha	0,904	0,042	0,425	-0,479
Colar	0,978	0,035	0,474	-0,504
Engate Rotativo	10,522	0,071	3,259	-7,263
Engate Fixo	14,839	0,057	7,382	-7,457
Mandíbula	19,258	0,047	9,614	-9,644
Pino de Conexão Fixo	0,773	0,017	0,314	-0,459
Pino de Conexão Rotativo	0,534	0,014	0,209	-0,325

Fonte: Autoria própria (2025)