

2025

Olavo Ricardo Melo Sousa
Jose de Ribamar Ferreira Barros Junior

Desenvolvimento de um Dispositivo Mecânico para Extração de Eixos em Locomotivas acoplados em Tubo U *uma solução aplicada à manutenção ferroviária*



Olavo Ricardo Melo Souza
Jose de Ribamar Ferreira Barros Junior

**DESENVOLVIMENTO DE UM
DISPOSITIVO MECÂNICO
PARA EXTRAÇÃO DE
EIXOS EM LOCOMOTIVAS
ACOPLADOS EM TUBO U:
uma solução aplicada à
manutenção ferroviária**

EDITORA PASCAL

2025

Editor Chefe: Patrício Moreira de Araújo Filho

Edição e Diagramação: Eduardo Mendonça Pinheiro

Edição de Arte: Marcos Clyver dos Santos Oliveira

Bibliotecária: Rayssa Cristhália Viana da Silva – CRB-13/904

Revisão: Eric Costa Carvalho

Conselho Editorial

Dr. Will Ribamar Mendes Almeida

Dr. Raimundo Luna Neres

Dr. Raimundo José Barbosa Brandão

Dr. Elmo de Sena Ferreira Junior

Dr. André Leonardo Demaison Medeiros Maia

Dr. Wellinton de Assunção

Dr. Moisés dos Santos Rocha

M.Sc. José Ribamar Santos Moraes Filho

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S237d

Sousa, Olavo Ricardo Melo; Barros Junior, Jose de Ribamar Ferreira

Desenvolvimento de um dispositivo mecânico para extração de eixos em locomotivas acoplados em Tubo U: uma solução aplicada à manutenção ferroviária / Olavo Ricardo Melo Sousa e Jose de Ribamar Ferreira Barros Junior — São Luís: Editora Pascal, 2025

54 f. : il.:

Formato: PDF

Modo de acesso: World Wide Web

ISBN: 978-65-6068-192-7

D.O.I.: 10.29327/5663911

1. Engenharia de Produção. 2. Tecnologia. 3. Inovação. 4. Pesquisa. I. Sousa, Olavo Ricardo Melo. II. Barros Junior, Jose de Ribamar Ferreira. III. Título.

CDU: 658.5:62:001.895(045)

Qualquer parte deste livro poderá ser reproduzida ou transmitida, sejam quais forem os meios empregados: eletrônicos, mecânicos, fotográficos, gravação ou quaisquer outros, desde que seja citado o autor.

PREFÁCIO

Este livro representa uma valiosa contribuição para a engenharia mecânica aplicada à manutenção ferroviária, unindo pesquisa acadêmica, inovação tecnológica e prática industrial. A proposta de desenvolver um dispositivo mecânico para extração de eixos acoplados em Tubo U de locomotivas surge como resposta direta a um desafio recorrente: a necessidade de realizar operações críticas de manutenção com segurança, precisão e eficiência. Trata-se de um tema que transcende o ambiente acadêmico, alcançando a realidade das oficinas ferroviárias e dos profissionais que atuam diariamente nesse setor estratégico.

A obra demonstra, de maneira didática e consistente, como os fundamentos da resistência dos materiais, o uso de softwares de modelagem tridimensional e a validação por meio do Método dos Elementos Finitos podem ser aplicados para transformar uma demanda prática em uma solução técnica inovadora. O rigor metodológico é equilibrado pela clareza na exposição, tornando o conteúdo acessível tanto a estudantes quanto a profissionais experientes.

É digno de nota que o protótipo em estudo está sendo desenvolvido na empresa METALMA Serviços LTDA, o que evidencia a relevância da integração entre universidade e setor produtivo. Essa sinergia fortalece a inovação, garante aplicabilidade imediata e reafirma o papel da engenharia como ponte entre teoria e prática. A iniciativa ilustra como parcerias institucionais podem acelerar o desenvolvimento de soluções tecnológicas de impacto.

Assim, o leitor encontrará neste livro não apenas um registro técnico, mas também um convite à reflexão sobre o papel da engenharia na modernização da manutenção ferroviária e na promoção de ambientes de trabalho mais seguros e eficientes. Que sua leitura inspire novas ideias, projetos e colaborações em prol de um setor ferroviário cada vez mais confiável e sustentável.

José de Ribamar Ferreira Barros Júnior

Mestre em Engenharia de Materiais e Professor Assistente III da UEMA

AUTORES

Olavo Ricardo Melo Sousa

Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão. Analista de Projetos na Ágora Engenharia Jr, empresa júnior de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão.

José de Ribamar Ferreira Barros Júnior

Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual do Maranhão (1988), especialização em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de São Carlos (1992), especialização em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina (1993), mestrado em Engenharia de Materiais pelo Instituto Federal do Maranhão (2012) e especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Universidade Estadual do Maranhão (2024). Atualmente é Professor Assistente III da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), onde atua como chefe do Laboratório de Soldas, orientador da Empresa Júnior do curso de Engenharia Mecânica (AGORA) e do projeto especial Lanterna Verde – versão Odyssey (Nautidesign). Leciona as disciplinas de Ergonomia e Segurança do Trabalho, Metrologia e Ciência e Tecnologia dos Materiais. Na iniciativa privada, exerce a função de engenheiro mecânico da Metalma Serviços Ltda., desenvolvendo projetos, avaliações e fabricação de cozinhas industriais, estruturas metálicas (coberturas, fachadas, mezaninos, entre outros), além de manutenção e avaliação de máquinas pesadas, elaboração de laudos técnicos e planos de manutenção veicular e industrial.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	7
OBJETIVOS	9
Objetivo geral	9
Objetivos específicos	9
JUSTIFICATIVA	9
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
PROJETO	11
TUBO U.....	11
Funções do Tubo U.....	13
DISPOSITIVO DE EXTRAÇÃO DE EIXOS DO COMPONENTE “TUBO U”	13
RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS.....	14
MATERIAIS MECÂNICOS	16
Comportamento do metal	16
MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	17
Tipos de elementos usados no estudo	18
Elementos de Viga - Para Cálculo de instabilidade estrutural (Flambagem).....	18
Elementos de Placa e Casca Triangulares Parabólicos - Para Detecção de Tensões.....	19
METODOLOGIA.....	20
ESCOPO DE FORNECIMENTO.....	22
ANÁLISE DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL.....	24
ELEMENTOS DO TIPO CASCA.....	25
ANÁLISES DAS TENSÕES E DESLOCAMENTOS.....	27
Propriedades do Estudo	27
Acessórios de Fixação e Cargas Aplicadas	28
Malha e Qualidade da Malha	29
Resultados da Simulação.....	30
Deslocamentos e Deformações.....	32
Análises das Tensões Axiais.....	34
Tensão Normal (SX).....	34
Tensão Normal (SY).....	35
Elementos de viga	35
CÁLCULO DE INSTABILIDADE ESTRUTURAL (FLAMBAGEM).....	36
ANÁLISE DE CONDIÇÃO ADVERSA	37
CARGA NO APOIO.....	38
Modelagem Numérica	38
CÁLCULO DE TENSÃO E DESLOCAMENTOS GERADOS	38
ANÁLISE DOS RESULTADOS	41
CONCLUSÃO	43
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	46
REFERÊNCIAS	48
Anexos	50

INTRODUÇÃO



A manutenção ferroviária é uma área essencial para garantir a continuidade, eficiência e segurança da operação de locomotivas em sistemas de transporte de carga e passageiros. Dentre as diversas atividades realizadas em oficinas ferroviárias, destaca-se a extração de eixos acoplados na carcaça dos motores de tração, especificamente os conhecidos como “Tubo U”. Essa operação é crítica devido ao elevado peso dos componentes, à necessidade de precisão no manuseio e aos riscos envolvidos, tanto para os operadores quanto para o equipamento.

Este projeto tem como objetivo o desenvolvimento de um dispositivo mecânico destinado a facilitar a extração desses eixos, proporcionando uma solução técnica que aumente a segurança, a eficiência e a ergonomia no processo. A proposta integra um sistema de garras ajustáveis, capaz de se adaptar às variações dimensionais dos diferentes modelos de Tubo U existentes na frota da mineradora onde o estudo foi realizado. Além disso, o dispositivo se apoia em uma estrutura rígida e resistente, composta por perfis metálicos W150x13 soldados, e incorpora a unidade hidráulica já disponível na oficina, otimizando recursos existentes.

O foco da pesquisa está na concepção, modelagem e validação estrutural de um equipamento aplicável diretamente na manutenção de locomotivas em oficinas ferroviárias, com ênfase na adaptação a diferentes modelos de motores de tração.

O trabalho inclui o uso de ferramentas de engenharia assistida por computador (CAE), com modelagem tridimensional no software SolidWorks e validação do projeto por meio de análise por elementos finitos (FEA), garantindo confiabilidade e viabilidade do dispositivo antes da sua fabricação.

Dentro do contexto da engenharia mecânica, o tema está inserido na área de projeto e desenvolvimento de máquinas e equipamentos industriais, com aplicação prática na manutenção pesada e na engenharia de segurança do trabalho. A pesquisa une conceitos de resistência dos materiais, análise estrutural, e normas técnicas, contribuindo para o avanço das práticas na manutenção ferroviária e para o desenvolvimento de soluções mais seguras e eficientes.

A escolha do tema surgiu a partir da experiência prática do autor durante o estágio curricular supervisionado em uma grande mineradora, onde se observou a necessidade de um equipamento que atendesse às demandas operacionais de extração de eixos de forma mais segura e eficiente, reduzindo os riscos de acidentes, danos aos componentes e os custos com manutenção corretiva. O contato direto com os profissionais da operação e o levantamento de campo realizado na oficina proporcionaram subsídios para o desenvolvimento de uma solução técnica inovadora, adaptada à realidade da empresa e alinhada às boas práticas da engenharia.

O objeto de análise deste estudo é o dispositivo mecânico desenvolvido para a extração dos eixos “Tubo U” de locomotivas, incluindo sua concepção estrutural, funcionamento, adaptação aos diferentes modelos de motores de tração e sua validação por elementos finitos, como etapa fundamental para a verificação da segurança e eficácia do equipamento antes de sua fabricação e uso na prática.

OBJETIVOS

Objetivo geral

Desenvolver e validar, por meio de modelagem computacional tridimensional e análise por elementos finitos, um dispositivo mecânico para extração de eixos de um componente mecânico “Tubo U” de locomotivas, adaptável a diferentes modelos de motores de tração, com vistas à aplicação prática na manutenção ferroviária.

Objetivos específicos

- a) Projetar, modelar e dimensionar o dispositivo mecânico e suas garras ajustáveis no software SolidWorks, considerando a adaptação a diferentes modelos;
- b) Analisar e verificar, utilizando o método dos elementos finitos, o comportamento estrutural do dispositivo sob condições de carga reais, avaliando tensões de Von Mises, modos de flambagem e coeficiente de segurança;
- c) Explicar e validar a eficiência e segurança do projeto desenvolvido, fornecendo base técnica para futura fabricação e aplicação prática;

JUSTIFICATIVA

A extração de eixos acoplados na carcaça de motores de tração, especialmente os do tipo “Tubo U”, constitui uma operação de grande relevância social e industrial no setor ferroviário. Esse processo, quando realizado de maneira inadequada, eleva significativamente os riscos de acidentes de trabalho, danos ao patrimônio e interrupções no fluxo de transporte de cargas, afetando diretamente a produtividade e a segurança das operações logísticas. O desenvolvimento de um dispositivo mecânico seguro, eficiente e adaptado à realidade das oficinas de manutenção ferroviária contribui para a mitigação desses problemas, promovendo melhores condições de trabalho e preservação dos recursos materiais e humanos envolvidos na atividade.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA



Esta revisão tem como objetivo analisar os temas diretamente relacionados ao trabalho proposto, portanto os principais temas estudados foram: projeto, dispositivos mecânicos, resistência dos materiais, materiais mecânicos e método dos elementos finitos.

PROJETO

Segundo Shigley *et al.* (2005), projetar consiste em elaborar um plano capaz de solucionar uma necessidade específica ou um problema técnico, transformando ideias em soluções físicas que sejam funcionais, seguras, confiáveis e viáveis do ponto de vista da manufatura e da aplicação. Neste contexto, o projeto do dispositivo mecânico para extração de eixos “Tubo U” se enquadra como uma resposta técnica a um problema recorrente identificado no processo de manutenção de locomotivas em oficinas ferroviárias.

O desenvolvimento deste projeto baseou-se em informações obtidas por meio de observações práticas, entrevistas com operadores, levantamentos dimensionais e análise dos requisitos operacionais.

Como afirma Shigley *et al.* (2005, p. 27), o processo de projetar é iterativo e requer tomada de decisões, muitas vezes com dados incompletos ou conflitantes. Neste trabalho, buscou-se equilibrar critérios técnicos, operacionais e normativos para chegar a uma solução viável e segura.

No que diz respeito ao projeto de máquinas, Norton (2004, p. 34) define que o objetivo principal é dimensionar, dar forma às peças e selecionar materiais e processos de fabricação de modo que o equipamento desempenhe sua função sem falhas. Isso exige do projetista a capacidade de prever modos de falha, realizar análises de tensões e deformações e garantir a integridade estrutural de cada componente. Aplicando essa abordagem, o presente trabalho realizou modelagem tridimensional do dispositivo no software SolidWorks e validou sua estrutura por meio de análise por elementos finitos (FEA), assegurando resistência mecânica adequada e desempenho seguro sob as cargas envolvidas na operação.

Embora nem todas as etapas da metodologia proposta por Norton (2004) sejam aplicadas integralmente em projetos acadêmicos, este trabalho seguiu um fluxo compatível com essa estrutura, contemplando:

- (a) a **identificação da necessidade**, a partir de observações em campo;
- (b) a **pesquisa de suporte**, incluindo normas técnicas e requisitos operacionais;
- (c) a **definição dos objetivos e especificações do projeto**;
- (d) a **síntese e análise da solução proposta**, com uso de ferramentas de engenharia assistida por computador; e
- (e) a **validação estrutural**, como etapa final antes da possível prototipagem.

Assim, este projeto se insere na área de desenvolvimento de equipamentos industriais, com aplicação prática na manutenção pesada ferroviária, promovendo soluções mais seguras, técnicas e alinhadas às boas práticas da engenharia mecânica.

TUBO U

O Tubo U é uma peça fundamental em sistemas mecânicos, como os utilizados em ferrovias e em outras aplicações industriais pesadas. Ele é uma carcaça feita de ferro fundi-



do, projetada para envolver e proteger o eixo, funcionando como uma estrutura de apoio e proteção para os componentes internos, como os rolamentos e outros elementos de transmissão de força. Sua principal função é proporcionar rigidez, estabilidade e proteção ao eixo e aos sistemas mecânicos em seu interior.

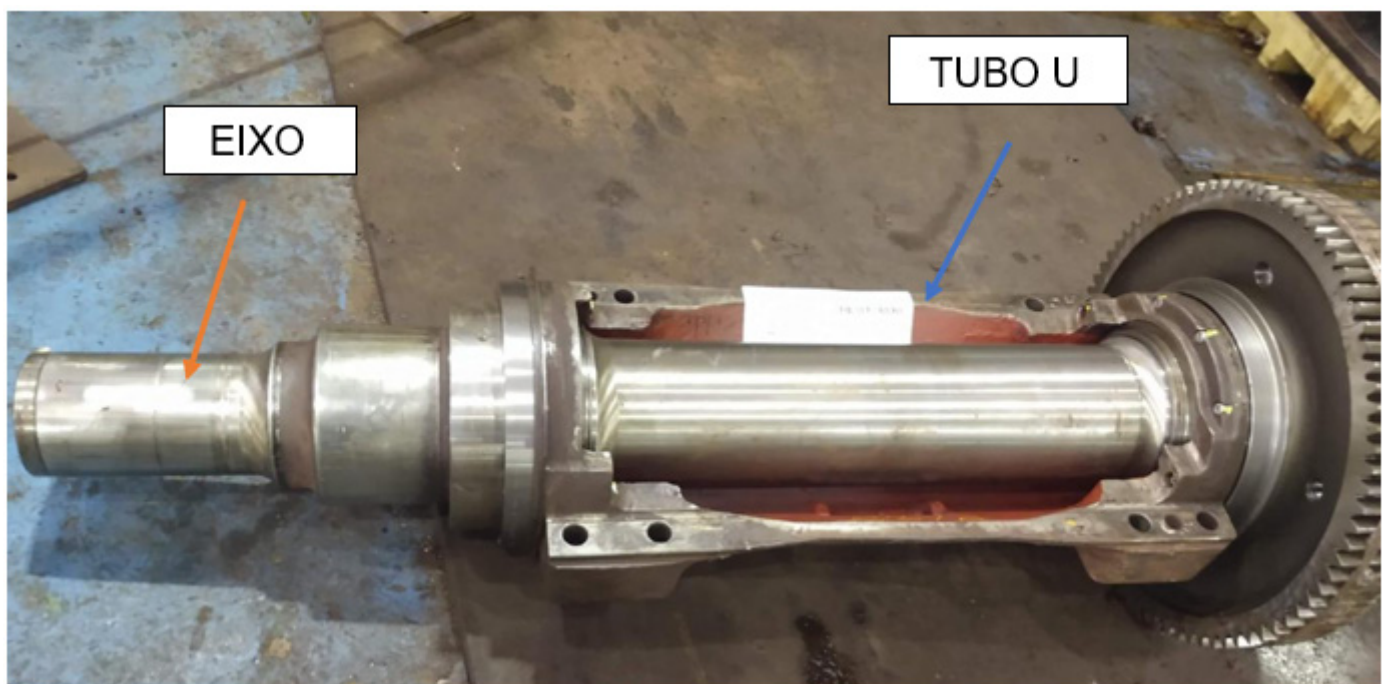
Figura 1. Carcaça do Tubo U



Fonte: Autores

O nome “Tubo U” refere-se ao formato da peça, que, como o próprio nome sugere, tem uma geometria parecida com a letra “U”. Esse design é vantajoso porque envolve o eixo de maneira a permitir sua movimentação e rotação, ao mesmo tempo que protege contra impactos e desgaste excessivo. O Tubo U é geralmente feito de ferro fundido, que é resistente e adequado para suportar as tensões mecânicas elevadas presentes em sistemas de transporte, como os trens.

Figura 2. Componente montado do eixo com o tubo U



Fonte: Autores

Funções do Tubo U

Proteção do Eixo: Como uma carcaça metálica, o Tubo U protege o eixo contra contaminantes, como poeira, água ou sujeira, além de oferecer proteção física contra impactos e forças externas.

Estabilidade e Suporte: Ele ajuda a estabilizar o eixo, mantendo-o alinhado e prevenindo deformações ou desalinhamentos durante a operação, o que é fundamental em sistemas de alta carga, como ferrovias.

Distribuição de Tensões: O Tubo U distribui as tensões geradas durante a operação do eixo de maneira mais uniforme, ajudando a prevenir falhas no eixo e outros componentes internos. Ele também pode ser projetado para absorver certas vibrações, ajudando a reduzir o desgaste dos componentes internos.

Facilidade de Manutenção: Como componente de um sistema mecânico modular, o Tubo U pode ser projetado para ser facilmente removido ou substituído, sem a necessidade de desmontar todo o sistema. Isso facilita a manutenção e o reparo dos eixos, sem comprometer a funcionalidade do restante da máquina.

Figura 3. Conjuntos montados de eixo, roda e tubo u



Fonte: Autores

DISPOSITIVO DE EXTRAÇÃO DE EIXOS DO COMPONENTE “TUBO U”

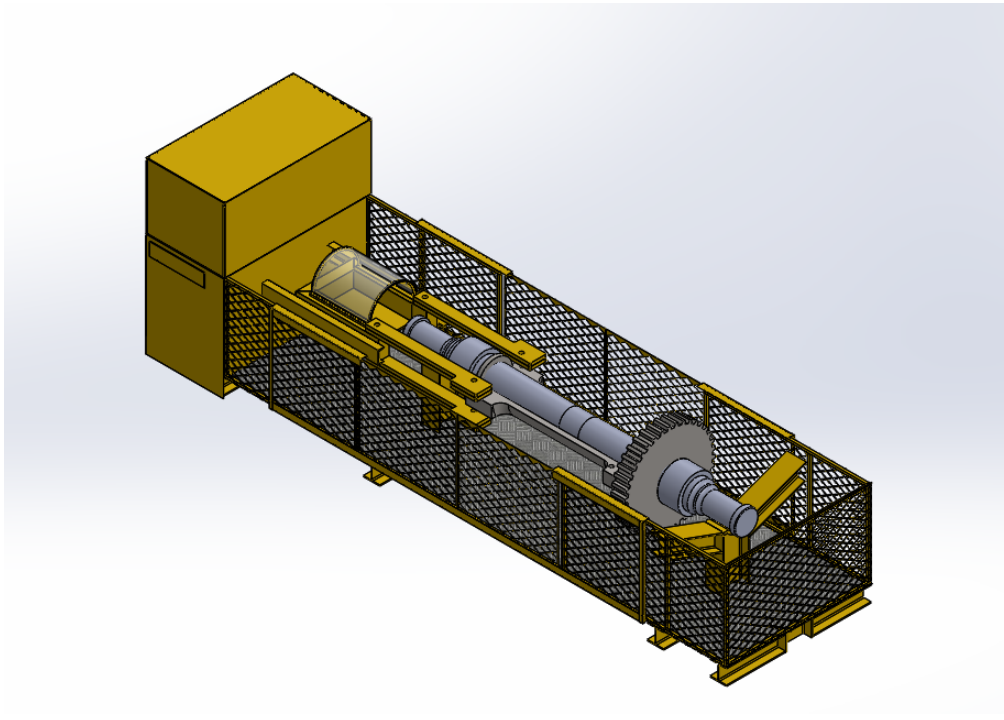
O dispositivo desenvolvido neste trabalho destina-se à extração de eixos acoplados aos motores de tração de locomotivas, conhecidos como “Tubo U”. Trata-se de uma estrutura mecânica projetada para operar com auxílio de uma unidade hidráulica existente na oficina, composta por uma base rígida metálica, um conjunto de garras ajustáveis e elementos de fixação, conforme mostrado na Figura 1.

Segundo a definição do próprio autor com base na aplicação prática, o equipamento se caracteriza como um dispositivo auxiliar de manutenção, projetado para garantir segurança, eficiência e precisão na remoção dos eixos, sem comprometer os componentes da locomotiva ou expor os operadores a riscos.

A estrutura principal do dispositivo é formada por perfis metálicos do tipo W150x13 soldados, garantindo resistência à flexão e torção durante a operação. As garras móveis foram projetadas para se adaptar aos diferentes modelos de eixos “Tubo U” da frota, respeitando tolerâncias operacionais e evitando folgas excessivas.

A Figura 4 apresenta a representação do equipamento modelado no software SolidWorks, onde se destacam os principais subconjuntos estruturais e o sistema de engate com a unidade hidráulica:

Figura 4. Modelagem 3D do dispositivo



Fonte: Autores

Adicionalmente, para validação da estrutura, foram aplicados os critérios da análise por elementos finitos (FEA), assegurando a integridade do equipamento sob as cargas esperadas durante a operação.

O projeto também foi pautado nos princípios de projeto mecânico segundo Norton (2004), com foco na resistência dos materiais, estabilidade da estrutura e escolha de materiais adequados ao ambiente de operação. A solução propõe um avanço significativo em relação aos métodos artesanais anteriormente utilizados, otimizando tempo, reduzindo riscos e promovendo maior confiabilidade ao processo de manutenção de locomotivas.

RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS

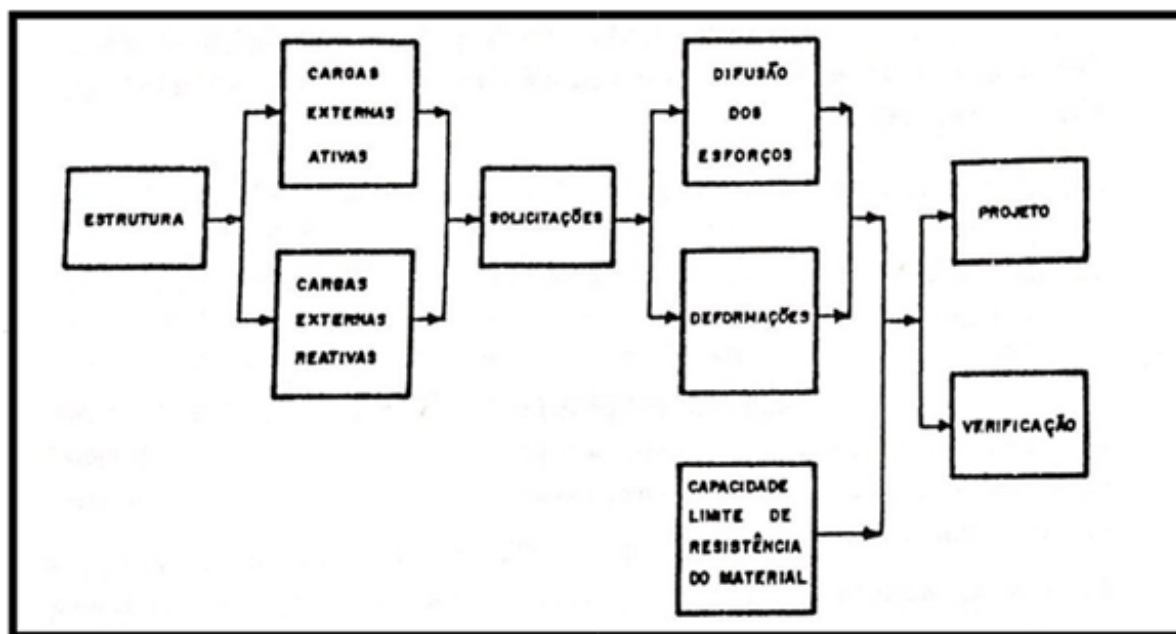
De acordo com Shigley *et al.* (2005, p. 41), a resistência é uma propriedade atribuída aos materiais ou aos elementos mecânicos, diretamente influenciada pela escolha do material, seu tratamento térmico e o processo de fabricação. No desenvolvimento do dispositivo mecânico proposto neste trabalho, os fundamentos da resistência dos materiais foram essenciais para garantir que a estrutura suportasse as cargas envolvidas no processo de extração dos eixos “Tubo U” de forma segura e confiável.

A correta compreensão dos conceitos de **estática e isostática** é fundamental para o dimensionamento estrutural de qualquer equipamento. Segundo Gomes (1998, p. 1), a análise dos sistemas estruturais deve iniciar com a determinação das reações externas e das solicitações internas, obedecendo às condições de equilíbrio. Esse procedimento é base para o estudo da resistência dos materiais e se aplica diretamente ao projeto do dispositivo em questão, cuja estrutura metálica foi submetida a esforços de tração, compres-

são e flexão.

A Figura 5, baseada no fluxograma proposto por Gomes (1998), resume as etapas da condução de um problema típico de resistência dos materiais, desde a formulação até a interpretação dos resultados obtidos.

Figura 5. Condução de um Problema de Resistência dos Materiais



Fonte: GOMES, 1998, pág. 3

Complementando essa abordagem, Hibbeler (2004, p. 1) define a resistência dos materiais como o ramo da mecânica que estuda a relação entre cargas aplicadas a um corpo deformável e as forças internas geradas, bem como a deformação resultante e a estabilidade da estrutura. No caso do dispositivo proposto, essa análise foi realizada por meio da técnica de elementos finitos (FEA), com o objetivo de prever o comportamento do sistema sob carga e garantir que a estrutura não falhe durante o uso.

Segundo Beer e Johnston (1995), determinar as tensões em um componente estrutural não é o objetivo final, mas sim uma etapa crítica no processo de análise de equipamentos existentes ou no projeto de novos dispositivos, como o apresentado neste trabalho. A segurança do projeto é garantida pela utilização de um **coeficiente de segurança**, que representa a razão entre a carga de ruptura e a carga admissível. Conforme afirmam os autores:

Uma peça estrutural ou componente de máquina deve ser projetada de tal forma que a carga última seja consideravelmente maior que o carregamento que essa peça ou elemento irão suportar em condições normais de utilização (Beer e Johnston, 1995, p. 39).

Neste contexto, adotou-se um coeficiente de segurança adequado à aplicação, conforme as recomendações das normas técnicas e da NR-12, equilibrando segurança operacional e viabilidade econômica. Um coeficiente muito baixo aumenta o risco de falhas, enquanto um coeficiente excessivamente alto resulta em projetos superdimensionados e com custo elevado, o que não é desejável para aplicações industriais com restrições orçamentárias.

Portanto, o projeto do dispositivo mecânico de extração foi desenvolvido com base

nos princípios fundamentais da resistência dos materiais, utilizando ferramentas modernas de análise computacional para garantir sua integridade estrutural e confiabilidade em operação.

MATERIAIS MECÂNICOS

O aço é um dos materiais mais amplamente utilizados na engenharia mecânica, especialmente em estruturas sujeitas a esforços mecânicos significativos, como é o caso do dispositivo mecânico desenvolvido neste trabalho. Por sua versatilidade, resistência mecânica e facilidade de fabricação, o aço se torna a escolha natural para projetos estruturais como o presente.

Chiaverini (1988, p. 21) define o aço como uma liga metálica complexa, formada essencialmente por ferro e carbono, mas contendo ainda elementos residuais provenientes do processo de fabricação.

Segundo o autor:

Aço é a liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes dos processos de fabricação (Chiaverini, 1988, p. 21).

No projeto do dispositivo de extração dos eixos “Tubo U”, foi utilizado o aço **ASTM A36**, uma liga de uso comum na construção de estruturas metálicas. A sigla ASTM refere-se à *American Society for Testing and Materials*, entidade que padroniza especificações técnicas de materiais. De acordo com publicação da empresa GERDAU (2013), disponível no site www.profissionaldoaco.com.br, a norma **ASTM A36** especifica um aço carbono destinado a aplicações estruturais em geral, comumente empregado em perfis metálicos, estruturas de passarelas, máquinas agrícolas e implementos ferroviários.

Os perfis estruturais utilizados no projeto — especificamente os perfis tipo W150x13 — são fabricados com esse material, devido às suas propriedades mecânicas adequadas, como limite de escoamento, resistência à tração e boa soldabilidade. A norma ASTM A36 estabelece os seguintes parâmetros principais para o material:

- Limite de escoamento mínimo: **250 MPa**
- Resistência à tração: **400 a 550 MPa**
- Alongamento mínimo: **20 a 23%**, dependendo da espessura

Essas propriedades garantem ao aço ASTM A36 a capacidade de resistir às solicitações mecânicas envolvidas no processo de extração dos eixos, sem comprometer a integridade estrutural do dispositivo. Além disso, sua disponibilidade no mercado e facilidade de fabricação tornam o material uma escolha eficiente tanto técnica quanto economicamente.

Portanto, a seleção do aço ASTM A36 para a estrutura principal do dispositivo considera não apenas a resistência mecânica necessária, mas também aspectos práticos de fabricação, manutenção e conformidade com normas aplicáveis.

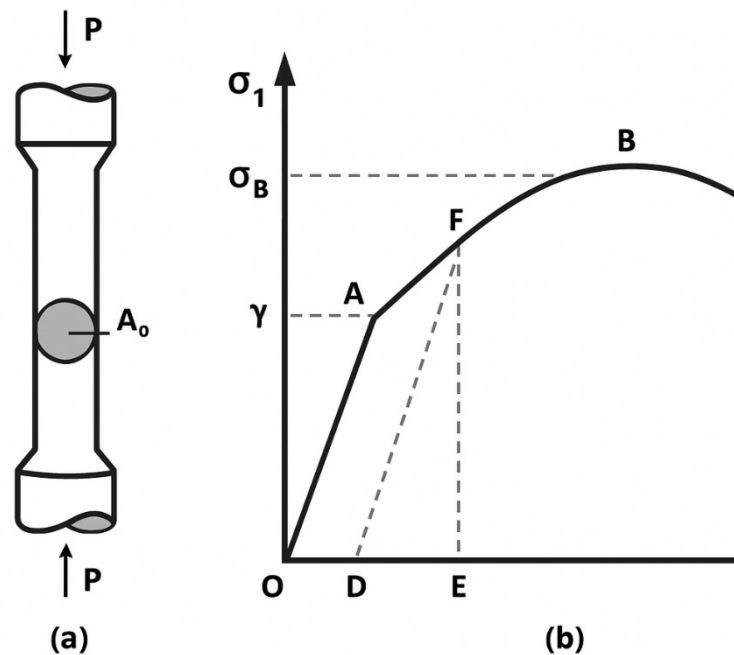
Comportamento do metal

O comportamento de um metal submetido à tração pura de acordo com a Figura

3. Conforme Helman e Cetlin (1993, p. 26), considera-se um corpo de prova de tração, de comprimento inicial e cuja área da seção transversal inicial é A . Este corpo é submetido a cargas crescentes P , anotando o seu alongamento Δl para cada valor de P . A tensão σ e a deformação e são dadas pelas equações 1 e 2 respectivamente.

$$\sigma_1 = \frac{P}{A_0} \quad (1) \quad e_1 = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

Figura 6. Gráfico do comportamento de um metal a tração pura



Fonte: HELMAN e CETLIN, 1993, pág. 26

De acordo com Helman e Cetlin (1993), em um gráfico de tensão e deformação, os valores obtidos normalmente formam curvas com o aspecto mostrado na Figura 6. Pode-se verificar de forma experimental que até o ponto A, onde σ é menor que Y , a deformação é elástica. Após o ponto A, ocorre deformação plástica simultaneamente com a elástica. A tensão no ponto A é conhecida como tensão de escoamento do material.

MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

De acordo com Azevedo (2003, p. 1), no campo da Engenharia de Estruturas, o Método dos Elementos Finitos (MEF) tem como objetivo determinar o estado de tensão e deformação de sólidos com geometria arbitrária, sujeitos a diferentes condições de carregamento. Trata-se de uma ferramenta essencial para a análise estrutural, aplicada em áreas como edifícios, pontes, barragens e, no caso deste trabalho, dispositivos mecânicos utilizados na manutenção ferroviária.

Quando existe a necessidade de projetar uma estrutura, é habitual proceder-

-se a uma sucessão de análises e modificações das suas características, com o objetivo de se alcançar uma solução satisfatória, quer em termos econômicos, quer na verificação dos pré-requisitos funcionais e regulamentares (AZEVEDO, 2003, p. 1).

Neste trabalho, o MEF foi utilizado para validar a integridade estrutural do dispositivo projetado para a extração de eixos “Tubo U”, garantindo que os esforços mecânicos atuantes durante a operação não provoquem falhas ou deformações permanentes nos componentes do equipamento.

Segundo Malkus e Plesha (1989), o Método dos Elementos Finitos é um procedimento numérico baseado na discretização, onde o domínio contínuo da estrutura é dividido em pequenas partes chamadas de elementos finitos. Essa técnica transforma um problema complexo em vários problemas simples e interligados, cujas soluções locais contribuem para a solução global do modelo.

Com o uso de softwares de Engenharia Assistida por Computador (CAE), como o **SolidWorks Simulation**, é possível aplicar o MEF de maneira eficiente, proporcionando análises precisas de tensões, deformações e fatores de segurança em peças com geometrias complexas. No contexto deste projeto, o método foi fundamental para avaliar:

- A resistência das vigas e perfis metálicos sob carga;
- A estabilidade da estrutura durante o processo de extração;
- A distribuição de tensões nas garras ajustáveis;
- E a adequação do dispositivo aos critérios de segurança da **NR-12**.

Além de permitir a validação do projeto, a aplicação do MEF também contribuiu para reduzir a necessidade de protótipos físicos na fase inicial, otimizando recursos e diminuindo custos de desenvolvimento. Essa abordagem reflete o uso moderno da engenharia computacional no desenvolvimento de soluções seguras, econômicas e eficientes.

Tipos de elementos usados no estudo

No presente estudo, a análise estrutural foi realizada utilizando dois tipos principais de elementos no Método dos Elementos Finitos (MEF): **elementos de viga** e **elementos de placa e casca triangulares parabólicos**. Cada tipo de elemento foi escolhido com base nas características específicas do problema e na necessidade de otimizar a análise em termos de precisão e desempenho computacional.

Elementos de Viga - Para Cálculo de instabilidade estrutural (Flambagem)

Os elementos de viga foram utilizados especificamente para o cálculo de flambagem. Esse tipo de elemento é ideal para modelar componentes que se comportam predominantemente em flexão, como vigas e colunas submetidas a compressão axial.

O modelo de viga é simplificado, focando em representar a distribuição de momentos, forças cortantes e deslocamentos ao longo do comprimento do componente.

No caso da análise de flambagem, onde o comportamento instável do material devido à compressão é fundamental, os elementos de viga são eficientes, pois eles consideram a rigidez do material e a flexibilidade do componente em termos de seu comprimento e

suas condições de apoio.

Elementos de Placa e Casca Triangulares Parabólicos - Para Detecção de Tensões

Por outro lado, os elementos de placa e casca triangulares parabólicos foram utilizados para a detecção de tensões na estrutura.

Esses elementos são mais adequados para representar estruturas que possuem geometria mais complexa ou curvada, como placas finas ou cascas com curvaturas. Esses elementos são ideais para a análise de tensões em superfícies onde as deformações podem ser mais complexas e as variações de tensão são mais significativas.

O uso dos elementos de casca triangulares parabólicos permite uma detecção mais precisa das tensões com menos custo computacional, já que, ao contrário dos elementos sólidos, eles modelam apenas a superfície da estrutura, ignorando os efeitos internos complexos e focando na deformação e na tensão ao longo das superfícies.

Esse tipo de elemento proporciona uma análise detalhada das tensões, especialmente em componentes como as garras ajustáveis e outros elementos metálicos do dispositivo, sem sobrecarregar o processo de simulação com um número excessivo de cálculos.

Além disso, esses elementos parabólicos são eficazes em representar a flexão e a tensão de membrana, permitindo uma melhor previsão de como a estrutura se comporta sob cargas sem a necessidade de uma malha excessivamente refinada ou de cálculos muito complexos.

METODOLOGIA



A metodologia adotada para o desenvolvimento do dispositivo mecânico de extração dos eixos “Tubo U” foi estruturada em etapas, a fim de garantir que o equipamento atendesse aos requisitos técnicos, operacionais e normativos, com foco na segurança e na eficiência da operação em oficinas de manutenção ferroviária.

Inicialmente, foi realizado um levantamento técnico em campo, na oficina da mineradora onde o equipamento seria utilizado. Nessa fase, foram obtidas as características dimensionais dos motores de tração, variações dos eixos “Tubo U”, condições de operação, e recursos disponíveis, como a unidade hidráulica já existente. Também foram consideradas as exigências da NR-12 e outras normas técnicas relacionadas à segurança em máquinas e equipamentos.

Com base nessas informações, foi definida a concepção preliminar do dispositivo. A estrutura principal foi projetada utilizando perfis metálicos tipo W150x13 e sistema de garras ajustáveis, respeitando os limites de espaço, operação e os esforços previstos no processo de extração. A modelagem tridimensional foi realizada no software SolidWorks, permitindo a visualização completa do equipamento, análise de interferências e preparação dos desenhos técnicos para fabricação.

A etapa seguinte consistiu na validação estrutural do projeto. Para isso, foi aplicada a análise por elementos finitos (MEF), com o objetivo de identificar pontos críticos de tensão e verificar o comportamento estrutural do dispositivo sob carga. As análises foram conduzidas utilizando o módulo de simulação do SolidWorks, adotando elementos do tipo viga e malhas compatíveis com a geometria do modelo.

Os resultados da simulação foram comparados com cálculos analíticos de resistência dos materiais, verificando se as tensões máximas e as deformações estavam dentro dos limites aceitáveis para o aço ASTM A36, material utilizado na fabricação. Também foi considerado um coeficiente de segurança adequado, de acordo com o tipo de esforço e as normas vigentes.

Por fim, com os resultados validados, foram elaborados os desenhos técnicos finais, com todas as especificações de fabricação e montagem. A metodologia ainda incluiu simulações adicionais com sobrecargas, de forma a avaliar a robustez do dispositivo e simular cenários extremos de operação, como forma de garantir a confiabilidade e a durabilidade da estrutura ao longo do tempo.

ESCOPO DE FORNECIMENTO



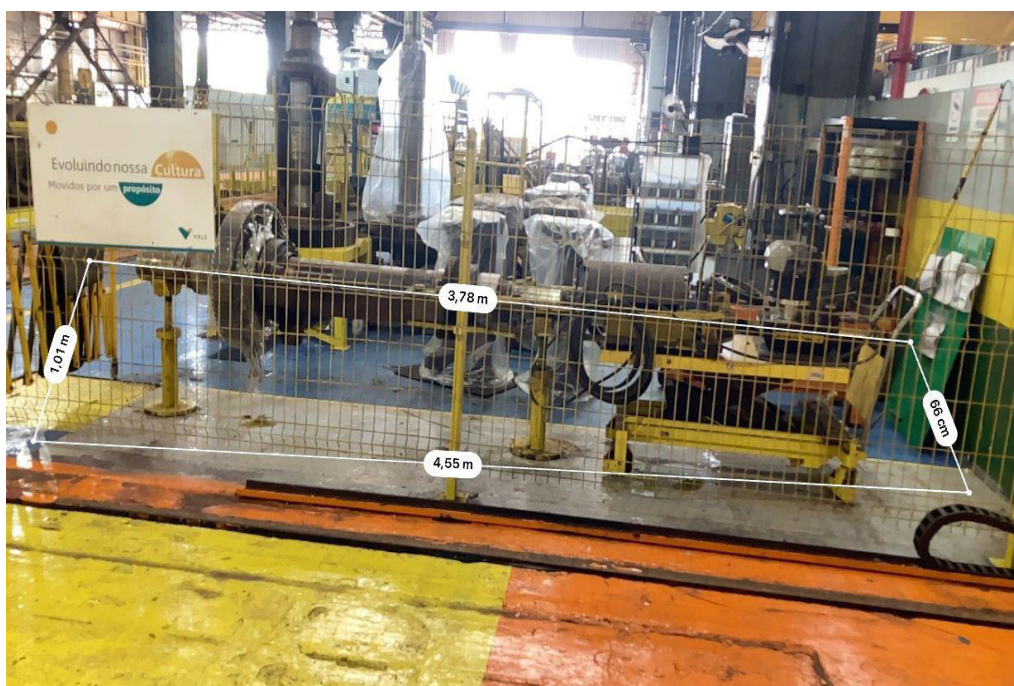
A primeira etapa do desenvolvimento do projeto consistiu na análise dos dados técnicos obtidos em campo, conforme descrito no Anexo A, que detalha as condições operacionais e as exigências para a aplicação do dispositivo de extração de eixos “Tubo U” em oficinas ferroviárias. Esse levantamento foi essencial para garantir que o equipamento fosse projetado de acordo com os requisitos reais da operação, respeitando os limites físicos, funcionais e de segurança.

A seguir, são descritas as principais informações técnicas e operacionais consideradas no projeto:

- **Equipamento:** Dispositivo de Extração de Eixos “Tubo U”;
- **Aplicação:** Manutenção corretiva em motores de tração de locomotivas;
- **Local de instalação:** Oficina de manutenção de uma grande mineradora;
- **Tipo de componente:** Tubo U (variável em modelo e diâmetro externo);
- **Peso estimado do eixo:** Aproximadamente **1 a 2 toneladas**;
- **Frequência de uso:** Baixa frequência, porém crítica em segurança;
- **Operação:** Manual com auxílio de unidade hidráulica existente;
- **Alimentação hidráulica:** Unidade padrão da oficina (já disponível);
- **Área útil de operação:** Espaço limitado entre os trilhos e equipamentos adjacentes;
- **Restrições adicionais:** Dispositivo deve permitir fácil acoplamento e desacoplamento, sem desmontagens adicionais dos motores.

Como forma de registrar visualmente as condições reais do ambiente de aplicação, foi realizada uma vistoria técnica no local, acompanhada de registros fotográficos. A Figura 7 apresenta uma das imagens capturadas em campo, que serviu de base para a análise do espaço físico, identificação de possíveis interferências e definição de parâmetros geométricos do dispositivo

Figura 7. Local de aplicação do dispositivo



Fonte: Autores

ANÁLISE DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL



O projeto do dispositivo mecânico foi desenvolvido para atender às exigências operacionais observadas em campo, além de incorporar as melhores práticas de engenharia, sem impactar significativamente os custos de fabricação.

O objetivo principal foi criar uma solução tecnicamente viável, segura e economicamente otimizada, utilizando os recursos já disponíveis na oficina da mineradora. Para isso, optou-se pela utilização da unidade hidráulica existente, bem como pela escolha de materiais amplamente disponíveis e de fácil aquisição, como os perfis metálicos W150x13 em aço ASTM A36.

Durante o processo de desenvolvimento do dispositivo, foram realizadas análises de integridade estrutural para garantir que o equipamento fosse capaz de suportar as condições de operação sem comprometer sua segurança ou funcionalidade. O estudo foi conduzido com o auxílio do Método dos Elementos Finitos (MEF), utilizando o SolidWorks Simulation, para avaliar o comportamento do dispositivo sob diferentes tipos de carga e garantir que os esforços mecânicos atuantes durante a operação não causassem falhas ou deformações permanentes nos componentes.

A análise de tensão permitiu identificar os pontos críticos da estrutura, como as garras ajustáveis e a estrutura principal do dispositivo, que foi projetada para suportar cargas de até 2 toneladas, com uma margem de segurança adicional em relação ao peso dos eixos extraídos. Através dessas simulações, foi possível otimizar a geometria da estrutura e reduzir a complexidade de fabricação, garantindo a robustez necessária para a aplicação.

Além disso, a análise de flambagem foi realizada para verificar a estabilidade estrutural do dispositivo, considerando os elementos mais esbeltos, como as vigas e as partes da estrutura sujeitas a compressão. A análise indicou que a estrutura possui uma boa margem de segurança, prevenindo o risco de falhas devido à instabilidade por flambagem.

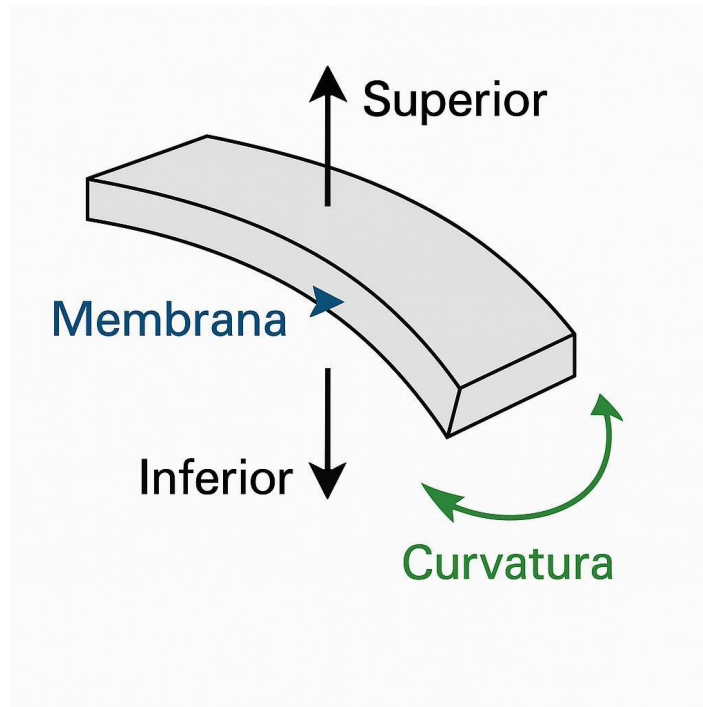
O projeto também foi concebido de forma modular, o que facilita a transporte, montagem e manutenção, aspectos essenciais para ambientes industriais como oficinas ferroviárias. A modelagem tridimensional permitiu a visualização completa da montagem, além de identificar possíveis interferências e gerar automaticamente os desenhos técnicos de fabricação e montagem.

O resultado final é um dispositivo funcional, seguro, ergonômico e econômico, que representa uma melhoria significativa em relação aos métodos artesanais atualmente empregados na extração dos eixos. As análises de integridade estrutural realizadas garantiram que o dispositivo fosse capaz de operar de maneira eficiente, reduzindo significativamente os riscos operacionais e os danos aos componentes, enquanto mantém os custos de produção e operação sob controle.

ELEMENTOS DO TIPO CASCA

A análise de tensões em estruturas de casca, especialmente quando sujeitas a curvaturas, é essencial para entender a distribuição de forças internas e a deformação da estrutura. Este estudo visa analisar as tensões atuando em diferentes regiões de uma casca curvada, considerando quatro componentes principais: superior, inferior, membrana e curvatura. Através do uso de software de simulação SOLIDWORKS SIMULATION, foram calculadas as tensões de Von Mises, tensões normais em diferentes direções, e o deslocamento causado pelas forças aplicadas.

Figura 8. Exemplo de um elemento de casca



Fonte: Autores

A figura 8 ilustra uma casca curvada, com as indicações dos direcionamentos das forças e tensões. A curvatura da casca influencia diretamente nas tensões que atuam sobre as diferentes faces e regiões da estrutura. A casca é analisada a partir de quatro componentes principais:

- **Superior:** Refere-se à face superior da casca, onde geralmente ocorre a tensão de tração. Essa face é importante na análise de tração e compressão, principalmente nas cargas aplicadas externamente.
- **Inferior:** Refere-se à face inferior da casca, onde as tensões de compressão são predominantes. Esta face é analisada para entender o comportamento sob compressão.
- **Membrana:** A análise de membrana envolve as tensões médias (sem considerar os efeitos de flexão), sendo fundamental para avaliar esforços axiais e cisalhamentos.
- **Curvatura:** As tensões de flexão associadas à curvatura da casca são avaliadas para entender o impacto de momentos nas diferentes regiões da estrutura.

Figura 9. Especificação de utilização dos elementos

Opção	Mostra...	Quando usar?
Superior	Tensão na face de cima da casca	Análise de tração/compressão na face externa
Inferior	Tensão na face de baixo da casca	Idem, mas no lado oposto
Membrana	Tensão média (sem flexão)	Esforço axial ou cisalhamento
Curvatura	Tensão de flexão	Avaliação de momentos

Fonte: Autores

A figura 9 apresenta uma tabela detalhada, correlacionando os tipos de tensões com a face onde atuam e as condições de aplicação. Cada componente da casca (superior, inferior, membrana e curvatura) tem uma função distinta e é analisado em contextos específicos:

- **Superior:** Tensões atuando na face superior da casca. A análise visa identificar as tensões de tração ou compressão na face externa.
- **Inferior:** Tensões na face inferior, com foco na análise de compressão ou tração na face oposta à superior.
- **Membrana:** A tensão média, sem flexão, que representa o comportamento da estrutura em termos de esforço axial e cisalhamento.
- **Curvatura:** Tensões de flexão, que são fundamentais na avaliação de momentos e deformações causadas pela curvatura.

ANÁLISES DAS TENSÕES E DESLOCAMENTOS

O estudo realizado foi uma Análise Estática usando o software SolidWorks Simulation, com o objetivo de verificar a integridade estrutural do dispositivo mecânico projetado para a extração de eixos “Tubo U” de locomotivas. A análise focou em avaliar as tensões, deslocamentos e deformações no modelo estrutural, sob as condições de carga aplicadas, com base nas propriedades do material ASTM A36 Aço, utilizado para a fabricação das partes do dispositivo.

Propriedades do Estudo

A análise foi configurada para identificar as tensões de Von Mises, deslocamentos, e deformações nas diferentes partes do dispositivo, além de observar o comportamento do sistema sob a ação de forças e momentos aplicados. A análise foi realizada considerando um **sistema de unidades SI (MKS)**, com tensões expressas em **N/mm² (MPa)** e deslocamentos em **mm**.

- **Material:** O material utilizado para as simulações foi o aço **ASTM A36**, caracterizado por sua resistência e durabilidade. As propriedades deste aço incluem:
- **Limite de Escoamento:** 250 MPa
- **Resistência à Tração:** 400 MPa
- **Módulo de Elasticidade:** $2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
- **Coeficiente de Poisson:** 0,26
- **Módulo de Cisalhamento:** $7,93 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$

As características do material foram essenciais para garantir que o dispositivo resista adequadamente às forças envolvidas durante a operação.

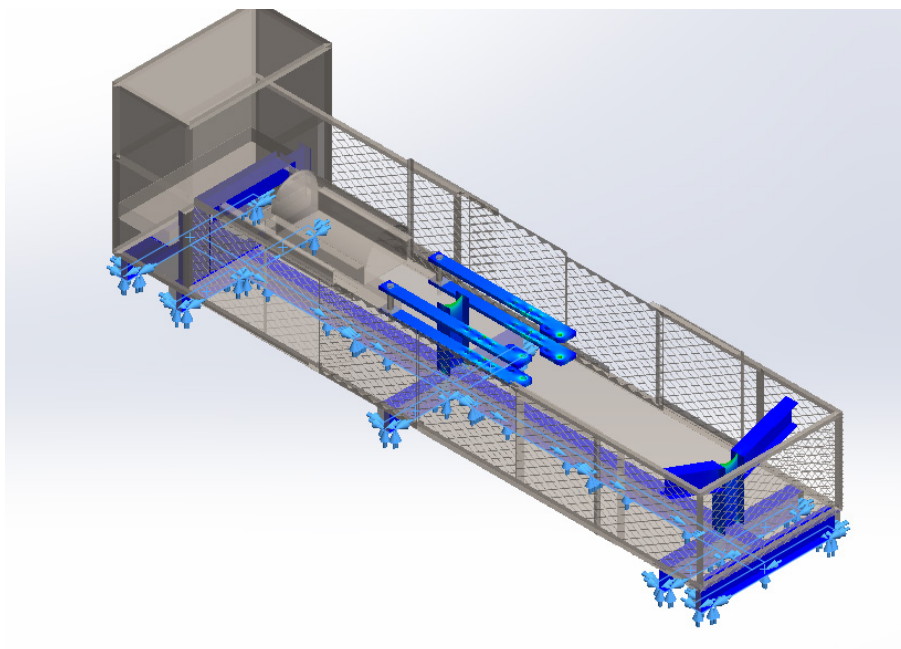
Acessórios de Fixação e Cargas Aplicadas

Durante a análise, foram aplicados dois tipos de cargas principais: **gravidade** e **forças aplicadas** nas faces específicas do modelo.

- **Força de Reação (Imóvel-1):** Uma força de reação foi aplicada nas faces do modelo, representando a fixação do dispositivo no sistema.
- **Forças Aplicadas:**
 - **Força-1:** 2.000 kgf
 - **Força-2:** 7.000 kgf

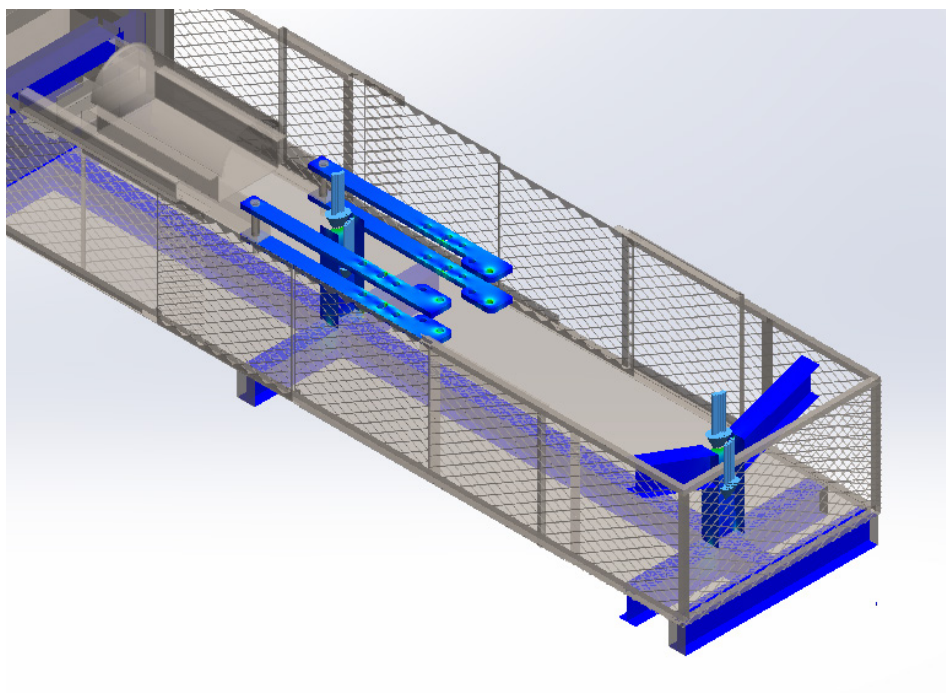
Essas forças foram modeladas de acordo com as condições de operação do dispositivo na prática, com a aplicação de cargas verticais e horizontais.

Figura 10. Condição de condição de contorno (apoiado)



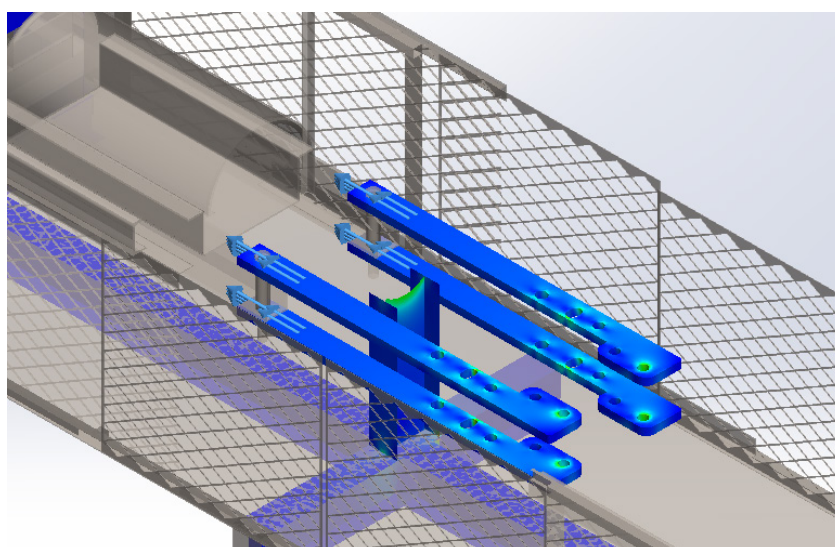
Fonte: Autores

Figura 11. Carga axial de 2.000 kgf (referente ao peso do tubo u)



Fonte: Autores

Figura 12. Carga axial de 7.000 kgf (referente a carga de reação devida ao acionamento do cilindro hidráulico)

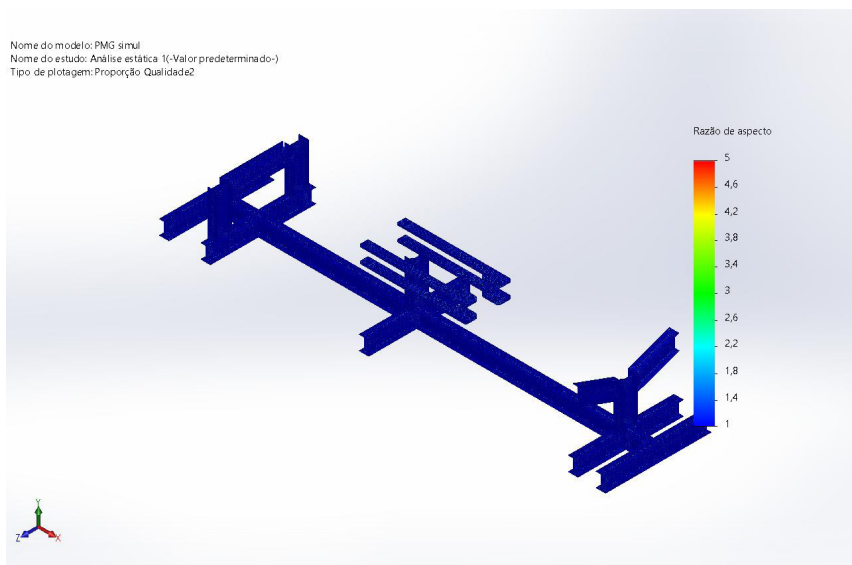


Fonte: Autores

Malha e Qualidade da Malha

A malha utilizada na simulação foi uma **malha mista**, que incorpora elementos de curvatura para garantir alta qualidade nos resultados da análise estrutural. O **tamanho máximo de elemento** foi de **16,67 mm**, e o **tamanho mínimo** foi de **0,83 mm**, garantindo precisão suficiente para os cálculos.

Figura 13. Razão de aspecto de malha



Fonte: Autores

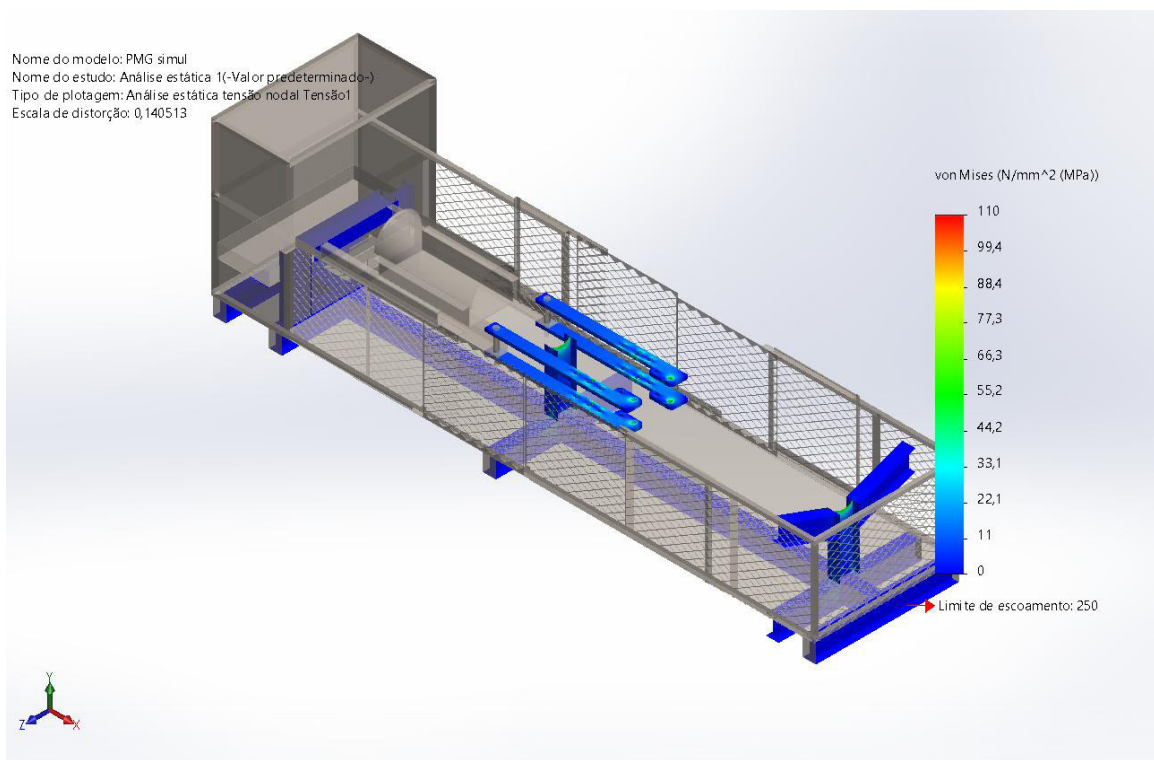
A qualidade da malha foi classificada como alta, com um total de 119.975 nós e 58.640 elementos.

Resultados da Simulação

A análise de tensões mostrou os seguintes resultados:

Tensão de Von Mises (Superior): A tensão máxima registrada foi de **110 MPa**, localizada no nó 12570, refletindo as tensões na face superior da casca. Este valor indica a tensão máxima na região sujeita à tração/compressão da face externa.

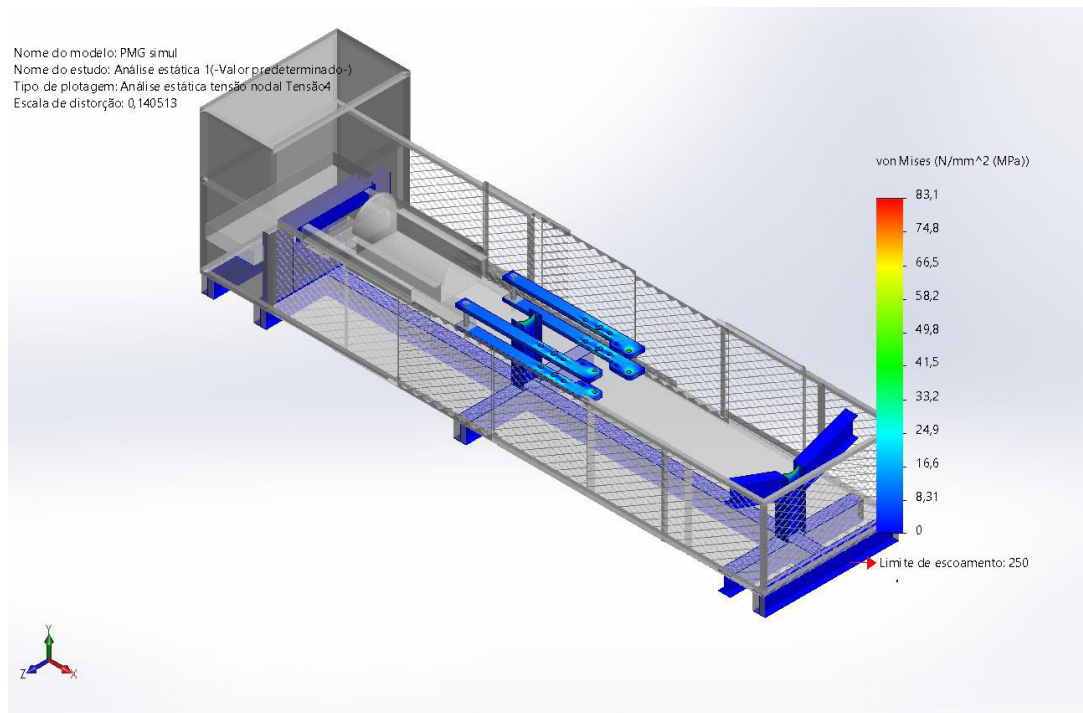
Figura 14. Tensão de von mises (Casca superior)



Fonte: Autores

Tensão de Von Mises (Curvatura): A tensão associada à curvatura foi de **83,1 MPa**, localizada no nó 196. Esse valor está relacionado à análise de momentos de flexão e a resistência do material contra a deformação da estrutura.

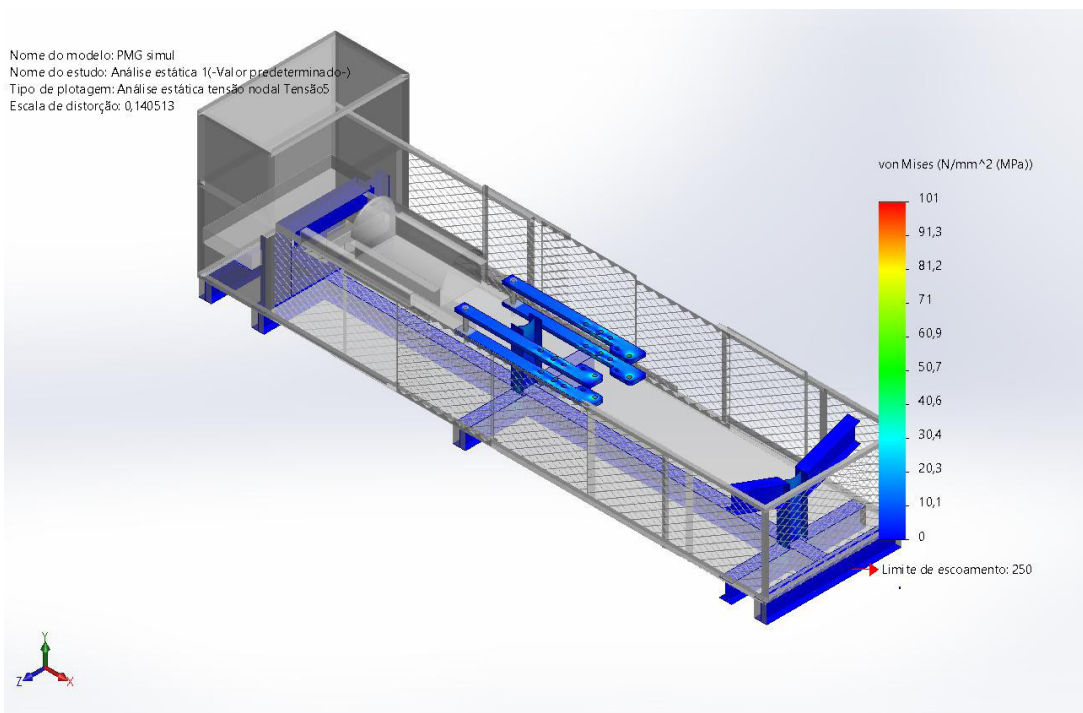
Figura 15. Tensão de von mises (Curvatura)



Fonte: Autores

Tensão de Von Mises (Membrana): A tensão de Von Mises associada à membrana foi de **101 MPa**, localizada no nó 12570. Esta tensão representa o comportamento do material sob esforços axiais sem flexão, essencial para garantir a resistência do dispositivo à tração sem comprometer a integridade estrutural.

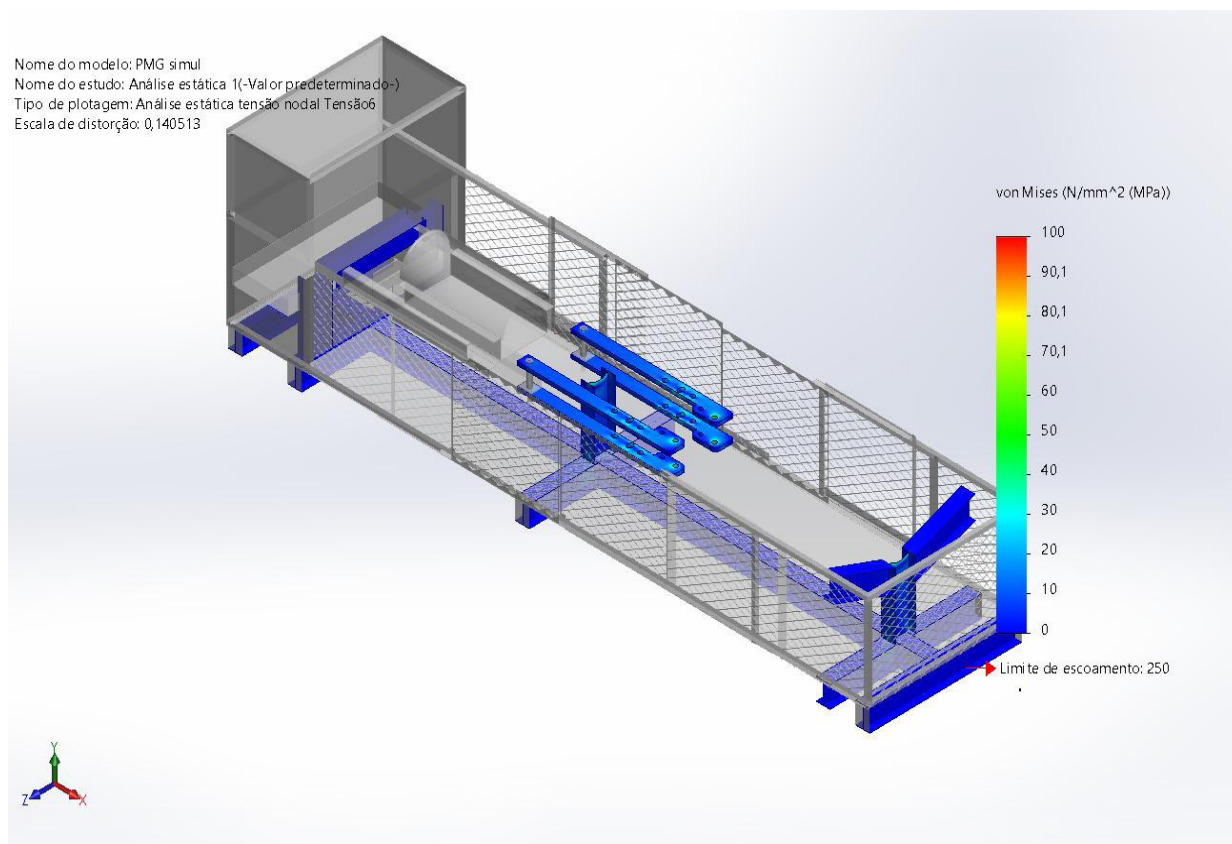
Figura 16. Tensão de von mises (Curvatura)



Fonte: Autores

Tensão de Von Mises (Casca Inferior): A tensão máxima registrada na face inferior da casca foi de **100 MPa**, localizada também no nó 12570. Esse valor reflete as tensões atuando na face oposta à superior, garantindo que o dispositivo seja robusto o suficiente para suportar forças de compressão.

Figura 17. Tensão de von mises (Curvatura)



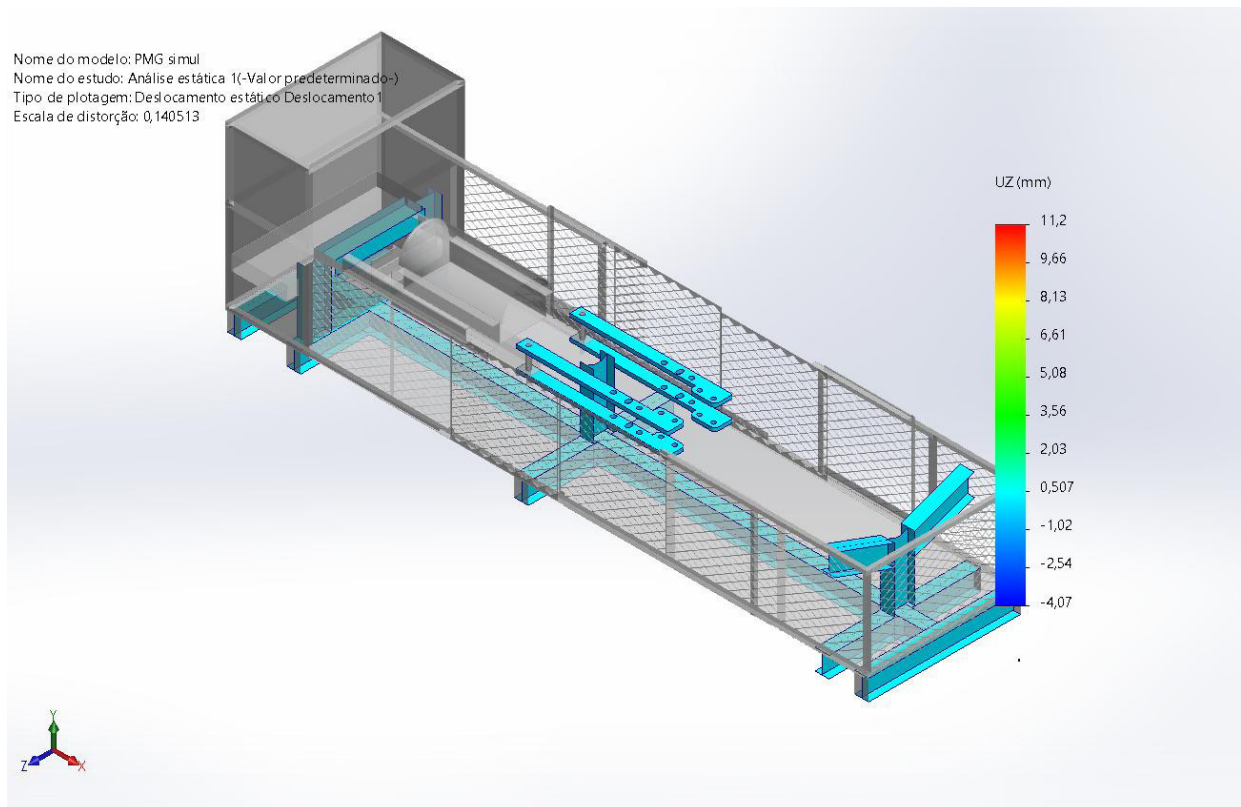
Fonte: Autores

Deslocamentos e Deformações

O **deslocamento máximo** registrado foi de **11,2 mm** no nó 47250, enquanto o **mínimo** foi de **-4,07 mm** no nó 47247. Este deslocamento foi observado no eixo Z, indicando a deformação vertical máxima do dispositivo sob a carga aplicada.

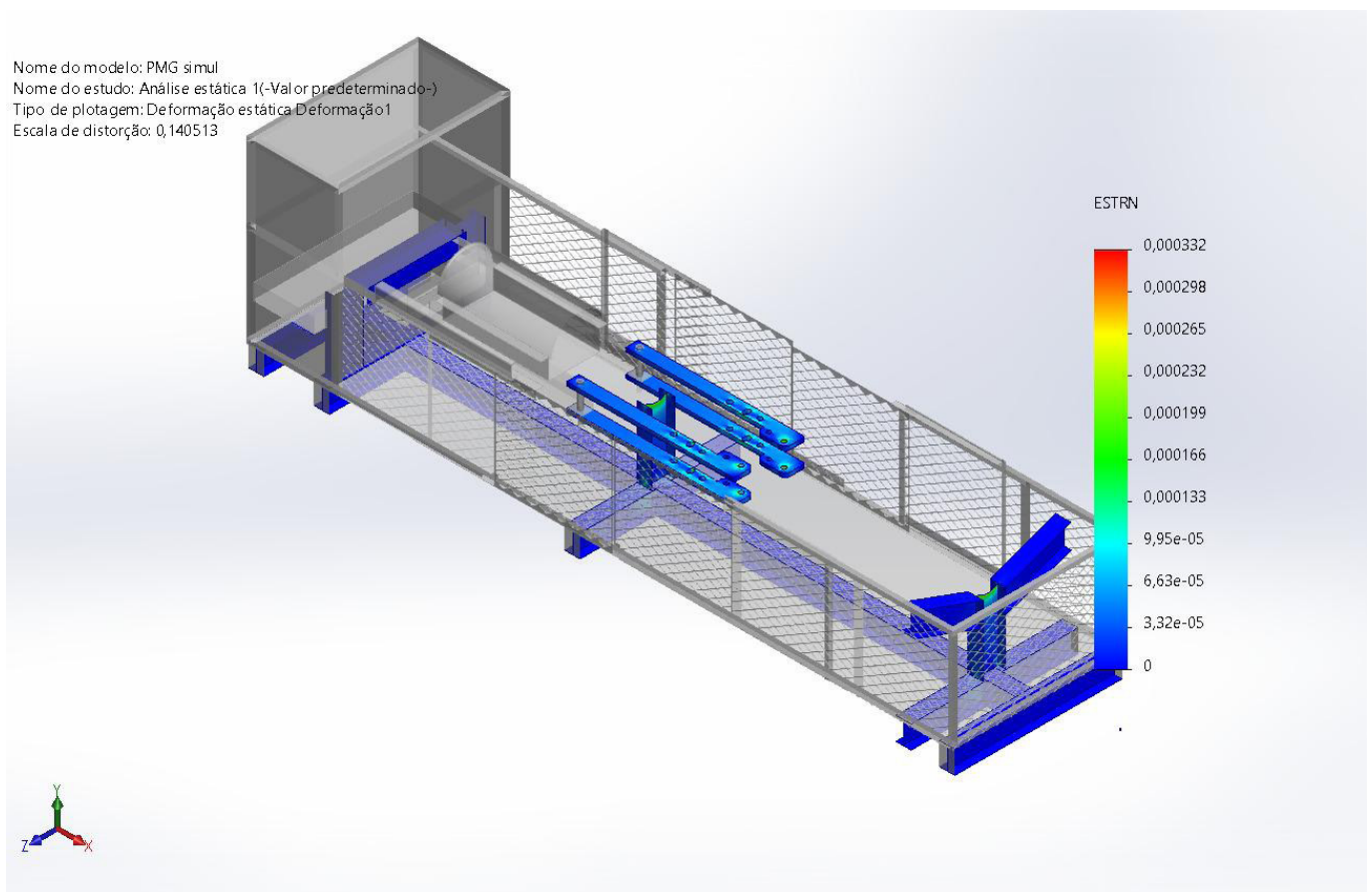
Além disso, a **deformação equivalente** máxima foi de **0,000332**, refletindo a deformação geral do material sob as tensões aplicadas.

Figura 18. Deslocamento equivalente



Fonte: Autores

Figura 19. Deformação equivalente



Fonte: Autores

Análises das Tensões Axiais

As tensões axiais em uma estrutura são aquelas que ocorrem ao longo do eixo da peça e estão relacionadas com as forças internas que agem sobre ela. Em nosso caso, essas tensões são geradas pelas cargas aplicadas ao dispositivo mecânico para a extração de eixos “Tubo U”. Para analisar as tensões axiais, é necessário considerar como as forças se distribuem ao longo da estrutura, levando em conta a geometria e o material utilizado.

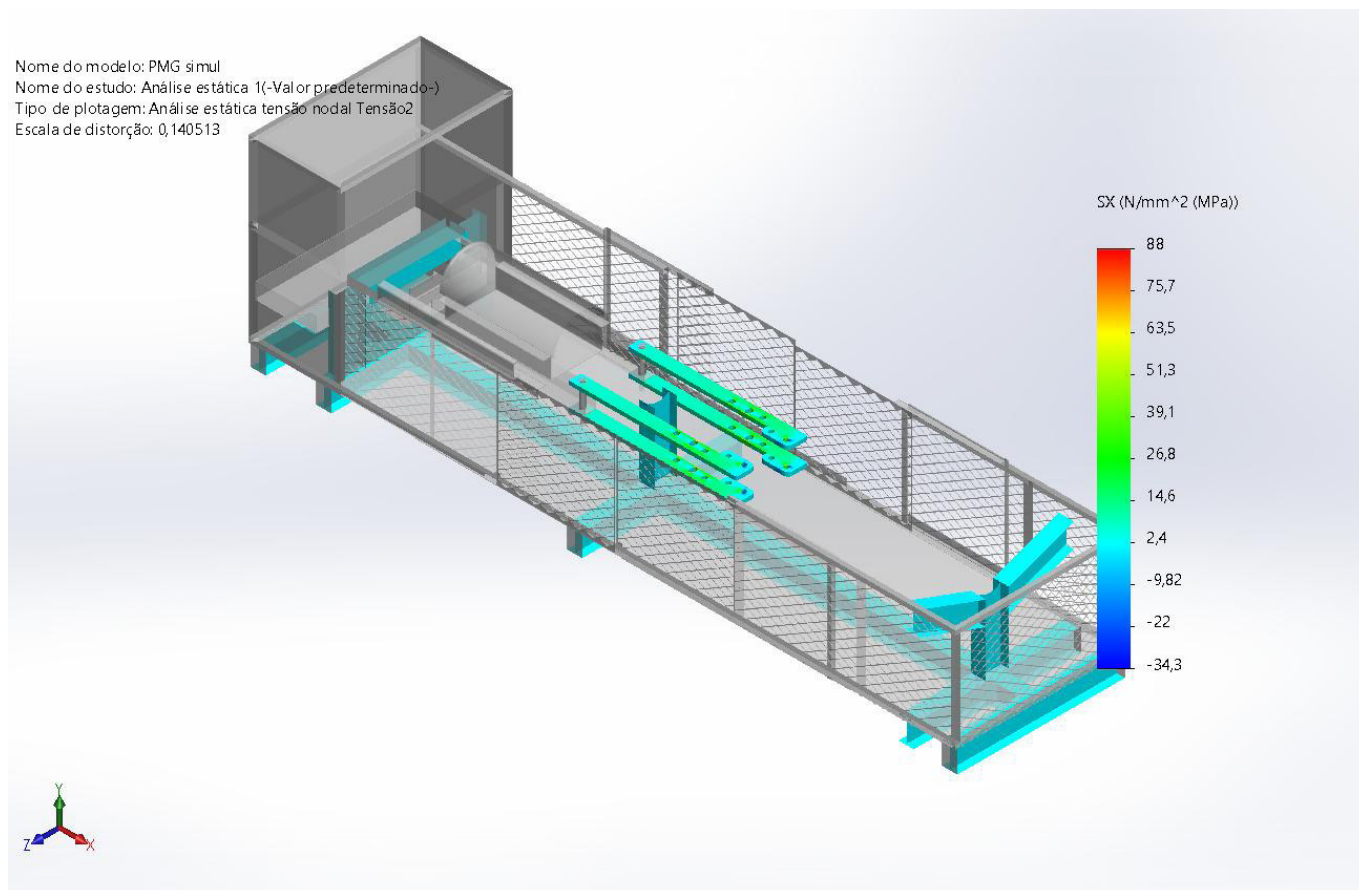
Tensão Normal (SX)

A tensão **normal** em um componente está relacionada à força axial dividida pela área da seção transversal da peça. No caso do dispositivo projetado, a **tensão normal em X (SX)** foi calculada para as faces da casca onde as forças são aplicadas. O relatório de simulação forneceu os seguintes valores para as tensões normais em X:

Mínima: -34,3 MPa no nó 108227

Máxima: 88 MPa no nó 196

Figura 20. Tensão normal em x



Fonte: Autores

Essas tensões indicam as variações de compressão e tração ao longo da estrutura da peça, dependendo da direção da força aplicada. A **tensão negativa** em determinados nós indica compressão, enquanto a **tensão positiva** indica tração, o que é essencial para entender como as forças internas distribuem-se ao longo do dispositivo.

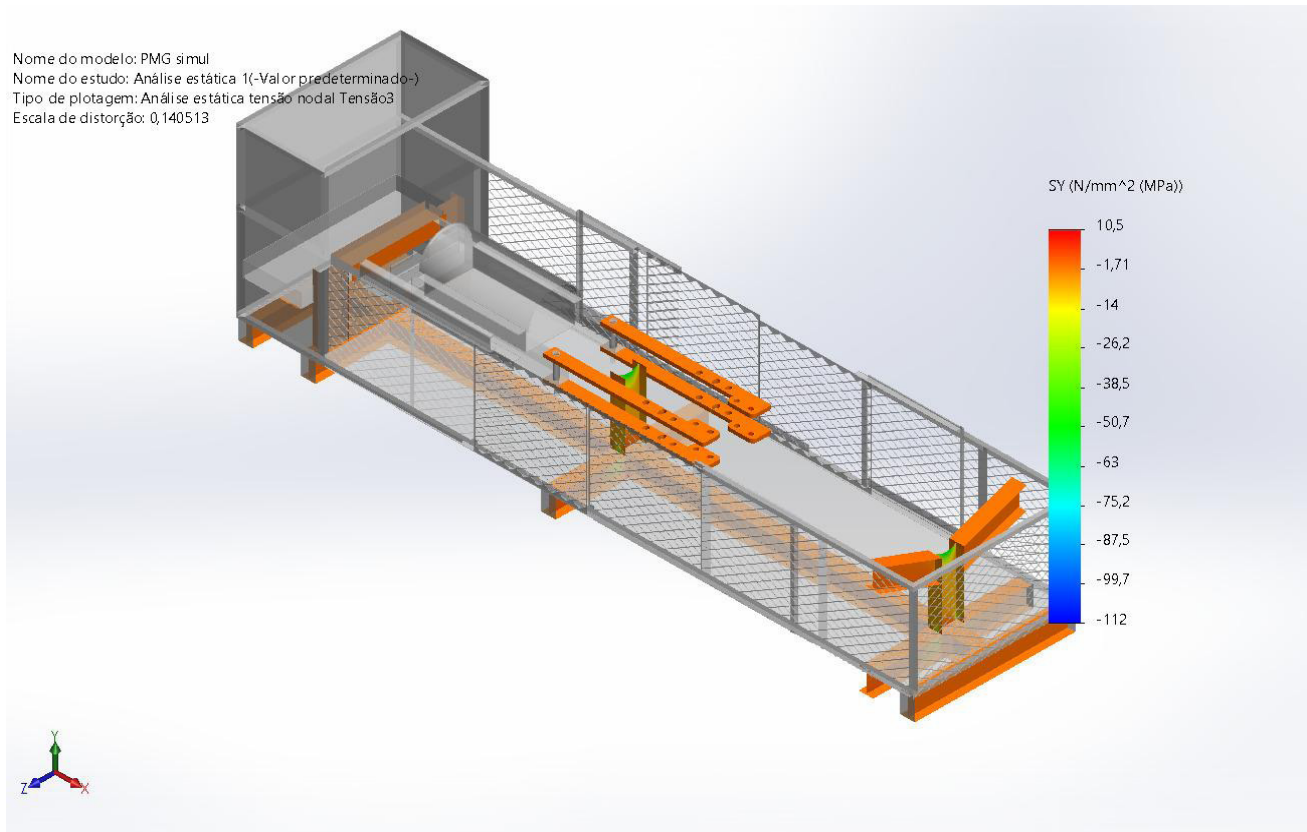
Tensão Normal (SY)

A **tensão normal em Y (SY)** é outra componente importante a ser analisada. Ela representa a tensão axial ao longo da direção Y. Os valores encontrados na simulação são:

Mínima: -112 MPa no nó 12572

Máxima: 10,5 MPa no nó 115645

Figura 21. Tensão normal em y



Fonte: Autores

Este tipo de tensão é fundamental quando há componentes que suportam forças paralelas à direção Y, ajudando a identificar áreas da peça sujeitas a compressão e tração nas direções correspondentes, imprescindível em análises de instabilidade estrutural, como no caso das análises de flambagem.

ELEMENTOS DE VIGA

A utilização de elementos de viga permite simplificar a análise estrutural, uma vez que esses elementos representam de maneira eficiente o comportamento flexional de longos componentes estruturais, sem a necessidade de modelar detalhadamente a distribuição interna das tensões, como seria necessário em uma modelagem tridimensional mais complexa. Isso resulta em uma redução significativa do tempo de processamento, permitindo que a análise seja realizada de forma mais ágil, sem perder a precisão necessária para garantir a segurança e a funcionalidade da estrutura.

Esses elementos são especialmente aplicados em seções transversais bem definidas e conhecidas, como vigas I, vigas retas e outros perfis metálicos padronizados. Isso torna o processo de modelagem mais direto, pois as propriedades dessas seções já são ampla-

mente conhecidas e podem ser facilmente integradas ao modelo de análise. A abordagem simplificada e a utilização de seções padrões permitem que o estudo da integridade estrutural seja realizado de maneira eficaz, com o menor custo computacional possível.

CÁLCULO DE INSTABILIDADE ESTRUTURAL (FLAMBAGEM)

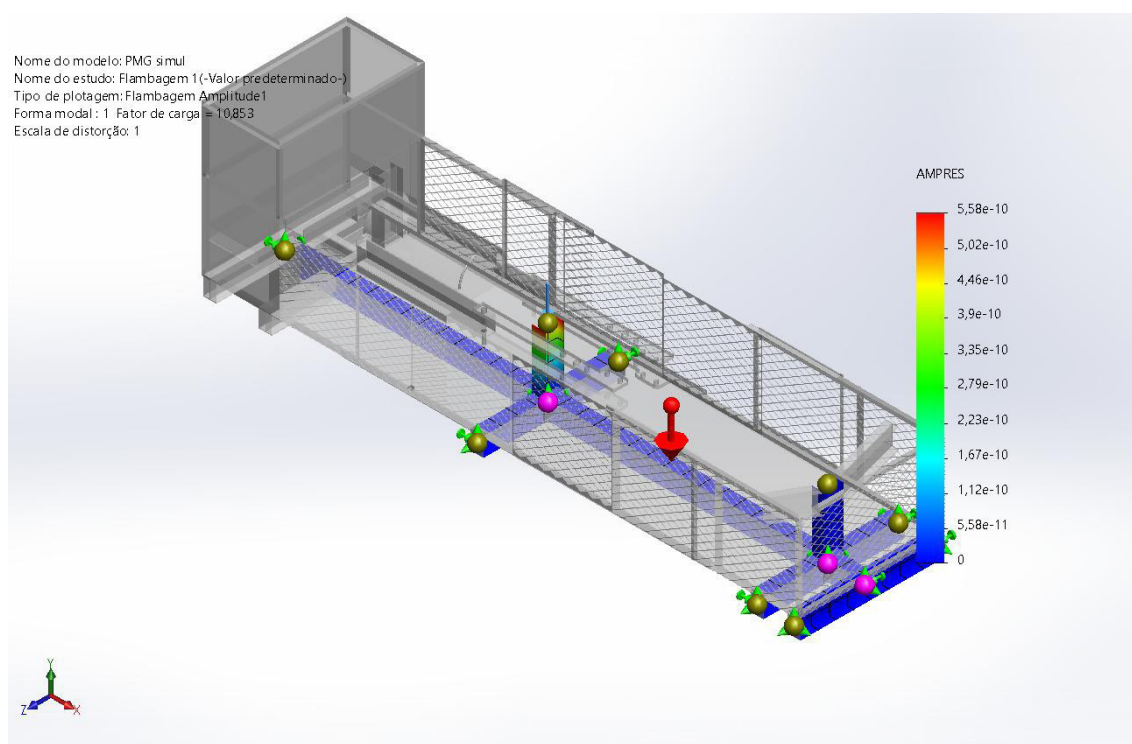
A flambagem é um fenômeno crítico a ser considerado no projeto de qualquer estrutura submetida a compressão, especialmente em componentes como vigas e suportes. Este estudo se concentrou na análise de flambagem do dispositivo projetado para a extração de eixos “Tubo U”, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) para simular o comportamento estrutural sob as condições de carga aplicadas.

Durante a simulação, mantivemos as mesmas condições de contorno em relação ao modelo original, com a única diferença sendo a alteração do tipo de elemento utilizado. Essa mudança foi feita para avaliar o comportamento da estrutura de uma maneira diferente, já que a análise anterior visava identificar tensões e deformações em componentes específicos da estrutura, enquanto a análise de flambagem foca na estabilidade global da peça sob compressão.

A análise de flambagem revelou um fator de segurança de 10,853, o que indica que a estrutura tem uma boa margem antes de alcançar o ponto de instabilidade. Esse fator de segurança é uma medida crítica, pois sugere que, sob as condições atuais de carga e geometria, a estrutura é suficientemente resistente para evitar falhas por flambagem.

O modo de flambagem identificado foi o primeiro modo, que apresenta a menor carga crítica para a instabilidade. A amplitude resultante desse modo foi registrada em $5,58e-10$. Esses resultados indicam que, embora a estrutura não esteja em risco imediato de flambagem, o comportamento do primeiro modo fornece informações importantes sobre os pontos mais suscetíveis à instabilidade.

Figura 22. Análise de flambagem



Fonte: Autores

ANÁLISE DE CONDIÇÃO ADVERSA



Com o objetivo de garantir a integridade estrutural do dispositivo de extração de eixos com tubo em formato de U, foi considerada uma condição adversa de carga concentrada atuando exclusivamente sobre um dos apoios responsáveis pela centralização do eixo durante o processo de extração. Essa análise visa verificar a robustez da peça em um cenário extremo, no qual ocorre um desvio da operação ideal e o peso do eixo é transferido quase integralmente para apenas um dos apoios laterais.

CARGA NO APOIO

Durante a operação normal, o apoio é solicitado apenas para manter o eixo na posição correta, sem suportar carga significativa. No entanto, devido a eventuais desalinhamentos ou imperfeições no posicionamento do dispositivo, é possível que o eixo venha a repousar diretamente sobre um único apoio lateral, descarregando parte do seu peso sobre essa estrutura secundária.

Para simular esse cenário:

- (1) Foi aplicada uma carga concentrada equivalente ao peso total do eixo (ou fração crítica dele) sobre a superfície superior do apoio;
- (2) O restante da estrutura foi mantido com as mesmas condições de contorno adotadas nas análises anteriores;
- (3) Não foram considerados esforços dinâmicos ou de impacto, de modo que a análise representa uma condição estática extrema.

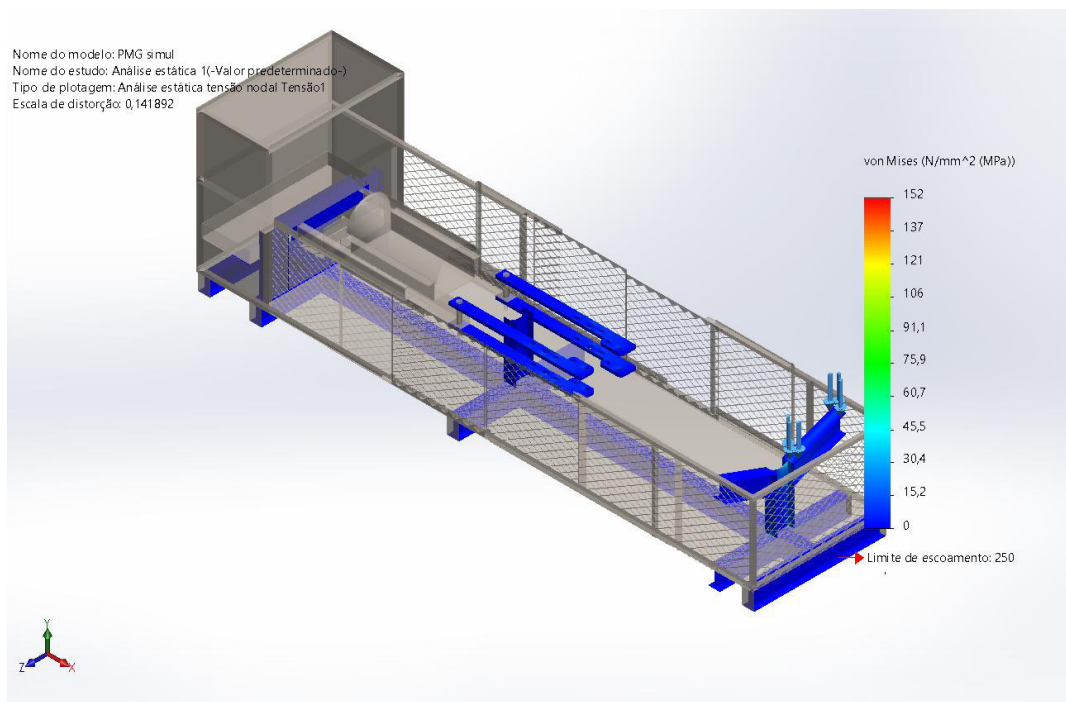
Modelagem Numérica

A modelagem foi realizada utilizando elementos finitos do tipo casca (shell), mais especificamente elementos triangulares parabólicos de segunda ordem (tipo Shell 93 ou equivalente), que proporcionam maior acurácia na representação da geometria curva e do gradiente de tensões na peça.

CÁLCULO DE TENSÃO E DESLOCAMENTOS GERADOS

A simulação indicou uma tensão de von Mises máxima de 152 MPa concentrada na região superior do apoio, próximo à zona de contato direto com o eixo. Esse valor encontra-se dentro do limite de resistência do material, mantendo um fator de segurança adequado para o funcionamento seguro do dispositivo, mesmo em condição crítica.

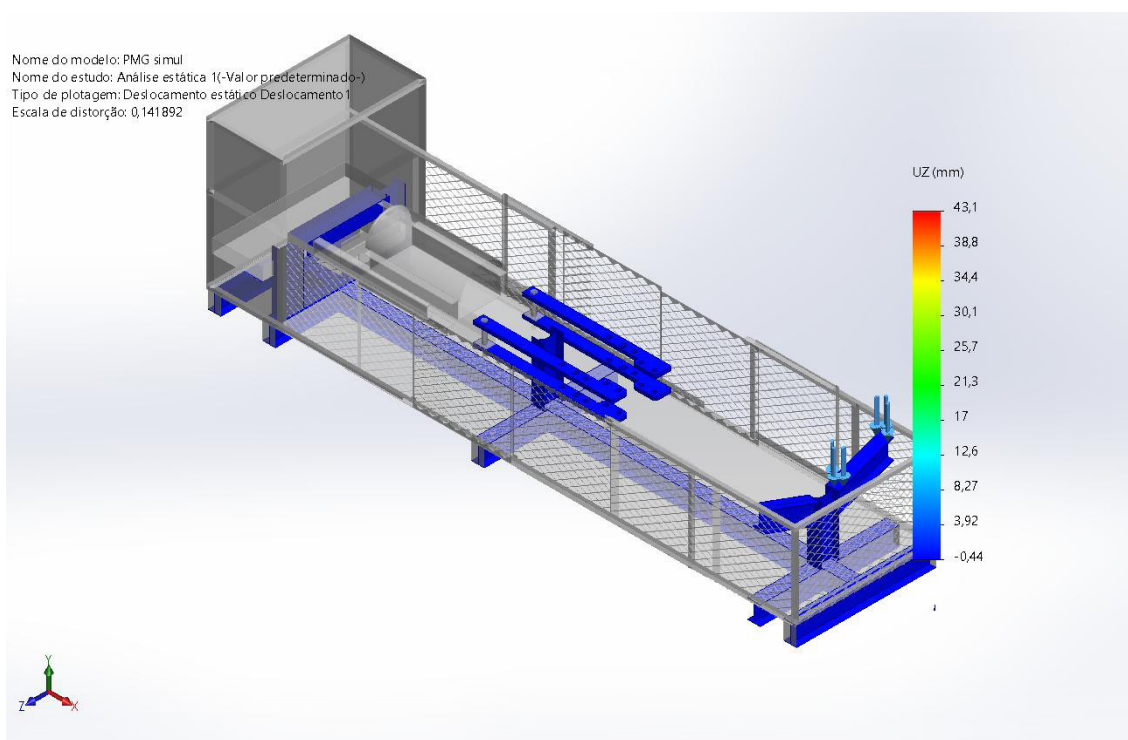
Figura 23. Tensão de von mises



Fonte: Autores

O **deslocamento vertical máximo (UZ)** registrado foi de aproximadamente 43,1 mm, o que evidencia uma deformação considerável, porém localizada. Essa deformação não compromete a integridade global da estrutura, nem inviabiliza o uso do dispositivo, mas ressalta a necessidade de que essa situação permaneça como exceção operacional.

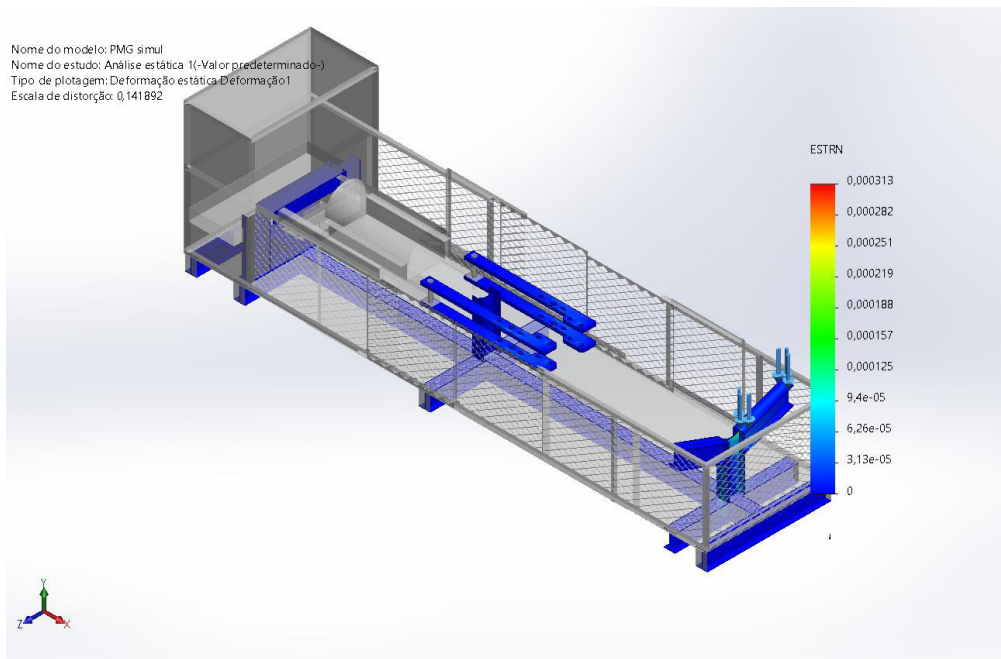
Figura 24. Deslocamento equivalente



Fonte: Autores

A análise também apresentou uma deformação equivalente máxima de 0,000313, indicando que o material operou em regime elástico e não houve sinais de colapso ou plastificação na região analisada.

Figura 25. Deformação equivalente



Fonte: Autores

ANÁLISE DOS RESULTADOS



A análise estrutural do dispositivo proposto foi conduzida com base em simulações no SolidWorks Simulation, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) e modelos compostos por elementos de viga e de casca triangulares parabólicos. Os resultados obtidos ao longo do estudo confirmam a viabilidade técnica do projeto, tanto em condições normais quanto adversas de operação.

A tensão de von Mises máxima obtida nas simulações padrão foi de 110 MPa, localizada na casca superior do dispositivo (ver Figura 14 – Tensão de von Mises). Essa tensão representa o pico nas regiões onde há concentração de esforços de tração e compressão, permanecendo significativamente abaixo do limite de escoamento do aço ASTM A36, que é de 250 MPa.

Na região de curvatura da casca, foi registrada uma tensão de 83,1 MPa, enquanto na região da membrana, os valores chegaram a 101 MPa (ver Figuras – 15 e 16 Tensão de Von Mises). A casca inferior apresentou valores máximos de 100 MPa, evidenciando uma distribuição relativamente equilibrada das tensões ao longo da estrutura (ver Figura 17 – Tensão de von Mises)..

Em relação aos deslocamentos verticais (UZ), foi identificado um valor máximo de 11,2 mm, no nó 47250, com deslocamento mínimo de -4,07 mm no nó 47247 (ver Figura 18 – Deslocamento equivalente). Esses deslocamentos indicam deformações aceitáveis para a operação do dispositivo, especialmente considerando que a estrutura permanece no regime elástico e não compromete a função do sistema.

A deformação equivalente máxima observada foi de 0,000332, o que também confirma que não houve plastificação do material em nenhuma das regiões críticas (Figura 19 – Deformação equivalente).

Nas análises específicas de tensões normais, os valores para a direção X (SX) variaram entre -34,3 MPa (compressão) e 88 MPa (tração), enquanto na direção Y (SY) as tensões oscilaram de -112 MPa até 10,5 MPa.

A análise de flambagem, feita com elementos de viga, indicou um fator de segurança de 10,853 e um primeiro modo de flambagem com amplitude de $5,58 \times 10^{-10}$, demonstrando que a estrutura é estável mesmo sob cargas compressivas elevadas (figura 22).

Na análise da condição adversa (índice 6), em que uma carga concentrada foi aplicada diretamente sobre um dos apoios de centralização do eixo, o sistema suportou uma tensão máxima de 152 MPa, com deslocamento vertical de 43,1 mm e deformação equivalente de 0,000313 (seção 6.2). Mesmo sendo um cenário extremo, os valores permaneceram dentro dos limites seguros para o material utilizado, e o comportamento elástico da estrutura foi preservado.

Esses resultados confirmam que o dispositivo projetado apresenta robustez estrutural, segurança operacional e margem adequada para variações de carga, sendo apto para aplicação prática no ambiente de manutenção ferroviária.

CONCLUSÃO



O presente trabalho apresentou o desenvolvimento completo de um dispositivo mecânico para extração de eixos acoplados em Tubo U de locomotivas, uma operação crítica e recorrente no cenário da manutenção ferroviária. A proposta surgiu a partir de uma demanda real observada em campo, reforçando a importância da engenharia aplicada como ferramenta de solução de problemas práticos, onde teoria e experiência convergem para gerar inovação e eficiência operacional.

Através da integração entre a modelagem tridimensional (CAD) e a validação estrutural por meio do Método dos Elementos Finitos (FEA), o projeto foi desenvolvido com rigor técnico e base científica sólida, permitindo a antecipação de falhas estruturais, otimização de geometrias e seleção adequada de materiais. A utilização do SolidWorks Simulation como ferramenta CAE foi fundamental para garantir a integridade do dispositivo sem a necessidade inicial de prototipagem física, refletindo um paradigma moderno na engenharia de produto.

Os resultados das simulações indicaram tensões significativamente abaixo do limite de escoamento do aço ASTM A36, além de deslocamentos e deformações aceitáveis dentro do regime elástico. A análise de flambagem apresentou fator de segurança elevado, assegurando que a estrutura mantém sua estabilidade mesmo sob compressões intensas, comum em ambientes industriais. A análise em condição adversa também confirmou a robustez do projeto, mesmo em situações operacionais extremas, mostrando que o dispositivo pode resistir a falhas pontuais sem comprometer sua função.

Do ponto de vista normativo, o projeto foi desenvolvido em conformidade com os princípios da NR-12, norma regulamentadora que estabelece os requisitos mínimos para a segurança no trabalho em máquinas e equipamentos. Foram considerados critérios como estabilidade estrutural, ausência de zonas de esmagamento, facilidade de acoplamento e ergonomia, fatores que impactam diretamente a segurança e a saúde dos operadores. A aderência às normas técnicas da ABNT, especialmente à NBR 8400 (atualmente desdobrada e substituída por outras normas como a ABNT NBR ISO 12100), reforça a credibilidade técnica da proposta e confere respaldo para sua aplicação prática em ambientes industriais de alto risco.

A estrutura do dispositivo, baseada em perfis W150x13 em aço ASTM A36, foi dimensionada com foco em resistência, rigidez e facilidade de fabricação, utilizando componentes padronizados e acessíveis no mercado nacional. Isso confere ao projeto não apenas robustez, mas também viabilidade econômica, fator essencial para sua implementação em larga escala em oficinas ferroviárias. A modularidade do equipamento, somada à possibilidade de adaptação a diferentes modelos de Tubo U, amplia sua aplicabilidade e prolonga sua vida útil, reduzindo o custo total de propriedade para a empresa usuária.

Este trabalho também possui relevância acadêmica ao propor uma solução inédita documentada com fundamentação teórica, cálculos analíticos, validação por simulação e apresentação de sugestões para melhorias futuras. Serve como referência para estudantes, profissionais e pesquisadores da área de engenharia mecânica, em especial aqueles voltados para manutenção industrial, projeto de máquinas e engenharia ferroviária. Ao unir conhecimento técnico e experiência prática, o projeto estimula o desenvolvimento de soluções cada vez mais seguras, inteligentes e alinhadas às boas práticas de projeto mecânico.

Do ponto de vista da engenharia como ciência aplicada, este TCC cumpre um papel social e técnico ao oferecer uma alternativa eficiente à prática até então artesanal de remoção dos eixos, que envolvia riscos ergonômicos, operacionais e mecânicos. A automação parcial desse processo, viabilizada pelo uso do dispositivo, contribui para a redução de

acidentes, aumento da produtividade e preservação dos componentes das locomotivas, fatores de extrema relevância em operações de logística de grande escala.

Em resumo, o desenvolvimento deste dispositivo mecânico representa um passo concreto rumo à modernização da manutenção ferroviária nacional. Mostra-se um equipamento tecnicamente sólido, economicamente viável, seguro e aplicável, com grande potencial de gerar impactos positivos no desempenho da oficina, na segurança dos trabalhadores e na confiabilidade do sistema ferroviário como um todo. Seu desenvolvimento demonstra a capacidade do engenheiro mecânico de atuar como agente transformador, capaz de identificar gargalos e propor soluções inteligentes e normatizadas, com embasamento técnico e compromisso com a excelência.

O desenvolvimento do dispositivo mecânico para extração de eixos acoplados em Tubo U, conforme apresentado neste trabalho, atendeu de forma satisfatória aos requisitos de segurança, funcionalidade e aplicabilidade definidos no escopo do projeto. Através da aplicação do Método dos Elementos Finitos e da modelagem tridimensional no SolidWorks, foi possível validar a integridade estrutural da solução proposta e demonstrar sua capacidade de suportar as cargas envolvidas na operação.

A estrutura, composta por perfis metálicos W150x13 em aço ASTM A36, mostrou-se adequada em termos de resistência e rigidez, inclusive em cenários de sobrecarga e condição adversa. A análise de flambagem confirmou a estabilidade do conjunto, e os deslocamentos observados em simulação permaneceram dentro dos limites aceitáveis para a operação segura do equipamento.

Além de atender às exigências técnicas e normativas, o projeto se destaca por sua simplicidade construtiva e por utilizar recursos já disponíveis no ambiente da oficina, o que contribui para sua viabilidade econômica e facilidade de implantação.

Conclui-se, portanto, que o dispositivo projetado representa uma contribuição significativa para a melhoria dos processos de manutenção ferroviária, elevando os padrões de segurança, eficiência e ergonomia das atividades realizadas nas oficinas.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS



Com base na experiência adquirida ao longo do desenvolvimento deste trabalho, algumas possibilidades de aprofundamento e melhoria podem ser sugeridas para futuros estudos:

- Prototipagem e validação experimental: A fabricação de um protótipo funcional permitirá realizar testes práticos de desempenho, facilitando a correção de eventuais ajustes ergonômicos ou estruturais não previstos em simulação.
- Análise dinâmica do processo de extração: Considerar as variações de carga ao longo do tempo, impactos e acelerações impostas pelo sistema hidráulico pode aprimorar a compreensão do comportamento real do dispositivo em operação.
- Estudo de materiais alternativos: Avaliar a utilização de ligas metálicas de maior resistência mecânica ou mesmo materiais compósitos pode contribuir para a redução de peso e aumento da durabilidade da estrutura.
- Integração de sensores e monitoramento: A inserção de sensores de deformação e carga pode transformar o dispositivo em um equipamento inteligente, capaz de fornecer dados em tempo real e aumentar ainda mais a segurança da operação.
- Aprimoramento do sistema de acoplamento: Estudos voltados para o desenvolvimento de mecanismos automáticos de travamento e ajuste das garras podem tornar o processo mais rápido, padronizado e seguro.

REFERÊNCIAS

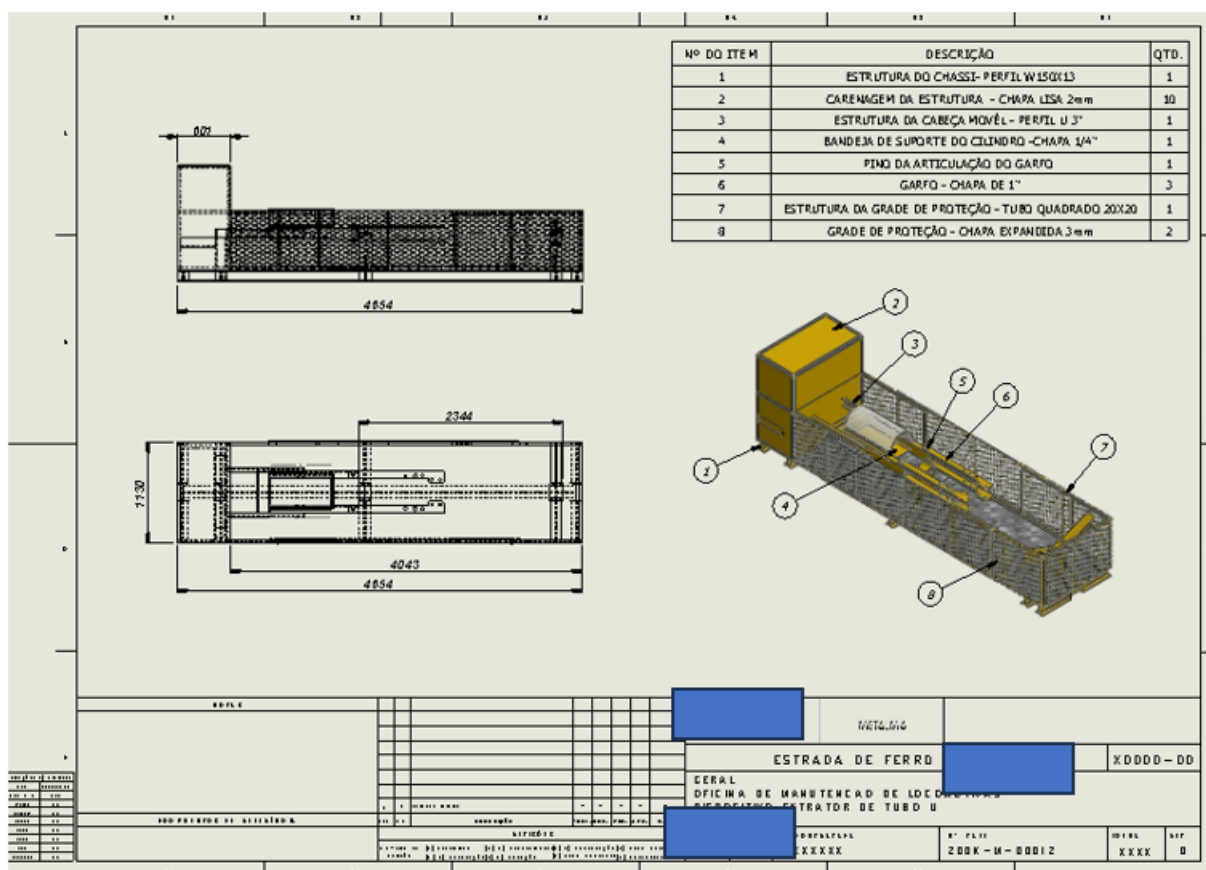


- ALVES FILHO, Avelino. **Elementos finitos**: a base da tecnologia CAE. 1. ed. São Paulo: Érica, 2000.
- AZEVEDO, Álvaro F. M. **Método dos elementos finitos**. 1. ed. Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.
- BEER, Ferdinand P.; JOHNSTON, E. Russell. **Resistência dos materiais**. 3. ed. São Paulo: Makron Books, 1995.
- CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 6. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1988.
- CMAA 70. Specification for electric overhead traveling cranes. **Pittsburg**: The Crane Manufacturers Association of America, 2000.
- COOK, Robert D.; MALKUS, David S.; PLESHA, Michael E. **Concepts and applications of finite element analysis**. 3. ed. Canadá: John Wiley & Sons, 1989.
- GOMES, Sérgio Concli. **Resistência dos materiais**. 5. ed. São Leopoldo: Unisinos, 1983.
- GROEHS, Ademar Gilberto. **Resistência dos materiais e vasos de pressão**. 8. ed. São Leopoldo: Editora Unisinos, 2006.
- HELMAN, Horacio; CETLIN, Paulo Roberto. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. 2. ed. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1993.
- HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.
- LANGUI, Claudio Alberto. **Pontes rolantes**: a importância do equipamento nas áreas de produção industrial. Taubaté: Universidade de Taubaté, 2001.
- NBR 8400. **Cálculo de equipamentos para levantamento e movimentação de cargas**. São Paulo: ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1983.
- NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas**: uma abordagem integrada. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.
- SHIGLEY, Joseph E.; MISCHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard G. **Projeto de engenharia mecânica**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

ANEXOS



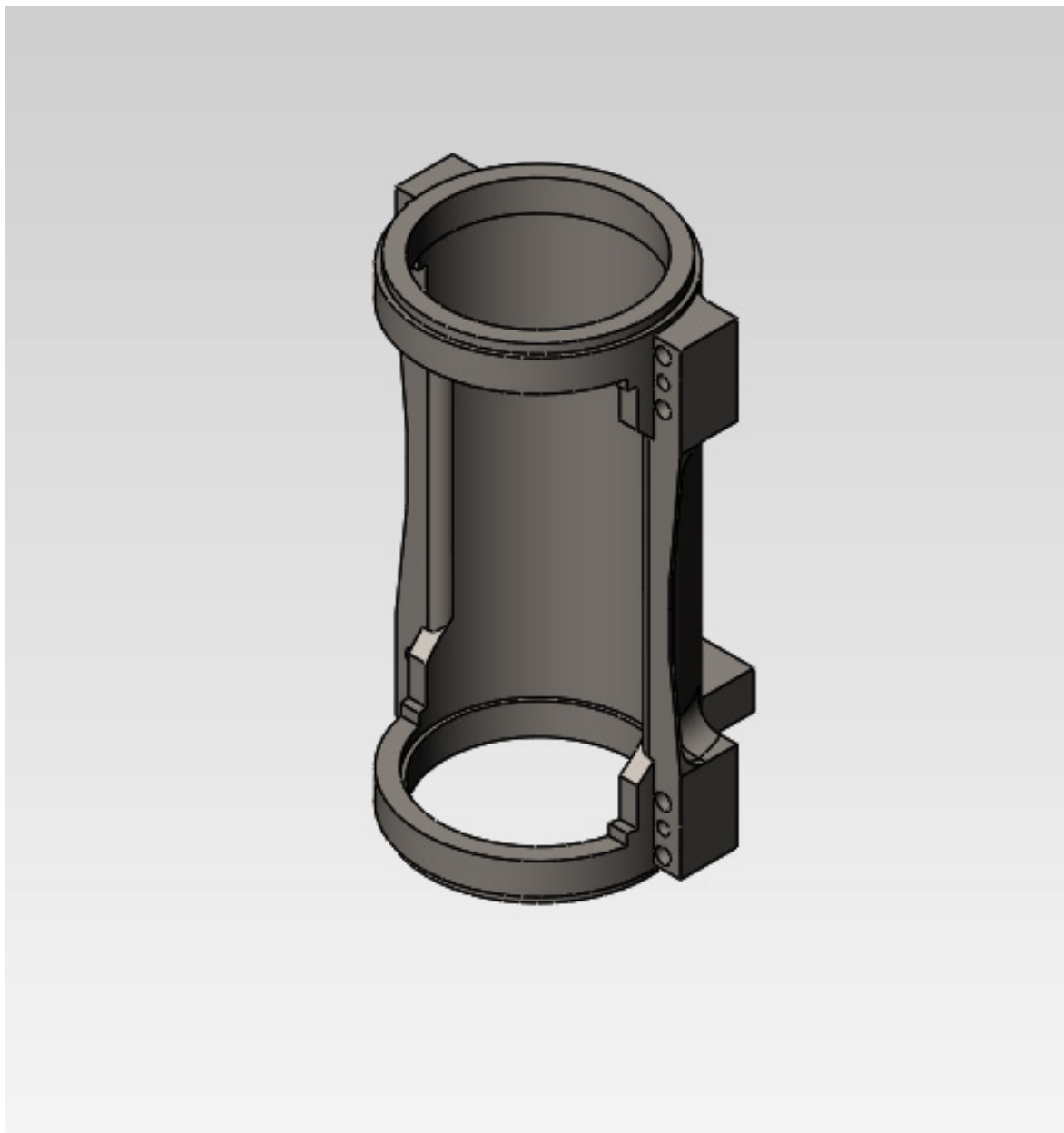
ANEXO A – DESENHO TÉCNICO DO DISPOSITIVO



ANEXO B – REGISTRO DO TUBO U MONTADO NO EIXO



ANEXO C – ENGENHARIA REVERSA CARCAÇA DO TUBO U (MODELO VIRTUAL)





A obra apresenta o desenvolvimento de um dispositivo mecânico destinado à extração de eixos acoplados em Tubo U de locomotivas, operação crítica na manutenção ferroviária. Combinando modelagem tridimensional, análise por elementos finitos e critérios de segurança da engenharia mecânica, o estudo valida a viabilidade estrutural e ergonômica da solução. O protótipo, em fase de desenvolvimento na empresa METALMA Serviços LTDA, evidencia a interação entre pesquisa acadêmica e prática industrial. O livro é leitura essencial para profissionais e estudantes que buscam compreender a inovação aplicada à manutenção pesada.

ISBN: 978-65-6068-192-7

