



Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Tecnologia e Geociências
Departamento de Engenharia Mecânica

Paulo de Tarso Galindo Muniz

**Projeto de um equipamento para manipulação de uma tampa de forno
industrial: conjunto mecânico de elevação**

Recife
2023

Paulo de Tarso Galindo Muniz

Projeto de um equipamento para manipulação de uma tampa de forno industrial: conjunto mecânico de elevação

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia e Geociências do Universidade Federal de Pernambuco como requisito para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientadora: Profa. Dra. Janaína Moreira de Meneses.

Recife
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Muniz, Paulo de Tarso Galindo.

Projeto de um equipamento para manipulação de uma tampa de forno industrial: conjunto mecânico de elevação / Paulo de Tarso Galindo Muniz. - Recife, 2023.

61 p. : il., tab.

Orientador(a): Janaína Moreira de Meneses

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Informática, Engenharia Mecânica - Bacharelado, 2023.

Inclui referências, apêndices.

1. Desenvolvimento de produto. 2. Metodologia de Projeto. 3. Modelagem. 4. Desenho Técnico. 5. Simulação Computacional. I. Meneses, Janaína Moreira de. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

Paulo de Tarso Galindo Muniz

Projeto de um equipamento para manipulação de uma tampa de forno industrial: conjunto mecânico de elevação

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheiro Mecânico” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Mecânica.

Recife, 26 de setembro de 2023.

Banca Examinadora:

Prof. Janaína Moreira de Meneses, Dra.
UFPE – DEMEC

Prof. Francisco Espedito de Lima, Me.
UFPE - DEMEC

Prof. Francisco Fernando Roberto Pereira, Dr.
UFPE - DEMEC

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a minha família amada, minha mãe Adriana Santos Galindo, meu pai Plácido Antonio Batista Muniz, por terem apoiado em todos esses anos, dando suporte e confiança para ingressar e concluir com êxito a jornada acadêmica, com certeza não seria possível sem tê-los ao meu lado.

Agradeço também a todos os professores que fizeram parte da minha trajetória acadêmica, fornecendo o conhecimento necessário para minha formação com excelência, oferecendo oportunidades de crescimento profissional, agradeço em especial a professora Dra. Janaína Moreira por ter fornecido todo suporte necessário para conseguir concluir essa trajetória, e ao professor Me. Francisco Espedito por ter me apresentado e expandido conhecimentos práticos que levarei comigo durante toda minha carreira.

Agradeço aos meus amigos da universidade, que foram verdadeiros incentivadores da busca por conhecimento, e me proporcionaram uma trajetória mais leve e agradável, fornecendo apoio nas horas difíceis e celebrando cada conquista juntos.

RESUMO

Tratando de um forno industrial, uma das operações de manutenção realizadas é a inspeção e troca do material refratário presente no interior das paredes, assim como na região interna da tampa do equipamento. Tal atividade muitas vezes acaba sendo negligenciada por falta de equipamento adequado para o trabalho, que demanda um esforço elevado da equipe de manutenção, ou um alto custo para terceirizar o serviço de inspeção. No presente trabalho foi realizado o projeto de um equipamento mecânico com finalidade de atender a operação de retirada da tampa do forno industrial real em uma indústria cearense. Utilizando a metodologia de desenvolvimento de produtos, focado em atender a demanda operacional e as limitações impostas pelo espaço e apontadas pelo cliente, prezando pela simplificação das etapas e pela segurança dos operadores envolvidos na tarefa. Desta forma, o desenvolvimento do projeto contou com o auxílio de ferramentas de CAD para modelagem 3D e desenho detalhado do equipamento, e com a validação e memorial de cálculo, através de simulação computacional por elementos finitos, prezando pela integridade do produto desenvolvido e garantindo a possibilidade de realizar a demanda inicial apresentada. Ao longo deste projeto, foram aplicados os princípios da engenharia mecânica, incluindo análise estrutural, modelagem de componentes e metodologia do projeto, para criar um dispositivo robusto e versátil. Além disso, levou-se em consideração os aspectos ergonômicos, buscando minimizar o esforço físico dos operadores e promover um ambiente de trabalho mais saudável. Como conclusão, este projeto contribuiu significativamente para a resolução de um problema prático na indústria, demonstrando o valor da engenharia mecânica na melhoria dos processos industriais.

Palavras-chave: Desenvolvimento de Produto. Metodologia de Projeto. Modelagem. Desenho Técnico. Simulação Computacional.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
1.1	OBJETIVO GERAL	9
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
2.1	CRITÉRIO DE FALHA DE VON MISES	10
2.2	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	12
2.3	MANCAIS.....	13
2.4	ROLAMENTOS.....	14
2.5	METODOLOGIA DE PROJETOS	16
3	METODOLOGIA	18
3.1	PROJETO INFORMACIONAL.....	19
3.2	PROJETO CONCEITUAL	19
3.3	PROJETO PRELIMINAR	20
3.4	PROJETO DETALHADO	20
4	PROJETO INFORMACIONAL.....	21
4.1	LEVANTAMENTO DE CAMPO	21
5	PROJETO CONCEITUAL.....	24
6	PROJETO PRELIMINAR.....	26
6.1	ESTRUTURA FIXADA À TAMPA.....	27
6.1.1	Análise da estrutura.....	29
6.1.2	Análise do eixo.....	31
6.2	VIGAS DE SUSTENTAÇÃO.....	35
6.3	SISTEMA DE ELEVAÇÃO	37
6.4	CARRO AUXILIAR.....	42
6.5	CARRO PRINCIPAL	43
6.5.1	Estrutura do carro principal	44
6.5.2	Mecanismo de rotação.....	46
6.6	COLUNAS DE CANTO E SUPORTE DE FIXAÇÃO DO EQUIPAMENTO	49
7	PROJETO DETALHADO.....	53
7.1	DESENHOS CONJUNTOS.....	53
7.2	DESENHOS DETALHAMENTO.....	54
7.3	MEMÓRIA DE CÁLCULO	55
8	CONCLUSÃO	56
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57
	APÊNDICE A – Desenho Conjunto Geral	59
	APÊNDICE B – Desenho Conjunto Elevador	60
	APÊNDICE C – Desenho Conjunto Carro Auxiliar	61

1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que nas indústrias em geral a utilização de fornos nas plantas é bastante abrangente conforme as diferentes aplicações, vários setores dependem da utilização de tais componentes para desenvolver parte do processo da instalação. Os fornos, como qualquer outro equipamento na indústria, devem seguir um plano de manutenção e inspeção de forma a garantir o bom funcionamento e evitar problemas com sua eficiência ou até mesmo riscos para os operadores (TRINKS *et al.*,2003).

Tratando de um forno industrial e suas dimensões, a manutenção e movimentação de seus componentes fica bastante limitada devido ao peso das estruturas, impossibilitando a operação manual, a simples operação de retirada da tampa de um forno pode ser negligenciada durante uma manutenção de rotina por falta de equipamentos capazes de realizar tal atividade de forma eficiente e que traga segurança aos operadores durante o processo.

Uma das atividades realizadas em um forno industrial que se utiliza de refratários é justamente a retirada da tampa para substituição de tais componentes, de forma a assegurar o bom funcionamento do equipamento. Esta operação, exige mão de obra, tempo e custos elevados para mobilização e até mesmo terceirização de funcionários para a operação de retirada da tampa.

Nesse contexto, projetar consiste tanto em formular um plano para a satisfação de uma necessidade específica quanto em solucionar um problema. Se tal solução acarretar a criação de algo tendo uma realidade física, então o produto criado deverá ser funcional, seguro, confiável, competitivo, utilizável, manufaturável e mercável (SHIGLEY *et al.*,2005). Para isso faz-se necessário o projeto de um equipamento mecânico capaz de atender a demanda da atividade de forma eficiente e viabilizando a operação de manutenção de maneira prática, otimizada e ergonomicamente segura para o operador.

Portanto, neste estudo de caso foram estudadas soluções mecânicas para o desenvolvimento de um equipamento capaz de atender a demanda apresentada, e com a validação através de memórias de cálculo, simulação numérica e modelagens dos componentes ser possível a realização de um projeto executivo posterior, dando sequência na fabricação e operação do equipamento projetado no presente estudo.

O desenvolvimento do projeto, utilizando ferramentas computacionais de modelagem e simulação, fez com que houvesse a diminuição dos custos e o do tempo de desenvolvimento do equipamento, permitindo inclusive, que o projetista conseguisse avaliar os efeitos de diversos parâmetros, como mudança de geometria e escolha de material, sem a necessidade da construção de protótipos físicos (PUCHI-CABRERA et al., 2008).

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver o sistema de elevação e estrutura para um equipamento de retirada da tampa do forno industrial.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a demanda e limitações do processo de abertura e fechamento de tampa;
- Elencar as possibilidades de montagem e componentes que satisfaça as necessidades do cliente;
- Modelar o equipamento para a retirada e colocação da tampa e seus componentes;
- Realizar simulações dos componentes por elementos finitos para validação do modelo gerado;
- Realizar o projeto detalhado do equipamento.

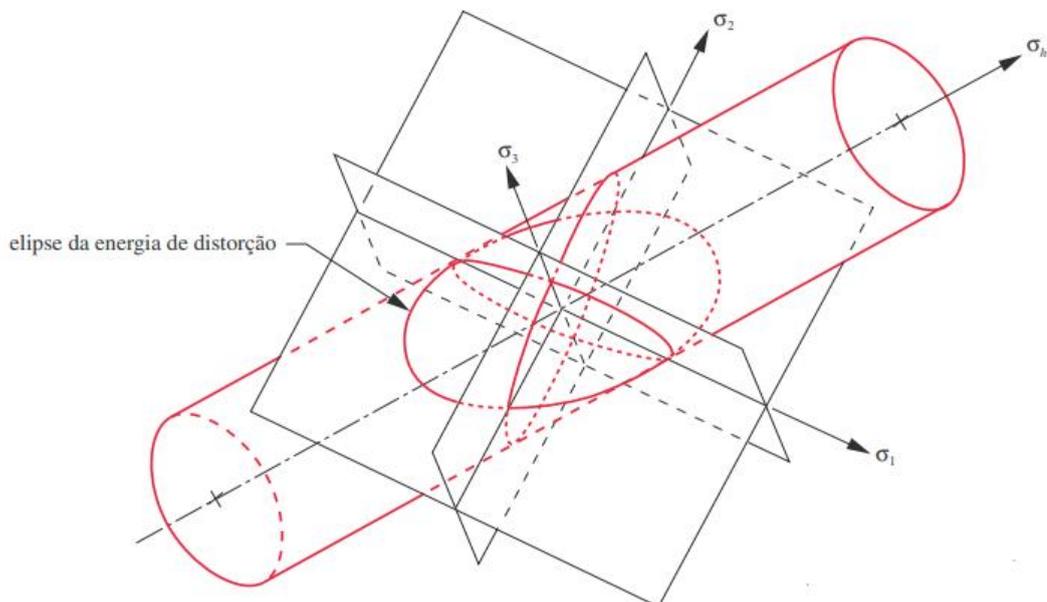
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CRITÉRIO DE FALHA DE VON MISES

O critério de Von Mises, também conhecido como teoria da máxima energia de distorção, é uma ferramenta utilizada para a análise de componentes estruturais, pois permite avaliar a resistência do material sob tensões complexas. Esse método de avaliação é frequentemente utilizado em projetos mecânicos, como em análises de tensão em peças de máquinas, estruturas metálicas, vasos de pressão, entre outros (CALLISTER, 2004).

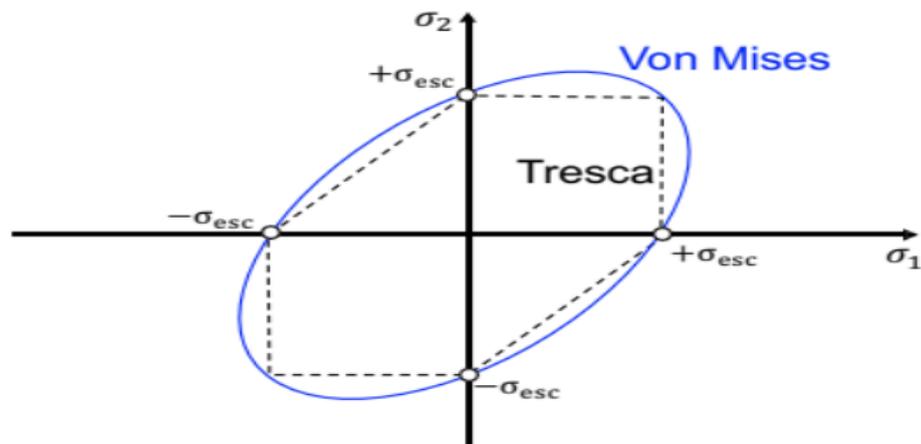
Segundo Beer (2011), este critério é utilizado para analisar a resistência de materiais sob tensão multiaxial. Portanto ele é capaz de avaliar a resistência de materiais isotrópicos, ou seja, que possuem as mesmas propriedades em todas as direções.

Figura 1. Vista das interseções da superfície cilíndrica de falha com os três planos principais.



Fonte: Adaptado de Norton (2013).

Figura 2. Diagrama de falha para o caso biaxial de Von Mises.



Fonte: Adaptado de Norton (2013).

O critério baseia-se na ideia de que a tensão equivalente de uma tensão multiaxial pode ser calculada a partir da raiz quadrada da soma dos quadrados das tensões principais, ponderadas pelos coeficientes de influência. A tensão equivalente é então comparada com o limite de escoamento do material para determinar se ocorrerá falha.

Como o próprio nome sugere, este critério baseia-se na energia de deformação (distorção), que é a energia armazenada por um sistema sujeito a deformações. Tal energia possui 2 componentes, sendo eles a componente hidrostática, que muda o volume, e a componente de distorção, que muda a forma do elemento. Experimentalmente, verificou-se que materiais podem suportar um alto nível de tensões hidrostáticas. Já quando trata-se da componente de distorção, materiais dúcteis suportam baixo nível de tensões de distorção antes de ocorrer a deformação plástica. Dessa forma, esta componente é responsável pela falha neste critério.

A tensão equivalente de Von Mises se dá em função das tensões principais, segundo a Equação (1).

$$\sigma_{eq}^2 = \frac{(\sigma_2 - \sigma_1)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2}{2} \quad (1)$$

Onde, σ_{eq} é a tensão equivalente de Von Mises, σ_1 é a tensão máxima principal, σ_2 é a tensão média principal, σ_3 é a tensão mínima principal.

O critério de Von Mises alega que a falha ocorrerá quando a tensão equivalente for maior ou igual a tensão admissível do material que está sendo utilizado, que por sua vez a tensão admissível leva em consideração a relação entre a tensão de escoamento e o fator de segurança adotado na etapa de projeto. Pode ser analisado gráficamente, a falha ocorrerá quando a tensão equivalente encontrar-se fora da elipse apontada no diagrama de falha (caso biaxial), na figura 2.

Segundo Shigley (2005), o critério de falha de Von Mises também pode ser adotado durante a fase de projeto de novos equipamentos, com o objetivo de aumentar a margem de segurança contra falhas mecânicas e, conseqüentemente, aumentar o tempo de vida útil do equipamento.

2.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Grande parte das estruturas e modelos reais possuem alto nível de complexidade na sua geometria, carregamento e/ou condições de contorno. Por este motivo torna-se muitas vezes inviável a análise por métodos analíticos clássicos, que apresentam a solução exata para as tensões, deslocamentos e deformações presentes na estrutura de uma forma geral. Nesse caso a utilização do método dos elementos finitos (MEF) surge como um meio de analisar o comportamento da estrutura de forma aproximada garantindo um nível de confiabilidade aceitável.

O MEF é uma ferramenta que possibilita a investigação dos deslocamentos e tensões presentes em estruturas e componentes mecânicos. Esse método utiliza equações diferenciais para conectar as variáveis de campo em um domínio específico, o qual requer que as variáveis fundamentais e suas derivadas na fronteira do domínio satisfaçam certas condições de restrições. Os domínios físicos são estabelecidos de acordo com a geometria da estrutura analisada, bem como com as premissas básicas relacionadas ao problema em análise (MARTHA, 1994). Os pontos que conectam os elementos finitos são denominados de nós, sendo a malha composta pela coleção desses nós. Segundo Owen (1998), a eficiência da malha é diretamente influenciada pelo nível de refinamento aplicado, o qual é determinado pelas operações aritméticas que correspondem ao tamanho do elemento finito adotado. Diferentes modelos de malha estão disponíveis, sendo triangular, quadrilátero, entre outros. Devido à subdivisão da geometria em elementos finitos, os modelos matemáticos utilizados não produzem resultados

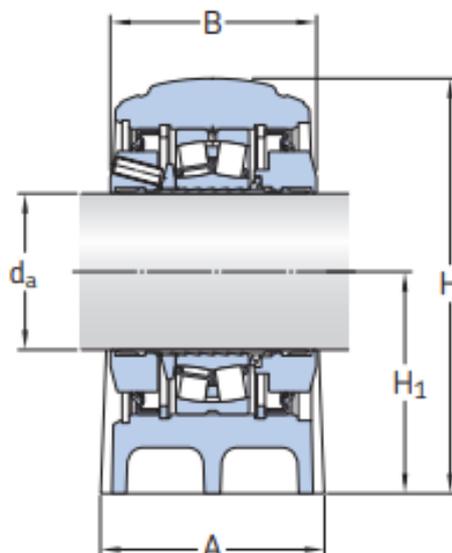
exatos, mas conseguem gerar estimativas precisas, que dependem do número de nós e do tamanho e tipo dos elementos utilizados na malha.

2.3 MANCAIS

Segundo Norton (2013), mancais são elementos mecânicos que servem para apoiar ou guiar uma peça em movimento. Essas peças podem ser eixos, hastes, pinos ou qualquer outro componente que necessite de apoio para se movimentar. Os mancais têm como função primordial a redução do atrito e do desgaste entre as superfícies em contato, além de suportar as cargas e momentos associados ao movimento.

A seleção adequada do mancal é fundamental para garantir a durabilidade e o bom desempenho da máquina ou equipamento em que ele é utilizado. A escolha do tipo de mancal a ser utilizado em uma aplicação específica depende de diversos fatores, como as condições de operação (carga, velocidade, temperatura, umidade, etc.), o tipo de movimento (rotativo ou linear), as características geométricas das peças envolvidas, entre outros. A escolha baseia-se em catálogos de fabricantes.

Figura 3. Dimensões relevantes na seleção de mancais.



Fonte: Grupo SKF (2019).

Tabela 1. Seleção de caixas de mancais.

Diâmetro do eixo	Unidade de rolamento		Rolamento Designação	Capacidades de carga básica		Limite de carga de fadiga	Tampa de fechamento Designação
	Fixo	Livre		dinâmica	estática		
d				C	C0	Pu	
[mm]				[kN]	[kN]	[kN]	
50	SYNT 50 F	SYNT 50 L	22210 E	104	108	11,8	ECY 210
55	SYNT 55 F	SYNT 55 L	22211 E	125	137	13,7	ECY 211
60	SYNT 60 F	SYNT 60 L	22212 E	156	166	18,6	ECY 212
65	SYNT 65 F	SYNT 65 L	22213 E	193	216	24	ECY 213
70	SYNT 70 F	SYNT 70 L	22214 E	208	228	25,5	ECY 214
75	SYNT 75 F	SYNT 75 L	22215 E	212	240	26,5	ECY 215

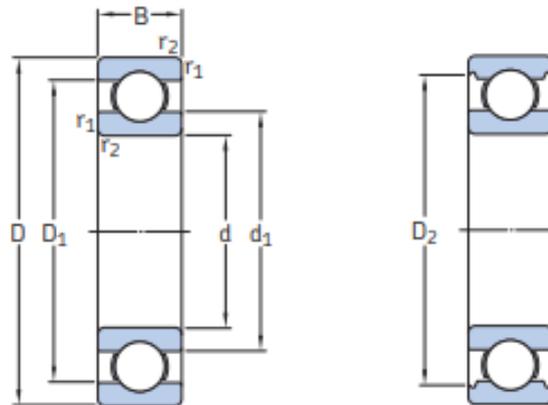
Fonte: Adaptado de Grupo SKF (2019).

2.4 ROLAMENTOS

Rolamentos são dispositivos mecânicos que permitem a movimentação suave e com baixo atrito de uma peça em relação a outra. Eles são compostos por elementos rolantes (tais como esferas, rolos ou agulhas) que estão contidos dentro de uma estrutura de suporte, chamada de anel interno e anel externo. Os rolamentos são amplamente utilizados em aplicações industriais e em equipamentos mecânicos, como motores elétricos, máquinas-ferramenta, entre outros (SHIGLEY et al.,2005).

Os rolamentos normalmente são alocados em mancais, ou cavidades específicas para seu alojamento, a seleção baseia-se em diversos fatores, como o tipo de carregamento submetido (axial, radial, combinado), a velocidade de rotação do eixo que o rolamento suporta, condições ambientais (temperatura de operação, umidade, presença de contaminantes), dimensões do eixo existente a ser acoplado ao rolamento, entre outros. A escolha do modelo de rolamento baseia-se em catálogos de fornecedores.

Figura 4. Dimensões relevantes para seleção de rolamentos.



Fonte: Grupo SKF (2015).

Tabela 2. Seleção de rolamentos SKF.

Dimensões principais			Classificação básica de carga		Limite de carga de fadiga Pu	Classificações de velocidade		Massa [kg]	Designação
			dinâmica C	estática C0		Velocidade referência [r/min]	Velocidade limite [r/min]		
d	D	B	C	C0	Pu	Velocidade referência	Velocidade limite		
[mm]			[kN]	[kN]	[kN]	[r/min]	[r/min]	[kg]	
3	10	4	0,54	0,18	0,007	130 000	80 000	0,0015	623
4	9	2,5	0,423	0,116	0,005	140 000	85 000	0,0007	618/4
	11	4	0,624	0,18	0,008	130 000	80 000	0,0017	619/4
	12	4	0,806	0,28	0,012	120 000	75 000	0,0021	604
	13	5	0,936	0,29	0,012	110 000	67 000	0,0031	624
	16	5	1,11	0,38	0,016	95 000	60 000	0,0054	634
5	11	3	0,468	0,143	0,006	120 000	75 000	0,0012	618/4
	13	4	0,884	0,335	0,014	110 000	70 000	0,0025	619/5
	16	5	1,14	0,38	0,016	95 000	60 000	0,005	625
	19	6	2,34	0,95	0,04	80 000	50 000	0,0085	635

Fonte: Adaptado Grupo SKF (2015).

2.5 METODOLOGIA DE PROJETOS

A metodologia de projetos é essencialmente um exercício de criatividade aplicada. Muitas “metodologias de projetos” foram definidas para ajudar a organizar a enfrentar o “problema não estruturado”, isto é, casos em que a definição do problema é vaga e para os quais muitas soluções possíveis existem (NORTON, 2013).

Segundo Norton (2013), aborda um modelo de metodologia de projeto para atender, de modo geral, os processos e passos a serem considerados ao início de um estudo, conforme tópicos:

1. Identificação da necessidade
2. Pesquisa de suporte
3. Definição dos objetivos
4. Especificações de tarefas
5. Síntese
- 6 Análise
- 7 Seleção
- 8 Projeto detalhado
- 9 Protótipo e teste
- 10 Produção

Já Rozenfeld (2011), apresenta a concepção de um projeto orientado por modelos (MPOM), visando aprimorar o processo de desenvolvimento de produtos de forma mais eficiente, o modelo sugere uma abordagem dividida em etapas de projetos, conforme Figura 5, e abordadas em caráter de funcionalidade como:

1. Definição do Problema: Identificação do problema e levantamento de informações sobre o produto a ser desenvolvido.
2. Formulação do Problema: Definição clara dos objetivos do projeto e dos requisitos a serem atendidos.
3. Geração de Alternativas: Geração de ideias e conceitos de solução para o problema, levando em consideração aspectos técnicos, econômicos e de mercado.
4. Análise e Seleção: Avaliação das alternativas geradas e seleção da melhor

solução com base em critérios preestabelecidos.

5. Detalhamento: Detalhamento da solução selecionada, por meio da elaboração de desenhos e especificações técnicas.
6. Implementação: Construção e teste do produto desenvolvido, validando a solução selecionada.

Figura 5. Fluxograma de desenvolvimento de produto de Rozenfeld.



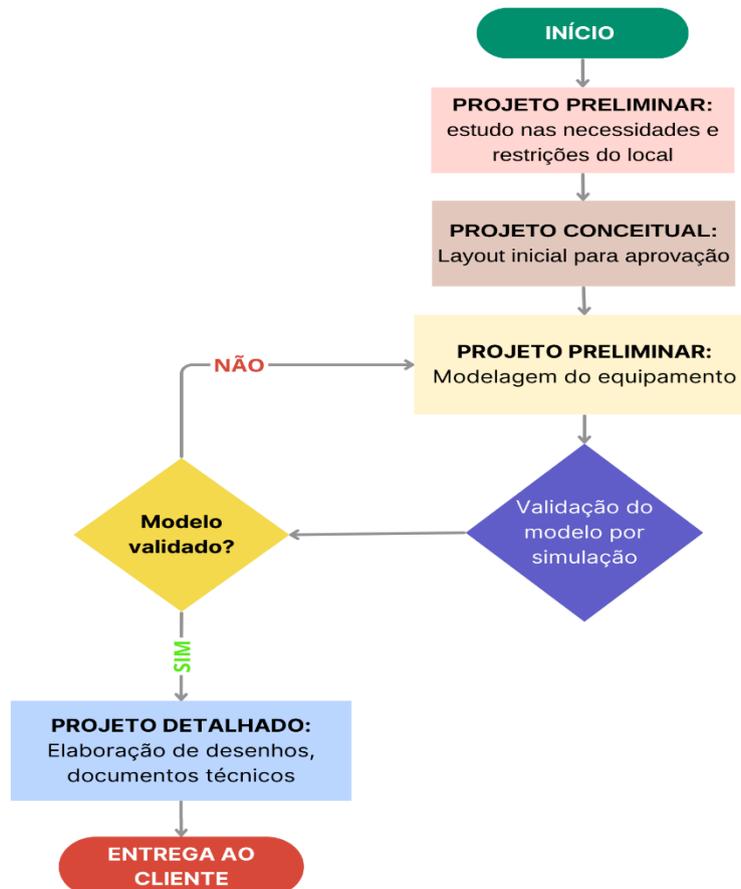
Fonte: Adaptado de Rozenfeld *et al.* (2011).

3 METODOLOGIA

Esse trabalho trata-se de um projeto classificado como estudo de caso, onde foi analisada uma problemática realística em uma empresa cearense, tema abordado durante o período de estágio do autor, em uma empresa de consultoria e projetos mecânicos, o projeto do equipamento proposto foi desenvolvido em parceria com a equipe de projetos e com outro estagiário de projetos, onde foram divididas as tarefas de forma a maximizar o tempo de entrega ao cliente e todo processo de revisão e consolidação se deu de forma conjunta, junto ao setor de projetos.

As próximas seções abordarão as atividades e os procedimentos para a análise, cálculo, modelagem, simulação e validação do modelo, voltados para os componentes mecânicos e estruturais presentes no projeto do equipamento, que seguiram basicamente as etapas detalhadas que compõe o fluxograma da Figura 6, tendo como pilar a metodologia de desenvolvimento de produto de Rozenfeld (2011).

Figura 6. Fluxograma dos procedimentos utilizados nesse trabalho.



Fonte: Autor.

3.1 PROJETO INFORMACIONAL

O projeto informacional corresponde a uma das etapas iniciais de um projeto, é tido como a fase mais importante quando se trata de desenvolvimento de um produto, pois tratando-se de uma etapa inicial, os dados preliminares de operação, limitações e decisões nela adotadas influenciam diretamente sobre o resultado das etapas posteriores do projeto.

Nesta etapa, foi realizado um levantamento inicial do local onde fica localizado o forno em estudo, das limitações e condições para o espaço de operação na movimentação da tampa, fator crucial para dimensionamento do equipamento que será utilizado no local.

Inicialmente o cenário e disposição dos equipamentos e estruturas presentes no local onde tem-se a operação de retirada da tampa foram analisados utilizando a maquete fornecida através de um levantamento por nuvem de pontos e renderizada por meio do programa *Autodesk ReCap*.

Nesta etapa foram realizadas as reuniões com cliente para definir as necessidades reais, condições de operação e fatores fundamentais para que fosse possível realizar um esboço inicial do equipamento de forma a atender a demanda de forma eficiente e que se enquadre nas exigências internas pontuadas.

3.2 PROJETO CONCEITUAL

Através da maquete 3D da estrutura presente no local, o projetista responsável por criar o escopo para proposta comercial, apresentou uma solução conceitual com respeito as dimensões do local de aplicação e com as funções básicas de operação para possibilitar o movimento de retirada e giro da tampa do forno. Esta modelagem inicial foi realizada previamente a nuvem de pontos e posteriormente foi ajustada ao ambiente, através do programa *Autodesk AutoCAD*, respeitando as interferências com a estrutura existente no ambiente e atendendo as solicitações internas.

O modelo inicial do equipamento inserido na maquete do espaço real de operação foi submetido à aprovação do cliente, para dar sequência nos dimensionamentos dos componentes, remodelagem de peças, e estudos de operação e melhoria do layout inicial proposto.

3.3 PROJETO PRELIMINAR

Com o layout do equipamento definido e aceito pelo cliente, foi possível trabalhar em cima do dimensionamento e escolha dos componentes que atendem os esforços da operação de retirada da tampa do forno, assim como as limitações de movimento e montagem. Tendo em vistas tais pontos, foi possível fazer a modelagem dos componentes e do conjunto do equipamento de forma definitiva, através do programa *Autodesk Inventor*.

Nesta etapa do projeto também foram realizadas as análises dos componentes e estrutura do equipamento em cenários críticos e relevantes para a operação de retirada da tampa, para que seja possível validar o modelo e as peças utilizadas no equipamento de forma a atender o propósito do dispositivo. Em caso de necessidade de alteração de componentes ou da montagem, a modelagem foi retrabalhada, de forma a garantir maior segurança e eficiência do equipamento, buscando atender as normas técnicas referentes ao desenvolvimento de produtos.

Com o modelo definitivo, foi possível realizar o estudo detalhado, onde são apresentadas as análises finais dos componentes, realizadas através do programa *Ansys Workbench Student*, que atestam a funcionalidade do equipamento com as condições de operação, respeitando os esforços e aplicação, de forma a garantir confiabilidade para dar sequência ao projeto executivo e/ou um possível protótipo do equipamento.

3.4 PROJETO DETALHADO

Na etapa de projeto detalhado, estão presentes a confecção dos documentos técnicos padronizados que serão entregues ao cliente final, contendo a memória de cálculo dos componentes através das análises, o memorial descritivo de todo o equipamento desenvolvido, além disso foi realizado o levantamento de todos os componentes e peças necessárias para o equipamento proposto, os desenhos de detalhamento e de conjuntos, para a fabricação e montagem em campo.

4 PROJETO INFORMACIONAL

Inicialmente foi realizado o levantamento dos dados a respeito do local de trabalho, e o estudo das necessidades internas, de forma a garantir a eficiência do produto desenvolvido e a satisfação do solicitante.

Através de reunião remota foram apresentadas pelo cliente, as diretrizes e exigências técnicas e operacionais, além dos dados de carregamento. Os pontos principais acordados inicialmente foram:

- Respeitar as limitações de espaço do local e tubulações existentes no local de operação;
- Movimentação e giro da tampa realizadas de maneira simplificada, estudar possibilidade de acionamentos manuais nos processos;

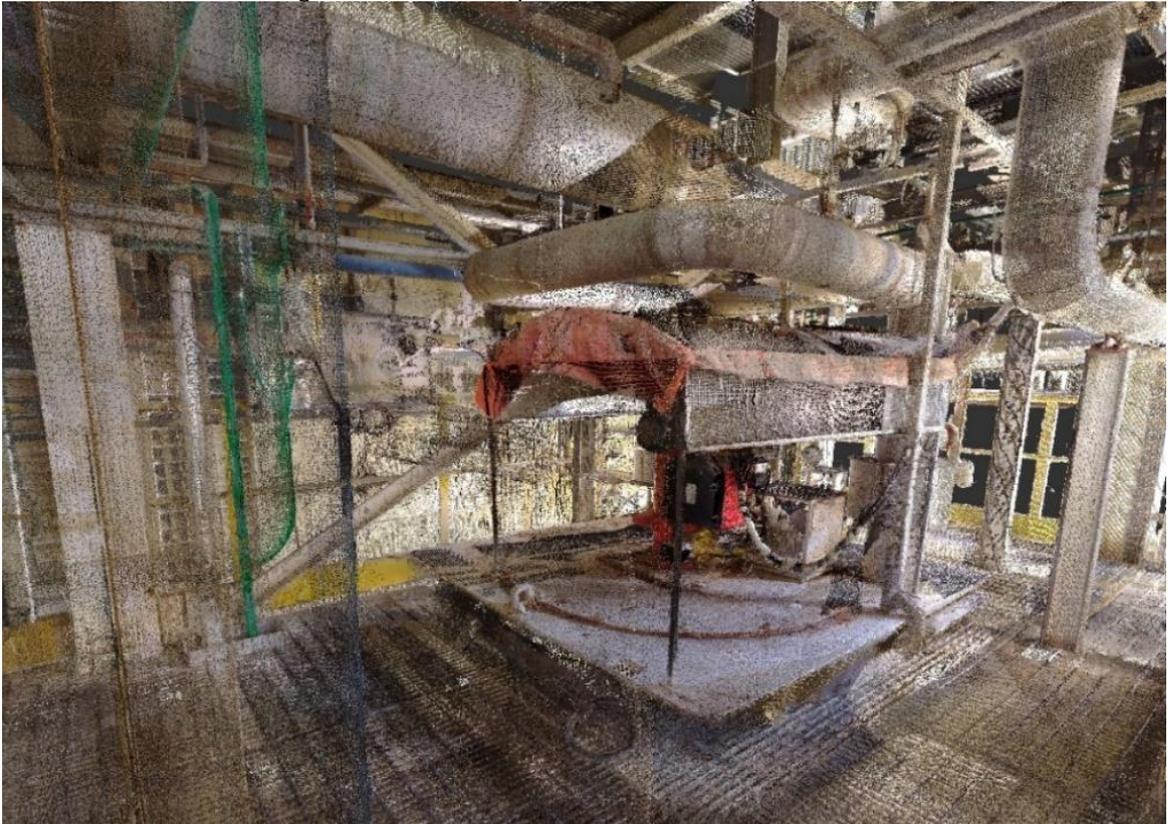
Desta forma foi realizada a etapa de levantamento dos dados a respeito dos carregamentos, peso das estruturas, e através de varredura por nuvem de pontos foi possível gerar o modelo contendo as dimensões e estruturas presentes no local, além de desenvolver um layout inicial do equipamento, para aprovação do cliente e posteriormente seguir para a etapa de dimensionamento, cálculo e dimensionamento dos componentes.

4.1 LEVANTAMENTO DE CAMPO

Para o estudo e concepção do equipamento a ser modelado, inicialmente foram estabelecidas condições de operação e dados a respeito do local de instalação e das limitações que influenciam diretamente nas etapas posteriores do projeto.

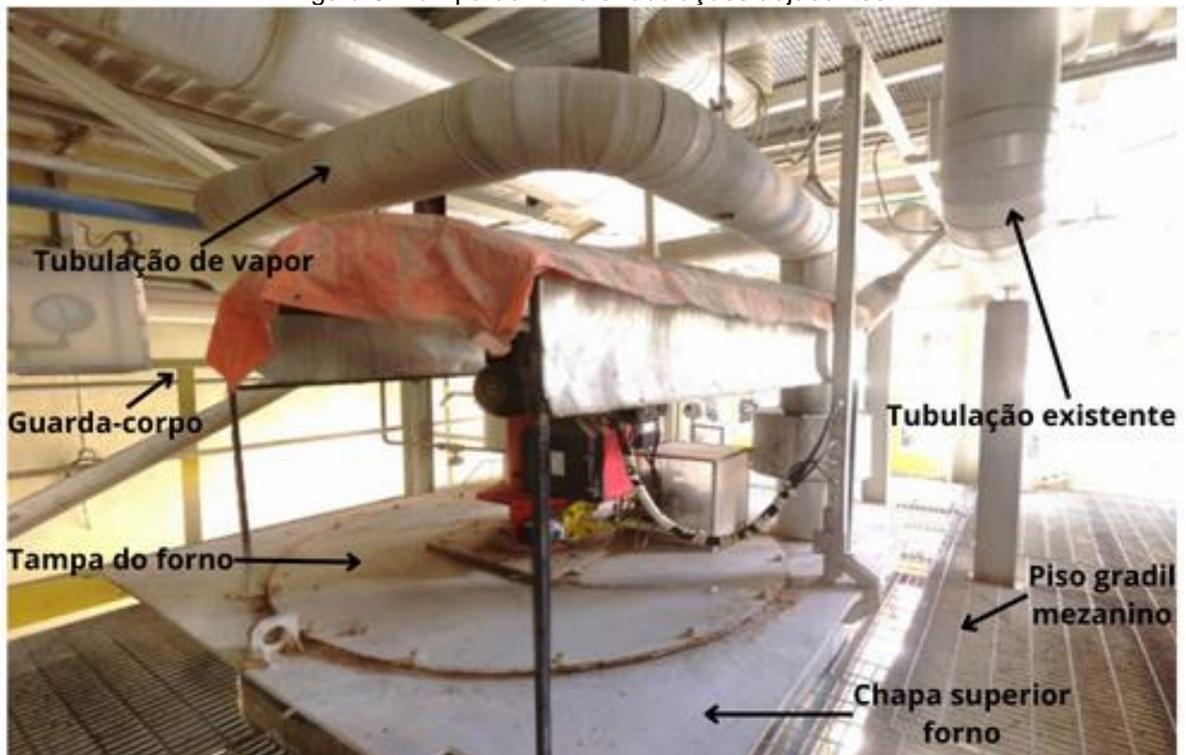
O levantamento das condições do local no qual o equipamento será alocado, por se tratar de uma empresa distante, dentro do escopo inicial do projeto foi incluído a etapa de levantamento por nuvem de pontos, o resultado do mesmo pode ser visualizado na Figura 7. Além de fotografias panorâmicas do local, Figura 8, que foram adquiridas durante o levantamento para facilitar a visualização e ter perspectiva das instalações presentes no ambiente, fornecendo uma visão geral mais clara do ambiente de trabalho.

Figura 7. Nuvem de pontos local da tampa do forno.



Fonte: Autor.

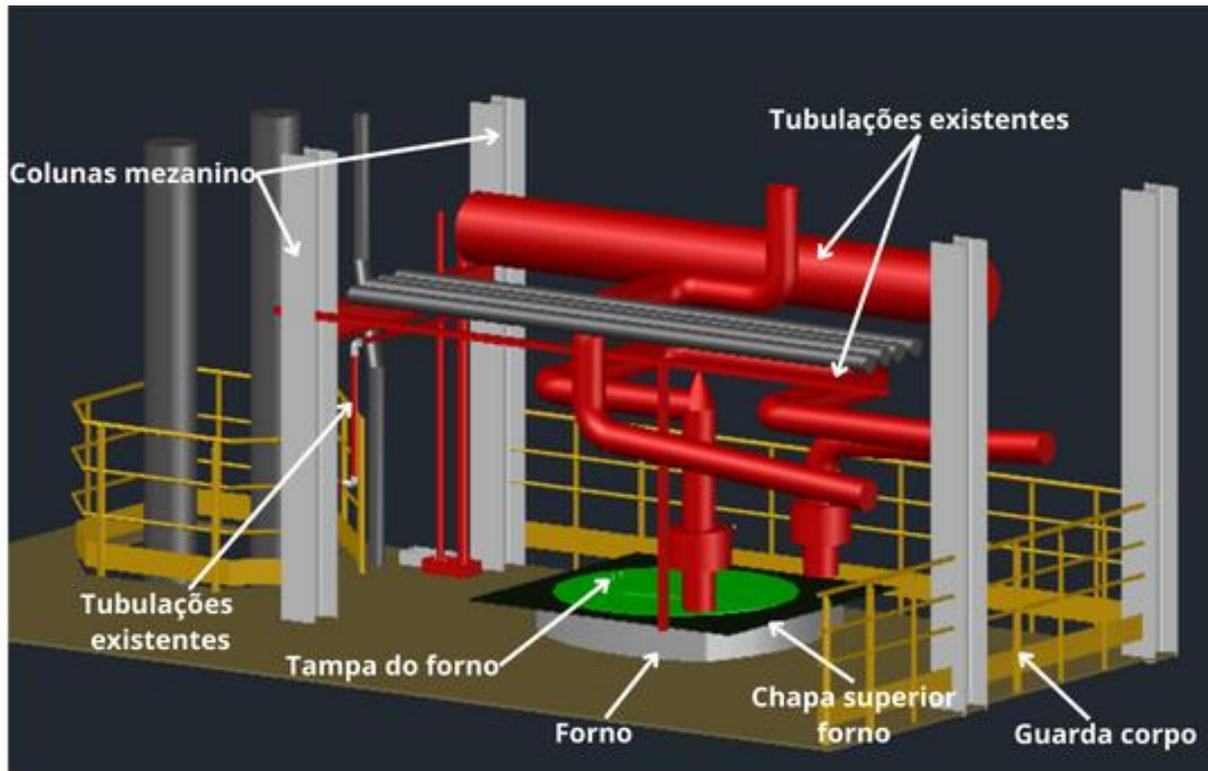
Figura 8. Tampa do forno e tubulações adjacentes.



Fonte: Autor.

Com o levantamento realizado através da nuvem de pontos, foi possível gerar a maquete 3D do local, conforme Figura 9. O modelo gerado da estrutura existente serviu como base e principal referência e limitação ao decorrer do estudo de forma que garanta uma operação segura e livre de interferência no ambiente ao qual será instalado o equipamento.

Figura 9. Maquete 3D da estrutura presente mezanino forno.



Fonte: Autor.

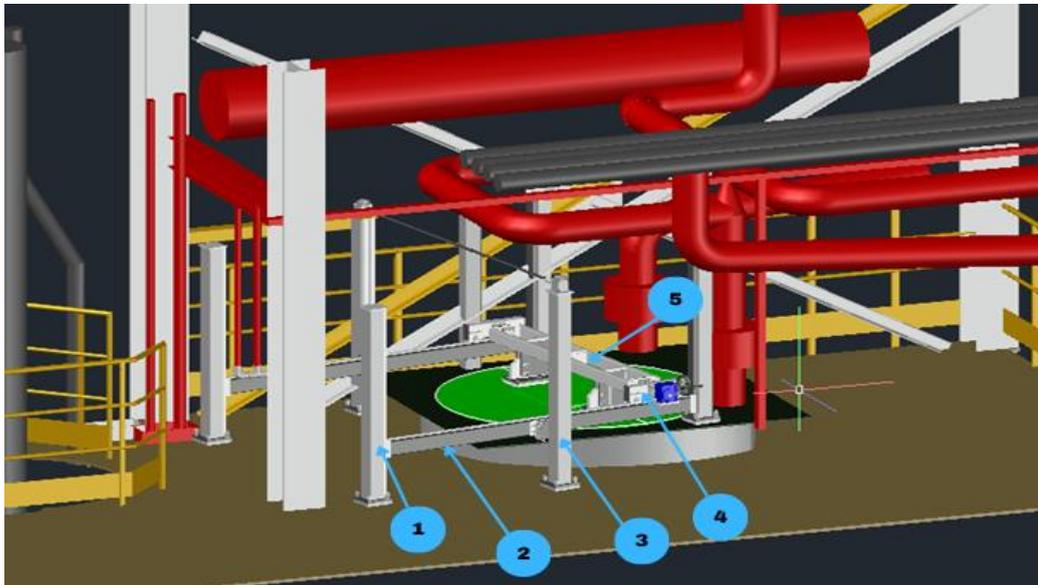
Como apresentado no modelo gerado, o local da instalação e de operação do equipamento é bastante restrito, com diversos pontos de possíveis interferências, pontos estes que não podem ser realocados, conforme exigência do cliente. Em verde claro está representada a tampa do forno industrial a ser movida, em cinza, logo abaixo, está o forno industrial, as limitações e restrições podem ser correspondem as estruturas em vermelho, que por sua vez trata-se das tubulações de vapor, bem como tubulações de água e gás natural que circundam a região, em amarelo os guarda corpos presentes nas laterais no mezanino, também o possível visualizar as colunas do mezanino em cinza claro, assim como demais pontos apresentados na Figura 9.

5 PROJETO CONCEITUAL

Com base na modelagem das estruturas presentes no local, obtidas na etapa de projeto informacional, foi possível idealizar um layout inicial do equipamento que atendesse a operação de retirada da tampa do forno refratário e respeitando as limitações de espaço que o espaço apresenta.

Desta forma foi modelado inicialmente o esboço do equipamento, Figura 10, com a ideia de elevação, rotação e movimentação da tampa para fora do forno, para que seja possível a manutenção do refratário no seu interior.

Figura 10. Maquete 3D da estrutura presente. (1) coluna de apoio, (2) viga sustentação, (3) coluna elevador, (4) carro, (5) estrutura fixada à tampa.



Fonte: Autor.

A ideia inicial para o layout do equipamento levou em consideração as limitações do local, assim como as necessidades de movimentação da tampa. Neste primeiro modelo podemos observar diferentes estruturas com funções estabelecidas para suprir as necessidades da tarefa a ser realizada, desta forma, no ponto (1) foram estabelecidas colunas de apoio para sustentação do equipamento ao piso e nela anexadas guias lineares para auxiliar no movimento de elevação, no ponto (2) idealizada uma viga horizontal com patins em suas extremidades para translação da tampa horizontalmente, o ponto (3) corresponde ao sistema de elevação do equipamento através de um elevador mecânico presente no interior das colunas centrais, o ponto (4) corresponde aos carros que estabelecem o sistema de giro da

tampa, assim como a movimentação sobre a viga, permitindo a translação da tampa, vale ressaltar que o layout inicial do equipamento apresentava o sistema de rotação da tampa de maneira manual, através de uma roda de mão idealizada na fase inicial, pelo projetista da empresa, já o ponto (5) corresponde a estrutura do equipamento que é fixada à tampa do forno.

O layout do equipamento idealizado na etapa de projeto conceitual, foi apresentado ao cliente, e uma vez aceito, iniciou-se o estudo detalhado e aprimorado, na etapa de projeto preliminar, através do dimensionamento das suas estruturas e de seus elementos para permitir a operação de retirada da tampa do forno, respeitando os carregamentos envolvidos e adotando uma solução prática e comercial para o produto.

6 PROJETO PRELIMINAR

Definido o layout inicial para o equipamento de retirada da tampa do forno na etapa de projeto básico, foi dado início ao desenvolvimento do projeto preliminar. Neste tópico são apresentados os resultados obtidos nesta etapa de desenvolvimento do produto, definindo as soluções para os sistemas, a modelagem do equipamento, os materiais utilizados, especificações dos componentes e validação dos componentes pertencentes ao modelo adotado.

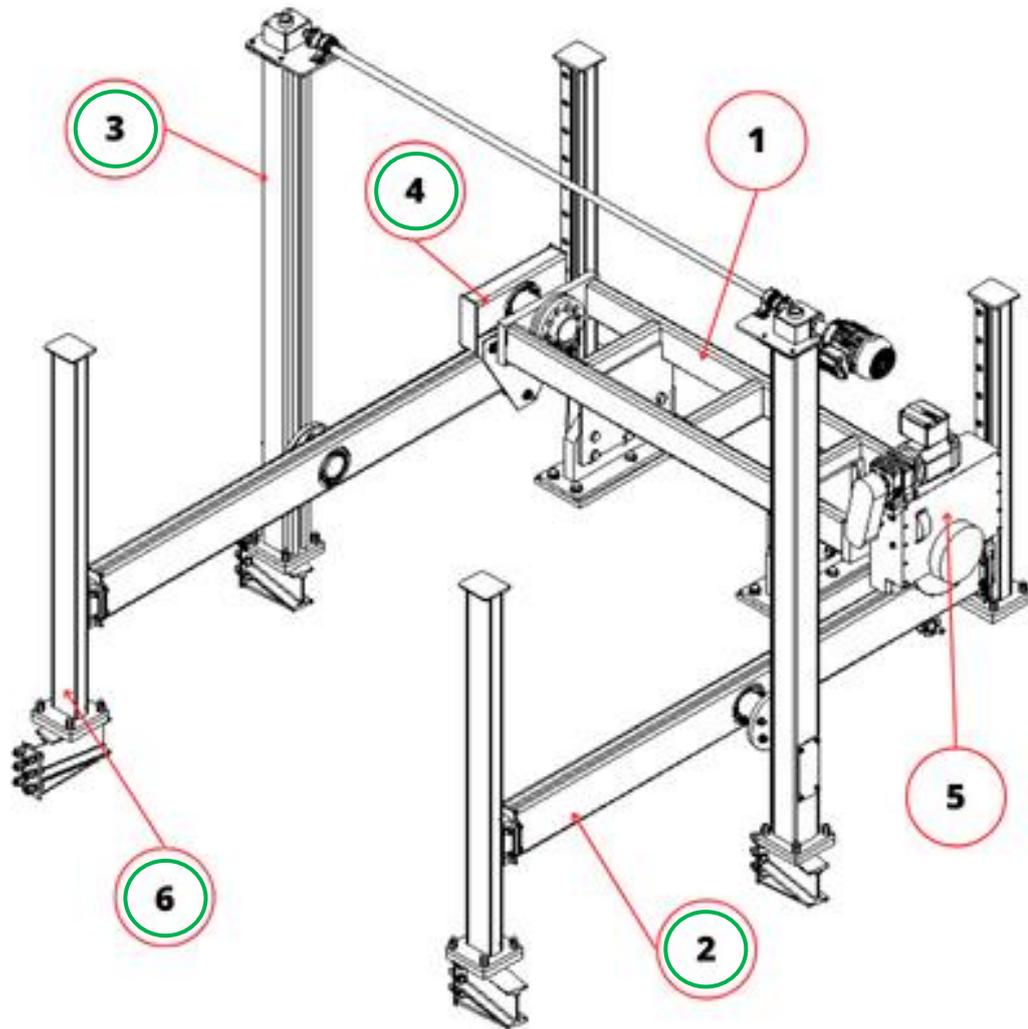
Desta forma procurou-se utilizar, sempre que possível, as proposições referentes ao projeto para manufatura e montagem (DFMA - *Design for Manufacture and Assembly*), disponíveis em Forcellini (2002). O uso dessa metodologia tem como objetivo a redução de complexidade nos processos de fabricação e montagem do equipamento desenvolvido. Como resultado, os componentes projetados visam uma fácil usinagem, com isso uma redução de custos e material utilizado, e quando possível foram adotados peças e componentes normalizados e comerciais no projeto.

A utilização de peças e componentes normalizados/comerciais implica em uma redução de custos para o projeto, já para os componentes não comerciais foram feitos desenhos detalhados de fabricação e escolha apropriada dos materiais conforme a solicitação e esforços envolvidos no componente em questão.

Tratando de uma operação de retirada da tampa do forno refratário industrial, a temperatura pode ser um ponto chave na seleção dos materiais que compõe o equipamento, porém vale ressaltar que o equipamento encontra-se em uma região de termicamente favorável e sua operação ocorre apenas com o forno desligado e na fase de limpeza e manutenção do mesmo, o que implica em uma temperatura propícia para os operadores realizarem a limpeza interna, dito isso, a temperatura tornou-se um ponto de atenção mas não de prioridade.

No sentido de otimizar o trabalho a ser realizado na fase de projeto preliminar, o equipamento de retirada da tampa do forno foi dividido em subconjuntos de acordo com suas funções de operação. Desta forma foram criados seis subconjuntos, conforme ilustrado na Figura 9, sendo eles: (1) Estrutura fixada à tampa, (2) Vigas de sustentação, (3) Sistema de elevação, (4) Carro auxiliar, (5) Carro principal, (6) Colunas de canto e suporte de fixação do equipamento. No qual será abordado de maneira mais detalhada os sistemas em destaque.

Figura 9. Subconjuntos do equipamento de retirada da tampa. (1) Estrutura fixada à tampa, (2) Vigas sustentação, (3) Sistema de elevação, (4) Carro auxiliar, (5) Carro principal, (6) Colunas de canto.

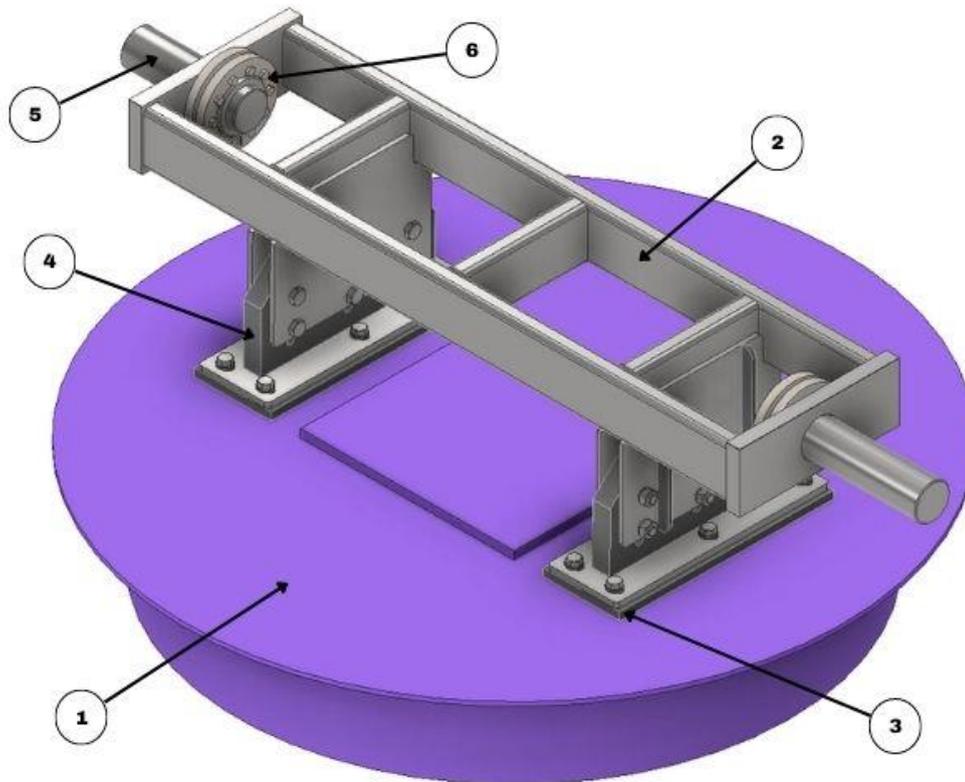


Fonte: Autor.

6.1 ESTRUTURA FIXADA À TAMPA

Durante o processo de desenvolvimento da estrutura fixada à tampa foi decidido com o cliente que a estrutura seria baseada em tubos retangulares comerciais, e um ponto importante a se respeitar seria a impossibilidade de furação na tampa ou estrutura existente do forno industrial para fixação, com base nessas exigências foi desenvolvida a estrutura, conforme Figura 10. Modelo este desenvolvido com mais detalhes por Rocha (2023), e validado em conjunto.

Figura 10. Estrutura fixada à tampa.



Fonte: Autor.

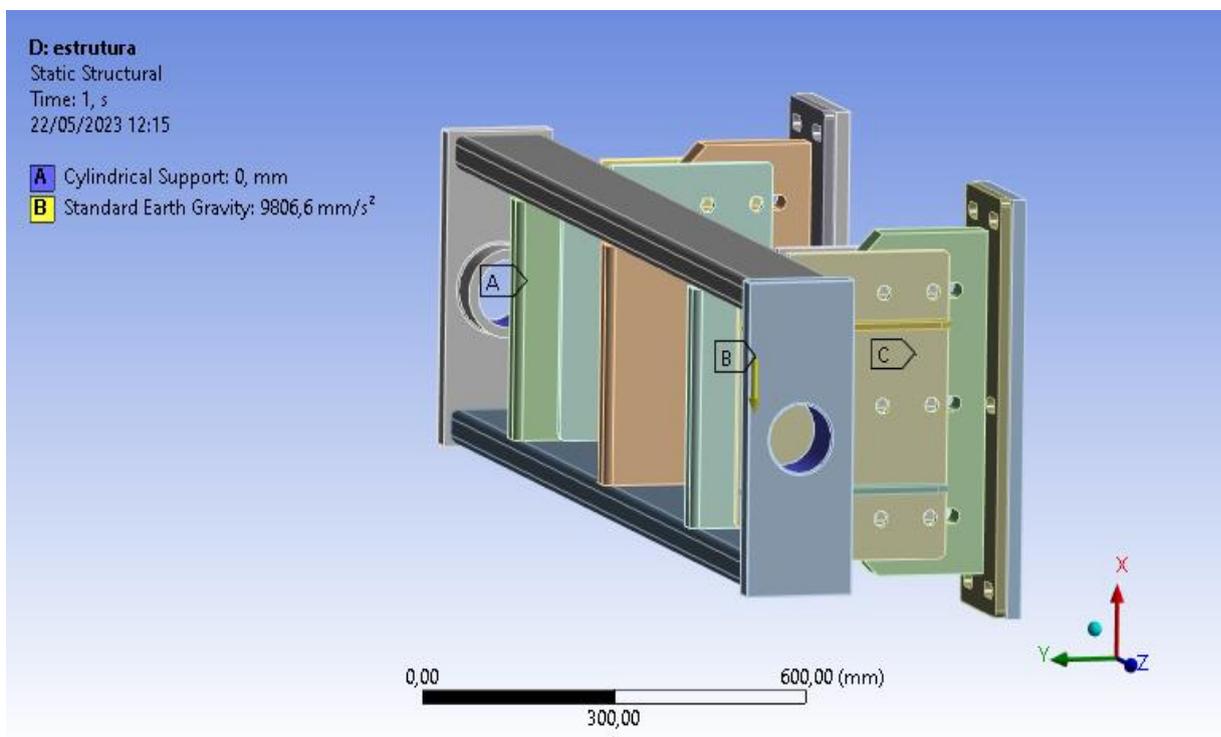
A estrutura fixada à tampa, Figura 10, desenvolve a função de fixação do equipamento com a tampa do forno, responsável por transmitir os movimentos de translação, elevação e giro para a tampa. Como o próprio nome sugere esta estrutura é fixada à tampa do forno (1), como não pode ser realizado furação para rosqueamento e fixação da estrutura diretamente na tampa, foi soldado uma chapa em sua superfície (3), a estrutura de tubos (2) foi modelada de forma a suportar os esforços de flexo-torção que surge durante a movimentação da carga, utilizando tubo retangular 150x50 – 6,3mm. No ponto (4) fez-se necessário adicionar uma chapa de reforço para enrijecer a estrutura na parte inferior e garantir a regulagem de altura na hora da montagem do equipamento, o eixo de rotação com diâmetro de 100 mm (5) é um ponto importante do subconjunto pois é responsável por transmitir o momento de giro do sistema de rotação para a estrutura e conseqüentemente a tampa do forno, para ser possível a transmissão do momento e garantir a condição de não deslizamento do eixo durante a rotação do equipamento, foram adotados discos de contração comerciais (6).

Para validação da estrutura apresentada, foi dividido em dois principais pontos, primeiramente a validação da estrutura com os tubos retangulares, em seguida a validação do eixo de rotação (5).

6.1.1 Análise da estrutura

Para a estrutura fixada à tampa foram definidas as condições de contorno e operação de modo a satisfazer o cenário crítico da estrutura, quando a tampa está na posição de giro a 90° em relação ao ponto inicial, sendo este o ponto em que os componentes sofrem maior esforço de torção. A tampa do forno foi considerada com massa igual a 800kg, a Figura 11 apresenta as condições de contorno adotadas, foram fixadas as faces inferiores da chapa que fica em contato com a tampa do forno, um ponto de massa de 1200kg foi inserido no centro de gravidade do conjunto (estrutura e tampa)

Figura 11. Condições de contorno estrutura fixada à tampa.

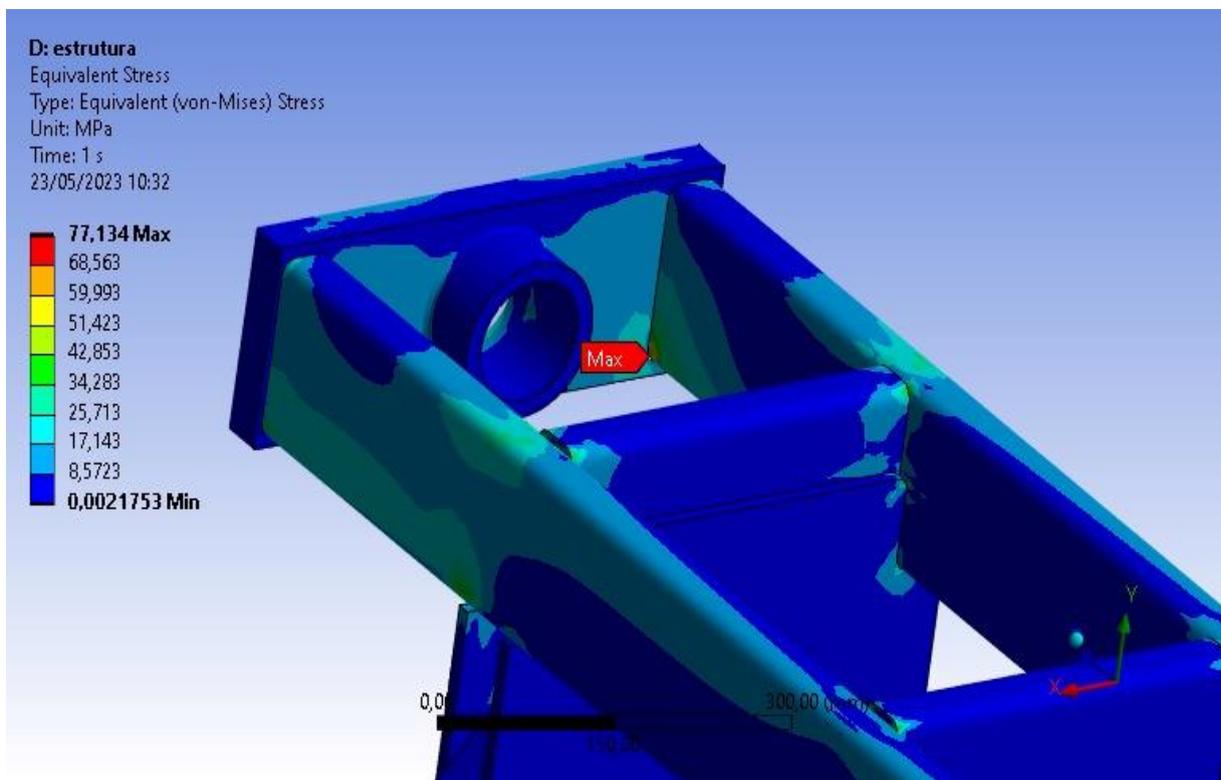


Fonte: Autor.

O material utilizado para os tubos retangulares foi o AISI A500, onde a tensão admissível (δ_{adm}) é de 150 MPa

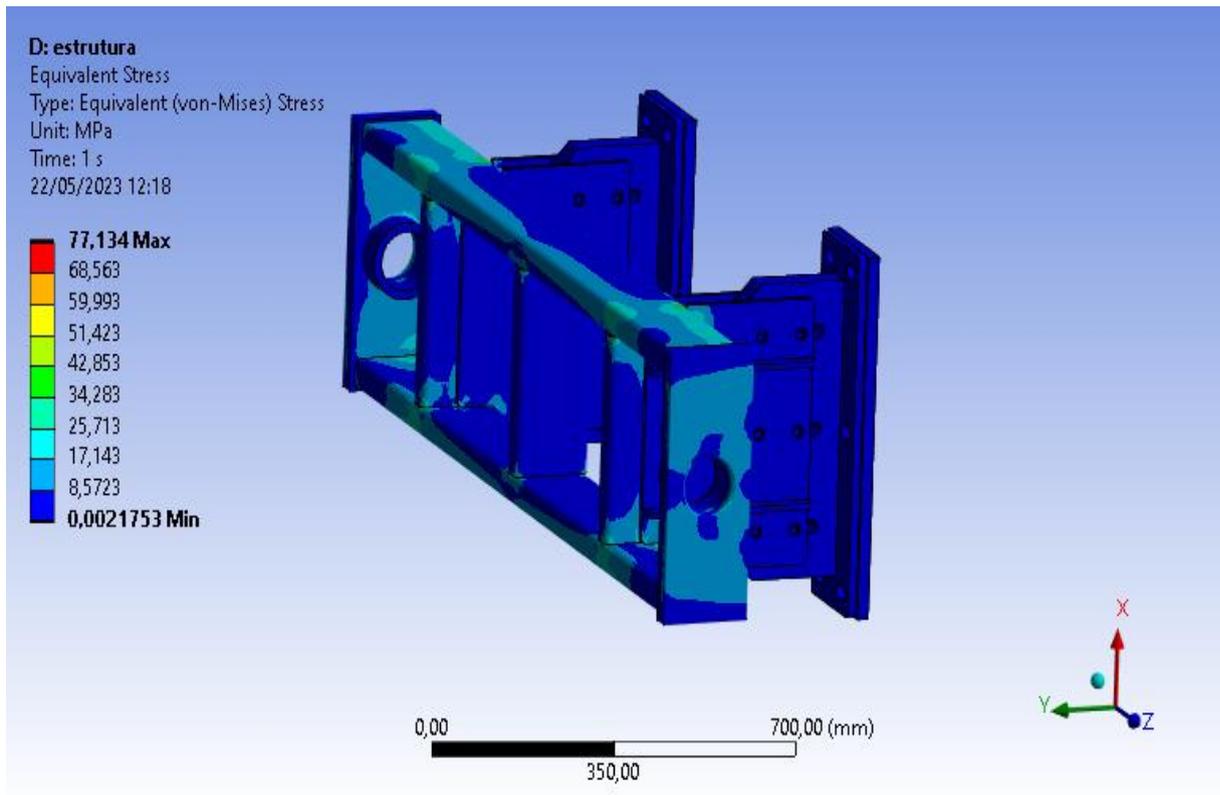
Após a simulação por elementos finitos a tensão máxima apresentada na estrutura foi de 77 MPa, Figura 12, valor este que se encontra abaixo da tensão admissível para o material, e conforme apresentado na Figura 13. Há uma distribuição de tensões nos componentes da estrutura de forma uniforme, garantindo a integridade da estrutura para as cargas e condições adotadas anteriormente.

Figura 12. Região de máxima tensão na estrutura fixada à tampa.



Fonte: Autor.

Figura 13. Tensões resultantes na estrutura fixada à tampa.



Fonte: Autor.

6.1.2 Análise do eixo

Para o dimensionamento e análise do eixo principal, foi necessário entender a natureza dos esforços atuantes neste elemento, responsável por transmitir o torque para possibilitar a rotação de todo o conjunto e da tampa. Neste caso além da abordagem por simulação computacional para escolha do diâmetro que satisfaça as condições de operação e de contorno, foi realizado o cálculo analítico do componente, este que está sendo submetido a esforço de flexo torção, uma vez que ocorre a flexão devido ao peso aplicado na extremidade do eixo e a torção decorrente ao movimento de giro da tampa.

Para o cálculo analítico para determinar diâmetro mínimo do eixo a ser adotado, foram utilizadas as equações de dimensionamento para flexão, torção e flexo torção, que tratando de uma seção circular, podem ser apresentadas através das Equações 2,3 e 4 respectivamente.

$$\sigma_f = \frac{M_f}{W_f} = \frac{M_f}{\frac{\pi\phi^3}{32}} = \frac{32M_f}{\pi\phi^3} \rightarrow \phi_1 = \sqrt[3]{\frac{32M_f}{\pi\sigma_f}} \quad (2)$$

$$\sigma_t = \frac{M_t}{W_t} = \frac{M_t}{\frac{\pi\phi^3}{16}} = \frac{16M_t}{\pi\phi^3} \rightarrow \phi_2 = \sqrt[3]{\frac{16M_t}{\pi\sigma_t}} \quad (3)$$

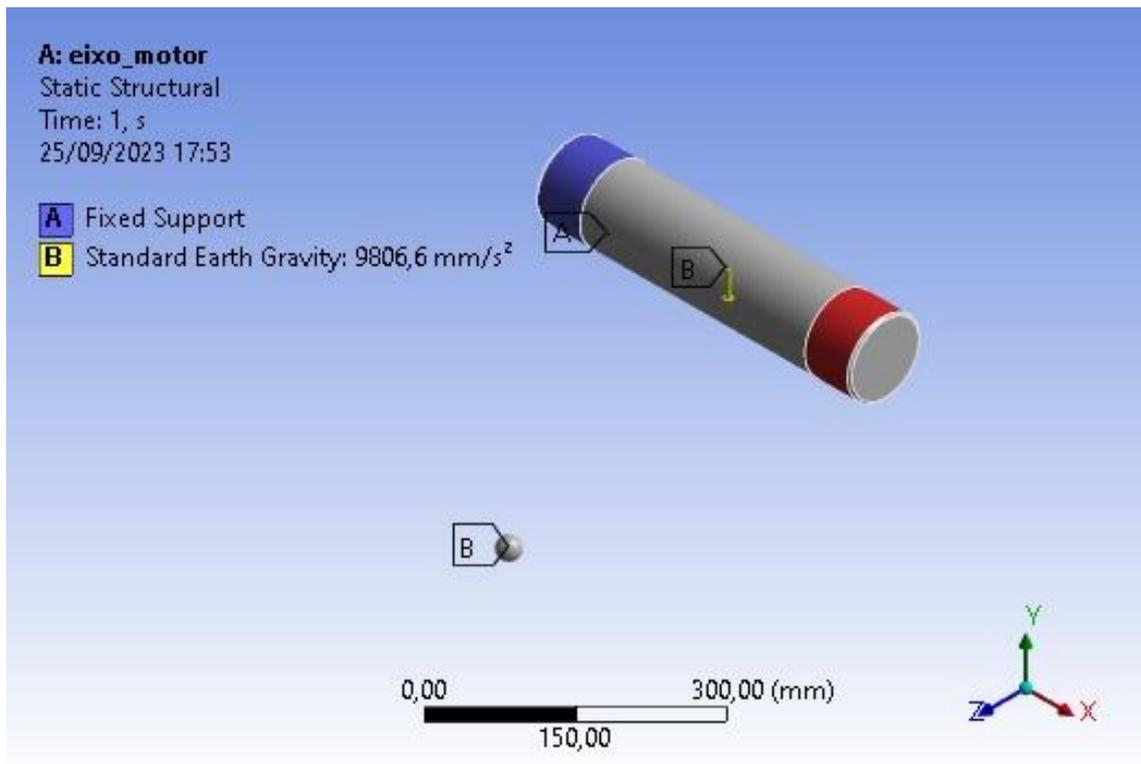
$$\sigma_{ft} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_f}{2}\right)^2 + \sigma_t^2} = \frac{16}{\pi\phi^3} \sqrt{M_f^2 + M_t^2} \rightarrow \phi_3 = \frac{16}{\pi\sigma_{ft}} \sqrt[3]{M_f^2 + M_t^2} \quad (4)$$

onde, ϕ é o diâmetro do eixo a ser calculado, σ_f corresponde a tensão admissível à flexão, M_f corresponde ao momento fletor, W_f corresponde ao momento de inércia para flexão, σ_t corresponde a tensão admissível à torção, M_t corresponde ao torque ou momento torsor, W_t corresponde ao momento de inércia para torção.

Para o cálculo, inicialmente foi adotado um aço comercial de baixo carbono, com base em suas tensões, obtivemos um diâmetro de aproximadamente 120 mm, devido as condições de montagem e respeitando as dimensões adotadas na estrutura fixada à tampa e também aos carros do equipamento, componentes estes associados ao eixo, foi necessário o estudo para redução deste diâmetro, analisando as equações foi possível concluir que a maneira de reduzir o diâmetro seria utilizando um material com maior resistência, para isso foi adotado o material aço AISI 4340, onde foi possível adotar um eixo com diâmetro de 100 mm, respeitando as condições de carga da operação.

Para a simulação computacional e validação do cálculo analítico, o modelo do eixo com diâmetro calculado, foram definidas as condições de contorno e carregamento conforme Figura 14. Considerando a região A, em azul no eixo, como suporte fixo, a região em vermelho foi o definido como o ponto de aplicação da flexo torção correspondendo a área de contato com a flange da estrutura, também foi inserido um ponto de massa na posição onde está localizado o centro de massa do conjunto da estrutura e tampa do forno mediante cenário crítico de rotação, a 90° em relação ao ponto inicial.

Figura 14. Condições de contorno adotadas no eixo.

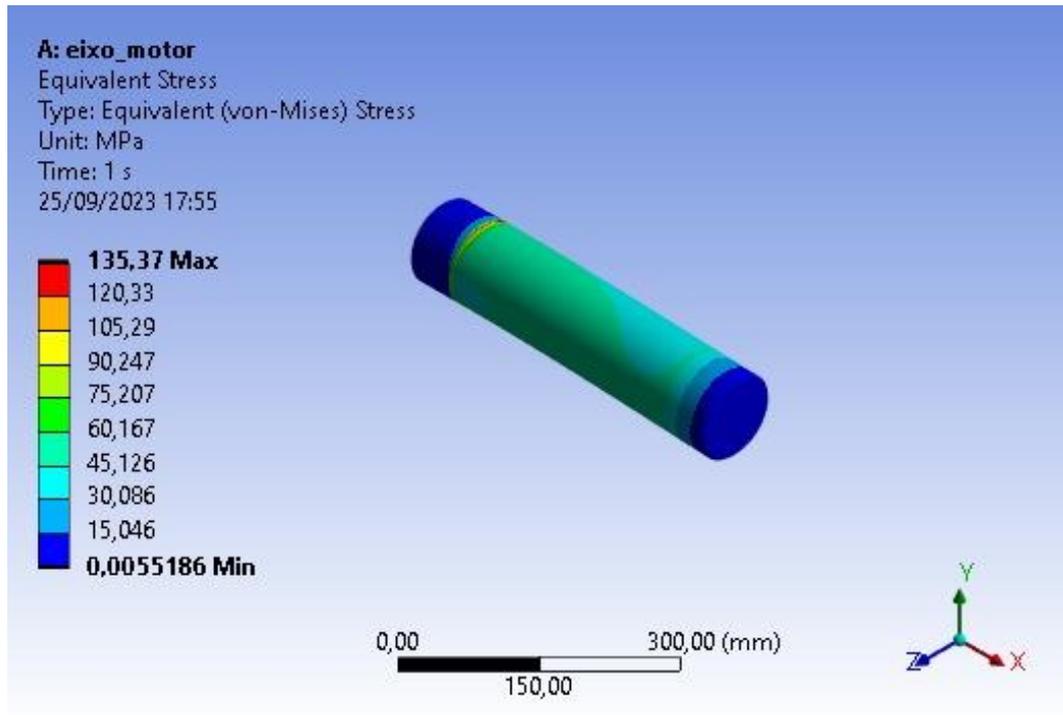


Fonte: Autor.

Como citado anteriormente, o material adotado para fabricação do eixo foi o aço de alta resistência AISI 4340, onde a tensão admissível (δ_{adm}) é de 350 MPa.

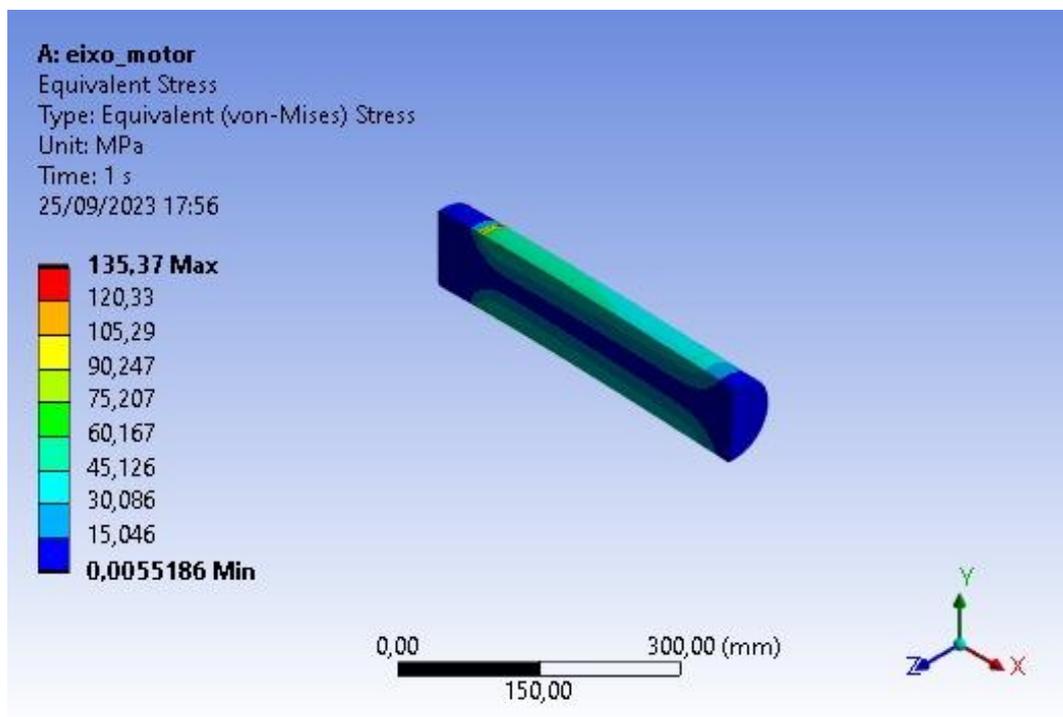
Após a simulação por elementos finitos a tensão máxima apresentada no eixo sujeito a flexo torção foi de 135 MPa (Figura 15), valor este que se encontra abaixo da tensão admissível para o material, e através do corte parcial (Figura 16). É possível visualizar a distribuição de tensões internas, no sentido radial do eixo.

Figura 15. Tensões resultantes no eixo.



Fonte: Autor.

Figura 16. Vista de corte tensões resultantes no eixo.

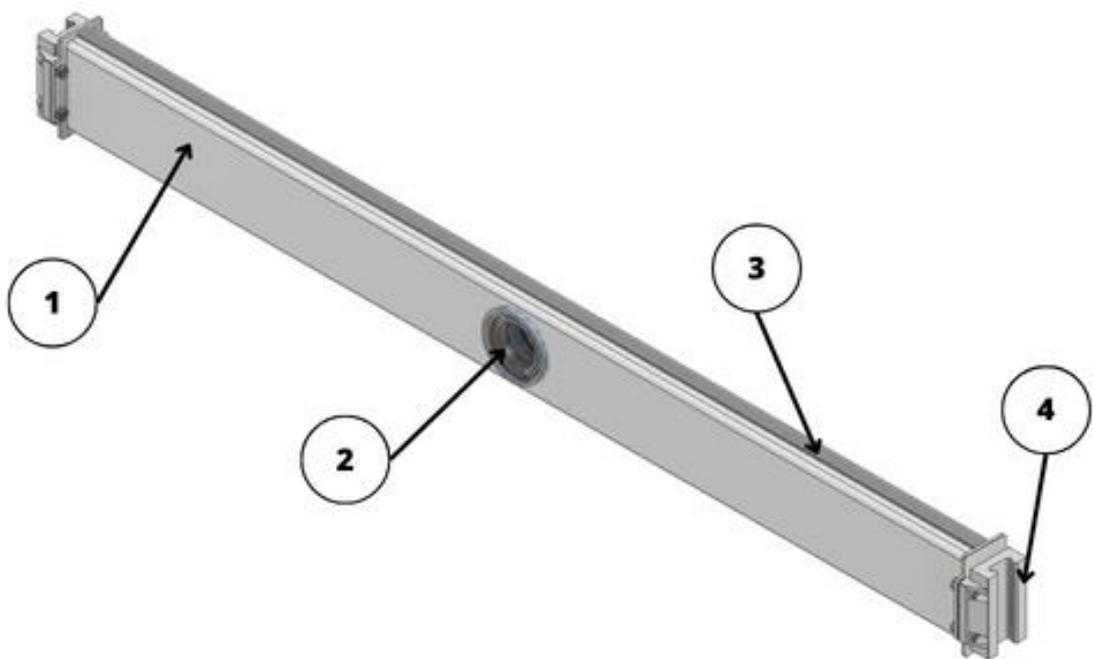


Fonte: Autor.

6.2 VIGAS DE SUSTENTAÇÃO

Este subconjunto foi projetado com intuito de possibilitar duas movimentações do equipamento e da tampa do forno, o primeiro movimento é a elevação da estrutura, esse subconjunto está acoplado ao sistema de elevação, o segundo movimento é de translação da tampa do forno, através dos carros que suportam a estrutura fixada à tampa, que deslizam sobre a viga de sustentação. Tudo isso de forma a garantir o posicionamento adequado da tampa do forno para uma região de trabalho, respeitando as limitações existentes no local.

Figura 17. Viga de sustentação. (1) Tubo retangular, (2) Bucha, (3) Trilho, (4) Patim.



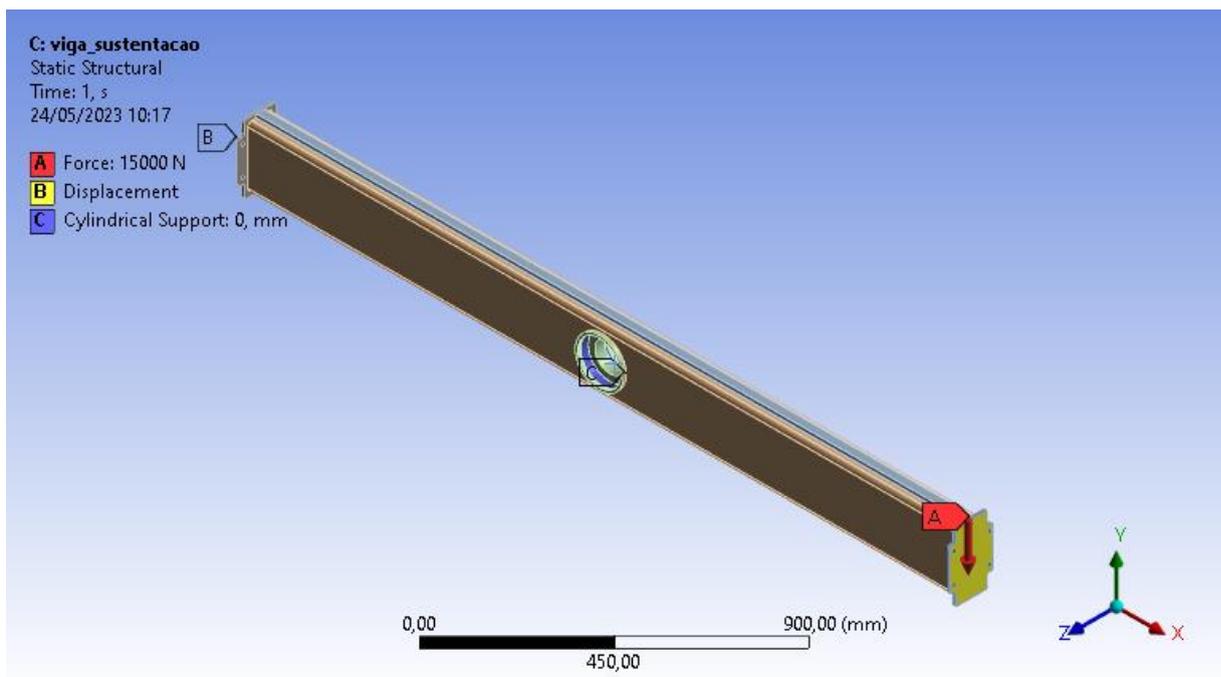
Fonte: Autor.

Desta forma os componentes que compõe o subconjunto da viga de sustentação, estão presentes na Figura 17, basicamente composto por um tubo retangular principal 80mmx200mm com espessura de 6,3mm (1), dimensionado através de estudo dos esforços envolvidos, tendo em vista uma menor deformação a flexão, e especificação de catálogo do fabricante, já no ponto (2) estão presentes a bucha e o conjunto de rolamento e anéis elásticos internos que estão acoplados ao sistema de elevação do equipamento, no ponto (3) está representado o trilho por onde os carrinhos iram deslizar e realizar a translação de todo o sistema incluindo a

tampa fixada, já no ponto (4) temos os patins que deslizam sobre a guia linear presente nas colunas de canto de forma a guiar o movimento de elevação, selecionados a partir do catálogo do fabricante KALATEC, com base nas dimensões e cargas atuantes no componente.

Para análise e validação do modelo apresentado, foram definidas as condições de contorno de forma crítica, Figura 18, adotando o carregamento total presente na extremidade da viga, ponto de maior braço de alavanca consequentemente maior flexão, a bucha considerada como suporte cilíndrico visto que o elevador funciona como um pino junto aos rolamentos presentes, eliminando o momento torsor na região, as duas faces onde estão presentes os patins foram consideradas como suporte deslizante no eixo y.

Figura 18. Condições de contorno da viga de sustentação.

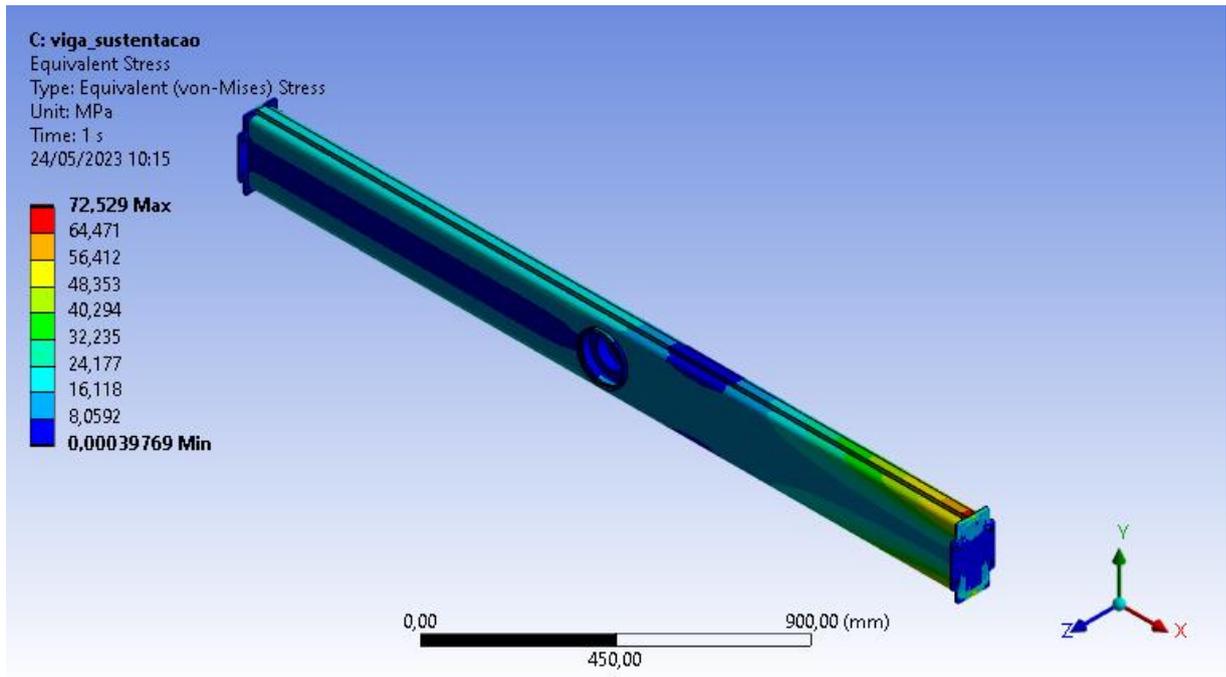


Fonte: Autor.

Os materiais adotados para fabricação da estrutura foram os aços estruturais AISI A500 (tubo) e A36 (chapas), onde a tensão admissível (δ_{adm}) é de 150 MPa.

Para tais condições de contorno e operação, foi obtido o resultado de tensão máxima no subconjunto da viga de aproximadamente 73 MPa, Figura 19, valor este que se encontra abaixo da tensão admissível para o material, validando o modelo e a montagem projetada.

Figura 19. Condições de contorno da viga de sustentação.

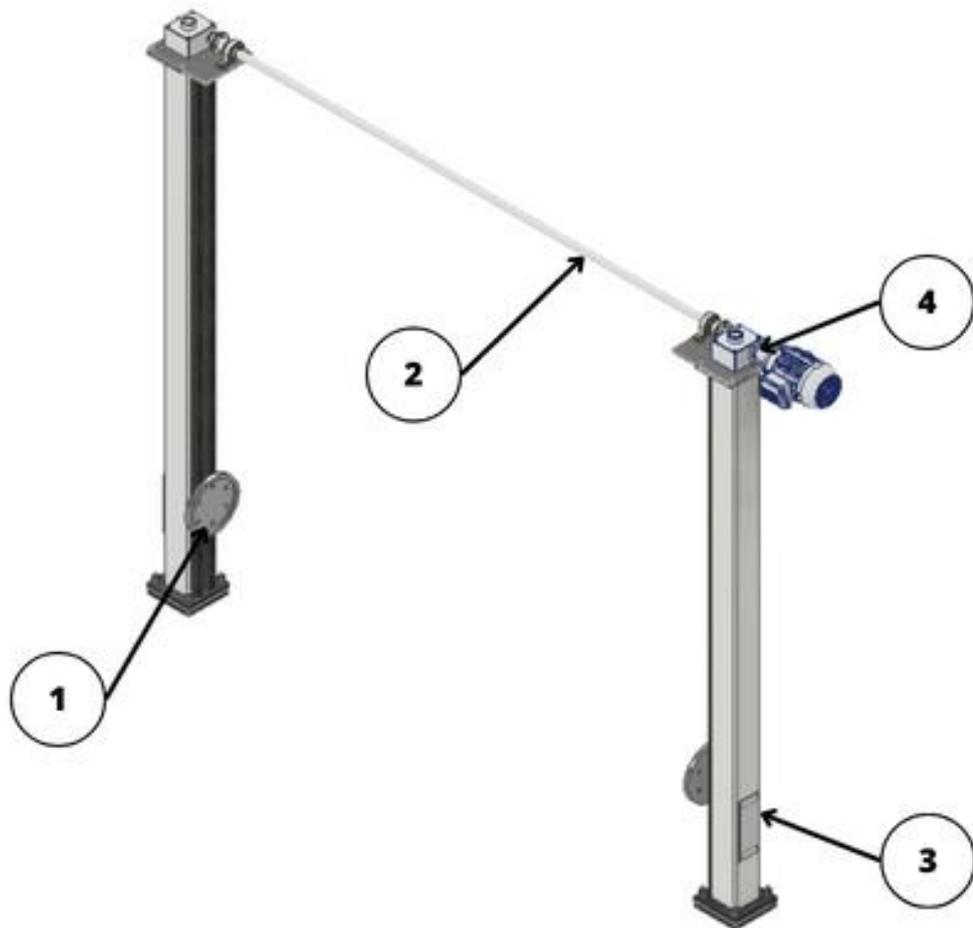


Fonte: Autor.

6.3 SISTEMA DE ELEVAÇÃO

Para o sistema de elevação, continuou seguindo a mesma ideia de utilização de tubos na fabricação dos elementos estruturais, porém o conjunto, dimensionamento do elevador e análise, foram realizados pela empresa IMETEX, com base nos dados de range de operação e carga de elevação, respeitando o pedido do cliente para utilização de apenas um motor para o sistema, desta forma se fez necessário a utilização de um eixo de transmissão para garantir o sincronismo entre as duas colunas do elevador. A modelagem e análise do componente da porca que está acoplado ao fuso do elevador foi realizada pelo autor.

Figura 20. Sistema de elevação do equipamento de retirada da tampa. (1) Porca, (2) eixo interligação, (3) coluna elevador, (4) conjunto macaco mecânico.

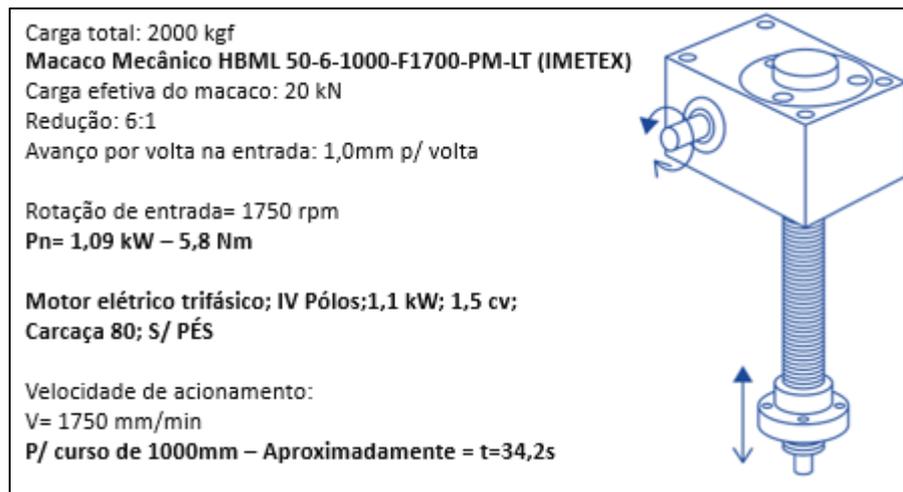


Fonte: Autor.

Conforme Figura 20, o item (1) corresponde a porca que está acoplada ao fuso do elevador mecânico, o item (2) corresponde ao eixo de transmissão do acionamento dos elevadores, de forma a garantir o sincronismo entre os dois fusos do sistema, no item (3) está representado o tubo quadrado estrutural responsável por envolver o sistema de elevação, vazado na face externa para permitir manutenção e montagem do sistema do elevador, o item (4) representa o macaco mecânico, o motor e o fuso, que correspondem ao elevador do sistema, solução proposta pela empresa citada anteriormente.

O mecanismo do elevador utilizado, item (4) da Figura 20, foi um macaco mecânico, projetado e dimensionado com auxílio da fabricante IMETEX, atendendo aos dados de operação do equipamento a ser desenvolvido. Dimensionamento básico segue conforme apresentado na Figura 21.

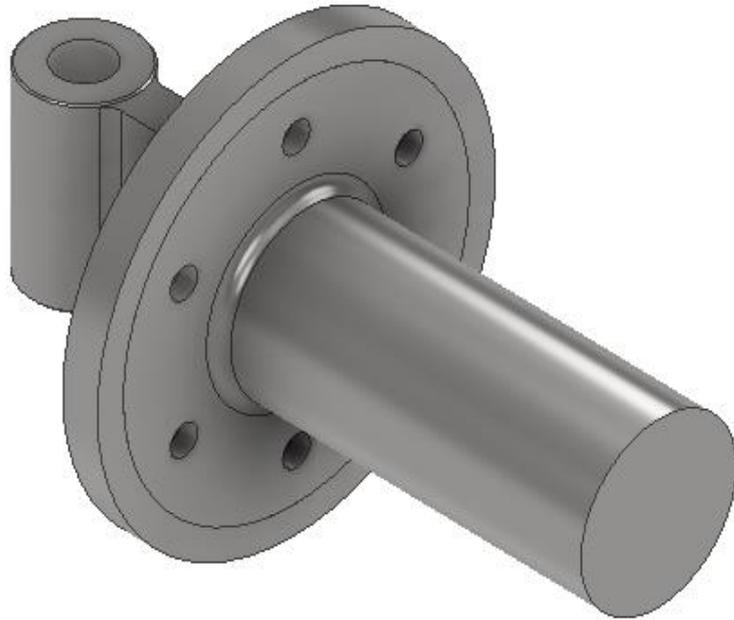
Figura 21. Dimensionamento do macaco mecânico elevador.



Fonte: Autor.

Inicialmente a solução para realizar a união do sistema de elevação com as vigas era rígida, ao decorrer do estudo e através de simulação foi possível observar que na proposta inicial haveria um pico de tensão elevado no componente de união, visto que o mesmo estaria submetido não somente a flexão como também a torção, e tal momento gerado na peça era suficientemente grande para invalidar esse tipo de montagem, a solução encontrada foi a utilização de uma barra redonda, com função de pino, junto a bucha e os rolamentos contidos na viga de sustentação, livrando assim o momento torsor gerado nesse componente. Tal componente foi modelado, conforme Figura 22.

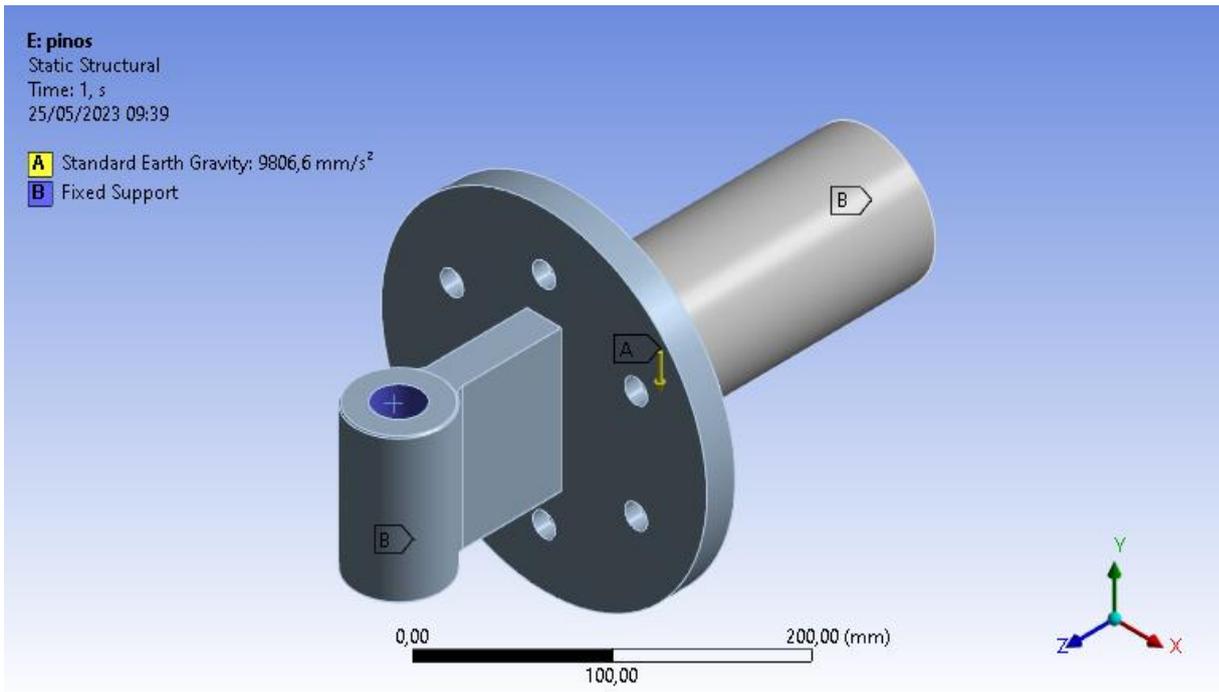
Figura 22. Pino e porca do sistema de elevação.



Fonte: Autor.

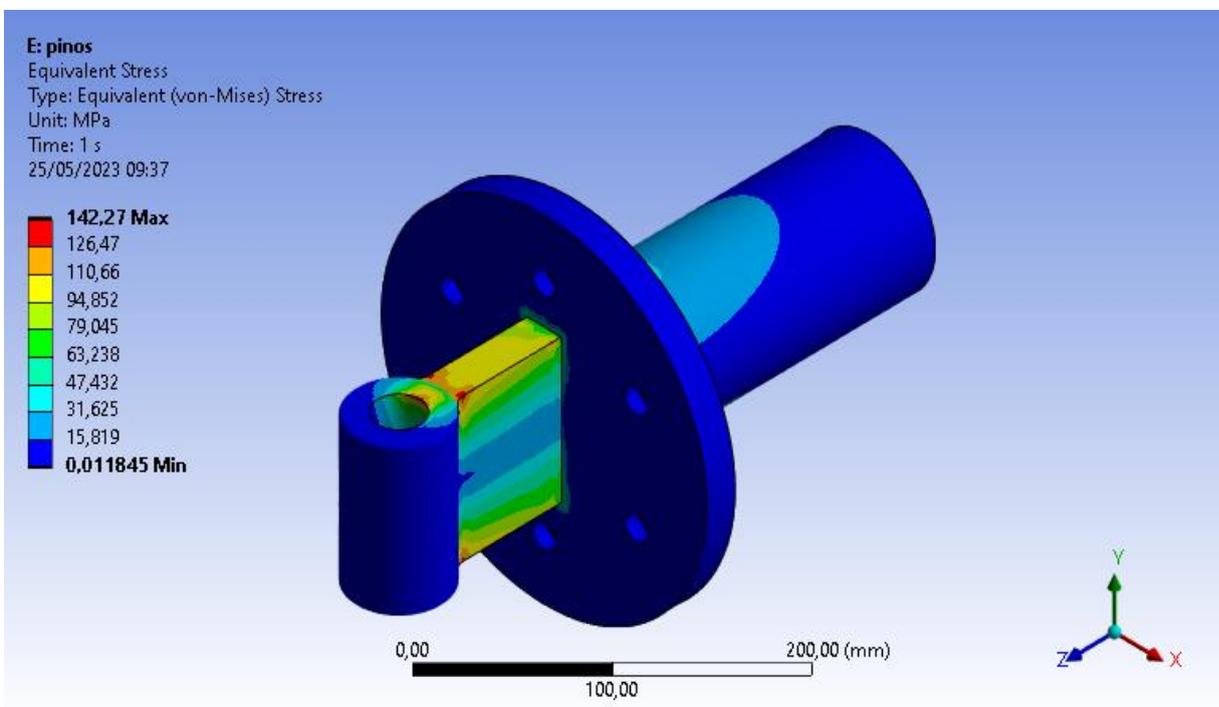
Para análise e estudo dos esforços envolvidos no componente, o modelo foi simplificado, porém com pouca perda de fidelidade, com isso foi realizada a simulação computacional, seguindo as condições de contorno apresentadas na Figura 23, onde temos um ponto de massa referente ao peso da estrutura a ser elevada aplicada na extremidade do pino, suporte fixado na face interna da porca em contato com eixo do sem-fim do elevador. As tensões resultadas da análise encontram-se abaixo da tensão admissível, conforme Figura 24.

Figura 23. Condições de contorno pino e porca do sistema de elevação.



Fonte: Autor.

Figura 24. Tensões resultantes no pino e porca do sistema de elevação.



Fonte: Autor.

6.4 CARRO AUXILIAR

A divisão de lados entre os dois carros para estudo e modelagem se fez necessário, visto que os esforços atuantes na estrutura são distintos, desta forma, o carro auxiliar foi projetado com a função de suportar o peso da estrutura fixada à tampa, e realizar o movimento de translação sobre as vigas de sustentação, abordadas anteriormente.

Mantendo o padrão de utilização de tubo retangular estrutural para os componentes, a modelagem do carro auxiliar contou com a utilização de tubo retangular 80mm x 200mm e espessura de 6,3mm.

Figura 25. Modelo do carro auxiliar.



Fonte: Autor.

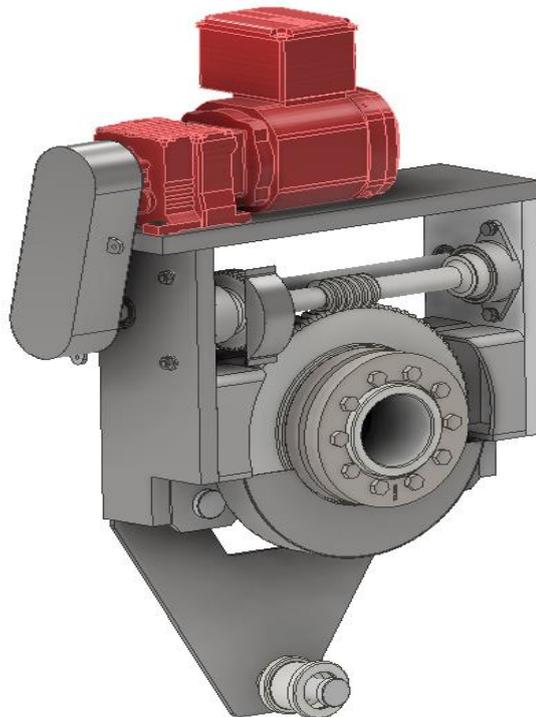
Conforme podemos observar na Figura 25, o carro auxiliar tem a função de receber o eixo principal apenas para suportar e guiar o equipamento no movimento de translação, utilizando os dois rodízios superiores, já o rodizio inferior tem a função de garantir que durante o movimento de giro da tampa, o carro não tenha a tendência de rotacionar em cima do trilho e tombar o conjunto, desta maneira o rodizio inferior é livre durante o movimento de translação e apenas imprime uma função de trava, entrando em contato com o trilho inferior da viga de sustentação,

durante o movimento de rotação do equipamento. Para o material dos rodízios foram utilizados metal de dureza elevada para evitar deformação devido ao peso da estrutura e o contato rodízio/trilho, os rolamentos nele utilizados são de rolos cilíndricos com alta capacidade de carga, outra possibilidade estudada seria a utilização de rolos de leva para fazer o movimento dos carros, ambos atendem as condições de operação exigidas.

6.5 CARRO PRINCIPAL

Para o subconjunto do carro principal, como dito anteriormente, foram necessários um dimensionamento detalhado e uma robustez superior, realizado com mais detalhes por Rocha (2023), visto que este grupo é responsável por alocar o mecanismo de giro e trem de engrenagens (Figura 26). Dividindo a modelagem e dimensionamento em duas etapas, a estrutura do carro e o sistema de giro contendo o motor e o trem de engrenagens responsável por realizar o giro do equipamento.

Figura 26. Modelo do carro principal.

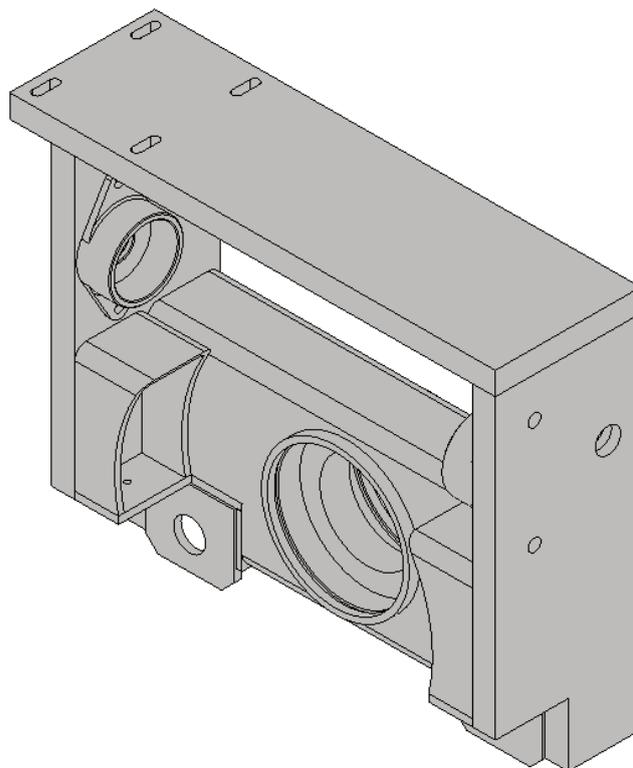


Fonte: Autor.

6.5.1 Estrutura do carro principal

Para modelagem e análise da estrutura do carro principal, foram consideradas as cargas envolvidas durante a operação de giro da tampa, visto que a estrutura suporta o mecanismo de giro, toda a carga procedente deste processo se reflete nos componentes a serem dimensionados. A Figura 27 traz o modelo simplificado da estrutura a ser validada.

Figura 27. Modelo do carro principal.

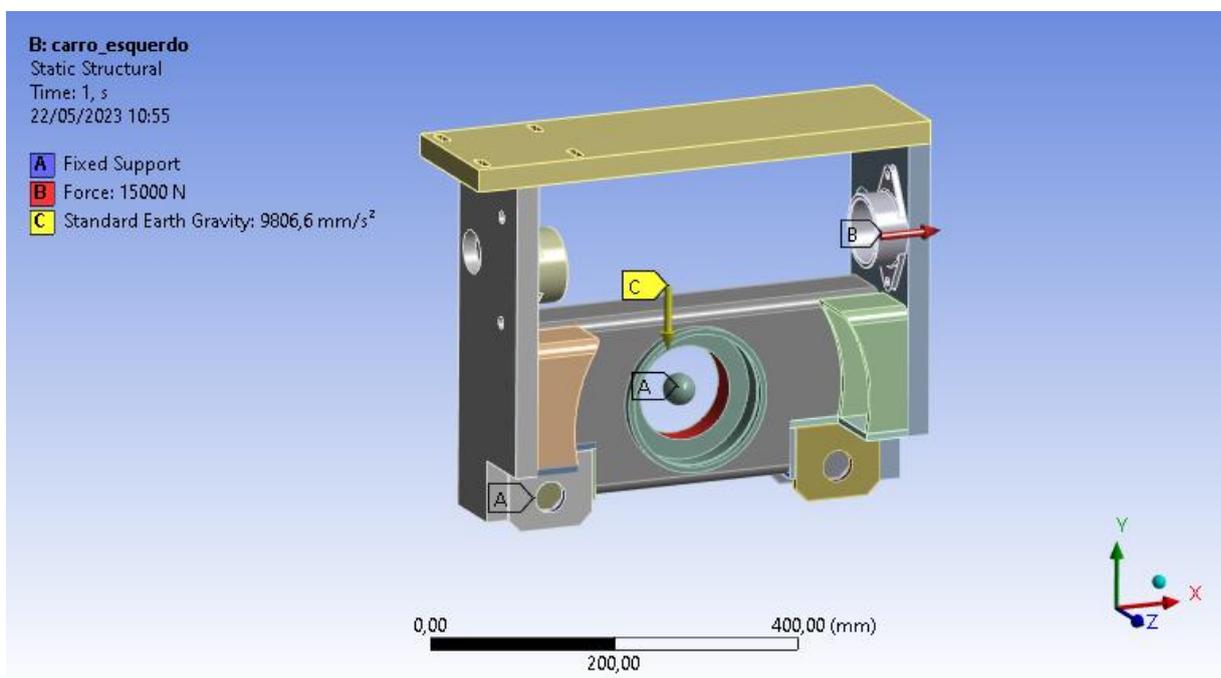


Fonte: Autor.

Seguindo a mesma premissa do carro principal, sua construção baseia-se em tubos retangulares 80mm x 200mm com espessura de 6.3mm, porém as chapas localizadas na região superior e laterais do carro, apresentam 1" de espessura, componentes estes que suportarão as forças de reação do trem de engrenagem durante o movimento, desta forma necessitaram de uma maior espessura para garantir a segurança e a integridade do conjunto. Além da bucha central com para acomodar os rolamentos e o eixo motor, assim como mancais axiais nas chapas laterais para garantir o giro e suportar o carregamento impresso pelo eixo sem-fim.

A validação do modelo gerado, foi realizada seguindo as condições de contorno apresentadas na Figura 28, onde foi fixada o eixo de giro dos rodízios para evitar a condição de deslizamento e analisar os esforços sobre a estrutura, a força de reação impressa pelo eixo do sem-fim, adotada no cenário de crítico, com a tampa parada a 90° da posição de origem, no sentido de giro anti-horário, além disso foi inserido um ponto de massa referente ao peso do subconjunto da estrutura fixada à tampa, bem como o peso da própria tampa a ser rotacionada.

Figura 28. Condições de contorno do carro principal.

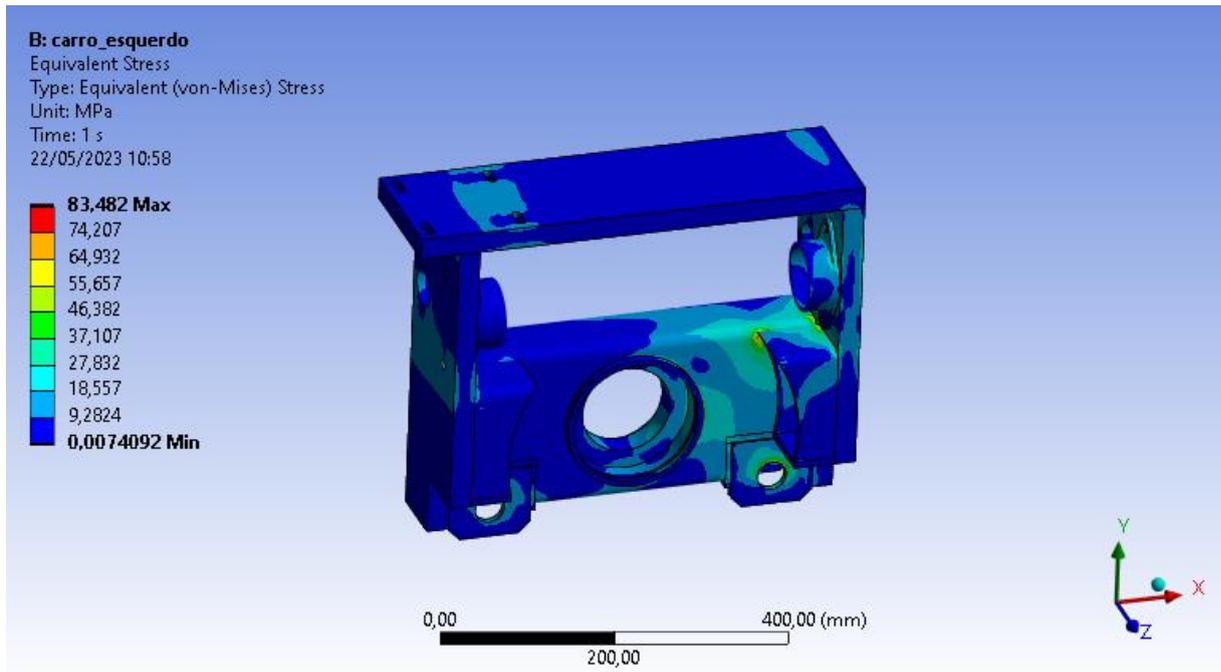


Fonte: Autor.

Os materiais adotados para fabricação da estrutura do carro principal foram os aços estruturais AISI A500 e A36, onde a tensão admissível (δ_{adm}) é de 150 MPa.

Após a análise, obtivemos as tensões resultantes atuantes na estrutura do carro principal, conforme mostra a Figura 29, onde temos uma tensão máxima de aproximadamente 84 MPa, na lateral que está recebendo as forças de reação e momentos do giro, pico localizado na região de mudança de geometria, na união entre os tubos, vale ressaltar que no local do pico não está sendo considerado o material do cordão de solda presente na região. O valor de tensão máxima não ultrapassou a tensão admissível do material, validando a modelagem apresentada.

Figura 29. Tensões resultantes na estrutura do carro principal.

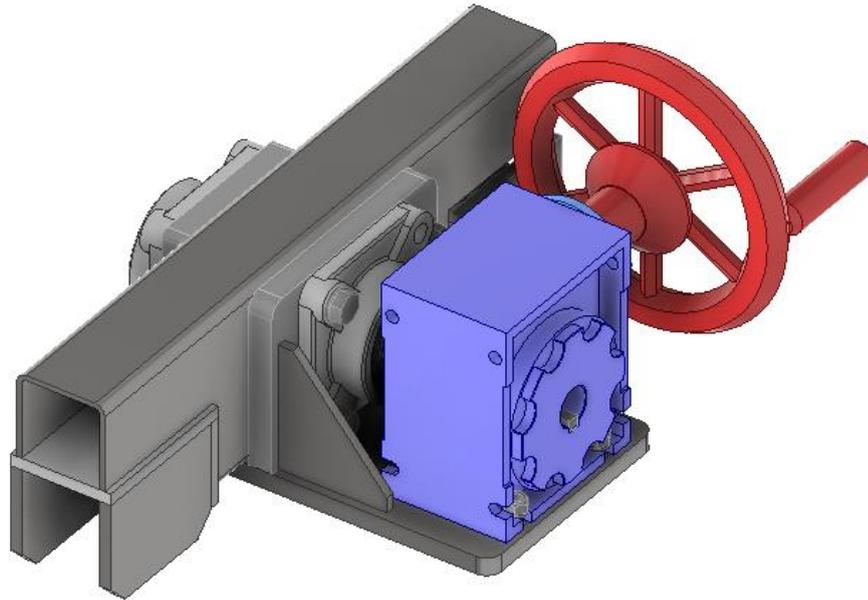


Fonte: Autor.

6.5.2 Mecanismo de rotação

Para tornar possível a operação de giro da tampa do forno, foi dimensionado um sistema de redução, com finalidade de reduzir o torque necessário para realizar a tarefa. Inicialmente no layout inicial, e no escopo inicial, tal movimento era realizado de forma manual, através de um redutor comercial e uma roda de mão, conforme Figura 30.

Figura 30. Layout inicial para sistema de giro carro principal.



Fonte: Autor.

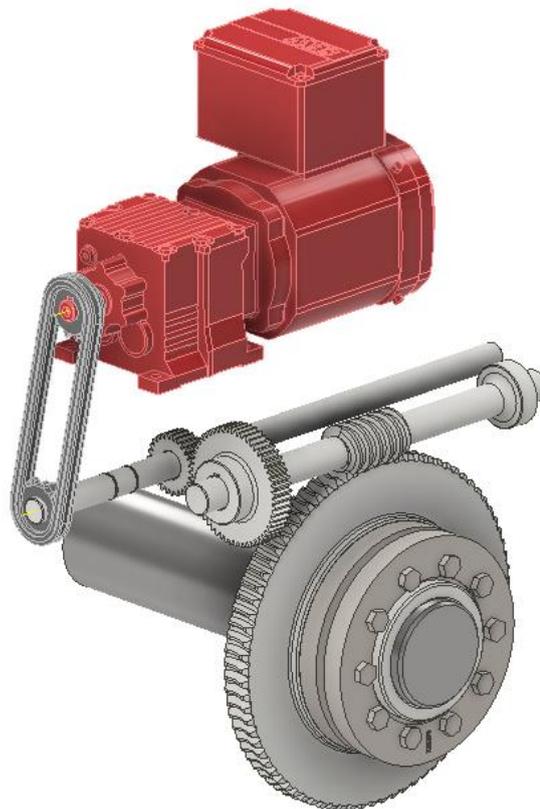
Ao estudar o torque necessário para realizar o giro da estrutura em conjunto com a tampa, vimos que era necessário a utilização de um trem de engrenagem, mais precisamente um redutor mecânico, para conseguir diminuir o torque necessária para o operador efetuar a atividade, que fosse viável ergonomicamente, Devido a limitação de espaço do local, e ser possível alocar o sistema junto a estrutura do carro, não foi encontrado um redutor comercial que atendesse ao torque exigido e as dimensões esperadas, desta forma foi desenvolvido um trem de engrenagem.

Primeiramente, devido a natureza da operação do giro da tampa, que ocorre em mais de uma etapa de rotação, foi selecionado um conjunto do tipo coroa e sem-fim, para garantir a segurança e o travamento do sistema, visto que este tipo de montagem não permite o retorno a posição inicial, a menos que seja acionado o sentido inverso de giro. Para a redução foi estabelecido o conjunto coroa sem fim com relação 1:80, em conjunto com uma redução de engrenagens de dente reto 1:2, de tal forma que obtemos uma redução de 1:160, com essa configuração, e uma roda de mão com raio de 0,5m, o operador teria que realizar aproximadamente 400 giros totais (360°) para rotacionar a tampa 180° para operação de manutenção ser realizada, e para retornar a posição inicial seriam mais 400 giros, com uma carga de

10kgf na roda de mão, tal operação é totalmente inviável para o operador realizar, e ergonomicamente condenada essa possibilidade, e ao tentar reduzir a força necessária para girar a roda, implica diretamente em aumentar o número de giros.

Para conseguir realizar o movimento utilizando o trem de engrenagem apresentado anteriormente, foi necessário implementar um motorreductor em conjunto ao sistema, conforme Figura 31, para garantir o torque necessário, com uma velocidade de rotação adequada, estipulando entre 4 a 5 minutos de operação para girar a tampa `180° de forma fracionada para manter a segurança da operação, analisando as interferências ao decorrer do movimento.

Figura 31. Layout inicial para sistema de giro carro principal.

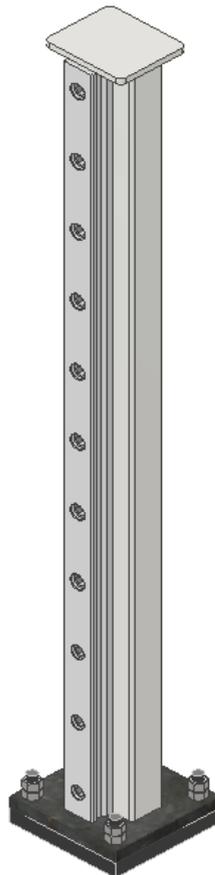


Fonte: Autor.

6.6 COLUNAS DE CANTO E SUPORTE DE FIXAÇÃO DO EQUIPAMENTO

O subconjunto das colunas de apoio e suporte, foram projetados com o mesmo conceito dos anteriores, mantendo a montagem com tubos retangulares, com a função de guiar a estrutura do equipamento no movimento de subida e descida da tampa. Desta forma, conforme a Figura 32, a coluna conta com o guia linear, que irá trabalhar em conjunto com os patins da guia, presentes no subconjunto das vigas de sustentação. Tanto a guia linear quanto os patins foram dimensionados para conseguir receber compressão referente ao movimento de giro da tampa e o momento criado nas vigas, de forma a não engripar durante o percurso.

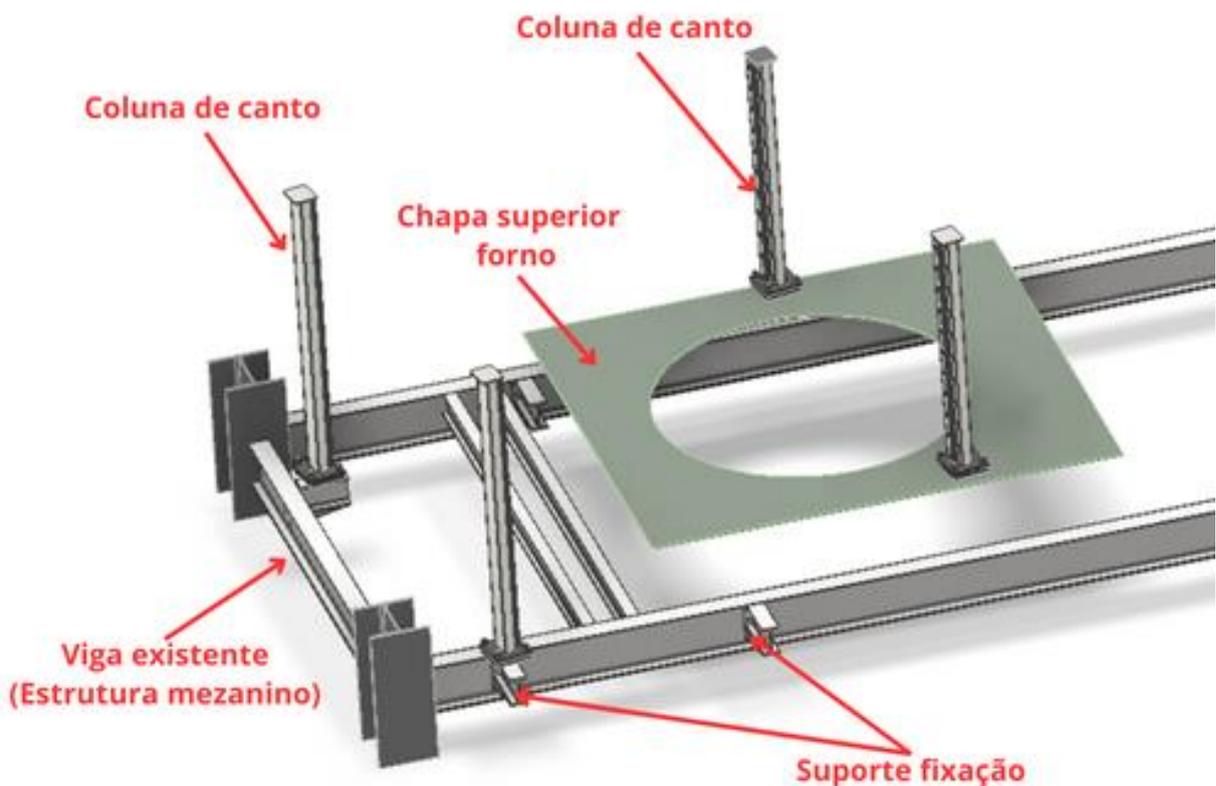
Figura 32. Coluna de apoio lateral do equipamento de retirada da tampa.



Fonte: Autor.

Para suporte das colunas de canto, assim como a coluna do elevador, tivemos que levar em consideração que todo o equipamento operará em um piso superior, mezanino, desta forma foi necessário estudar os pontos de ancoragem, ou pontos de suporte das colunas, através das vigas existentes no local, através da maquete 3D, foi possível definir os pontos de ancoragem, conforme Figura 33, tais pontos foram levantados segundo Rocha (2023).

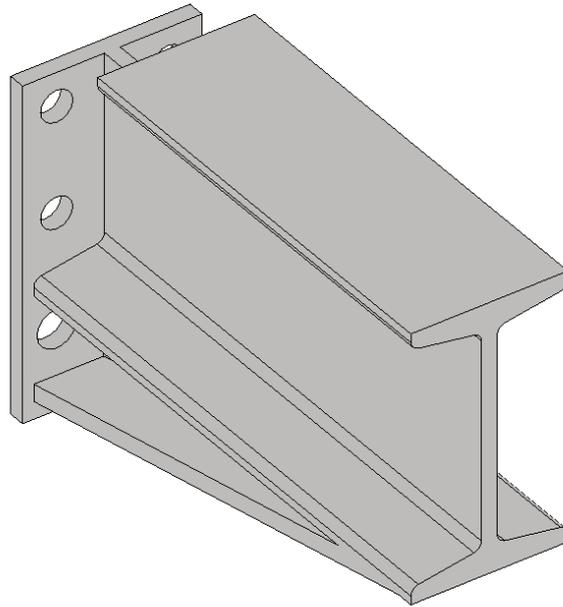
Figura 33. Pontos de ancoragem das colunas do equipamento de retirada da tampa.



Fonte: Autor.

Foi necessário dimensionar e modelar um suporte com perfil W e chapas de reforço para suportar o peso do equipamento em conjunto com o peso da tampa do forno, evitando flexão e garantindo a ancoragem do produto projetado. O modelo do suporte da Figura 34, passou por análise através de simulação computacional para validação dos esforços.

Figura 34. Modelo do suporte para ancoragem do equipamento

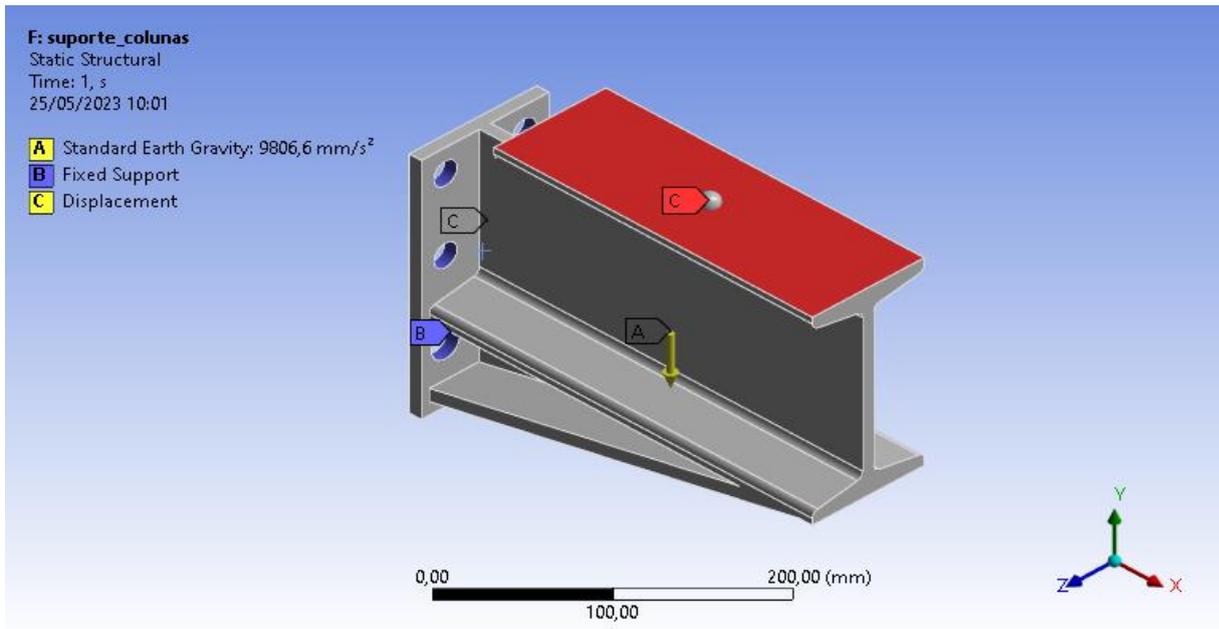


Fonte: Autor

Para isso foram utilizadas as seguintes condições de contorno, presentes na Figura 35.

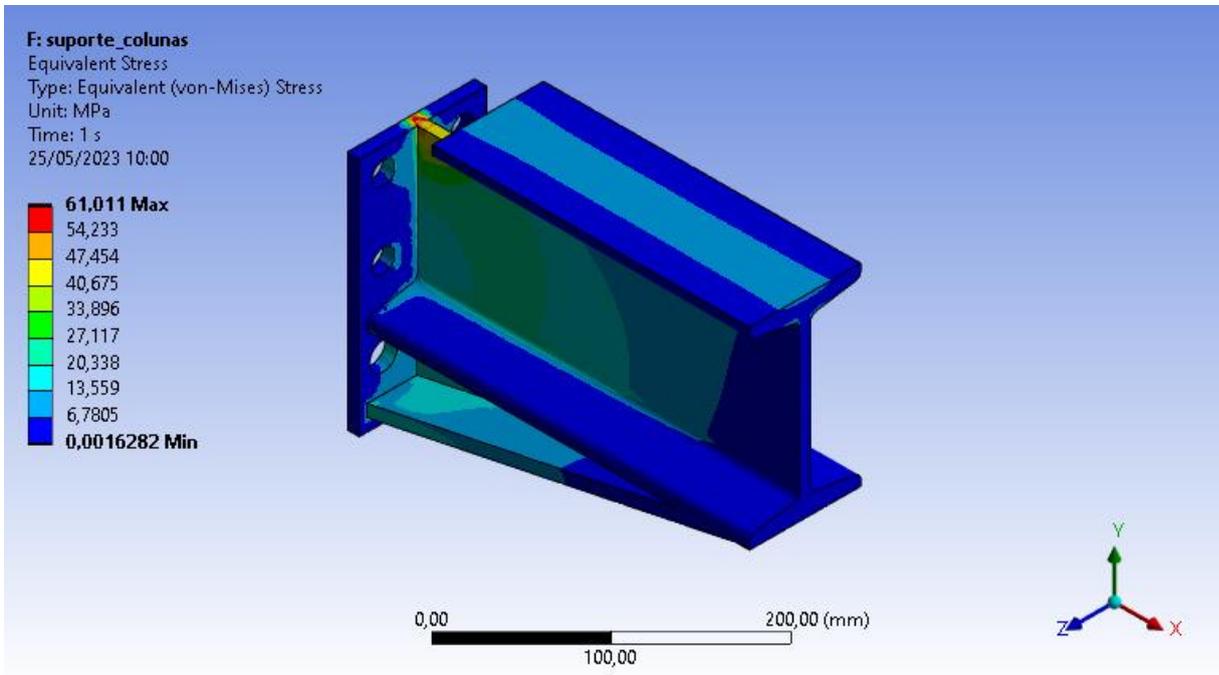
- Suporte fixo nas faces internas dos furos dos parafusos de fixação na viga (Ponto B – em azul);
- Restrição de deslocamento no eixo X, na face traseira do suporte, junto a alma da viga;
- Ponto de massa de 1.500 kg central na face superior do suporte (Ponto C - vermelho);
- Gravidade da Terra aplicada em -Y.

Figura 35. Condições de contorno adotadas no suporte



Fonte: Autor

Figura 36. Tensões resultantes no suporte



Fonte: Autor

O resultado de tensão máxima na estrutura, Figura 36, mostrou-se inferior a tensão admissível do material, validado o modelo apresentado.

7 PROJETO DETALHADO

Na etapa de projeto detalhado foram elaboradas todas as documentações técnicas referentes ao equipamento projetado, como finalização do escopo do projeto, tais documentações foram enviadas ao cliente solicitante. Entre os documentos gerados estão os desenhos dos conjuntos, desenhos de detalhamento das peças a serem usinadas, análise e memória de cálculo dos componentes envolvidos na montagem do equipamento. Por motivo de acordo de confiabilidade da empresa com o cliente, foi possível disponibilizar alguns arquivos, como desenhos de conjuntos, desenhos de detalhamento e exemplo de memória de cálculo que foram entregues, rasurando dados do cliente. Os documentos estão disponibilizados na seção de anexos deste trabalho.

7.1 DESENHOS CONJUNTOS

O equipamento de retirada da tampa foi dividido em seis subconjuntos, desta forma foram gerados sete desenhos de conjunto para este projeto. Define-se como conjunto o desenho que apresenta mais de uma peça projetada ou detalhada, e para padronização das abreviações e nomenclaturas internas da empresa, é utilizado o código C-XXX, referente ao número do documento entregue ao cliente.

- C-001 → CONJUNTO GERAL DO EQUIPAMENTO – Representando todo o equipamento projeto contendo todos os subconjuntos;
- C-002 → ESTRUTURA DE ELEVAÇÃO E ROTAÇÃO - Representando o subconjunto da estrutura fixada à tampa;
- C-003 → COLUNAS DE APOIO - Representando o subconjunto das colunas de apoio;
- C-004 → VIGAS DE SUSTENTAÇÃO – Representando o subconjunto das vigas de sustentação;
- C-005 → SISTEMA DE ELEVAÇÃO – Representando o subconjunto do sistema de elevação;
- C-006 → CARRO LADO DIREITO – Representando o subconjunto do carro auxiliar;
- C-007 → CARRO LADO ESQUERDO – Representando o subconjunto do carro principal.

7.2 DESENHOS DETALHAMENTO

Os desenhos de detalhamento contêm todas as cotas e especificações das peças a serem fabricadas, de maneira a garantir o bom funcionamento do equipamento. Segundo procedimento interno, peças soldadas correspondem a uma única peça, portanto são abordadas em um único desenho de detalhamento.

Foram entregues ao cliente, o total de quarenta e um desenhos de detalhamento, conforme Tabela 3.

Tabela 3. Lista de desenhos de detalhamento

CÓDIGO	TÍTULO
D-001	ESTRUTURA - DETALHES
D-002	PÉ DE FIXAÇÃO DA ESTRUTURA A TAMPA DO FORNO - DETALHES
D-003	INSERT FIXAÇÃO ESTRUTURA - DETALHES
D-004	COLUNA TIPO 1 - DETALHES
D-005	COLUNA TIPO 2 - DETALHES
D-006	CHAPA FIXAÇÃO COLUNAS - DETALHES
D-007	COLUNA ELEVADOR DIREITO - DETALHES
D-008	COLUNAS DO SISTEMA DE ELEVAÇÃO LADO ESQUERDO - DETALHES
D-009	PORCA DO ELEVADOR - DETALHES
D-010	EIXO RODÍZIO - DETALHES
D-011	FLANGE TRANSMISSÃO TIPO 1 - DETALHES
D-012	FLANGE TRANSMISSÃO TIPO 2 - DETALHES
D-013	EIXO TRANSMISSÃO - DETALHES
D-014	TUBO SUSTENTAÇÃO - DETALHES
D-015	PINO SUSTENTAÇÃO DIREITO DETALHES
D-016	PINO SUSTENTAÇÃO ESQUERDO - DETALHES
D-017	ESTRUTURA CARRO DIREITO - DETALHES
D-018	CHAPA FIXAÇÃO RODÍZIO INFERIOR - DETALHES
D-019	ESTRUTURA CARRO LADO ESQUERDO - DETALHES
D-020	COROA DO SEM-FIM - DETALHES
D-021	EIXO SEM FIM - DETALHES
D-022	ENGRENAGEM 54 DENTES - DETALHES
D-023	ENGRENAGEM 27 DENTES - DETALHES
D-024	EIXO ENGRENAGEM PINHÃO - DETALHES
D-025	PINHÃO ENGRENAGEM - DETALHES
D-026	PINHÃO MOTOR REDUTOR - DETALHES
D-027	MANCAL EIXO SEM FIM - DETALHES
D-029	RODÍZIO - DETALHES
D-030	CHAPA FECHAMENTO CARRO LADO ESQUERDO - DETALHES
D-031	CHAPA DE FECHAMENTO DA COROA DO SEM-FIM - DETALHES
D-032	CHAPA DE FECHAMENTO DO CARRO DO LADO ESQUERDO - DETALHES
D-033	SUPORTE EQUIPAMENTO - DETALHES
D-034	EIXO MOTOR - DETALHES
D-035	EIXO MOVIDO - DETALHES

CÓDIGO	TÍTULO
D-036	TRILHO TIPO 1 - DETALHES
D-037	TRILHO TIPO 2 - DETALHES
D-038	TAMPA COLUNA ELEVADOR - DETALHES
D-039	BASE SUPERIOR ELEV. DIREITO - DETALHES
D-040	BASE SUPERIOR ELEV. ESQUERDO - DETALHES
D-041	PROTEÇÃO CORRENTE - DETALHES

Fonte: Adaptada pelo autor

7.3 MEMÓRIA DE CÁLCULO

A memória de cálculo é um documento que descreve os cálculos e métodos utilizados para dimensionar os componentes ou estruturas mecânicas, conforme apresentado no tópico de projeto preliminar. Este documento contém dados a respeito das forças, tensões, deformações, fatores de segurança, seleção de materiais, e validação dos componentes com base em normas técnicas.

De forma geral essa documentação foi utilizada para comunicar informações técnicas, resultados de análises e detalhes de projeto para garantir que o cliente compreenda completamente o trabalho realizado e tenha a garantia de que o produto projetado atende aos requisitos de operação, de forma eficiente e segura, podendo assim prosseguir para a etapa de fabricação.

8 CONCLUSÃO

Em síntese, o presente trabalho conseguiu abordar, de forma prática, o desenvolvimento do projeto de um equipamento para a manipulação de uma tampa de forno industrial, um desafio relevante na engenharia mecânica. O projeto foi desenvolvido com o objetivo de melhorar a eficiência e a segurança dos processos industriais. Nele foram apresentados conceitos técnicos e fundamentos de projeto de produto, com base na literatura, de forma a garantir a segurança, a eficiência e principalmente solucionar a problemática que justificou o estudo.

Ao longo deste projeto, foram aplicados os princípios da engenharia mecânica, incluindo análise estrutural, modelagem de componentes e metodologia do projeto, para criar um dispositivo robusto e versátil. Além disso, levou-se em consideração os aspectos ergonômicos, buscando minimizar o esforço físico dos operadores e promover um ambiente de trabalho mais saudável.

O estudo de caso apresentado ilustra um problema real presente no cotidiano de trabalho de um engenheiro mecânico que atua na área de projetos, onde cada solução deve ser única, com base nas solicitações operacionais e escolhas do próprio cliente, e deve ser embasada em conhecimentos técnicos e na literatura que engloba o setor que é destinado.

Em conclusão, este projeto contribuiu significativamente para a resolução de um problema prático na indústria, demonstrando o valor da engenharia mecânica na melhoria dos processos industriais. Espera-se que este trabalho sirva como uma base sólida para futuras pesquisas e desenvolvimentos nesta área.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R.; DEWOLF, J. T.; MAZUREK, D. F., **Mecânica dos materiais**, 5. ed. Porto alegre: AMGH, 2011.

CALLISTER JR., W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2002.

HIBBELER, R. C., **Resistência dos materiais**, 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

MARTHA, L. F., **Método dos Elementos Finitos**. (Notas de Aula do Curso CIV-2118). ed. Rio de Janeiro: PUC-Rio, 1994.

NORTON, R. L., **Projeto De Máquinas: uma abordagem integrada**, 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

OWEN, S.J., **A survey of unstructured mesh generation technology**, in: Proc. 7th Internat. Meshing Roundtable, Dearborn, MI, USA, 1998.

PUCHI-CABRERA, E. S. et al., **High cycle fatigue behavior of 316L stainless steel**. International Journal of Fatigue, v. 30, p. 2140-2146, 2008.

ROCHA, J. V. B., **Projeto de um equipamento para manipulação de uma tampa de forno industrial: conjunto mecânico de rotação**. 2023. Bacharelado – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE - Brasil.

ROZENFELD, H.; FORCELLINI, F. A.; AMARAL, D. C.; TOLEDO, J. C.; SILVA, S. L.; ALLIPRANDINI, D. H.; SCALICE, R. K., **Gestão de desenvolvimento de produtos: Uma referência para a melhoria do processo**, 1. ed. São Paulo: Saraiva Uni, 2011.

SILVA, F. A.; CHAVES, C. A.; GUIDI, E. S., **Análise de falha por fadiga em eixo de**

transmissão utilizando o método dos elementos finitos. Exacta – EP, São Paulo, v. 14, n. 2, p. 207-219, 2016

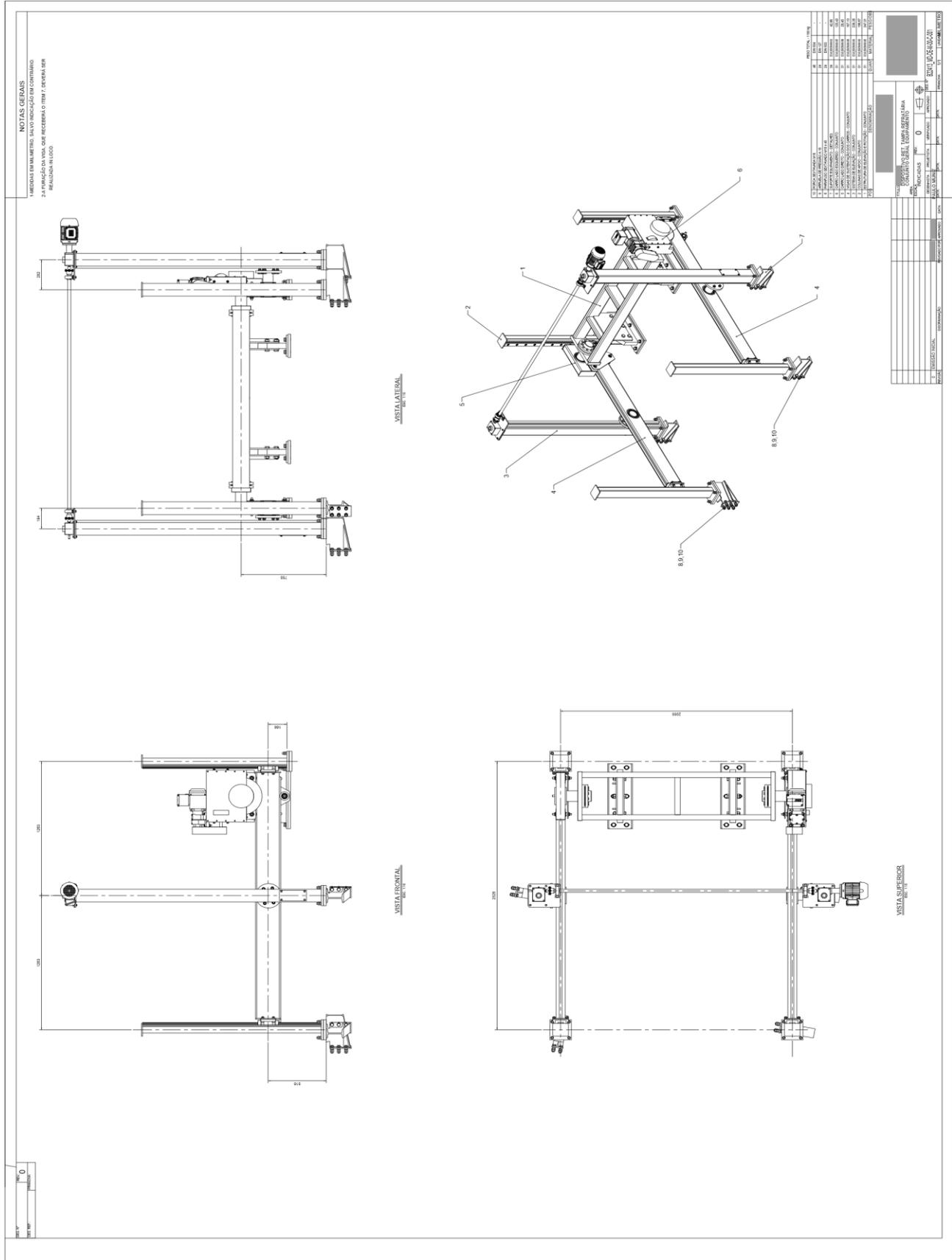
SKF. Catálogo caixas de mancal e unidades de rolamento SKF. Gotemburgo: Grupo SKF, 2019. Disponível em: https://www.skf.com/binaries/pub45/Images/0901d196809a75a3-Housings-catalogue---13186_1-PT_tcm_45-315185.pdf. Acesso em: 21 mar. 2023.

SKF. Catálogo rolamentos de esferas. Gotemburgo: Grupo SKF, 2015. Disponível em: <https://rolamentoscbf.com.br/catalogo/SKF-Catalogo-Geral-Rolamentos.pdf>. Acesso em: 21 mar. 2023.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G., **Projeto de engenharia mecânica**, 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

TRINKS, W.; MAWHINNEY, M. H.; SHANNON, R. A.; REED, R. J.; GARVEY, J. R., **Industrial Furnaces**. New York: John Wiley & Sons, 2003.

APÊNDICE A – DESENHO CONJUNTO GERAL



Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE C – DESENHO CONJUNTO CARRO AUXILIAR

