



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

José Vitor Bezerra da Rocha

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

Recife
2023

José Vitor Bezerra da Rocha

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

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.
Orientadora: Dr^a. Janaína Moreira de Meneses.

Recife
2023

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

Rocha, José Vitor Bezerra da .

Projeto de um equipamento para manipulação de uma tampa de forno industrial: conjunto mecânico de rotação / José Vitor Bezerra da Rocha. - Recife, 2023.

53 p.

Orientador(a): Janaína Moreira de Meneses

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

Inclui referências, apêndices.

1. Metodologia do projeto. 2. Projeto mecânico. 3. Rotação de carga. 4. Tampa refratária. I. Meneses, Janaína Moreira de. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

José Vitor Bezerra da Rocha

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

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, 18 de setembro de 2023.

Banca Examinadora:

Prof. Janaína Moreira de Meneses, Dr^a.
UFPE - DEMEC

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

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

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso apresenta o processo de desenvolvimento de um equipamento destinado à manutenção de uma tampa refratária de forno industrial com bastantes restrições de espaço. O projeto foi elaborado com o objetivo de facilitar as atividades de manutenção e respeitando as condições do cliente solicitante. A metodologia empregada pela empresa onde o projeto foi desenvolvido foi bastante semelhante ao que é encontrado na literatura, passando pelas fases de projeto informacional, projeto conceitual, projeto preliminar e por fim, projeto detalhado. Os resultados obtidos demonstraram que o equipamento desenvolvido é capaz de remover e posicionar a tampa respeitando as limitações de espaço do local do forno, vindo a proporcionar agilidade e rapidez no processo de manutenção do material refratário presente dentro da tampa. Este projeto demonstra de forma prática as etapas de metodologia do projeto para o desenvolvimento de equipamentos relacionados a engenharia mecânica e de como esta é capaz de trazer soluções inovadoras para problemas reais encontrados na indústria.

Palavras-chave: metodologia do projeto; projeto mecânico; rotação de carga; tampa refratária.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Visão geral do modelo adotado no livro de Rozenfeld	12
Figura 2 – Comparativo entre o critério de falha de Von-Mises e Tresca	13
Figura 3 – Exemplo de rolamento axial	14
Figura 4 – Exemplo de rolamento radial	14
Figura 5 – Exemplo de fixação utilizada no trabalho	16
Figura 6 – Resistência de parafusos a solicitações	16
Figura 7 – Exemplo de vista isométrica feita no AutoCAD	19
Figura 8 – Exemplo de representação técnica feita no AutoCAD	19
Figura 9 – Deformação de um cabo elástico apoiado nas extremidades	20
Figura 10 – Discretização do cabo	21
Figura 11 – Fluxograma da metodologia adotada	22
Figura 12 – Nuvem de pontos da região onde o equipamento será instalado	26
Figura 13 – Fotografia da parte superior do forno	26
Figura 14 – Detalhes da parte superior do forno	27
Figura 15 – Vista geral do local de instalação do equipamento	27
Figura 16 – Modelo base para construção do equipamento	28
Figura 17 – Equipamento idealizado	28
Figura 18 – Eixos de sustentação da tampa	29
Figura 19 – Condições de contorno para simulação do eixo principal	30
Figura 20 – Resultado das tensões resultantes no eixo principal	30
Figura 21 – Vista em corte do resultado das tensões resultantes no eixo principal	30
Figura 22 – Viga de sustentação/ elevação	31
Figura 23 – Condições de contorno para simulação do conjunto da viga	31
Figura 24 – Resultado das tensões resultantes no conjunto da viga	31
Figura 25 – Condições de contorno para simulação dos pinos das vigas	32
Figura 26 – Vista inferior das condições de contorno para simulação dos pinos das vigas	32
Figura 27 – Resultado das tensões resultantes nos pinos das vigas	32
Figura 28 – Vista em detalhe do resultado das tensões resultantes nos pinos das vigas	32
Figura 29 – Estrutura fixada a tampa do forno	33
Figura 30 – Condições de contorno da estrutura fixada a tampa do forno	34
Figura 31 – Resultado das tensões resultantes na estrutura fixada a tampa do forno	34
Figura 32 – Carro lado direito	35
Figura 33 – Carro Principal	36
Figura 34 – Mecanismo de giro da tampa	36
Figura 35 – Condições de contorno para simulação do carro lado esquerdo	37
Figura 36 – Resultado das tensões resultantes no carro lado esquerdo	37

Figura 37 – Coroa Sem Fim 80:1	38
Figura 38 – Engrenagens retas 1:2	38
Figura 39 – Conjunto do elevador	39
Figura 40 – Vigas estruturais para ancoragem do equipamento	40
Figura 41 – Ponto de ancoragem	40
Figura 42 – Posicionamento das ancoragens	40
Figura 43 – Vista dos pontos de ancoragem do equipamento	41
Figura 44 – Condições de contorno para simulação da ancoragem	41
Figura 45 – Resultado das tensões resultantes na ancoragem	41

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	OBJETIVOS	9
1.1.1	Objetivos Específicos	10
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1	METODOLOGIA DE PROJETO	11
2.2	MECÂNICA DOS MATERIAIS	12
2.2.1	Critério de Falhas para materiais dúcteis	12
2.2.1.1	<i>Critério da energia de distorção máxima</i>	13
2.3	ELEMENTOS DE MÁQUINAS	14
2.3.1	Mancais e Rolamentos	14
2.3.2	Elementos de Fixação	15
2.3.2.1	<i>Dimensionamento de Parafusos</i>	16
2.3.3	Sistemas de Transmissão	17
2.3.3.1	<i>Engrenagens</i>	17
2.4	RECURSO COMPUTACIONAIS	18
2.4.1	Método de Elementos Finitos - MEF	19
3	METODOLOGIA	22
3.1	PROPOSTA DO TRABALHO	23
3.1.1	Estudar as necessidades e dificuldades do cliente	23
3.1.2	Projeto Informacional e Conceitual	23
3.1.3	Projeto preliminar e detalhado	23
3.2	RECURSOS UTILIZADOS	24
4	PROJETO INFORMACIONAL E CONCEITUAL	25
4.1	ANÁLISE DO LOCAL DE INSTALAÇÃO	25
4.2	LAYOUT PRELIMINAR	26
5	PROJETO PRELIMINAR	29
5.1	EIXOS	29
5.2	VIGAS DE SUSTENTAÇÃO	31
5.3	ESTRUTURA FIXADA A TAMPA	33
5.4	ESTRUTURA DOS CARROS	35
5.4.1	Carro Secundário	35
5.4.2	Carro Principal	36
5.5	TREM DE ENGRENAGEM	38
5.6	ELEVADOR	39
5.7	PONTOS DE ANCORAGEM	40
6	PROJETO DETALHADO	42
6.1	DESENHOS DOS CONJUNTOS	42

6.2	DESENHOS DE DETALHAMENTOS	43
6.3	MEMORIAL DESCRITIVO	44
6.4	MEMÓRIA DE CÁLCULO DE COMPONENTES CRÍTICOS	44
7	CONCLUSÃO	45
	REFERÊNCIAS	46
	APÊNDICE A – Desenho de conjunto equipamento projetado	49
	APÊNDICE B – Desenho de conjunto do carro lado esquerdo	50
	APÊNDICE C – Desenho de detalhamento da estrutura fi- xada a tampa	51
	APÊNDICE D – Desenho de detalhamento do carro esquerdo	52

1 INTRODUÇÃO

Durante determinados períodos da história da indústria, a manutenção era vista como um fator gerador de custos desnecessários para as empresas. Porém, no cenário atual, a alta demanda e a exigência de padrões elevados de qualidade e de segurança, fazem com que a manutenção seja um fator indispensável e essencial para o correto funcionamento das linhas de produção (CERVEIRA; SELLITTO, 2015).

Tendo isso em vista, as empresas procuram estabelecer planos de manutenção para evitar paradas não programadas e reduzir custos e a necessidade de manutenções corretivas (LAMAS, 2021) que ocasionam interrupções na linha de produção além de riscos à segurança dos operadores. Nesse contexto, equipamentos como fornos industriais, exigem muita atenção. O problema é que em empresas que possuem esse tipo de equipamento em suas instalações, normalmente enfrentam dificuldades quanto vão executar serviços manutenção devido as altas temperaturas e cargas envolvidas (NOGUEIRA, 2016). O presente trabalho analisou a demanda de um cliente e traz solução para um problema dessa natureza que foi desenvolver um equipamento capaz de retirar e posicionar a tampa de um forno.

Sendo um diversos serviços de manutenção recomendados para fornos industriais, a inspeção e eventual substituição do material refratário presente em partes como a tampa do forno (TRINKS *et al.*, 2004), é um serviço que exige que a tampa seja retirada e posicionada de forma adequada e segura. Todavia, devido ao grande volume e peso dessa tampa, além de várias restrições de espaço onde o forno está inserido, tornam essa tarefa bastante complexa para o cliente solicitante do projeto. Desse modo, através da adoção de metodologias de desenvolvimento de produtos (ROZENFELD *et al.*, 2006), tem-se como objetivo analisar as dificuldades e restrições dessa operação de manutenção, onde é apontado quais foram as soluções técnicas de engenharia mecânica e como se deu o desenvolvimento de um equipamento para remoção e posicionamento de tampa refratária do forno industrial. O equipamento que desenvolvido viabiliza e facilita os serviços de manutenção preditiva e preventiva, que anteriormente era de difícil execução. Em consequência disso, o tempo de parada de operação do forno será reduzido assim como a quantidade de operários necessários que são alocados para realizar a remoção da tampa uma vez que, essa operação passará a ser realizada pelo equipamento projetado.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi o desenvolver um projeto de equipamento capaz de realizar a completa remoção da tampa refratária de um forno industrial, e posicioná-la de forma adequada e segura, de modo que os serviços de manutenção da mesma sejam possíveis.

1.1.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos foram:

1. Estudar as necessidades e dificuldades do atual procedimento de manutenção da tampa refratária;
2. Elencar as possibilidades de solução do problema através do desenvolvimento do projeto informacional;
3. Desenvolver o projeto conceitual para apresentação do equipamento proposto como solução para o problema;
4. Desenvolver o projeto detalhado do equipamento.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para o desenvolvimento do projeto apresentado neste trabalho, foram utilizados essencialmente os conhecimentos relacionados a mecânica dos materiais aplicados diretamente nos critérios de falha, em principal, no método da máxima energia de distorção (Von-Mises). Além disso, recursos computacionais foram bastante utilizados para o desenvolvimento e análise. Critérios para seleção para elementos de máquinas e metodologia de projetos também foram utilizados durante as etapas de desenvolvimento.

2.1 METODOLOGIA DE PROJETO

Como o objetivo principal deste trabalho consiste no projeto de um equipamento capaz de solucionar o problema de um cliente em específico, devemos seguir abordagens e metodologias já bem estabelecidas a fim de otimizarmos tempo e recursos. Nesse contexto, diversos autores e pesquisadores definem abordagens que devem ser seguidas e adaptadas para cada necessidade.

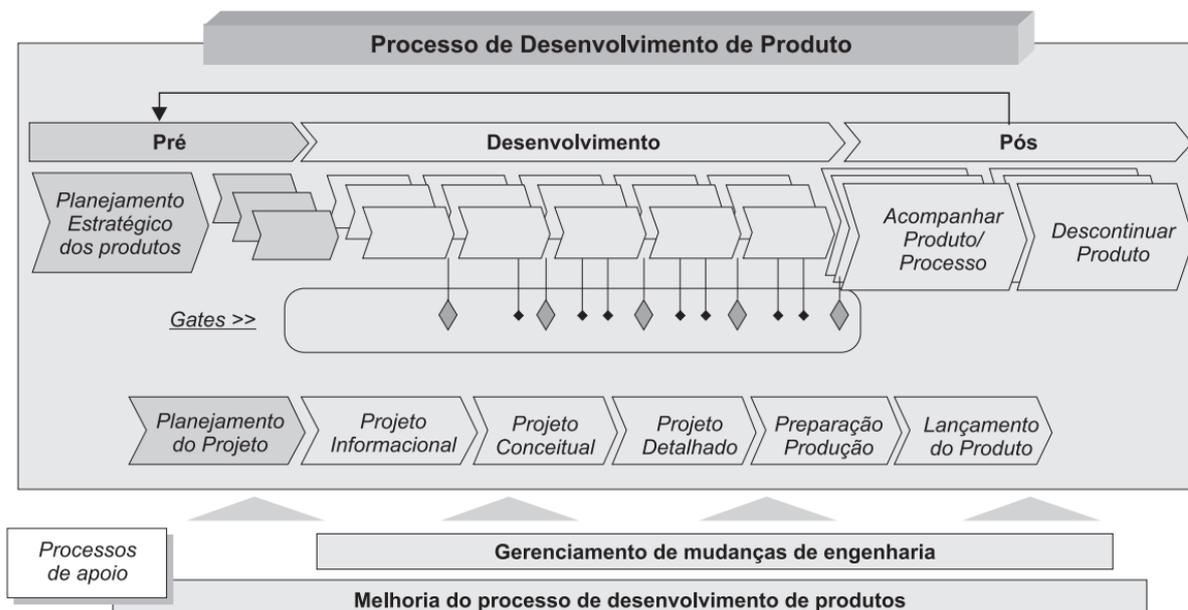
De acordo com Rozenfeld *et al.* (2006), uma das metodologias eficientes no desenvolvimento de produtos consistem em:

1. Definir o problema : através da identificação clara do problema a ser resolvido, é levantado informações sobre como o produto desenvolvido solucionará o problema;
2. Formular o problema: consiste na definição de objetivos e requisitos cujo o o qual o produto desenvolvido deverá atingir e atender;
3. Gerar alternativas: ideias e conceitos são levantados para solução do problema definido. Essas ideias e conceitos devem levar em consideração fatores técnicos e econômicos;
4. Analisar e selecionar: dentre as ideias e conceitos levantados, a melhor opção que consegue atender com todos os fatores elencados anteriormente, será a escolhida;
5. Detalhar: realizar o detalhamento da ideia/conceito que foi selecionada como sendo a melhor opção para resolução do problema. O detalhamento pode ser realizado através de relatórios, manuais, desenhos, modelos ou demais documentos que estabeleça as especificações técnicas do produto;
6. Implementar: através da construção e teste do produto desenvolvido, validar que a solução apontada realmente atende com os objetivos e requisitos definidos inicialmente.

Além dessas etapas que foram citadas, ao desenvolvermos produtos devemos levar em consideração diversos outros fatores como por exemplo, riscos, prazos, recursos, controle

de qualidade, monitoramento do progresso assim como a gestão das pessoas e equipes envolvidas.

Figura 1 – Visão geral do modelo adotado no livro de Rozenfeld



Fonte: Rozenfeld *et al.* (2006)

De modo geral, a essência de desenvolver um produto bem sucedido é entender plenamente as dificuldades e expectativas do consumidor ou cliente final. Através do pleno entendimento desses pontos, segue-se com: planejar, executar, monitorar e controlar, e por fim, finalizar fazendo com que o produto desenvolvido consiga acabar com as dificuldades e atender com as expectativas.

2.2 MECÂNICA DOS MATERIAIS

A mecânica dos materiais, ou mecânica dos sólidos, é a área da ciência que estuda as relações de cargas aplicadas a um corpo com as forças internas e deformações que nele são originadas. É de suma importância para o engenheiro conseguir assimilar essas relações de tensões e deformações para o correto dimensionamento de estruturas (HIBBELER, 2004).

Além disso, é necessário ter conhecimento dos principais critérios de falha de materiais, dúcteis ou frágeis, para termos uma aplicação prática dos conceitos estudados de mecânica dos materiais.

2.2.1 Critério de Falhas para materiais dúcteis

Os critérios de falha para materiais dúcteis levam em consideração a deformação plástica antes da ruptura do material. Os principais critérios utilizados são o critério de Von Mises e o critério de Tresca, que consideram a combinação das tensões atuantes no

material para determinar o seu estado de tensão e a possibilidade de falha. Esses critérios são aplicáveis a diversos tipos de materiais dúcteis, como metais, polímeros e ligas.

2.2.1.1 Critério da energia de distorção máxima

O critério da energia de distorção máxima, também conhecido como critério de Von Mises, em homenagem ao matemático alemão-americano Richard Von Mises (BEER *et al.*, 2011) é um critério de falha utilizado na mecânica dos sólidos para prever o ponto de ruptura de um material.

Esse critério estabelece que a falha ocorre quando a energia de distorção do material excede um valor crítico, que é determinado pela resistência à tração. A energia de distorção é uma medida da deformação elástica que ocorre em um material quando ele é submetido a um estado de tensão. A equação a seguir mostra como é calculado a energia de distorção equivalente no material em função das tensões máximas atuantes (σ_1, σ_2 e σ_3):

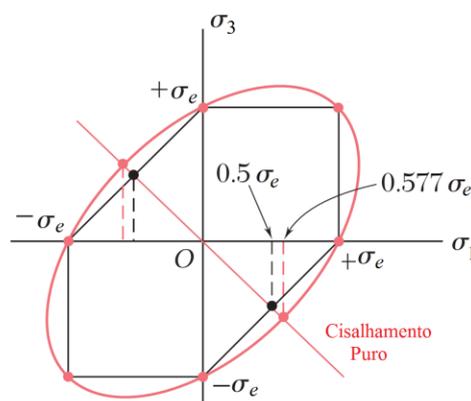
$$\sigma_{eq}^2 = \frac{(\sigma_2 - \sigma_1)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2}{2} \quad (1)$$

De acordo com o critério de Von Mises, a falha ocorre quando a energia de distorção por unidade de volume no material for maior do que a energia de distorção por unidade de volume necessária para provocar escoamento em um corpo de prova do mesmo material, em um ensaio de tração:

$$\sigma_{eq} \geq \sigma_{esc} \quad (2)$$

Esse critério é amplamente utilizado na engenharia, especialmente na análise de estruturas metálicas e outras aplicações que envolvem materiais com comportamento elástico-plástico. No entanto, deve-se notar que o critério de von Mises não é aplicável a materiais que apresentam um comportamento não linear ou não isotrópico (CURY, 2016).

Figura 2 – Comparativo entre o critério de falha de Von-Mises e Tresca



Fonte: Cury (2016)

Em comparação com o critério de falha de Tresca, podemos observar na Figura 2 que o critério de Von Mises é menos conservador (área delimitada pela elipse). Por outro lado, uma das razões pelo qual o critério de Von-Mises é amplamente utilizado é porque é um dos métodos que podem ser utilizados em simulações numéricas (MORALES, 2013). Essa técnica numérica é muito útil na simulação de sistemas complexos e análises estruturais. Os resultados obtidos através de análises em elementos finitos podem ser verificados com resultados experimentais, e o critério de Von-Mises tem sido eficaz nesse sentido. Portanto, por ser um método que pode ser facilmente aplicado em análises de elementos finitos, o critério de Von-Mises se tornou um método popular entre engenheiros e pesquisadores.

2.3 ELEMENTOS DE MÁQUINAS

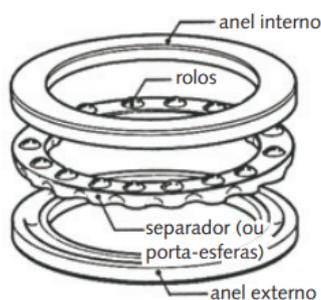
Diversos elementos de máquinas foram utilizados para compor o equipamento responsável por retirar e posicionar a tampa refratária do forno, fazendo-se necessário conhecimento prévio de alguns métodos de seleção e dimensionamento de tais elementos.

2.3.1 Mancais e Rolamentos

Mancais são elementos de máquinas que são responsáveis por suportarem cargas estáticas e/ou dinâmicas de outros elementos, na maioria dos casos, de eixos. As cargas aplicadas sobre os mancais são as radiais, axiais e combinadas. Para a determinação desses elementos, precisamos estudar a respeito dos tipos de rolamentos e suas respectivas características para que em função das cargas possamos determinar o tempo de vida útil desses elementos (NORTON, 2013). Dentre os vários tipos de rolamentos disponíveis, os utilizados foram:

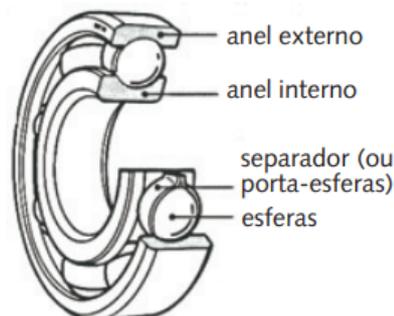
1. Rolamento axial : são rolamentos que possuem cargas predominantemente no sentido do eixo.
2. Rolamento radial: são rolamentos que possuem carga predominantemente no sentido radial, sendo a carga axial desprezível.

Figura 3 – Exemplo de rolamento axial



Fonte: Norton (2013)

Figura 4 – Exemplo de rolamento radial



Fonte: Norton (2013)

De modo geral, existem diversas equações e diversas variáveis para se determinar mancais e rolamentos. Muitas dessas variáveis foram estudadas e catalogadas por fabricantes que de modo geral, especificam a carga estática e dinâmica para o qual o rolamento irá resistir dentro de uma determinada faixa de vida útil (BUDYNAS; NISBETT, 2011).

Tabela 1 – Dimensões nominais de mancais de esferas de sulco profundo da série 02 com carreira única e mancais de contato angular

Orifício, mm	Diâmetro		Raio de filete, mm	Diâmetro de encosto, mm		Capacidade de carga, kN			
	externo, mm	Largura, mm		d_H	d_H	Sulco profundo		Contato angular	
						C_{10}	C_0	C_{10}	C_0
10	30	9	0,6	12,5	27	5,07	2,24	4,94	2,12
12	32	10	0,6	14,5	28	6,89	3,10	7,02	3,05
15	35	11	0,6	17,5	31	7,80	3,55	8,06	3,65
17	40	12	0,6	19,5	34	9,56	4,50	9,95	4,75
20	47	14	1,0	25	41	12,7	6,20	13,3	6,55
25	52	15	1,0	30	47	14,0	6,95	14,8	7,65
30	62	16	1,0	35	55	19,5	10,0	20,3	11,0
35	72	17	1,0	41	65	22,5	13,7	27,0	15,0
40	80	18	1,0	46	72	30,7	16,6	31,9	18,6
45	85	19	1,0	52	77	33,2	18,6	35,8	21,2
50	90	20	1,0	56	82	35,1	19,6	37,7	22,8
55	100	21	1,5	63	90	43,6	25,0	46,2	28,5
60	110	22	1,5	70	99	47,5	28,0	55,9	35,5
65	120	23	1,5	74,	109	55,9	34	63,7	41,5
70	125	24	1,5	79	114	61,8	37,5	68,9	45,5
75	130	25	1,5	86	119	66,3	40,5	71,5	49,0
80	140	26	2,0	93	127	70,2	45,0	80,6	55,0
85	150	28	2,0	99	136	83,2	53,0	90,4	63,0
90	160	30	2,0	104	146	95,6	62,0	106	73,5
95	170	32	2,0	110	156	108	69,5	121	85

Fonte: Budynas e Nisbett (2011)

2.3.2 Elementos de Fixação

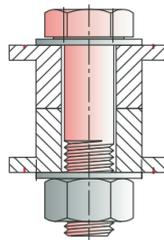
Parafusos e porcas são elementos de fixação mecânica que são amplamente utilizados em uma variedade de aplicações. Os parafusos são elementos cilíndricos que possuem uma rosca em sua superfície externa. As porcas, por sua vez, são elementos com formato hexagonal ou quadrado que possuem uma rosca interna compatível com a rosca do parafuso. Juntos, parafusos e porcas formam um sistema de fixação mecânica que pode ser facilmente montado e desmontado (SARDÁ, 2023).

Os parafusos são utilizados para unir duas ou mais peças, enquanto as porcas são utilizadas para fixar o parafuso em seu lugar e garantir que ele permaneça firmemente preso. Os parafusos e porcas podem ser fabricados a partir de diferentes materiais, como aço, aço inoxidável, latão, alumínio, entre outros.

Além dos parafusos e porcas comuns, existem diversos tipos de parafusos e porcas especiais, cada um com suas próprias características e aplicações. Alguns exemplos incluem os parafusos de cabeça sextavada, parafusos com cabeça cônica, parafusos de cabeça chata, porcas auto-blocantes, porcas com flange, entre outros.

Abaixo segue um exemplo de fixação que foi bastante utilizada durante o trabalho que consiste basicamente na fixação de duas ou mais peças através de um conjunto de fixação composto por 1 parafuso de cabeça sextavada, duas arruelas de pressão e uma porca sextavada:

Figura 5 – Exemplo de fixação utilizada no trabalho



Fonte: Norton (2013)

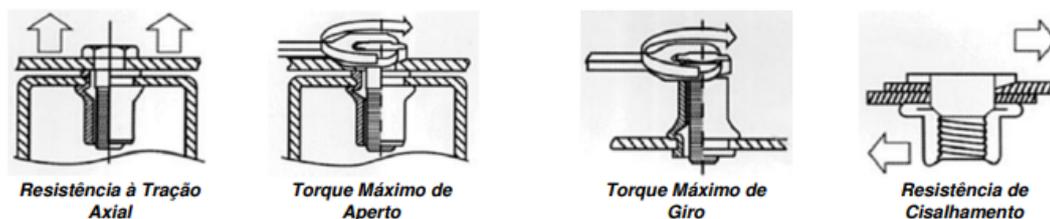
2.3.2.1 Dimensionamento de Parafusos

Em geral, o dimensionamento do parafuso envolve o cálculo da tensão de tração que ele será submetido e a seleção do diâmetro adequado para a rosca. A tensão de tração é calculada dividindo-se a força de tração F_t que o parafuso deve suportar pela área transversal do parafuso A .

$$\sigma_t = \frac{F_t}{A} \quad (3)$$

Análogo a Equação(3), a também existe uma equação para o cálculo da tensão de cisalhamento sofrida pelo parafuso que segue a mesma lógica. Além disso, é importante levar em consideração a resistência do material do parafuso, que pode ser avaliada por meio da tensão de escoamento ou do limite de resistência do material que normalmente é indicado através da classe dos parafuso.

Figura 6 – Resistência de parafusos a solicitações



Fonte: ORBrasil (2023)

Com base nos cálculos de tensão de tração e na resistência do material do parafuso, pode-se determinar o diâmetro adequado da rosca, bem como o comprimento do parafuso. O número de roscas e o passo da rosca também devem ser selecionados com cuidado para garantir uma fixação segura e confiável.

Vale lembrar que existem normas técnicas, como as da ABNT, que estabelecem critérios para o dimensionamento de parafusos em diversas aplicações. Por isso, é importante consultar essas normas e seguir as recomendações técnicas para garantir a qualidade e segurança da fixação mecânica.

2.3.3 Sistemas de Transmissão

Os sistemas de transmissão mecânica são compostos por um conjunto de elementos que permitem a transferência de energia mecânica de uma fonte para um ponto de aplicação. Esses sistemas são amplamente utilizados em diversas aplicações, como na indústria, na construção de máquinas e equipamentos, em veículos, entre outros.

Os principais elementos que compõem um sistema de transmissão mecânica são:

1. Fonte de energia mecânica: pode ser um motor elétrico, um motor a combustão, uma turbina, entre outros.
2. Eixo de transmissão: é o elemento que conecta a fonte de energia mecânica ao ponto de aplicação da energia.
3. Redutores de velocidade: são utilizados para diminuir a velocidade de rotação do eixo de transmissão, permitindo que a energia mecânica seja transferida com mais eficiência.
4. Acoplamentos: são utilizados para conectar dois eixos de transmissão, permitindo a transferência de energia mecânica entre eles.
5. Correias e polias: são utilizadas para transferir energia mecânica em sistemas de transmissão de movimento rotativo. As correias são elementos flexíveis que se movem ao longo das polias, transferindo energia entre elas.
6. Engrenagens: são utilizadas para transferir energia mecânica em sistemas de transmissão de movimento rotativo. As engrenagens são elementos rígidos que se conectam entre si, permitindo a transferência de energia entre elas.

Em geral, a escolha dos elementos de um sistema de transmissão mecânica dependerá das especificações do projeto e das condições de operação em que o sistema será utilizado. A seleção adequada de elementos pode garantir uma transmissão de energia mecânica eficiente e confiável.

2.3.3.1 Engrenagens

Existem vários tipos de engrenagens, sendo as engrenagens de dentes retos e a engrenagem coroa sem fim dois dos mais comuns.

As engrenagens de dentes retos são caracterizadas por possuírem dentes retos paralelos ao eixo de rotação. Elas transferem a energia entre eixos paralelos, permitindo a transmissão de torque e rotação. As engrenagens de dentes retos são amplamente utilizadas em aplicações de baixa a média velocidade, como em motores elétricos, caixas de câmbio de carros, entre outros.

A relação de torque transferida de uma engrenagem de módulo igual a m e de número de dentes igual a z_1 para uma engrenagem de mesmo módulo e com um número de dentes z_2 é dada da seguinte maneira:

- Determine o diâmetro primitivo das engrenagens: através da equação $D_p = m.z$, determinamos o diâmetro primitivo de cada uma das engrenagens;
- Determine a relação entre as engrenagens: a relação i entre as engrenagens é dada pela razão entre o diâmetro primitivo da engrenagem movida sobre a engrenagem motora, ou seja, para o exemplo dado em que as duas engrenagens têm o mesmo módulo:

$$i = \frac{D_{p2}}{D_{p1}} = \frac{m.z_2}{m.z_1}$$

- Calcule o momento de torque: tendo o resultado da relação entre as engrenagens, calculamos o torque na engrenagem de saída da seguinte maneira:

$$i = \frac{M_2}{M_1} \therefore M_2 = i.M_1$$

Daí podemos concluir que se a engrenagem movida tiver mais dentes do que a engrenagem motora, $z_1 < z_2$, temos uma relação de aumento de torque produzido uma vez que a relação entre engrenagens vai ser maior do que 1.

A engrenagem coroa sem fim é composta por uma roda dentada (a coroa) e um parafuso sem fim (Figura 37). A coroa possui dentes helicoidais que se engrenam com o parafuso sem fim. A transmissão de energia entre as engrenagens é feita de forma perpendicular, permitindo que ela seja utilizada para transferir energia entre eixos que estão em ângulos retos.

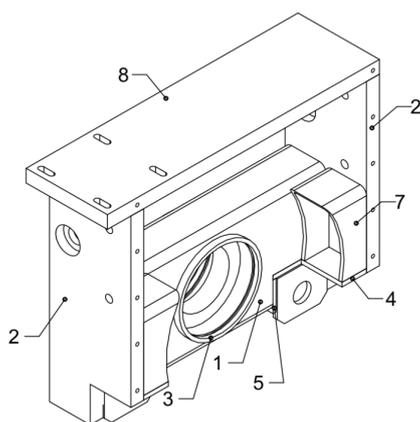
A engrenagem coroa sem fim é amplamente utilizada em aplicações de baixa velocidade, devido ao seu alto torque de saída e eficiência. Ela é muito comum em sistemas de elevação e em máquinas de construção, como guindastes e esteiras transportadoras. Além disso, a engrenagem coroa sem fim é muito utilizada em sistemas de segurança, devido à sua alta relação de transmissão e ao fato de que ela é classificada como um sistema irreversível. Isto nos diz que é possível movimentar o sem fim para movimentar a coroa, mas não é possível movimentar a coroa para movimentar o sem fim.

2.4 RECURSO COMPUTACIONAIS

Na atualidade, é indiscutível o papel dos recursos computacionais na elaboração de projetos de engenharia. Com o avanço da tecnologia, surgiram novas ferramentas que

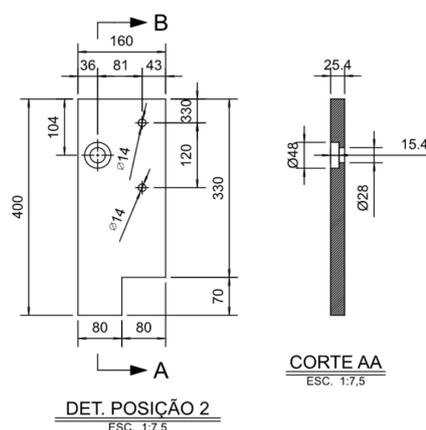
revolucionaram a forma como os projetos são desenvolvidos e otimizados (AMARAL; PINA FILHO, 2015). Entre essas ferramentas, destacam-se o CAD (*Computer Aided Design*) e o CAE (*Computer Aided Engineering*), que se tornaram indispensáveis no processo de criação e análise de projetos em diversas áreas da engenharia.

Figura 7 – Exemplo de vista isométrica feita no AutoCAD



Fonte: Autor

Figura 8 – Exemplo de representação técnica feita no AutoCAD



Fonte: Autor

O CAD permite que o projetista crie modelos tridimensionais de peças e sistemas, de forma rápida e precisa, permitindo a visualização detalhada do projeto antes mesmo da sua construção física. Já o CAE é utilizado para simular o comportamento dos sistemas, permitindo que sejam realizados testes virtuais para avaliar a performance e detectar possíveis problemas, antes mesmo da produção do protótipo físico.

2.4.1 Método de Elementos Finitos - MEF

Os elementos finitos são uma técnica utilizada na análise e resolução de problemas em engenharia e ciência aplicada. Essa técnica envolve a subdivisão de um objeto complexo de geometria complexa em um número finito de elementos menores, que podem ser facilmente analisados usando métodos matemáticos.

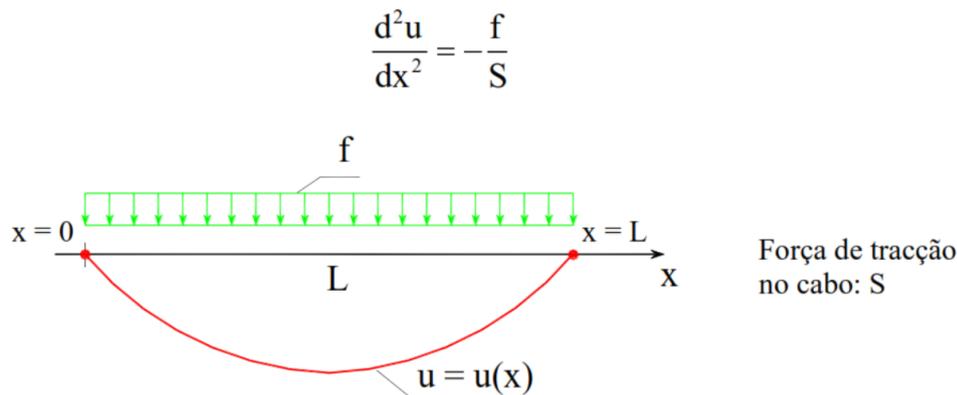
Atualmente, o Método dos Elementos Finitos - MEF, ou como é mais conhecido, *Finite Element Method* - FEM, apresenta um nível de desenvolvimento que permite sua utilização pela grande maioria de projetistas de estruturas (AZEVEDO, 2003). Além da área de mecânica estrutural, o método dos elementos finitos também é aplicado em áreas como mecânica dos fluidos, acústica, eletromagnetismo e transferência de calor.

Os princípios dos elementos finitos baseiam-se na discretização de um domínio em pequenos elementos e na solução de um sistema de equações que descreve o comportamento do sistema como um todo. Em outras palavras, podemos definir o MEF como sendo um método numérico para resolução de equações diferenciais por meio da divisão da estrutura

em um número discreto de elementos finitos ligados por pontos nodais, formando, desse modo, a malha de elementos finitos (SILVA, 2015).

Para exemplificar a abordagem matemática do MEF, um exemplo bastante útil é o da deformação em um cabo elástico que é submetido a uma força de tração S e a ação de uma carga uniformemente distribuída f conforme a figura a seguir:

Figura 9 – Deformação de um cabo elástico apoiado nas extremidades



Fonte: Silva (2015)

Verifica-se que a função $u = u(x)$ descreve o deslocamento vertical para cada ponto x do cabo e tem-se uma curvatura constante e proporcional ao valor da carga f e inversamente proporcional à força de tração S .

Isso corresponde ao seguinte problema de condições de contorno:

$$\begin{cases} S \frac{d^2u}{dx^2} + f = & , 0 \leq x \leq L \\ u(0) = u(L) = 0 \end{cases}$$

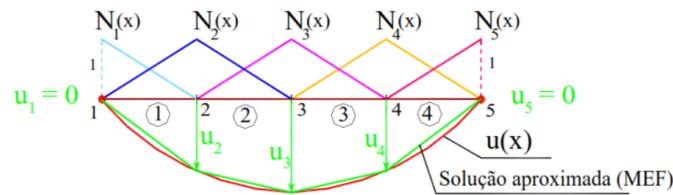
Para resolução numérica de uma equação diferencial é considerado a discretização do domínio ($[0, L]$) em vários subdomínios ou elementos finitos, ligados por pontos nodais como mostra a figura a seguir:

Portanto, dessa maneira é possível determinar os deslocamentos $u = u(x)$ no pontos nodais, fazendo com que passemos a ter um sistema de equações algébricas em que as incógnitas correspondem aos valores dos deslocamentos nos pontos nodais. Em outras palavras, o MEF consiste em admitir que a solução $u(x)$ pode ser aproximada através de combinação linear de funções simples $N_i = N_i(x)$, definidas, por traços lineares. Para cada ponto nodal i define-se uma função $N_i(x)$ que assume valor unitário nesse ponto nodal e valores nulos nos restantes (SILVA, 2015).

Na prática, em softwares CAE, conseguimos implementar o MEF executando a seguinte sequência de procedimentos:

1. Modelo: é preciso ter um modelo 3D do elemento que iremos analisar. Esse modelo é construído em qualquer software CAD 3D. No trabalho em questão, foi utilizado os software da Autodesk, o Inventor;

Figura 10 – Discretização do cabo



$$\mathbf{u}(x) = N_1 \mathbf{u}_1 + N_2 \mathbf{u}_2 + N_3 \mathbf{u}_3 + N_4 \mathbf{u}_4 + N_5 \mathbf{u}_5$$

$$\mathbf{u}(x) = \begin{bmatrix} N_1(x) & N_2(x) & N_3(x) & N_4(x) & N_5(x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{u}_2 \\ \mathbf{u}_3 \\ \mathbf{u}_4 \\ \mathbf{u}_5 \end{bmatrix} \quad \mathbf{u}(x) = \underline{\mathbf{N}} \underline{\mathbf{u}}$$

Fonte: Silva (2015)

2. Otimização do modelo: sempre que possível, analisar e simplificar o modelo 3D para que a análise pelo método de elementos finitos seja otimizada. Geometrias muito complexas tendem a exigir mais recursos computacionais para que seja possível realizar as análises;
3. Malha: uma malha é gerada dividindo o modelo 3D em diversos elementos finitos. Diversos critérios de malha são levados em consideração, como por exemplo, tamanho dos elementos e regularidade dos nós que unem os elementos.
4. Condições de contorno: todas condições de contorno do modelo são definidas. Pontos de fixação, forças, pressões, gravidade, etc.

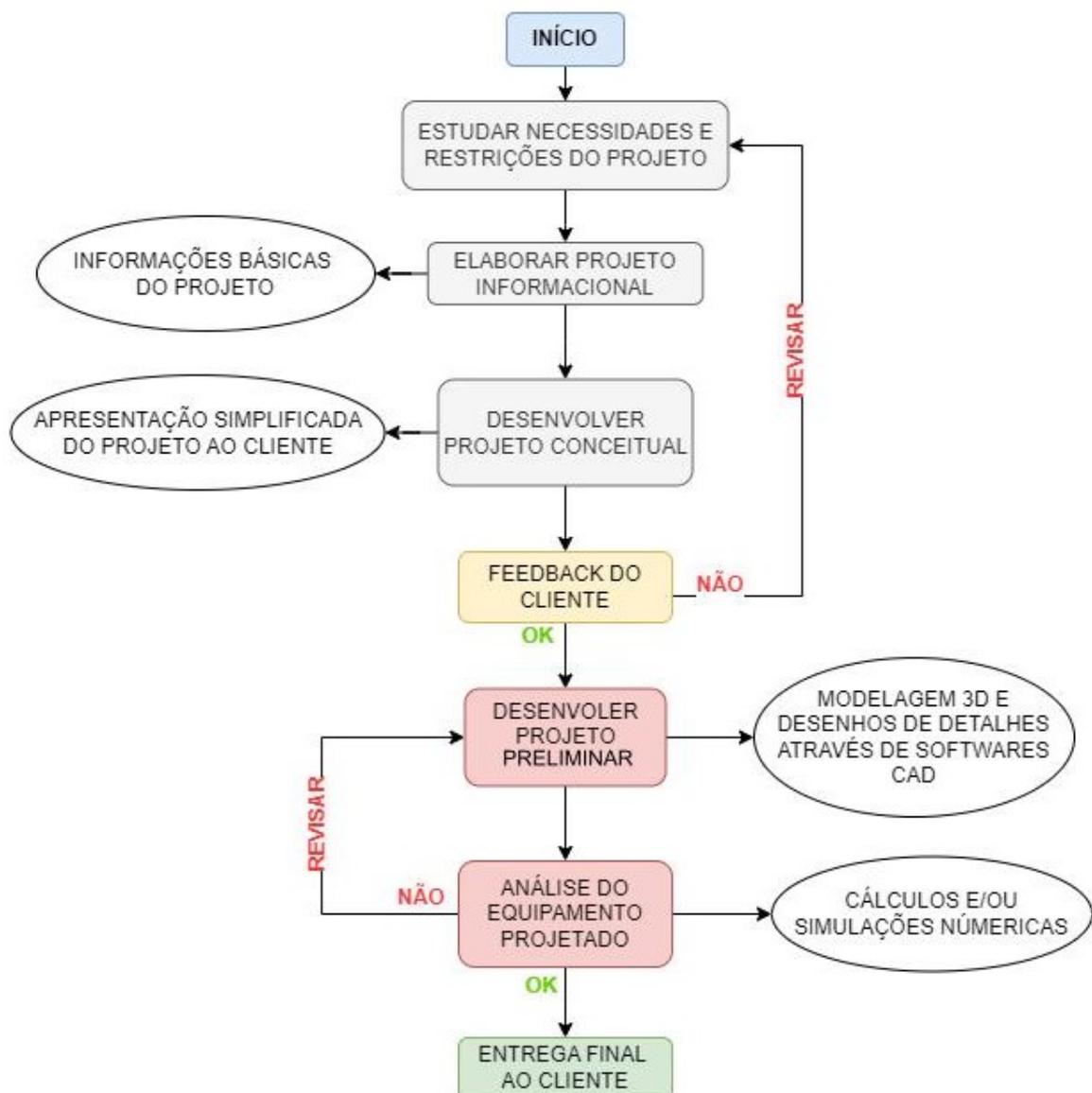
Como resultado da análise, os softwares CAE conseguem nos fornecer através do método dos elementos finitos tensões, deformações, deslocamentos e diversas outras informações.

3 METODOLOGIA

Esse trabalho trata-se essencialmente de um estudo de caso que foi encontrado pelo autor durante o período de estágio em uma empresa de consultoria de projetos mecânicos. A identidade das empresas envolvidas e outras informações de caráter comercial serão preservadas por questões de direitos autorais.

A pesquisa realizada é classificada como sendo uma pesquisa aplicada, uma vez que tem como objetivo principal apontar uma solução para o problema encontrado no estudo de caso. A finalidade é descritiva e os objetivos são classificados como qualitativos e quantitativos. A abordagem será bibliográfica e experimental e quanto ao método científico, será o hipotético-dedutivo.

Figura 11 – Fluxograma da metodologia adotada



Fonte: Autor

3.1 PROPOSTA DO TRABALHO

A proposta principal do trabalho consiste na solução do problema encontrado no estudo de caso da tampa refratária de um forno industrial. Através do estudo de movimento e cargas envolvidas para que seja realizado serviços de manutenção, analisamos alternativas de soluções teóricas e comerciais. Alguns detalhes, como por exemplo, as especificações elétricas e automação dos motores utilizados não foram parte de estudo uma vez que esses pontos não fizeram parte do escopo do projeto que foi executado.

Além disso, é importante ressaltar da participação de outros projetista. As etapas de projeto informacional e projeto conceitual foram desenvolvidas previamente por um projetista antigo da empresa. Já o projeto preliminar e detalhado, que é o objetivo principal desse trabalho, em específico os que diz a respeito da rotação da tampa são apresentados neste trabalho, tendo demais informações e detalhes presentes no trabalho de Muniz (2023).

3.1.1 Estudar as necessidades e dificuldades do cliente

Através dos dados fornecidos pelo cliente solicitante do projeto: nuvem de pontos 3D e modelo CAD do forno em questão; foi estabelecidos os requisitos e restrições cujo os quais o projeto será submetido, tendo em vista que o objetivo principal é a elaboração de um equipamento responsável por remover e posicionar a tampa do forno de modo que seja possível realizar os serviços de manutenção de maneira eficiente e segura. Essa etapa do projeto foi executada por um projetista da empresa.

3.1.2 Projeto Informacional e Conceitual

Estabelecido as necessidades e restrições do projeto, foi elencado possíveis soluções do problema enfrentado pelo cliente. Após escolhida uma alternativa de solução para o problema de retirada e rotação da tampa, foi determinado a geometria básica da estrutura e realizado estudos de movimento para verificar interferências. Definido essas questões, o projeto conceitual foi apresentado ao cliente através de uma apresentação simples, e após aprovação, o projeto seguiu para a etapa de detalhamento. Essas etapas são ilustradas em cinza no fluxograma do projeto (Figura 11).

3.1.3 Projeto preliminar e detalhado

Após a aprovação do projeto informacional e conceitual pelo cliente solicitante, as geometrias esboçada anteriormente foram refinadas, modeladas em 3D, montadas e validadas para que por fim os desenhos fossem gerados com o auxílio de *softwares* CAD. Além disso também foi realizado os devidos cálculos de dimensionamento de componentes a serem fabricados e consultado catálogo de fabricantes dos demais elementos. Por fim, todos os desenhos de detalhamento foram elaborados pra compor o projeto detalhado que veio a ser entregue ao cliente após uma revisão final. Essas etapas são ilustradas

em vermelho no fluxograma do projeto e em verde (Figura 11), entrega final ao cliente (projeto detalhado).

3.2 RECURSOS UTILIZADOS

Os recursos utilizados para o desenvolvimento desse trabalho consiste em basicamente alguns *softwares* desenvolvidos pela *Autodesk*, sendo eles:

1. *Autodesk Inventor*: utilizado para modelagem e montagem dos componentes projetados. Além disso, certos recursos de design e simulação por elementos finitos também foram utilizados;
2. *Autodesk AutoCAD*: utilizado para confecção dos desenhos de detalhamento das peças modeladas. Apesar dos desenhos de detalhamento puderem ser feitos no *Inventor*, o *AutoCAD* se mostrou a melhor uma opção uma vez que é possível ajustar aos padrões exigidos pelos clientes assim como ser mais simples de fazer ajustes manuais;

Além desses softwares citados, também foi utilizado a linguagem de programação *python* através da plataforma do *jupyter notebook* para a elaboração de pequenas linhas de código a fim de facilitar os cálculos analíticos.

4 PROJETO INFORMACIONAL E CONCEITUAL

A primeira etapa do projeto consistiu em realizar o estudo preliminar do problema a ser resolvido e das possibilidades de resolução. Além disso, foi necessário levar em consideração as exigências feitas pelo cliente solicitante do projeto. Por se tratar de um equipamento destinado a facilitar a manutenção preventiva da tampa refratária do forno, o equipamento projetado deve ser simples e robusto o suficiente para exigir o mínimo de manutenção possível.

As exigências do cliente foram que o equipamento projetado não viesse a interferir de forma estrutural o local onde será instalado nem que sejam feitas modificações nas tubulações de vapor que estão conectadas ao forno, e dentro do possível, fazer com que os mecanismos de movimento sejam realizados de forma manual.

Podemos resumir as premissas do projeto como sendo:

- a) Equipamento simples e robusto;
- b) Evitar mudanças estruturais;
- c) Não realizar modificações nas tubulações presentes do forno;
- d) Priorizar acionamentos manuais.

Com isso foi necessário elaborar um projeto informacional onde estabelecemos as premissas básicas de funcionamento do equipamento, como por exemplo a capacidade de carga, e posteriormente foi feito um esboço de *layout* do equipamento, sendo este o projeto conceitual. Essas etapas a priori foram executadas por um projetista mais antigo da empresa que posteriormente passou a responsabilidade da execução desse projeto para mim.

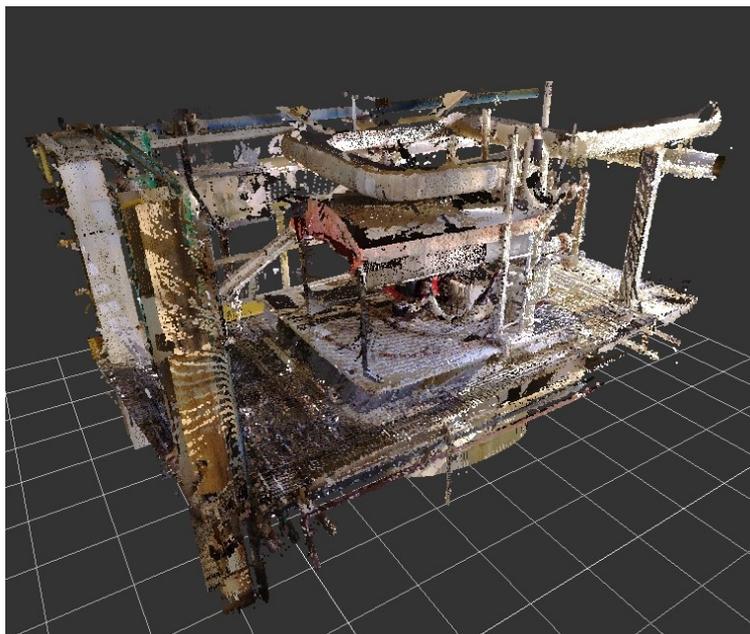
4.1 ANÁLISE DO LOCAL DE INSTALAÇÃO

Por se tratar de uma fábrica inacessível para nós devido a distancia, todas as medidas referentes ao local onde o equipamento projetado será instalado foram coletadas via nuvem de pontos (Figura 12) que foi fornecida pelo cliente além de um esboço tridimensional que foi produzido por terceiros.

Algumas fotografias 360° realizadas durante a aquisição dos dados da nuvem de pontos nos fornecem uma perspectiva do local onde o equipamento será instalado. A Figura 13 é uma fotografia em grande ocular do local e da tampa que será movimentada pelo equipamento projetado.

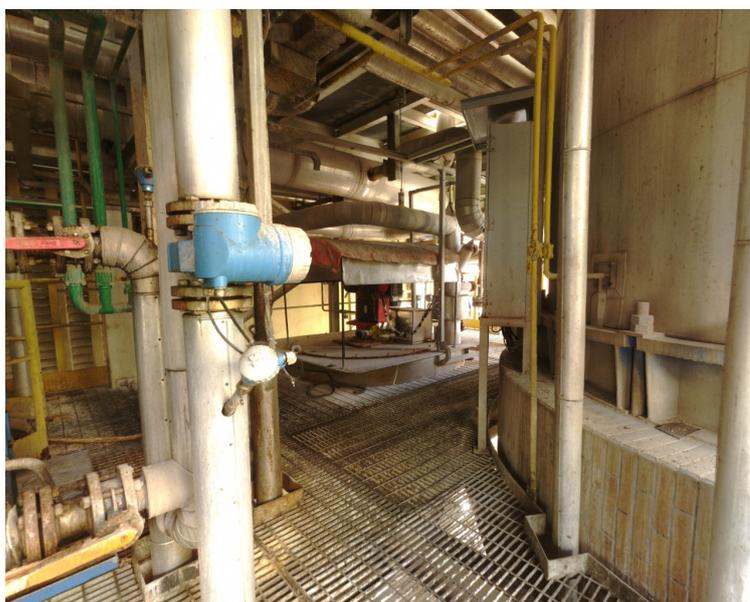
Uma fotografia realizada de um ponto mais próximo nos fornecesse uma visão mais apurada em relação as restrições das tubulações sobre o forno (Figura 14).

Figura 12 – Nuvem de pontos da região onde o equipamento será instalado



Fonte: Autor

Figura 13 – Fotografia da parte superior do forno



Fonte: Modificado pelo autor

4.2 LAYOUT PRELIMINAR

Para que a realização da inspeção e posteriormente substituição dos materiais refratários presentes na parte interna da tampa do forno possam ser substituídos, a tampa precisa ser transladada (erguida em relação ao eixo do forno) e rotacionada em torno do próprio eixo de modo que a parte interna fique para cima, ou seja, realizar um giro de 180°.

Figura 14 – Detalhes da parte superior do forno



Fonte: Autor

Figura 15 – Vista geral do local de instalação do equipamento

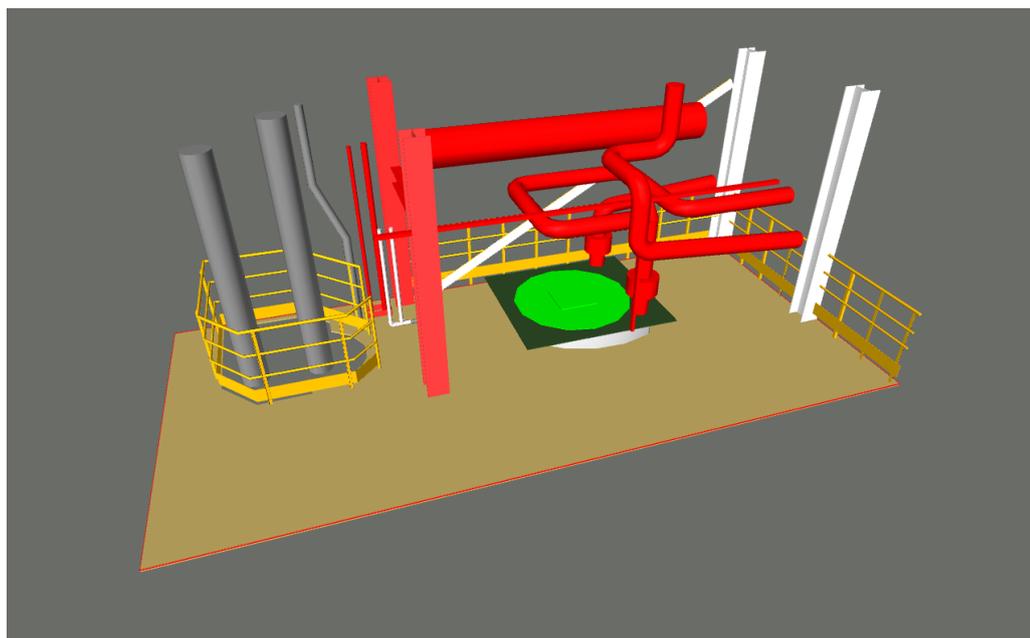


Fonte: Autor

Conforme pode-se visualizar na Figura 14, existem uma série de tubulações a vapor próximas ao topo do forno, o que impossibilita que o movimento de retirada e rotação ocorram no eixo do forno. Desse modo, através da nuvem de pontos, foi possível construir o modelo tridimensional para que a modelagem preliminar do projeto fosse iniciada (Figura 16).

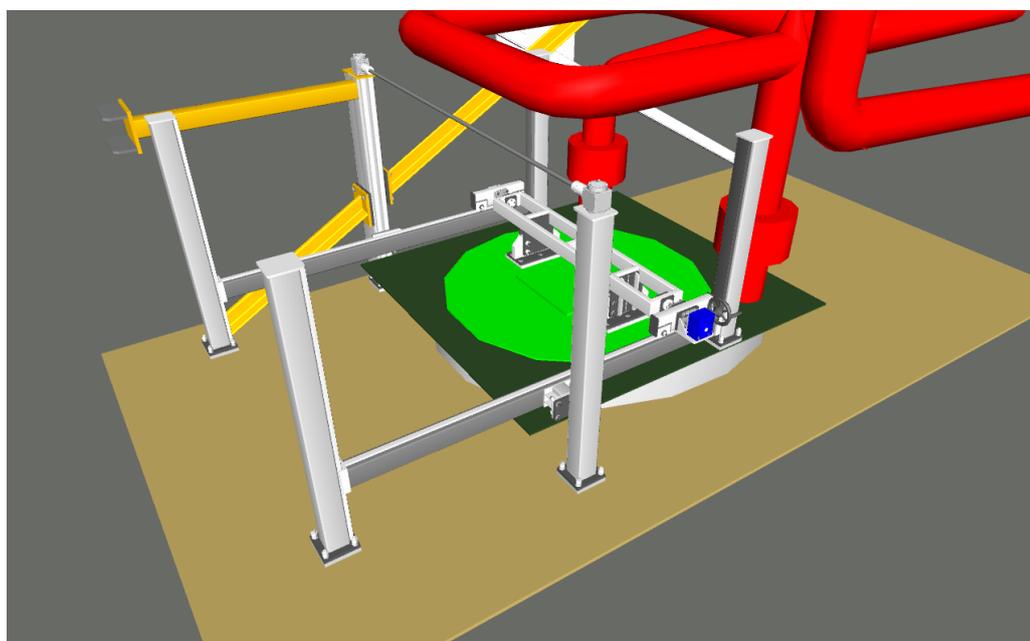
A equipamento idealizado para resolução do problema de movimentação da tampa do forno consistiu em uma espécie de ponte rolante. Duas colunas contendo um sistema de elevação foram esboçadas para que possam erguer duas vigas paralelas. Sobre essas vigas, dois carros serão responsáveis por realizar o movimento de translação da tampa (subida e descida sobre o forno e translação sobre as vigas). A Figura 17 ilustra o projeto preliminar do equipamento a que foi desenvolvido.

Figura 16 – Modelo base para construção do equipamento



Fonte: Autor

Figura 17 – Equipamento idealizado



Fonte: Autor

Na Figura 17 podemos observar que as vigas estão apenas apoiadas nas colunas mais externas. Elas apenas deslizarão através de guias lineares que foram dimensionadas nas etapas de detalhamento. Além disso, de forma preliminar respeitamos a condição imposta pela cliente de priorizar acionamentos manuais, portanto o movimento de rotação da tampa e translação da mesma sobre os trilhos presentes nas vigas ocorre de forma manual.

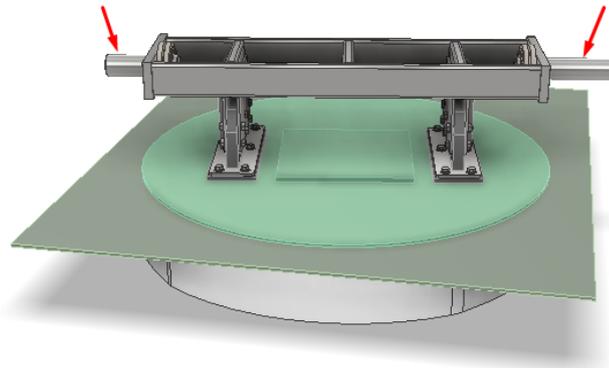
5 PROJETO PRELIMINAR

Após a aprovação do layout preliminar (projeto conceitual) do equipamento por parte do cliente, foi iniciado a parte crucial do projeto que consiste em dimensionar e detalhar todos os elementos que compõe o equipamento. Para tal, realizou-se a modelagem dos componentes e validou-se elas através de alguns cálculos analíticos e de simulações estáticas. Essa etapa juntamente com a etapa de projeto detalhado totalizaram mais de 200 horas de trabalho para sua conclusão.

5.1 EIXOS

Um dos primeiros elementos a serem projetados e dimensionados foram os eixos que são responsáveis por suportar o peso da tampa além de suportarem o torque necessário para rotação da mesma. Como tendem a ser o elemento de maior esforço, todos os demais componentes projetados foram dimensionados em função do diâmetro desses eixos, como por exemplo, a estrutura soldada, os carros e o sistema de rotação da tampa.

Figura 18 – Eixos de sustentação da tampa



Fonte: Autor

Na Figura 18 podemos observar que esses eixos estarão submetidos a um esforço de flexo torção: flexão por causa do peso da tampa e da estrutura e torção por causa do torque aplicado no eixo da esquerda (a direita na figura) para rotacionar a estrutura e a tampa. Portanto usamos as seguintes equações para determinar o diâmetro preliminar:

$$\bar{\sigma}_f = \frac{M_f}{W_f} = \frac{M_f}{\frac{\pi \phi^3}{32}} = \frac{32M_f}{\pi \phi^3} \quad (4)$$

$$\bar{\sigma}_t = \frac{M_t}{W_t} = \frac{M_t}{\frac{\pi \phi^3}{16}} = \frac{16M_t}{\pi \phi^3} \quad (5)$$

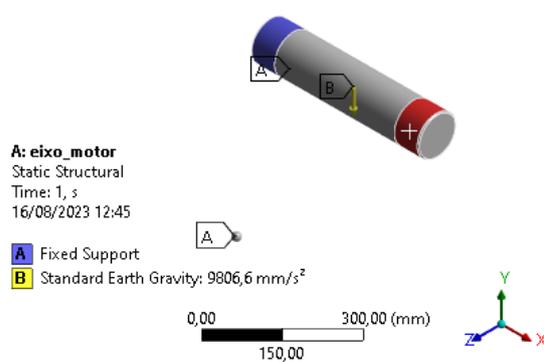
$$\sigma_{ft} = \sqrt{\left(\frac{\bar{\sigma}_f}{2}\right)^2 + \sigma_t^2} = \sqrt{\left(\frac{16M_f}{\pi \phi^3}\right)^2 + \left(\frac{16M_t}{\pi \phi^3}\right)^2} = \frac{16}{\pi \phi^3} \sqrt{M_f^2 + M_t^2} \quad (6)$$

Onde $\bar{\sigma}_f$ representa a tensão admissível a flexão, $\bar{\sigma}_t$ é a tensão admissível a torção, $\bar{\sigma}_f$ a tensão de flexo torção, M_f é o momento fletor, M_t é o momento torsor e ϕ o diâmetro do eixo.

Utilizando parâmetros um material de resistência genérica (um aço 1020, por exemplo) nas equações (4),(5) e (6), obtemos o diâmetro preliminar de 122 mm, mas ao utilizarmos os parâmetros de um Aço 4340 e simularmos os eixos com diâmetros de 100 mm nas condições de carga estimada do projeto, verificamos que as tensão resultante era inferior a tensão admissível do material.

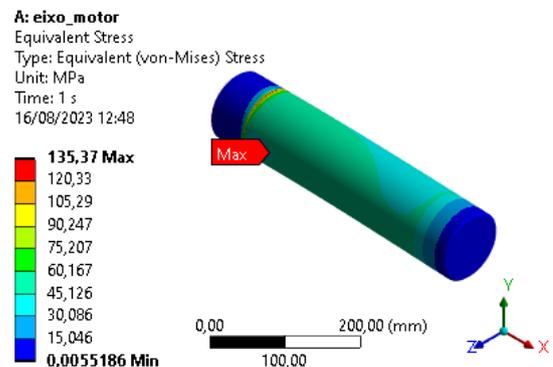
Abaixo segue as figuras referente as validações realizadas através de análise por elementos finitos.

Figura 19 – Condições de contorno para simulação do eixo principal



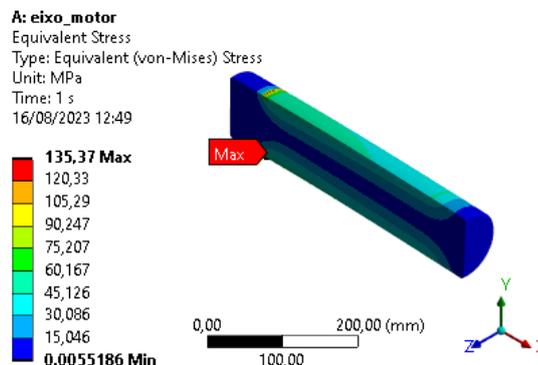
Fonte: Autor

Figura 20 – Resultado das tensões resultantes no eixo principal



Fonte: Autor

Figura 21 – Vista em corte do resultado das tensões resultantes no eixo principal



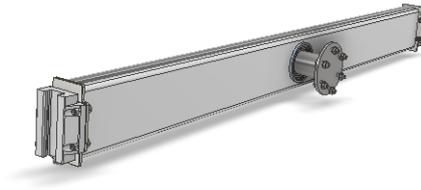
Fonte: Autor

Na Figura 19 que foi considerado que o eixo está engastado na região azul e que um ponto de massa equivalente a massa da tampa rotacionada em uma posição de 90° foi adicionada na região em vermelho de modo que gere uma carga de flexo torção.

5.2 VIGAS DE SUSTENTAÇÃO

Para o dimensionamento das vigas avaliou-se a possibilidade de utilização de perfis estruturais uma vez que poderíamos obter elevadas resistências a torção, mas optamos por utilizar tubos metálicos ao invés dos perfis por representar uma solução com design mais *clean* e mais moderna conforme é ilustrado na Figura 22. Para mais detalhes das vigas de sustentação, verificar o trabalho de Muniz (2023).

Figura 22 – Viga de sustentação/ elevação

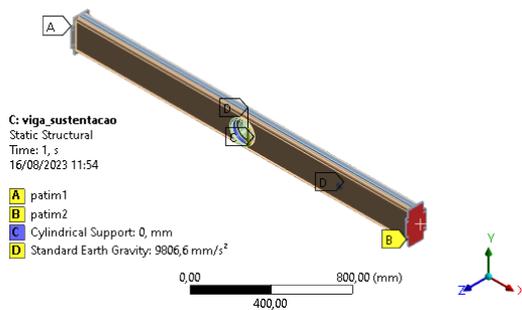


Fonte: Autor

Portanto, sabendo que as vigas serão pinadas no meio e simplesmente apoiadas nas extremidades através de um sistema de guias lineares, procuramos obter um perfil de tubo que apresente a menor deformação possível a flexão. Para determinação do perfil, avaliamos segundo a condição citada anteriormente e com uma carga de aproximadamente 800 kg sendo aplicada em uma das extremidades da viga. Em um segundo momento, simulamos o comportamento da viga para quando a tampa estiver sendo rotacionada. Isso fará com que surja um momento binário resultando uma torção da viga.

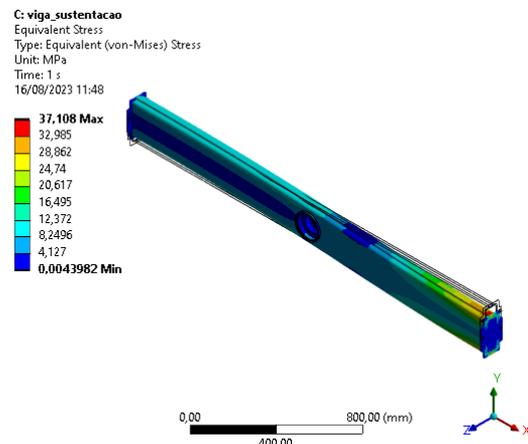
A Figura 23 ilustra as condições de contorno utilizadas para validação do conjunto da viga simplificado (sem os patins das guias lineares):

Figura 23 – Condições de contorno para simulação do conjunto da viga



Fonte: Autor

Figura 24 – Resultado das tensões resultantes no conjunto da viga

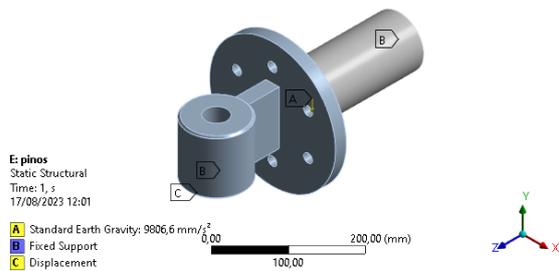


Fonte: Autor

As condições de contorno ilustradas na Figura 23 mostra que a região da bucha foi engastada como pino e aplicado um ponto de massa equivalente a estrutura fixada a tampa mais a tampa no ponto D. Além disso, as extremidades foram restritas para que não hajam deslocamentos na direção do eixo x indicado na figura. A Figura 24 apontam os resultados das tensões resultantes para o conjunto da viga.

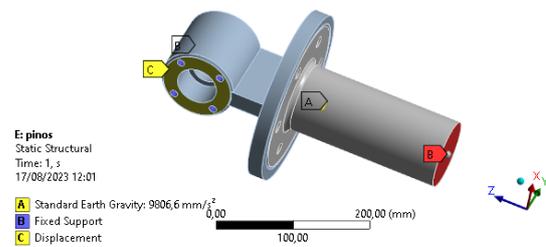
Além disso, foi projetado as buchas presentes no meio de cada uma das duas vigas de sustentação. As buchas foram utilizadas para servirem de local de instalação dos rolamentos e anéis de contenção. Essas buchas foram projetadas levando em consideração as dimensões dos rolamentos de 100 mm, uma vez que os pinos de sustentação do conjunto foram dimensionados com essa bitola através das equação de flexão e validados por análises de elementos finitos conforme é mostrado nas figuras a seguir:

Figura 25 – Condições de contorno para simulação dos pinos das vigas



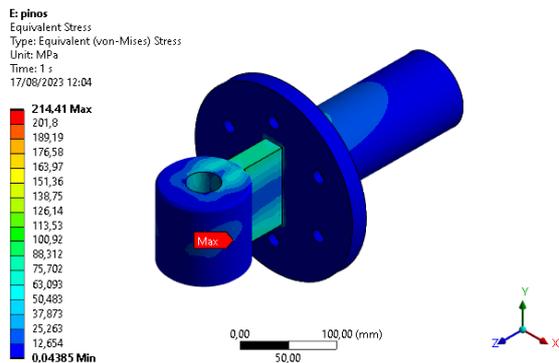
Fonte: Autor

Figura 26 – Vista inferior das condições de contorno para simulação dos pinos das vigas



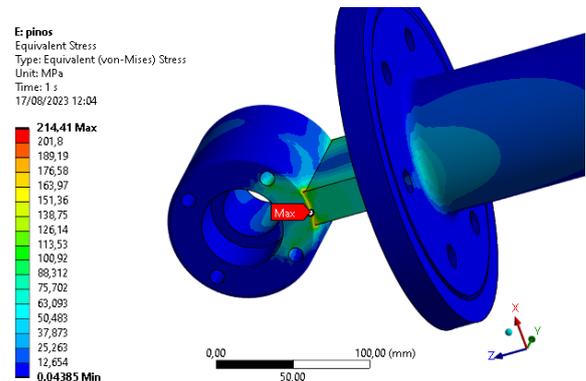
Fonte: Autor

Figura 27 – Resultado das tensões resultantes nos pinos das vigas



Fonte: Autor

Figura 28 – Vista em detalhe do resultado das tensões resultantes nos pinos das vigas



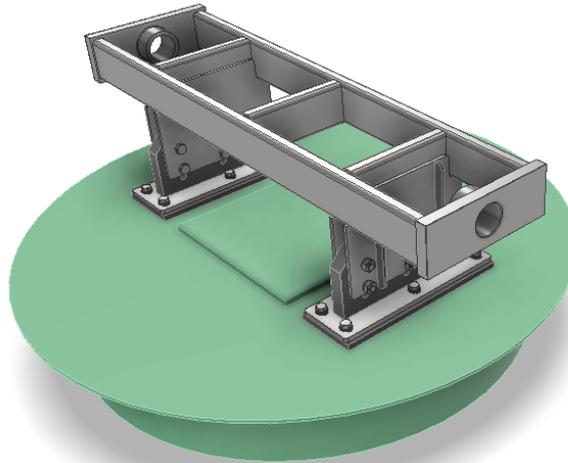
Fonte: Autor

É possível observar as condições de contorno nas Figuras 25 e 26 que os furos dos parafusos fixados a porca do elevador estão engastados e que a superfície inferior tem um deslocamento restrito nos eixo z e x. Além também é possível observar onde o ponto de massa foi considerado no pino e o resultado das tensões resultantes nas Figuras 27 e 28.

5.3 ESTRUTURA FIXADA A TAMPA

Para o projeto da estrutura fixada a tampa do forno partimos pela mesma premissa das vigas de sustentação: utilização de tubos metálicos ao invés de perfis.

Figura 29 – Estrutura fixada a tampa do forno



Fonte: Autor

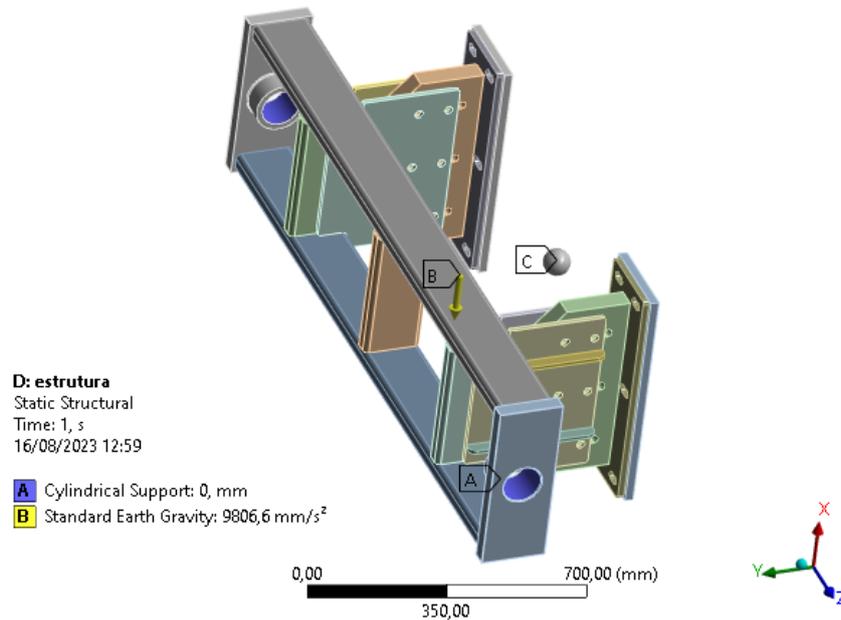
A restrição geométrica da estrutura fixada a tampa do forno foram os eixos de suportação que foram dimensionados anteriormente. Portanto, utilizamos tubos de 50 por 150 mm e chapas de 3/8", 1/2" e 1 1/2" mm. Além disso, foi projetado para as extremidades uma espécie de flange para que os eixos pudessem ser fixados com o auxílio de discos de contração como o que é mostrado na Figura 34.

A estrutura é composta basicamente por 3 elementos:

1. Chapas de enxerto: chapas soldadas in loco na tampa do forno para que possam servir de elementos de ancoragem dos pés da estrutura fixada a tampa do forno;
2. Pés da estrutura: duas chapas soldadas que servem como pés de fixação da estrutura. Os pés possuem rasgos oblongos para permitirem ajustes tanto no eixo y tanto quanto no eixo z;
3. Estrutura principal: composta por tubos e chapas, representa a estrutura engastada aos eixos responsáveis por erguer e rotacionar a tampa do forno.

Para a validação da estrutura, simulações por elementos finitos realizadas levando em consideração a massa da tampa do forno de aproximadamente 800 kg na posição horizontal e na posição de 90°, sendo esta última a posição mais crítica tanto para estrutura tanto quanto para os eixos uma vez que o braço de alavanca (distância entre o centro de massa da tampa do forno e eixo de rotação) está na horizontal, resultando em um momento máximo a ser vencido. Essas condições de contorno são apresentadas na Figura 30.

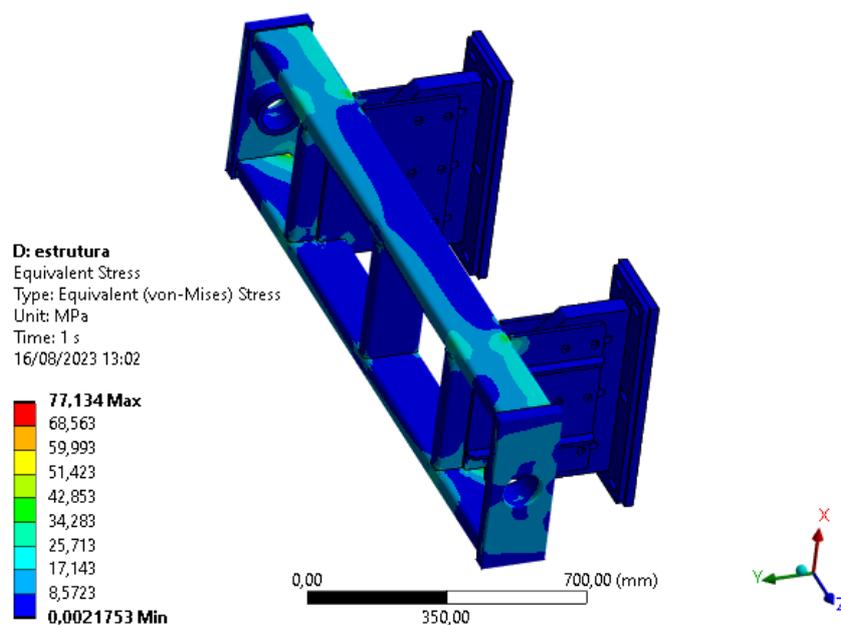
Figura 30 – Condições de contorno da estrutura fixada a tampa do forno



Fonte: Autor

A Figura 31 mostra o resultado das tensões resultantes e podemos observar uma boa distribuição de tensões ao longo da estrutura e sem picos consideráveis, isso mostra que a estrutura está bastante rígida para as condições de contorno que foram consideradas.

Figura 31 – Resultado das tensões resultantes na estrutura fixada a tampa do forno



Fonte: Autor

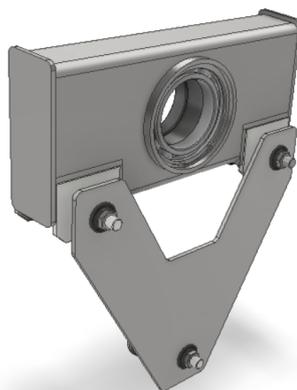
5.4 ESTRUTURA DOS CARROS

Para o projeto foi considerado que os eixos conectados a estrutura fixada a tampa serão montados em dois carros. Esses carros poderão ser movimentados sobre as vigas de sustentação ao longo do eixo x do equipamento de modo que a tampa possa ser posicionada fora do eixo do forno. Mecanismos para realização desse translado na direção do eixo x foram descartados uma vez que o cliente solicitou que fosse evitado a utilização de motores, priorizássemos acionamentos manuais. Apesar disso, sistemas de fusos sem fim poderiam ter sido implementados para dispensar operações manuais.

5.4.1 Carro Secundário

O carro secundário é um carro instalado do lado direito do equipamento e é o carro mais simples do equipamento uma vez que o eixo montado nesse carro não receberá torque de nenhum mecanismos que é o caso do carro principal que é detalhado logo a seguir.

Figura 32 – Carro lado direito



Fonte: Autor

Seguindo o estilo de design adotado em outros elementos do equipamento, os carros foram projetados utilizando tubos suficientemente grandes para acomodar a bucha com rolamentos e anéis de contenção adequados para o eixo de 100 mm que foi dimensionado anteriormente. Sendo assim, a carcaça principal do carro é constituída basicamente por um tubo de 80 por 200 mm com uma espessura de 6,3 mm. As chapas laterais aumentam a rigidez e fecham o tubo que possuem um furo na posição central e rasgos na parte inferior que servem de alojamento para os rodízios do carro.

A distância entre os rodízios não poderia ser grande demais se não perderíamos em *range* de deslocamento da tampa no eixo x e também não poderia ser pequeno demais por causa da bucha presente no centro do tubo. Portanto a medida adotada para o espaçamento entre os eixos dos rodízios principais foi de 340 mm.

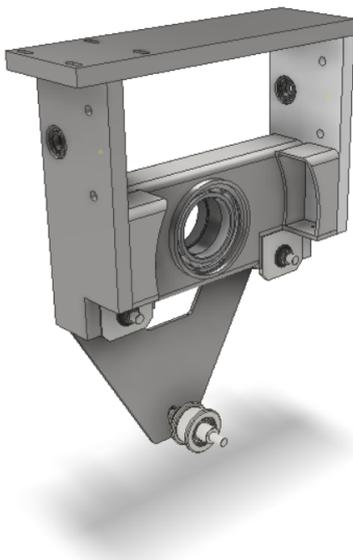
Um terceiro rodízio foi considerado para fazer com que os dois rodízios principais (rodízios alojados no carro) não percam o contato com o trilho presente na parte superior da viga de sustentação nem mesmo quando a tampa estiver sendo rotacionada. Para tal, uma chapa foi projetada para ser fixada nos eixos dos dois rodízios principais e servir como uma espécie de mono balança para o rodízio de apoio montado na parte inferior. Os rodízios foram projetados para serem os mais resistentes o possível e de fácil montagem. Para tal, foram utilizados rolamentos de rolos cilíndricos de alta capacidade.

Esses e outros detalhes são abordados de forma mais precisa no trabalho de Muniz (2023), responsável pelo detalhamento da maior parte dos componentes que compõe o carro secundário.

5.4.2 Carro Principal

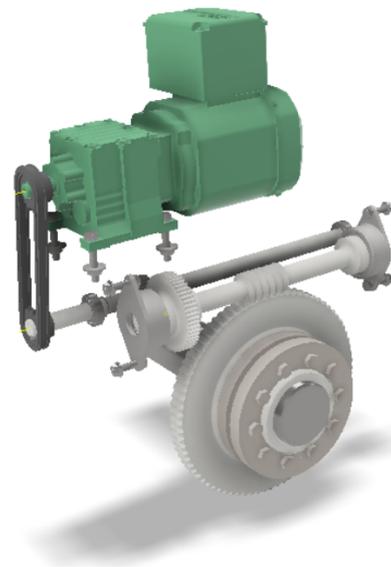
Diferente do carro secundário, o carro principal, instalado no lado esquerdo do equipamento, é o responsável por abrigar o mecanismo que realiza o giro da tampa, portanto a estrutura desse carro tem que ser reforçada.

Figura 33 – Carro Principal



Fonte: Autor

Figura 34 – Mecanismo de giro da tampa

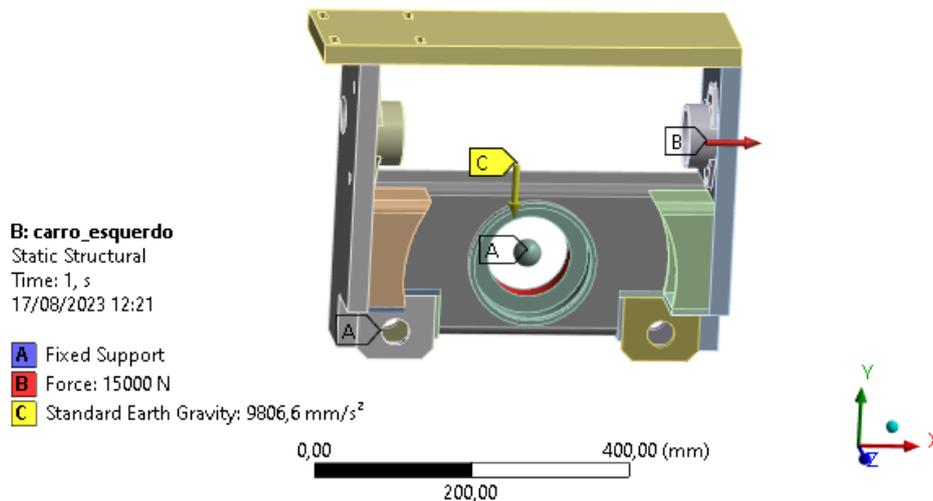


Fonte: Autor

Assim como o carro do lado direito, a estrutura básica é composta por um tubo de 80 por 200 mm com 6,3 mm de espessura com um furo no meio para abrigar os rolamentos dos eixos principais e rasgos na parte inferior para abrigar os rodízios. Além disso, as chapas laterais e a de topo são de 1 polegada de espessura para garantir a rigidez estrutural do carro conforme podemos observar na Figura 33. É nesse carro que é montado o mecanismo de coroa sem fim, engrenagens de dentes retos de 2:1, um eixo secundário, um par de pinhões, uma corrente e um motor redutor (Figura 34).

Para validação da resistência da estrutura do carro do lado esquerdo levamos em consideração o momento de maior torque aplicado para rotação da tampa, ou seja a posição em que a tampa está a 90º da posição inicial. Nesse momento, uma força resultante ao torque gerado é aplicado ao sem fim do redutor gerando uma torção na estrutura do carro. Portanto, seguimos com as condições de contorno que são apresentadas na Figura 35:

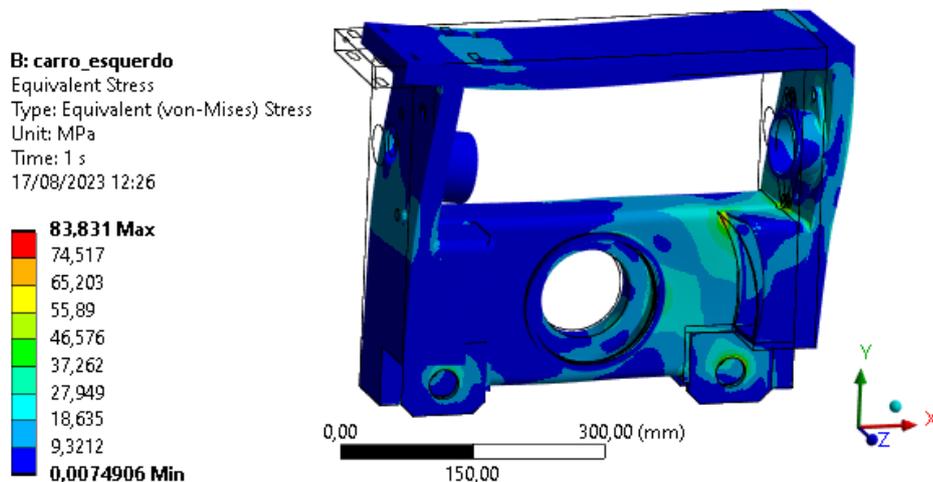
Figura 35 – Condições de contorno para simulação do carro lado esquerdo



Fonte: Autor

Como resultado, obtemos as tensões resultantes apresentadas na Figura 36 e avaliamos que a estrutura do carro está dentro dos parâmetros desejados uma vez que não apresenta elevadas tensões.

Figura 36 – Resultado das tensões resultantes no carro lado esquerdo

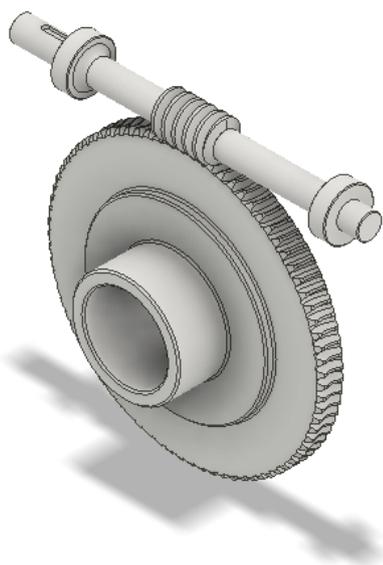


Fonte: Autor

5.5 TREM DE ENGRENAGEM

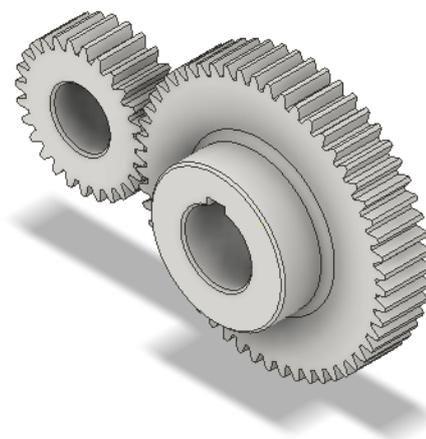
Foi necessário dimensionar um mecanismo para realizar o movimento de giro da tampa uma vez que não conseguimos encontrar redutores comerciais do tipo coroa sem fim que se adequassem ao espaço disponível que tínhamos. Inicialmente, para respeitar a imposição do cliente que os acionamentos do sistema fosse realizados de forma manual, dimensionamos um sistema essencialmente por uma redução do tipo coroa sem fim de 80:1 (Figura 37) com uma redução de engrenagens de dentes retos de 2:1 (Figura 38).

Figura 37 – Coroa Sem Fim 80:1



Fonte: Autor

Figura 38 – Engrenagens retas 1:2



Fonte: Autor

Dessa maneira, utilizando uma chave tipo catraca de 20 polegadas de comprimento (equivalente a um braço de alavanca de 500 mm), um operário precisaria executar mais de 1500 repetições (movimento de cerca de 45°) com uma carga de aproximadamente 10 kgf.

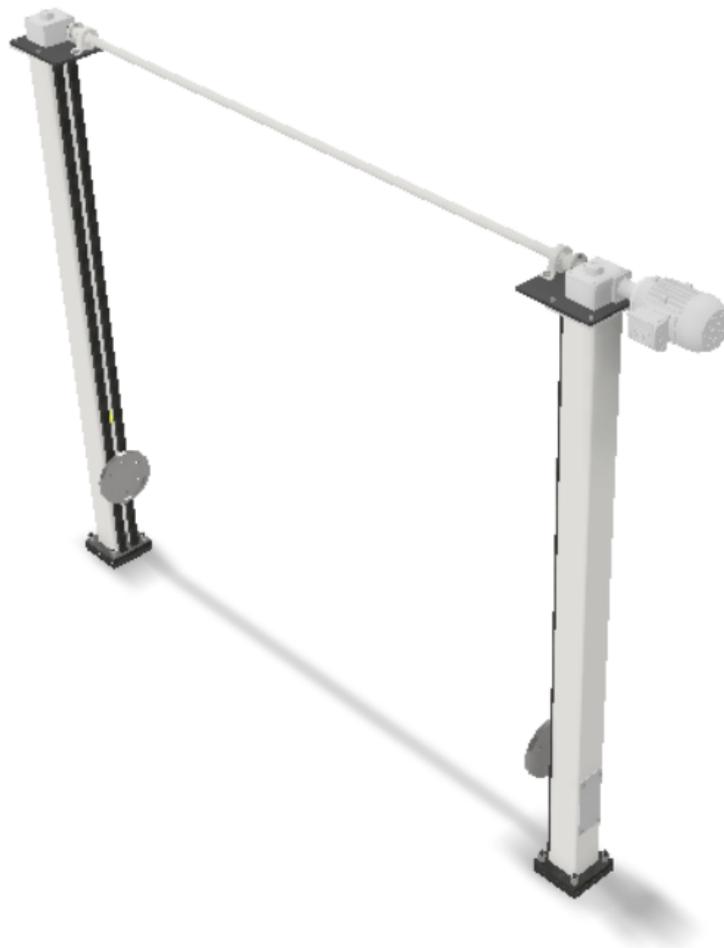
Apesar de ser possível essa solução, preferimos descartar essa possibilidade uma vez que a atividade se tornaria exaustiva para o operário além de muito demorada. Para diminuirmos a carga das repetições, iríamos precisar aumentar a quantidade de repetições, ou seja, iria demorar mais. Enquanto que para diminuir a quantidade de repetições, a carga aplicada em cada repetição teria que ser aumentada tornando a atividade inviável para o operador.

Portanto, preferimos adotar uma solução que usa um moto redutor para fornecer a força necessária para realizar o giro da tampa. Conectado através de uma corrente ao mecanismo de redução já citado (a redução de engrenagens de dentes retos de 2:1 e a coroa sem fim de 80:1), faz com que o giro de 180° da tampa seja executado em pouco menos do que 5 minutos.

5.6 ELEVADOR

O mecanismo responsável por elevar as vigas e conseqüentemente os carros e a tampa do forno é constituído basicamente por duas colunas de tubos de 120 por 120 mm com espessura de 4,75 mm que abrigam um fusos trapezoidais que são acionados por redutores do tipo coroa sem fim. Os redutores são acionados simultaneamente através de um único motor elétrico. A transferência de torque de um redutor para o outro acontece através de um eixo oco situado na parte superior do equipamento.

Figura 39 – Conjunto do elevador



Fonte: Autor

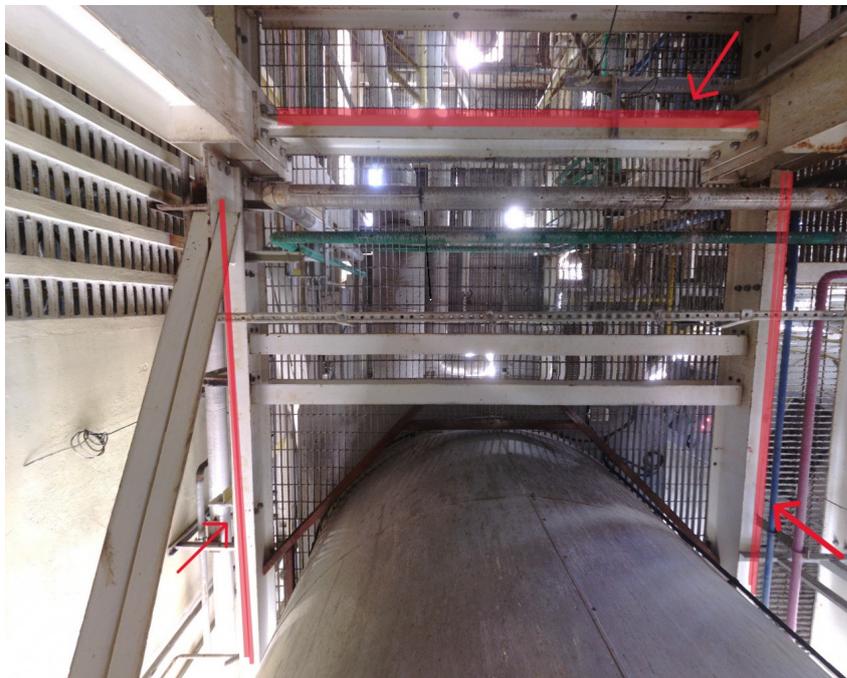
O mecanismo de fusos trapezoidais e redutores foram dimensionados por uma empresa terceirizada que é especialista na área. Portanto nos encarregamos apenas de projetar o alojamento para esses componentes assim como o eixo de ligação entre os dois redutores e demais dispositivos auxiliares (mancais e rolamentos). Esse sub conjunto também pode ser visto em maiores detalhes no trabalho de Muniz (2023), responsável pelo detalhamento da maior parte dos componentes do sistema de elevação.

5.7 PONTOS DE ANCORAGEM

Conforme podemos observar no esboço inicial do equipamento idealizado (Figura 17), as colunas de apoio assim como as colunas do elevador estão apoiadas sobre o mezanino, coisa que não pode acontecer principalmente nas colunas do elevador que são responsáveis por suportar todo o peso do equipamento e da tampa do forno.

Portanto, ao analisarmos a nuvem de pontos fornecida, identificamos vigas estruturais onde pudemos colocar os pontos de ancoragem do equipamento conforme vemos na Figura a seguir:

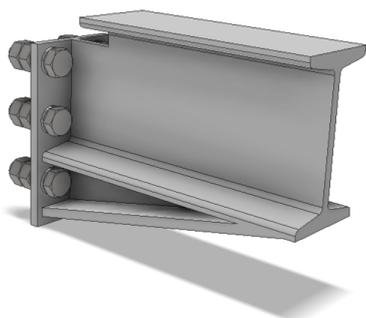
Figura 40 – Vigas estruturais para ancoragem do equipamento



Fonte: Modificado pelo autor

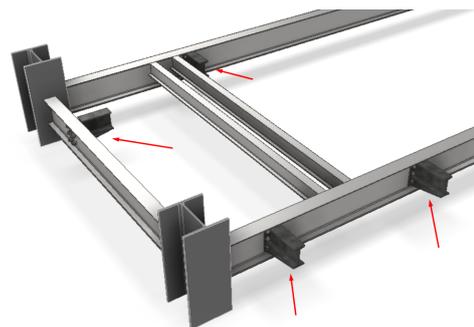
Utilizando perfil I de 6" e 22 kg/m enrijecido com chapas de 9,5 mm, elaboramos o seguinte ponto de ancoragem para o equipamento:

Figura 41 – Ponto de ancoragem



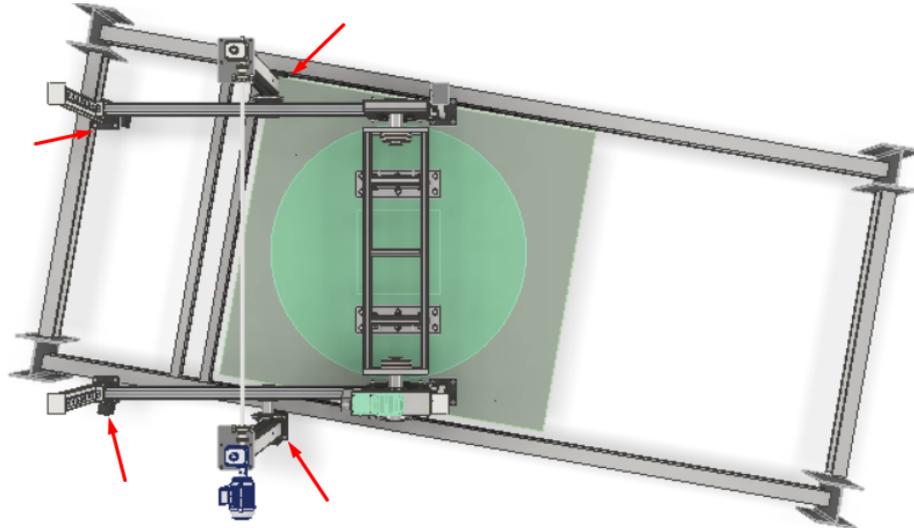
Fonte: Autor

Figura 42 – Posicionamento das ancoragens



Fonte: Autor

Figura 43 – Vista dos pontos de ancoragem do equipamento



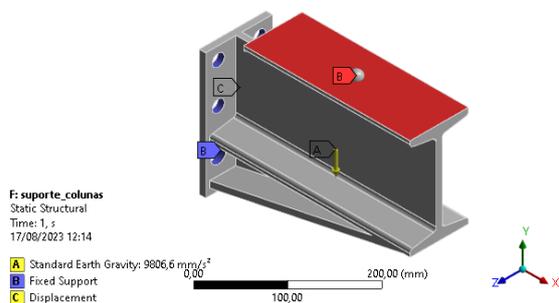
Fonte: Autor

Observe na Figura 43 que só foram considerados 4 pontos de ancoragem. 2 para as colunas de apoio e 2 para as colunas do elevador uma vez que a ancoragem das duas colunas de apoio localizadas próximas ao forno são fixadas sobre a chapa já existente do forno. Nos pontos de instalação dos pontos de ancoragem do equipamento, foi recomendado a utilização de enrijecedores nas vigas já existentes.

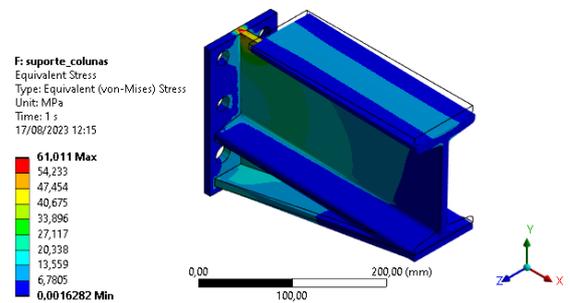
Para validação desse suporte que servirá como ponto de ancoragem do equipamento, utilizamos as condições de contorno ilustradas na Figura 44 que foi basicamente o engaste dos furos dos parafusos, a restrição de não deslocamento do plano ao longo do eixo x. Além disso, foi considerado uma massa de aproximadamente 1200 kg para esses suportes.

Figura 44 – Condições de contorno para simulação da ancoragem

Figura 45 – Resultado das tensões resultantes na ancoragem



Fonte: Autor



Fonte: Autor

O resultado das tensões resultantes no suporte são apresentados na Figura 45 onde podemos observar que a tensão resultante máxima (61 MPa) é baixo da tensão admissível do material, portanto podemos considerar que o suporte atende as condições de carga do equipamento projetado.

6 PROJETO DETALHADO

O projeto detalhado representa os documentos e arquivos que foram entregues ao cliente para que a fabricação do equipamento seja possível. Dentro da empresa responsável pelo projeto do equipamento temos determinadas premissas de divisões de tipos de desenhos a serem gerados. A divisão é feita basicamente em conjuntos e em desenhos de detalhamento.

Para caracterizar um determinado desenho como sendo um desenho de conjunto, precisamos ter mais de uma peça projetada e que seja montada a outras peças também projetadas. Também é caracterizado como sendo um desenho de conjunto estruturas composta por diversos componentes, mas que são unidos através de processos de solda, portanto todas as peças que serão soldadas formando a estrutura podem ser detalhadas dentro do desenho de conjunto.

6.1 DESENHOS DOS CONJUNTOS

Os desenhos de conjunto que foram gerados neste trabalho foram:

- C-001 : CONJUNTO GERAL DO EQUIPAMENTO - Desenho onde é representado todo o equipamento montado com todos os outros conjuntos;
- C-002 : ESTRUTURA DE ELEVAÇÃO E ROTAÇÃO - Desenho onde é representado a estrutura fixada a tampa do forno;
- C-003 : COLUNAS DE APOIO - Desenho onde é representado as colunas de apoio onde são fixadas as guias lineares para as vigas de sustentação;
- C-004 : VIGAS DE SUSTENTAÇÃO DOS CARROS - Desenho onde é representado o conjunto montado das vigas de sustentação da estrutura fixada a tampa e os carros;
- C-005 : SISTEMA DE ELEVAÇÃO: Desenho onde é representado as colunas que compõe o sistema de elevador assim como os demais componentes que são montados;
- C-006 : CARRO SECUNDÁRIO- Desenho onde é representado o carro mais simples do equipamento;
- C-007 : CARRO PRINCIPAL - Desenho onde é representado o carro do lado esquerdo que é onde é abrigado todo o sistema responsável por realizar a rotação da tampa (mecanismo).

Alguns dos desenhos mais representativos que puderam ser divulgados, estão em anexo (Apêndices A e B).

6.2 DESENHOS DE DETALHAMENTOS

A Tabela 2 lista todos os desenhos de detalhamento que foram produzidos e entregues ao cliente. Vale atenção aos desenhos D-001 (Apêndice C) e D-019 (Apêndice D) que ilustram as peças soldadas que compõe a estrutura fixada a tampa do forno e as peças também soldadas que compõe a estrutura do carro principal. Esses desenhos encontram-se com uma escala reduzida, uma vez que os desenhos originais não estão em folhas A4.

Tabela 2 – Lista de desenhos de detalhamento gerados

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 RODIZIO - 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 SECUNDÁRIO - DETALHES
D-018	CHAPA FIXAÇÃO RODIZIO INFERIOR - DETALHES
D-019	ESTRUTURA CARRO PRINCIPAL - 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	RODIZIO - DETALHES
D-030	CHAPA FECHAMENTO 1 CARRO PRINCIPAL - DETALHES
D-031	CHAPA DE FECHAMENTO DA COROA DO SEM FIM - DETALHES
D-032	CHAPA DE FECHAMENTO 2 DO CARRO PRINCIPAL - DETALHES
D-033	SUPORTE EQUIPAMENTO - DETALHES
D-034	EIXO MOTOR - DETALHES
D-035	EIXO MOVIDO - DETALHES
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: Autor

6.3 MEMORIAL DESCRITIVO

Um documento adicional que é entregue ao cliente é o memorial descritivo do equipamento onde é contido informações gerais a respeito do funcionamento do mesmo assim como limites de carga. Além disso, no memorial descritivo é descrito recomendações gerais a respeito de como a montagem do equipamento deve ser realizada de modo que todos os componentes e conjuntos consigam ser montados conforme o projeto final.

6.4 MEMÓRIA DE CÁLCULO DE COMPONENTES CRÍTICOS

De modo geral a memória de cálculo entregue ao cliente consiste na validação que foi realizada de determinados componentes, essencialmente aqueles que já foram abordados neste trabalho no Capítulo 5. Essa memória de cálculo entregue contém em detalhes as condições de contorno que foram utilizadas em cada simulações assim como determinadas considerações e simplificações que se fizeram necessárias para que as simulações fossem possíveis. Além dos resultados referentes as tensões resultantes que foram apresentadas nesse trabalho, também foram entregues os resultados referentes as deformações resultantes nos componentes simulados.

A memória de cálculo serve como garantia que o equipamento projetado resiste as condições de trabalho que foram apresentadas pelo cliente, ou seja, as condições de carga, que falando mais especificamente, é o peso da tampa refratária do forno.

7 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do equipamento de remoção e posicionamento de tampa refratária para o forno industrial apresentado neste trabalho representa uma contribuição para o entendimento das etapas de metodologia do projeto no desenvolvimento de equipamentos mecânicos. Mais que isso, este trabalho foi concebido com o objetivo de abordar um desafio real enfrentado na indústria e que veio a ser solucionado através do equipamento projetado e apresentado. Deste modo, o objetivo principal do trabalho foi alcançado juntamente com todos os objetivos específicos que foram estabelecidos inicialmente.

Desde as etapas de projeto informacional e conceitual, onde se foi realizado análise das necessidades do cliente e dos requisitos técnicos e estabelecido um esboço conceitual equipamento que viria a ser o desenvolvido, até as etapas de projeto preliminar e detalhado, onde a maior parte do tempo e esforço foram necessários para que tudo pudesse ser concluído, os resultados obtidos demonstram que o equipamento é capaz de remover e posicionar a tampa de forma eficaz e segura, mesmo que em espaço restrito. Além disso, a solução proposta apresenta vantagens em termos de tempo de execução da tarefa ergonomia para os operadores. Isso representa um avanço significativo na eficiência das operações de manutenção.

Este trabalho exemplifica a importância da colaboração multidisciplinar e da aplicação de princípios de engenharia em situações práticas do mundo real. Além disso, destaca a capacidade dos engenheiros mecânicos de inovar e encontrar soluções para desafios complexos. Esperamos que este trabalho possa servir como referência e inspiração para futuros trabalhos na área de projetos mecânicos.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, Renato Dias Calado do; PINA FILHO, Armando Carlos de. **A Evolução do CAD e sua Aplicação em Projetos de Engenharia**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2015.
- AZEVEDO, Álvaro FM. **Método dos elementos finitos**. 1ªed. Porto, Portugal: [s.n.], 2003. v. 1.
- BEER, Ferdinand P.; JOHNSTON, E. Russell; DEWOLF, John T.; MAZUREK, David F. **Mecânica dos Materiais**. 5ªed. Porto Alegre, Brasil: AMGH Editora Ltda., 2011.
- BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **Elementos de Máquinas de Shigley**. 8ªed. Porto Alegre, Brasil: AMGH Editora Ltda., 2011. v. 1.
- CERVEIRA, Diego Santos; SELLITTO, Miguel Afonso. Manutenção centrada em confiabilidade (MCC): análise quantitativa de um forno elétrico a indução. **Revista Produção Online**, v. 15, p. 405–432, 2 2015.
- CURY, Alexandre A. Critérios de falha. **Departamento de Mecânica Aplicada e**, 2016.
- HIBBELER, Russel C. **Mechanics of Materials**. 5ªed. São Paulo, Brasil: Pearson Education do Brasil, 2004.
- LAMAS, Lorenzo Mol. **Estudo das contribuições da implantação do Planejamento e Controle da Manutenção (PCM) : estudo teórico de múltiplos casos**. 2021. F. 53. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2021.
- MORALES, Eduardo Domingo. **Análise de critérios de falha em materiais dúcteis: um estudo numérico e experimental**. Mar. 2013. F. 112. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo.
- MUNIZ, Paulo de Tarso Galindo. **Projeto de um equipamento para manipulação de uma tampa de forno industrial: conjunto mecânico de elevação**. 2023. Bacharelado – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE - Brasil.
- NOGUEIRA, Carlos Rogerio. **Análise da exposição ocupacional a elevadas temperaturas na manutenção de fornos de clinquer**. 2016. F. 29. Trabalho de

Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

NORTON, Robert L. **Projeto de Máquinas - Uma Abordagem Integrada**. 4^aed. Porto Alegre, Brasil: BOOKMAN EDITORA LTDA., 2013.

ORBRASIL. **Tabela de Resistências**. ORBrasil, Equipamentos para Fixação Industrial: [s.n.], 2023. Disponível em: https://www.orbrasil.com.br/admin/dist/img/produtos/_6c488202fb84e2fe726a19b725d0937c.pdf. Acesso em: 7 abr. 2023.

ROZENFELD, Henrique; FORCELLINI, Fernando Antônio; AMARAL, Daniel Capaldo; TOLEDO, José Carlos; SILVA, Sergio Luis da; ALLIPRANDINI, Dário Henrique; SCALICE, Régis Kovacs. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos: Uma Referência para a Melhoria do Processo**. São Paulo, Brasil: Saraiva, 2006.

SARDÁ, Alexandre A. P. **PARAFUSOS**. Demec, UFPR: [s.n.], 2023. Disponível em: http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC038/Prof.Walter_Kapp/TM245/Slides/Parafusos.pdf. Acesso em: 6 abr. 2023.

SILVA, Adson Beserra da. **Projeto de vaso de pressão segundo norma ASME e análise pelo método dos elementos finitos**. 2015. F. 141. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – CTG - Demec, Universidade Federal de Pernambuco, 2015.

TRINKS, W.; MAWHINNEY, M. H.; SHANNON, R. A.; REED, R. J.; GARVEY, J. R. **Industrial Furnaces**. 6th. New Jersey, USA: John Wiley Sons, Inc, 2004.

Apêndices

