

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE ESTÁTICA PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS DE UMA
ESTRUTURA PARA MOVIMENTAÇÃO DE CARGAS

por

Bruna Oliveira Koehler

Monografia apresentada ao
Departamento de Engenharia Mecânica da
Escola de Engenharia da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, como parte
dos requisitos para obtenção do diploma de
Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, setembro de 2023.

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

CIP - Catalogação na Publicação

Koehler, Bruna Oliveira
Análise Estática pelo Método dos Elementos Finitos
de uma Estrutura para Movimentação de Cargas / Bruna
Oliveira Koehler. -- 2023.
27 f.
Orientador: Felipe Tempel Stumpf.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2023.

1. Elementos finitos. 2. Mecânica dos sólidos. 3.
Análise estrutural. 4. Movimentação de cargas. I.
Tempel Stumpf, Felipe, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Bruna Oliveira Koehler

ANÁLISE ESTÁTICA PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS DE UMA
ESTRUTURA PARA MOVIMENTAÇÃO DE CARGAS

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Ignacio Iturrioz
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Felipe Tempel Stumpf

Comissão de Avaliação:

Prof. Felipe Tempel Stumpf (Presidente)

Prof. Daniel Milbrath De Leon

Prof. Rafael Antônio Comparsi Laranja

Porto Alegre, setembro de 2023.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Ronise Oliveira e Neverson Koehler.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais por me ensinar, desde criança, o valor da educação, bem como os princípios e ideais que me guiam diariamente.

Agradeço ao Daniel, meu amor, por me incentivar a sempre entregar o meu melhor e por estar sempre ao meu lado, mesmo nos momentos mais sombrios da graduação.

Quero agradecer a minha família que desde o início dessa jornada sempre me apoiou e incentivou. Agradeço ao Tio Nederson por me ensinar, ainda como meu professor da Engenharia Mecânica, os passos para me tornar uma ótima profissional.

À, Tati, Claiton, Mel, Theo e a Cici, vocês tornaram essa jornada mais leve e muito mais feliz.

À Caete Engenharia, empresa que me recebeu de braços abertos como estagiária e disponibilizou os softwares e materiais necessários para a produção desse trabalho. Agradeço imensamente aos meus supervisores e colegas de trabalho que me ajudam e incentivam a entregar o meu melhor diariamente.

Agradeço aos professores e a Universidade por proporcionar um ensino de qualidade.

Ao professor Felipe Stumpf pela paciência e por ministrar suas aulas de forma inspiradora.

Agradeço aos meus amigos e colegas que, mesmo com todas as dificuldades e “sumiços”, sempre mostravam apoio e amizade.

Agradeço a Suely por todo o apoio, paciência e instrução durante a minha jornada.

*Divide as dificuldades que tenhas de examinar em tantas partes quantas for possível,
para uma melhor solução.*

René Descartes

Koehler, Bruna Oliveira. **Análise Estática pelo Método dos Elementos Finitos de uma Estrutura para Movimentação de Cargas**. 2023. 28. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

RESUMO

A movimentação de cargas é uma opção viável e vantajosa em diversos contextos industriais, tornando-se essencial em empresas de diversos segmentos. O objetivo do presente trabalho é analisar, pelo método de elementos finitos, uma estrutura metálica com três eixos destinada à elevação e movimentação de cargas de até 1962 N e determinar se o equipamento está dimensionado de forma correta para as condições operacionais para o qual será atribuído. O projeto mecânico foi desenvolvido no *software* CAD 3D SolidWorks® e a análise estática não-linear pelo método de elementos finitos foi realizada no *software* COMSOL Multiphysics®. Os estudos foram abordados com base em três possíveis posições de trabalho dispostos na altura máxima permitida de operação. Os resultados obtidos através das simulações foram satisfatórios, uma vez que a tensão máxima calculada na estrutura não ultrapassou a tensão admissível do material considerada na análise.

PALAVRAS-CHAVE: método de elementos finitos, elevação de cargas, análise estrutural.

Koehler, Bruna Oliveira. **Static Analysis by the Finite Element Method of a Load Handling Structure**. 2023. 28. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

ABSTRACT

Load handling is a viable and advantageous option in several industrial contexts, becoming essential in companies from different segments. The objective of this work is to analyze, using the finite element method, a metallic structure with three axes intended for lifting and handling loads of up to 1962 N in order to determine whether the equipment is correctly designed for the operating conditions to which it will be assigned. The mechanical design was developed in 3D CAD software SolidWorks® and the non-linear static analysis with the finite element method was performed in COMSOL Multiphysics® software. The studies were examined based on three possible working positions placed at the maximum permitted height of operation. The results obtained through the simulations were satisfactory since, the maximum stress computed in the structure did not exceed the admissible stress of the material.

KEYWORDS: finite element method, lifting loads, structural analysis.

NOMENCLATURA

Símbolos

E	Módulo de elasticidade	[Pa]
F	Força gerada pela carga	[N]
I	Momento de inércia de área	[m ⁴]
L	Comprimento da viga	[m]
y	Deflexão da viga	[m]
σ_e	Tensão de escoamento	[MPa]
ν	Coefficiente de Poisson	

Abreviaturas e acrômimos

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	2
2. METODOLOGIA	2
2.1. Dimensionamento da Estrutura	2
2.2. Cálculo Analítico.....	5
3. MODELO NUMÉRICO	6
3.1. Condições de Contorno	6
3.2. Definição dos Pares de Contatos	6
3.3. Materiais	7
3.4. Malha.....	7
3.5. Discretização Temporal.....	8
4. RESULTADOS	9
4.1. Resultado Analítico	9
4.2. Resultados Obtidos pela Análise por Elementos Finitos.....	9
4.2.1. Deslocamentos.....	9
4.2.2. Tensões	10
5. CONCLUSÕES	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
ANEXO I – DEFLEXÃO	16
APÊNDICE A – ESTUDO DE CONVERGÊNCIA DE MALHA	17

1. INTRODUÇÃO

A movimentação de cargas desempenha um papel crucial em uma ampla gama de contextos industriais, constituindo-se como um componente essencial para o funcionamento eficiente e seguro de empresas de diversos segmentos. A capacidade de mover cargas de forma eficaz aumenta a produtividade e contribui para a segurança dos trabalhadores e a otimização dos processos industriais. Para realizar essa tarefa, são utilizados equipamentos específicos, cada um com suas finalidades e características. Segundo Rudenko (1976), máquinas de elevação e transporte são utilizadas para mover cargas a distâncias relativamente curtas, diferente do transporte para longas distâncias, como por exemplo, caminhões, trens, navios, entre outros. Nesse contexto, uma série de equipamentos de elevação e movimentação de cargas emergem como ferramentas essenciais. Guindastes, empilhadeiras, talhas, pontes rolantes e transportadores são apenas alguns exemplos dentre uma ampla gama de opções disponíveis. Cada um desses equipamentos possui características únicas que os tornam adequados para diferentes tarefas e situações. A correta compreensão sobre o equipamento, suas vantagens e desvantagens, restrições e aplicações torna-se essencial no momento de escolha.

Carneiro (2012) afirma que a movimentação de cargas automatizada promove o aumento de produtividade, organização e, ainda, a redução de custos, pois com um plano de transporte de cargas eficiente, a mão de obra necessária para movimentar as cargas é reduzida, e custos extras resultantes de perdas e sinistros bem como acidentes de trabalho também são reduzidos. Entretanto, o custo de aquisição e aluguel desse tipo de maquinário pode ser considerado elevado para empresas de pequeno porte e, também, há despesas contínuas relacionadas à manutenção e ao treinamento de operadores e funcionários.

De acordo com Carneiro (2012), existem diversos tipos de equipamentos para a movimentação de cargas, entre eles, destacam-se:

- Transportadores: correias, roletes, rodízios, roscas e vibratórios;
- Guindastes, talhas e elevadores: guindastes fixos e móveis, de coluna e parede (Fig. 1.1), pontes rolantes, guinchos, monovias, elevadores;
- Equipamento de posicionamento, pesagem e controle: plataformas fixas e móveis, rampas, equipamentos de transferências.

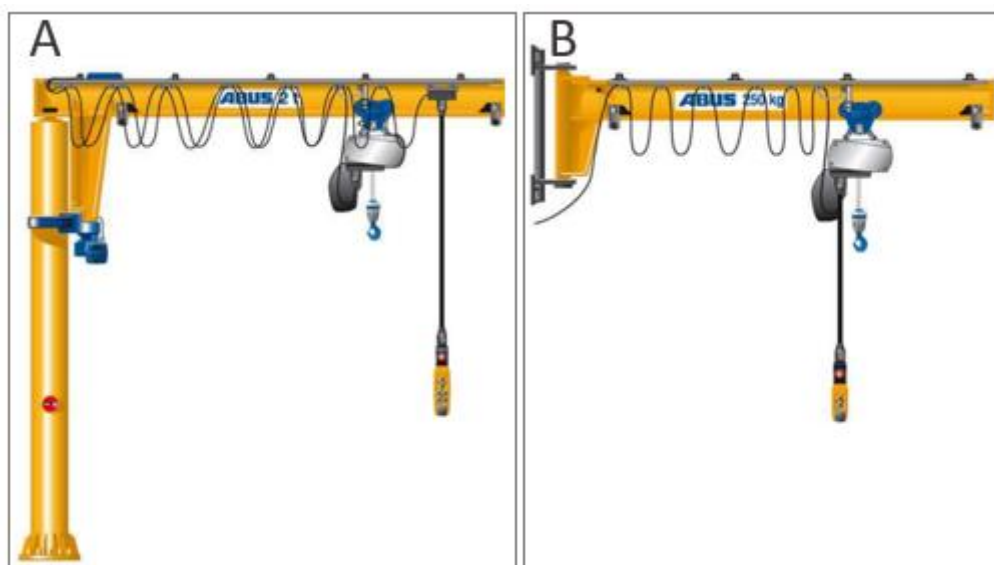


Figura 1.1 – Tipos de guindastes. Em A) Guindaste de coluna giratória; B) Guindaste de parede. Fonte: Adaptado de Passos (2011).

A movimentação eficiente de cargas é um desafio em diversas indústrias e empresas. Nesse contexto, as estruturas metálicas desempenham um papel essencial para garantir a segurança e a otimização dos processos. A análise estrutural pelo método dos elementos finitos (MEF) emerge como uma ferramenta para projetar e aprimorar essas estruturas. Portanto, tendo em vista a importância e a necessidade de máquinas para elevação de movimentação de cargas, torna-se relevante verificar a análise construtiva de uma estrutura destinada a esse fim.

1.1. Objetivos

O objetivo do presente trabalho é analisar de forma estática, a partir do método de elementos finitos, se uma estrutura metálica com 3 eixos para a elevação e movimentação de cargas está dimensionada para as condições de operação. A estrutura ainda não foi construída e a análise estática é feita de forma preliminar no projeto, ou seja, antecede as análises de fadiga e dinâmica. Através da abordagem numérica é possível compreender o comportamento estrutural em condições aproximadas às condições reais de operação, permitindo a identificação de pontos críticos e o desenvolvimento de soluções personalizadas. A análise será feita para um carregamento de 1962 N aplicado a um olhal presente na ponta da parte móvel horizontal da estrutura (Figura 2.1). Foram realizados os estudos com base em três possíveis posições de trabalho: com o braço reto, a 45° e a 90°, dispostos na altura máxima de operação. Para análise dos resultados, o critério de falha a ser utilizado será a tensão de von Mises, a fim de verificar a ocorrência de plastificação, ou seja, se ocorre a deformação permanente da estrutura.

2. METODOLOGIA

O projeto da estrutura foi previamente desenvolvido pela empresa Caete Engenharia, bem como a seleção de componentes e materiais, tendo em vista as condições de operação e cargas de trabalho. Porém, foi necessário realizar modificações em sua geometria original, a fim de preservar o contrato de confidencialidade de projeto entre empresa requerente e a prestadora de serviços (no caso, a Caete Engenharia).

2.1. Dimensionamento da Estrutura

O dimensionamento da estrutura foi feito a partir do espaço disponível para a sua instalação, respeitando os limites de altura e de deslocamento do extensor telescópico. O ambiente operacional na qual a estrutura será instalada não apresenta exposição aos efeitos climáticos, tais como chuva, sol, vento e altas temperaturas. A Figura 2.1 mostra a geometria com o braço reto, na maior altura possível de operação.

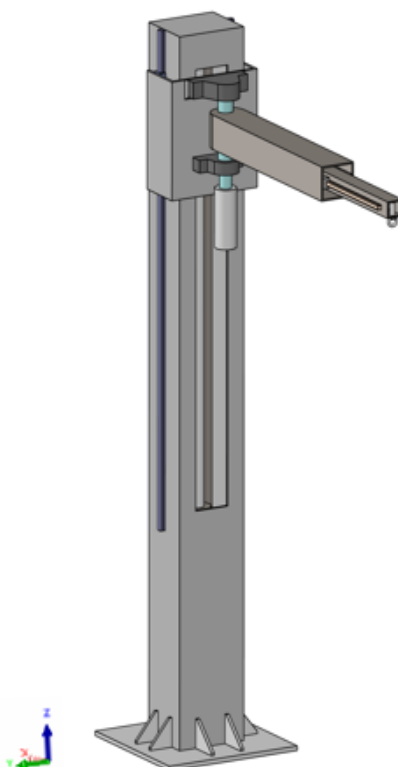


Figura 2.1 – Estrutura em sua forma final. Fonte: Autora.

A estrutura possui 3 m de altura e a estrutura horizontal, chamada de braço, conta com um extensor, o qual permite ser expandido até 1,3 m horizontalmente. A geometria foi desenhada no *software* CAD 3D SolidWorks®, sendo simplificada ao máximo, a fim de adaptá-la para a etapa de modelagem numérica. Os estudos foram desenvolvidos com base em três possíveis posições de trabalho em relação ao eixo x : braço reto, braço disposto a 45° e braço posicionado a 90° , como mostra a Figura 2.2.

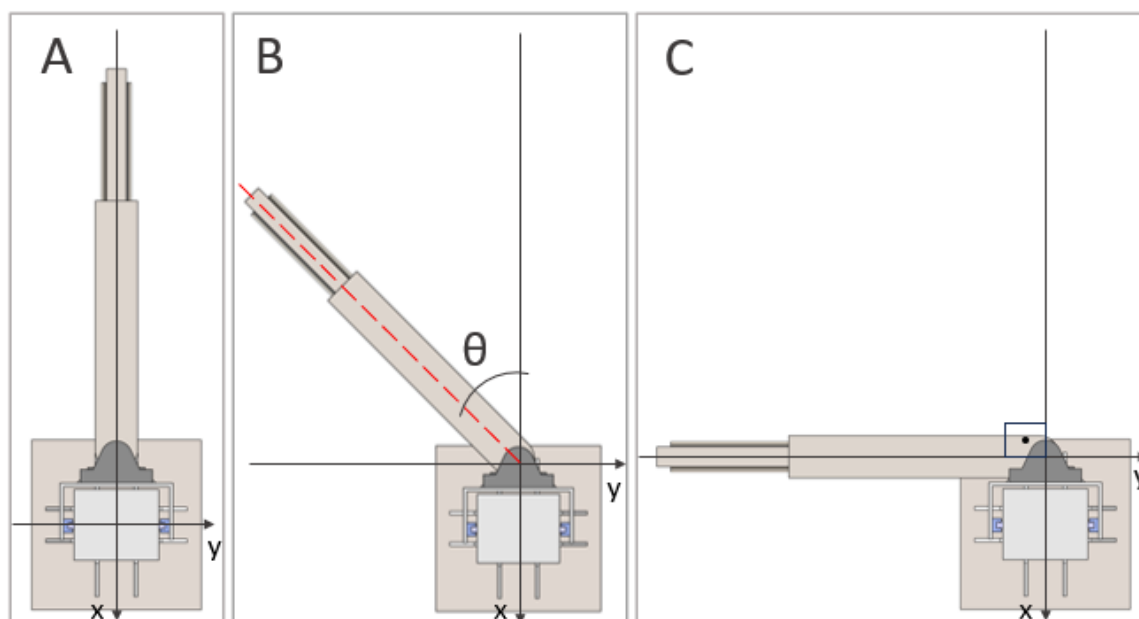


Figura 2.2 – Posições críticas de operação da estrutura. A) Braço reto; B) Braço a 45° ; C) Braço a 90° . Fonte: Autora.

Com o objetivo de facilitar a compreensão de funcionamento do projeto e facilitar a modelagem da estrutura no *software* de elementos finitos, COMSOL Multiphysics®, optou-se por dividir a geometria em três seções distintas, como mostra a Figura 2.3.

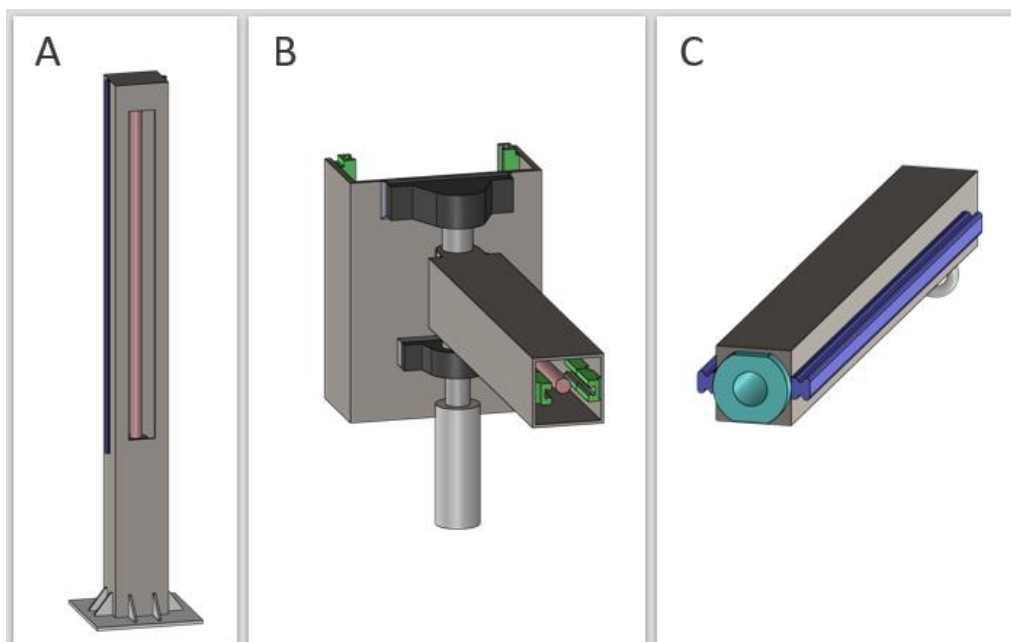


Figura 2.3 – Divisão da geometria. A) Coluna vertical; B) Base móvel do braço; C) Extensor do braço. Fonte: Autora.

A coluna vertical, embora tenha 3 m de altura, tem um limite de trabalho de 2,6 m. Uma caixa com motor elétrico acoplado à coluna, o qual não está representado na geometria, transfere o torque a um fuso de esferas, responsável por transformar movimento rotativo em movimento de translação. A fim de reduzir o atrito e aumentar a precisão de movimento são utilizados guias lineares, onde dois trilhos são instalados na coluna vertical e quatro patins são fixados simetricamente na estrutura móvel do braço, como mostra a Figura 2.4.

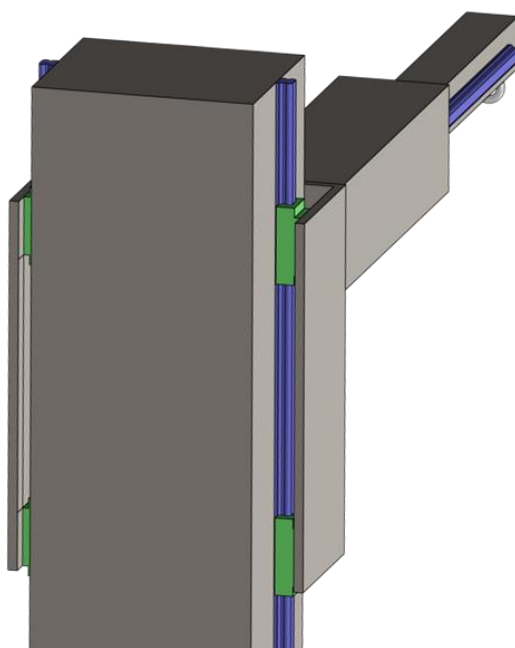


Figura 2.4 – Vista posterior da estrutura. Os patins estão representados na cor verde e os trilhos em azul. Fonte: Autora.

A base móvel do braço dispõe de um motor de passo responsável pela rotação do eixo no qual está acoplado a estrutura horizontal, permitindo variações no ângulo de trabalho do braço. O conjunto da base móvel também conta com 4 patins, dois de cada lado e 2 trilhos fixos à estrutura tubular do extensor. A estrutura horizontal (braço) apresenta um fuso de esferas, no qual a porca esférica (também conhecida como “castanha”), está fixa à estrutura do extensor, como mostra a Figura 2.5. O braço apresenta um comprimento máximo de operação (braço e extensor) de 1,3 metros.

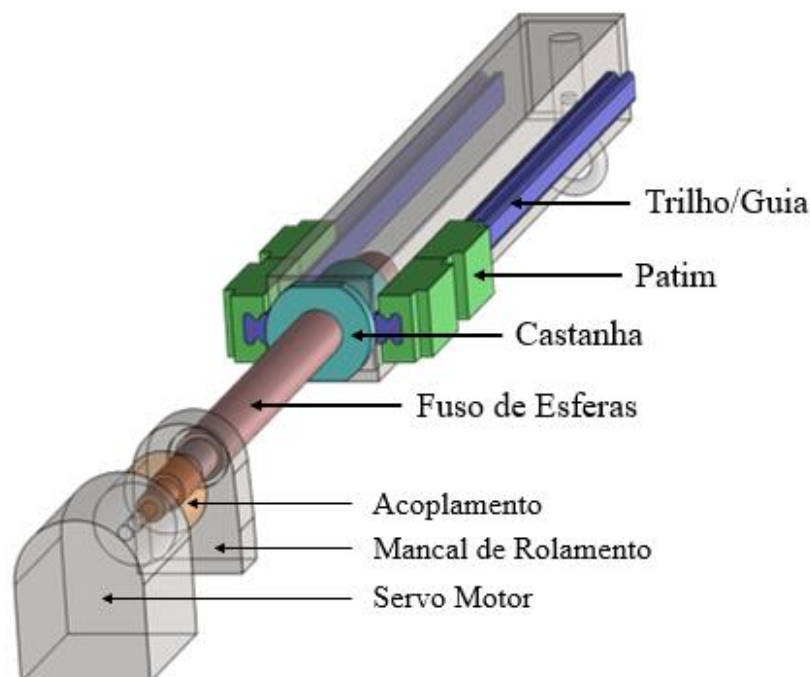


Figura 2.5 – Representação do funcionamento do movimento de translação do extensor. Fonte: Autora.

Devido à complexidade da geometria da estrutura, optou-se por recorrer a análise pelo método dos elementos finitos a fim de obter as tensões resultantes do carregamento na estrutura. Para a análise, foi considerado o Critério de Falha de von Mises (Máxima Energia de Distorção), pois de acordo com Chandrupatla e Belegundu (2002), a tensão de von Mises é utilizada como um critério para determinar o início da falha em materiais dúcteis, e, para que não ocorra a falha, a tensão von Mises não deve ultrapassar a tensão de escoamento do material obtida em ensaios experimentais.

Destaca-se, ainda, que existem normas técnicas e regulamentadoras referentes ao projeto e operação de equipamentos para movimentação e elevação de cargas, tais como a ABNT NBR 8400, NR11 e NR12. Entretanto, tais normas não serão abordadas no presente trabalho.

2.2. Cálculo Analítico

A fim de validar os resultados obtidos a partir do modelo numérico, procedeu-se à realização de um cálculo analítico conciso com o intuito de determinar a deflexão na extremidade do extensor, decorrente da carga aplicada no olhal. O objetivo do cálculo é verificar se o resultado analítico apresenta conformidade com a magnitude dos resultados obtidos pelas simulações. Para isso, a análise se baseou na aplicação da equação diferencial que descreve o comportamento elástico de uma viga em balanço submetida a flexão.

Devido ao cálculo ser realizado de forma concisa, foi considerada uma viga de seção contínua, ou seja, foi utilizada a seção transversal do tubo quadrado (extensor do braço) junto à seção transversal dos trilhos horizontais, aplicado ao comprimento total da estrutura

horizontal. O valor para o momento de inércia dessa seção foi obtido com auxílio da ferramenta “*Section Properties*”, através do *software* SolidWorks®. A viga é engastada e apresenta uma extremidade livre, na qual uma força concentrada é aplicada, a fim de representar a carga máxima de operação da estrutura. A seção da viga, para fins de cálculo, é uniforme, bem como seu módulo de elasticidade.

A equação final da deflexão vertical, obtida através da equação diferencial da linha elástica, detalhada no Anexo 1, é:

$$y = -\frac{PL^3}{3EI} \quad (1)$$

onde y é a deflexão máxima vertical [mm], P é a carga de operação [N] aplicada na extremidade livre da viga, L é o comprimento da viga [mm], E é o módulo de elasticidade do material da viga [MPa] e I é o momento de inércia da seção transversal da viga [mm⁴].

3. MODELO NUMÉRICO

A geometria, desenvolvida no SolidWorks®, após ser importada para o COMSOL Multiphysics®, foi dividida em 3 partes distintas e, ao realizar essa divisão no *software*, são formados pares de contato entre essas partes, de modo que o modelo computacional represente fidedignamente a estrutura a ser construída.

3.1. Condições de Contorno

A condição de engaste (*Boundary Fixed Constraint*) foi aplicada na face inferior da chapa localizada na base da estrutura. Esse parâmetro indica que, na face selecionada, os deslocamentos são nulos. Com o objetivo de representar a carga máxima de trabalho, foi aplicado ao domínio do olhal o recurso de adição de massa (*Added Mass*), com valor de 200 kg.

3.2. Definição dos Pares de Contatos

Os contatos localizados nas guias e nos patins, verticais e horizontais, foram definidos com atrito, utilizando o modelo de fricção de Coulomb (para análises estacionárias) com método de penalidade, onde são solicitados os seguintes parâmetros: coeficiente de atrito, a resistência ao deslizamento de coesão e a máxima tensão tangencial. De acordo com o catálogo do fabricante Kalatec, o valor do coeficiente de atrito para guias lineares de esferas é de 0,003. O valor da resistência ao deslizamento de coesão e o valor da máxima tensão tangencial foram deixados como o padrão definido pelo *software*, sendo, respectivamente: nulo e *Inf*. Segundo COMSOL (2022), a expressão padrão *Inf* indica que nenhum limite de máxima tração tangencial está ativo. Os contatos foram atribuídos como mostra a Figura 3.1.

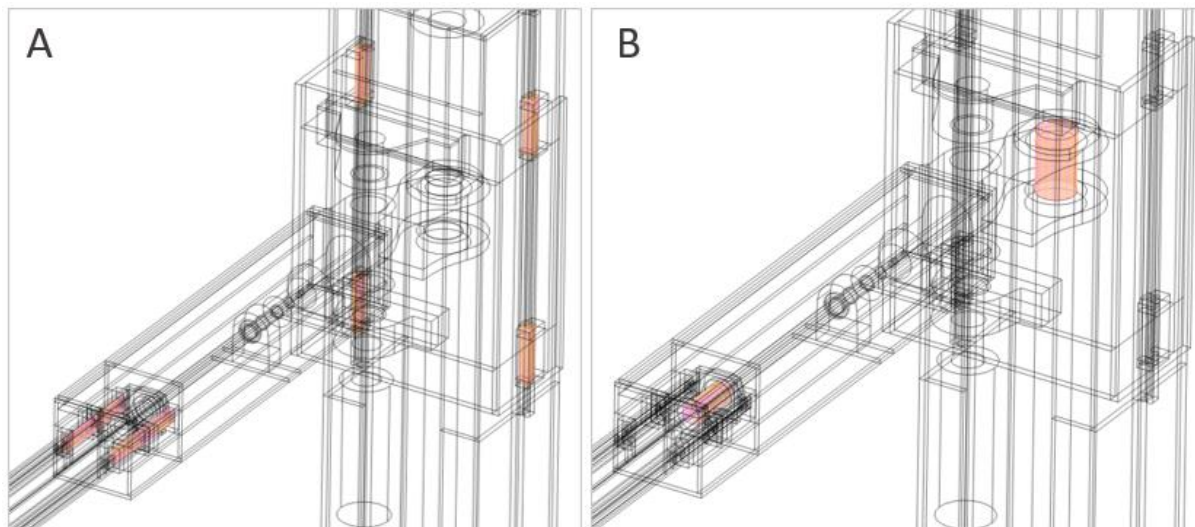


Figura 3.1 – Contatos modelados a partir da divisão da geometria. A) Contatos nas regiões em que os patins estão em contato com as guias lineares. B) Contato entre fuso e a porca de cada conjunto.

Para os fusos de esferas também foram atribuídos contatos com atrito, com os parâmetros iguais aos dos contatos nas guias e nos patins, exceto o coeficiente de atrito. Para fins de simplificação da geometria, a rosca dos fusos e das castanhas, bem como as esferas localizadas no interior da porca esférica, não foram modeladas. Segundo Norton (2013), experimentos indicam que o coeficiente de atrito entre um fuso e porca lubrificada por óleo é de aproximadamente, $0,15 \pm 0,05$. Portanto, para o coeficiente de atrito nos fusos de esferas, foi atribuído o valor de 0,15.

3.3. Materiais

Os materiais foram previamente selecionados, sendo atribuídos a partir da biblioteca de materiais do COMSOL, com as propriedades em conformidade com suas respectivas normas. Os fusos de esferas e as guias lineares foram selecionados através dos catálogos fornecidos pelo fabricante Kalatec, onde apresentam informações sobre o dimensionamento das peças e seus respectivos materiais.

Para as chapas da coluna, base móvel e braço, foi atribuído o aço ASTM A36 ($\sigma_e = 250 \text{ MPa}$); os conjuntos de fusos de esferas, de acordo com o fabricante, são fabricados com o aço SAE 4150 ($\sigma_e = 550 \text{ MPa}$) para o fuso e SAE 4120 ($\sigma_e = 400 \text{ MPa}$) para a castanha; o tubo quadrado do extensor do braço possui aço ASTM A500 Grau C ($\sigma_e = 345 \text{ MPa}$); as guias lineares, de acordo com o fabricante, são produzidas com o aço DIN 58CrMoV4 ($\sigma_e = 520 \text{ MPa}$) e os patins, de acordo com o fabricante, são de aço DIN 16MnCr5 ($\sigma_e = 440 \text{ MPa}$).

Os valores atribuídos ao coeficiente de Poisson e ao módulo de elasticidade foram obtidos através da biblioteca de materiais do COMSOL, o qual apresenta os gráficos em função da temperatura. Visto que a estrutura não é exposta a grandes variações de temperatura, o valor do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson dos materiais foram obtidos através da temperatura ambiente, o qual retornou os valores de $\nu = 0,29$ e $E = 212,86 \text{ GPa}$.

3.4. Malha

Devido à complexidade da geometria da estrutura, foram utilizados elementos quadráticos *serendipity* tetraédricos (10 nós), prismáticos (15 nós) e hexaédricos (20 nós). O estudo de convergência de malha foi feito para os domínios onde ocorrem maiores concentrações de tensões, como por exemplo, nas guias e nos patins localizados no braço e no

extensor. Tal estudo é apresentado no Apêndice 1 e o tamanho de elemento aplicado nos patins horizontais foi de 2 mm.

Norton (2013) afirma que as regiões da peça onde o gradiente de tensões varia de forma suave e, também, onde não ocorre distribuições de tensões, podem ser utilizados elementos mais grosseiros. Ainda de acordo com o autor, em contrapartida, elementos menores (mais refinados) devem ser aplicados em regiões onde o gradiente de tensões varia de forma acentuada. A Figura 3.2 ilustra a malha utilizada para modelar a estrutura.

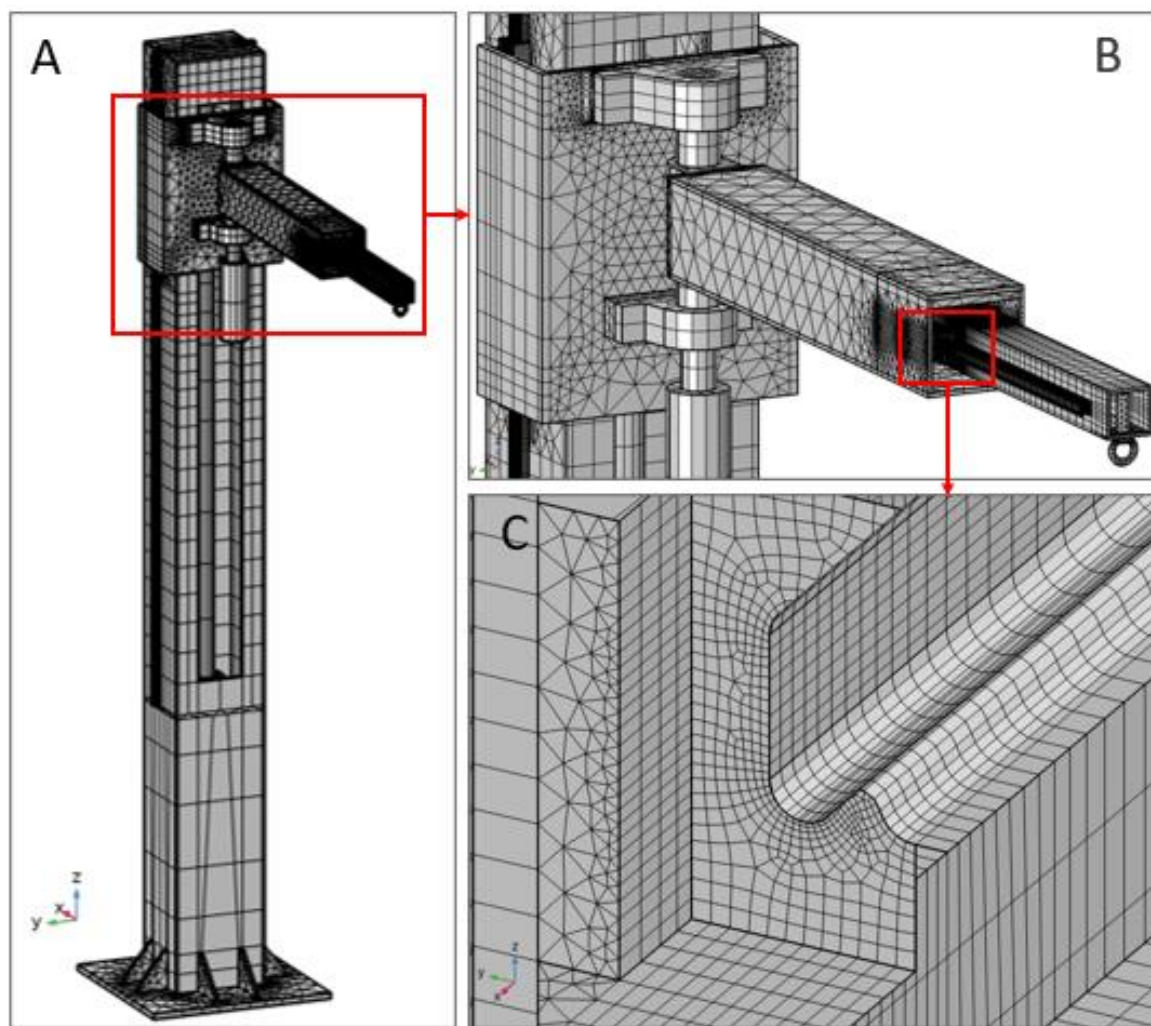


Figura 3.2 – Malha final utilizada para fazer a análise dos três casos a serem calculados. Em A) Estrutura completa; B) Malha utilizada no braço; C) Malha refinada na região dos patins e guias horizontais. Fonte: Autora.

3.5. Discretização Temporal

Em estruturas que apresentam problemas com contatos, a análise não-linear deve ser utilizada, pois, de acordo com Bathe (2014), se durante um carregamento um grau de liberdade que estava livre torna-se restrito, a resposta do problema é linear somente antes da mudança na condição de contorno. Para a análise não-linear empregada no problema, foi utilizado o recurso “*Auxiliary sweep*”, onde são definidos os critérios para a análise estática. De acordo com COMSOL (2022), estudos com contatos podem ser realizados dentro do regime estático, entretanto, deve ser utilizado o recurso de solução de continuação paramétrica. O recurso “*Auxiliary sweep*” atribui ao solucionador um “tempo virtual”. O parâmetro empregado para os

estudos foi definido de 0 a 1 segundo com intervalos de 0,25 segundo. A solução final é obtida através da interpolação dos resultados obtidos para cada convergência.

4. RESULTADOS

4.1. Resultado Analítico

A equação da linha elástica possibilita encontrar o valor de deflexão vertical na ponta do extensor do braço. O estudo analítico foi realizado a partir do caso em que o braço está posicionado a 0° em relação ao eixo x . A Tabela 4.1 apresenta os valores considerados para o desenvolvimento do cálculo.

Tabela 4.1 – Valores considerados para encontrar o valor da deflexão máxima. Fonte: Autora.

DESCRIÇÃO	VARIÁVEL	VALOR	
Comprimento da viga	L	1300	mm
Força peso	P	1962	N
Módulo de elasticidade	E	212860	MPa
Momento de inércia	I_{yy}	1913859,12	mm ⁴

Substituindo os termos na Equação 1, obtêm-se:

$$y = -\frac{1962(1320,5775)^3}{3(220000 * 1913859,12)}$$

$$y = -3,53 \text{ mm}$$

O valor encontrado a partir do cálculo analítico para a magnitude da deflexão máxima vertical, considerando que o sinal negativo indica a direção negativa do eixo vertical, é de 3,53 mm.

É importante ressaltar que se tem ciência da simplificação aplicada ao cálculo analítico, visto que o objetivo é viabilizar uma análise comparativa das grandezas e magnitudes obtidas através dos cálculos analítico e numérico. Tal simplificação, embora limitada, visa avaliar as discrepâncias entre as abordagens analítica e computacional, assegurando a solidez e validade das conclusões obtidas.

4.2. Resultados Obtidos pela Análise por Elementos Finitos

4.2.1. Deslocamentos

A análise dos deslocamentos foi realizada através da deformação, na direção z , que a estrutura apresenta de acordo com o posicionamento do braço, a partir do carregamento máximo estipulado de operação. O estudo realizado para o caso em que o braço está posicionado a 0° em relação ao eixo x indica um deslocamento de 3,33 mm no sentido negativo do eixo z .

A análise feita para o braço posicionado a 45° em relação ao eixo x aponta, na extremidade do extensor, um deslocamento vertical de 3,61 mm no sentido negativo do eixo z e para o caso em que o braço está a 90° em relação ao eixo x , o deslocamento vertical obtido através da simulação foi de 3,78 mm no sentido negativo do eixo z . A Figura 4.1 mostra o mapa de deslocamentos para os três casos analisados.

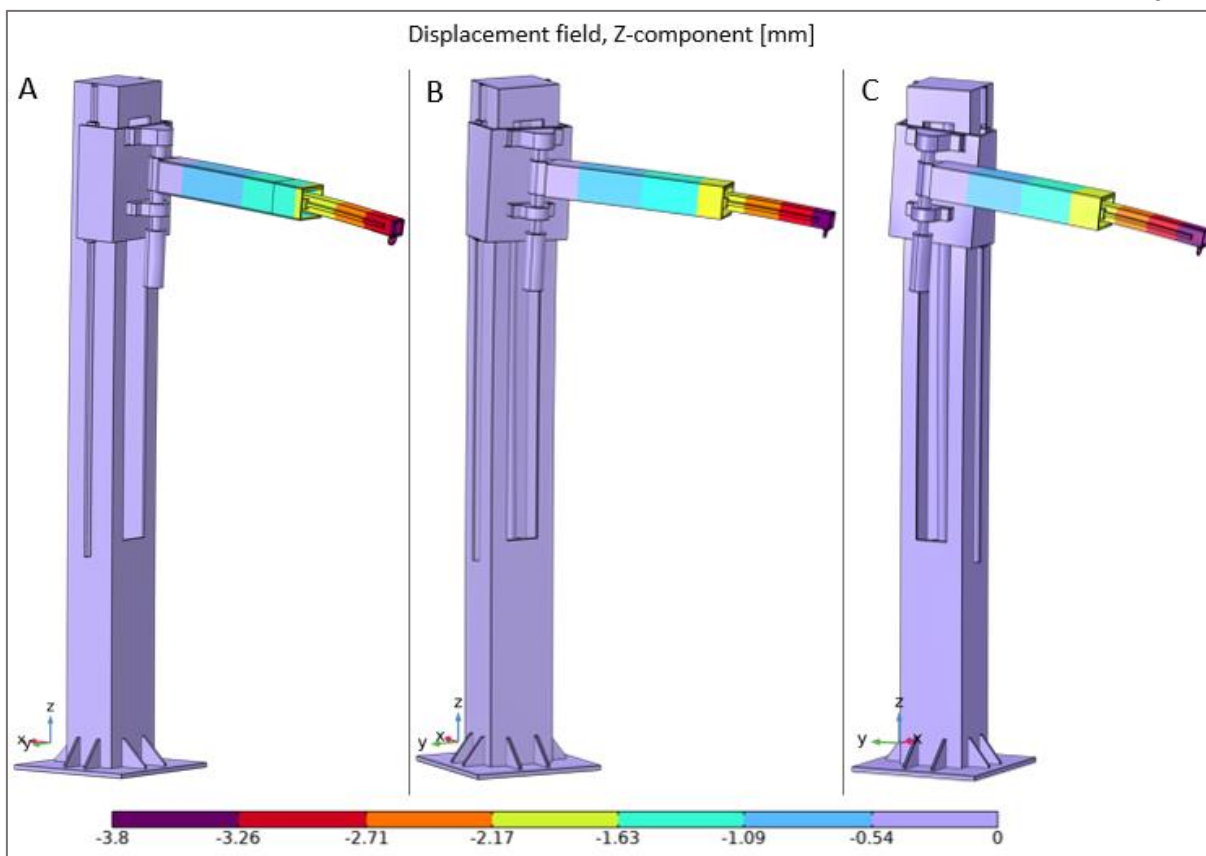


Figura 4.1 – Mapa de deslocamento vertical, em milímetros, para as três posições de trabalho em relação ao eixo x . A) Braço reto; B) Braço a 45° ; C) Braço a 90° . Escala de deformação: 50. Fonte: Autora.

Visto que o valor da magnitude de deflexão vertical obtido através do cálculo analítico foi de 3,53 mm, pode-se afirmar que os resultados obtidos por meio das simulações numéricas estão em concordância, uma vez que a diferença entre o valor analítico da deflexão e o valor numérico obtido para o caso em que o braço está a 0° em relação ao eixo x foi de 5,67%.

4.2.2. Tensões

A análise pelo método de elementos finitos apresenta o comportamento da estrutura em diferentes posições de operação e sob determinado carregamento. As análises de tensões de von Mises demonstram que a tensão máxima atingida é de 153 MPa para os três casos de estudo. O valor máximo, para os três casos analisados, foi apresentado na região dos patins, localizados no braço da estrutura. A Figura 4.2 apresenta o resultado obtido pelas simulações do mapa de tensões para as três posições distintas do braço.

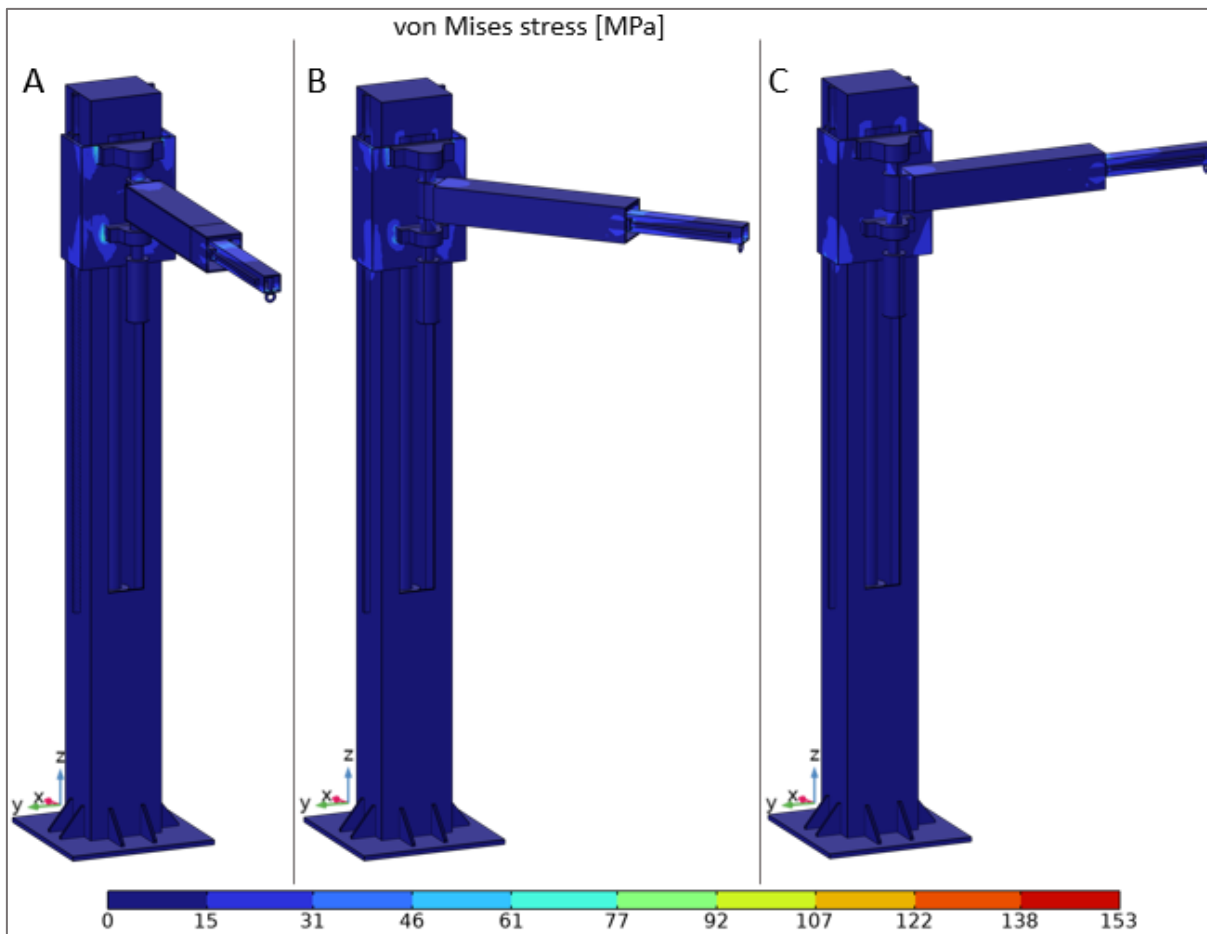


Figura 4.2 – Mapa de tensões de von Mises, em MPa, para as três posições de trabalho em relação ao eixo x . A) Braço reto; B) Braço a 45° ; C) Braço a 90° . Fonte: Autora.

O mapa de tensões von Mises na região em que ocorrem os maiores valores de tensões nos patins horizontais é, de modo geral, o mesmo para os três casos analisados. Entretanto, a tensão máxima apontada a partir das simulações não é real, visto que a região apresenta uma concentração de tensão, particularidade muito discutida na teoria de análise por elementos finitos. Apesar de o material não apresentar tensões de valores críticos, ou seja, acima da sua tensão de escoamento (o que levaria à falha da estrutura), regiões que apresentam concentrações de tensões devem ser analisadas com cautela. As tensões máximas podem ser atribuídas através de elementos próximos aos elementos encontrados na concentração de tensão. Para os três casos de estudo, os elementos analisados para determinar a máxima tensão produzida na estrutura estão distantes em 1 elemento da concentração de tensão, como mostra a Figura 4.3.

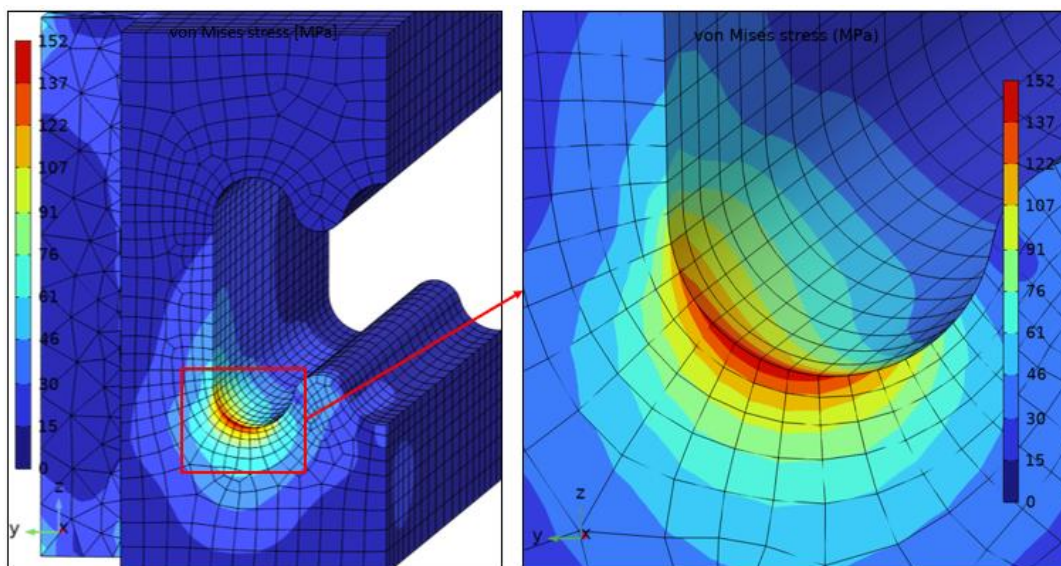


Figura 4.3 – Região do patim que apresenta a maior concentração de tensão na estrutura. Tensão máxima de 152 MPa para o caso em que o braço está posicionado a 0° do eixo x . Fonte: Autora.

A Figura 4.4 mostra o mapa de tensões na região da base móvel e do braço na sua posição de 0° em relação ao eixo x .

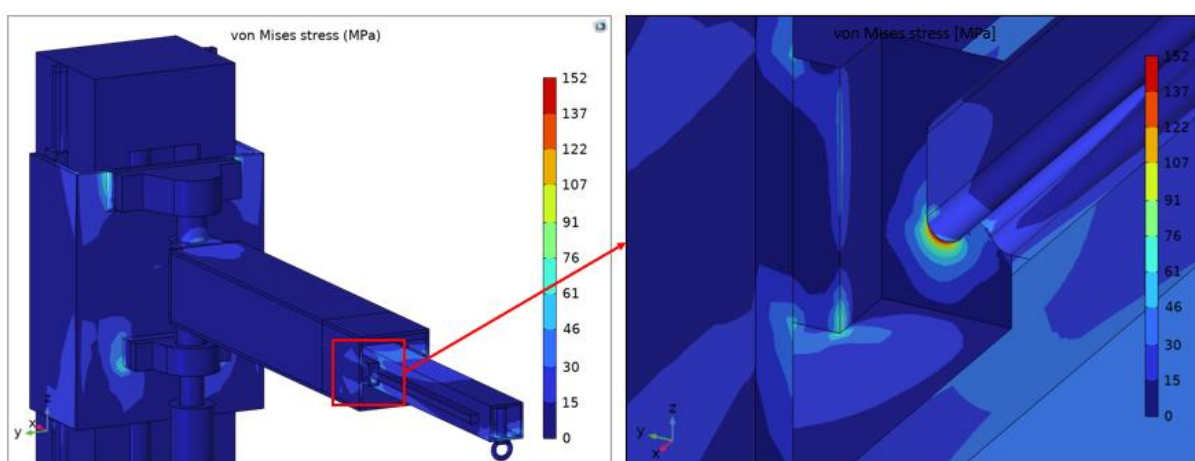


Figura 4.4 – Mapa de tensões von Mises, em MPa, para o braço posicionado a 0° do eixo x . À esquerda, tensões na região da base móvel e braço; À direita, tensões concentradas na região dos patins. Fonte: Autora.

Pode-se observar, a partir da Figura 4.4, a ocorrência de uma descontinuidade no campo de tensões dos patins em relação às tensões dos trilhos, visto que a tensão no patim apresenta um valor de 115 MPa (73,9% menor que a tensão de escoamento do material) e, nos trilhos, a tensão na região de contato com os patins é de 41,5 MPa, 92% menor que o valor da tensão de escoamento do material. O fato de surgir uma região que apresenta uma descontinuidade no mapa de tensões deve-se ao fato de que a área de contato dos trilhos é relativamente maior em comparação à área de contato dos patins, ou seja, a tensão nos trilhos é distribuída através da sua área de contato e, à medida que a densidade da malha na região de concentração de tensão aumenta, o valor dessa tensão tende ao infinito, visto que a tensão é a medida de força pela área e, ao diminuir a área, a tensão aumenta.

É importante ressaltar que o mapa de tensões nos patins, bem como nos demais casos de posicionamento do braço, é simétrico, ou seja, os mesmos valores de tensões encontrados no patim esquerdo serão encontrados no patim direito. Entretanto, para o restante da geometria há

uma mudança no mapa de tensões nos casos em que o braço está posicionado a 45° e 90° do eixo x , indicando pequena assimetria das tensões. A Figura 4.5 apresenta o mapa de tensões von Mises, para o braço posicionado a 45° do eixo x , o qual indica um valor de 110 MPa (75% menor que a tensão de escoamento do material), localizado nos patins horizontais. Na região de contato nos trilhos, a tensão apresenta o valor de 37,8 MPa, que representa cerca de 92,7% menor que o valor da sua tensão de escoamento.

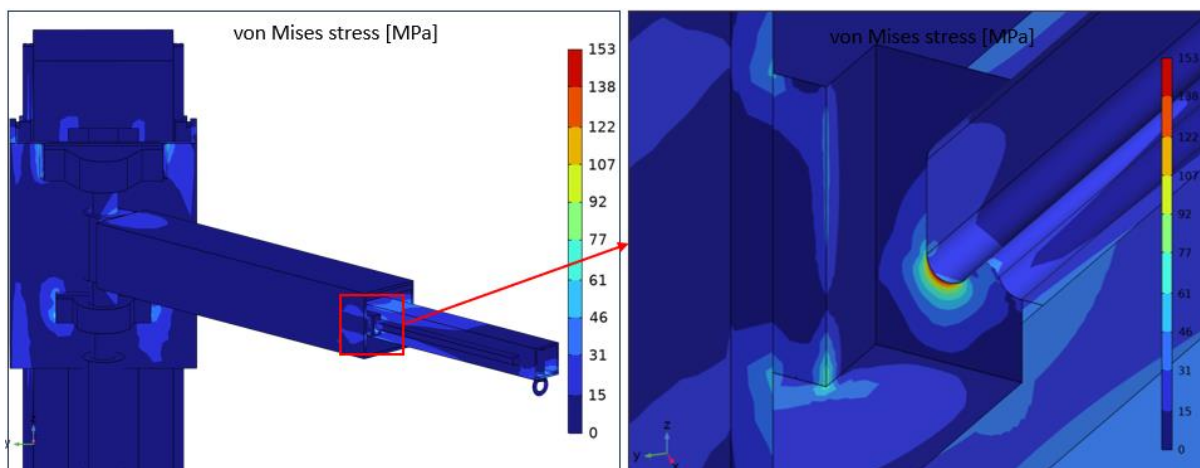


Figura 4.5 – Mapa de tensões von Mises, em MPa, para o braço posicionado a 45° do eixo x . À esquerda, tensões na região da base móvel e braço; À direita, tensões concentradas na região dos patins. Fonte: Autora.

A Figura 4.6 apresenta as tensões von Mises para o braço posicionado a 90° em relação ao eixo x . O estudo indica uma tensão de 117 MPa localizada nos patins horizontais (73,4% menor que a tensão de escoamento do material) e a região de contato nos trilhos apresenta uma tensão de 43 MPa, que representa cerca de 91,7% menor que o valor da tensão de escoamento do material.

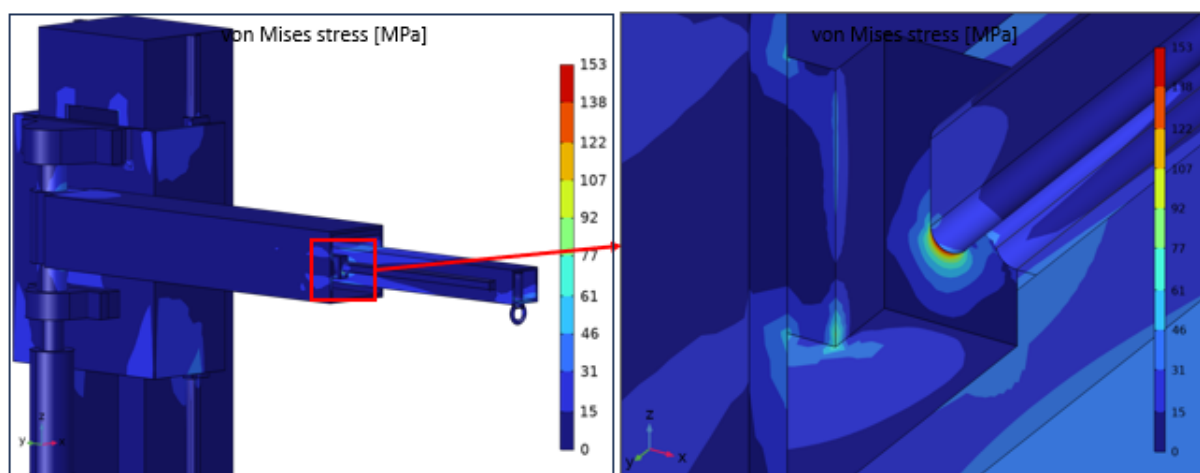


Figura 4.6 – Mapa de tensões von Mises, em MPa, para o braço posicionado a 90° do eixo x . À esquerda, tensões na região da base móvel e braço; À direita, tensões concentradas na região dos patins. Fonte: Autora.

5. CONCLUSÕES

Através da utilização do método de elementos finitos foi possível realizar uma avaliação abrangente do comportamento estrutural da máquina em algumas condições de operação. O objetivo foi verificar se a estrutura estava devidamente dimensionada para suportar um carregamento de 1962 N, aplicado por meio de um olhal na extremidade da parte móvel

horizontal. Ao considerar as três posições de trabalho (em relação ao eixo x): com o braço reto, a 45° e com o braço a 90° , todas dispostas na altura máxima de operação, foi possível obter uma compreensão de suas respostas estruturais. A análise numérica permitiu a identificação de potenciais pontos críticos e através da visualização dos resultados, é possível compreender como a estrutura irá se comportar em condições aproximadas às reais.

Com base nas simulações realizadas, foi constatado que a tensão máxima apresentada na estrutura é de 117 MPa, cerca de 73,4% menor que o valor da tensão de escoamento do material. Além disso, foi conduzido um cálculo analítico para validar os dados obtidos a partir da análise por elementos finitos. Essa validação corroborou os resultados numéricos, confirmando a adequação do modelo de elementos finitos da estrutura.

A partir dos resultados obtidos, é possível observar que a estrutura metálica examinada não atingiu escoamento, o que indica que ela possui uma margem de segurança significativa em relação à carga de trabalho proposta. Isso é um indicativo de que o dimensionamento da estrutura e das escolhas de materiais feitas durante o processo de projeto foram eficazes.

No entanto, é importante ressaltar que, mesmo com os resultados favoráveis, a melhoria contínua é uma diretriz crucial para o desenvolvimento de máquinas e estruturas. Os resultados adquiridos a partir desta análise podem ser usados para identificar áreas onde melhorias podem ser feitas, seja na eficiência de materiais, geometria ou distribuição de cargas.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a análise de flambagem, visto que a coluna vertical está sob carga compressiva, podendo ocasionar alterações súbitas na estrutura. Nesse contexto, recomenda-se realizar a abordagem de análise de vida em fadiga da estrutura, o qual irá aumentar sua eficácia e durabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM. **ASTM A36/A36M**: Standard Specification for Carbon Structural Steel. 2019.
- ASTM. **ASTM A500/A500M**: Standard Specification for Cold-Formed Welded and Seamless Carbon Steel Structural Tubing in Rounds and Shapes. 2021.
- BATHE, K. J. **Finite Element Procedures**. 2 ed. Watertown: Prentice-Hall, 2014.
- BEER, F. P; JOHNSTON, E. R; DEWOLF, J. T; MAZUREK, D. F. **Mecânica dos Materiais**. 7 ed. São Paulo: AMGH Editora, 2015.
- Beuth Verlag GmbH. **DIN 17200**: Steels for quenching and tempering. 1987.
- BRINGAS, E. J. **Handbook of Comparative World Steel Standards**: ASTM Stock DS67D. 5 ed. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2016.
- CARNEIRO, R. J. **Movimentação e Armazenagem**. Curitiba: IFPR, 2012. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/375702385/Livro-Movimentacao-e-Armazenagem-pdf#>. Acesso em: 02 jul. 2023.
- CHANDRUPATLA, T. R.; BELEGUNDU, A. D. **Introduction to Finite Elements in Engineering**. 3 ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.
- COMSOL. **COMSOL Documentation**, 2022.
- ISO. **ISO 683-3. Heat-treatable steels, alloy steels and free-cutting steels**: Part 3: Case-hardening steels. 2018.
- Kalatec Automação Industrial. <<http://www.kalatec.com.br>>. Acesso em 10/06/2023.
- NORTON, L. R., 2013. **Projeto de Máquinas**: uma abordagem integrada. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- PASSOS, L. C. **Pontes Rolantes, Guindastes Giratórios e Acessórios de Movimentação de Cargas**. Brasil. 2011.
- RAO, S. S. **The Finite Element Method in Engineering**. 4 ed. Burlington: Elsevier, 2005.
- RUDENKO, N. **Máquinas de Elevação e Transporte**. 1 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 1976.

ANEXO I – DEFLEXÃO

A Figura I.1 mostra o equacionamento proposto por Beer et al (2015) para encontrar a equação da linha elástica de uma viga e, ao final, sua deflexão.

ΟΙΣΤΥΟ 9 • ΟΡΙΘΜΟΣ 011 ΜΗΝΙΑΣ 575

Aplicação do conceito 9.1

A viga em balanço AB tem seção transversal uniforme e suporta uma força P na sua extremidade livre A (Fig. 9.9a). Determine a equação da linha elástica, a deflexão e a inclinação em A .

Usando o diagrama de corpo livre da parte AC da viga (Fig. 9.9b), em que C está localizado a uma distância x da extremidade A ,

$$M = -Px \quad (1)$$

Substituindo M na Equação (9.4) e multiplicando ambos os membros pela constante EI , escrevemos

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = -Px$$

Integrando em x ,

$$EI \frac{dy}{dx} = -\frac{1}{2}Px^2 + C_1 \quad (2)$$

Observamos agora que na extremidade engastada B temos $x = L$ e $\theta = dy/dx = 0$ (Fig. 9.9c). Substituindo esses valores na Equação (2) e resolvendo para C_1 , temos

$$C_1 = \frac{1}{2}PL^2$$

que usamos novamente na Equação (2):

$$EI \frac{dy}{dx} = -\frac{1}{2}Px^2 + \frac{1}{2}PL^2 \quad (3)$$

Integrando ambos os membros da Equação (3)

$$EI y = -\frac{1}{6}Px^3 + \frac{1}{2}PL^2x + C_2 \quad (4)$$

Contudo, em B temos $x = L$, $y = 0$. Substituindo na Equação (4)

$$0 = -\frac{1}{6}PL^3 + \frac{1}{2}PL^3 + C_2$$

$$C_2 = -\frac{1}{3}PL^3$$

Utilizando o valor de C_2 novamente na Equação (4), obtemos a equação da linha elástica:

$$EI y = -\frac{1}{6}Px^3 + \frac{1}{2}PL^2x - \frac{1}{3}PL^3$$

ou

$$y = \frac{P}{6EI}(-x^3 + 3L^2x - 2L^3) \quad (5)$$

A deflexão e a inclinação em A são obtidas fazendo $x = 0$ nas Equações (3) e (5).

$$y_A = -\frac{PL^3}{3EI} \quad \text{e} \quad \theta_A = \left(\frac{dy}{dx}\right)_A = \frac{PL^2}{2EI}$$

Figura I.1 – Equacionamento proposto por Beer et al (2015) para a equação da linha elástica de uma viga. Fonte: Beer et al.

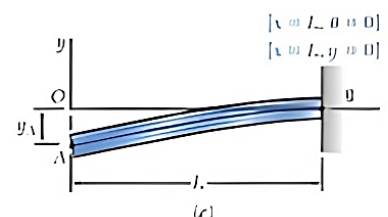
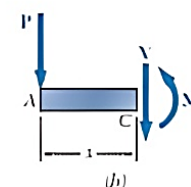
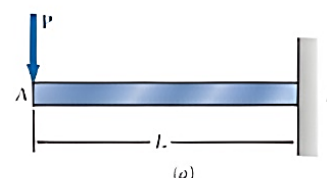


Fig. 9.9 (a) Viga em balanço com carregamento na extremidade (b) Diagrama do corpo livre da parte AC (c) Esboço da deformada e condições de contorno.

APÊNDICE A – ESTUDO DE CONVERGÊNCIA DE MALHA

A Tabela A.1 apresenta os valores para o tamanho da malha em relação à tensão obtida a partir da simulação.

Tabela A.1 – Valores considerados para o estudo da curva de convergência. Fonte: Autora.

Tamanho dos Elementos [mm]	DOFs	Tensão [MPa]	Erro %
20	2042936	25,762	
16	2046812	55,547	-53,62
12	2057564	69,386	-19,94
10	2068472	78,371	-11,46
8	2090726	88,448	-11,39
6	2165900	97,136	-8,94
4	2351160	106,1	-8,45
2	2401520	111,82	-5,12
1	2950880	112,84	-0,90

O Gráfico A.1 apresenta a curva obtida a partir dos valores apresentados na Tabela A.1.

Gráfico A.1 – Curva de convergência de malha. Fonte: Autora.

