



INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO

Campus Recife
Engenharia Mecânica

RENATA DIAS DA SILVA

**PROJETO DE UMA ESTRUTURA METÁLICA: ANÁLISE ESTRUTURAL,
DIMENSIONAMENTO E DETALHAMENTO NO PGL 3B NO PORTO DE SUAPE**

Recife - PE

2025

RENATA DIAS DA SILVA

**PROJETO DE UMA ESTRUTURA METÁLICA: ANÁLISE ESTRUTURAL,
DIMENSIONAMENTO E DETALHAMENTO NO PGL 3B NO PORTO DE SUAPE**

Trabalho de conclusão de curso apresentada
ao Departamento de Engenharia Mecânica do
Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de
Pernambuco, como requisito para a obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Dr. José Ângelo Peixoto da
Costa

Recife
2025

S586p

2025 Silva, Renata Dias da.

Projeto de uma estrutura metálica : análise estrutural, dimensionamento, e detalhamento no PGL 3B no Porto de Suape / Renata Dias da Silva. --- Recife: A autora, 2025.

66f. il. Color.

TCC (Curso de Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Pernambuco, 2025.

Inclui Referências.

Orientador: Professor Dr. José Ângelo Peixoto da Costa.

1. Engenharia Mecânica. 2. Estrutura metálica. 3. Manutenção portuária. 4. Porto de Suape. I. Título. II. COSTA, José Ângelo Peixoto da. (orientador). III. Instituto Federal de Pernambuco.

CDD 620.1 (23 ed.)

**PROJETO DE UMA ESTRUTURA METÁLICA: ANÁLISE ESTRUTURAL,
DIMENSIONAMENTO E DETALHAMENTO NO PGL 3B NO PORTO DE SUAPE**

Trabalho aprovado. Recife, 04/04/25.

Prof. Dr. José Ângelo Peixoto da Costa
Professor Orientador

Prof. Dr. Frederico Duarte de menezes
Avaliador Interno

Prof. Dr. Alex Elton de Moura
Avaliador Externo

Recife
2025

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por ser essencial em minha vida, socorro presente na hora da angústia, ao meu esposo Agnes Julio, aos meus pais e irmãos que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Àquele que orchestra o universo, dedico este trabalho, como um testemunho do poder da fé, que em diversas ocasiões se revelou mais eficaz do que qualquer dose de cafeína. Agradeço a Deus por me lembrar de respirar profundamente e confiar, mesmo diante dos gigantes aparentemente invencíveis.

Agradeço também ao meu esposo, Agnes Julio, que de forma especial e carinhosa me deu força e coragem, me apoiando nos momentos de dificuldades. E não deixando de agradecer de forma grata e grandiosa aos meus pais, Raimundo Sobrinho e Maria Luciana, e irmãos Rayane e Rafael pela força e principalmente pelo carinho.

A Antony Buchegger, por seus ensinamentos e pela paciência demonstrada nas supervisões das minhas atividades de estágio, que foram essenciais para o desenvolvimento deste projeto. Ao meu orientador, Prof. Dr. José Ângelo Peixoto da Costa, por sua compreensão e por ter aceitado me acompanhar nesta trajetória acadêmica.

Aos meus colegas de graduação, pela amizade e companheirismo que tornaram nossa trajetória mais do que uma série de sessões de aprendizado, mas momentos de verdadeira alegria. Ao IFPE, pelas oportunidades e pelo conhecimento adquirido ao longo dessa caminhada.

Por fim, minha gratidão à presente banca, por sua valiosa contribuição nesta defesa, e a todos que, direta ou indiretamente, me ajudaram a alcançar este momento tão significativo.

*“Tudo tem o seu tempo determinado,
e há tempo para todo o propósito
debaixo do céu”- Eclesiastes 3:1*

RESUMO

Este trabalho visa projetar uma estrutura metálica para aprimorar o acesso durante as atividades de manutenção do PGL 3B no Porto de Suape. Atualmente, a configuração do píer apresenta restrições logísticas que dificultam a movimentação de caminhões, essenciais para a realização da manutenção das defensas marítimas. A necessidade dessa melhoria surge da limitação de espaço disponível para a manobra desses veículos, um fator determinante para a eficiência das operações de manutenção portuária. Como solução, propõe-se o desenvolvimento de uma estrutura metálica otimizada, projetada para facilitar a movimentação das defensas de maneira mais eficaz. A concepção e o dimensionamento desta estrutura são realizados com base em cálculos precisos, atendendo aos critérios técnicos estabelecidos pela norma ABNT NBR 8800. Além disso, a análise estrutural será complementada por simulações no Autodesk Inventor utilizando a ferramenta FEA (Finite Element Analysis) para validar os resultados obtidos nos cálculos analíticos.

Palavra-Chave: Estrutura metálica; manutenção portuária; FEA; NBR 8800; simulação.

ABSTRACT

This work aims to design a metal structure to improve access during maintenance activities at PGL 3B in the Port of Suape. Currently, the pier configuration presents logistical constraints that hinder the movement of trucks, essential for the maintenance of maritime fenders. The need for this improvement arises from the limited space available for maneuvering these vehicles, a crucial factor for the efficiency of port maintenance operations. As a solution, the development of an optimized metal structure is proposed, designed to facilitate the movement of the fenders more effectively. The design and sizing of this structure are based on precise calculations, adhering to the technical criteria established by the ABNT NBR 8800 standard. Additionally, the structural analysis will be complemented by simulations in Autodesk Inventor using the FEA (Finite Element Analysis) tool to validate the results obtained from the analytical calculations.

Keywords: Metal structure; port maintenance; FEA; NBR 8800; simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 PORTO DE SUAPE	13
FIGURA 2 EXEMPLO DE GUINDAUTO	15
FIGURA 3 DEFENSA DO PGL 3B.....	16
FIGURA 4 COMPONENTES DA DEFENSA DO PGL	17
FIGURA 5 EXEMPLO DE ESTRUTURA METÁLICA.....	20
FIGURA 6 EXEMPLO DE ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS	21
FIGURA 7 PERFIL ESTRUTURAL I E H.....	22
FIGURA 8 FLUXOGRAMA DE ATIVIDADES.	25
FIGURA 9 PGL 3B SUAPE. (A) PARTE DO PGL 3B (B) LOCAL ONDE VAI FICAR A ESTRUTURA METÁLICA.	26
FIGURA 10 VISTA ISOMÉTRICA DA ESTRUTURA METÁLICA NO PGL 3B.....	26
FIGURA 11 VISTA ISOMÉTRICA DA ESTRUTURA.....	27
FIGURA 12 DIMENSÕES DAS PEÇAS	28
FIGURA 13 ESFORÇOS ATUANTES EM UMA SEÇÃO.....	31
FIGURA 14 DIAGRAMA DE MOMENTO FLETOR E ESFORÇO CORTANTE	32
FIGURA 15 DESENHO DA PLATAFORMA	35
FIGURA 16 VISTA FRONTAL E CORTE DA VISTA LATERAL DA PLATAFORMA	36
FIGURA 17 SUPORTE ESQUERDO	37
FIGURA 18 SUPORTE DIREITO	38
FIGURA 19 VISTA FRONTAL DA PLATAFORMA	39
FIGURA 20 EQUIPAMENTOS DE MOVIMENTAÇÃO. (A) CAMINHÃO MUNCK. (B) CABRESTANTE E PÓRTICO.....	40
FIGURA 21 DESENHO ISOMÉTRICO DOS PERFIS HORIZONTAIS	42
FIGURA 22 DESENHO ISOMÉTRICO DA ESTRUTURA COM UMA COLUNA.....	43
FIGURA 23 DIAGRAMA DA PEÇA LONGITUDINAL 1 COM CARGA.	44
FIGURA 24 DIAGRAMA DA PEÇA LONGITUDINAL 2 COM CARGA.	44
FIGURA 25 DIAGRAMA DE ESFORÇO CORTANTE	46
FIGURA 26 DIAGRAMA DE MOMENTO FLETOR.....	46
FIGURA 27 DIAGRAMA DE ESFORÇO CORTANTE VIGA.....	48
FIGURA 28 DIAGRAMA DE MOMENTO FLETOR VIGA	48
FIGURA 29 VISTA DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO PERFIL.	50
FIGURA 30 PILAR	54
FIGURA 31 ANÁLISE DO DESLOCAMENTO.....	56
FIGURA 32 ANÁLISE DO FATOR DE SEGURANÇA	56
FIGURA 33 TENSÃO DE VON MISES	57

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO ASTM A36.	27
TABELA 2 LISTA DO MATERIAL DA PLATAFORMA	36
TABELA 3 LISTA DO MATERIAL DO SUPORTE ESQUERDO.....	37
TABELA 4 LISTA DE MATERIAL DO SUPORTE DIREITO.....	38
TABELA 5 LISTA DE MATERIAL DO PISO	39
TABELA 6 PERFIL SELECIONADO.....	49
TABELA 7 CARACTERÍSTICAS DO PERFIL.....	49
TABELA 8 FLECHA MÁXIMA.....	54
TABELA 9 LISTA DE MATERIAL DO PILAR	55
TABELA 10 CARACTERÍSTICAS DOS PERFIS.	55
TABELA 11 RESUMO DOS RESULTADOS.....	60

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	JUSTIFICATIVA	15
3	OBJETIVOS.....	18
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
4.1	Introdução às Estruturas Metálicas.....	19
4.2	Análise Estrutural em Projetos de Estruturas Metálicas	20
4.3	Dimensionamento de Perfis e Ligações	21
4.4	Normas Técnicas e Regulamentações.....	23
4.5	Uso De Software no Projeto e Detalhamento de Estruturas Metálicas	23
4.6	Propriedades e Aplicações do Aço ASTM A36.....	24
5	MATERIAIS E MÉTODOS	24
5.1	Levantamento.....	25
5.2	Projeto Preliminar	26
5.3	Análise Estrutural Detalhada	33
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	34
6.1	Resultados Alcançados.....	34
6.1.1	Modelagem 3D Detalhada:.....	34
6.1.2	Dimensionamento dos Elementos de Fixação.....	39
6.1.3	Dimensionamento e Seleção dos Perfis.....	41
6.1.4	Os Cálculos das Reações, bem como as equações do esforço cortante e do Momento Fletor para a Viga 1.	44
6.1.5	Diagrama de Momento Fletor (M).....	45
6.1.6	Os Cálculos das Reações, bem como as equações do esforço cortante e do Momento Fletor para a Viga 2.	46
6.1.7	Diagrama de Força Cortante (V).....	47
6.1.8	Diagrama de Momento Fletor (M).....	47
6.1.9	Análise Estrutural e Simulações	55
6.2	Discussão dos Resultados	57
7	CONCLUSÃO	62
	REFERENCIAS.....	63

1 INTRODUÇÃO

O Porto de Suape, localizado em Pernambuco, Brasil, é um dos principais complexos industriais-portuários do país, inaugurado em 1979. Projetado como um porto de águas profundas, Suape atende grandes navios e as crescentes demandas do comércio internacional, beneficiado por sua localização estratégica a 40 km ao sul do Recife, com acesso direto ao Oceano Atlântico. Este porto desempenha um papel crucial na economia regional e nacional, atraindo investimentos em setores como petroquímica, logística, energia e indústria, gerando emprego e renda. Sua infraestrutura inclui terminais para contêineres, grãos, líquidos e veículos, movimentando milhões de toneladas de carga anualmente.

Figura 1 Porto de Suape



Fonte: Complexo Industrial Portuário de Suape ,2023.

O PGL 3B (Pier de Granéis Líquidos) é um pier específico dentro do Porto de Suape destinado à logística de granel líquido. Ele recebe navios petroleiros de até 170 mil toneladas por porte bruto (TPB), tendo 17,7 metros de profundidade e bacia de evolução com 20 metros de profundidade em alguns pontos. Possui cinco braços de carregamento e opera navios dos tipos Aframax e Suezmax.

Seus objetivos gerais são proporcionar um espaço adequado e seguro para operações, descarga e transferência dos granéis líquidos em questão. O PGL 3B é

essencial para a eficiência das operações portuárias, pois sua localização e estrutura permitem uma movimentação mais rápida e organizada das cargas, reduzindo tempos de espera e melhorando a produtividade geral do porto.

A importância do PGL 3B na logística portuária é notável. Ele funciona como um ponto crucial para a transferência segura e eficiente de produtos líquidos. Suas instalações e infraestrutura são projetadas para atender às rigorosas exigências de manuseio e armazenamento de produtos líquidos, garantindo que o porto possa lidar com diferentes tipos de produtos de forma eficiente e segura.

Este trabalho visa projetar uma estrutura metálica para melhorar o acesso durante a manutenção do PGL 3B no Porto de Suape.

2 JUSTIFICATIVA

A justificativa para este trabalho se baseia na necessidade de resolver a falta de espaço suficiente para a manobra de caminhões do tipo munck, essenciais para a realização de manutenções no píer. O Guindauto, também conhecido como Munck, é um equipamento de elevação composto por um guindaste hidráulico articulado acoplado a um caminhão. Ele é utilizado para içar, transportar e movimentar cargas pesadas, sendo muito empregado na construção civil, indústrias, portos e serviços de manutenção. Diferente de um guindaste convencional, o Guindauto oferece mobilidade, pois pode se deslocar facilmente entre diferentes locais de trabalho, tornando-se uma solução versátil para operações que exigem elevação e transporte de materiais em um único equipamento.

Figura 2 Exemplo de guindauto



Fonte: JZ Munck, 2025.

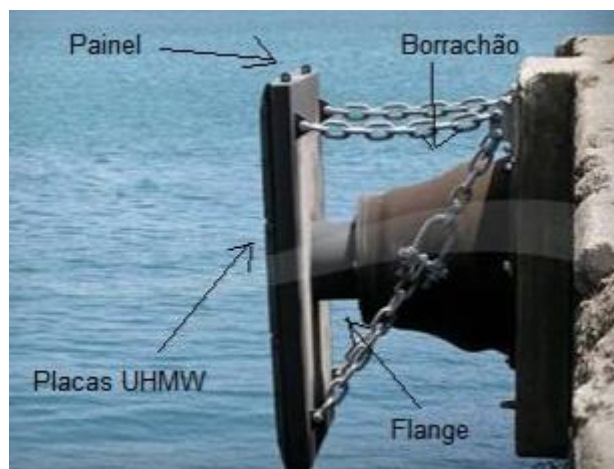
Além disso, essa melhoria do espaço destinado à manobra de caminhões é essencial para garantir que as operações de manutenção sejam realizadas de forma mais eficiente e segura. Um exemplo de manutenção é o serviço de substituição do painel de uma defesa. Este equipamento permite a boa absorção da energia de movimento dos navios no momento da atracação, evitando o impacto no PGL e danos nos cascos das embarcações.

Figura 3 Defesa do PGL 3B

Fonte: A autora, 2024.

Dessa forma, a energia cinética do navio em movimento é transformada em energia potencial elástica pelo borrachão, enquanto o painel tem a função de resistir à pressão aplicada, protegendo o casco da embarcação contra danos. Essa estrutura é composta por quatro elementos principais: o borrachão, que contém um cone de borracha integrado a uma estrutura metálica interna; o painel, que são perfis metálicos que formam a estrutura interna; as placas de UHMW (Ultra High Molecular Weight polyethylene), que minimizam o atrito entre o navio e a defesa; e o flange, que conecta o borrachão ao painel. O painel que será removido e passará pelo processo de restauração, retornando ao uso, posteriormente. O processo é repetido periodicamente.

Figura 4 Componentes da defesa do PGL



Fonte: Fonte: SILVA NETO, 2019.

Portanto, a escolha desse tema é motivada pela necessidade de que o acesso aos pontos de manutenção seja mais rápido, seguro e eficiente, facilitando a movimentação de equipamentos e veículos utilizados nas manutenções portuárias, permitindo uma resposta mais ágil às necessidades de reparo.

3 OBJETIVOS

- Objetivos Geral

O objetivo geral deste trabalho é elaborar um projeto estrutural, realizando a modelagem no software Autodesk Inventor, de uma plataforma e perfis W, através do cálculo analítico e comparação com elementos.

Objetivos específicos:

- Realizar o levantamento preciso do espaço onde a plataforma será instalada, incluindo medidas, características do ambiente e quaisquer restrições, para garantir que o projeto estrutural seja adequado às condições reais do local.
- Criar o modelo 3D detalhado da plataforma e dos perfis no software Autodesk Inventor, garantindo a representação precisa de todos os componentes estruturais.
- Desenvolver os cálculos analíticos para determinar se suporta as tensões nos elementos estruturais da plataforma, considerando as cargas aplicadas e as condições de apoio conforme a norma.
- Utilizar a ferramenta FEA do Autodesk Inventor para simular os resultados dos cálculos analíticos.
- Efetuar o detalhamento completo da estrutura no software Autodesk Inventor, incluindo a criação de desenhos técnicos, especificações dos materiais e geração de vistas e cortes necessários para a fabricação e montagem da plataforma.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Introdução às Estruturas Metálicas

O aço oferece vantagens consideráveis, como maior resistência à tração e compressão, menor peso próprio e flexibilidade no design, isso permite a construção de grandes vãos sem a necessidade de pilares intermediários, o que é particularmente útil em galpões industriais e centros logísticos (Vaz & Schneider, 2018). A utilização de estruturas metálicas reduz o tempo de construção, uma vez que a montagem dos elementos metálicos é mais rápida do que as etapas de concretagem e cura do concreto armado (Kassab, 2016).

De acordo com Leonhardt e Figueiredo (2017), o uso do aço em estruturas permite grande versatilidade e precisão no processo construtivo. As principais vantagens das estruturas metálicas, conforme descrito por Leonhardt e Figueiredo (2017), são a resistência à tração e compressão, a rapidez na montagem e a redução de peso em comparação com outros sistemas estruturais.

Kassab (2016) destaca que o aço permite a construção de vãos maiores sem a necessidade de apoios intermediários, o que otimiza o espaço interno de edifícios e galpões industriais. Segundo Vaz e Schneider (2018), as peças podem ser pré-fabricadas e montadas no local da obra, diminuindo o tempo de execução em até 40% em comparação com estruturas de concreto armado.

As estruturas metálicas são amplamente aplicadas em diversas áreas, como na construção de pontes, edifícios de múltiplos andares, galpões industriais, torres de transmissão e até mesmo em obras residenciais, em pontes e viadutos. A leveza do aço permite a construção de grandes vãos sem o uso de muitos apoios, o que reduz o impacto no solo e facilita a execução em áreas urbanas ou com rios (Schneider & Leonhardt, 2019).

Como afirmam John e Agopyan (2012), a construção metálica moderna está alinhada com as diretrizes de sustentabilidade, já que o aço é 100% reciclável e sua produção pode ser feita com menor impacto ambiental comparado a outros materiais, como o concreto armado.

Figura 5 Exemplo de estrutura metálica



Fonte: Viva Decora (2024).

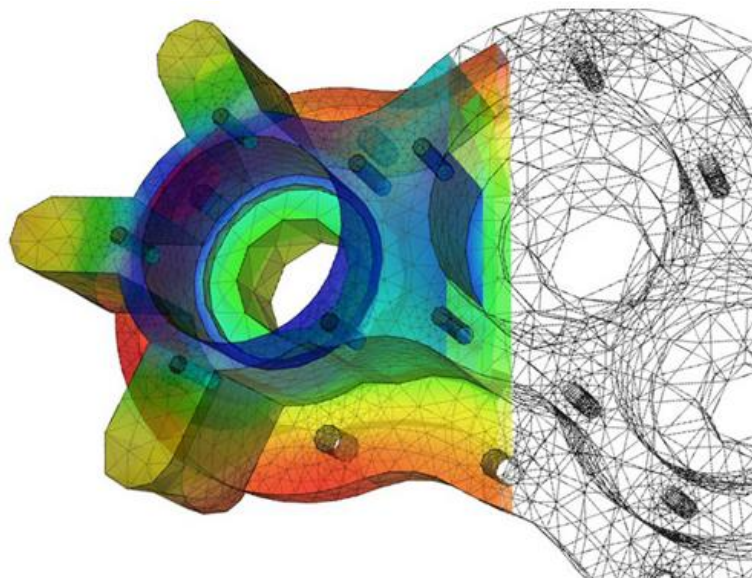
4.2 Análise Estrutural em Projetos de Estruturas Metálicas

Segundo Hibbeler (2018), o método das forças é útil em situações onde o equilíbrio de momentos e forças internas é fundamental, enquanto o método dos deslocamentos foca na deformação dos elementos sob a ação das cargas aplicadas. A análise estrutural é uma das fases mais importantes em um projeto de estruturas, pois permite prever o comportamento real das mesmas (Martha, 2017). Essa etapa é fundamental na idealização das ações e do comportamento mecânico da estrutura e pode ser dividida em quatro níveis de abstração. Inicialmente, a estrutura real é idealizada, e um modelo estrutural é criado, incluindo hipóteses simplificadoras. Em seguida, realiza-se a discretização da estrutura, uma vez que é geralmente mais simples determinar a solução para partes específicas do que abordar a solução geral. Por fim, a resolução da estrutura é frequentemente realizada com o auxílio de ferramentas computacionais.

A análise matricial das estruturas, que utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF), é atualmente uma das mais utilizadas devido à sua precisão e à capacidade de lidar com estruturas complexas (Timoshenko & Gere, 2002). Além disso, segundo Souza e Lopes (2020), o avanço dos métodos computacionais, como o MEF, permite a análise de elementos estruturais em situações não lineares, como grandes

deslocamentos e comportamentos pós-flambagem, aumentando a confiabilidade das análises.

Figura 6 Exemplo de análise por elementos finitos



Fonte: ENSUS (2024).

De acordo com Silva (2020), um dos principais objetivos do projeto estrutural é produzir estruturas que sejam seguras e duráveis a um custo razoável. Para atingir esse objetivo, é fundamental que as dimensões das seções transversais dos elementos estruturais sejam determinadas de modo a garantir que o sistema estrutural suporte, com segurança, as cargas aplicadas.

No Brasil, o dimensionamento de estruturas metálicas é regido pela NBR 8800 (ABNT, 2008), que estabelece critérios para garantir a segurança e a funcionalidade das estruturas. A norma define os estados limites últimos e de serviço, garantindo que as estruturas suportem as cargas máximas previstas e mantenham deformações dentro de limites aceitáveis. Além da NBR 8800, normas internacionais, como o Eurocode e as diretrizes do American Institute of Steel Construction (AISC), também são amplamente utilizadas, especialmente em projetos de grandes obras e obras internacionais (Schneider & Leonhardt, 2019).

4.3 Dimensionamento de Perfis e Ligações

A NBR 8800 estabelece critérios detalhados para o dimensionamento de perfis e ligações, abrangendo a verificação de estados limites últimos, como

resistência ao colapso e fadiga, e estados limites de serviço, como deformações excessivas (ABNT, 2008). Para garantir a segurança da estrutura, a norma exige que cada perfil e ligação seja dimensionado para suportar as cargas aplicadas, levando em consideração o comportamento dinâmico, a flambagem local e global, e a torção (Souza & Lopes, 2020).

Segundo McCormac (2017), os perfis I e H são amplamente usados em vigas e colunas de edifícios, pois oferecem alta resistência à flexão e são eficientes para suportar grandes cargas verticais.

Segundo Shigley (2016), a seleção adequada dos perfis para suportar a carga de uma estrutura depende do conhecimento prévio de suas dimensões e da carga à qual será submetida.

Figura 7 Perfil estrutural I e H



Fonte: METALON (2024).

De acordo com Kassab (2016), as ligações parafusadas são mais indicadas para estruturas que precisam de flexibilidade de montagem, enquanto as ligações soldadas proporcionam maior rigidez e continuidade estrutural.

Segundo Schneider e Leonhardt (2019), as ligações podem ser parafusadas ou soldadas. As ligações parafusadas são vantajosas em situações que exigem desmontagem ou ajustes posteriores, enquanto as ligações soldadas oferecem maior rigidez e continuidade estrutural. O dimensionamento das ligações, conforme

a NBR 8800, deve garantir que elas resistam a esforços normais, cortantes e momentos fletores (ABNT, 2008).

4.4 Normas Técnicas e Regulamentações.

A NBR 8800 é a norma que rege o dimensionamento e a construção de estruturas metálicas no Brasil. Ela aborda temas como a estabilidade global e local, resistência ao fogo, cálculo de ligações e flambagem (ABNT, 2008). Kassab (2016) destaca que a aplicação correta da norma garante que as estruturas metálicas atendam aos requisitos mínimos de segurança, durabilidade e desempenho, prevenindo acidentes e falhas estruturais.

Além da NBR 8800, outras normas são fundamentais no dimensionamento e projeto de estruturas metálicas. A NBR 6123, por exemplo, trata da ação do vento sobre as edificações, sendo essencial para estruturas altas e esbeltas (ABNT, 1987). Já a NBR 14762 aborda o dimensionamento de estruturas formadas a frio, que são comumente utilizadas em construções de pequeno e médio porte (Schneider & Leonhardt, 2019).

4.5 Uso de Software no Projeto e Detalhamento de Estruturas Metálicas

Kubo (2019) destaca a importância de utilizar softwares de CAD nesse processo, garantindo que os desenhos técnicos sejam realizados de acordo com as normas aplicáveis. Programas como SAP2000, Ansys e Robot Structural Analysis são ferramentas indispensáveis para o cálculo e a simulação de estruturas complexas, permitindo uma análise precisa e detalhada (Timoshenko & Gere, 2002).

Esses softwares são capazes de prever o comportamento estrutural sob diversas condições de carga, incluindo vento, sismos e cargas dinâmicas (McCormac, 2017).

De acordo com Barros (2002), o método dos elementos finitos considera a questão da continuidade física ao empregar funções de interpolação. À medida que mais elementos são incluídos na análise, a solução se aproxima do valor real, garantindo uma convergência mais precisa.

4.6 Propriedades e Aplicações do Aço ASTM A36

De acordo com Chiaverini (2008), o A36 é um aço carbono com limite de escoamento mínimo de 250 MPa e resistência à tração entre 400 e 550 MPa. Além disso, apresenta boa soldabilidade e ductilidade, facilitando processos de fabricação como corte, dobra e soldagem.

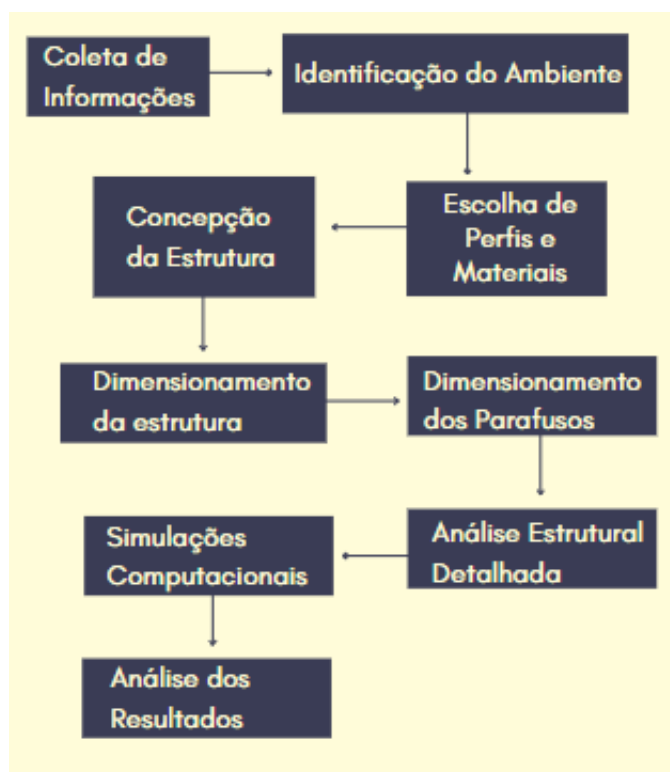
Segundo Pauletti (2010), o aço A36 é frequentemente empregado na fabricação de perfis laminados e chapas para construção de edificações e pontes, devido à sua combinação equilibrada de resistência e maleabilidade. A norma ASTM A36 especifica os requisitos químicos e mecânicos para esse tipo de aço, garantindo sua adequação em projetos estruturais.

Campos (2015) menciona que o aço A36 possui composição química com baixo teor de carbono, geralmente abaixo de 0,3%, o que contribui para sua excelente soldabilidade e reduz a possibilidade de trincas durante o processo de soldagem. Essa característica torna o A36 uma escolha popular em projetos que exigem juntas soldadas de alta qualidade.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção descreve em detalhes os materiais utilizados, os métodos aplicados e a sequência de atividades necessárias para o desenvolvimento do projeto de estrutura metálica no PGL 3B no Porto de Suape. O processo inclui desde o levantamento inicial de dados até a finalização do projeto, com ênfase nas normas técnicas, ferramentas de simulação e critérios de segurança. Com o objetivo de organizar as atividades, é elaborado um fluxograma que representa as etapas do trabalho, conforme apresentado na figura abaixo.

Figura 8 Fluxograma de atividades.



Fonte: A autora, 2025.

5.1 Levantamento

- Coleta de Informações:

O primeiro passo no desenvolvimento do projeto estrutural foi a coleta de dados detalhados no local onde a estrutura será implantada. Esse levantamento foi essencial para garantir que o projeto considerasse todas as condições físicas que podem afetar o desempenho da estrutura metálica. O principal aspecto abordado durante a coleta de informações no local, onde foi realizado o levantamento das dimensões e o desenho técnico das peças é:

- Identificação do ambiente, possíveis interferências de outras infraestruturas no local a ser colocado a estrutura metálica.

Figura 9 PGL 3B Suape. (a) Parte do PGL 3B (b) local onde vai ficar a estrutura metálica.



(a) Fonte: A autora, 2024.

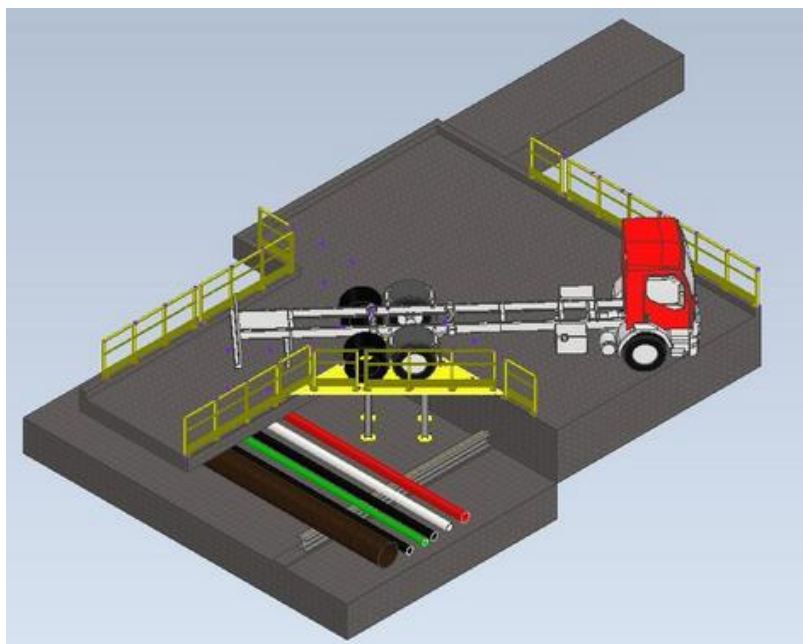
(b) Fonte: A autora, 2024.

5.2 Projeto Preliminar

- Concepção da Estrutura:

Com base nas informações coletadas e desenho técnico, foi feito o desenho do ambiente e da estrutura através do autodesk inventor 2024.

Figura 10 Vista isométrica da estrutura metálica no PGL 3B



Fonte: A autora, 2024.

- Escolha de Perfis e Materiais:

Nesta fase, foi escolhido os perfis metálicos mais adequados, levando em consideração os critérios de desempenho, durabilidade e facilidade de montagem.

Para determinar o dimensionamento dos perfis, foi necessário selecionar o material a ser utilizado, garantindo que os limites de resistência sejam previamente conhecidos. Neste estudo, optou-se pelo aço ASTM A36, devido às suas características estruturais e à sua boa resistência à corrosão. A seleção de perfis foi feita com base nas recomendações da NBR 8800. E conforme estabelecido, será usado perfis que já tem na oficina do porto. As propriedades mecânicas do material podem ser vistas na tabela 1.

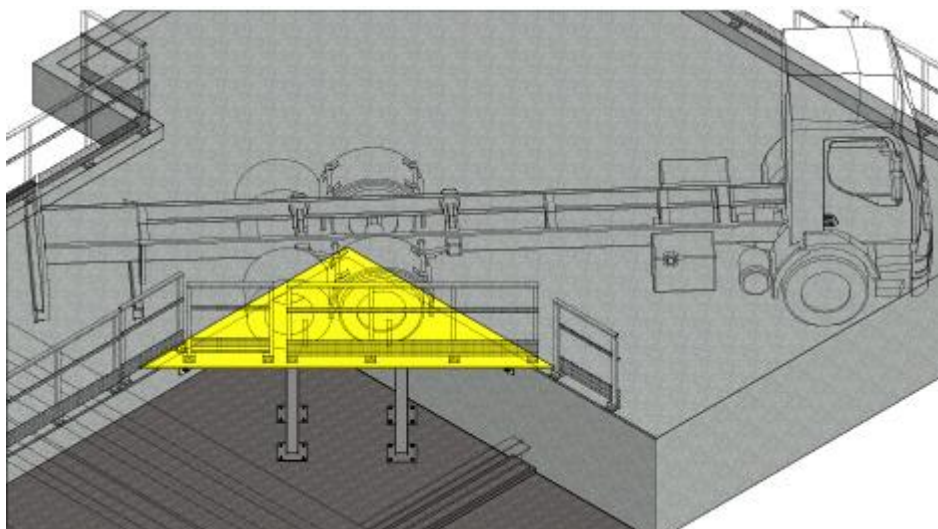
Tabela 1 Propriedades mecânicas do aço ASTM A36.

AÇO ASTM A36	
Limite de escoamento (σ_e)	250 MPa
Resistência à tração	400 MPa e 550 MPa
Módulo de elasticidade	200GPa

Fonte: LUZ, Gelson, adaptado pela autora.

Para dar início aos cálculos, foi elaborado um desenho da estrutura utilizando um software CAD, com o objetivo de exemplificar sua posição em relação ao ambiente, conforme ilustrado na Figura.

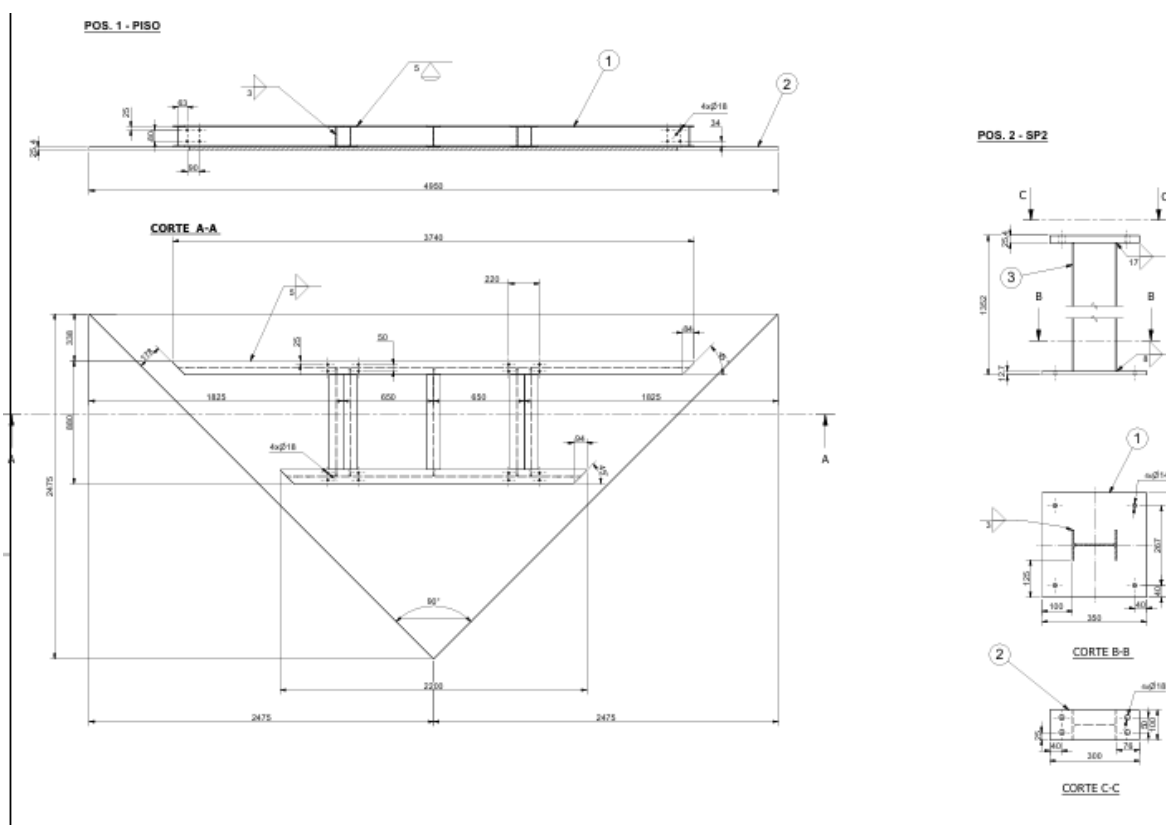
Figura 11 Vista isométrica da estrutura



Fonte: A autora, 2024.

As dimensões do projeto estão apresentadas na Figura 12. Essas medidas, estabelecidas com base nas dimensões do PGL 3B, são essenciais para o início dos cálculos.

Figura 12 Dimensões das peças



Fonte: A autora, 2024.

- **Simulação Inicial:**

Foi realizada uma simulação preliminar utilizando software de análise Autodesk Inventor 2024 para identificar possíveis problemas de desempenho, como áreas com tensões elevadas (critério de Von Mises), grandes deformações e o fator de segurança. Esse software permitiu uma modelagem tridimensional da estrutura e uma análise de comportamento inicial das cargas.

Para garantir a segurança estrutural e a eficiência no uso do material, verificou as condições de resistência e de serviço da estrutura.

A norma exige que o dimensionamento das estruturas metálicas seja realizado considerando os estados limites de resistência e serviço:

- Estado Limite Último (ELU)

O ELU refere-se à capacidade da estrutura de resistir a esforços máximos sem entrar em colapso. As verificações incluem:

Resistência à flexão, compressão, tração e cisalhamento;

Flambagem global e local;

Ruptura frágil da estrutura.

- Estado Limite de Serviço (ELS)

O ELS trata do desempenho da estrutura sob as condições de uso. As verificações incluem:

Limitação de deslocamentos e vibrações;

Controle de deformações excessivas.

Verificações Estruturais

Dimensionamento à Flexão

Para perfis W submetidos à flexão, a capacidade resistente deve atender à seguinte equação:

$$M_d \geq M_s$$

Onde:

M_d é o momento resistente do perfil;

M_s é o momento solicitante.

O momento resistente da seção é dado por:

$$M_r = W_x \cdot f_y$$

Onde:

$M_r \rightarrow$ Momento resistente da seção (kN·m ou N·mm);

$W_x \rightarrow$ Módulo de resistência à flexão (cm³ ou mm³), que depende da geometria do perfil;

$f_y \rightarrow$ Tensão de escoamento do material (MPa ou N/mm²).

Se o perfil não sofre FLF, então

$M_d = M_p$, e podemos aproximar M_p pelo momento resistente da seção, ou seja:

$$M_d \approx M_r = W_x \cdot f_y$$

Isso significa que o módulo de resistência da seção W_x e a tensão de escoamento do material f_y devem ser suficientes para resistir ao momento solicitante M_s , garantindo que o perfil não entre em colapso por flexão.

Dimensionamento à Compressão

Para perfis submetidos à compressão, deve-se verificar a carga crítica de flambagem com a seguinte fórmula:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(KL)^2}$$

Onde:

K é o fator de comprimento efetivo;

L é o comprimento livre de flambagem.

A resistência à compressão deve ser maior que a carga solicitante:

$$P_d \geq P_s$$

Dimensionamento ao Cisalhamento

A tensão de cisalhamento na alma do perfil deve ser verificada com a fórmula:

$$Vd = 0.6 \cdot f_y \cdot A_w$$

Vd → Capacidade resistente ao cisalhamento da alma da viga (força cortante resistente).

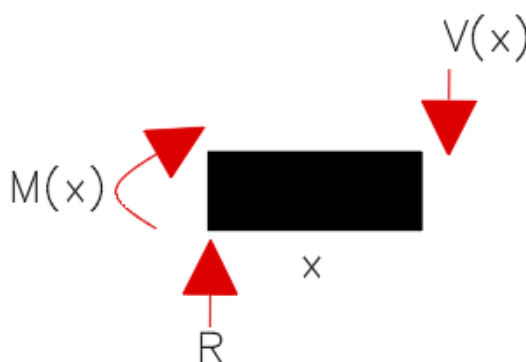
f_y → Tensão de escoamento do material (limite elástico do aço, geralmente em MPa).

A_w → Área da alma da viga (espessura da alma multiplicada pela altura útil da viga).

- **Esforços solicitantes**

Para dimensionar uma viga, é essencial determinar como os esforços variam ao longo do comprimento da viga. Isso é feito utilizando as equações da estática aplicadas a cada segmento avaliado. Como ilustrado na Figura abaixo, temos que **$V(x)$** representa o esforço cortante, **$M(x)$** o momento fletor, **x** é a distância e **R** a reação gerada nos apoios. O esforço cortante e momento fletor, são fundamentais para a análise e o dimensionamento de vigas.

Figura 13 Esforços atuantes em uma seção



. Fonte: A autora, 2025.

Ao analisar uma viga, o momento fletor e o esforço cortante podem variar ao longo do comprimento da estrutura devido aos diferentes tipos de apoios (como fixos, móveis ou engastados) e o tipo de carga aplicada (concentrada, distribuída,

momentos). Essas variações podem causar descontinuidades nos diagramas, ou seja, mudanças bruscas nos valores de momento fletor e esforço cortante. A equação abaixo descreve a relação fundamental entre a carga distribuída $q(x)$, o esforço cortante $V(x)$ e o momento fletor $M(x)$ ao longo de uma viga. Essa equação é a base para a construção dos diagramas de esforço cortante e momento fletor, ajudando a calcular como as vigas suportam diferentes cargas e apoios.

$$q(x) = \frac{-dV}{dx} = \frac{d^2 \cdot M}{dx^2}$$

Ela nos diz que:

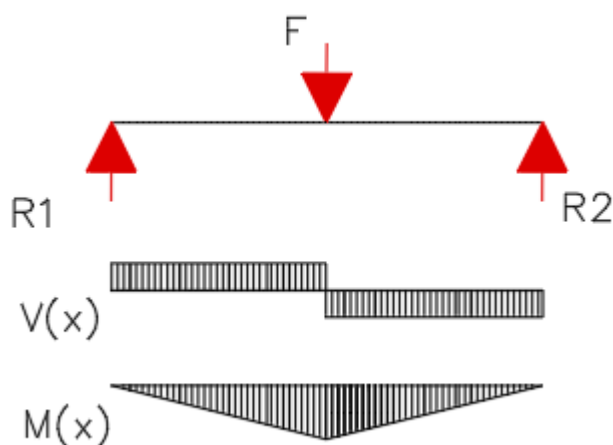
$q(x)$: Representa o carregamento da viga em função da posição x . Ele é obtido pela soma das forças externas aplicadas em um trecho específico.

dV : É o esforço cortante, que corresponde à força interna que age ao longo da seção transversal da viga.

dx : Distância ao longo de um eixo

dM : É o momento fletor, relacionado às tensões internas que causam flexão na viga.

Figura 14 Diagrama de momento fletor e esforço cortante



. Fonte: Hibbeler, 2011. Adaptado pela autora.

A partir do momento fletor máximo e da tensão admissível do material, é possível determinar o módulo de resistência à flexão, que indica a capacidade da viga de resistir à flexão sem ultrapassar a tensão limite do material.

5.3 Análise Estrutural Detalhada

- Aplicação de Análise:

Na análise estrutural, foi realizado o dimensionamento dos parafusos, determinando os esforços de tensão admissível e o cisalhamento dos parafusos, utilizando um fator de segurança de 2, com base nas forças externas aplicadas para definir o diâmetro adequado. Além disso, a deformação foi analisada para verificar como as peças e a estrutura respondem às cargas aplicadas. O setor de engenharia solicitou um fator de segurança superior a 2 na análise da estrutura. Os métodos empregados seguiram as combinações de carga estabelecidas pela NBR 8800.

- Simulações Computacionais:

Foram feitas simulações computacionais detalhadas usando autodesk inventor 2024 para confirmar a segurança e viabilidade da estrutura. Essas simulações incluíram: Carregamentos estática: Simulações de cargas, como o peso do caminhão munk;

O fator de segurança foi adotado conforme as diretrizes da NBR 8800:2008 e a análise realizada pelo Setor de Engenharia do Porto;

Análise não linear: Consideração de efeitos como grandes deslocamentos e flambagem para prever o comportamento da estrutura em situações críticas.

- Aplicação das Condições de Contorno

Restrições: Foi identificado as partes da estrutura que estão fixas ou possuem restrições de movimento (graus de liberdade limitados), como suportes, bases fixas ou superfícies em contato. Essas condições foram levadas em consideração para garantir que a estrutura seja analisada corretamente sob as forças reais que atuam sobre ela.

- Análise dos Resultados

Geração de Malha (Elementos Finitos): O software gerou a malha conforme geometria da estrutura.

Resultados: Os resultados da análise são gerados, incluindo mapas de tensões, deformações, deslocamentos e fator de segurança. Esses resultados permitiram identificar as áreas de maior tensão, regiões críticas e o comportamento geral da estrutura sob as condições de carregamento.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O projeto da estrutura metálica para o PGL 3B no Porto de Suape foi desenvolvido com o objetivo de otimizar o espaço para manobra de caminhões munck durante as manutenções, visando maior eficiência e segurança. Os resultados obtidos através da modelagem no Autodesk Inventor e das análises estruturais realizadas são discutidos a seguir.

6.1 Resultados Alcançados:

6.1.1 Modelagem 3D Detalhada:

A plataforma e os perfis metálicos foram modelados com precisão no Autodesk Inventor, permitindo uma visualização completa da estrutura e a identificação de possíveis interferências. A modelagem 3D facilitou a detecção de erros antes da fabricação.

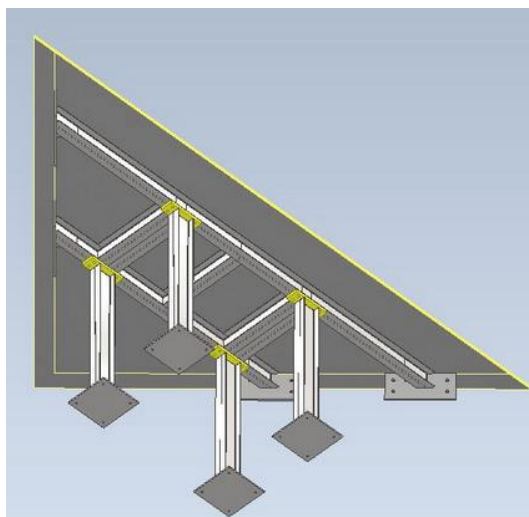
Detalhamento da Estrutura

Desenhos Técnicos e Modelagem 3D: O detalhamento final da estrutura foi feito através de modelagem 3D e desenhos técnicos no software Autodesk Inventor.

Esses desenhos incluirão:

- Plantas, cortes: Representações detalhadas da estrutura com especificação dos perfis e materiais.
- Detalhes de ligações: Vistas ampliadas das ligações estruturais, com todas as especificações necessárias para a fabricação e montagem.
- Listas de materiais: Relação completa dos perfis e componentes metálicos necessários para a construção, com especificação de dimensões e quantidades.

Figura 15 Desenho da plataforma

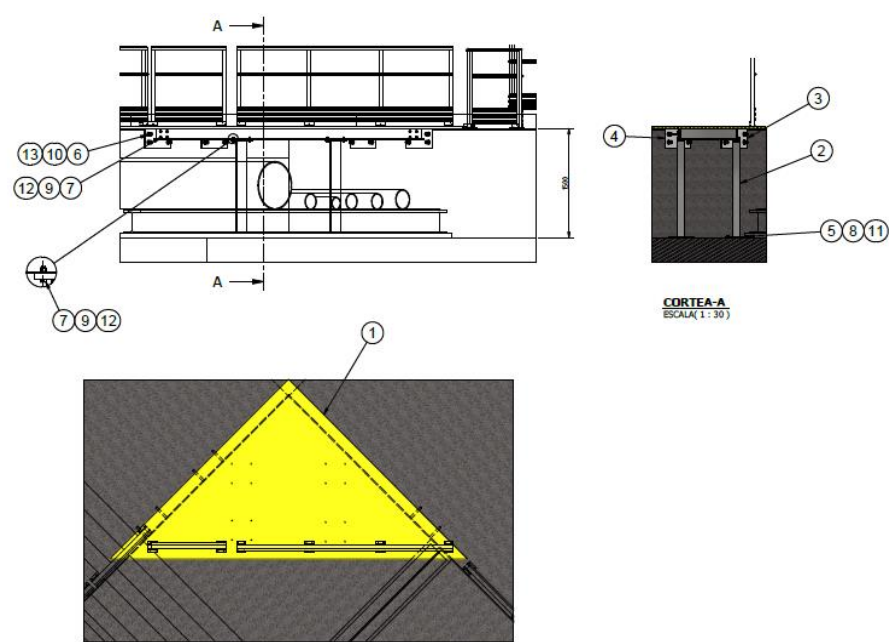


Fonte: A autora, 2024

A vista frontal da plataforma mostra a estrutura, com colunas, vigas e suportes visíveis, além de elementos como guarda-corpos e acessos.

O corte lateral revela os detalhes internos, como a espessura dos materiais, a disposição das vigas e as conexões estruturais, além de mostrar reforços e variações de altura.

Figura 16 Vista frontal e corte da vista lateral da plataforma



Fonte: A autora, 2024

A lista de materiais descreve todos os componentes utilizados na construção da plataforma, com suas especificações técnicas. Ela deve incluir as quantidades e o tipo de material necessário para cada componente.

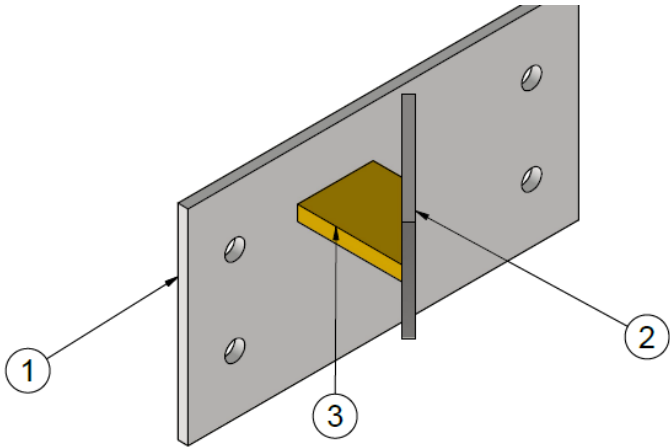
Tabela 2 Lista do material da plataforma

14	3	CHUMBADOR QUÍMICO FIS EP 390s	FISCHER	
13	16	BARRA ROSCADA P/ CHUMBADORES FTR 12x220 mm	FISCHER	
12	16	BARRA ROSCADA P/ CHUMBADORES FTR 22x255 mm	FISCHER	
11	16	ARRUELA LISA M22	DIN 125 - GALV. FOGO	
10	32	ARRUELA LISA M16	DIN 125 - GALV. FOGO	
9	16	ARRUELA LISA M12	DIN 125 - GALV. FOGO	
8	32	PORCA SEXT. M22	DIN 934 - GALV. FOGO	
7	32	PORCA SEXT. M16	DIN 934 - GALV. FOGO	
6	16	PORCA SEXT. M12	DIN 934 - GALV. FOGO	
5	32	PARAF. CAB. SEXT. M16 x 60 - 8.8	DIN 931- 1 -GALV. FOGO	
4	2	SUPORTE SP1D	FOLHA 2	16,5 kg
3	2	SUPORTE SP1E	FOLHA 2	16,5 kg
2	4	SUPORTE SP2	FOLHA 3	34,4 kg
1	1	PISO	FOLHA 3	1337,8 kg
POS	QUANT	DESCRIÇÃO	MATERIAL/DES.	PESO
LISTA DE MATERIAIS				

Fonte: A autora, 2024.

O suporte esquerdo é um elemento estrutural responsável por fornecer estabilidade e sustentação à plataforma, garantindo a distribuição adequada das cargas aplicadas. Ele é fixado à estrutura principal por meio de soldagem e parafusos de alta resistência. Fabricado em aço ASTM A36, o suporte apresenta alta resistência mecânica e boa soldabilidade, permitindo sua integração segura à estrutura. Sua geometria e dimensões são projetadas para suportar a carga, evitando deformações excessivas e garantindo a durabilidade da plataforma.

Figura 17 Suporte esquerdo



Fonte: A autora, 2024.

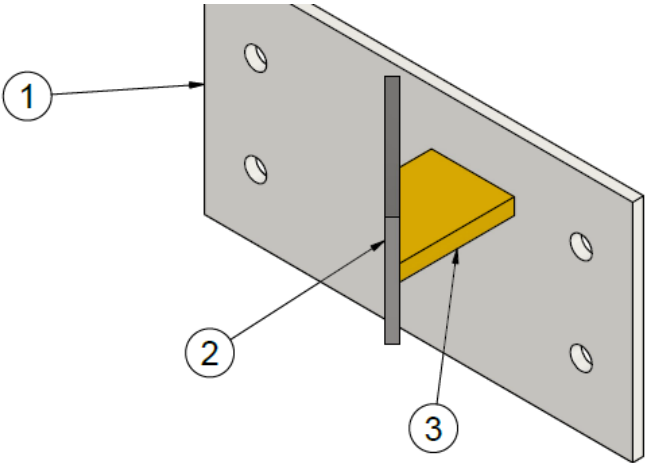
Tabela 3 Lista do material do suporte esquerdo

3	1	CHAPA 3/4"x97x133	ASTM A36	1,23 kg
2	1	CHAPA 1/2"x130x141	ASTM A36	2,47 kg
1	1	CHAPA 1/2"x262x500	ASTM A36	12,87 kg
POS	QUANT	DESCRIÇÃO	MATERIAL/DES.	PESO
LISTA DE MATERIAIS				

Fonte: A autora, 2024.

O suporte direito é um componente estrutural essencial para a estabilidade da plataforma, contribuindo para a distribuição uniforme das cargas e garantindo a integridade da estrutura. Construído em aço ASTM A36, possui alta resistência mecânica e excelente soldabilidade, permitindo uma fixação segura à estrutura principal por meio de soldagem ou parafusos de alta resistência. Suas dimensões e formato são projetados para suportar cargas específicas, minimizando deslocamentos e prevenindo falhas estruturais ao longo do tempo.

Figura 18 Suporte direito



Fonte: A autora, 2024

Tabela 4 Lista de material do suporte direito

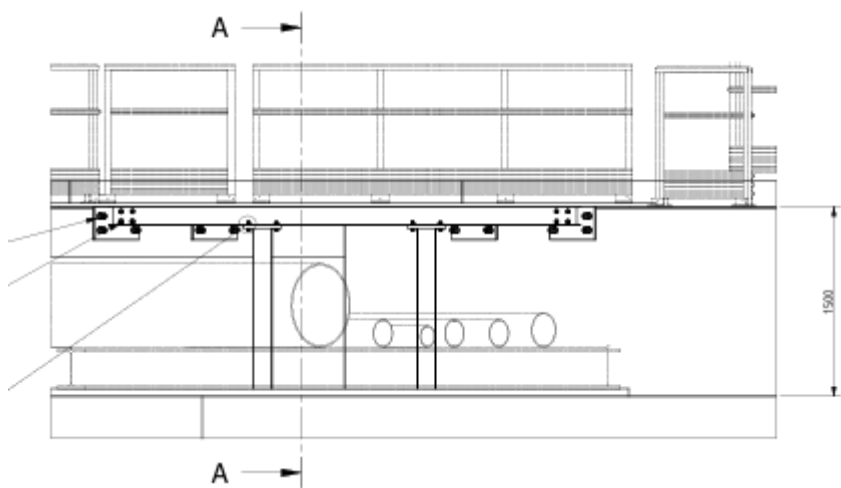
3	1	CHAPA 3/4"x97x133	ASTM A36	1,23 kg
2	1	CHAPA 1/2"x130x141	ASTM A36	2,47 kg
1	1	CHAPA 1/2"x262x500	ASTM A36	12,87 kg
POS	QUANT	DESCRIÇÃO	MATERIAL/DES.	PESO
LISTA DE MATERIAIS				

Fonte: Autora, 2024

A vista frontal exibe a estrutura da plataforma, incluindo os suportes, vigas e o piso, destacando a distribuição das cargas e os pontos de fixação.

A vista lateral mostra o perfil da plataforma, evidenciando a espessura das vigas e a disposição dos suportes, permitindo uma análise detalhada da transmissão de esforços.

Figura 19 Vista frontal da plataforma



Fonte: A autora, 2024

Tabela 5 Lista de material do piso

1	7	W 150 x 13 kg/m	ASTM A-36	127,53 kg
2	1	CHAPA 1" x 2475 x 5000	ASTM A-36	1221,26 kg
POS	QUANT	DESCRIÇÃO	MATERIAL/DES.	PESO
LISTA DE MATERIAIS				

Fonte: A autora, 2024.

6.1.2 Dimensionamento dos Elementos de Fixação:

Os cálculos para o dimensionamento dos parafusos foram realizados considerando as cargas atuantes e um fator de segurança de 2, conforme solicitado.

Os resultados garantem que as conexões sejam capazes de suportar os esforços sem falhas, contribuindo para a segurança da estrutura.

Dimensionamento

- Cálculo e Dimensionamento de Componentes:
Dimensionamento da plataforma para o PGL 3B.

Dados e premissas de projeto:

- Para o dimensionamento da estrutura, foram adotadas as especificações contidas nas seguintes normas:

NBR 8800:2008 – Parafusos e barras redondas rosqueadas.

ANSI/AWS A2.4-98 - Soldas Filete (Fillet Welds).

NR12 - Guarda corpos.

Figura 20 Equipamentos de movimentação. (a) Caminhão munck. (b) Cabrestante e Pórtico.



(a) Fonte: A autora, 2024. (b) Fonte: A autora, 2024.

Dados:

- Peso do caminhão Munck: $15tf \rightarrow 147100N$
 - Pórtico: $800Kg$
 - Cabrestante: $3 \cdot 280kg = 840 kg$
 - Guindaste articulado TKA 45.700: $4170 kgf$
- Critérios utilizados para dimensionamento:
 - Peso total = Caminhão + Pórtico + Cabrestante + Guindaste articulado

$$\rightarrow 15000 \text{ kg} + 800 \text{ kg} + 840 \text{ kg} + 4170 \text{ kg} = 20810 \text{ kg}$$

-Aplicando a 2ª Lei de Newton: $F=m \cdot a \rightarrow F= 20810 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m/s}^2 = 208100 \text{ N}$

- O caminhão tem 10 pneus: $20810 \text{ kg} \div 10(\text{pneus}) = 2081 \text{ kg} \rightarrow \text{por pneu}$

- Quantidade de pneus que passa pela plataforma: 4 pneus $\rightarrow$

$$\rightarrow 4 (\text{pneus}) \cdot 2081 \text{ kg} (1 \text{ pneu}) = 8324 \text{ kg}$$

-Aplicando a 2ª Lei de Newton:

$$F = m \cdot a \rightarrow F = 8324 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m/s}^2 = 83240 \text{ N}$$

- Cisalhamento do parafuso

1. Fator de segurança: 2

2. Tensão admissível:

$$\sigma_{adm} = \frac{725 \text{ MPa}}{2} \rightarrow \sigma_{adm} = 362,5 \text{ MPa}$$

- Tensão de ruptura:

$\rightarrow$ De acordo com a NBR 8800:2008

$\rightarrow$ ASTM A325

$$\sigma = \frac{F}{A} \rightarrow \sigma = \frac{F}{\frac{(\pi^2 \cdot d)}{4}} \rightarrow d^2 = \frac{F}{\frac{(\pi \cdot \sigma)}{4}} \rightarrow d^2 = \frac{83240 \text{ N}}{\frac{(\pi^2 \cdot 362,5)}{4}}$$

$\rightarrow d = 17,09 \text{ mm} \rightarrow \text{Comercial M18}$

OBS: Cálculo realizado para 1 parafuso

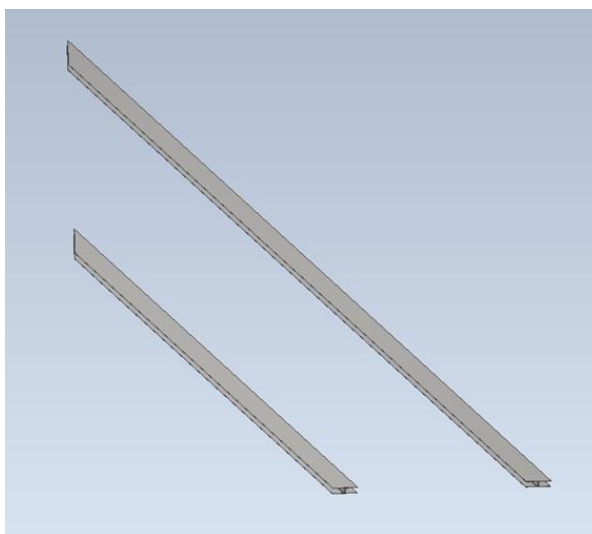
6.1.3 Dimensionamento e Seleção dos Perfis:

Os perfis metálicos foram selecionados com base nos cálculos de resistência e nas recomendações da NBR 8800, utilizando perfis disponíveis na oficina do porto. A seleção otimizada dos perfis garante a resistência da estrutura e o uso eficiente dos materiais.

Dimensionamento das peças devido à carga

O dimensionamento das peças em função das cargas seguiu os estados limites estabelecidos pela ABNT NBR 8800:2008, levando em consideração não apenas a resistência das peças, mas também a segurança e as deformações limitadas, a fim de garantir a funcionalidade da estrutura ao longo do tempo. Para isso, foram analisados cuidadosamente os diferentes tipos de esforços, como flexão, compressão, tração e cisalhamento, com o objetivo de determinar os perfis e as dimensões mais adequadas. Após verificar a resistência da peça a todos os esforços atuantes, o dimensionamento envolveu a definição de como o perfil seria disposto na estrutura, garantindo o atendimento a todos os requisitos de segurança e desempenho.

Figura 21 Desenho isométrico dos perfis horizontais



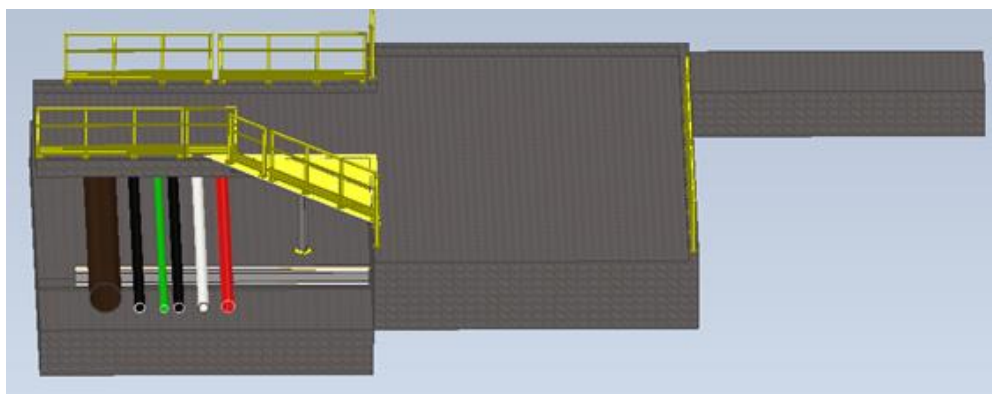
Fonte: A autora, 2024.

Inicialmente, a estrutura mecânica foi projetada com uma configuração composta por uma única coluna e duas vigas para suportar uma carga de 208,1 kN. No entanto, após a realização dos cálculos estruturais e a análise no software da autodesk inventor, verificou-se que essa configuração não seria suficiente para suportar a carga de forma segura.

A simulação computacional permitiu avaliar os esforços atuantes na estrutura, incluindo flexão, compressão e cisalhamento. Os resultados indicaram que o fator de segurança ficou abaixo de 1, enquanto a tensão de von Mises superou a tensão de escoamento do material. Esses fatores indicam que a estrutura pode não suportar as condições de operação sem falha estrutural.

Diante desse cenário, foi necessário ajuste no dimensionamento, aumentar a espessura ou alterar a geometria do componente. As soluções consideradas incluem a inclusão de reforços estruturais para reduzir as tensões atuantes. Essas modificações visam garantir a resistência e estabilidade da estrutura.

Figura 22 Desenho isométrico da estrutura com uma coluna

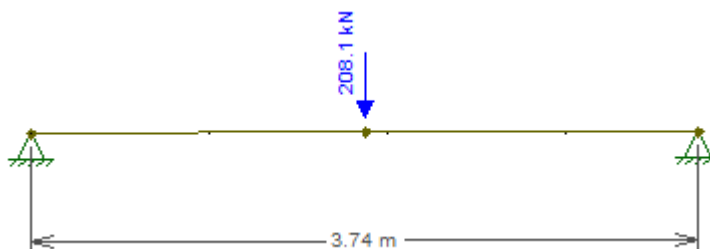


Fonte: A autora, 2024.

O peso total do conjunto, incluindo o caminhão, pórtico, cabrestante e guindaste articulado, é de 20810 kg, o que equivale a uma força de 208,1 kN. O comprimento dos perfis é de 3,74 m e a outra 2,20 m. Com base nesses valores, foi elaborado o diagrama de forças para determinar as reações de apoio, o momento fletor e o esforço cortante. A partir desses resultados, serão calculadas as tensões admissíveis, permitindo encontrar o módulo de resistência à flexão do perfil utilizado na estrutura.

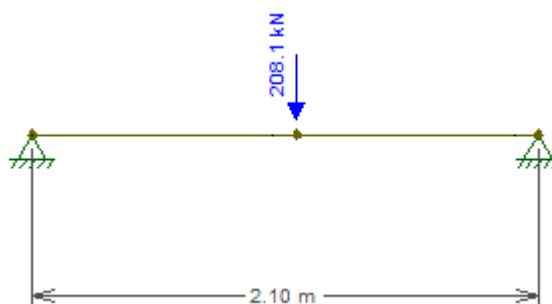
Foi utilizado o software Ftool, por meio do qual será gerado o diagrama correspondente.

Figura 23 Diagrama da peça longitudinal 1 com carga.



Fonte: A autora, 2025

Figura 24 Diagrama da peça longitudinal 2 com carga.



Fonte: A autora, 2025

6.1.4 Os cálculos das reações, bem como as equações do esforço cortante e do momento fletor para a viga 1.

No eixo x do diagrama de forças, obtém-se a seguinte equação:

$$\rightarrow + \Sigma F_x = 0$$

Como não há componentes de força na direção horizontal, no eixo vertical tem-se.

$$\uparrow + \Sigma F_y = 0 \rightarrow R_A + R_B - 208,1 = 0$$

$$R_A + R_B = 208,1 \text{ KN}$$

Para o equilíbrio dos momentos, encontra-se:

$$\hookrightarrow +MA = 0 \rightarrow \frac{(208,1 \cdot 3,742)}{2} = RB \cdot 3,74$$

$$RB = 104,05 \text{ KN}$$

Diagrama de Força Cortante (V)

O diagrama de força cortante é obtido da seguinte maneira:

De $x = 0$ até $x = 1,87 \text{ m}$ (antes da carga), a força cortante é $+104,05 \text{ kN}$ (reação no apoio).

Onde, $0 \leq x \leq 1,87 \text{ m}$, tem-se:

$$\uparrow +Fy = 0 \rightarrow R1 \cdot V = 0$$

Equação do esforço cortante:

$$V = 104,05 \text{ KN}$$

No ponto da carga ($x=1,87 \text{ m}$), há uma redução de $208,1 \text{ kN}$, então a força cortante passa para $-104,05 \text{ kN}$.

De $x=1,87 \text{ m}$ até $x=3,74 \text{ m}$ (apoio B), a força cortante se mantém $-104,05 \text{ kN}$ até chegar a zero no apoio.

6.1.5 Diagrama de Momento Fletor (M)

O momento fletor é calculado pela equação:

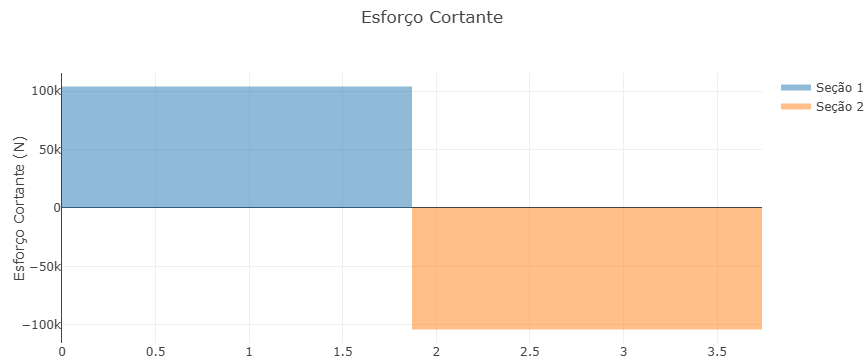
$$Ma = RA \cdot x$$

O valor máximo do momento ocorre no centro da viga:

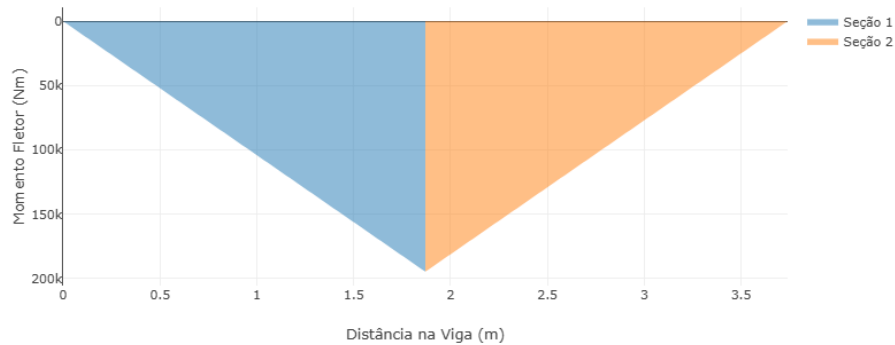
$$M_{max} = RA \cdot \frac{L}{2}$$

$$M_{max} = 104,05 \cdot 3,742 = 194,57 \text{ KN.m}$$

A partir dos cálculos, monta-se os gráficos da figura 24 e 25.

Figura 25 Diagrama de esforço cortante

Fonte: A autora, 2025. (com o auxílio do site www.aprenderengenharia.com.br)

Figura 26 Diagrama de momento fletor

.Fonte: A autora, 2025 (com o auxílio do site www.aprenderengenharia.com.br)

6.1.6 Os cálculos das reações, bem como as equações do esforço cortante e do momento fletor para a viga 2.

No eixo x do diagrama de forças, obtém-se a seguinte equação:

$$\rightarrow + \Sigma F_x = 0$$

Como não há componentes de força na direção horizontal, no eixo vertical tem-se.

$$\uparrow + \Sigma F_y = 0 \rightarrow RA + RB - 208,1 = 0$$

$$RA + RB = 208,1 \text{ KN}$$

Para o equilíbrio dos momentos, encontra-se:

$$\hookrightarrow +MA = 0 \rightarrow \frac{208,1 - 2,20}{2} = RB \cdot 2,20$$

$$RB = 104,05 \text{ KN}$$

6.1.7 Diagrama de Força Cortante (V)

O diagrama de força cortante é obtido da seguinte maneira:

De $x=0$ até $x=1,10 \text{ m}$ (antes da carga), a força cortante é $+104,05 \text{ kN}$ (reação no apoio).

Onde, $0 \leq x \leq 1,10 \text{ m}$, tem-se:

$$\uparrow +Fy = 0 \rightarrow R1 \cdot V = 0$$

Equação do esforço cortante:

$$V = 104,05 \text{ KN}$$

6.1.8 Diagrama de Momento Fletor (M)

O momento fletor é calculado pela equação:

$$\hookrightarrow +M1 = 0 \rightarrow Mf - R1 \cdot x = 0$$

$$Mf = R1x$$

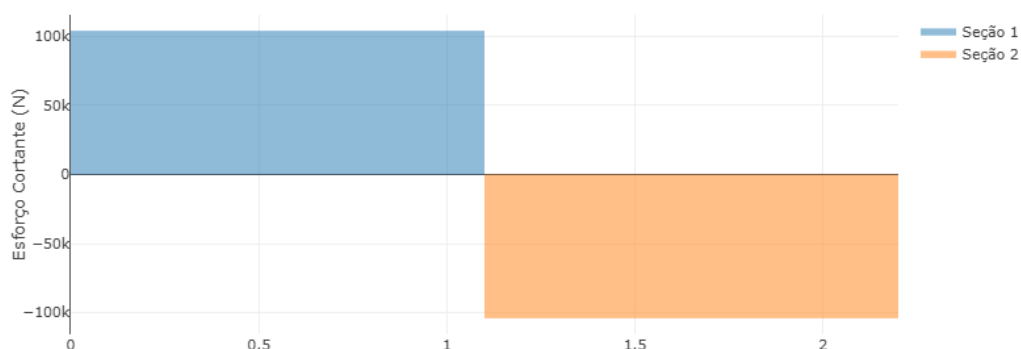
O valor máximo do momento ocorre no centro da viga:

$$M_{max} = \frac{P \cdot L}{4}$$

$$M_{max} = \frac{208,1 \cdot 2,20}{4} = 114,45 \text{ KN.m}$$

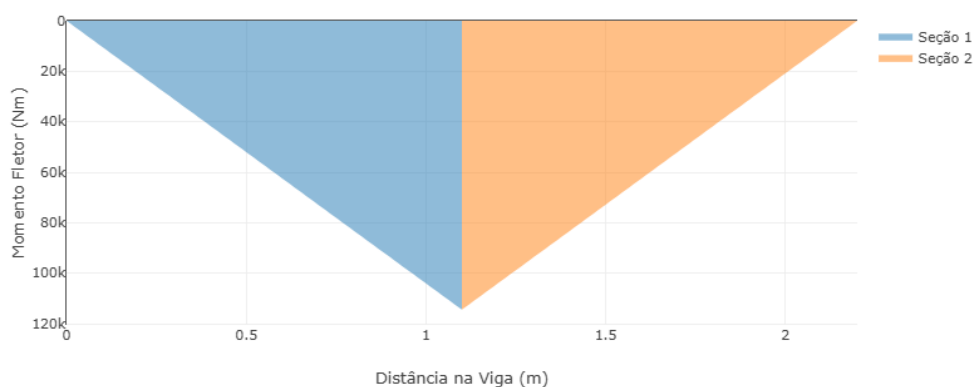
Conforme feito na peça longitudinal 1, a partir dos cálculos, monta-se os gráficos da figura 26 e 27.

Figura 27 Diagrama de esforço cortante viga



Fonte: A autora, 2025 (com o auxílio do site www.aprender engenharia.com.br)

Figura 28 Diagrama de momento fletor viga



Fonte: A autora, 2025. (com o auxílio do site www.aprender engenharia.com.br)

Após esse cálculo, determinou o valor da tensão admissível a ser utilizada no dimensionamento. Para isso, deve-se consultar o Tabela 6, que fornece o valor da tensão de escoamento em função do tipo de aço utilizado. O valor da tensão admissível é obtido dividindo-se a tensão de escoamento do material pelo fator de segurança, conforme estabelecido pela norma.

$$\tau_{adm} = \frac{\sigma_{esc}}{\gamma} \rightarrow \frac{250 \text{ Mpa}}{2} = 125 \text{ Mpa}$$

Tabela 6 Perfil selecionado.

Perfil	Módulo de resistência à flexão (W) para o eixo x-x (cm ³)
W150x13	85,8

Fonte: catálogo de perfil Gerdau, 2025, adaptado pelo autor.

Tabela 7 Características do perfil.

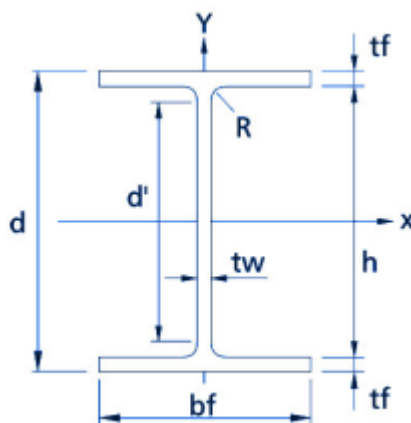
Perfil	Densidade	Área útil	Alma(tw)	Altura do perfil(d)	Momento de Inércia(I)
W150x13	13kg/m	507,4mm ²	85,8mm ³	148mm	635cm ⁴

Fonte: catálogo de perfil Gerdau, 2025, adaptado pelo autor.

A área útil não é diretamente especificada no catálogo de perfis da Gerdau, sendo determinada pelo produto entre a espessura da alma (tw) e a altura da alma (d') do perfil. O detalhamento da seção transversal pode ser observado na Figura 28, onde:

- d = altura do perfil
- h = altura interna
- bf = largura da aba do perfil
- tf = espessura da aba
- tw = espessura da alma
- R = raio de concordância

Figura 29 Vista da seção transversal do perfil.



Fonte: catálogo de perfil Gerdau, 2025.

Essas dimensões são essenciais para a determinação das propriedades mecânicas e estruturais do perfil.

Considerando o cálculo do momento solicitante (M_s) e o momento resistente (M_r) do perfil W, temos os seguintes valores:

- $M_s = 114,45 \text{ KN} \cdot \text{m}$ (momento solicitante calculado com base nas condições de carregamento e as reações na estrutura).
- $M_d = 10,72 \text{ KN} \cdot \text{m}$ (momento resistente determinado com base nas propriedades do material e nas dimensões do perfil).

A inequação que deve ser verificada é:

$$M_d \geq M_s$$

Substituindo os valores:

$$10,72 \text{ KN} \cdot \text{m} \geq 114,45 \text{ KN} \cdot \text{m}$$

Neste caso, vemos que M_d (10,72 kN·m) não é maior ou igual a M_s (114,45 kN·m), o que indica que o perfil não atende aos requisitos de segurança e um perfil

mais robusto ou ajuste no dimensionamento será necessário para garantir a segurança da estrutura.

O setor de Engenharia do Porto optou por fazer ajustes no dimensionamento do projeto. A solução adotada foi a introdução de uma coluna no meio da viga de 3,74 m, a fim de reduzir o comprimento efetivo da viga e distribuir as forças de maneira mais equilibrada, o que contribui para o aumento da capacidade resistente da estrutura.

A verificação de estabilidade à compressão de um perfil submetido a carga axial envolve a análise do risco de flambagem, que ocorre quando a peça perde sua estabilidade estrutural devido à carga axial aplicada.

O cálculo da Força Crítica de flambagem $P_{cr} = 725,96 \text{ KN}$ foi realizado com base nas condições de carregamento e nas propriedades geométricas do perfil. O valor de P_{cr} foi obtido utilizando a fórmula apropriada para a análise de flambagem, considerando as características do material e o comprimento efetivo do perfil.

Com o valor de P_{cr} determinado, foi possível avançar para o próximo passo do projeto, que consiste na verificação da estabilidade estrutural e no ajuste final do dimensionamento do perfil, levando em consideração os efeitos de flambagem e a segurança da estrutura.

A carga resistente da seção (P_d) é a carga máxima que a seção do perfil pode suportar antes de falhar devido à compressão. Ela depende da área da seção transversal do perfil e do limite de escoamento do material.

A fórmula para a carga resistente P_d é:

$$P_d = f_y \cdot A$$

$$P_d = 250 \text{ MPa} \cdot 507,4 \text{ mm}^2$$

$$P_d = 126,85 \text{ KN}$$

Ao comparar a carga resistente (P_d) com a carga solicitante (P_S) e fazer a verificação se a condição é atendida:

$$Pd \geq PS$$

Ou seja, a carga resistente deve ser maior ou igual à carga solicitante. Neste caso:

$$126,85 \text{ KN} < 208,1 \text{ KN}$$

No entanto, como 126,85 KN não é maior ou igual a 208,1 KN, a condição não é atendida, indicando que a estrutura não está segura para suportar a carga solicitante sem risco de falha.

Quando a carga resistente de um único pilar não é suficiente para suportar a carga solicitante, a solução é distribuir a carga entre vários pilares.

Nesse caso, como a carga solicitante era maior do que a carga resistente de um único pilar, foi necessário adicionar mais pilares para dividir a carga entre eles e garantir que a estrutura estivesse segura.

Foram colocados 4 pilares, e a carga solicitante foi dividida por 4, o que resulta em uma carga menor para cada pilar, tornando a carga resistente de cada pilar suficiente para suportar a carga solicitante. Isso aumenta significativamente a segurança da estrutura.

A carga solicitante PS seria dividida por 4, e agora, cada pilar precisaria suportar:

$$P_{\text{por pilar}} = \frac{208,1 \text{ KN}}{4} = 52,025 \text{ KN}$$

Agora, com cada pilar suportando 52,025 kN, a carga resistida por cada pilar é bem menor do que a carga solicitante total, o que melhora a segurança e estabilidade da estrutura.

No dimensionamento ao cisalhamento, a tensão de cisalhamento na alma do perfil (a parte central do perfil estrutural que não contém furos) deve ser verificada para garantir que o perfil seja capaz de resistir à força de cisalhamento sem falhar.

A área da alma pode ser obtida a partir das dimensões do perfil W, considerando a largura e a altura da alma.

$$A_w = 4,3mm \cdot 3740mm = 16082mm^2$$

Para calcular a força de cisalhamento que o perfil pode suportar, basta substituir por V_d (Capacidade resistente ao cisalhamento da alma da viga).

$$V_d = 0,6 \cdot 250 MPa \cdot 16085 mm^2$$

$$V_d = 2412300 N \rightarrow 2412,3 KN$$

Isso significa que o perfil pode suportar uma força de cisalhamento de até 2412,3 kN sem falhar na alma, considerando o limite de escoamento do Aço A36.

No dimensionamento de vigas, é fundamental garantir que as deformações da viga, especialmente as deflexões, não ultrapassem os limites estabelecidos pelas normas técnicas, para que a viga permaneça funcional e segura durante a operação da estrutura. A deflexão máxima ou flecha máxima é a maior deformação que ocorre na viga devido a uma carga aplicada. Ela é uma medida crítica, pois deflexões excessivas podem comprometer a estética, a segurança e a eficiência da estrutura.

Neste projeto, a viga foi analisada para garantir que sua flecha máxima não exceda o valor máximo permitido pela ABNT NBR 8800:2008, que estabelece um limite de deflexão geralmente relacionado ao comprimento da viga (comumente $L/350$).

$$\delta_{max} = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I}$$

Onde:

δ_{max} = flecha máxima

- P = carga concentrada no meio da viga (em Newtons)
- L = comprimento do vão da viga (em metros)
- E = módulo de elasticidade do material (N/m^2)
- I = momento de inércia da seção da viga (m^4)

$$\delta_{max} = \frac{208100 \cdot 3,74^3}{48 \cdot 200000 \times 10^6 \cdot 6,35 \cdot 10^{-6}}$$

$$\delta_{max} = 0,2 \text{ mm}$$

$$\delta_{max \text{ permitida}} = \frac{3740}{350} = 10,68 \text{ mm}$$

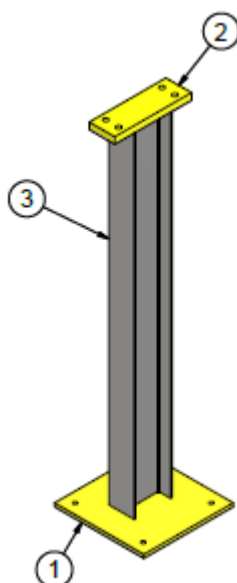
Como o valor da flecha máxima calculada 0,2 mm é inferior ao valor máximo permitido de 10,68 mm, a viga atende aos requisitos de deflexão e está dentro dos limites de segurança.

Tabela 8 Flecha máxima.

Flecha máx(mm) δ_{max}	Flecha máx permitida(mm) $\delta_{max \text{ permitida}}$	Comprimento L(mm)
0,2	10,68	3740
0,01	6,3	2200

Fonte: A autora, 2025.

Figura 30 Pilar



Fonte: A autora, 2024

Tabela 9 Lista de material do pilar

3	1	PERFIL W 150 x 13,0x1314	ASTM A36	16,4 kg
2	1	CHAPA 1"x100x300	ASTM A36	5,89 kg
1	1	CHAPA 1/2"x350x350	ASTM A36	12,15 kg
POS	QUANT	DESCRIÇÃO	MATERIAL/DES.	PESO
LISTA DE MATERIAIS				

Fonte: A autora, 2024

Tabela 10 Características dos perfis.

Perfis W150x13		
Material A36		
Elemento	Quantidade	Comprimento (m)
Viga	1	3,74
Viga	1	2,20
Viga	5	0,70
Pilar	4	1,314

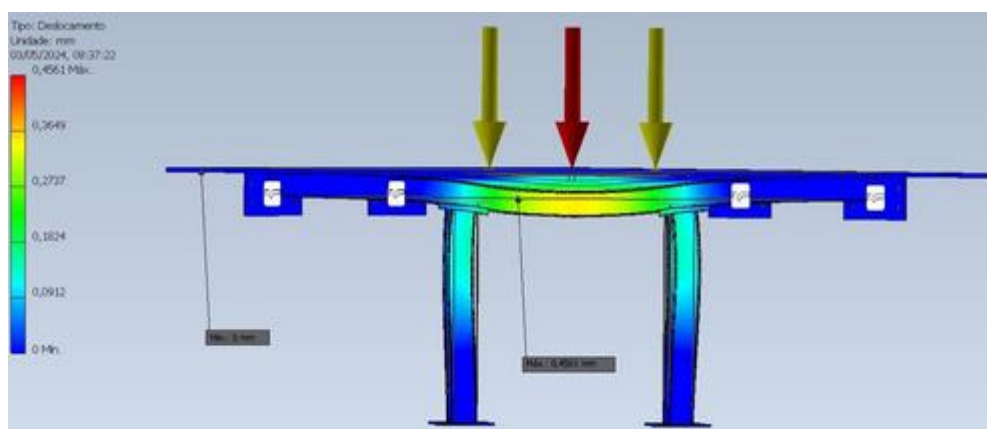
Fonte: A autora, 2025

6.1.9 Análise Estrutural e Simulações:

As simulações no Autodesk Inventor, incluindo análises estáticas e não lineares, confirmaram a segurança e a viabilidade da estrutura. Os resultados das simulações, como mapas de tensões, deformações e fatores de segurança, indicam que a estrutura é capaz de suportar as cargas previstas com segurança.

O deslocamento em estruturas metálicas refere-se à deformação dos elementos que compõem a estrutura devido à aplicação de cargas externas. A análise desse deslocamento é fundamental para assegurar que a estrutura não sofra deformações excessivas, que possam comprometer sua funcionalidade e segurança. No caso da estrutura metálica que suporte uma carga de 208,1 KN, como o peso de um mulk, foi crucial calcular os deslocamentos para garantir que os limites de deformação sejam atendidos, evitando falhas ou danos aos componentes estruturais.

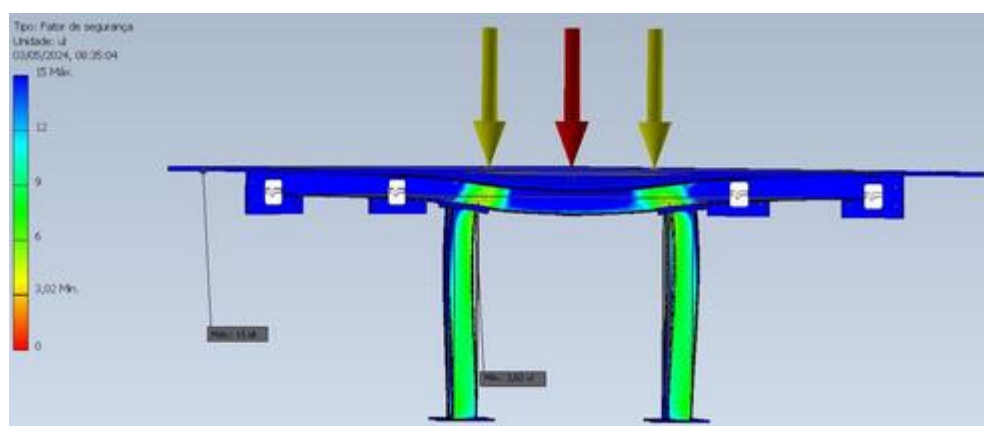
Figura 31 Análise do deslocamento



Fonte: A autora, 2024

O fator de segurança é uma margem adicional de resistência aplicada no dimensionamento de estruturas metálicas, visando garantir que a estrutura seja capaz de suportar sobrecargas e condições imprevistas sem falhar. Esse fator é calculado pela razão entre a resistência máxima do material e a carga máxima esperada. Para a carga de 208,1 KN, o fator de segurança que deu na análise foi 3,02 min.

Figura 32 Análise do Fator de segurança

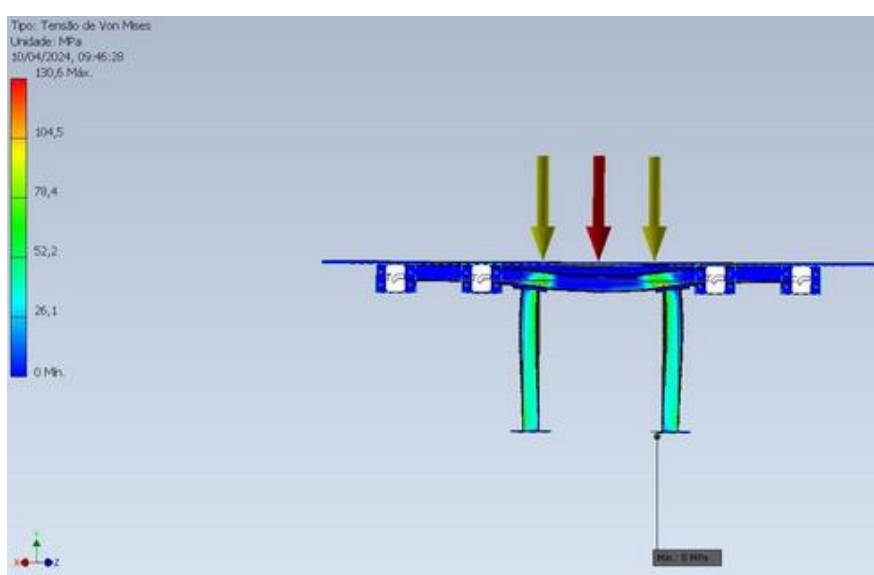


Fonte: A autora, 2024

A tensão de Von Mises é critério de falha amplamente utilizado na análise de estruturas metálicas sujeitas a tensões combinadas, como tração, compressão e

cisalhamento. Essa tensão é calculada a partir das tensões principais atuando sobre o material e comparada com o limite de escoamento do material. Quando a tensão de Von Mises ultrapassa o limite de escoamento, a estrutura começa a sofrer deformação plástica, comprometendo sua integridade. Ao aplicar uma carga de 208.100 N sobre a estrutura metálica, a análise de Von Mises foi usada para identificar as regiões críticas de tensão e garantir que a estrutura seja projetada para resistir sem falhar.

Figura 33 Tensão de Von Mises



Fonte: A autora, 2024

6.2 Discussão dos Resultados:

A análise dos resultados obtidos demonstra que o projeto da estrutura metálica atende aos requisitos de segurança e funcionalidade. A modelagem 3D detalhada e as simulações computacionais permitiram uma análise precisa do comportamento da estrutura sob diferentes condições de carregamento.

A seleção dos perfis e o dimensionamento dos elementos de fixação foram realizados com base nas normas técnicas aplicáveis, garantindo a resistência e a durabilidade da estrutura. A aplicação das condições de contorno e a análise dos resultados das simulações permitiram identificar as áreas críticas da estrutura e garantir que ela seja capaz de suportar as cargas previstas com segurança.

O cálculo da porcentagem da flecha máxima é baseado na relação entre a flecha obtida pelo cálculo analítico, simulação e a flecha máxima permitida.

Fórmula utilizada:

$$\% \text{ Flecha Máxima} = \left(\frac{\text{Flecha analítica}}{\text{Flecha Máxima Permitida}} \right) \times 100$$

Aplicação para o Cálculo Analítico:

$$\begin{aligned} \% \text{ Flecha Analítica} &= \left(\frac{0.2}{10.68} \right) \times 100 \\ &= (0.018726) \times 100 = 1.87\% \end{aligned}$$

Aplicação para a Simulação:

$$\begin{aligned} \% \text{ Flecha Simulada} &= \left(\frac{0.4}{10.68} \right) \times 100 \\ &= (0.037453) \times 100 = 3.75\% \end{aligned}$$

Esses valores mostram que ambas as flechas calculadas estão bem abaixo do limite permitido de 10.68 mm, garantindo que o deslocamento estrutural esteja dentro dos critérios aceitáveis.

Para avaliar a segurança estrutural do componente em estudo, utilizou-se o critério de Von Mises, que é adequado para materiais dúcteis, como o aço ASTM A36. O fator de segurança (FS) foi determinado pela relação entre a tensão de escoamento do material e a tensão equivalente de Von Mises obtida na análise:

$$FS = \frac{\sigma_{esco}}{\sigma_{von\ mises}}$$

Onde:

Tensão de escoamento do aço A36: $\sigma_y = 250$ MPa

Tensão equivalente de Von Mises obtida: $\sigma_{von\ mises} = 130.6$ MPa

Substituindo os valores:

$$FS = \frac{250 \text{ MPa}}{130.6 \text{ MPa}} = 1.9 \sim FS = 2$$

Dessa forma, o fator de segurança calculado é 1.9, indicando que a estrutura pode suportar a tensão aplicada antes de atingir o escoamento.

O cálculo da porcentagem do fator de segurança é baseado na relação entre o fator obtido pelo cálculo analítico, simulação e o fator mínimo permitido.

$$\% \text{ Fator de Segurança} = \left(\frac{FS \text{ analítico}}{FS \text{ Permitido}} \right) \times 100$$

Aplicação para o Cálculo Analítico:

$$\% FS \text{ Analítico} = \left(\frac{2}{1} \right) \times 100 = 200\%$$

Isso significa que, no cálculo analítico, o fator de segurança é duas vezes maior que o mínimo exigido.

Aplicação para a Simulação:

$$\% FS \text{ Simulado} = \left(\frac{3.02}{1} \right) \times 100 = 302\%$$

Isso indica que, na simulação, o fator de segurança é 3,02 vezes maior que o mínimo necessário, proporcionando ainda mais confiabilidade à estrutura.

Para calcular a porcentagem da tensão de Von Mises em relação ao limite permitido (250 MPa), usamos a fórmula:

$$\% \text{ Tensão de Von Mises} = \left(\frac{\text{Tensão analítica}}{\text{Tensão Máxima Permitida}} \right) \times 100$$

Aplicação para o Cálculo Analítico (162,25 MPa):

$$\% \text{ Tensão Analítica} = \left(\frac{162,25}{250} \right) \times 100 = 64,9\%$$

A tensão de Von Mises obtida no cálculo analítico corresponde a 64,9% do limite máximo permitido.

Aplicação para a Simulação (130,6 MPa):

$$\%Tensão\ Simulada = \left(\frac{130,6}{250}\right) \times 100 = 52,24\%$$

A tensão de Von Mises obtida na simulação corresponde a 52,24% do limite máximo permitido.

Tabela com a comparação em porcentagem:

Tabela 11 Resumo dos resultados.

Parâmetro	Cálculo analítico	Porcentagem do cálculo analítico	Simulação	Critério de aceitação	Porcentagem da simulação	Observação
Flecha máxima (mm)	0,2	1,87%	0,4	10,68	3,75%	Dentro do limite permitido.
Fator de segurança	2	200%	3,02	FS > 1	302%	Adequado
Von mises (MPa)	162,25	64,9%	130,6	250	52,24%	Abaixo do limite de escoamento, estrutura segura.

Fonte: A autora, 2025

As porcentagens indicam o quanto cada valor calculado está em relação ao limite máximo ou mínimo aceitável:

- A flecha máxima (Deformação) é muito menor que o limite permitido no cálculo analítico 1,87% e na simulação 3,75%, garantindo segurança estrutural.
- A estrutura está no cálculo analítico 200% e na simulação 302% muito acima do fator de segurança mínimo, indicando alta resistência e confiabilidade.

- A tensão de Von Mises é aproximadamente no cálculo analítico 64,9% e na simulação 52,24% do limite de escoamento, o que é bom, pois a estrutura ainda está bem abaixo do limite de falha.

A implementação deste projeto contribuirá para a otimização das operações de manutenção no PGL 3B, reduzindo o tempo de inatividade do píer e aumentando a segurança dos trabalhadores. A melhoria do espaço para manobra de caminhões munck permitirá a realização de manutenções de forma mais eficiente, garantindo a operação contínua do porto.

7 CONCLUSÃO

O projeto da estrutura metálica para o PGL 3B no Porto de Suape foi desenvolvido com sucesso, atendendo aos requisitos de segurança e funcionalidade. A modelagem 3D detalhada, as análises estruturais e as simulações computacionais garantem que a estrutura seja capaz de suportar as cargas previstas com segurança.

A implementação deste projeto trará benefícios significativos para o Porto de Suape, otimizando as operações de manutenção e contribuindo para a eficiência e a segurança do píer.

REFERENCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16239: Estruturas de Aço e Estruturas Mistas de Aço e Concreto em Edificações – Dimensionamento de Ligações Parafusadas e Soldadas. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

BARROS, Felício Bruzzi. Métodos Sem Malha e Método dos Elementos Finitos Generalizados em Análise Não-Linear de Estruturas. 2002. 222 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

CAMPOS, Aderson. Manual de engenharia para estruturas metálicas. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

CHIAVERINI, Vicente. Materiais de construção mecânica. 6. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2008.

COMPLEXO INDUSTRIAL PORTUÁRIO DE SUAPE. Conheça Suape. LinkedIn, 2023. Disponível em: https://pt.linkedin.com/posts/complexo-industrial-portu%C3%A1rio-de-suape_conhe%C3%A7asuape-activity-6797593132323090432-M7s1. Acesso em: 10 jun. 2024.

ENSUS. Elementos finitos: quais os benefícios? 2024. Disponível em: <https://ensus.com.br/elementos-finitos-quais-os-beneficios/>. Acesso em: 28 fev. 2025.

HIBBELER, R. C. Análise Estrutural. 10. ed. São Paulo: Pearson, 2018.

KASSAB, F. Estruturas Metálicas na Prática da Engenharia. 2016.

KUBO, M. Desenho Técnico de Estruturas Metálicas. São Paulo: LTC, 2019.

LUZ, Gelson. Limite de resistência à tração. Blog Materiais, [s. l], 2017. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/12/limite-de-resistencia-tracao.html>. Acesso em: 19 mar. de 2025.

MARTHA, L. F. Análise de estruturas: Conceitos e métodos básicos. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017. 569 p.

McKINNELL, J. Steel Detailing in CAD and BIM. 2nd ed. CRC Press, 2020.
METALON. Perfil I e H. 2024. Disponível em: <https://www.metalon.com.br/novo/produto/perfil-i-h/>. Acesso em: 28 fev. 2025.
NÉSTOR, S.; MARCOS, A. M. Projeto de Estruturas de Aço: Dimensionamento de Perfis. São Paulo: Blucher, 2017.

PAULETTI, Ruy. Estruturas de aço. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.
SCHNEIDER, C., & LEONHARDT, F. Estruturas de Aço para Obras Industriais. 2019.

SHIGLEY, Joseph E.; MISCHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard G. Projeto de Engenharia Mecânica. 7. ed. São Paulo: Bookman, 2005.

SILVA, Marcos. Comportamento de materiais em estruturas metálicas. São Paulo: Blucher, 2017.

SILVA NETO, I. S. Projeto de uma estrutura metálica para remoção de defesa marítima de um complexo industrial portuário. 2019. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/46801/1/ILTON%20SOARES%20DA%20SILVA%20NETO-PROJETO%20DE%20UMA%20ESTRUTURA%20MET%3%81LICA%20PARA%20REMO%3%87%C3%83O%20DE%20DEFENSA%20MAR%3%8DTIMA%20DE%20UM%20COMPLEXO%20INDUSTRIAL%20PORTU%3%81RIO.pdf>. Acesso em: 19 mar. de 2025.

SOUZA, L. A., & LOPES, M. F. Métodos Numéricos Aplicados à Engenharia de Estruturas. 2020.

TIMOSHENKO, S. P., & GERE, J. M. Teoria da Elasticidade. 2002.

VIVA DECORA. Estrutura metálica: vantagens, tipos e 35 projetos para se inspirar. 2024. Disponível em: <https://arquitetura.vivadecora.com.br/estrutura-metalica/>. Acesso em: 28 fev. 2025.

Vaz, M., & SCHNEIDER, C. Estruturas Metálicas: Projetos e Execuções. 2018.