



**INSTITUTO
FEDERAL**

Bahia

Campus
Jequié

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA
BAHIA (IFBA), CAMPUS JEQUIÉ**

MARCOS VINICIUS DE LIMA E SILVA

**PROTOTIPAGEM VIRTUAL DE UMA BATERIA GRAVITACIONAL: DESENVOLVIMENTO E
VALIDAÇÃO DE UMA PROVA DE CONCEITO**

**JEQUIÉ-BA
2025**

MARCOS VINICIUS DE LIMA E SILVA

**PROTOTIPAGEM VIRTUAL DE UMA BATERIA
GRAVITACIONAL: DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE
UMA PROVA DE CONCEITO**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à disciplina de TCC, aos docentes Fabiano Borges e Rita Queiroz como requisito parcial para conclusão do curso.

Orientador: Prof. Dr. Wesley Matos Cidreira

JEQUIÉ-BA
2025

MARCOS VINICIUS DE LIMA E SILVA

**PROTOTIPAGEM VIRTUAL DE UMA BATERIA
GRAVITACIONAL: DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE
UMA PROVA DE CONCEITO**

A banca examinadora, abaixo listada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso “Prototipagem Virtual de uma Bateria Gravitacional: Desenvolvimento e Validação de uma Prova de Conceito” elaborado por “Marcos Vinicius de Lima e Silva ” como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia.

Jequié-BA, 22/01/2025

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Wesley Matos Cidreira
IFBA
(Orientador)

Prof. Esp. Vitor Silva Vieira
IFBA

**Prof. Esp. Roberto Oliveira Correia de
Brito**
Petrobras

Prototipagem Virtual de uma Bateria Gravitacional: Desenvolvimento e Validação de uma Prova de Conceito

Resumo

A prototipagem virtual de sistemas mecânicos, como no caso de uma bateria gravitacional, surge como uma abordagem promissora para o desenvolvimento e otimização de mecanismos de armazenamento de energia. Este estudo focou no desenvolvimento de um protótipo virtual de uma bateria, visando aplicações específicas e limitadas em comparação com versões de maior escala, de produção industrial. O principal objetivo foi adaptar a teoria existente para a criação de um protótipo capaz de armazenar cerca de 10 kWh, para uso em sistemas autônomos. O processo de desenvolvimento seguiu três etapas principais: a definição do projeto conceitual, a atribuição dos comportamentos mecânicos às peças, e a realização da prototipagem virtual, incluindo modelagens tridimensionais e simulações de resistência estrutural. O sistema proposto se baseia no uso da energia potencial gravitacional, com ênfase na elevação e descida de um lastro para gerar eletricidade. Foram considerados parâmetros como altura e massa, os quais definem a capacidade de armazenamento da bateria. A simulação computacional desempenhou um papel fundamental, utilizando o método de Análise por Elementos Finitos (FEA) para avaliar as tensões mecânicas em diferentes componentes, como o carretel e as polias. Foram modeladas diversas peças para a composição da estrutura, totalizando 91.860,34 kg de estrutura metálica. No desenvolvimento do projeto, foram realizados 12 ensaios de simulação computacional para avaliar o comportamento do sistema diante das cargas aplicadas. Os resultados das simulações indicaram que as peças modeladas suportaram as cargas com um fator de segurança dentro dos limites estipulados, garantindo a integridade estrutural e a confiabilidade do sistema. Além disso, a montagem do sistema estrutural da bateria foi realizada sem interferência entre os sólidos, assegurando um encaixe adequado das peças. A bateria projetada possui uma capacidade de armazenamento de 10,86 kWh, atendendo aos requisitos energéticos definidos para o projeto. Apesar dos avanços obtidos com a prototipagem virtual, o estudo revela limitações quanto à transposição do modelo virtual para um protótipo físico. Questões logísticas, de fabricação, e eficiência energética precisam ser avaliadas mais profundamente, assim como os custos e impactos ambientais. O estudo serve como base para futuros desenvolvimentos que busquem validar e aprimorar o sistema proposto, permitindo sua aplicação prática em larga escala, especialmente em contextos off-grid.

Palavras-chave: bateria gravitacional; energia; FEA; prototipagem virtual.

Abstract

The virtual prototyping of mechanical systems, such as a gravitational battery, emerges as a promising approach for the development and optimization of energy storage mechanisms. This study focused on developing a virtual prototype of a battery, targeting specific and limited applications compared to larger-scale, industrially-produced versions. The main objective was to adapt existing theory to create a prototype capable of storing approximately 10 kWh, for use in autonomous systems. The development process followed three main stages: the definition of the conceptual design, the assignment of mechanical behaviors to components, and the execution of virtual prototyping, including three-dimensional modeling and structural resistance simulations. The proposed system is based on the use of gravitational potential energy, with an emphasis on raising and lowering a ballast to generate electricity. Parameters such as height and mass were considered, which define the battery's storage capacity. Computational simulation played a fundamental role, using the Finite Element Analysis (FEA) method to evaluate mechanical stresses on different components, such as the spool and pulleys. Various parts were modeled to compose the structure, totaling 91,860.34 kg of metal framework. During the project development, 12 computational simulation tests were conducted to assess the system's behavior under applied loads. The simulation results indicated that the modeled parts withstood the loads with a safety factor within the stipulated limits, ensuring the structural integrity and reliability of the system. Additionally, the assembly of the battery's structural system was completed without interference between the solids, ensuring a proper fit of the components. The designed battery has a storage capacity of 10,86 kWh, meeting the energy requirements defined for the project. Despite the advances achieved with virtual prototyping, the study reveals limitations regarding the translation of the virtual model into a physical prototype. Logistical, manufacturing, and energy efficiency issues need further evaluation, as well as costs and environmental impacts. This study serves as a foundation for future developments aimed at validating and enhancing the proposed system, enabling its practical application on a larger scale, especially in off-grid contexts.

Keywords: gravitational battery; energy; FEA; virtual prototype.

Lista de figuras

Figura 1 – Cabos de 6 pernas	11
Figura 2 – Representação esquemática do arranjo dos componentes da bateria	12
Figura 3 – Fluxograma da metodologia de prototipagem virtual.	18
Figura 4 – Medidas laterais de um palet PBR.	19
Figura 5 – Bloco do lastro	19
Figura 6 – Lastro	20
Figura 7 – Fixações e cargas no bloco	20
Figura 8 – Valores de H	22
Figura 9 – Secção axial do carretel com o cabo de aço enrolado	23
Figura 10 – Carretel (Versão 01)	24
Figura 11 – Fluxograma sequencial das simulações no cerretel	24
Figura 12 – Cargas e fixações no carretel	25
Figura 13 – Tensão de fratura no eixo do carretel	26
Figura 14 – Tensão máxima no eixo ajustado do carretel	27
Figura 15 – Compressão no tambor do carretel	28
Figura 16 – Secção do carretel modificado	28
Figura 17 – Cadernal utilizado como referência	30
Figura 18 – Tabela de cabos de 6 pernas IPH 619	30
Figura 19 – Canal da roldana (polia)	32
Figura 20 – Dimensões do canal da polia	33
Figura 21 – Cadernal	33
Figura 22 – Análise estática no cadernal	34
Figura 23 – Ponte	34
Figura 24 – Fixações e aplicação das cargas na ponte.	35
Figura 25 – Carretel para o cabo de aço de 22 mm	37
Figura 26 – Cargas e fixações para simulação a ação da força peso no carretel.	38
Figura 27 – Mancal	39
Figura 28 – Aplicação da carga σ_m	39
Figura 29 – Face de aplicação do carregamento P_m e aceleração da gravidade .	40
Figura 30 – Fixações no mancal	40
Figura 31 – Vista lateral da montagem	41
Figura 32 – Ângulo de desvio do cabo de aço.	42
Figura 33 – Representação esquemática da instalação da bateria gravitacional .	45
Figura 34 – Ponto de tensão máxima na gaiola da ponte	48
Figura 35 – Ponto de tensão máxima no mancal	50

Figura 36 – Quadro dos parâmetros das malhas geradas nas simulações computacionais. 61

Lista de símbolos

E_{pg}	Energia potencial gravitacional
S	Altura de deslocamento do lastro
m	Massa do lastro
g	Aceleração da gravidade
V_L	Velocidade do lastro durante o carregamento
Vd_L	Velocidade do lastro durante o descarregamento
a	Aceleração de subida do lastro
t_p	Tempo total da partida do motor elétrico
V_i	Velocidade inicial do lastro
a_f	Aceleração de frenagem do lastro
t_f	Tempo de frenagem do lastro
P_b	Peso aplicado em um bloco do lastro
P_l	Peso total do lastro
σ_s	Tensão adicional no cabo de aço gerada na subida do lastro
σ_f	Tensão adicional no cabo de aço gerada na frenagem, durante a descida do lastro
m_a	Massa total do cabo de aço de 82,6 mm
D	Diâmetro mínimo de enrolamento do cabo de aço de 82,6 mm
H	Coeficiente para o cálculo de diâmetro de enrolamento mínimo do cabo de aço
d	Diâmetro nominal do cabo de aço
D_f	Diâmetro mínimo dos flanges do carretel A
C_t	Comprimento do tambor do carretel A
T_t	Torque aplicado no tambor

σ_{y0}	Tensão de compressão circunferencial
F_c	Força máxima de tração no cabo de aço
t_u	Espessura útil do tambor
p	Passo da ranhura
C_{ra}	Carga de ruptura do cabo de aço de 82,6 mm
C_{rb}	Carga de ruptura do cabo de aço de 22 mm
m_c	Massa total do cabo de aço de 22 mm
m_b	Massa admissível para o cadernal
p_b	Passo da ranhura para o cabo de 22 mm
D_p	Diâmetro mínimo das polias do cadernal
D_b	Diâmetro do tambor do carretel B
D_{fb}	Diâmetro dos flanges do carretel B
C_{tb}	Comprimento do tambor do carretel B
C_{tb}	Número de voltas para enrolamento do cabo de aço no carretel B
F_{cb}	Força máxima de tração no cabo de aço de 22 mm
T_{tb}	Torque aplicado no tambor do carretel B
P_c	Peso do cabo de 22 mm
P_{cd}	Peso do cadernal
σ_m	Carga de compressão aplicada no mancal
P_m	Força reativa atuante nos mancais
α	Ângulo máximo de desvio do cabo de aço
X	Distância mínima no centro do carretel ao moitão

Sumário

1 – Introdução	1
2 – Referencial teórico	3
2.1 Armazenamento de energia	3
2.2 Projetos de engenharia mecânica	5
2.2.1 Prototipagem Virtual	6
2.2.2 Fator de segurança	6
2.3 Ligas metálicas	7
2.3.1 Limite de resistência a tração	7
2.4 Esforços mecânicos	8
3 – Metodologia	10
3.1 Considerações de projeto	10
3.2 Conjunto de decisões	13
3.3 Prototipagem virtual	17
3.3.1 Lastro	18
3.3.2 Carretel para o cabo de aço de 82,6 mm (Carretel A)	21
3.3.3 Reestruturação do sistema	29
3.3.4 Cadernal	31
3.3.5 Ponte	34
3.3.6 Carretel para o cabo de aço de 22,00 mm (Carretel B)	36
3.3.7 Mancais	38
3.3.8 Montagem	41
4 – Resultados	43
4.1 Simulações computacionais	46
4.2 Desempenho	52
4.3 Aplicações	53
5 – Conclusão	55
Referências	58

Anexos	60
ANEXO A – Propriedades das malhas de elementos finitos	61
ANEXO B – Propriedades das ligas metálicas	62

1 Introdução

A busca por soluções sustentáveis de armazenamento de energia é essencial devido ao aumento da demanda energética global e à diminuição dos recursos naturais. Dentre essas soluções inovadoras, destaca-se o armazenamento de energia por meio da força gravitacional, que utiliza pesos suspensos para armazenar, converter e fornecer energia. Este método consiste em usar energia excedente para erguer um objeto, acumulando energia potencial gravitacional, que é liberada quando o objeto desce, gerando eletricidade por meio de um gerador.

Desenvolver e testar protótipos de baterias gravitacionais envolve garantir que as estruturas sejam capazes de suportar as cargas previstas. Isso é crucial para a segurança, durabilidade e eficiência do sistema. Projetos bem elaborados devem considerar fatores como a escolha de materiais adequados que suportem as tensões e forças envolvidas, garantindo que a estrutura permaneça estável durante o levantamento e a descida dos pesos. Além disso, é importante projetar para minimizar desgaste e necessidade de manutenção, assegurando longevidade do sistema, bem como implementar medidas que previnam falhas catastróficas, protegendo tanto o equipamento quanto os operadores.

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver um protótipo virtual de uma bateria gravitacional de pequeno porte, ou seja, um dispositivo destinado a armazenar quantidades relativamente menores de energia, em comparação com as baterias gravitacionais utilizadas em indústrias ou grandes instalações. Essas baterias de maior escala são projetadas para suportar demandas energéticas significativas, enquanto a bateria de pequeno porte, como o exemplo deste estudo, tem a capacidade de armazenar cerca de 10 kWh, tornando-se mais adequada para aplicações menores e específicas. Isso inclui a definição das dimensões principais das estruturas necessárias para a instalação da bateria, baseada em padrões de fabricação e nos resultados das simulações. Essa abordagem busca oferecer mais uma alternativa inovadora às soluções convencionais de armazenamento energético, contribuindo para a transição global rumo à sustentabilidade.

Para atingir esses objetivos, o projeto começa utilizando um estudo teórico já existente como base para o desenvolvimento do protótipo, assegurando que os princípios e parâmetros teóricos sejam aplicados corretamente. A concepção do dispositivo mecânico envolve adaptar o design virtual do mecanismo que irá erguer e descer os pesos, incluindo todos os componentes mecânicos necessários, com base na teoria existente. Em seguida, são realizadas simulações para prever o desempenho do protótipo, identificando pontos fortes e possíveis áreas de melhoria.

Este trabalho se concentra na adaptação de um estudo teórico para a criação de um protótipo virtual, sem entrar em detalhes sobre fabricação, análises de viabilidade econômica ou impactos socioambientais. No entanto, os resultados obtidos poderão servir de base para futuros estudos e desenvolvimentos nessa área promissora do armazenamento de energia.

2 Referencial teórico

2.1 Armazenamento de energia

Atualmente existem diversos tipos de tecnologias para baterias elétricas, as maiores fabricantes de baterias produzem principalmente dispositivos à base de chumbo, lítio, sódio, níquel base, capacitor eletroquímico e bateria de fluxo de vanádio. A maioria dos projetos de tecnologia em operação utilizam baterias de lítio íon nos circuitos elétricos (SILVA, 2022).

As baterias podem ser utilizadas de diversas formas, como para regulação e controle de tensão e frequência, arbitragem e compensação da variabilidade de geração eólica e solar, gerenciamento de energia, e aplicadas em diversos setores, como de distribuição, transmissão e geração de energia elétrica. As aplicações das baterias de lítio estão em ampliação, devido a elevada densidade energética destes dispositivos, gerando impactos negativos em relação às consequências da mineração do metal e da dificuldade de reaproveitamento pelas indústrias de reciclagem de baterias, que estão em seus estágios iniciais (SILVA, 2022).

A eficiência do armazenamento de energia em uma bateria é definida pela relação entre a energia armazenada e a energia recuperada do armazenamento, a chamada eficiência CA/CA, também conhecida do termo em inglês *round-trip efficiency* (do português, eficiência de ida e volta). Tal eficiência circunda os 90% para as de lítio íon, chumbo ácido e sódio enxofre, cujas vidas úteis estão por volta de 15 anos (SILVA, 2022).

As baterias de lítio são um tipo de baterias secundárias que fornecem eletricidade através da energia química que armazenam. O controle do sentido das reações eletroquímicas entre os eletrodos das baterias de lítio, definem os ciclos de carga e recarga. Durante o ciclo de recarga das baterias de lítio, os íons de lítio (Li^+) se deslocam do cátodo para o ânodo, ao contrário do ciclo de descarga, no qual a movimentação dos íons e elétrons ocorrem ao contrário (FILHO, 2019).

A energia pode ser armazenada de diversas formas, por meio de transformações energéticas são gerados potenciais de liberação de energia que podem ser contidos para utilização em um momento futuro. A energia potencial gravitacional, segundo Halliday et al. (2009, p. 181), “trata-se de uma energia associada ao estado de separação entre dois objetos que se atraem mutuamente através da força gravitacional”, tal energia pode ser transformada em outras formas de energia, inclusive a elétrica.

Ruoso et al. (2022) expõe algumas tecnologias de armazenamento energé-

alternativas às baterias: volantes (FES, do inglês *Flywheel Energy Storage*), que armazena eletricidade mediante a energia cinética contida em um disco móvel; armazenamento de energia por ar comprimido, (CAES, do inglês *Compressed Air Energy Storage*), que converte a pressão do ar armazenado em eletricidade; armazenamento hidroelétrico bombeado (PHES, do inglês *Pumped Hydroelectric Energy Storage*), armazena energia via o bombeamento de água para um reservatório em altitude elevada; sistema de armazenamento submerso no oceano (UOSS, do inglês *Underwater Ocean Storage Systems*), uma embarcação submersa que bombeia água para fora durante o ciclo de carregamento; módulo de força gravitacional (GPM, do inglês *Gravity Power module*), que utiliza um pistão, um container d'água e uma turbina, para armazenar energia; armazenamento hidro hidráulico (HHS, do inglês *Hydraulic Hydro Storage*) e o GBES (do inglês *Ground-breaking Energy Storage*) e o Gravitricity, que se baseia no içamento vertical de uma massa pesada ao longo de um eixo no subsolo.

De acordo com [Bowoto et al. \(2021\)](#), o sistema Gravitricity de Charles Blair, basicamente, utiliza de uma fonte de energia renovável para suspender pesos com um conjunto de polias e de uma rede de conexões elétricas. Thomas Morstyn desenvolveu o projeto do armazenador de energia Gravity, que utiliza pesos suspensos por hastes de minas abandonadas, conectando um motor de indução aos pesos através de cordas. A energia elétrica fornecida pelo motor, é proporcional a velocidade e a massa do peso suspenso, quanto maior é a necessidade de energia, maiores são as taxas de aceleração necessárias, implicando a utilização de motores e circuitos elétricos mais potentes.

O projeto EVx™ de armazenamento de energia por gravidade da Energy Vault, com capacidade de 100 MWh, construído em Rudong, China, próximo a uma fazenda eólica e à rede nacional de energia. A conexão total à rede estava prevista para até o final de 2023, visando estabilizar a rede elétrica chinesa ao redistribuir energia renovável para a State Grid Corporation of China. A tecnologia EVx™ apresenta uma eficiência de ciclo superior a 80%, destacando-se em relação a outros métodos de armazenamento de longa duração, como sistemas mecânicos e termodinâmicos. Projetado para uma vida útil de 35 anos, o sistema apoia a iniciativa chinesa de "Parques de Carbono Zero" e o plano de neutralidade de carbono "30-60", estabelecendo um marco para tecnologias de descarbonização global ([VAULT, s.d.](#)).

A densidade energética, expressa em energia por unidade de massa, é um parâmetro essencial para avaliar e comparar diferentes fontes e métodos de armazenamento de energia, especialmente ao considerar a eficiência e viabilidade de baterias e combustíveis fósseis. As baterias de chumbo-ácido, comuns em veículos e sistemas de armazenamento, possuem densidade energética relativamente baixa, enquanto as baterias de íon-lítio, predominantes em dispositivos portáteis e veículos elétricos, ofe-

recem densidade energética consideravelmente superior (REIS, 2023).

2.2 Projetos de engenharia mecânica

Segundo Shigley et al. (2005), “o conjunto de decisões é expresso em termos dos parâmetros de pensamento do projetista e enfoca facilmente a função, a segurança, a confiabilidade e assim por diante”, tais resoluções são responsáveis por definir como a bateria gravitacional atingirá o seu objetivo. Um projeto de engenharia se torna uma alternativa satisfatória quando é adequado, factível e aceitável, ou seja, atende ao propósito destinado, pode ser desenvolvido com os recursos disponíveis e possui resultados compatíveis com os valores investidos. As características que influenciaram a elaboração da bateria gravitacional são considerações de projeto definidas pelo projetista conforme o objetivo final do produto.

Para Shigley et al. (2005), considerações de projeto estão relacionadas diretamente a características como dimensões e materiais, geralmente definidas por abordagens matemáticas, entretanto, é comum que os conceitos mais importantes não utilizem de cálculos ou experimentos para estabelecer um elemento ou esquema.

De acordo com Beer et al. (2011), é de extrema importância para o projeto, o conhecimento do comportamento dos materiais escolhidos quando submetido a um esforço, os elementos estruturais de uma máquina possuem uma carga máxima que podem suportar, a carga-limite, que ao ser multiplicada por um fator de segurança, obtém-se a carga admissível, adotada para o uso seguro no projeto.

O coeficiente de segurança pode ser pensado como o nível de incerteza do projetista em relação aos modelos analíticos do projeto, teorias de falha e das propriedades dos materiais. A magnitude do coeficiente depende de diversos fatores, incluindo o nível de conhecimento sobre as possíveis variações de esforços no qual o projeto será submetido (NORTON, 2013).

Os projetos de engenharia foram revolucionados pelo surgimento do computador. Aplicativos de desenho auxiliado por computador (CAD, do inglês *Computer Aided Design*), originalmente surgiram como ferramentas que permitiam a criação de desenhos com vistas múltiplas, semelhantes aos feitos manualmente. Versões atualizadas dos *softwares* CAD codificam a geometria das peças em bancos de dados 3D, permitindo o rápido cálculo das propriedades de massa do objeto (NORTON, 2013).

Através da Análise por Elementos Finitos (FEA, do inglês *Finite Element Analysis*), pode-se obter, dadas as condições de contorno, uma aproximação das tensões e deformações em um componente dividindo-o em um número finito de elementos discretos conectados por nós, dando origem a uma malha. Tal método não se limita a

análises estruturais, situações de mecânica dos fluidos, transferência de calor, eletromagnetismo e acústica são exemplos onde a FEA é aplicada, obtendo-se informações sobre tensões, deformações, deflexão, frequências naturais e modos de vibração e impacto (NORTON, 2013).

2.2.1 Prototipagem Virtual

De acordo com Faithfull, Ball e Jones (2001, citado por Müller e Saffaro (2011)), a prototipagem virtual é compreendida como um processo de aproximação do produto que se desenvolve ao longo das etapas do Processo de Desenvolvimento do Produto (PDP), utilizando tecnologias CAD com Realidade Virtual (RV), proporcionando uma experiência imersiva e interativa por meio de imagens gráficas tridimensionais geradas em tempo real por um computador.

McLeod (2003, citado por Müller e Saffaro (2011)) afirma que os protótipos virtuais tendem a oferecer mais flexibilidade para ajustes em comparação com os protótipos físicos, uma vez que permitem o uso de tecnologias da informação para uma colaboração mais eficiente entre designers, engenheiros, comerciantes e clientes.

A análise por elementos finitos (FEA) é uma técnica numérica confiável para projetos de engenharia, iniciando com a criação de um modelo geométrico, que é subdividido em pequenos elementos conectados em nós. O Método de Elementos Finitos (MEF) combina as informações de todos os elementos para prever o comportamento do modelo. A geração de malhas é crucial, sendo controlada pelo *software* que ajusta o tamanho dos elementos com base em especificações globais e locais. Este processo resulta em uma rede de elementos 1D, 2D ou 3D, conforme a necessidade do modelo, onde elementos sólidos são usados para volumes, cascas para peças finas, e vigas para componentes estruturais, permitindo ajustes no tamanho dos elementos para balancear precisão e tempo de solução (SYSTEMES, 2022).

2.2.2 Fator de segurança

Chiaverini (1986) afirma que ao projetar uma estrutura ou máquina, é fundamental considerar tanto as condições de segurança quanto a aplicação de um coeficiente de segurança, também conhecido como "fator de segurança". Esse coeficiente é utilizado para aumentar a margem de segurança, sendo obtido ao dividir a carga no qual as peças estão sujeitas pela resistência do material escolhido. O coeficiente de segurança, que é um valor empírico, permite obter uma tensão mais conservadora. Além disso, os fatores de segurança variam amplamente, dependendo do tipo de carga, do material utilizado e das condições de serviço.

2.3 Ligas metálicas

O uso de ligas metálicas na engenharia e na indústria é predominantemente determinado por suas propriedades mecânicas, embora outras características, como resistência à corrosão, ao calor, e propriedades elétricas e magnéticas, também possam ser relevantes em algumas aplicações. As propriedades mecânicas das ligas estão diretamente ligadas à sua estrutura, que depende tanto da composição química quanto das condições de fabricação (CHIAVERINI, 1986).

As ligas ferrosas, que têm o ferro como principal constituinte, são produzidas em grande quantidade e são amplamente utilizadas na engenharia devido à sua abundância na crosta terrestre, ao custo relativamente baixo de produção e à sua versatilidade em termos de propriedades físicas e mecânicas. Contudo, uma desvantagem dessas ligas é a sua suscetibilidade à corrosão. Especificamente, os aços, que são ligas de ferro-carbono, apresentam diferentes concentrações de carbono e, em alguns casos, outros elementos de liga. Suas propriedades mecânicas variam conforme o teor de carbono, que geralmente não ultrapassa 1,0%. Aços com baixo, médio e alto teor de carbono são classificados de acordo com essa concentração e, dentro de cada grupo, podem existir subclasses baseadas em outros elementos de liga. Os aços-carbono comuns contêm principalmente carbono e pequenas quantidades de manganês, enquanto nos aços-liga, elementos adicionais são introduzidos para aprimorar suas características (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

A família de ligas de cobre, especialmente os bronzes, é uma ótima opção para mancais que trabalham em atrito com aço e ferro fundido. Embora o bronze seja mais suave do que os materiais ferrosos, ele oferece boa usinabilidade, resistência mecânica e à corrosão, sendo eficaz contra ligas de ferro quando devidamente lubrificado. As buchas de bronze podem funcionar sob lubrificação de contorno, suportando cargas elevadas e altas temperaturas. No mercado, buchas e peças planas de bronze estão disponíveis em diversas dimensões, tanto em versões sólidas quanto sinterizadas (NORTON, 2013).

2.3.1 Limite de resistência a tração

De acordo com a abordagem descrita por Beer et al. (2011), é fundamental que o projetista considere o comportamento de um material sob carregamento. Isso pode ser determinado por meio de testes específicos realizados em corpos de prova, nos quais o material é submetido a forças axiais controladas em laboratório. Durante esses ensaios, são registradas variações no comprimento e no diâmetro do corpo de prova, até que se atinja a carga-limite, momento em que o material pode romper ou perder a capacidade de suportar carga. A partir dessa carga-limite, é possível calcular

a tensão normal do material, dividindo-a pela área da seção transversal original, o que permite determinar o limite de resistência à tração do material.

2.4 Esforços mecânicos

As propriedades mecânicas são fundamentais para a aplicação dos metais na engenharia, uma vez que o projeto e a execução de estruturas e componentes metálicos dependem do conhecimento dessas propriedades. Elas determinam o comportamento de um material quando submetido a esforços mecânicos, definindo sua capacidade de transmitir e resistir a essas forças sem sofrer deformações indesejadas ou ruptura. Esses esforços podem ser estáticos, como tração e compressão, quando aplicados de maneira lenta e gradual, ou dinâmicos, como no caso de cargas repentinas. Além disso, podem ocorrer esforços repetitivos, associados à fadiga do material (CHIAVERINI, 1986).

As propriedades mecânicas dos materiais são avaliadas por meio de experimentos laboratoriais detalhadamente planejados para reproduzir as condições reais de serviço. Nesses testes, diversos fatores precisam ser considerados, como a natureza da carga aplicada, a duração dessa aplicação e as condições ambientais. A carga pode ser de tração, compressão ou cisalhamento, e sua magnitude pode permanecer constante ou variar ao longo do tempo (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

A resistência de um material, essencial para suportar cargas sem sofrer deformações excessivas ou ruptura, é uma propriedade intrínseca que precisa ser determinada experimentalmente, sendo o teste de tração ou compressão um dos métodos mais relevantes. Esse teste permite identificar diversas propriedades mecânicas, mas é particularmente utilizado para avaliar a relação entre tensão normal média e deformação normal média em materiais como metais, cerâmicas, polímeros e compósitos. Os dados obtidos no teste possibilitam o cálculo de diferentes valores de tensão e deformação, os quais são representados graficamente no diagrama tensão-deformação, proporcionando uma visão do comportamento mecânico do material (HIBBLER, 2004).

Elementos submetidos à torção são amplamente utilizados em engenharia, especialmente em eixos de transmissão que transferem potência entre pontos, como do motor para as rodas traseiras de um veículo. Esses eixos podem ser projetados em formato de tubo ou totalmente preenchidos, dependendo da aplicação (BEER et al., 2011).

O torque é definido como o momento angular que tende a torcer um membro ao longo de seu eixo longitudinal, sendo uma característica crucial no design de eixos, especialmente em veículos e máquinas. O efeito do torque pode ser visualizado ao

aplicar uma força em um eixo circular feito de material altamente deformável, como borracha, permitindo observar a torção resultante ao longo do eixo ([HIBBLER, 2004](#)).

3 Metodologia

O desenvolvimento do trabalho ocorreu em três etapas principais: primeiramente, a definição de um projeto conceitual de bateria gravitacional, com a seleção das estruturas necessárias para a prototipagem virtual, estabelecendo o escopo do trabalho e os passos subsequentes. A segunda etapa é a definição da atuação das estruturas selecionadas, onde foram atribuídos comportamentos mecânicos aos componentes conforme o funcionamento da bateria. E por último, a terceira etapa, onde foi realizado a prototipagem virtual, contendo as características das modelagens 3D e das simulações de resistência mecânica.

3.1 Considerações de projeto

O primeiro aspecto considerado para este projeto é o porte do sistema, com o objetivo de atender a demandas inferiores às consumidas pelos sistemas de baterias gravitacionais de grande escala atualmente em uso, como as desenvolvidas pelas empresas Gravitricity e Energy Vault. Para a definição do conceito de pequeno porte, foi criado um parâmetro com base no projeto de bateria EVx™, que tem capacidade de 100 MWh. Para este trabalho foi considerado que uma bateria gravitacional de pequeno porte deve ter uma capacidade de armazenamento de no máximo 0,01% da EVx™, equivalendo a 10 kWh.

A prototipagem virtual a ser desenvolvida, se baseará em um projeto conceitual de bateria gravitacional para armazenamento de energia em sistemas autônomos. Tal mecanismo foi idealizado para aplicações residenciais de consumo médio diário de energia elétrica equivalente a 7 kWh, alimentado por geração fotovoltaica própria. O trabalho desenvolvido pelo autor possui estudos e análises a respeito do ambiente de implementação da bateria gravitacional, justificando as dimensões e parâmetros utilizados para a criação de um esquema de mecanismo, além de configurações alternativas para a tentativa de otimizar o sistema já definido. Entretanto, foi executada uma seleção de elementos dentre os conceitualizados pelo autor, de modo a delimitar a prototipagem a apenas as estruturas de sustentação do peso, sujeitas a tensões mecânicas.

A premissa do equipamento se baseia no acúmulo de energia potencial gravitacional (EPG), assim, duas variáveis são determinantes: a altura e a massa. Tais fatores definem um atributo presente em qualquer bateria, a capacidade de armazenamento de energia. De acordo com REIS (2023), um armazenamento robusto e confiável está estimado em 10 kWh para o cenário adotado. Sendo assim, é estipulado um poço

de profundidade equivalente a 50 metros para o deslocamento de um peso onde a energia potencial gravitacional será armazenada.

REIS (2023) afirma que o armazenamento da bateria possui energia equivalente a 36.000 kJ, e através desse valor, é calculada a massa do objeto a ser deslocado, denominado lastro. A equação 1 representa o cálculo realizado, em que E_{pg} é a energia potencial gravitacional, m é a massa do lastro, S é a distância de deslocamento do lastro no poço e g , a aceleração da gravidade.

$$E_{pg} = m \times g \times S \quad (1)$$

$$36.000kJ = m \times 9,80m/s^2 \times 50m \quad (2)$$

$$m = \frac{36.000 \times 10^3}{490} \approx 73.469kg \quad (3)$$

Para permitir os movimentos de subida e descida do lastro, é necessário um cabo que o conecte ao mecanismo de tração. Segundo REIS (2023), o cabo deve ser resistente e capaz de ser enrolado, suportando tensões além do peso exercido pelo lastro, assim, foi considerado um fator de segurança mínimo igual a 6, em que se constatou que um cabo de aço com diâmetro entre 76,2mm e 82,6mm, é ideal para suportar uma força de tração média de 719,99 kN, provocada pelo peso do lastro.

Figura 1 – Cabos de 6 pernas

Diâmetro		Massa aprox.	Carga mínima de ruptura	
[mm]	[poleg]	[kg/m]	[kN]	[tn]
50,8	2	11,0	1760	180
54,0	2 1/8	12,4	1970	201
57,2	2 1/4	13,9	2200	224
60,3	2 3/8	15,5	2440	249
63,5	2 1/2	17,3	2950	301
69,9	2 3/4	20,8	3530	360
76,2	3	24,7	4160	424
82,6	3 1/4	29,0	4830	493
85,7	3 3/8	31,3	5180	529
88,9	3 1/2	33,8	5520	563
102	4	44,0	6340	647

Construção: 6x36, 6x41, 6x61 ou 6x69 Warrington Seale, segundo o grau e o diâmetro.

Acabamento: polido o galvanizado (classe B).

Norma de fabricação: API 9A/ ISO 10425.

Consulte a IPH por diâmetros e resistências não especificados no catálogo.

Fonte: IPH (2016).

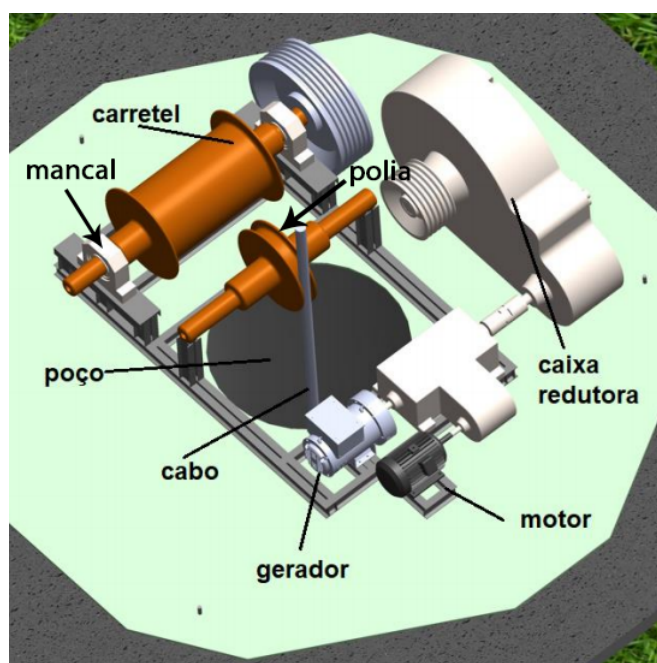
É importante ressaltar que o sistema não se limita a uma única via de cabo, de acordo com REIS (2023), outras configurações de cabos podem ser praticadas, cabos

mais finos podem ser combinados para proporcionar o mesmo nível de resistência e segurança.

A medida que o cabo é tracionado, é também enrolado em um carretel. REIS (2023) afirma que o diâmetro do cabo a ser enrolado influencia diretamente na quantidade de cabo a ser acomodado no tambor do carretel, portanto, ao considerar um cabo de 82,6 mm de diâmetro e 50 metros de comprimento, o volume de cabo a ser acomodado é igual a $0,2679 \text{ m}^3$.

A figura 2 ilustra o arranjo físico do esquema desenvolvido pelo autor, essa configuração foi utilizada como base para a montagem da estrutura e como referência para o esboço das peças.

Figura 2 – Representação esquemática do arranjo dos componentes da bateria



Fonte: Adaptado de REIS (2023).

O escopo da prototipagem é definido pelos elementos principais que compõem a estrutura de sustentação da bateria, as quais estão sujeitas a carga de peso proveniente do lastro. Fazem parte da prototipagem algumas peças do mecanismo que não são citadas diretamente, mas são possíveis identificá-las na figura 2, que ilustra o arranjo físico do esquema desenvolvido pelo autor, em que também contém as estruturas já abordadas anteriormente. Esses elementos foram os mancais e a polia, peças essenciais para o funcionamento em conjunto das demais e estão sujeitas a esforços mecânicos semelhantes às estruturas mencionadas previamente, tais elementos serão dimensionados e produzidos conforme os métodos a serem empregados nas etapas da prototipagem virtual.

3.2 Conjunto de decisões

Uma vez selecionada as partes a serem desenvolvidas, prosseguiu-se com as escolhas que deram forma ao mecanismo, descrevendo seu funcionamento, formatos e limitações. Os projetos das estruturas da bateria foram realizados com base nos fundamentos estabelecidos nesse tópico.

A bateria gravitacional em estudo, é um dispositivo que armazena e transforma energia, seu carregamento é realizado através do içamento de um peso por um motor elétrico alimentado pela carga provida de uma fonte de energia externa, já na descarga, o peso despenca de uma altura específica, movimentando um gerador de velocidade variável, sendo responsável por transformar a energia cinética em elétrica novamente.

Por meio de um sistema de redução de torque, a rotação do motor é transmitida para o carretel, que enrola o cabo de aço, tracionando-o e movimentando o lastro. Os mecanismos responsáveis pelo início e parada do movimento do lastro devem ser integrados ao sistema motor da bateria gravitacional, o qual está fora do escopo de desenvolvimento neste projeto, em que deve possuir capacidade suficiente para superar a inércia inerente ao peso do lastro. É desejável que esses mecanismos incluam sistemas de frenagem de segurança, que garantam o controle e a estabilidade do lastro durante os ciclos de movimentação, prevenindo acidentes ou falhas estruturais.

Tanto os ciclos de carregamento (elevação do lastro) quanto os de descarregamento (descida do lastro) são definidos e controlados pelo sistema eletrônico da bateria. Ele é responsável por gerenciar o funcionamento do motor com base em parâmetros previamente configurados, como a capacidade de geração de energia fotovoltaica disponível e a demanda elétrica solicitada no momento. Além disso, a velocidade de movimentação do lastro é diretamente ajustada pelo sistema eletrônico, considerando a necessidade de otimizar a conversão de energia e atender às variações de demanda de maneira eficiente e segura.

O esquema elétrico da bateria gravitacional é baseado na geração *off-grid*, operando independentemente da rede elétrica convencional. O sistema conta com painéis solares que convertem a luz solar em energia elétrica, armazenada temporariamente em um banco de baterias auxiliares e posteriormente distribuída conforme a demanda.

Para alimentar a residência, um inversor de corrente converte a corrente contínua (CC) gerada pelos painéis solares em corrente alternada (CA), compatível com os eletrodomésticos e demais equipamentos elétricos da casa.

Quando há excedente de energia gerado pelo sistema fotovoltaico, essa energia é direcionada para um motor elétrico acoplado ao carretel da bateria gravitacional. O motor é acionado por meio de um sistema de partida eletrônica, que detecta a

disponibilidade de energia extra e inicia o levantamento do lastro. Para garantir uma movimentação controlada e eficiente, o motor pode operar com um sistema de transmissão adequado, como redutores de velocidade ou polias de controle de torque.

Durante o descarregamento do lastro, um controlador eletrônico monitora a demanda de energia da residência. Quando necessário, o controlador libera a descida do lastro, acionando um mecanismo de desacoplamento do motor (embreagem) e, simultaneamente, acoplando um gerador elétrico ao carretel. À medida que o lastro desce sob a ação da gravidade, ele faz o carretel girar, convertendo a energia potencial gravitacional armazenada em energia mecânica. O gerador, por sua vez, transforma essa energia mecânica em eletricidade, que é então enviada ao inversor para conversão em corrente alternada (CA), sendo distribuída para suprir as necessidades da residência.

Para garantir um funcionamento seguro e eficiente, o sistema pode incluir dispositivos adicionais, como sensores de posição do lastro, reguladores de tensão e um sistema de controle programável (PLC ou microcontrolador), que otimizam a gestão do fluxo de energia e evitam sobrecargas ou desperdícios.

A conceitualização desse esquema elétrico visa garantir que a instalação completa da bateria gravitacional funcione de maneira integrada ao sistema fotovoltaico, aproveitando ao máximo a energia renovável disponível e fornecendo o armazenamento e o uso eficiente da eletricidade.

Para REIS (2023), um cilindro de proporção 2/3 é a forma mais eficiente de acomodar o lastro, cujo seria utilizado o aço de densidade de 7.800 kg/m^3 para a construção, resultando em um corpo maciço de volume igual a $9,41 \text{ m}^3$, 2 m de diâmetro e 3 m de altura. Entretanto, projetar essa peça como um único componente aumenta o grau de complexidade de processos de fabricação e procedimentos logísticos, sendo assim, foi determinado que o lastro deve ser segmentado em partes menores e passível de posicionamentos realizados por máquinas como empilhadeiras de alta capacidade e guindastes.

Segundo REIS (2023), o tempo estimado para o carregamento da bateria, em um cenário ideal, é de 3,33 dias, ou seja, para que o carregamento total de 10 kWh seja concluído com um armazenamento diário de 3 kWh. Através do valor de 50 metros de altura (S) do deslocamento, foi calculada a velocidade (V_L) com que o lastro se move, para isso, adotou-se que o tempo de carregamento por dia seja de 10 horas, equivalente ao período de geração fotovoltaica.

$$V_L = \frac{S}{3,333\text{dias}} = \frac{50\text{m}}{33,33\text{h}} = 1,50\text{m/h} \approx 4,16 \cdot 10^{-4}\text{m/s} \quad (4)$$

REIS (2023) calcula que o consumo elétrico do sistema a cada noite é igual a 5,49 kWh, ou seja, esse valor de carga armazenada pela bateria é solicitado. Para que

a bateria descarregue essa quantidade de energia, é necessário que a velocidade de descida do lastro seja maior que a de subida, essa velocidade (V_{dL}) foi calculada por:

$$V_{dL} = \frac{5,49kWh}{3kWh} \times V_L = 1,83 \times 4,16 \cdot 10^{-4}m/s = 7,613 \cdot 10^{-4}m/s \quad (5)$$

O cabo de aço definido para a utilização na máquina, possui uma geometria particular, relativo à estrutura de construção de cabos dessa categoria. A construção do cabo é do tipo Warrington Seale, com 6 pernas, de norma de fabricação: API 9A/ ISO 10425. REIS (2023) afirma que tal cabo está sujeito a cargas adicionais durante breves acelerações, no içamento do peso, e frenagens nos períodos de descida. Sendo assim, foi ponderado dois cenários inerentes ao funcionamento da bateria, relativos ao funcionamento usual do mecanismo. Em cada cenário, os componentes do mecanismo estão sujeitos as tensões variadas.

1. Estágio de carregamento: nesse estágio, o lastro parte da inércia para o movimento de subida, a tensão extra provocada pelo peso do lastro, é relativa ao início do movimento, onde ocorre uma aceleração (a) provocada pelo mecanismo motor. Tal aceleração foi baseada em um tempo (t_p) arbitrado em 6 segundos, necessário para o motor elétrico sair completamente da inatividade.

$$a = \frac{V_L - V_i}{t_p} = \frac{4,16 \times 10^{-4}m/s - 0}{6s} = 6,933 \cdot 10^{-5}m/s^2 \quad (6)$$

em que V_i é a velocidade inicial do lastro.

2. Estágio de descarregamento: nesse estágio, a tensão adicional no cabo é provocada pela frenagem do peso durante a descida. Arbitrando-se um valor de 3 segundos para a frenagem total do lastro, foi calculado a aceleração de frenagem (a_f) através da equação 7.

$$a_f = \frac{0 - V_{dL}}{t_p} = \frac{0 - 7,613 \times 10^{-4}m/s}{3s} = -2,537 \cdot 10^{-4}m/s^2 \quad (7)$$

Os componentes estruturais deverão desempenhar certa resistência mecânica de modo a proporcionar uma margem para resistir a tensões adicionais. REIS (2023) propõe um fator de segurança igual a 6 para o cabo de aço, entretanto, tal valor não pode ser replicado para cada uma das demais estruturas devido às diferenças de esforços mecânicos aos quais estão submetidos, sendo assim, deve-se buscar fatores de segurança com valores que corresponda a cada contexto, garantindo a segurança

mínima e evitando o superdimensionamento das estruturas. Valores de fator de segurança inferiores a 1 em simulações de resistência mecânica indicam que as tensões resultantes excedem a capacidade do material, provocando a ruptura da estrutura.

A escolha de um fator de segurança igual a 2 para a modelagem e simulação das peças é justificada por diversos aspectos da engenharia mecânica, garantindo a confiabilidade e resistência estrutural dos componentes.

Primeiramente, os modelos computacionais utilizados na simulação adotam simplificações e aproximações que podem introduzir incertezas nos resultados. Fatores como a qualidade da malha de elementos finitos, os critérios de falha considerados e as condições de contorno aplicadas podem gerar desvios entre o comportamento teórico e o real da peça. Assim, um fator de segurança adequado compensa essas incertezas, reduzindo o risco de falhas inesperadas.

Além disso, os materiais podem apresentar tensões residuais originadas de processos, como soldagem, conformação e usinagem. Tais tensões, combinadas com regiões críticas concentradoras, como entalhes, furos e transições geométricas, podem reduzir a resistência mecânica da peça. O fator de segurança age como uma margem de proteção contra esses efeitos localizados, garantindo que a estrutura suporte os esforços aplicados sem falhar prematuramente.

Outro fator a ser considerado é a presença de cargas dinâmicas e impactos ao longo da vida útil da peça. Vibrações, esforços cíclicos e choques podem amplificar significativamente as tensões, mesmo quando a peça opera dentro dos limites nominais de carregamento. A aplicação de um fator de segurança adequado permite que a estrutura absorva essas variações sem comprometer seu desempenho.

A resistência real de um material pode apresentar variações devido a imperfeições no processo de fabricação, tolerâncias dimensionais e condições ambientais. Assim, a resistência teórica obtida a partir de normas e tabelas pode não corresponder exatamente ao comportamento do material em serviço. O fator de segurança protege contra essas incertezas, garantindo que a peça se mantenha dentro de parâmetros seguros mesmo em condições adversas.

Além disso, ao longo do tempo, os materiais estão sujeitos a processos de degradação, como corrosão, desgaste e envelhecimento, que reduzem sua capacidade de suportar cargas. Em ambientes agressivos, a deterioração pode ser acelerada, tornando essencial a adoção de uma margem de segurança para prolongar a vida útil da estrutura e evitar falhas prematuras.

Por fim, sistemas mecânicos podem estar sujeitos a sobrecargas acidentais ou erros operacionais, como falhas em sensores, acionamentos inadequados e eventos inesperados. Essas ocorrências podem resultar em esforços superiores aos proje-

tados inicialmente, tornando necessária a utilização de um fator de segurança que permita à estrutura suportar essas condições sem falhar.

Portanto, a escolha de um fator de segurança igual a 2 não se trata apenas de uma margem arbitrária, mas sim de uma estratégia fundamentada na necessidade de compensar incertezas e garantir a integridade estrutural, entretanto, essa definição foi genericamente aplicada a todas as peças, tendo em vista que não serão realizadas análises individuais para encontrar um valor preciso de fator de segurança para cada uma delas. Esse critério visa assegurar uma resistência adicional contra variações inesperadas de carregamento, contribuindo para a confiabilidade e durabilidade do sistema.

3.3 Prototipagem virtual

O *design* do maquinário e as simulações mecânicas foram realizadas com o auxílio do *software* SolidWorks, uma ferramenta de CAD (Desenho Assistido por Computador, do inglês Computer Aided Design) e CAE (Engenharia Assistida por Computador, do inglês Computer Aided Engineering) capaz de gerar representações dos objetos produzidos em três dimensões, elaborar as junções entre eles e simular aplicações de energias nos componentes. A escolha deste *software* para a modelagem e simulações do projeto foi baseada na familiaridade do projetista com sua interface e nas parametrizações disponíveis para a realização de simulações estruturais. A experiência prévia do projetista com o SolidWorks contribuiu para uma maior eficiência no desenvolvimento do modelo virtual e na execução das simulações computacionais.

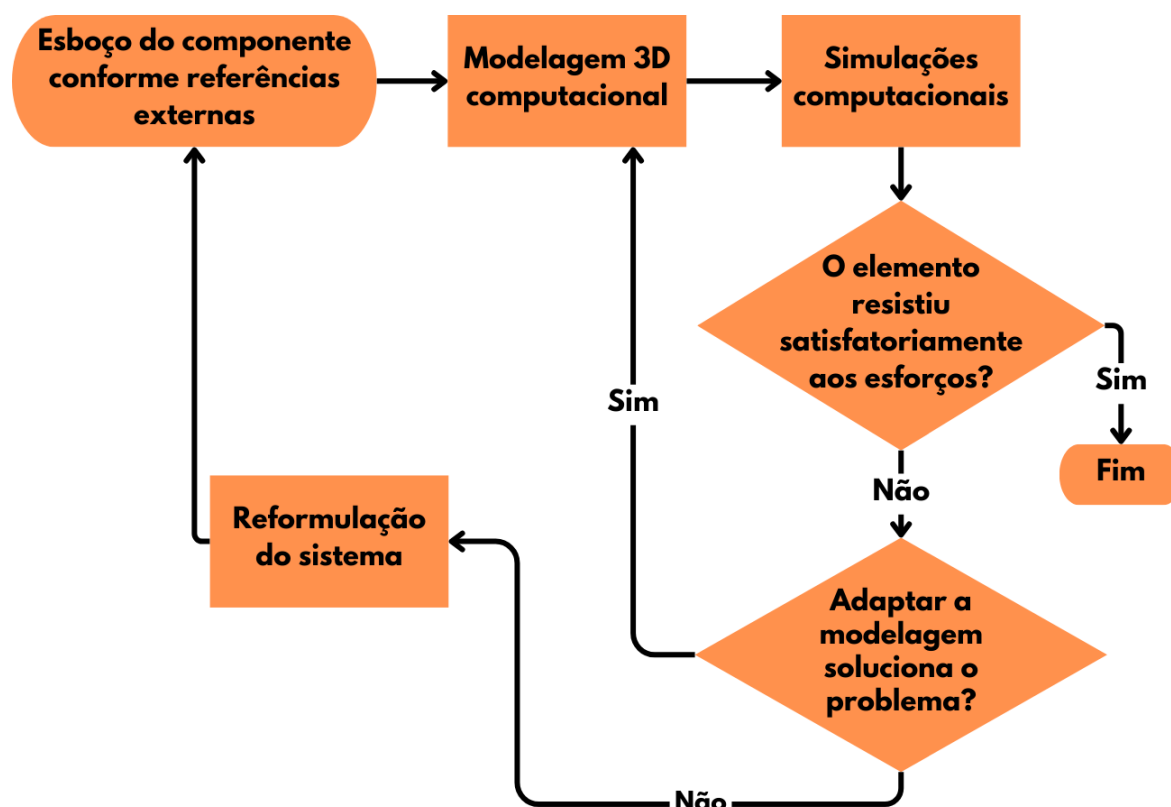
No entanto, cabe ressaltar que nenhum outro software foi analisado ou comparado para determinar se haveria alternativas mais adequadas para este trabalho. Assim, a escolha do SolidWorks não envolveu uma avaliação técnica de outras opções, mas foi feita com base na expertise do projetista e na facilidade de uso do software, que se mostrou satisfatório para atender aos objetivos propostos no projeto.

Cada componente foi modelado individualmente e, em seguida, integrado no ambiente de montagem do *software*. Isso permitiu a validação das dimensões espaciais estabelecidas para a construção, bem como a realização dos ajustes necessários nos componentes. Certas dimensões de peças, bem como os materiais utilizados no projeto, foram determinadas com base em normas de fabricação brasileiras e de outros países, sendo referências para a definição de suas características físicas.

O processo se inicia na idealização do componente, com base em referências visuais, o formato geral é concebido e em seguida é realizada a modelagem 3D computacional. Nesta etapa, normas técnicas podem ser utilizadas para estabelecer dimensões físicas e materiais de construção. Os modelos adentram na etapa

das simulações onde as cargas impostas revelam o desempenho das peças quanto a sua resistência mecânica que, caso seja satisfatório, o que significa ter fator de segurança entre 6 e 7, o modelo é aprovado. Na falta da resistência mecânica desejada, é avaliada a possibilidade de adaptar tal modelo com a finalidade de torná-lo como o pretendido, e caso isso não seja possível, é executado uma reformulação do sistema, uma modificação conceitual que viabilize a estrutura, reiniciando o processo. A figura 3 contém o fluxograma que ilustra a trajetória das etapas que compuseram a prototipagem virtual.

Figura 3 – Fluxograma da metodologia de prototipagem virtual.



Fonte: Autor (2024).

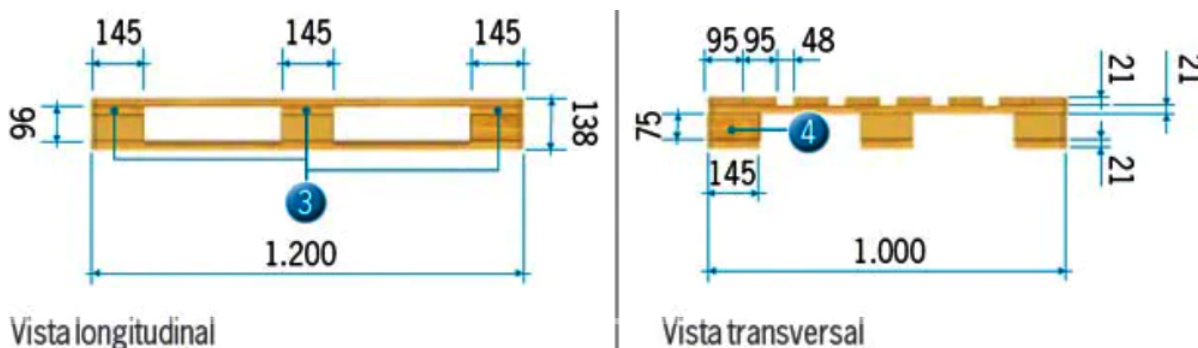
3.3.1 Lastro

O primeiro componente modelado foi o lastro. Ele foi projetado como uma estrutura composta por várias partes montáveis, sem a necessidade de elementos de fixação adicionais. Para alcançar isso, utilizou-se uma geometria que permite o encaixe das peças. Além disso, considerou-se que todas as partes do componente devem ser idênticas, como é observado nos elos de uma corrente.

O esboço da peça foi inspirado na geometria de “quebra-cabeças”, em que ponto o de partida para a modelagem virtual foi definir uma medida máxima de aproximadamente 2 metros, equivalente ao diâmetro do lastro cilíndrico estipulado por REIS

(2023). Outra medida de referência utilizada foi a de paletes de madeira, padrão PBR com 1200 mm x 1000 mm, conforme ilustrado na figura 4.

Figura 4 – Medidas laterais de um palet PBR.

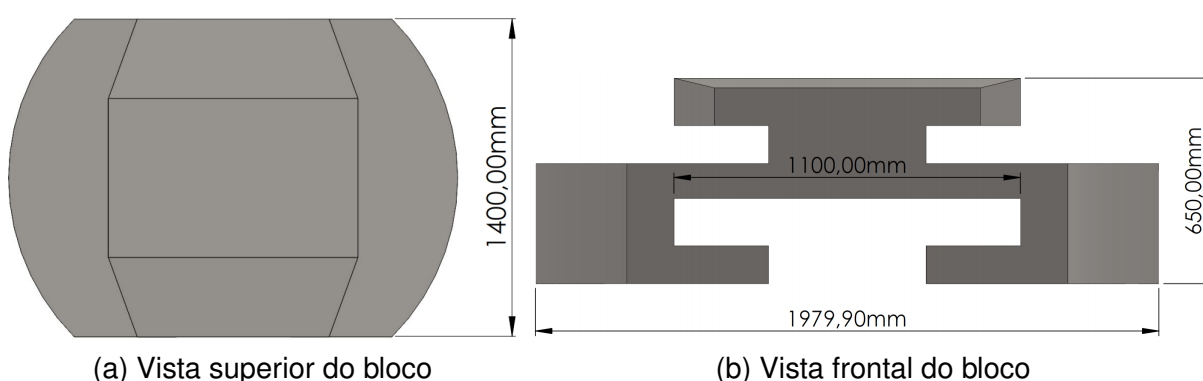


Fonte: Adaptado de [Mecalux \(s.d.\)](#).

[REIS \(2023\)](#) afirma que o aço é o material mais apropriado para a construção do lastro, devido sua densidade, resistência e disponibilidade. Também aponta a possibilidade do uso desse material em forma reciclada, todavia, para a prototipagem foi utilizado o aço AISI 1020, com densidade igual a 7.900 kg/m^3 .

O resultado foi a criação de um bloco de aço com geometria que permite o encaixe em série de outros elementos iguais. A menor unidade do lastro possui 1400 mm por 1979,9 mm e 650 mm de altura. Foram feitos chanfros nas bordas da região do topo com objetivo de facilitar os processos de encaixe das peças. A figura 5a mostra sua vista superior e a figura 5b, a vista frontal.

Figura 5 – Bloco do lastro

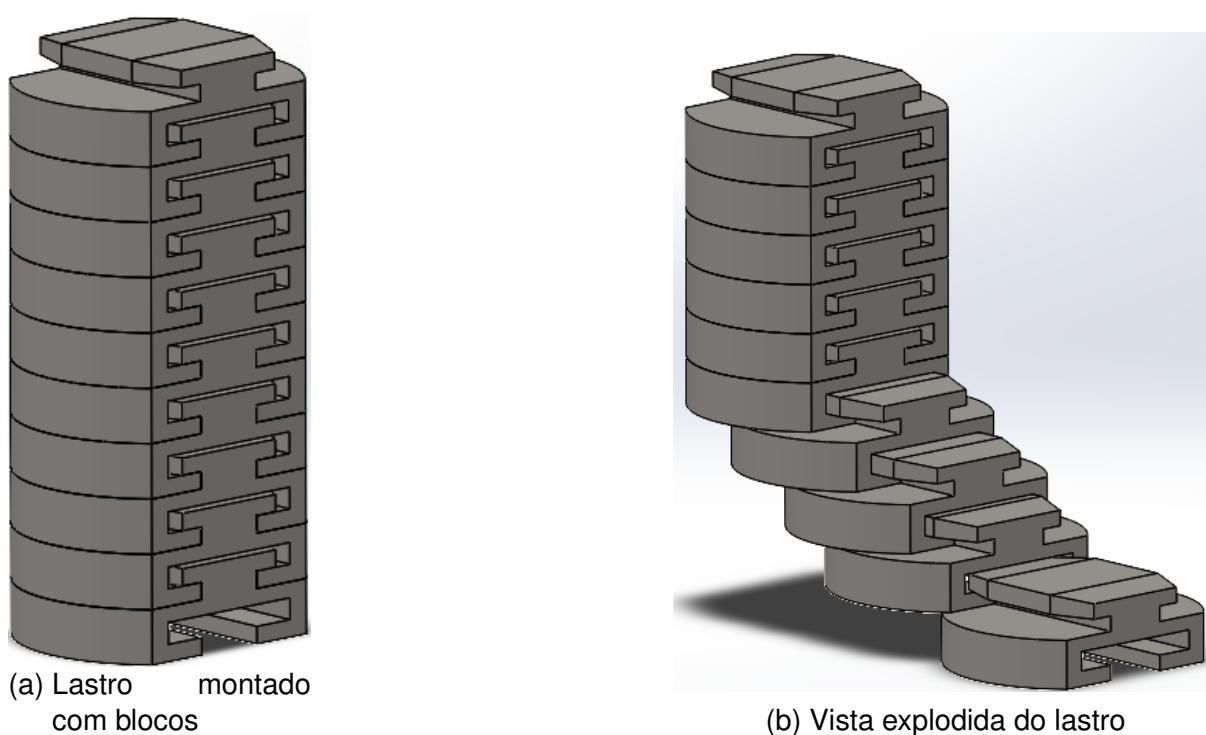


Fonte: Autor (2024).

Cada bloco pesa aproximadamente 7.378 kg, para o lastro alcançar os 73.469 kg, calculados na equação 3, foram utilizados 10 blocos acoplados, formando um conjunto com um total de 73.787 kg e 6,5 metros de altura.

Foi realizada uma simulação de análise estática com finalidade de observar o comportamento do bloco mediante ao carregamento máximo da bateria gravitacional.

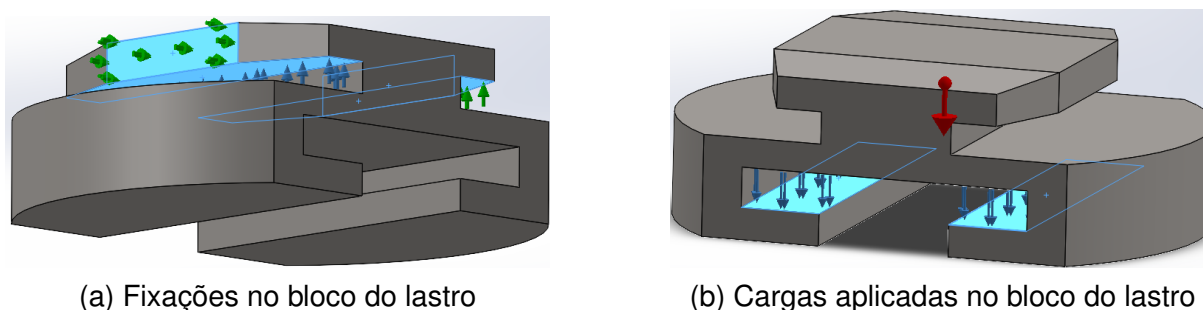
Figura 6 – Lastro



Fonte: Autor (2024).

Definiram-se fixações em faces do topo da peça, restringindo a movimentação e deformação destas em suas respectivas direções normais, de modo a simular o contato de tais superfícies com outras estruturas do lastro, a figura 7a ilustra tais faces. As cargas aplicadas foram a gravidade (g), de $9,80 \text{ m/s}^2$, e o peso (P_b) provocado pelos outros 9 blocos, calculado na equação 8, essa carga foi aplicada nas faces internas do bloco, destacadas na imagem 7b. A malha de elementos finitos foi criada e o estudo foi executado.

Figura 7 – Fixações e cargas no bloco



Fonte: Autor (2024).

$$P_b = 9 \times 7.378 \text{ kg} \times g = 66.402 \text{ kg} \times 9,80 \text{ m/s}^2 \approx 650.740,0 \text{ N} \quad (8)$$

Para realizar as simulações nos componentes estruturais, foram calculadas os módulos das tensões adicionais no cabo de aço advindas do funcionamento do mecanismo, em cada cenário estipulado no tópico 3.2.

A tensão máxima de tração (σ_s) no cabo gerada durante a subida do lastro foi definida por:

$$\sigma_s = (m + m_a) \times a = (73.787kg + 1450kg) \times 6,933 \cdot 10^{-5}m/s^2 = 5,21N \quad (9)$$

em que m_a é a massa do cabo de aço de 82,6 mm.

Já a tensão máxima (σ_f) gerada pela frenagem do objeto, durante o movimento de descida, foi calculada por:

$$\sigma_f = (m + m_a) \times |a_f| = (73.787kg + 1450kg) \times 2,537 \cdot 10^{-4}m/s^2 = 19,08N \quad (10)$$

Cada tensão calculada é adicionada a força peso provocada pela massa do lastro, assim, cada cenário de trabalho da bateria provoca uma tensão resultante no cabo.

Tabela 1 – Tensões adicionais no cabo de aço

Cenário	Tensão máxima adicional	Tensão máxima total
Carregamento da bateria	5,21 N	737.327,81 N
Descarregamento da bateria	19,08 N	737.341,68 N

Fonte: Autor (2024).

3.3.2 Carretel para o cabo de aço de 82,6 mm (Carretel A)

O formato do carretel foi definido com base no ilustrado pela figura 2, com regiões diferentes ao longo de sua extensão, são elas: eixo, flange e tambor.

A norma brasileira ABNT NBR 11375, regulamenta as dimensões dos sulcos nos tambores e de parâmetros para a fixação do cabo de aço no carretel, entretanto, para simplificar a prototipagem, não foi adicionado tais estruturas na modelagem virtual.

A norma brasileira NBR 8400-3, afirma que o diâmetro mínimo de enrolamento do cabo deve obedecer à relação descrita na inequação 11.

$$D \geq H \times d \quad (11)$$

onde D é o diâmetro mínimo de enrolamento do cabo, H é o coeficiente em relação ao grupo do mecanismo e d é o diâmetro nominal do cabo. Os valores de H estão disponíveis na figura 8.

Figura 8 – Valores de H

Grupo de mecanismo	Tambores		Polias		Polias de compensação	
	Cabo normal	Cabo resistente à rotação ou cabos	Cabo normal	Cabo resistente à rotação ou cabos	Cabo normal	Cabo resistente à rotação ou cabos
	6 × 36/ 6 × 41/ 8 × K26/ 8 × K36/ 6 × K36/ 6 × K41	6 × 19/ 6 × K26	6 × 36/ 6 × 41/ 8 × K26/ 8 × K36/ 6 × K36/ 6 × K41	6 × 19/ 6 × K26	6 × 36/ 6 × 41/ 8 × K26/ 8 × K36/ 6 × K36/ 6 × K41	6 × 19/ 6 × K26
M1	11,2	12,5	12,5	14	11,2	12,5
M2	12,5	14	14	16	12,5	12,5
M3	14	16	16	18	12,5	14
M4	16	18	18	20	14	14
M5	18	20	20	22,4	14	16
M6	20	22,4	22,4	25	16	16
M7	22,4	25	25	28	16	18
M8	25	28	28	31,5	18	20

Fonte: ABNT (2019).

Dadas condições do projeto, utilizou-se $H = 25$, relativo ao grupo de mecanismo M8 para cabos normais em tambores. O diâmetro mínimo do tambor do carretel foi calculado por:

$$D \geq 25 \times 82,6mm \quad (12)$$

$$D \geq 2.065mm \quad (13)$$

Já para os flanges, a norma ABNT NBR 11375 afirma que devem estar presentes em ambos os lados do tambor, com diâmetro externo maior ou igual ao nominal do tambor, com acréscimo de quatro vezes o diâmetro do cabo. O diâmetro dos flanges (D_f) foi calculado por:

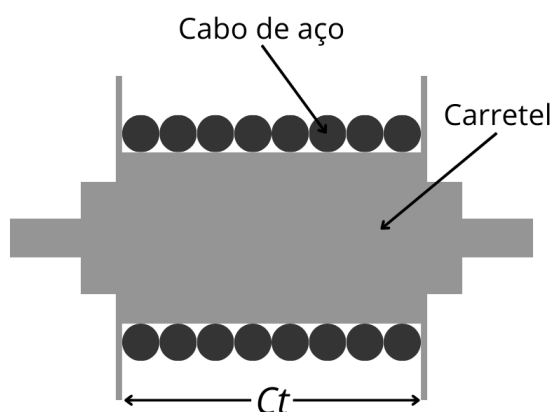
$$D_f = D + 4 \times 82,6mm = 2.065mm + 330,4mm = 2.395,4mm \approx 2.400mm \quad (14)$$

O carretel deve acomodar por completo o cabo de aço, implicando a necessidade de um volume adequado na região exterior do tambor, assim, a peça foi projetada para que toda a extensão do cabo seja enrolada em que as espiras não se sobreponham, conforme ilustrado no diagrama da figura 9.

Através do diâmetro do tambor, foi possível calcular a sua circunferência, e em seguida, calculou-se o número de voltas que o cabo pode alocar em volta do carretel, um número próximo a oito voltas. Assim, o comprimento (C_t) do tambor foi definido por:

$$C_t = 8 \times 82,6mm = 660,8mm \approx 700mm \quad (15)$$

Figura 9 – Secção axial do carretel com o cabo de aço enrolado



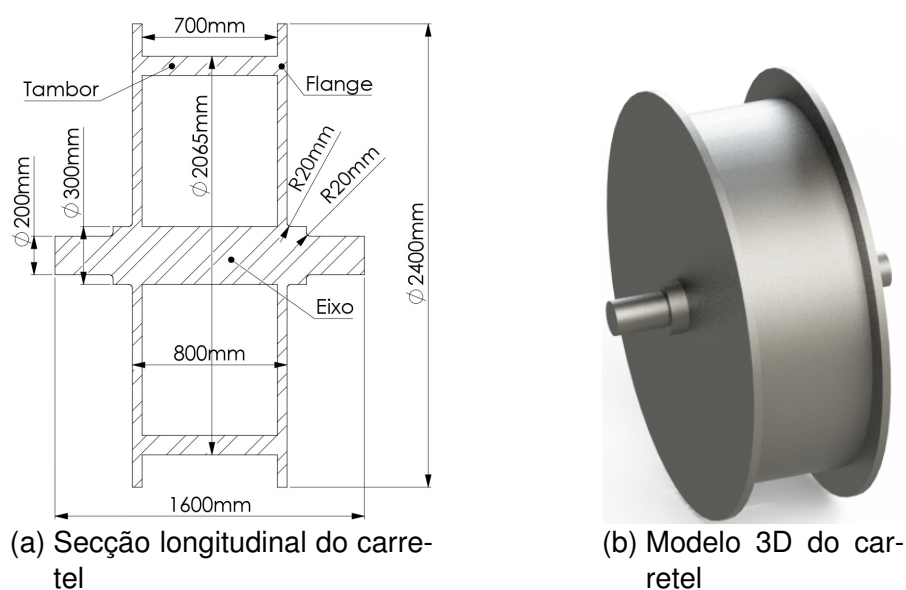
Fonte: Autor (2024).

Dentre os materiais listados pela norma, foi escolhido o aço ASTM A36, devido à sua disponibilidade na biblioteca de materiais do *software* utilizado, em que suas propriedades estão disponíveis no anexo B.

A peça foi modelada como uma estrutura única e sólida, sem adição de partes por meio de dispositivos de fixação ou soldas. As dimensões do eixo e da espessura dos flanges foram determinadas pelo projetista para a confecção da modelagem virtual. A figura 10a, ilustra a secção longitudinal do carretel, contendo as dimensões e indicações das seções da peça.

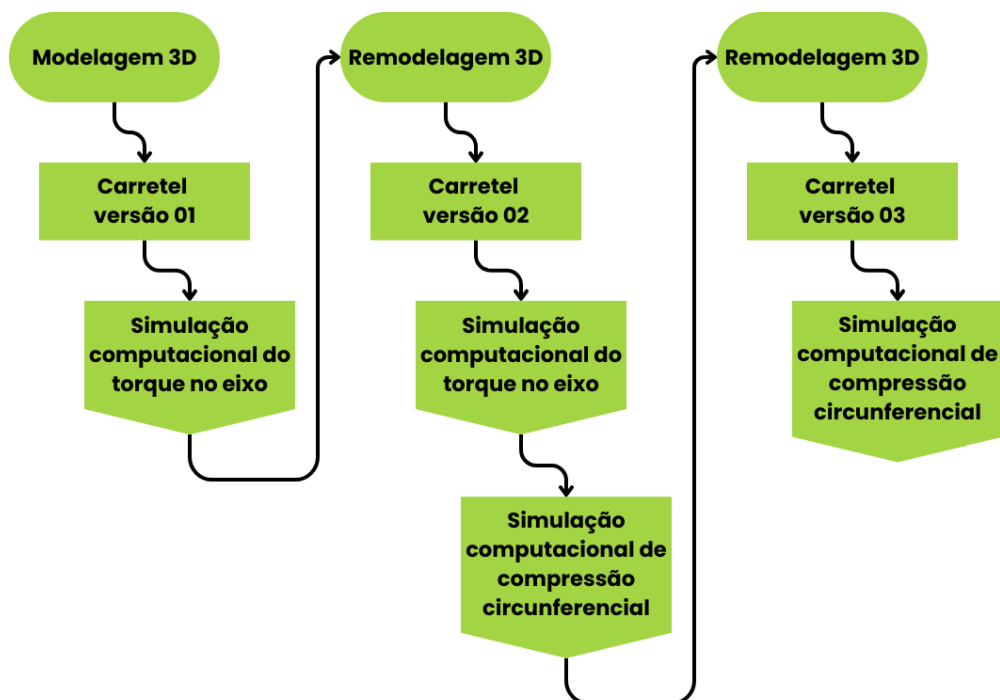
Ao finalizar a modelagem computacional, prosseguiu-se para as simulações de resistência mecânica na peça, nesta etapa houve a necessidade de remodelar certas regiões do carretel de modo a ajustar sua geometria, reforçando os pontos onde as

Figura 10 – Carretel (Versão 01)



Fonte: Autor (2024).

Figura 11 – Fluxograma sequencial das simulações no carretel



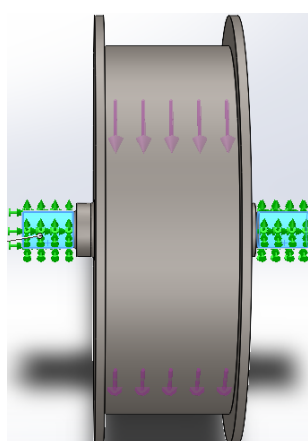
Fonte: Autor (2024).

tensões causaram falhas. A figura 11 contém um fluxograma que ilustra a sequência desses passos executados.

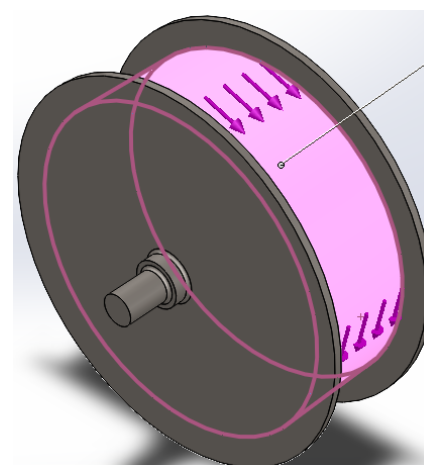
O primeiro ensaio foi de análise estática, a fim de testar o comportamento da peça quando submetida ao carregamento de torque produzido pelo lastro. Inicialmente foi definido “Geometria fixa” nas faces cilíndricas do eixo (destacadas em azul na figura 12a), esse parâmetro impede deformações e movimentações translacionais e rotacionais nas faces onde é aplicado. O carregamento definido foi o torque (T_t) aplicada na face do tambor, provocado pela tensão máxima total no descarregamento da bateria, com direção e sentido indicado pelas setas cor de rosa, ilustradas na figura 12b.

$$T_t = \frac{D}{2} \times 737.323,9N = 1,0325m \times 737.341,68N = 761.305,28Nm \quad (16)$$

Figura 12 – Cargas e fixações no carretel



(a) Geometria fixa nas faces do eixo



(b) Carga no tambor

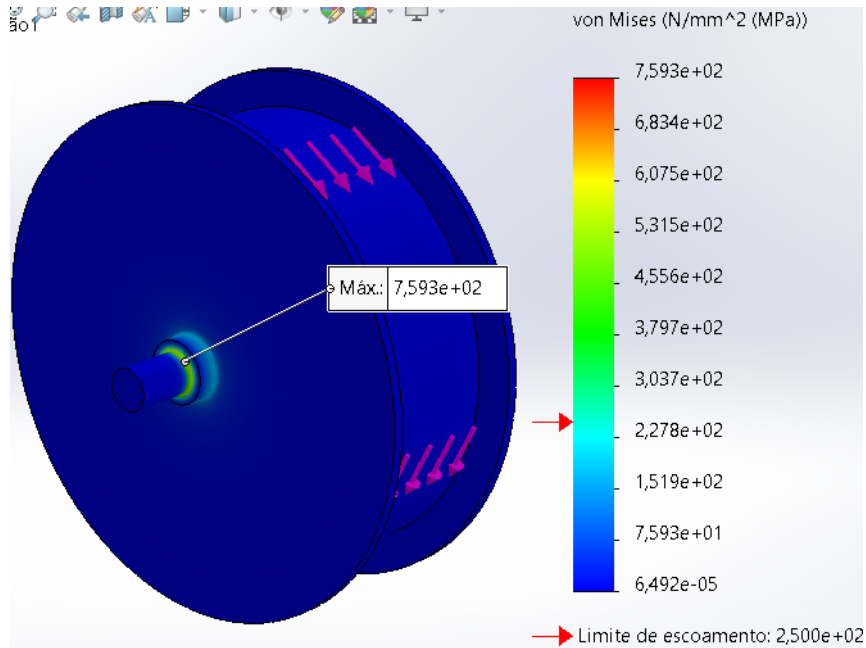
Fonte: Autor (2024).

A malha de elementos finitos foi gerada, suas propriedades estão listadas no quadro disponível no anexo A. O estudo foi executado pelo SolidWorks, cujo exibiu os resultados das tensões e deformações formadas.

A simulação identificou pontos críticos na região do eixo do carretel, onde as tensões atingiram valores máximos, ultrapassando o limite de escoamento do material e indicando uma possível fratura na estrutura. A imagem 13 retrata a tensão na região, conforme a escala de cores da legenda.

Tal tensão, de módulo igual à 759,3 MPa, é cerca de três vezes maior que o limite de escoamento do aço, assim, o diâmetro do eixo foi ajustado proporcionalmente, adotando formato tubular de 600 mm de diâmetro com paredes de 100 mm de espessura.

Figura 13 – Tensão de fratura no eixo do carretel



Fonte: Autor (2024).

Uma nova simulação foi realizada, utilizando os mesmos parâmetros anteriores de fixação, carregamento e malha. A tensão máxima encontrada foi de 51,72 MPa, na região de transição entre as seções do eixo, indicando resistência a esse carregamento.

O ensaio seguinte, foi realizado com a força de compressão circunferencial provocada pela ação do cabo enrolado na bobina. A ABNT NBR 11375 afirma que tal tensão, para o cabo totalmente recolhido, é calculada por:

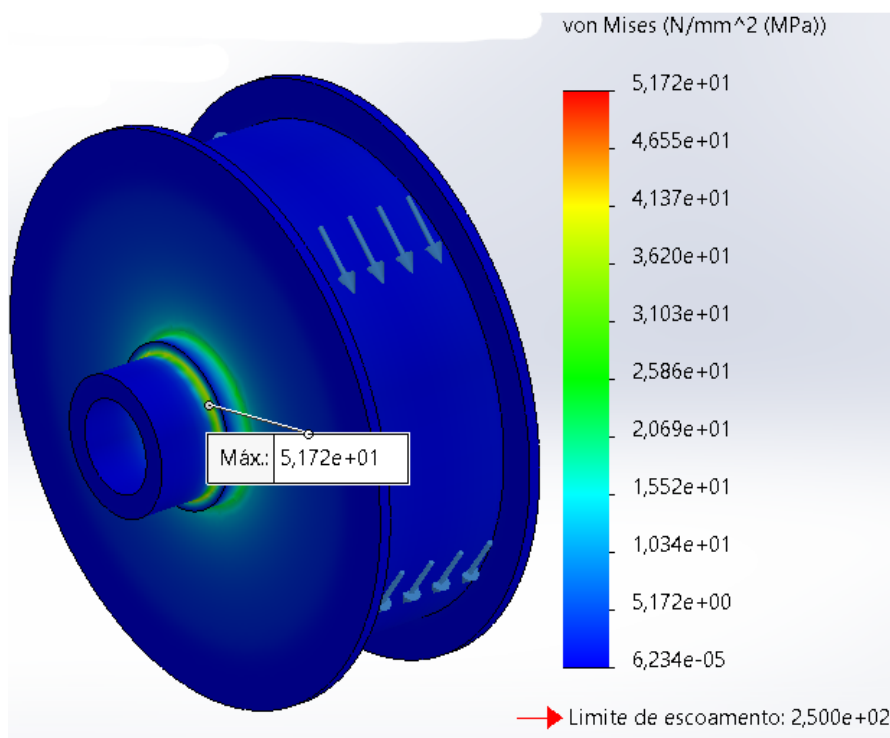
$$\sigma_{y0} = 0,85 \times \frac{F_c}{p \times t_u} \quad (17)$$

em que F_c é a força máxima no cabo, advinda do ciclo de descarregamento, já t_u é a espessura útil do tambor e p é o passo da ranhura. Nesse caso, o diâmetro do cabo foi adotado para o passo da ranhura.

$$\sigma_{y0} = 0,85 \times \frac{737.341,68N}{0,0826m \times 0,1m} = 75,876MPa \quad (18)$$

A carga de compressão foi aplicada sobre a parede do tambor e a simulação foi realizada sob os mesmos critérios anteriores de fixação e malha. Os resultados demonstraram tensões quatro vezes a cima do limite de escoamento do aço ASTM A36, assim, foi realizada uma nova modificação na peça, acrescentando uma estrutura no interior do tambor para aumentar a resistência nessa região. A figura 15 exibe um

Figura 14 – Tensão máxima no eixo ajustado do carretel



Fonte: Autor (2024).

diagrama de tensões na peça e a deformações exibida com uma escala multiplicada em 50 vezes a deformação real.

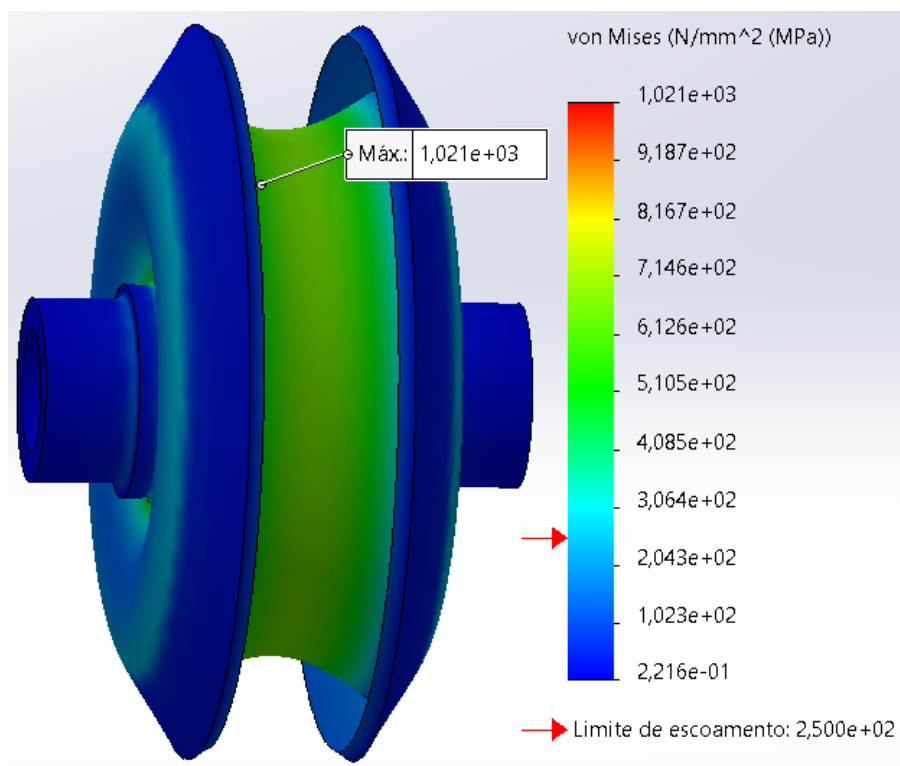
A segunda modificação no modelo 3D do carretel envolveu a adição de estruturas radiais no interior do tambor, o aumento de sua espessura e a ampliação do comprimento externo do eixo. A figura 36 ilustra o interior da peça através de uma secção transversal.

Com as alterações aplicadas, foi necessário recalcular o valor da tensão de compressão circunferencial.

$$\sigma_{y0} = 0,85 \times \frac{737.341,68N}{0,0826m \times 0,2m} = 37,938MPa \quad (19)$$

Através do novo valor de σ_{y0} e da nova modelagem virtual, a simulação foi reexecutada, exibindo os resultados de tensões e deslocamentos calculados que indicaram que a estrutura suportou a carga aplicada, porém com fator de um segurança a baixo do valor mínimo definido no capítulo 3.2, além de que pode ser observada a inviabilidade da estrutura através da quantidade de material que compôs tal versão no carretel.

Figura 15 – Compressão no tambor do carretel



Fonte: Autor (2024).

Figura 16 – Secção do carretel modificado



Fonte: Autor (2024).

3.3.3 Reestruturação do sistema

Tendo em vista a magnitude da falha ocorrida no último ensaio, descrito no tópico 3.3.2, foi avaliado pelo projetista a inviabilidade da remodelagem do carretel para a submissão de novos ensaios, sendo assim, foi realizada uma reorganização do sistema estrutural da bateria gravitacional para possibilitar o prosseguimento da prototipagem virtual.

O alvo da modificação foi a redução do módulo da tensão de compressão circunferencial (σ_{y0}), responsável por exceder o limite de escoamento do aço. Essa tensão é proporcional a três fatores que interferem direta e indiretamente em seu módulo, em cada um foi estipulado estratégias para alterar seus valores.

- Força máxima no cabo (F_c): Reduzir a força necessária para erguer o lastro por meio de polias móveis.
- Passo da ranhura (p): Aumentar ao máximo valor do passo, respeitando o limite imposto pela norma ABNT NBR 11375.
- Espessura útil do tambor (t_u): Aumentar a espessura útil do tambor.

Foi implementado mecanismos de polias móveis no sistema, que resultou na inclusão de componentes adicionais não mencionados no tópico 3.1, a saber, o cadernal e a ponte. Essas novas estruturas eliminaram a necessidade da polia entre o carretel e o lastro, na qual foi substituída pela ponte, estrutura de sustentação das polias fixas, localizada na superfície do poço e engastada ao solo, essa construção foi segmentada em partes de modo a viabilizar a inserção ou retirada do lastro sem que seja necessário a desmontagem completa da ponte.

Como referência, foi utilizado o cadernal de 5 polias ilustrado na figura 17, entretanto para a estrutura da bateria, foi feito o uso de uma configuração com quatro polias, capaz de promover uma redução de 16 vezes a força de tração no cabo, composta pelos pesos do lastro, do cadernal e do próprio cabo, submetidos a desaceleração durante o descarregamento da bateria. Essa redução possibilita a escolha de um cabo de aço com menor diâmetro, mantendo o fator de segurança igual a 6.

A definição de um outro cabo de aço partiu do seu módulo de carga de ruptura mínima (C_{rb}) calculado pela equação 20, em que se arbitrou um acréscimo de 5% para compensar o peso do cadernal e do próprio cabo, até então desconhecidos.

$$\frac{F_c}{16} \times 6 + 5\% \geq C_{rb} \quad (20)$$

$$297,973kN \geq C_{rb} \quad (21)$$

Figura 17 – Cadernal utilizado como referência



Fonte: Adaptado de [megafilm \(2024\)](#).

Essa propriedade pôde ser satisfeita pelo modelo de cabo de aço de 6 pernas IPH 619 de 22 mm de diâmetro, alma de fibra e construção *Seale*, grau 1960 com 313 kN de carga mínima de ruptura.

Figura 18 – Tabela de cabos de 6 pernas IPH 619

Diâmetro	AFS Massa aprox.	Carga mínima de ruptura			
		Grau 1770		Grau 1960	
[mm]	[kg/m]	[kN]	[t]	[kN]	[t]
3,00	0,032	4,9	0,5	5,8	0,6
5,00	0,087	13,6	1,4	16,2	1,7
8,00	0,230	37,4	3,8	41,2	4,2
9,50	0,320	52,7	5,4	58,8	6,0
11,00	0,433	70,7	7,2	78,4	8,0
13,00	0,607	98,7	10,1	109	11,1
14,00	0,704	114	11,6	127	13,0
16,00	0,919	150	15,3	166	16,9
19,00	1,300	211	21,5	233	23,8
22,00	1,740	283	28,9	313	31,9
26,00	2,430	395	40,3	437	44,6
28,00	2,810	458	46,7	507	51,7
32,00	3,680	598	61,0	662	67,6
35,00	4,400	716	73,1	792	80,8
38,00	5,180	843	86,0	934	95,3
44,00	6,950	1130	115	1250	128
51,00	9,340	1520	155	168	171

Fonte: Adaptado de [IPH \(2016\)](#).

A utilização das polias móveis, também implica no incremento na quantidade de cabo de aço utilizado. A cada polia, uma volta de cabo é dada, significando 100

metros de cabo por polia, totalizando 400 metros de comprimento do cabo de aço. Essa quantidade resultou em uma massa m_c de cabo de aço calculada por:

$$m_c = 400m \times 1,74kg/m = 696,00kg \quad (22)$$

O valor de m_c possibilitou o cálculo do limite de massa admissível (m_b) para o cadernal, considerando o cenário de descarregamento da bateria, onde ocorre a frenagem do lastro.

$$\frac{C_{rb}}{6} = \frac{(m + m_c + m_b) \times (g - a_f)}{16} \quad (23)$$

$$m_b = \frac{16 \times 297.973N}{6 \times 9,800m/s^2} - 73.787,00kg - 696,00kg = 6.598,00kg \quad (24)$$

De acordo com a norma ABNT NBR 11375, o passo da ranhura não deve exceder o valor de 1,2 vezes o diâmetro do cabo de aço, logo, outro valor de passo foi definido por:

$$p_b = 22mm \times 1,2 = 26,4mm \quad (25)$$

Esse valor de passo não representou um aumento real, quando comparado ao passo para o cabo de aço de 82,6 mm, o incremento foi de natureza proporcional ao diâmetro do cabo de aço de 22 mm.

3.3.4 Cadernal

O cadernal é a porção móvel do sistema de divisão de força, é composta por três polias paralelas e um ponto de fixação para o cabo de aço. A modelagem 3D computacional dessa peça partiu de uma ideação feita baseada na imagem 17, o que permitiu a segregação da peça em partes menores, sendo elas as polias e buchas deslizantes, o eixo e a gaiola. Os materiais utilizado para a prototipagem das partes da peça foram o aço ASTM A36, conforme indicado na norma ABNT NBR 10980, e o aço AISI 1020 para as buchas.

A gaiola é a estrutura responsável por agrupar as polias e realizar a ancoragem do conjunto ao lastro. As polias são fixadas pelo eixo, que permite a rotação dessas por meio do deslizamento em torno das buchas.

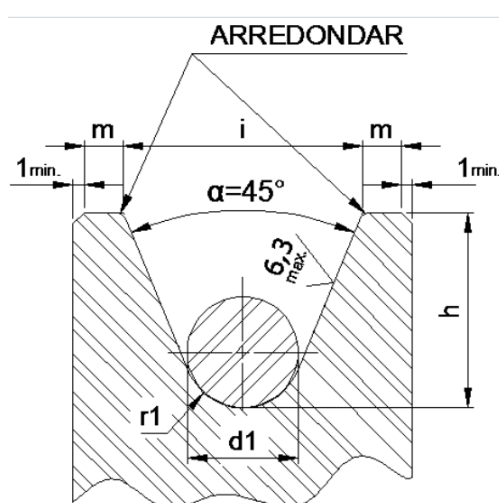
A primeira característica da peça definida foi o diâmetro primitivo (D_p) das polias, através da inequação 11, com $H = 28$, conforme o quadro da figura 8.

$$D_p \geq 28 \times 22,00mm \quad (26)$$

$$D_p \geq 616,00mm \quad (27)$$

As dimensões dos canais das polias foram determinados pela norma ABNT NBR 10980, que indica as medidas conforme ilustrado na figura 19, já os valores para m , i e $r1$ são encontrados na figura 20 que ilustra uma parte da tabela 1 contida na norma.

Figura 19 – Canal da roldana (polia)



Fonte: ABNT (2022)

A polia possui 6 furos radiais e um central, onde é posicionado a bronzina para a passagem do eixo; nas laterais, espaçadores desempenham a função de centralizar a peça na gaiola. A base da gaiola tem a mesma geometria da porção inferior do bloco unitário do lastro, possibilitando o acoplamento do cadernal semelhantemente aos blocos do lastro. As peças foram montadas no *software* dando forma ao cadernal ilustrado na figura 21b, cuja massa total é igual a 5.271 kg.

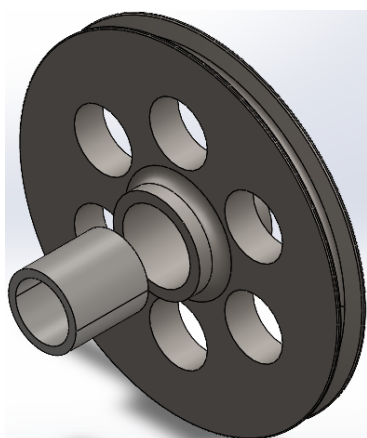
A simulação computacional foi executada na peça montada que, por meio de uma análise estática, testou-se a resistência mecânica dos componentes. Para esse ensaio foram definidos os parâmetros de fixação nas faces da metade inferior dos canais das polias, onde ocorre o contato com o cabo de aço, definiu-se também a relação de contato entre os elementos, não permitindo interferências entre si. Já para as cargas, aplicou-se a aceleração da gravidade sobre o conjunto e uma força vertical, com módulo de 737.341,68 N, na superfície de contato do acoplamento do cadernal com o lastro. A malha de elementos finitos foi gerada e a simulação foi concluída.

Figura 20 – Dimensões do canal da polia

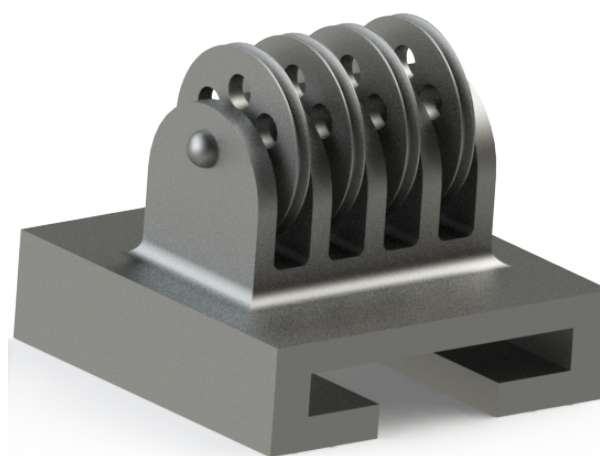
Raio do canal e variação permissível				Dimensões (mm)			Diâmetro nominal do cabo de aço
$r1$	Grupo do mecanismo			h^a	i	m	$d1$
	M1/M2	M3/M4/ M5	M6/M7/ M8				
8.5	+0.8	+0.4	+0.2	27.5	34	6	16
9.0				30.0	37	6	17
9.5				30.0	38	6	18
10.0				32.5	40	7	19
10.5				35.0	43	7	20
11.0				35.0	44	7	21
12.0				35.0	45	7	22
12.5				35.0	46	7	23
13.0				37.5	48	8	24
13.5				40.0	51	8	25
14.0				40.0	52	8	26
15.0				40.0	53	8	27, 28
16.0				45.0	59	8	29, 30

Fonte: Adaptado de [ABNT \(2022\)](#).

Figura 21 – Cadernal



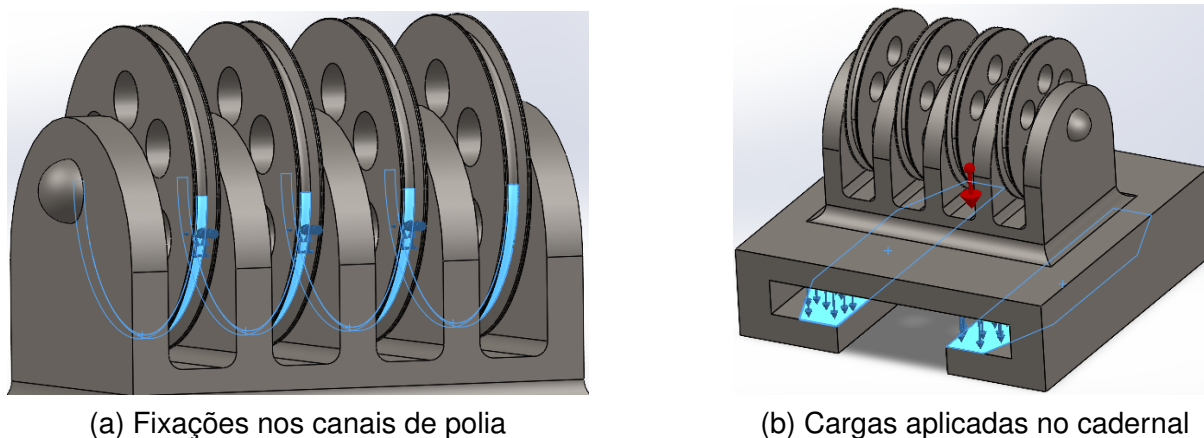
(a) Vista explodida da polia e bucha deslizante



(b) Montagem do cadernal

Fonte: Autor (2024).

Figura 22 – Análise estática no cadernal



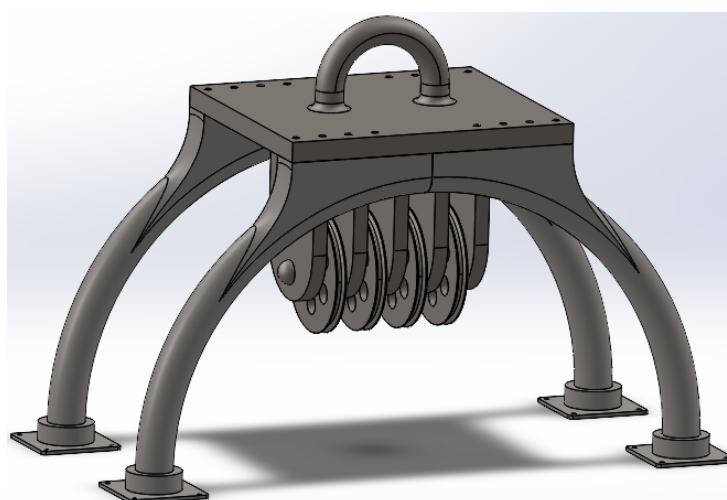
Fonte: Autor (2024).

3.3.5 Ponte

A ponte é a estrutura de sustentação das polias fixas pertencentes ao conjunto de redução de peso, essas peças ficarão posicionadas na superfície do poço, intermediando a conexão entre o carretel e o lastro. Essa estrutura foi segmentada em cinco partes: quatro braços e um moitão.

O moitão foi modelado semelhantemente ao cadernal. Polias, buchas e eixos foram mantidos, apenas a gaiola foi modificada, onde as barras de fixação das polias foram alongadas, foram criadas fixações para os braços da ponte e um olhal para engate em guindastes.

Figura 23 – Ponte



Fonte: Autor (2024).

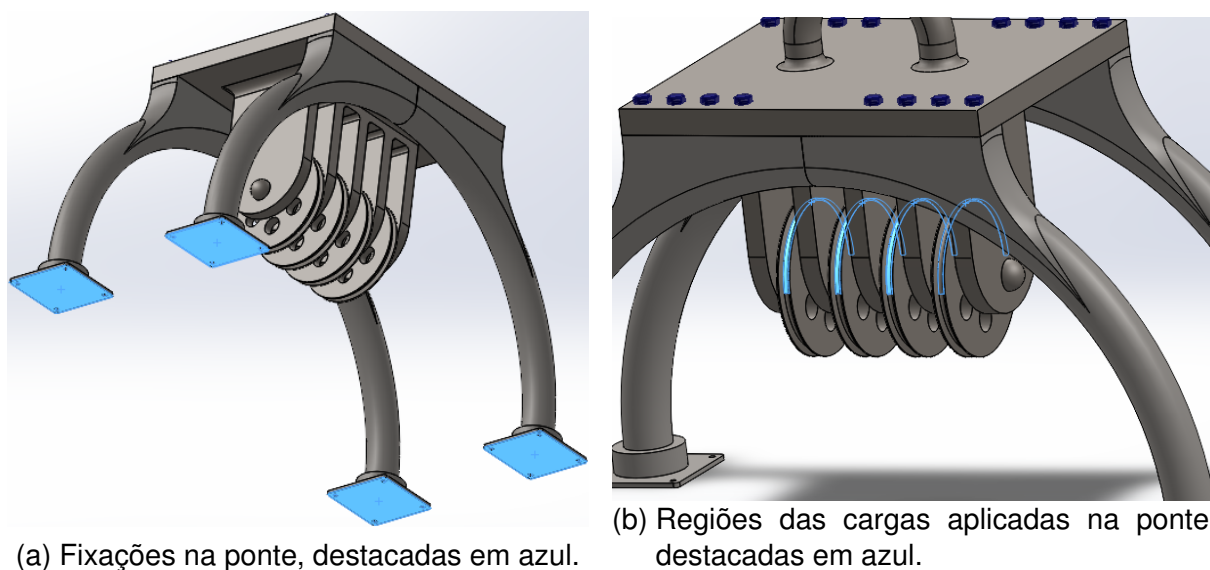
Os braços da ponte foram projetados com um formato circular, visando otimizar a distribuição de tensões e garantir maior resistência estrutural. Para garantir a estabi-

lidade, foram implementadas estruturas de fixação no solo, assegurando que a ponte permaneça ancorada. O material escolhido para a construção desses braços foi o aço 1020, devido a suas propriedades mecânicas de resistência à tração.

A simulação computacional foi realizada após a montagem virtual das peças que compõem a estrutura da ponte. Nos orifícios de fixação da gaiola, foram definidos parafusos com tipo de conexão rígida, responsáveis por unir a gaiola aos braços da ponte, sem a aplicação de um pré-carregamento de torque. Para assegurar a não interferência entre os elementos, foram configuradas interações do tipo “contato” entre os componentes da estrutura, permitindo uma análise das tensões e forças atuantes individualmente nas superfícies em contato.

Nas regiões dos furos para ancoragem, as geometrias foram definidas como fixas, representando a restrição total de movimento nesses pontos, simulando o comportamento das peças em condições reais de fixação ao solo. Além disso, na face inferior da estrutura, foi aplicada uma restrição à movimentação normal, limitando deslocamentos verticais de modo a representar a presença do solo em contato com essa região.

Figura 24 – Fixações e aplicação das cargas na ponte.



Fonte: Autor (2024).

A carga utilizada para a simulação consiste na ação da gravidade sobre a ponte e a soma dos pesos do lastro (P_l), cadernal (P_{cd}) e cabo de aço (P_c), tal valor foi calculada pela equação 28. Essa força foi aplicada na metade superior dos canais das polias, região onde permanece o contato com o cabo de aço, responsável por transmitir o peso da estrutura.

$$F_p = P_l + P_{cd} + P_c = 723.112,6N + 51.940N + 6.820,8N = 781.873,4N \quad (28)$$

Essas definições permitiram uma simulação do comportamento mecânico da ponte mediante as cargas impostas, em que o programa exibiu os resultados de tensões e deformações nos pontos críticos da estrutura.

Uma nova simulação foi realizada na estrutura com o objetivo de testar a resistência do olhal de ancoragem do guindaste. Nesta análise, foram mantidos os mesmos parâmetros de cargas, interações entre as peças, configurações de conexões e a malha de elementos finitos previamente estabelecida, assegurando a consistência dos resultados comparativos. A única modificação aplicada foi no local de fixação, que passou a ser definido na porção inferior do olhal, com a condição de “geometria fixa” nessa região. Essa alteração visou avaliar como a nova configuração de fixação impacta a distribuição de tensões e o desempenho estrutural do olhal sob as mesmas condições de carga, proporcionando uma análise de sua resistência nestes cenários de ancoragem.

3.3.6 Carretel para o cabo de aço de 22,00 mm (Carretel B)

A metodologia utilizada para a construção do exemplar de carretel dessa seção, foi semelhante a da peça modelada para o enrolamento do cabo de 82,6 mm. Manteve-se o aço ASTM A36 e os mesmos princípios utilizados para o cálculo das dimensões, conforme as normas brasileiras NBR 11375 e NBR 8400-3, resultando nos valores listados a seguir.

- Diâmetro do tambor (D_b): conforme à inequação 11, foi calculado o diâmetro mínimo para o tambor do carretel.

$$D_b \geq 25 \times 22mm; D_b \geq 550mm \quad (29)$$

$$D_b = 1000mm \quad (30)$$

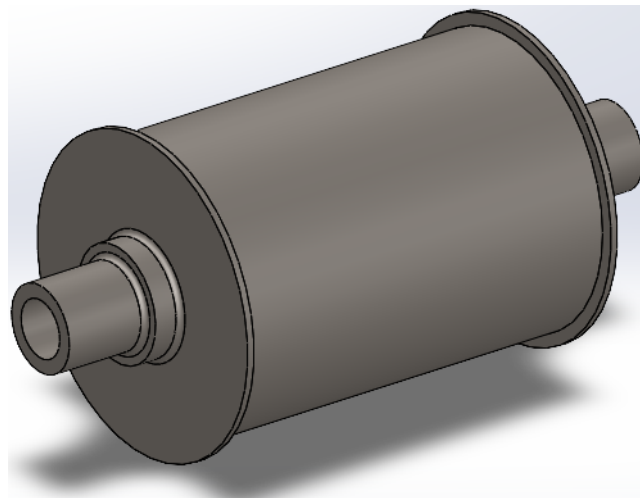
- Diâmetro dos flanges (D_{fb}): $D_b + 4 \times 22mm = 1088mm$
- Comprimento do tambor (C_{tb}): o comprimento do tambor foi calculado com metade das voltas necessárias para o enrolamento total do cabo (v_c), multiplicado pela medida de p_b .

$$C_{tb} = \frac{v_c}{2} \times p_b \quad (31)$$

$$C_{tb} = \frac{127,3239}{2} \times 22mm \approx 1400mm \quad (32)$$

Foi utilizada a versão 02 do carretel da seção 3.3.2 como referência para a modelagem virtual. O eixo tubular, definido com 300 mm de diâmetro e 50 mm de parede, está presente em toda a extensão transversal da peça, conforme é ilustrado na figura 25.

Figura 25 – Carretel para o cabo de aço de 22 mm



Fonte: Autor (2024).

Foram executadas simulações computacionais na peça semelhantemente às realizadas no tópico 3.3.2, utilizando os mesmos princípios de fixações e aplicação de cargas. O primeiro ensaio foi o do torque (T_{tb}) no eixo provocado pela tração (F_{cb}) no cabo de aço durante a frenagem do lastro. O módulo de F_{cb} foi calculado por:

$$F_{cb} = \frac{(m + m_c + m_b) \times (g - a_f)}{16} = \frac{79.754kg \times (9,80m/s^2)}{16} = 48.849,32N \quad (33)$$

O torque foi definido por:

$$T_{tb} = \frac{D_b}{2} \times F_{cb} = 0,5m \times 48.849,32N = 24.424,66Nm \quad (34)$$

Após a aplicação dessa carga, a malha de elementos finitos foi gerada e o estudo foi executado, revelando que o carretel resistiu a carga aplicada.

O segundo ensaio foi de aplicação da carga de compressão circunferencial (σ_{y0}) no tambor do carretel, calculada pela equação 35. O estudo foi executado após a geração da malha, demonstrando o desempenho da estrutura mediante a carga.

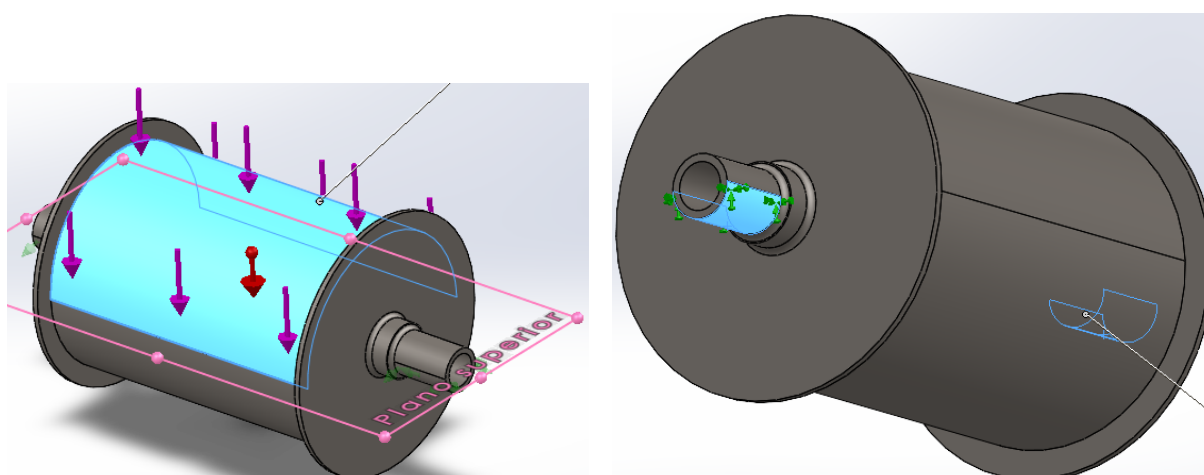
$$\sigma_{y0} = 0,85 \times \frac{F_{cb}}{p_b \times t_{ub}} = 0,85 \times \frac{48.849,32N}{0,0264m \times 0,097m} = 16,214MPa \quad (35)$$

O carretel suportou a compressão circunferencial σ_{y0} , que produziu tensões que alcançaram o módulo de 100 MPa.

O estudo seguinte foi executado de modo a testar o desempenho da estrutura mediante ao próprio peso do carretel e o peso do cabo de aço nele enrolado. Para isso, aplicou-se a aceleração da gravidade no sistema e o peso (P_c) do cabo na metade superior do tambor, com direção vertical para baixo, as fixações foram estabelecidas na metade inferior da face do eixo em ambas extremidades, por meio de restrições de geometria fixa. A malha de elementos finitos foi gerada e a simulação foi executada.

$$P_c = m_c \times 9,8m/s^2 = 696,0kg \times 9,8m/s^2 = 6.820,8N \quad (36)$$

Figura 26 – Cargas e fixações para simulação a ação da força peso no carretel.



(a) Carga do peso do cabo de aço e ação da gravidade.

(b) Fixação na porção inferior do eixo do carretel.

Fonte: Autor (2024).

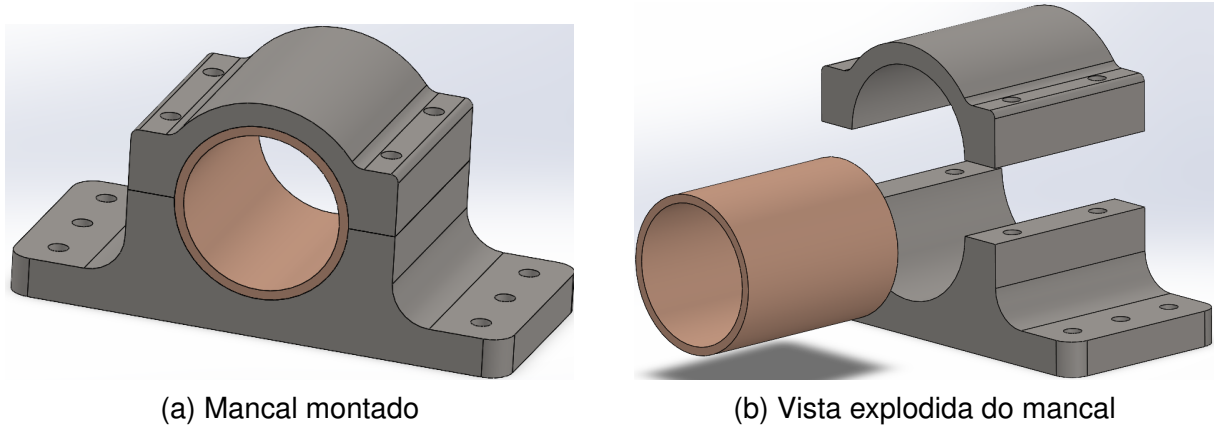
3.3.7 Mancais

Os mancais são responsáveis por suportar o carretel na estrutura e reduzir as perdas de cargas por atrito, presentes nas áreas de contato com o eixo. Essas peças foram divididas em três elementos: parte inferior e superior, construídas em aço AISI 1020 e a bucha de deslizamento, em liga de bronze 9010.

As dimensões do mancal foram definidas a partir do diâmetro e do comprimento do eixo do carretel, as buchas possuem diâmetro externo igual a 340 mm e interno igual a 300 mm, a base do mancal tem 3 furos passantes, em cada lado da peça,

para fixação e quatro furos de 60 mm de profundidade no topo para a fixação da parte superior.

Figura 27 – Mancal

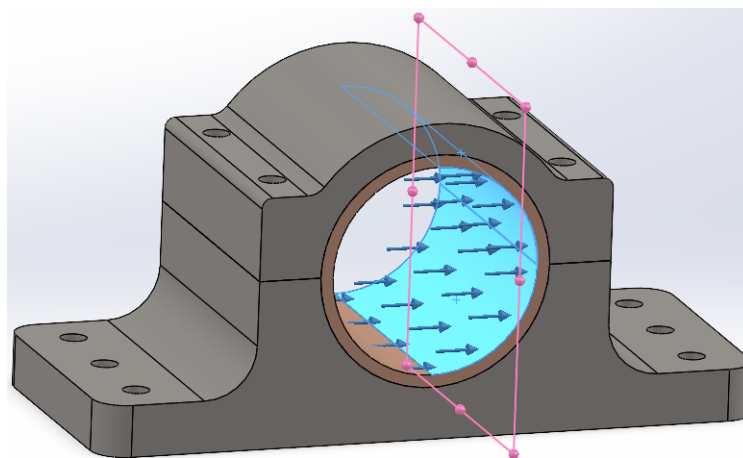


Fonte: Autor (2024).

Na simulação computacional realizada nessa peça, foi aplicado a carga de compressão σ_m , gerada pelo eixo do carretel ao ser tracionado pelo cabo de aço. Tal carga, de módulo calculado pela equação 37, foi submetida em metade da face interna do mancal, com direção horizontal, conforme observado na figura 28, que sinaliza o local de aplicação da carga, indicada pelas setas em azul.

$$\sigma_m = \frac{F_{cb}}{2} = \frac{48.849,32N}{2} = 24.424,66N \quad (37)$$

Figura 28 – Aplicação da carga σ_m

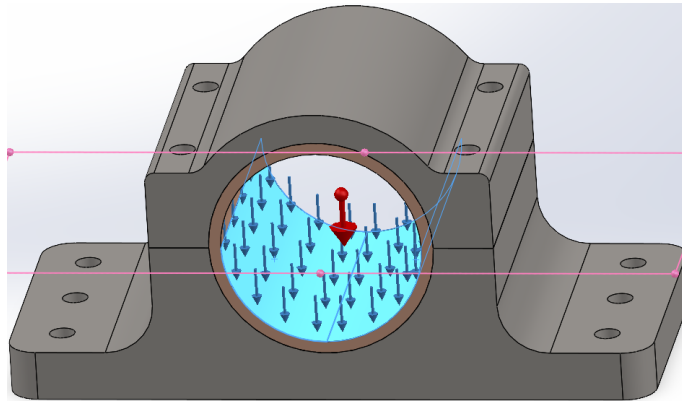


Fonte: Autor (2024).

Adicional a σ_m , aplicou-se a aceleração da gravidade e a força peso gerada pelo carretel com o cabo de aço enrolado no tambor. Tal peso, gera uma força reativa P_m atuante em cada mancal, definida por:

$$P_m = \frac{P_{carretel} + P_b}{2} = \frac{38.267,7N + 6.820,8N}{2} = \frac{45.088,5N}{2} = 22.544,25N \quad (38)$$

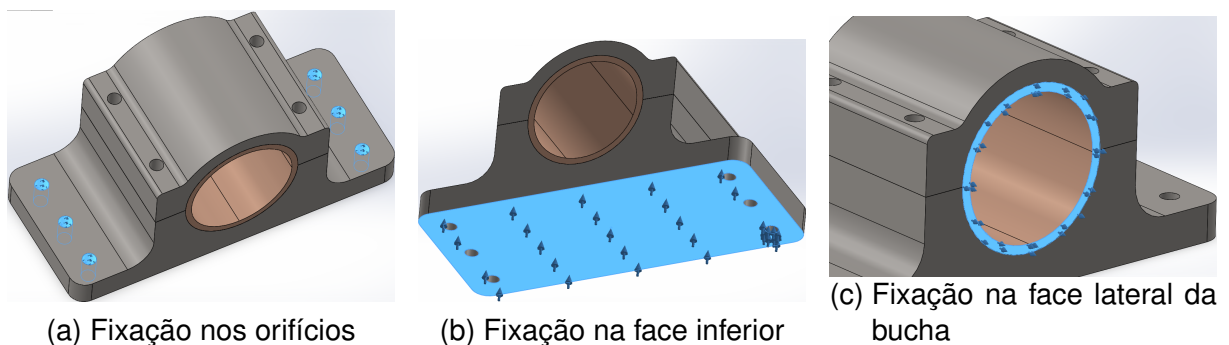
Figura 29 – Face de aplicação do carregamento P_m e aceleração da gravidade



Fonte: Autor (2024).

De modo a evitar a sobreposição entre os elementos do mancal, a configuração de interação do tipo contato foi estabelecida, já para a união entre a base e o topo do mancal utilizou-se parafusos como conectores. Através dos orifícios nas laterais, foi definido o parâmetro de geometria fixa, impedindo o movimento nessa região. A figura 30a ilustra o local de fixação nos orifícios e as conexões por parafusos no topo da peça. Na face inferior do mancal e em uma das faces laterais da bucha, a fixação foi definida para impedir a movimentação dessas superfícies em suas direções normais, como indicado pelas setas na figura 30b e 30c.

Figura 30 – Fixações no mancal



(a) Fixação nos orifícios

(b) Fixação na face inferior

(c) Fixação na face lateral da bucha

Fonte: Autor (2024).

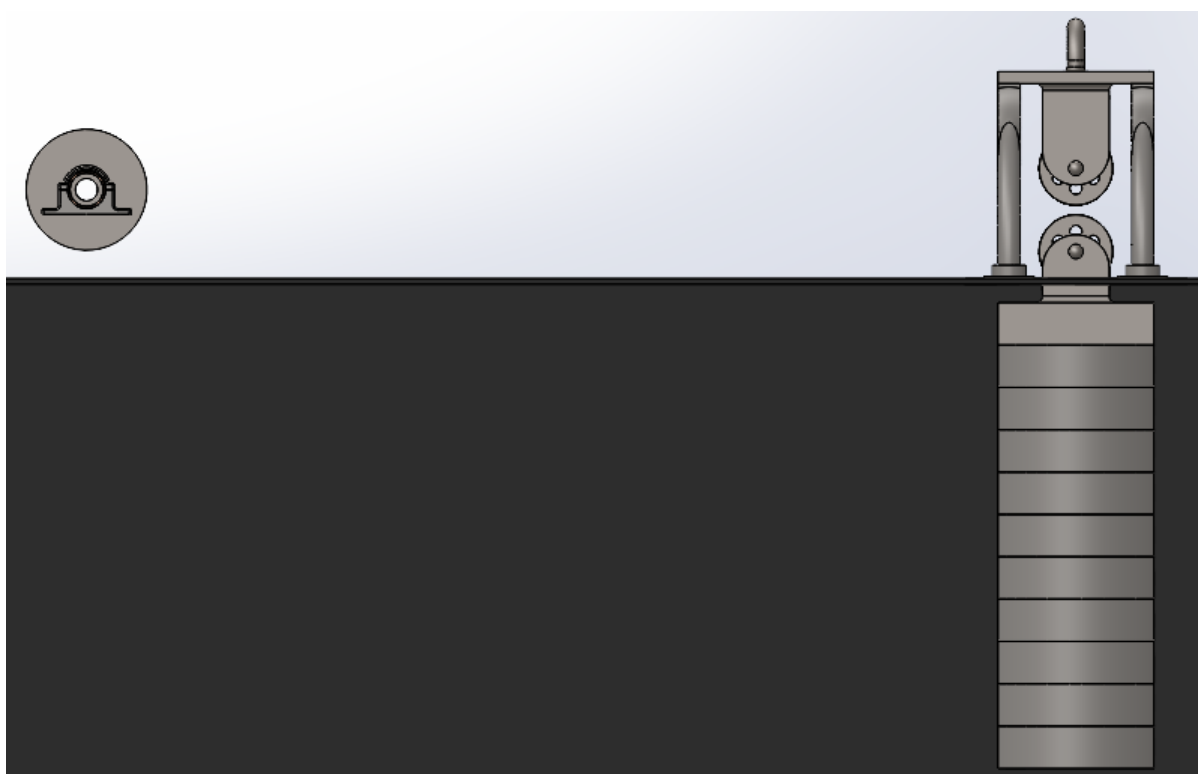
O *software* calculou a simulação após a criação da malha de elementos finitos, exibindo os resultados relativos às tensões atuantes no mancal.

3.3.8 Montagem

Após a conclusão das modelagens 3D e das simulações correspondentes, foi realizada a montagem completa de todos os componentes em um ambiente virtual. Esse processo de montagem envolveu o encaixe e o posicionamento preciso das peças, respeitando os alinhamentos e distâncias exigidos pelo projeto para garantir o funcionamento adequado do sistema.

Durante a montagem, os mancais foram encaixados nos eixos do carretel, assegurando a rotação e o suporte necessários para o movimento. O cadernal foi acoplado ao lastro de modo semelhante aos encaixes dos blocos. Por fim, a ponte foi alinhada com o cadernal, de modo que as polias ficassem perfeitamente posicionadas, garantindo um trajeto alinhado para o movimento do cabo. Essas etapas de montagem foram fundamentais para verificar a compatibilidade geométrica e o funcionamento integrado de todos os componentes no modelo virtual. A figura 31 é uma das vistas laterais da montagem, nela é possível identificar o alinhamento das estruturas posicionadas.

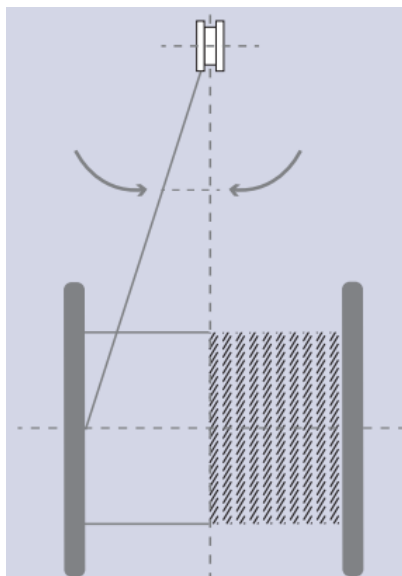
Figura 31 – Vista lateral da montagem



Fonte: Autor (2024).

IPH (2016), recomenda que, para cabos de aço não anti giratórios, a angulação máxima de desvio (α) entre dois pontos do cabo é de $4,5^\circ$, conforme demonstrado pela figura 32 que ilustra tal deslocamento que ocorre durante a movimentação do cabo de aço no carretel.

Figura 32 – Ângulo de desvio do cabo de aço.



Fonte: IPH (2016).

Para que a angulação seja respeitada, é necessária uma distância mínima (X) entre o eixo do carretel e das polias do moitão, calculada por:

$$X = \frac{C_{tb}}{2} \cdot \frac{1}{\tan(\alpha)} = 0,7m \times 12,70 = 8,89m \quad (39)$$

Na montagem do sistema, o carretel foi posicionado com essa distância calculada, já a altura do carretel em relação ao solo foi definida com base no alinhamento entre a superfície do tambor e as polias fixas, de modo a assegurar que o cabo de aço se mova de maneira reta e alinhada ao longo do trajeto horizontal. Esse posicionamento permite garantir que a transmissão de força entre o tambor e as polias ocorra sem desvios, evitando tensões secundárias que venham interferir no funcionamento do mecanismo.

4 Resultados

Uma vez obtida a velocidade nominal do lastro, através da equação 4, foram calculadas as tensões adicionais, nos estágios de movimentação do mecanismo, a partir de valores arbitrados dos tempos necessários para o sistema sair e retornar da inércia. Tais tensões, observadas na tabela 1, geradas nos ciclos o carregamento e descarregamento, provocam um acréscimo na ordem de grandeza de $10^{-7}\%$ e $10^{-6}\%$ no módulo das cargas, respectivamente. Com o cabo de 22 mm, esses acréscimos também corresponderam a esses mesmos percentuais da tensão gerada pelo sistema quando estático. Essas tensões podem ser ainda mais reduzidas com a parametrização do sistema de tração, partidas e frenagens mais suaves reduzem o valor de tais tensões.

O sistema final prototipado, ao todo, obteve 35 componentes mais o cabo de aço, sendo que os mancais, polias, buchas, eixos e os arcos da ponte foram replicados para compor a montagem completa da estrutura. A tabela 2 contém os dados quantitativos referentes as peças utilizadas para a montagem virtual do sistema final e do cabo de aço de 22 mm.

Tabela 2 – Componentes da bateria gravitacional

Componente	Quantidade	Material	Peso unitário	Peso total
Cabo de aço	400 m	Aço e fibra	696,00 kg	696,00 kg
Bloco de lastro	10 un	AISI 1020	7.378,00 kg	73.780,00 kg
Gaiola do cadernal	1 un	ASTM A36	4.715,41 kg	4.715,41 kg
Polia do cadernal	4 un	ASTM A36	116,92 kg	467,68 kg
Bucha do cadernal	4 un	AISI 1010	11,59 kg	46,36 kg
Eixo do cadernal	1 un	ASTM A36	70,68 kg	70,68 kg
Carretel B	1 un	ASTM A36	4.748,51 kg	4.748,51 kg
Braço da ponte	4 un	AISI 1020	691,12 kg	2.764,48 kg
Gaiola do moitão	1 un	ASTM A36	3.986,50 kg	3.986,50 kg
Polia do moitão	4 un	ASTM A36	116,92 kg	467,68 kg
Bucha do moitão	4 un	AISI 1010	11,59 kg	46,36kg
Eixo do moitão	1 un	ASTM A36	70,68 kg	70,68kg
Total				91.860,34 kg

Fonte: Autor (2024).

Todas as peças foram compostas por materiais metálicos e ao todo, a estrutura da bateria mais o lastro pesa, aproximadamente, 91.860,34 kg, considerando a massa total do cabo de aço de 22 mm, conforme a tabela.

A configuração do lastro em blocos de encaixe permitem a adequação da bateria a outros sistemas com demandas energéticas distintas, a capacidade armaze-

namento elétrico é proporcional a quantidade de blocos utilizados para a formação de um lastro, a utilização de mais dessas unidades proporciona uma capacidade maior de armazenamento.

A altura total do lastro, empregada no sistema em questão, é de 4,070 m, sendo 1,070 m maior e 318,0 kg mais pesado que o conceitualizado por REIS (2023), tais diferenças se justificam pela densidade do aço utilizado, que é maior que a estipulada pelo autor e pela segmentação em partes unitárias, cujo formato não cilíndrico resulta em um comprimento vertical mais alongado. Tal dimensão do lastro exige que a profundidade do poço seja superior a 50 metros, de modo a não interferir na distância de deslocamento do peso, que define a quantidade de energia armazenada pela bateria gravitacional.

O modelo de carretel, documentado no tópico 3.3.2, foi descartado para a integração no conjunto que compõe a estrutura da bateria gravitacional, as remodelagens feitas nessa peça não obtiveram resultados satisfatórios mediante as tensões aplicadas a ela. A quantidade de aço empregada foi julgada pelo projetista como elevada, tendo em vista que o peso do componente teria potencial capacidade de prejudicar outros elementos da estrutura, como os mancais de deslizamento que sustentam diretamente o peso do carretel.

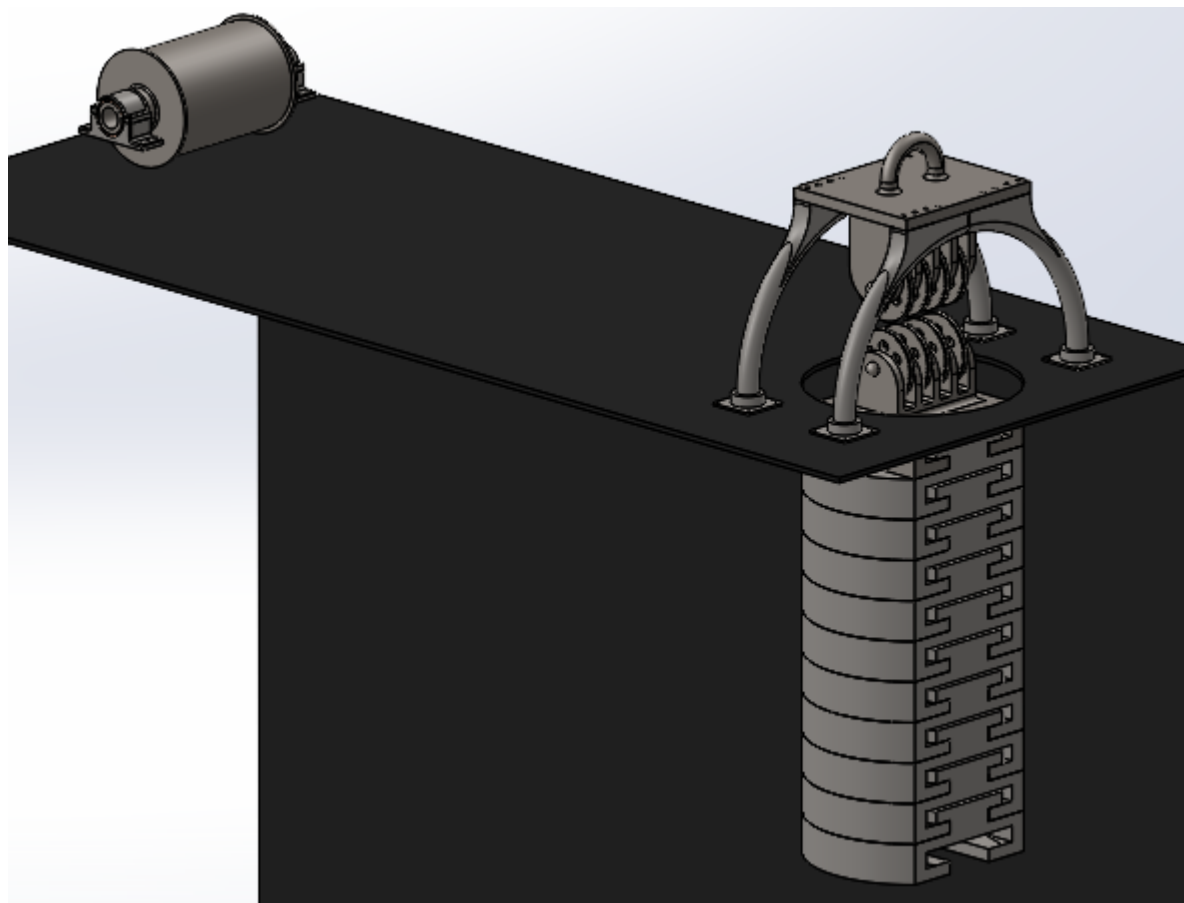
A reestruturação do sistema formulou novos elementos, que foram agregados de modo a aproximar a factibilidade do protótipo, a implementação de um sistema de polias móveis garantiu a redução da tensão de tração necessária para erguer o lastro, eliminando a necessidade de um carretel com a quantidade de aço como a da terceira versão do primeiro modelo, relativo ao cabo de 82,6 mm que também foi descartado, dando lugar a um de 22 mm que manteve o mesmo nível de segurança. O exemplar resultante de carretel é 75% mais leve que o anterior, entretanto, o comprimento do tambor é maior para acomodar os 400 m de cabo de aço exigidos.

Dentre os elementos elaborados na reestruturação, o cadernal obteve uma massa total de 5.271,64 kg, valor a baixo da margem determinada na equação 24, o que resultou em um fator de segurança calculado superior a 6 para o cabo de aço.

A montagem virtual dos componentes modelados resultaram em encaixes corretos entre as peças, não ocorrendo sobreposição de sólidos, desalinhamentos ou disposição assimétrica, entretanto, não foram adotadas folgas entre as partes que se acoplam para obter algum tipo de movimentação, onde é necessário um espaço para acomodação de um elemento lubrificante e para permitir o deslizamento durante o encaixe, que pode ser dificultado pelas dilatações e contrações térmicas no material e pela rugosidade das superfícies, observadas no ambiente físico. A estrutura foi arranjada similarmente a instalação ilustrada na figura 2, revelando as dimensões espaciais necessárias para a disposição da bateria em um local físico, em que resultou em uma

área mínima para a instalação de aproximadamente 40,00 m², com 10 m de largura por 4 m de comprimento. A altura máxima da estrutura, a cima do solo, é de 2,3 m, que vai do ponto mais alto da ponte ao solo.

Figura 33 – Representação esquemática da instalação da bateria gravitacional



Fonte: Autor (2024).

Essa montagem evidenciou a necessidade de uma distância mínima entre os mancais e o solo, de modo a permitir a livre rotação do carretel. Essa distância está diretamente relacionada à altura das polias fixas e ao diâmetro do carretel, sendo ideal que o cabo de aço entre o carretel e as polias permaneça alinhado horizontalmente. No entanto, uma estrutura de fixação para os mancais, responsável por este espaçamento, não foi projetada neste estudo, uma vez que o projetista considerou a possibilidade de fabricar essa estrutura em concreto armado, dadas as cargas que devem ser impostas nessa estrutura. Devido à indisponibilidade de modelos de concreto armado com as propriedades físicas adequadas no banco de dados do *software* utilizado, não foi possível realizar uma prototipagem virtual dentro da metodologia estabelecida para o trabalho.

4.1 Simulações computacionais

As simulações realizadas permitiram uma visualização básica do comportamento das estruturas da bateria, quando estas estão sujeitas as cargas impostas pelas condições ideais de trabalho do mecanismo. O quadro 1 lista alguns dos dados obtidos em cada simulação, na ordem sequencial, descrita na seção 3.3.

Quadro 1 – Dados das simulações computacionais

Peça	Ensaio	Tipo de ensaio	Esforço mecânico	Tensão máxima encontrada	Fator de segurança
Bloco do lastro	01	Análise estática	Tração / compressão	26,74 MPa	13
Carretel A (Versão 1)	02	Análise estática	Torção	759,3 Mpa	0,33
Carretel A (Versão 2)	03	Análise estática	Torção	53,08 MPa	4,8
Carretel A (Versão 2)	04	Análise estática	Compressão circunferencial	1021 MPa	0,24
Carretel A (Versão 3)	05	Análise estática	Compressão circunferencial	191,3 MPa	1,3
Cadernal	06	Análise estática	Tração / compressão	73,73 MPa	3,4
Ponte	07	Análise estática	Tração / compressão	87,42 Mpa	2,9
Ponte	08	Análise estática	Tração / compressão	67,37 Mpa	3,7
Carretel B	09	Análise estática	Torção	9,556 Mpa	26
Carretel B	10	Análise estática	Compressão circunferencial	99,66 Mpa	2,5
Carretel B	11	Análise estática	Flexão	5,864 Mpa	43
Mancal	12	Análise estática	Tração / compressão	30,62 Mpa	2,5

Fonte: Autor (2024).

Na última coluna deste quadro, são apresentados os valores dos fatores de segurança mínimos correspondentes a cada ensaio realizado. Esses valores foram determinados pela razão entre a tensão máxima obtida nas simulações e a tensão admissível do material utilizado na construção das peças. Um dos principais fatores que influenciaram os valores dos fatores de segurança foi a quantidade de material empregada em cada componente, definida pelo projetista com o objetivo de equilibrar adequadamente resistência e peso. Essa decisão foi tomada com base em uma análise técnica, considerando as condições específicas e os requisitos operacionais do sistema em questão. Dessa forma, buscou-se otimizar o desempenho estrutural das peças, garantindo que elas suportem as tensões impostas durante o funcionamento

sem comprometer a leveza e a eficiência do conjunto.

A simulação realizada no bloco do lastro demonstrou que o peso combinado de outros nove blocos resultou em tensões significativas no objeto. As maiores concentrações de tensão foram observadas nas regiões próximas aos pontos de aplicação das forças, com especial incidência nos cantos da peça. A tensão máxima registrada foi de 26,74 MPa, resultando em um fator de segurança de 13. Esse elevado fator de segurança sugere que a estrutura do bloco é robusta o suficiente para suportar uma carga adicional de até aproximadamente 117 blocos de lastro, sem comprometer sua integridade estrutural, o que demonstra uma ampla margem de segurança para futuras expansões do sistema.

A versão 01 do carretel A não resistiu ao esforço de torção aplicado no ensaio 02, cuja tensão máxima de 779,3 MPa foi suficiente para romper a peça na região de transição dos diâmetros do eixo, conforme ilustrado na figura 13. Essa região foi remodelada, resultando na versão 02, que resistiu a torção no ensaio 03, obtendo um fator de segurança igual a 4,7, entretanto, quando submetida ao esforço de compressão circunferencial no ensaio 04, as tensões resultantes apresentaram módulo quatro vezes maior que o limite de escoamento do aço ASTM A36.

Nas simulações computacionais realizadas no carretel B, foram avaliados diferentes tipos de esforços. Na simulação de torção, a região de maior concentração de tensão foi identificada no eixo, especificamente na circunferência chanfrada, com uma tensão máxima registrada de 9,556 MPa. Esse valor resultou em um fator de segurança igual a 26, o que indica que a estrutura apresenta uma boa margem de resistência sob esse tipo de esforço.

Na simulação de compressão circunferencial, a maior tensão foi observada no tambor do carretel B, com um módulo de 99,66 MPa, resultando em um fator de segurança de 2,5. Embora esse valor ainda seja considerado seguro, ele demonstra uma margem de segurança menor em comparação com os outros ensaios de outros componentes, sendo próximo ao limite mínimo, o que exige1 atenção na aplicação de cargas de compressão.

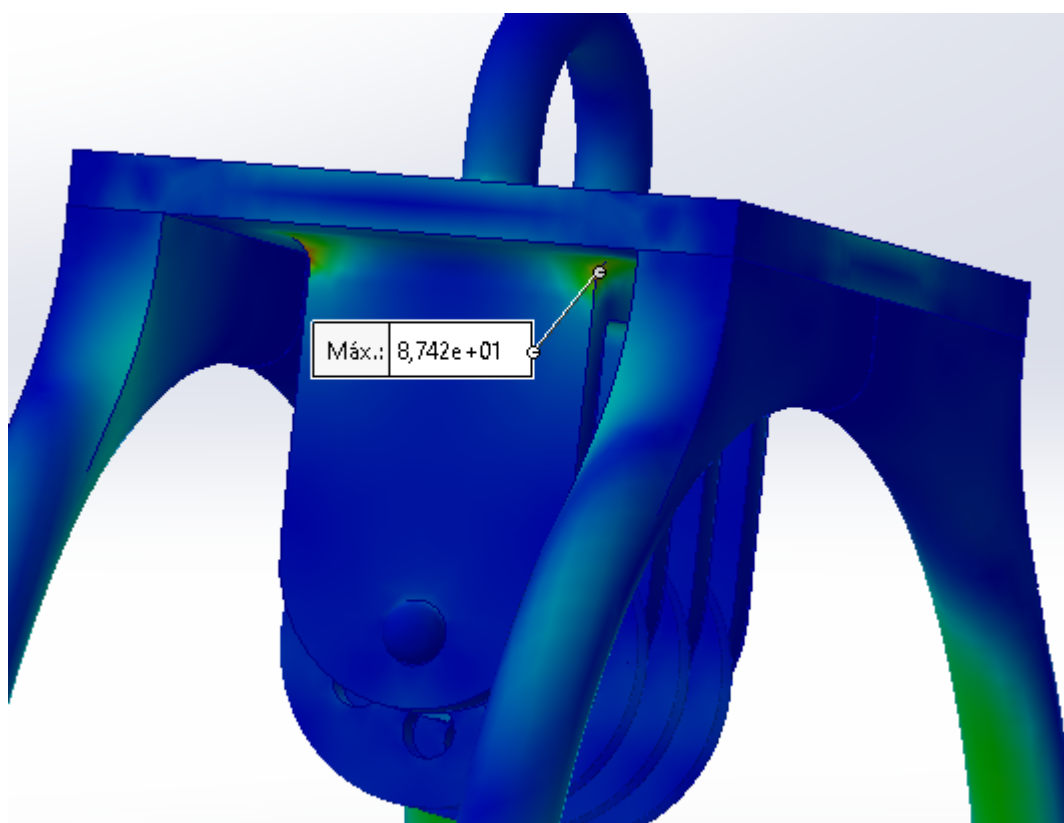
Por fim, na simulação de flexão, gerada pelas forças de peso do cabo e do próprio carretel, a região de maior tensão coincidiu com a área crítica do ensaio de torção, registrando um módulo de 5,864 MPa. O fator de segurança nesse caso foi de 43, evidenciando uma resistência significativa da estrutura em relação a esforços de flexão.

Esses resultados indicam que o carretel B apresenta boa resistência geral, com maior atenção necessária para os esforços de compressão no tambor, onde a margem de segurança é relativamente menor.

A simulação computacional no cadernal revelou que as maiores concentrações de tensão ocorrem nas regiões de contato entre as polias e a gaiola, com um módulo de 73,73 MPa, resultando em um fator de segurança de 3,4. Esses valores indicam que, em condições estáticas, a estrutura é capaz de suportar as cargas impostas com uma margem de segurança. No entanto, o ensaio estático, embora confirme a capacidade da estrutura para cargas estáticas, também sugere que a movimentação dinâmica dos elementos pode gerar outros tipos de tensões que não foram completamente abordadas nessa simulação, exigindo uma análise dinâmica mais detalhada para prever possíveis falhas ou desgastes decorrentes do movimento contínuo.

A primeira simulação realizada na ponte teve como objetivo testar o comportamento da estrutura sob o peso do lastro, com o cadernal e o cabo de aço devidamente acoplado. Durante a análise, observou-se que as tensões se distribuíram predominantemente entre os braços da ponte e a gaiola, refletindo as áreas mais solicitadas pela carga aplicada. As tensões máximas concentraram-se nas regiões dos cantos arredondados da gaiola, como ilustrado na figura 34. Nessas áreas, o módulo da tensão máxima alcançou um valor de 87,42 MPa, o que resultou em um fator de segurança de 2,9. Esse fator sugere a importância de monitorar essas regiões críticas, onde há maior concentração de tensões, especialmente em condições de cargas adicionais.

Figura 34 – Ponto de tensão máxima na gaiola da ponte



Fonte: Autor (2024).

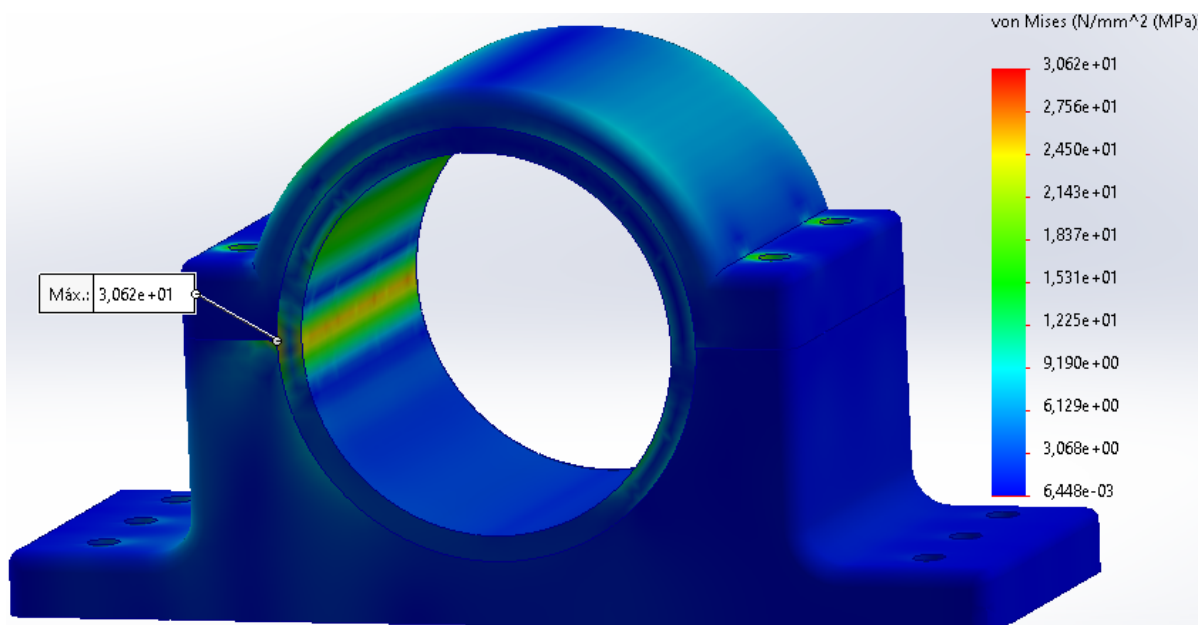
A segunda simulação na ponte foi projetada para avaliar o comportamento do olhal em um cenário onde um guindaste está acoplado, sustentando todo o peso da estrutura. Nesse contexto, observou-se que as tensões se concentraram principalmente na região do olhal, próximo à sua junção com o restante da gaiola, evidenciando essa área como ponto crítico de tensão. A tensão máxima registrada foi de 67,37 MPa, o que proporcionou um fator de segurança de 3,7. Esse valor indica uma margem de segurança relativamente satisfatória para a aplicação, garantindo a capacidade do olhal de suportar a carga total da estrutura, mesmo sob as condições exigidas pelo guindaste. Contudo, a concentração de tensões nessa junção destaca a importância de uma avaliação contínua dessa região devido às adversidades desse cenário, onde é provável o surgimento de cargas variáveis.

A simulação computacional realizada no mancal revelou uma distribuição heterogênea das tensões ao longo da peça. As tensões mais elevadas foram observadas, principalmente, nas regiões de fixação por parafusos, na bucha, no topo do mancal, e na base, especialmente no lado em que foi aplicada a força horizontal. A tensão máxima ocorreu na extremidade da base, na junção com o topo do mancal, em contato direto com a bucha, como mostra a indicação na figura 35. O módulo dessa tensão máxima foi de 30,62 MPa, resultando em um fator de segurança de 2,5. Embora o fator de segurança esteja em um nível comparável aos resultados anteriores, a concentração de tensões nessa região crítica indica a necessidade de uma atenção especial em um eventual protótipo físico. Devido aos movimentos rotacionais realizados pela bucha, essa área está mais suscetível a um desgaste acelerado, que atrelado as cargas de tração presentes pode ocasionar em rompimentos dessa estrutura.

Durante o processo de prototipagem virtual, identificou-se a possibilidade de surgimento de comportamentos específicos durante o funcionamento da bateria gravitacional. Tais fenômenos podem resultar em desgastes que comprometem a durabilidade da estrutura. Dentre esses fatores, destacam-se os seguintes:

- Deslizamento dos blocos do lastro: a movimentação do sistema pode induzir um movimento pendular no lastro, especialmente durante a elevação ou descida. Esse movimento oscilatório pode gerar instabilidade nos blocos que compõem o lastro, uma vez que estes não possuem travas de encaixe. Como resultado, há o risco de deslizamento e desencaixe dos blocos, o que comprometeria tanto a eficiência do sistema quanto a sua integridade estrutural.
- Deslizamento do cabo nas polias: durante a movimentação do sistema, pode ocorrer deslizamento do cabo de aço nas polias, em vez de ambos se moverem de forma sincronizada na mesma velocidade. Esse deslizamento pode ser causado por uma falta de atrito adequado entre o cabo e a superfície das polias

Figura 35 – Ponto de tensão máxima no mancal



Fonte: Autor (2024).

ou atrito excessivo em outras regiões, comprometendo a transmissão eficiente de força e resulta em perda de desempenho do sistema. Além disso, esse fenômeno pode gerar desgaste acelerado tanto no cabo quanto nas polias, afetando a durabilidade dos componentes e, conseqüentemente, a confiabilidade do mecanismo.

- Vibrações no cabo de aço: durante a movimentação do sistema, podem ocorrer vibrações no cabo de aço, causadas por irregularidades no movimento do sistema motriz. Essas vibrações podem resultar em perda de desempenho, comprometendo a eficiência na transmissão de força. Além disso, a persistência dessas vibrações ao longo do tempo pode gerar folgas nos pontos de fixação da estrutura, o que pode afetar a estabilidade do sistema e aumentar o desgaste dos componentes, diminuindo a sua vida útil.
- Interação galvânica entre as ligas de bronze e aço: o contato entre a liga de bronze e a liga de aço no mancal pode desencadear processos de corrosão galvânica, um fenômeno que ocorre quando dois metais de naturezas eletroquímicas diferentes entram em contato na presença de um eletrólito, como a umidade do ambiente. Nesse caso, o aço, sendo o metal menos nobre, tende a se corroer mais rapidamente, enquanto o bronze, mais nobre, atua como cátodo no processo. Esse tipo de corrosão pode comprometer a integridade dos componentes do mancal, prejudicando o funcionamento do mecanismo ao longo do tempo, resultando em desgastes acelerados, folgas indesejadas e, eventualmente, falhas estruturais.

- Resistência mecânica a impactos: Uma das limitações observadas neste trabalho foi a ausência de ensaios dinâmicos para avaliar a resistência da bateria gravitacional a danos causados por impactos. Esses impactos podem ocorrer devido a diversos fatores, como falhas operacionais, movimentos abruptos do lastro, erros de alinhamento durante a montagem ou choques externos no sistema. A realização de análises específicas para impactos seria essencial para prever como a estrutura reage a forças repentinas e de alta intensidade, identificando possíveis pontos críticos que podem comprometer a integridade do sistema. Por exemplo, choques inesperados nas conexões entre os componentes, como nos mancais ou no cadernal, poderiam gerar deformações localizadas ou falhas estruturais.

A simulação desses eventos não foi realizada, uma vez que eles estão fora do escopo deste estudo. Tais ocorrências indesejadas são eventuais e aleatórias e não impactam diretamente as tensões mecânicas principais, exercidas na prototipagem virtual, que determinam o desempenho estrutural imediato. No entanto, apesar de não afetarem diretamente a distribuição de tensões no curto prazo, esses fenômenos podem influenciar significativamente a durabilidade e a integridade da estrutura ao longo do tempo. Sua ocorrência repetida pode contribuir para o surgimento de desgastes acumulativos, levando a falhas precoces e comprometendo a vida útil do sistema.

As peças modeladas no presente trabalho resultaram em objetos sólidos uniformes, cujas propriedades dos materiais foram atribuídas de forma padronizada pelo *software*. No entanto, não foi realizado um aprofundamento nos aspectos relacionados à fabricação dessas peças, como os processos de união por soldagem, tratamentos térmicos, conformações mecânicas e acabamentos realizados por usinagem, em que podem estar presentes em regiões distintas de uma mesma peça. Esses fatores desempenham um papel crucial na resistência mecânica da estrutura, pois podem alterar significativamente as propriedades do material, como resistência à tração, dureza e resistência ao desgaste.

Os resultados obtidos nas simulações realizadas neste trabalho demonstram o comportamento da estrutura da bateria gravitacional sob esforços estáticos. Embora esses resultados forneçam uma base sólida para avaliar a resistência inicial dos componentes, a natureza operacional da bateria gravitacional envolve movimentos rotativos contínuos, além de paradas e inícios frequentes de movimentação de carga. Esse tipo de operação tende a gerar esforços de fadiga em diversos pontos da estrutura, especialmente em regiões de conexão e nas áreas de concentração de tensões.

Os esforços de fadiga também estão diretamente relacionados à vida útil da estrutura, pois a repetição cíclica de tensões ao longo do tempo pode levar ao surgi-

mento de microtrincas e, eventualmente, à falha estrutural. Além disso, esses esforços desempenham um papel crítico na definição de planos de manutenção, ao permitirem prever quando e onde serão necessárias intervenções para preservar a integridade do sistema.

4.2 Desempenho

A prototipagem virtual da bateria, revelou os pontos de contato entre as partes móveis onde ocorrem tensões de atrito contrárias ao movimento, sendo responsáveis por reduzir a eficiência da bateria mediante as perdas de energia por calor e vibração. O atrito nessas regiões também é responsável pelo desgaste físico das peças, influenciando diretamente na vida útil do sistema estrutural. As simulações realizadas no mancal, moitão e cadernal revelaram que os pontos concentradores de tensões estão localizados nas regiões das buchas de deslizamento, agravando o efeito degradante causado pelo atrito nessas peças e as estabelecendo como parâmetro principal para determinar a vida útil da estrutura.

A densidade energética da bateria gravitacional foi calculada através da relação entre a capacidade total de armazenamento de energia e o somatório da massa de todos os elementos prototipados. A capacidade de armazenamento resultante foi maior que a estipulada por REIS (2023), devido ao acréscimo da massa do cadernal e do cabo de aço, que também são deslocados com o lastro. Tal capacidade total de armazenamento (E_t) foi calculada por:

$$E_t = (73.787,00kg + 5.300,14kg + 696,00kg) \times 9,80m/s^2 \times 50m \quad (40)$$

$$E_t = 39.093,74kJ = 10,86kWh \quad (41)$$

Já equação 42 demonstra que a densidade energética D_e é a razão entre E_t e o peso total da estrutura.

$$D_e = \frac{E_t}{91.860,34kg} = \frac{10,86kWh}{91.860,34kg} = 0,118Wh/kg \quad (42)$$

O valor de densidade energética encontrado neste estudo considera apenas a massa das partes estruturais da bateria e do lastro, excluindo a massa adicional do sistema motor. Caso o peso do sistema motor fosse incluído, o valor de densidade energética diminuiria, uma vez que o aumento da massa total reduziria a energia armazenada por unidade de massa. Esse dado é relevante ao avaliar o desempenho e a

viabilidade do sistema, pois uma densidade energética mais baixa pode limitar a competitividade da bateria em comparação com outras tecnologias de armazenamento de energia.

A eficiência do sistema, por sua vez, está diretamente relacionada à quantidade de energia perdida durante as conversões energéticas ao longo do processo de operação. As principais vias de perda incluem o atrito entre os componentes móveis e o ruído gerado durante o funcionamento, ambos os quais consomem energia que, de outra forma, poderia ser armazenada ou utilizada. Contudo, este estudo não abrange uma análise detalhada dessas perdas, tampouco foi calculado um valor de eficiência de ciclo completo, conhecido como *round-trip efficiency*, que representa a relação entre a energia recuperada e a energia total armazenada. Uma investigação futura das perdas por atrito e ruído seria essencial para obter uma estimativa mais precisa da eficiência real do sistema em condições operacionais.

4.3 Aplicações

A bateria gravitacional apresenta um grande potencial de aplicação em diferentes cenários, indo além da integração com sistemas fotovoltaicos. Sua capacidade de armazenar energia de maneira sustentável e sem a necessidade de materiais químicos a torna uma solução a ser considerada em diversas situações, especialmente em locais remotos ou com acesso limitado à rede elétrica convencional.

Em áreas rurais, comunidades ribeirinhas ou ilhas sem conexão com a rede elétrica, a bateria gravitacional pode ser uma alternativa viável para armazenamento de energia. Nessas regiões, a geração de eletricidade pode ocorrer por diferentes fontes renováveis, como pequenas turbinas eólicas, rodas d'água em rios, biodigestores ou até mesmo geradores manuais.

Uma vantagem significativa desse modelo é a flexibilidade na escolha dos materiais para a fabricação do lastro. Em locais onde o aço não está facilmente disponível, pode-se utilizar pedras, concreto moldado in loco, blocos de terra compactada ou até mesmo grandes recipientes preenchidos com areia ou argila. No entanto, o uso de materiais menos densos implica na necessidade de um maior volume para armazenar a mesma quantidade de energia, exigindo adaptações na estrutura da bateria para otimizar sua eficiência.

Por exemplo, um sistema baseado em pesos de pedra poderia ser implementado com ferramentas rudimentares, garantindo acesso à eletricidade para iluminação, bombeamento de água e comunicação sem a necessidade de baterias químicas de alto custo e difícil descarte.

Já em centros urbanos, uma das principais aplicações desse sistema pode ser o seu uso em prédios comerciais e residenciais de grande porte. Durante os períodos de menor demanda por energia, o sistema pode utilizar eletricidade mais barata da rede ou de fontes renováveis, como painéis solares fotovoltaicos instalados no próprio edifício, para elevar pesos maciços a uma altura elevada dentro da estrutura do prédio. Essa energia potencial gravitacional armazenada pode então ser liberada estrategicamente durante o horário comercial, quando o consumo energético é maior, reduzindo picos de demanda e evitando tarifas elevadas de energia elétrica.

5 Conclusão

Este trabalho apresenta avaliações virtuais da resistência mecânica dos componentes estruturais de uma bateria gravitacional idealizada a partir de uma prova de conceito. Além disso, contém o desenvolvimento das peças por meio de modelagens virtuais tridimensionais considerando aspectos referentes a características de projetos mecânicos. O uso de simulações computacionais, aplicando o método de análise por elementos finitos como forma de verificação do desempenho estrutural do sistema, revelou dados quantitativos necessários para a formulação de um parecer técnico no âmbito da engenharia mecânica.

Ao se aplicar conceitos de engenharia mecânica para a formulação do projeto, o estudo desenvolvido deu continuidade ao desenvolvimento do projeto estrutural da bateria gravitacional conceitualizado pelo trabalho de REIS (2023), focando no sistema de sustentação e içamento do lastro. Através dele, foi constatado que para um possível sucesso da estrutura, é necessário um sistema de multiplicação da força exercida para erguer o lastro, descartando a possibilidade de usar exatamente o esquema proposto inicialmente pelo autor.

Neste estudo também foram verificadas afirmações e suposições existentes na prova de conceito que preveem comportamentos da bateria gravitacional durante o funcionamento. A presença de tensões adicionais no cabo, defendida por REIS (2023), se mostrou relativamente irrisória quando contrastada com a carga nominal de tração, a velocidade de movimentação do lastro não é capaz de provocar acelerações ou frenagens abruptas de modo a causar danos significativos a estrutura. Adotar um formato cilíndrico para o lastro é a forma mais eficiente de se acomodar tal objeto dada as condições espaciais do poço para o armazenamento de energia gravitacional, entretanto, para a magnitude da carga abordada nesse trabalho, o projeto do lastro tornou-se factível mediante a sua segmentação em partes menores, o que viabiliza o transporte e o posicionamento dessas peças, além de possibilitar o acréscimo ou decréscimo da capacidade de armazenamento da bateria, transformando essa estrutura adaptável a outros sistemas com demandas energéticas diferentes.

As definições do *software*, executadas pelo usuário, dos parâmetros e configurações para o desempenho das simulações computacionais estão associadas a erros inerentes a operação humana. Os módulos e direções das cargas, assim como as localizações das regiões de restrição dos movimentos, são aproximações dos eventos que tendem a ocorrer no meio real, atrelado a isso, existem limitações inerentes ao ambiente virtual que interferem na qualidade dos resultados, além de que, para a prototipagem ser mais completa e representativa das condições reais de operação,

faz-se necessário realizar simulações que incluam esforços de natureza dinâmica e um detalhamento de processos utilizados para a construção dos sólidos.

Posterior as revisões do modelo virtual, urge a necessidade da prototipagem física da bateria gravitacional de modo a submeter o sistema em um ambiente com mais variáveis e observar cenários não avaliados ou que passaram despercebidos no meio computacional.

A implementação de um protótipo físico está sujeita a etapas que vão além das abordadas teoricamente, como a necessidade de folgas adequadas para a lubrificação nos acoplamentos onde ocorrem movimentações de partes. Além disso, há a possibilidade de integração de componentes essenciais ao sistema motriz da bateria gravitacional, como o motor elétrico, o gerador e a caixa redutora, elementos que não foram contemplados na prototipagem virtual desenvolvida neste estudo e que necessitam de elementos de união, fixação e transmissão de força.

No ambiente real, também se faz necessária a preparação da área de instalação do mecanismo, o que inclui o preparo adequado do solo para suportar as cargas impostas pelo maquinário, bem como a fabricação de uma estrutura específica para a fixação dos mancais. Revisões adicionais podem ser necessárias em relação ao formato e às condições de instalação, incluindo o acesso físico à estrutura, a instalação de dispositivos de segurança contra acidentes e outras medidas de proteção. Essas considerações exigem uma reavaliação dos fatores de segurança adotados durante a modelagem virtual dos elementos da bateria, uma vez que podem impactar diretamente suas características físicas no contexto prático.

A conceitualização proposta por REIS (2023) tem como cerne a aplicação prática da bateria gravitacional em um meio residencial tomado como referência as habitações brasileiras, entretanto, o presente estudo demonstrou que as dimensões e pesos das peças exigem uma logística específica para serem transportados e instalados, o que pode inviabilizar a implementação da estrutura nesses ambientes, tal como em zonas rurais, regiões ribeirinhas e comunidades remotas com difícil acesso à rede elétrica, conforme abordado pelo autor. Assim, como forma de progressão ao estudo desenvolvido neste trabalho, faz-se necessário uma investigação aprofundada no aspecto logístico inerente ao sistema, desenvolvendo técnicas em que estejam associadas aos processos de fabricação que possivelmente também exigirão adaptações nos elementos resultados por este estudo, como segmentações em partes, alterações de tamanhos e acabamentos.

Conclui-se, então, que os resultados obtidos confirmam a viabilidade estrutural do protótipo virtual proposto, atingindo o objetivo de desenvolver uma solução alternativa para o armazenamento de energia. A bateria gravitacional projetada demonstrou capacidade de armazenar 10,86 kWh, com segurança estrutural validada por meio de

simulações computacionais. O desenvolvimento do modelo virtual 3D e as simulações baseadas no método de Análise por Elementos Finitos (FEA) forneceram informações essenciais sobre o comportamento estrutural do sistema, identificando os pontos críticos que demandam maior atenção em relação à resistência mecânica e ao desempenho sob condições reais de operação. Assim, os resultados obtidos nesta etapa constituem um importante avanço no desenvolvimento conceitual da bateria gravitacional.

Entretanto, este estudo não é suficiente para assegurar a viabilidade de produção de protótipos físicos em larga escala. A transposição dos modelos virtuais para exemplares reais requer a realização de estudos adicionais que abranjam uma avaliação mais detalhada de eficiência energética, processos de fabricação, viabilidade logística, custos de implementação e manutenção, além de considerações sobre os impactos ambientais e sociais decorrentes da adoção dessa tecnologia. Esses fatores são cruciais para determinar a aplicabilidade prática da bateria gravitacional, especialmente em contextos residenciais e off-grid, como proposto pelo projeto original.

Ademais, a eficiência do sistema, em termos de conversão e recuperação de energia potencial gravitacional, precisará ser comparada com tecnologias convencionais, como as baterias de lítio, para validar sua competitividade no mercado. A investigação de fatores relacionados à durabilidade dos materiais e ao desgaste das peças durante o uso contínuo também será essencial para garantir a robustez e longevidade da solução proposta.

Portanto, os resultados alcançados neste estudo representam uma importante contribuição para o campo da engenharia mecânica e para o desenvolvimento de tecnologias alternativas de armazenamento de energia. No entanto, para que a bateria gravitacional avance para uma fase de implementação prática, são necessárias pesquisas futuras que contemplem uma série de fatores que envolvem essa tecnologia em contextos de uso real. Assim, será possível determinar com maior precisão o potencial tecnológico para ser adotada em larga escala como uma solução viável e sustentável para o armazenamento de energia dessa forma.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8400-3**: informação e documentação: trabalhos acadêmicos: apresentação. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10980**: informação e documentação: trabalhos acadêmicos: apresentação. Rio de Janeiro, 2022.

BEER, F. P.; JOHNSTON, J. E. R.; DEWOLF, J. T.; MAZUREK, D. F. **Mecânica dos Materiais**. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda., 2011.

BOWOTO, O. K.; EMENUVWE, O. P.; AZADANI, M. N. Gravitricity based on solar and gravity energy storage for residential applications. **International Journal of Energy and Environmental Engineering**, 2021.

CALLISTER, J. W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica: estrutura e propriedades das ligas metálicas**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 1986.

FILHO, C. M. de O. Análise do ciclo de vida de baterias de Íon-Lítio. **Inventions**, 2019.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física - Volume 1**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2009.

HIBBLER, R. C. **Resistência Dos Materiais 5ª Edição**. São Paulo: Pearson Pretince Hall, 2004.

IPH. **Cabos de aço para uso geral**. São Paulo: [s.n.], 2016.

MECALUX. **Paleta PBR: medidas e características**. s.d. Disponível em: <<https://www.mecalux.com.br/manual-de-armazenagem/paletes/paleta-pbr-medidas>>. Acesso em: 03 de novembro de 2024.

MEGAFILM. **Seção de polia de gancho de braço de guindaste industrial de construção industrial**. 2024. Disponível em: <https://br.freepik.com/fotos-premium/secao-de-polia-de-gancho-de-braco-de-guindaste-industrial-de-construcao-industrial_27703363.htm>. Acesso em: 08 de agosto de 2024.

MÜLLER, A. L.; SAFFARO, F. A. A prototipagem virtual para o detalhamento de projetos na construção civil. **Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, 2011.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

REIS, W. D. Prova de conceito em baterias gravitacionais: Uma abordagem para o armazenamento de energia sustentável. **UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**, p. 146, 2023.

RUOSO, A. C.; CAETANO, N. R.; ROCHA, L. A. O. Storage gravitational energy for small scale industrial and residential applications. **Universidade Federal de São Paulo**, 2022.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. **Projeto de Engenharia Mecânica**. [S.l.]: Bookman, 2005.

SILVA, R. D. de Souza e. Novas tecnologias e infraestrutura do setor elétrico brasileiro – armazenamento de energia em baterias. **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - ISSN 1415-4765**, p. 39, 2022.

SYSTEMES, D. **Ajuda do SOLIDWORKS: Gerar malhas**. 2022. Disponível em: https://help.solidworks.com/2022/portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/c_Background_on_Meshing.htm?id=560cf6b4a48f4c348f284b95a89ff278#Pg0. Acesso em: 25 de setembro de 2024.

VAULT, E. **Rudong, China Gravity Energy Storage System**. s.d. Disponível em: <https://www.energyvault.com/projects/cn-rudong>. Acesso em: 03 de novembro de 2024.

Anexos

ANEXO A – Propriedades das malhas de elementos finitos

Figura 36 – Quadro dos parâmetros das malhas geradas nas simulações computacionais.

Parâmetro	Bloco do lastro	Carretel A Versão 1	Carretel A Versão 2	Carretel A Versão 3	Cadernal	Ponte	Carretel B	Mancal
Tipo de malha	Malha sólida	Malha sólida	Malha sólida	Malha sólida	Malha sólida	Malha sólida	Malha sólida	Malha sólida
Pontos Jacobianos para malha de alta qualidade	Nos nós	Nos nós	Nos nós	Nos nós	Nos nós	Nos nós	Nos nós	Nos nós
Tamanho do elemento	40 mm	50 mm	50 mm	60 mm	22 mm	60 mm	60 mm	60 mm
Tolerância	2 mm	2,5 mm	2,5 mm	3 mm	1,1 mm	3 mm	3 mm	3 mm
Total de nós	140.396	94.201	112.264	122.592	635.498	122.592	122.592	122.592
Total de elementos	94.238	53.882	65.660	75.185	422.597	75.185	75.185	75.185
Proporção máxima	4,038	6,7276	6,4242	8,0117	35,308	8,0117	8,0117	8,0117
Porcentagem de elementos com proporção <3	99,90%	99,70%	99,70%	99,50%	97,50%	99,50%	99,50%	99,50%
Porcentagem de elementos com proporção >10	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,42%	0,00%	0,00%	0,00%
% de elementos distorcidos (Jacobiana)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Número de elementos distorcidos	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Autor (2024).

ANEXO B – Propriedades das ligas metálicas

Tabela 3 – Propriedades dos materiais utilizados.

Propriedades	ASTM A36	AISI 1020	AISI 1010	Bronze 90-10
Módulo elástico	200.000 MPa	200.000 MPa	200.000 MPa	115.000 MPa
Coeficiente de Poisson	0,26	0,29	0,29	N/A
Módulo de cisalhamento	79.300 MPa	77.000 MPa	80.000 MPa	44.000 MPa
Massa específica	7.850 kg/m ³	7.900 kg/m ³	7.870 kg/m ³	8.800 kg/m ³
Resistência a tração	400 MPa	420,50 MPa	325 MPa	255 MPa
Limite de escoamento	250 MPa	351,57 MPa	180 MPa	69 MPa

Fonte: Adaptado de SolidWorks (2022).