

ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO
NAVAL DE HÉLICES CONTRA ROTATIVAS

ANALYSIS AND DESIGN OF A NAVAL TRANSMISSION SYSTEM OF COUNTER-
ROTATING PROPELLERS

Hiago Machado Sanglard

Bacharel em Engenharia Mecânica (Universidade Federal do Rio de Janeiro)

Lucas da Silva Lourenço

Graduando em Engenharia Civil (Universidade Federal do Rio de Janeiro)

Thaiene Pereira da Costa

Graduanda em Engenharia de Produção (Universidade Federal do Rio de Janeiro)

Iago Velasco de Oliveira Carvalho

Graduando em Engenharia Mecânica (Universidade Federal do Rio de Janeiro)

Daniela Marques de Andrade

Graduanda em Engenharia Mecânica (Universidade Federal do Rio de Janeiro)

Resumo: O presente trabalho teve por finalidade, dimensionar os elementos de uma transmissão mecânica naval para utilização em um barco elétrico da equipe Fernando Amorim. Foi realizado o dimensionamento das engrenagens, eixos, chavetas e mancais que compõem o sistema de transmissão, além da modelagem em software 3D e simulação para análise de tensões e deslocamentos dos componentes.

Palavras-chave: transmissão naval, hélices contra rotativas, *SolidWorks*.

Abstract: The purpose of this work was to dimension the elements of a marine mechanical transmission for use in an electric boat belonging to the Fernando Amorim team. The dimensioning of the gears, shafts, keys and bearings that make up the transmission system was carried out, in addition to modeling in 3D software and simulation for the analysis of stresses and displacements of the components

Keywords: naval transmission, counter-rotating propellers, SolidWorks.

1 INTRODUÇÃO

Na engenharia a busca por fontes alternativas de energia que possam minimizar os graves problemas advindos de combustíveis fósseis é uma constante. Os sistemas fotovoltaicos surgem como uma das soluções de baixo custo para o problema, pois os painéis solares convertem a luz do sol em eletricidade, reduzindo assim a dependência de combustíveis fósseis. Neste contexto surge O Desafio Solar Brasil (DSB), organizando uma competição de barcos movidos à energia solar visando estimular o desenvolvimento de tecnologias e aplicações das fontes alternativas de energia em embarcações, através do esporte e educação em tecnologia e meio ambiental. A Equipe Fernando Amorim, foi criada em 2014 por estudantes de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro - Campus Macaé, desenvolvendo novos projetos para a embarcação, como sistemas elétricos otimizados, design e fabricação de muitos equipamentos utilizados no barco, como o sistema de transmissão. Uma embarcação, para navegar a uma velocidade desejada, deve vencer a resistência da água. Isso ocorre através da geração de potência, que é convertida em empuxo. Esse processo é feito pelo conjunto propulsor. A transmissão é quem realiza a integração entre o propulsor e a máquina principal. A transmissão atual é composta por um único hélice e um leme, ligado a um tubo que por sua vez está conectado ao sistema de direção. Este único hélice causa um efeito de torque no sistema de direção, que tende a “puxar” a embarcação para o lado oposto ao qual o hélice está girando, tanto num momento de aceleração quanto em velocidade constante, sendo impossível a navegação em linha reta sem a compensação do piloto. Estando o hélice ligado ao eixo horizontal e com velocidade angular, é gerado um momento angular na mesma direção do eixo. Ainda há a atuação da força peso e do torque externo como consequência da rotação do hélice. A resultante dessas forças gera no conjunto o movimento de precessão. Este efeito é anulado através da implementação de hélices contra rotativas pois, estando com a mesma rotação, cada elemento propulsor irá gerar um momento angular de mesmo módulo, porém de sentidos opostos. Este trabalho tem o intuito de colaborar em um projeto de transmissão para a equipe, propondo melhorias ao sistema atual, através de um novo conjunto mecânico de duas hélices contra rotativas, tendo como um dos focos solucionar o problema do efeito de torque através do novo arranjo, anulando o efeito.

2 METODOLOGIA

Este trabalho tem como natureza aplicada, pois tem como seus objetivos dimensionar os componentes do sistema. Pode ser classificada como quantitativa, pois são determinadas as variáveis e feitos os cálculos analisando os dados iniciais, apresentando as conclusões.

Inicialmente foi necessário obter os dados de entrada e parâmetros para que estes pudessem ser inseridos nos cálculos do dimensionamento dos elementos. Para realizar o dimensionamento do sistema de transmissão foi necessário compreender as necessidades do projeto como um todo, para que o sistema atenda da melhor forma a solicitação de cargas sem prejudicar o desempenho dos demais subsistemas. A modelagem do sistema consistiu no projeto alternativo para a transmissão atual bem como uma proposta de solução para os problemas como um todo, tendo seus posicionamentos definidos através da montagem parcial da rabeta do barco.

A confecção dos componentes em 3D foi realizada no software SolidWorks e andou em paralelo com o dimensionamento do sistema, pois para se obter as distâncias reais para o cálculo dos momentos dos eixos e das posições das cargas aplicadas, foi necessário conhecer o real posicionamento de cada item que compõe o sistema.

3 DIMENSIONAMENTO

As imagens da modelagem do sistema encontram-se a seguir. As engrenagens dos eixos 1 e 2 são representadas pelas Figuras 1 e 2, respectivamente.

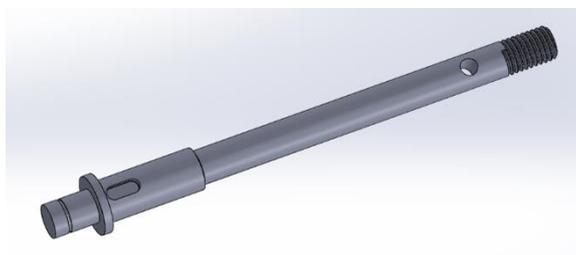
Figuras 1 e 2: Rosca e Elementos de Fixação



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

A modelagem do eixo 1 e todo seu detalhamento de rosca e elementos de fixação

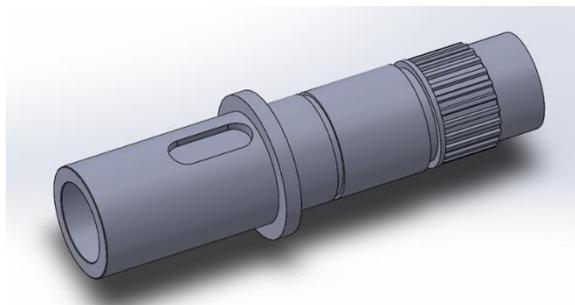
Figura 3: Eixo 1



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

O eixo 2 que além desses elementos, também possui um elemento de vedação e uma estria para fixação do hélice.

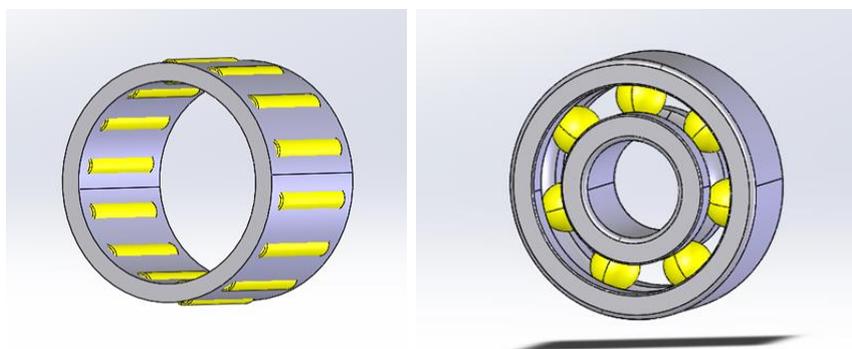
Figura 4: Eixo 2



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Os mancais comerciais de esferas são representados pela Figura 5 e o de rolos de agulhas pela Figura 6.

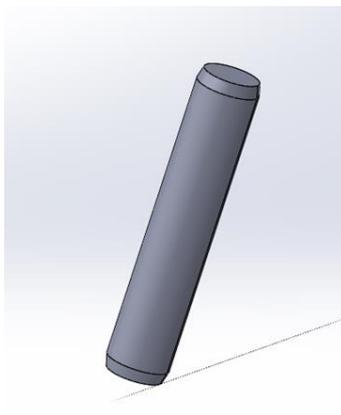
Figuras 5 e 6 Mancais:



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

O pino de fixação que conecta e transfere torque ao hélice através do eixo 1 foi modelado como mostra a Figura 7 a seguir.

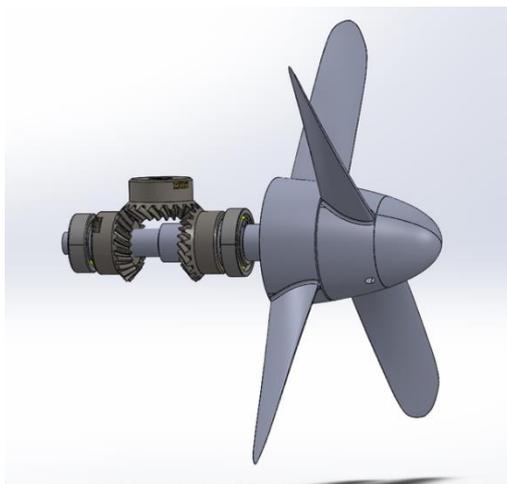
Figura 7: Pino de Fixação



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

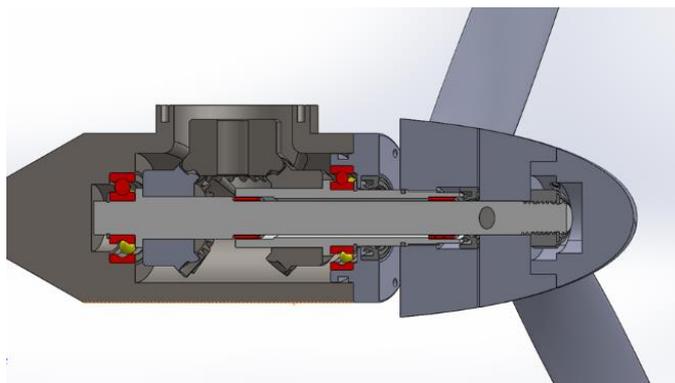
A montagem dos elementos internos e o corte em vista de seção para melhor visualizar todos os componentes conectados são mostrados nas Figuras 8 e 9, respectivamente.

Figura 8: Montagem dos Componentes Internos



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

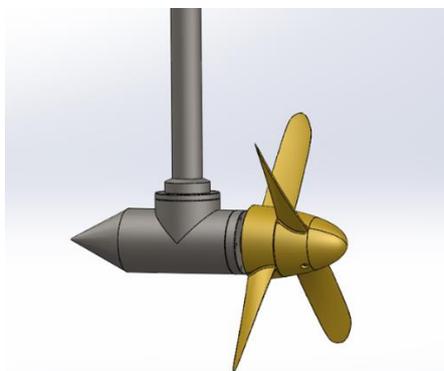
Figura 9: Vista em Corte



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

A montagem final do sistema é mostrada na Figura 10, onde podemos ver também um tubo vertical onde se encontra o eixo que liga o motor a engrenagem.

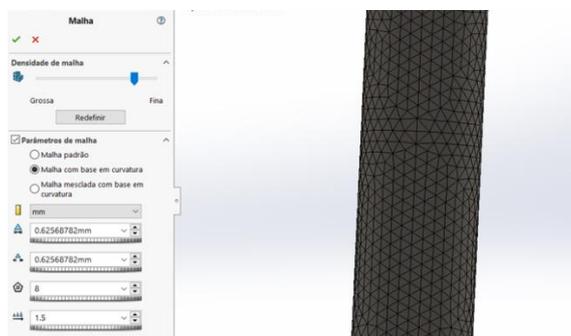
Figura 10: Montagem Final do Sistema



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Para validar os elementos críticos do sistema, utilizou-se o software SolidWorks para realizar a análise estática dos esforços impostos. Foram aplicadas as cargas em que os elementos se encontram expostos, como torque e esforços cisalhantes, e posicionados seus pontos de apoio, mancais para eixos e chavetas para engrenagens. A malha dos modelos 3D foi gerada pelo software através do controle por geometria e curvatura, variando de 38047 nós no eixo 2 e 33039 nós no pino

Figura 11: Análise Estática dos Esforços Impostos - Software SolidWorks

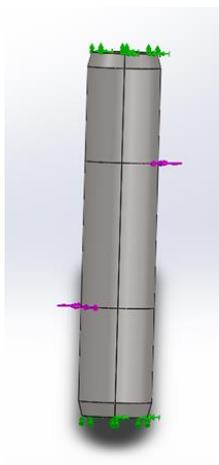


Fonte: Software SolidWorks

Como as engrenagens 1 e 2 são muito similares, diferenciando-se apenas pelo diâmetro do furo e pelo alojamento da chaveta, foi simulada apenas uma das engrenagens pois ambas sofrem os mesmos esforços nos dentes das mesmas. Para realizar a simulação foram verificados os gradientes de tensão verificando assim os deslocamentos e deformação que a ação destas forças pode resultar no corpo da engrenagem.

A Figura 12 mostra as forças aplicadas no pino, as extremidades do mesmo se encontram fixas para simular a pior condição que seria o eixo em rotação e o pino ligado ao hélice parado, e a força agindo na seção.

Figura 12: Forças Aplicadas no Pino



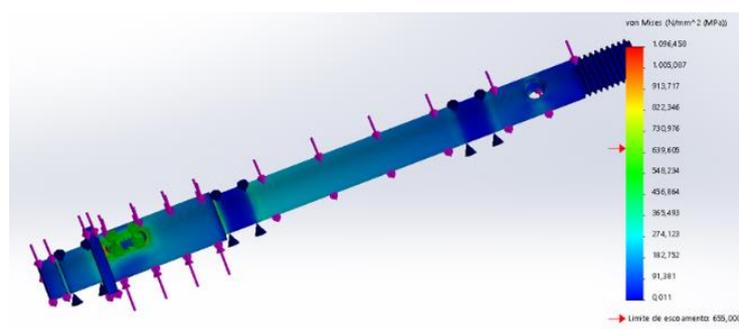
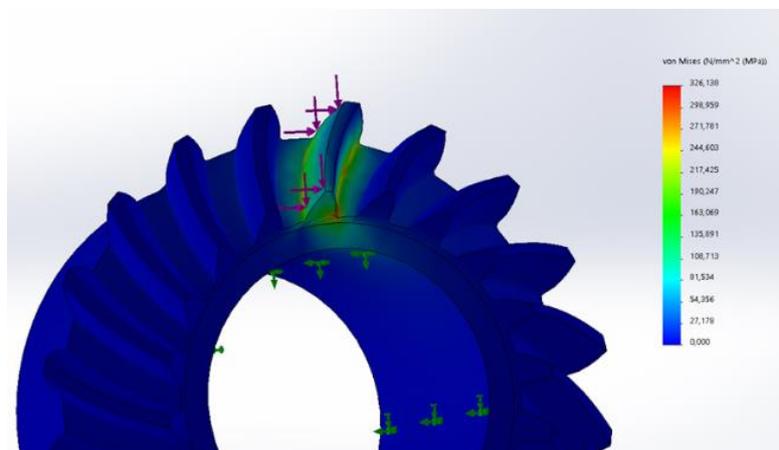
Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

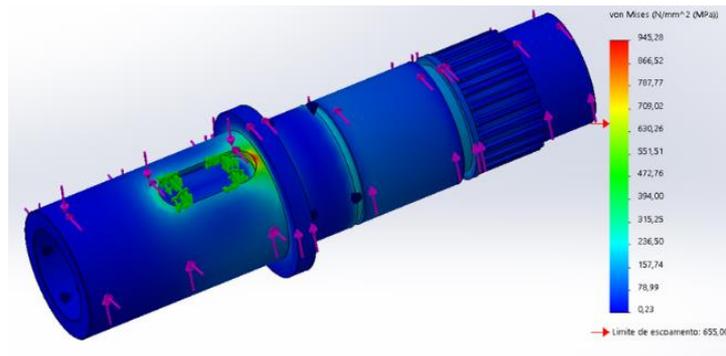
O material utilizado para os pinos foi o aço SAE 1020.

5 RESULTADO DO DIMENSIONAMENTO

Os eixos foram simulados considerando a pior condição possível, desta forma, se considerou estático o rasgo da chaveta que gera a condução de torque e rotação na engrenagem. As Figuras 13 e 14 mostram os gradientes de tensões gerados após a simulação, produzindo uma tensão máxima de 1096 MPa para o eixo 1 e de 945 MPa para o eixo 2.

Figuras 13, 14 e 15: Gradientes de Tensões Gerados Após a Simulação

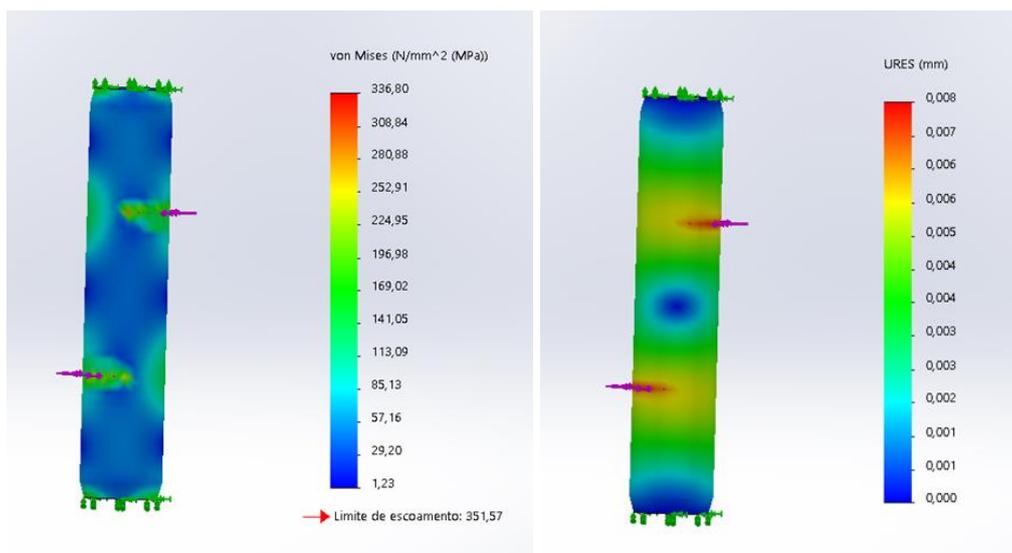




Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

O material utilizado para as engrenagens foi o aço SAE 4340 e para os eixos foi utilizado o aço SAE 4140 .

Figuras 16 e 17: Os Gradientes de Tensões e Deslocamentos

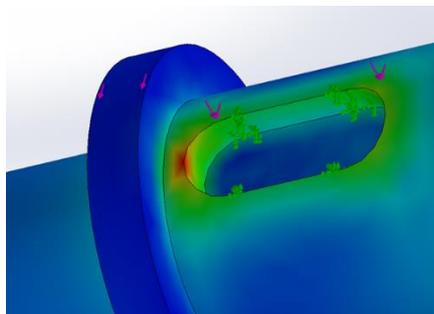


Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Analisando as engrenagens, na parte de alívio entre um dente e outro também ocorreu um acúmulo de tensão, isso devido as forças que tendem a comprimir esta área. O material a qual é fabricada a engrenagem possui 860 MPa de limite de escoamento, o valor da maior tensão encontrada no resultado da simulação é 2,64 vezes menor, não ocasionando falha ao componente. Já analisando o deslocamento do dente, o valor máximo é relativamente baixo para ser considerado como um deslocamento que possa interferir no funcionamento do sistema. Desta forma, é possível considerar que o deslocamento no dente da engrenagem é desprezível. Tanto para o eixo 1 quanto para o 2 a maior tensão está presente no mesmo

ponto, que é o rasgo das chavetas e local de maior momento, além de ser o fim da engrenagem.

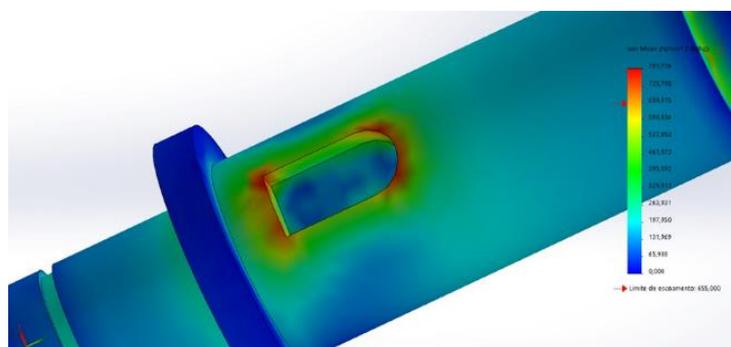
Figura 18: Gradiente de Tensão e Deslocamento da Entrada de Chaveta Eixo 2



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Através de ferramentas de análise do software, é possível obter os valores das tensões em cada nó gerado pela malha, mostrado na Figura 18. Assim, todo o acúmulo de tensões está realmente localizado somente na borda do rasgo da chaveta. O ponto de maior tensão fora da borda apresenta uma tensão de 500 MPa, o que está abaixo do limite de escoamento do material, com valor de 655 MPa. Além disso, a tensão média no eixo apresenta um valor de 179MPa, numericamente muito próximo ao resultado analítico, validando os resultados obtidos anteriormente.

Figura 19: Gradiente de Tensão e Deslocamento da Entrada de Chaveta do Eixo 1



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Analisando os resultados é possível observar que no eixo 1 o maior deslocamento se faz presente no ponto mais distante do mancal de esferas, este estando fixo, onde está localizado o hélice. Foi observado um deslocamento de 0,167 mm que não interfere no funcionamento da transmissão, pois a força gerada pelo propulsor é a causadora deste efeito. Para o eixo 2 o valor do deslocamento máximo foi de 0,034 mm, que ocorre no ponto mais afastado do apoio devido ao efeito de torção no eixo gerado pelo torque. A deformação por flexão é praticamente anulada pois os apoios estão bem próximos das forças fletoras. Pelo fato de o pino estar fixo em suas extremidades, o deslocamento máximo ocorrerá exatamente nos pontos onde as forças estão presentes, pois estas atuam em direções opostas, mas com o mesmo módulo. O valor máximo na região de atuação das forças foi de 0,008 mm, um valor considerado insignificante por representar apenas 0,0013% do diâmetro do pino.

6 CONCLUSÃO:

Foi possível iniciar o dimensionamento dos elementos, buscando atender os esforços impostos ao sistema definindo as dimensões dos componentes através da metodologia desenvolvida no trabalho e seguindo a bibliografia adotada. Após obter os resultados foi possível modelar os elementos, facilitando a visualização do arranjo final de montagem e também para realizar a simulação de elementos finitos. Realizando esta análise, foi possível comprovar que as tensões que agem nos componentes dimensionados não são superiores às tensões suportadas pelos elementos, ou seja, a transmissão é capaz de suportar os esforços impostos pelas cargas internas durante sua operação, bem como de corrigir o efeito de torque presente no sistema de um único hélice. Os resultados provenientes da simulação computacional comprovam a coerência entre os dados calculados e os dados computacionais do modelo.

7 REFERÊNCIAS

BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **Elementos de Máquinas de Shigley: projeto de Engenharia Mecânica**, McGrawHill, Bookman, 8ª ed, 2011

MELCONIAN, S. **Elementos de máquinas**. Erica, 9ª ed, 2009

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. Bookman, 4ª ed. 2013

HIBBELER, Russell. C. **Estática, Mecânica para Engenharia**. Pearson Prentice Hall, 10ª ed. 2005

FRANCESCHI, Alessandro; ANTONELLO, Miguel. **Elementos de Máquinas**. Santa Maria, e-Tec. 2014

NIEMANN, Gustav. **Elementos de Máquina**. Edgard Blücher Ltda, 1ª ed, 1995

AURAS, André Paegle. **Elementos de máquinas 2**. Florianópolis, 2006

Sanglard, Hiago Machado. **Análise e dimensionamento de um sistema de transmissão naval de hélices contra rotativas**. Orientador: Marcelo Costa Cardoso. 2022. 93. TCC (Graduação) – Bacharel em Engenharia Mecânica, Universidade do Rio de Janeiro, Macaé. 2022.