

DIMENSIONAMENTO ESTÁTICO ESTRUTURAL APLICADO A UMA BICICLETA AQUÁTICA

Bruno Ferreira dos Santos, brunoferreiradossantos13@hotmail.com¹

Mateus Turíbio e Silva Moreira, turibioengmec@gmail.com²

Rosemberg Carlos Vicente, rberg.engmec@gmail.com³

Daniel Oliveira de Lima, daniel.lima@ifrj.edu.com¹⁻⁴

¹Laboratório de Metrologia, Instituto Federal do Rio de Janeiro – IFRJ, Rua Sebastião Lacerda, s/nº, centro, Paracambi – RJ, Brasil.

Resumo. A premissa deste trabalho é realizar um dimensionamento estático de um conjunto mecânico, obtendo dados preliminares de projeto, ou seja, um memorial de cálculo que, posteriormente, será utilizado como parâmetro para confeccionar a estrutura de uma bicicleta aquática, composta pelo quadro e pelas travessas de flutuação. Portanto, para que isso seja possível, serão determinadas as solicitações básicas de uso do conjunto, considerando o carregamento estático sobre a estrutura. Além disso, o projeto visa à utilização de materiais comercializados no mercado, sendo utilizado o aço ASTM A500 Grau A. Dessa forma, serão realizados os cálculos e a simulação por meio das propriedades mecânicas dos materiais selecionados.

Palavras chave: Bicicleta, Aquática, dimensionamento, estática.

Abstract. The premise of this work is to perform a static design of a mechanical assembly, obtaining preliminary project data, that is, a calculation report that will later be used as a reference for constructing the structure of a water bike, composed of the frame and the flotation beams. Therefore, to make this possible, the basic operating loads of the assembly will be determined, considering the static loading on the structure. In addition, the project aims to use commercially available materials, with ASTM A500 Grade A steel being selected. Thus, calculations and simulations will be carried out based on the mechanical properties of the selected materials.

Keywords: Bicycle, Aquatic, Sizing, Static.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, uma das formas de se executar atividade física e dispor de um lazer aquático são os barcos movidos a pedal, os pedalinhos. Os barcos movidos a pedal representam uma inovadora forma de propulsão aquática que combina exercício físico com transporte sustentável (ALMEIDA, 2021). Contudo, a bicicleta aquática surgiu como uma evolução natural dos barcos a pedal tradicionais. Incorporando a ergonomia e o design das bicicletas terrestres, as bicicletas aquáticas oferecem uma experiência de pedalar mais natural e eficiente (GARCIA; MARTINS, 2021). Logo, neste trabalho encontram-se os desenvolvimentos de projeto de uma bicicleta aquática.

Ao iniciar o desenvolvimento, foi necessário realizar a aplicação de uma metodologia de projeto, na qual, de acordo com Norton (2013), essas etapas iniciais são responsáveis pela identificação da necessidade, pesquisa de suporte e definição dos objetivos. Desse modo, com os estágios iniciais, devem ser apresentados os primeiros modelos, nos quais, no decorrer do projeto, ocorrem as iterações, visando atingir um modelo que preencha os requisitos. Portanto, no transcorrer deste trabalho, serão apresentadas todas essas premissas.

Com posse dessas prerrogativas, o grupo de pesquisa, orientado pelo docente responsável, iniciou os estudos no Laboratório de Metrologia do IFRJ campus Paracambi, cujo objetivo é desenvolver uma bicicleta aquática movida por transmissão de eixo cardan, além de possuir flutuadores de tubos de PVC.

Em suma, este trabalho discorre sobre os métodos de seleção do material, dos cálculos preliminares, das simulações prévias, das normas para estruturas em aço e dos métodos de segurança para certificar que o produto esteja de acordo com os padrões estabelecidos. Todavia, este trabalho apenas ratifica a importância de fornecer os primeiros parâmetros de iteração de projeto, ou seja, neste primeiro momento, o mais significativo é fazer valer os valores dimensionais pertinentes às normativas estudadas, ficando o emprego dos tópicos acerca dos testes e ensaios normativos para fases posteriores do desenvolvimento do projeto, com o objetivo de validar a segurança de todo o conjunto.

2. METODOLOGIA

Foram modelados os componentes estruturais, sendo eles: o quadro, as colunas de sustentação e as travessas de fixação dos flutuadores. O modelo inicial foi desenvolvido no *software* SOLIDWORKS, da *Dassault Systèmes*, sendo uma ferramenta de CAD (Computer-Aided Design). A Figura 1 ilustra a disposição dos elementos modelados do conjunto estrutural pertinente.

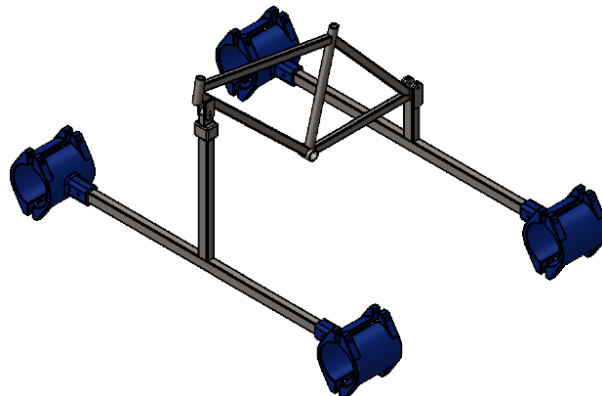


Figura 1. Desenho de conjunto estrutural

O projeto foi desenvolvido com base nas dimensões padrão de uma bicicleta aro 26. Segundo a ABNT NBR 14714 (2013), que estabelece requisitos de segurança para bicicletas, foi adotado o distanciamento mínimo entre o eixo traseiro e o eixo do pé de vela, garantindo uma cota superior a 320 mm, conforme exigido.

Considerando o tipo de bicicleta e sua categoria de uso (voltada a jovens e adultos), também se seguiu a norma ISO 4210-2 (2023), que define requisitos para bicicletas urbanas destinadas a esse público. Assim, a distância máxima do selim foi projetada em conformidade com essa norma, sendo inferior a 635 mm. A Figura 2 apresenta, por meio das cotas, todas as dimensões mencionadas.

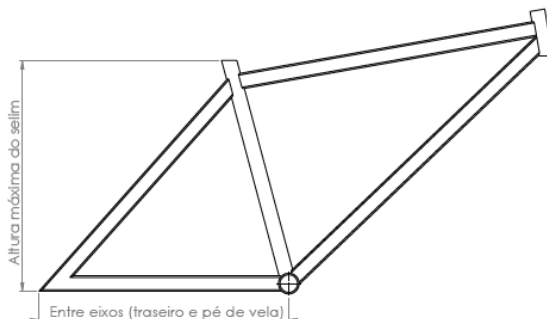


Figura 2. Distanciamentos mínimos

O desenho esquemático do quadro foi elaborado considerando um carregamento centrado no selim. Com base na Tabela 4 da Pesquisa de Orçamentos Familiares (IBGE, 2010, p. 34), adotou-se, para fins de projeto, um carregamento máximo de 75 kg, correspondente à faixa de homens com 171 cm de altura e 74,6 kg de massa.

Este protótipo será fabricado com materiais disponíveis em laboratório, utilizando o aço ASTM A500 Grau A, conforme especificações da norma ASTM A500 (ASTM INTERNATIONAL, 2014), que trata de tubos estruturais de aço-carbono soldados ou sem costura, formados a frio.

Além disso, para garantir que o projeto atenda aos parâmetros estruturais ao utilizar perfis formados a frio, considera-se também a norma ABNT NBR 14762 (2010). Segundo o item 4.1.1, a razão entre o limite de resistência à tração e a tensão de escoamento deve ser $\geq 1,08$, com tensão de escoamento mínima de 250 MPa. De acordo com a Tabela 2 da norma ASTM A500 (2014), os valores atendem a esses critérios, com limite de resistência de 310 MPa e escoamento de 270 MPa.

2.1. Determinação das solicitações

Nesta etapa, o quadro foi modelado para se utilizar das premissas de determinação de treliças, ou seja, todos os elementos estão fixados através de nós, que consistem em elementos retilíneos apenas unidos por suas extremidades

(BEER et al., 2011). Portanto, torna-se necessário determinar o tipo (tração ou compressão) e a magnitude dos esforços. A Figura 3 demonstra o diagrama de corpo livre do quadro.

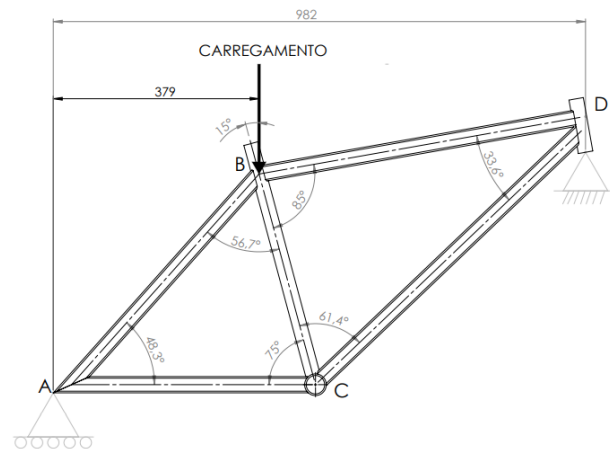


Figura 3. Diagrama de corpo livre considerando o quadro treliçado

Por se tratar de uma treliça simples, com o carregamento centrado em um dos nós, é viável aplicar a análise pelo método dos nós (HIBBELER, 2017). Os pontos de fixação foram projetados conforme os elementos mecânicos que atuarão nesses locais: no ponto A, o quadro será fixado por pinos, justificando o apoio do primeiro gênero; já em D, a fixação ocorrerá por juntas aparafusadas, caracterizando o apoio do segundo gênero. Dessa forma, foi possível determinar as reações de apoio e os esforços nos elementos, com base nos fundamentos da estática (somatório dos momentos, das forças verticais e das forças horizontais) respectivamente conforme as fórmulas a seguir:

$$\sum M = 0 \quad (1)$$

$$\sum F_y = 0 \quad (2)$$

$$\sum F_x = 0 \quad (3)$$

Portanto, com a aplicação dessas fórmulas, determinam-se os esforços atuantes nos elementos. Cabe ressaltar que o segmento formado entre dois nós foi definido como elemento deste segmento, por exemplo: o segmento AB representa-se como FAB. A Tabela 1 correlaciona os segmentos com seus respectivos esforços, além de informar o tipo de solicitação. Além disso, disponibiliza as informações de comprimento linear e de massa, segundo o catálogo técnico dos Tubos Oliveira (2025), perfis laminados a frio em aço ASTM A500.

Tabela 1. Valores resultantes do carregamento

Elemento	Esforço [N]	Tipo de solicitação	Comprimento [mm]	Massa [kg]
FAB	605,10	Compressão	520	0,470
FAC	402,53	Tração	450	0,407
FBC	316,95	Compressão	401,9	0,838
FCD	443,94	Tração	667,8	0,604
FBD	127,78	Compressão	591	0,534

Evidentemente, esses cálculos foram realizados considerando a massa do ocupante, que é de 75 kg, e a aceleração gravitacional com base no Sistema Internacional (SI). Dito isso, esse é o carregamento considerado na análise.

Com posse de todos os elementos do quadro, torna-se importante realizar as determinações pertinentes nos apoios, considerando o carregamento e o peso da estrutura. Ou seja, necessita-se determinar o centróide do quadro, que, por hipótese, modela-se considerando as peças homogêneas, sendo a análise bidimensional (BEER et al., 2011). Portanto, houve uma simplificação do modelo do quadro, sendo demonstrado o diagrama de corpo livre na Fig. 4, onde são indicadas as coordenadas de cada vértice dos triângulos utilizados na decomposição da estrutura.

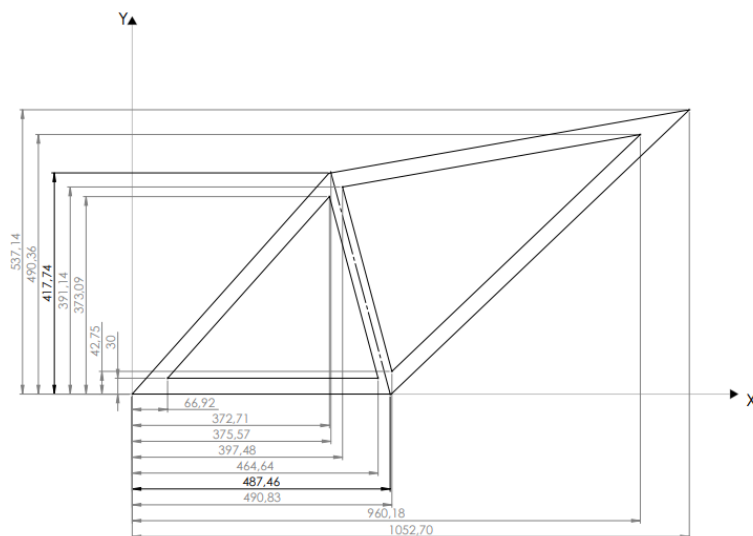


Figura 4. Determinação do centroide

Aplicando o conceito de placas compostas, considera-se que triângulos vazios representam subtrações nos momentos de primeira ordem, enquanto os com volume contribuem positivamente. Com base nos centros (X e Y) e nas áreas (A), determinam-se os triângulos utilizados na decomposição do quadro. Nesta análise, a ordem crescente é definida da seguinte forma: à esquerda, o menor (vazado) é o primeiro, seguido pelo segundo, externo; à direita, o menor (vazado) é o terceiro e o externo, o quarto. A Tabela 2 apresenta os valores utilizados no cálculo do centróide.

Tabela 2. Componentes de área

Componente	A, [mm ²]	X, [mm]	Y, [mm]	XA, [mm ³]	YA, [mm ³]
Primeiro	-6,85x10 ⁴	301,42	144,36	-2,07x10 ⁷	-9,90x10 ⁶
Segundo	1,02x10 ⁵	287,68	139,25	2,93x10 ⁷	1,42x10 ⁷
Terceiro	-1,03x10 ⁵	616,16	308,08	-6,35x10 ⁷	-3,18x10 ⁷
Quarto	1,48x10 ⁵	638,58	318,29	9,48x10 ⁷	4,73x10 ⁷

Por fim, por meio desses dados e utilizando as equações seguintes, de momentos de primeira ordem, consegue-se determinar a localização do centróide do quadro. Sendo $\bar{X}$ e $\bar{Y}$ as coordenadas do centróide.

$$\bar{X} = \frac{\sum \bar{X}A}{\sum A} \quad (4)$$

$$\bar{Y} = \frac{\sum \bar{Y}A}{\sum A} \quad (5)$$

Conforme as formulações anteriores, o peso do quadro está localizado, respectivamente, a 507,67 mm e 251,54 mm. Isso permite calcular as reações geradas pelo carregamento combinado com o peso dos elementos do conjunto. Aplicando-se as equações da estática e o somatório das massas Tab. 1, obtêm-se as reações nos apoios A e D: 465,31 N e 298,43 N, respectivamente. Esses valores são fundamentais para a verificação das tensões nas colunas de sustentação, que influenciam diretamente no dimensionamento das travessas de fixação. A Figura 5 apresenta os diagramas de corpo livre correspondentes.

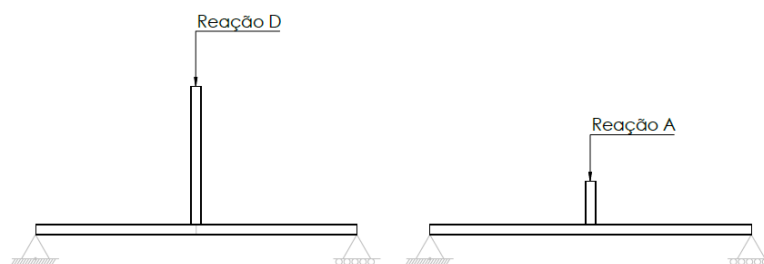


Figura 5. Diagrama de corpo livre das colunas e travessas

2.2. Determinação das tensões de projeto

Com os esforços determinados, é possível definir as dimensões mínimas dos componentes estruturais com base nas propriedades mecânicas do material, aplicando os princípios da mecânica dos sólidos. Assim, os elementos foram dimensionados considerando o limite elástico do material, mantendo o projeto na região elástica (CALLISTER; RETHWISCH, 2016), utilizando a tensão de escoamento como referência para as seções transversais.

Além disso, foi adotado um fator de segurança para prever possíveis variações ou imprevistos que possam comprometer o conjunto. Conforme Norton (2013), a seleção adequada desse coeficiente deve ser baseada em normas, legislações e dados anteriores que orientem a estimativa da probabilidade de falha.

Neste trabalho, seguem-se os critérios da norma AISC 360-16 (2016), que, por meio do método das tensões admissíveis, define coeficientes de segurança iguais a 1,67 para tração axial, compressão axial e flexão. As formulações a seguir apresentam os critérios aplicados a todos os elementos do conjunto. Onde, σ_{adm} (tensão admissível), σ_{esc} (tensão de escoamento do material), A (área do material) e F (força aplicada).

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{esc}}{C.S} \Rightarrow \sigma_{adm} = \frac{270MPa}{1,67} \cong 161,68MPa \quad (6)$$

$$A = \frac{F}{\sigma_{adm}} \quad (7)$$

Em complemento, verificou-se que, com a utilização do critério de falha estática, ou seja, com a teoria da energia de distorção para materiais dúcteis (SHIGLEY et al., 2005), a tensão de falha é igual à tensão normal proveniente de um ensaio de tração, onde σ_A e σ_B são as tensões principais atuantes e σ' é a tensão equivalente de Mises. Ou seja, por dispor de um estado plano de tensão e também por possuir um estado uniaxial de tensão, a formulação a seguir se traduz da seguinte maneira:

$$\sigma' = (\sigma_A^2 - \sigma_A \cdot \sigma_B + \sigma_B^2)^{\frac{1}{2}} = \sigma_{adm} \Rightarrow \sigma_{adm} = (\sigma_A^2)^{\frac{1}{2}} \Rightarrow \sigma_{adm} = \sigma_A \quad (8)$$

Além das formulações para os esforços normais e as áreas das seções, a próxima fórmula denota o critério de seleção através da flexão pura de vigas (BEER et al., 2010). Logo, define-se um módulo de resistência (W) que atenda à solicitação de flexão. Ratifica-se que, para se utilizar os cálculos de flexão, é necessário determinar o momento fletor máximo (M) ao qual a viga está submetida. As fórmulas a seguir abrangem esses termos. Sendo L (comprimento da viga).

$$M = \frac{F.L}{4} \quad (9)$$

$$W = \frac{M}{\sigma_{adm}} \quad (10)$$

A Tabela 3 apresenta as seções mínimas exigidas pertinentes aos esforços normais, com os critérios utilizados.

Tabela 3. Seções mínimas exigidas no dimensionamento dos elementos

Elemento	FAB	FAC	FBC	FCD	FBD	Coluna Frontal	Coluna Posterior
Área [mm ²]	3,74	2,49	1,96	2,75	0,79	1,85	2,88

Em complemento, a Tab. 4 apresenta os módulos de resistência mínimos exigidos.

Tabela 4. Módulos de resistências das travessas

Travessa	Frontal	Posterior
Módulo de resistência [mm ³]	553,74	863,39

2.3. Verificação dos materiais disponíveis

Portanto, após os dimensionamentos mínimos, e considerando o uso de perfis já comercializados e disponíveis no laboratório, foi necessária a consulta a catálogos técnicos para assegurar que as dimensões atendam aos critérios estabelecidos. Foram utilizados dois catálogos: o da Tubos Oliveira (2025), para obter as áreas dos elementos solicitados por esforços normais; e o da ALLITUBOS (2024), para definir os módulos de resistência à flexão. A Tabela 5 apresenta os valores das tensões normais, enquanto a Tabela 6 reúne os parâmetros referentes à flexão.

Tabela 5. Área das seções transversais dos perfis (Tubos Oliveira, 2025)

Perfil	30x20x1,2	40x30x1,2	28,60x3,35
Área [mm ²]	114,20	162,20	265,74

Tabela 6. Módulo de resistência para as travessas (ALLITUBOS, 2024)

Perfil	Módulo de resistência (W_{x-x}) [mm ³]
40x30x1,2	1887,00

Logo, conclui-se que os perfis disponíveis atendem às solicitações prévias de projeto, devido a possuírem seções maiores do que as determinadas.

3. RESULTADOS

Nesta fase do trabalho, utiliza-se o critério de falha para carregamento estático aplicado a materiais dúcteis, visto que, por se dimensionar todo o conjunto utilizando o aço ASTM A500 — que, evidentemente, é um material dúctil (CALLISTER; RETHWISCH, 2016) —, pode-se aplicar uma das teorias de falhas pertinentes a essa solicitação.

Em decorrência disso, aplica-se a teoria da energia de distorção, ou seja, a teoria de Von Mises (SHIGLEY et al., 2005). Com isso, visando aplicar essa análise, e considerando que a execução manual desses cálculos torna-se exaustiva e improdutiva, recorre-se a programas que utilizam o Método dos Elementos Finitos (MEF), capazes de realizar as simulações das solicitações de projeto.

Foram, portanto, desenvolvidas simulações estáticas lineares com base no critério de Von Mises (FILHO, 2018). A seguir, serão apresentadas as validações dos resultados simulados por MEF, através do software SOLIDWORKS SIMULATION.

3.1. Simulação do quadro

Com base na simulação do quadro, as tensões máximas concentram-se nos pontos de contato, onde foram aplicadas as condições de contorno para a análise conforme a Fig. 6. Além disso, utilizou-se o tipo de contato global para representar as ligações soldadas. Como resultado, essas regiões não comprometem a integridade da estrutura, uma vez que as tensões observadas não ultrapassaram o limite do material.

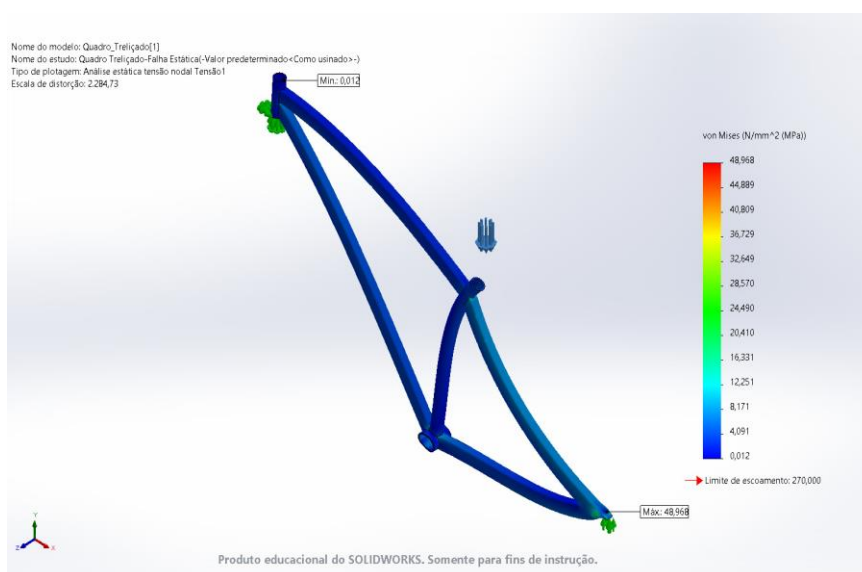


Figura 6. Tensões máximas e mínimas utilizando critério de Von Mises, quadro

3.2. Simulação da coluna e travessa frontal

De forma análoga à primeira simulação, os parâmetros de contorno e de contato foram configurados da mesma maneira, além da utilização de parâmetros analíticos para determinar a carga resultante na parte frontal do conjunto. Portanto, observa-se que o ponto de máxima tensão não ultrapassou o limite do material. A Figura 7 mostra o resultado.

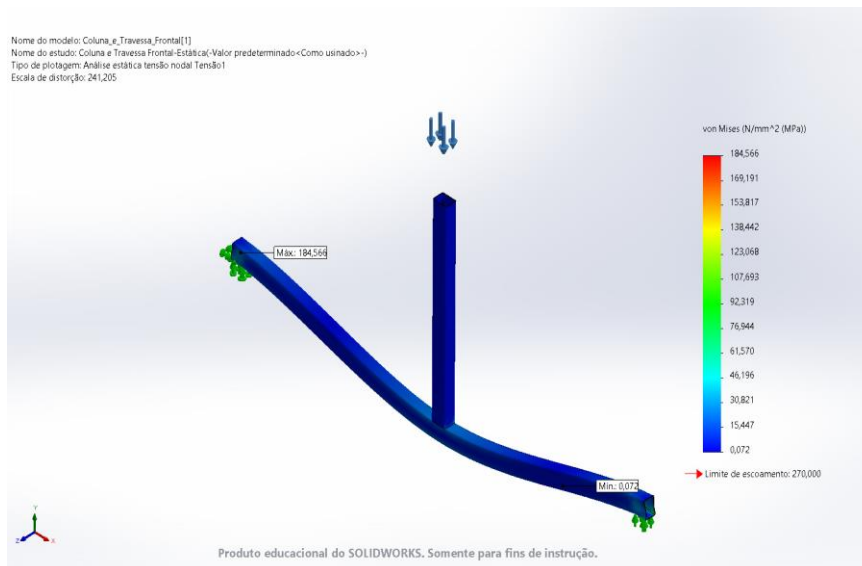


Figura 7. Tensões máximas e mínimas utilizando critério de Von Mises, coluna e travessa frontal

3.3. Simulação da coluna e travessa posterior

Nesta última simulação, as premissas utilizadas foram as mesmas das anteriores. Com base nas análises analíticas propostas, verificou-se a magnitude do carregamento na parte posterior do conjunto, onde a região de máxima tensão não ultrapassou o limite do material, conforme demonstrado na Fig. 8.

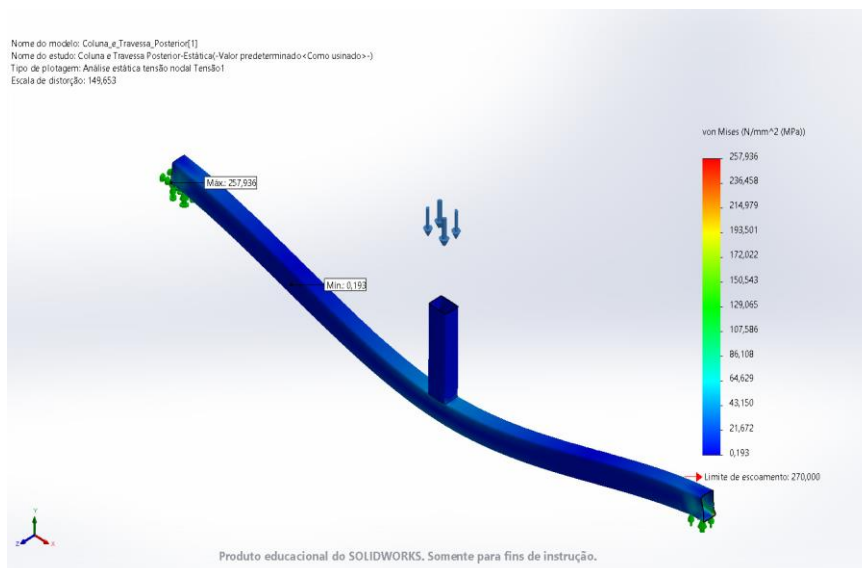


Figura 8. Tensões máximas e mínimas utilizando critério de Von Mises, coluna e travessa posterior

4. CONCLUSÃO

Este trabalho forneceu parâmetros iniciais de projeto, baseando-se em análises analíticas para a obtenção de dados de entrada destinados às simulações numéricas. Com isso, foi possível verificar se o conjunto projetado atende às solicitações impostas, concluindo-se que:

- Os resultados obtidos para a parametrização foram satisfatórios;
- Com a utilização dos artifícios da simulação, foram validados os componentes escolhidos através das análises teóricas aplicadas no decorrer do trabalho;
- As tensões atuantes estão abaixo da tensão de escoamento do material, sendo comprovado pela simulação;
- As geometrias estão em concordância com o exigido.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro fornecido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Agradecimentos ao IFRJ campus Paracambi por fornecer todo o aporte necessário na realização deste trabalho.

Os amigos, Mateus Turíbio Silva e Moreira, Rosemberg Carlos Vicente, meus sinceros agradecimentos pelas contribuições na execução deste trabalho.

Ao estimado docente, Daniel Oliveira de Lima, muito obrigado pelas orientações e ensinamentos.

6. REFERÊNCIAS

ALLITUBOS TUBOS DE AÇO. *Catálogo de perfis*. Recebido por e-mail em: 11 de dezembro de 2024.

ALMEIDA, Roberto. *O Uso de Tubos de PVC na Construção de Estruturas Flutuantes*. Journal of Marine Technology, v.15, n. 3, p. 87-95, 2021.

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. *ANSI/AISC 360-16: Specification for structural steel buildings*. Chicago: AISC, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14714:2013 – Bicicletas — Requisitos de segurança para bicicletas*. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14762:2010 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio – Procedimento*. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASTM INTERNATIONAL. *ASTM A500/A500M-14: Standard Specification for Cold-Formed Welded and Seamless Carbon Steel Structural Tubing in Rounds and Shapes*. West Conshohocken: ASTM International, 2014.

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R.; DEWOLF, J. T.; MAZUREK, D. F. *Mecânica dos Materiais*. 5ª edição. Porto Alegre: AMGH, 2010.

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R.; MAZUREK, D. F. *Mecânica Vetorial para Engenheiros: Estática*. 9ª edição. Porto Alegre: AMGH, 2011.

CALLISTER, W. D., RETHWISCH, D. G. *Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução*. 9ª edição, Rio de Janeiro: Editora LTC, 2016.

FILHO, A. A. *Elementos Finitos – A Base da Tecnologia CAE*. 6ª edição. São Paulo: Érica, 2018.

GARCIA, João; MARTINS, Luana. *Inovação em Sistemas de Propulsão: A Aplicação de Eixos Cardan em Projetos Náuticos*. Revista de Inovação em Engenharia, v. 25, n. 1, p. 75-89, 2021.

HIBBELER, R. C. *Estática: mecânica para engenheiros*. 14ª edição. São Paulo: Pearson Universidades, 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Pesquisa de orçamentos familiares 2008-2009: antropometria e estado nutricional de crianças, adolescentes e adultos no Brasil*. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 4210-2:2023 – Cycles — Safety requirements for bicycles — Part 2: Requirements for city and trekking, young adult, mountain and racing bicycles*. Geneva: ISO, 2023.

NORTON, R. L. *Projeto de máquinas: uma abordagem integrada*. 4ª edição. Porto Alegre: Bookman, 2013.

SHIGLEY, Joseph E.; MISCHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard G. *Projeto de engenharia mecânica*. 7ª edição. Porto Alegre: Bookman, 2005.

TUBOS OLIVEIRA. *Catálogo de produtos*. Recebido por e-mail em: 25 de março de 2025.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.