

ANÁLISE DINÂMICA APLICADA À ESTRUTURA DE UMA BICICLETA DE USO AQUÁTICO

Rosemberg Carlos Vicente, rberg.engmec@gmail.com¹

Bruno Ferreira dos Santos, brunoferreiradossantos13@hotmail.com²

Mateus Turíbio e Silva Moreira, turibioengmec@gmail.com³

Daniel Oliveira de Lima, daniel.lima@ifrj.edu.br¹⁻⁴

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 uma simulação dinâmica para análise de fadiga para um quadro de bicicleta de uso aquático e sua base de apoio, objetivando averiguar se as condições de projeto foram atendidas. Além disso, o projeto irá utilizar materiais comercializados no mercado, sendo o aço ASTM A500 o escolhido para parte estrutural. Para as simulações dinâmicas será usado o software Solidworks 2025 Student Edition.

Palavras-chave: dinâmica, fadiga, confiabilidade.

Abstract. The premise of this work is to perform a dynamic simulation for fatigue analysis of a water bicycle frame and its support base, aiming to verify whether the design conditions were met. In addition, the project will use commercially available materials, with ASTM A500 steel being chosen for the structural part. For the dynamic simulations, the Solidworks 2025 Student Edition software will be used.

Keywords: dynamics, fatigue, reliability.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Callister (2002), 'Fadiga' refere-se à falha que ocorre após longos períodos de tensões repetitivas ou ciclos de deformação ao longo do tempo. A fadiga é a maior causa de falhas em metais, representando cerca de 90% dos casos de falhas em componentes mecânicos.

A fadiga é o processo de alteração estrutural progressivo, localizado e permanente que ocorre em um material em condições que produzem variações de tensões e de deformações em um ou mais pontos do material e que podem culminar em trincas ou fratura completa após um número suficiente de ciclos de carregamento (Fonseca, 2003).

Portanto, a fadiga mecânica nada mais é do que a ruptura de componentes sob uma carga bem inferior à carga máxima suportada pelo material, devido a solicitações cíclicas repetitivas.

O uso de softwares na simulação, por exemplo, o SolidWorks ou Ansys, seja no caso estático ou dinâmico, são ferramentas poderosas para averiguar se as condições de projeto foram atendidas ou não, sem a necessidade de construção de um protótipo, evidentemente reduzindo os custos e o tempo. No presente estudo será usada a abordagem adotada por (Silva et al., 2016), que, além dos cálculos de análise de fadiga, faz uso do software Ansys para análise dinâmica, para verificar o atendimento ou não à solicitação de carga de projeto para fadiga. Entretanto, neste projeto, fez-se o uso do SolidWorks Simulation.

A Figura 1, idealizada no fluxo para análise do ensaio de fadiga, demanda as seguintes informações: geometria do componente, carregamento aplicado e propriedades do material. Evidentemente, com uma metodologia adequada, obtém-se a vida ou a durabilidade do componente. O objetivo do presente estudo é contribuir de forma mais realista usando a ferramenta de simulação dinâmica o estudo feito na análise estática, são apresentados os cálculos da teoria de falha por fadiga para complementar as análises gráficas do presente estudo. A seguir é apresentado todo o desenvolvimento necessário para subsidiar as conclusões no final do presente estudo.

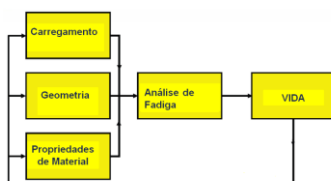


Figura 1. Fluxo para análise de fadiga elaborado pelo autor

2. METODOLOGIA

Primeiramente, foi realizada uma pesquisa na internet de modelos que pudessem nortear o design para a proposta de projeto da bicicleta aquática. Uma condição importante foi que os materiais utilizados fossem de fácil comercialização e que pudessem ser utilizados nos laboratórios para a confecção do protótipo no IFRJ/Paracambi. Após reunião com o grupo de pesquisa, um conceito foi apresentado, e um segundo passo foi o desenvolvimento do modelo da Fig. (2), usando uma ferramenta CAD (Computer Aided Design). O software utilizado foi o SOLIDWORKS, da Dassault Systèmes.

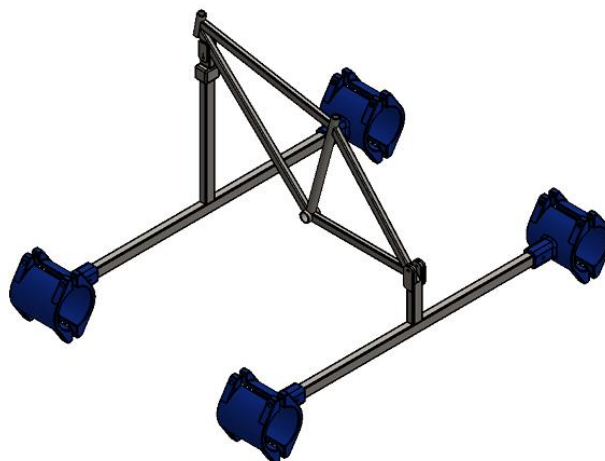


Figura 2. Desenho do conjunto estrutural

A escolha do material para o quadro treliçado, coluna e travessa frontal, coluna e travessa posterior foi pautada seguindo as propriedades conforme especificações da norma ASTM A 500 (ASTM INTERNATIONAL, 2014), que versa sobre tubos estruturais de aço-carbono soldados ou sem costura, formados a frio.

Foi definida a magnitude da carga solicitada com base na Pesquisa de Orçamentos Familiares (IBGE, 2010, p.3), que define a altura e o peso médios da população brasileira, sendo a altura média de 171 cm e o peso médio de 74,6 kg. Para fins de projeto, será adotado o peso de 75 kg como carregamento. Como base no limite de resistência à tração de 310 MPa e tensão de escoamento de 270 MPa do aço ASTM A500 de Grau A, foi utilizado um fator de segurança de 1,67, conforme a norma Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-16).

Com base nestes dados e no quadro de desenho da Fig. (3), foram realizados os cálculos das reações de apoio, o dimensionamento dos elementos estruturais, as tensões principais e a tensão de von Mises, além da posterior simulação via MEF. Uma complementação da análise estática é a simulação dinâmica para análise de fadiga, objetivando prever como um componente ou estrutura se comportará sob cargas cíclicas ao longo do tempo. Este tipo de análise é recomendado em projetos que envolvam esforços repetitivos, possibilitando reduzir custos de prototipagem, melhorar a segurança do produto e otimizar materiais.

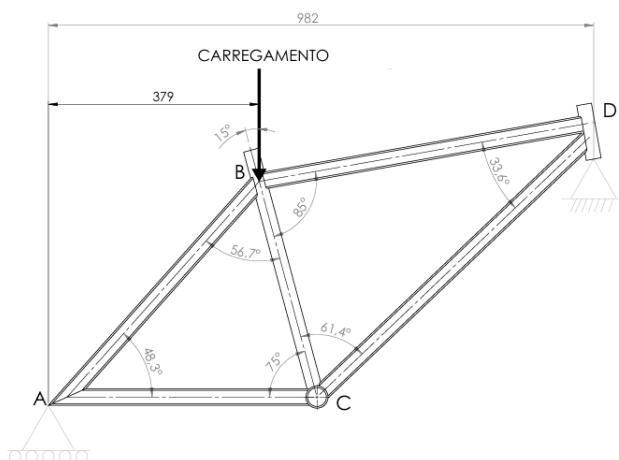


Figura 3. Quadro desenho elaborado pelos autores com identificação dos elementos

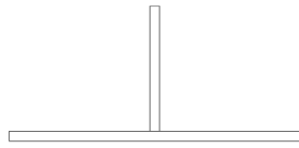


Figura 4. Coluna e Travessa Frontal desenho elaborado pelos autores



Figura 5. Coluna e Travessa Posterior desenho elaborado pelos autores

Cargas variáveis no tempo são mais a regra do que a exceção em qualquer máquina. Projetar para evitar falhas sob essas condições é mais desafiador do que projetar para cargas estáticas. Hoje, temos uma melhor compreensão do mecanismo de falha por fadiga e, evidentemente, os estudos não esgotaram todo o assunto, ou seja, ainda se pesquisam seus vários detalhes.

Temos dois regimes de carregamento a saber: fadiga de baixo ciclo (FBC), cujo número total de oscilações de tensão durante a vida da peça é menor do que 1.000 ciclos; e fadiga de alto ciclo (FAC), que considera um número de ciclos na ordem de milhões ou mais.

2.1. Análise dinâmica

A seguir, serão apresentadas regras práticas e aproximações utilizadas para estimar resistências de materiais sob condições de carregamento dinâmico, principalmente no caso de fadiga de alto ciclo. Ressalta-se que o material utilizado no projeto é o aço ASTM A500, em condição ambiente. Para outras situações e materiais, consultar (Norton, 2013) e (Shigley, 2004).

Para tanto, foram calculados:

- O limite de fadiga estimado, que depende da resistência à tração do material Eq. (1);
- O limite de fadiga corrigido, que considera os fatores de carregamento, tamanho, superfície, temperatura e confiabilidade Eq. (2), conforme (Norton, 2013), (Shigley, 2004) e (Almeida, 2024);
- A resistência do material a 10^3 ciclos Eq. (3);
- Os coeficientes da reta que passa por S_m e S_e Eq. (3) e Eq. (2);
- O limite de resistência para N ciclos Eq. (7).

O número de ciclos durante a vida útil do projeto será de 5 por dia, ao longo de 5 anos, totalizando 9.000 ciclos. Será utilizado o critério de alto ciclo (acima de 10^3 ciclos).

$$S_{e'} = 0,5 \times S_{ut} \quad (1)$$

$$S_e = C_{carreg} \times C_{tamanho} \times C_{superf} \times C_{temp} \times C_{conf} \times S_{e'} \quad (2)$$

$$S_m = 0,75 S_{ut} \text{ (Normais) ou } S_m = 0,9 \times S_{ut} \text{ (Flexão)} \quad (3)$$

$$b = \frac{1}{(\log_{10} N_1 - \log_{10} N_2)} \times \log_{10} \frac{S_m}{S_e} \quad (4)$$

$$\log(a) = \log(S_m) - 3b \quad (6)$$

$$S(N) = aN^b \quad (7)$$

Os resultados destes cálculos encontram-se na Tab. (1), Tab. (2) e Tab. (3). Ressalta-se que o perfil utilizado foi o Metalon (30x20x1,2), o mesmo para todos os elementos para coluna e travessa foi o Metalon de perfil (40x30x1,2) e por último o perfil tubular de $d_{ext} = 28,6$ mm com espessura de 3,35 mm.

Tabela 1. Resultados dos cálculos para os elementos AB, AC, BD, CD Perfil Retangular (30x20x1,2)

$S_{e'}$	155,0 MPa
S_e	89,61 MPa
S_m	232,5 MPa (Normal)
b	-0,1380
a	602,56
$S(N)$	171,79 MPa

Tabela 2. Travessa e coluna Perfil Retangular (40x30x1,2)

Travessa (Flexão)		Coluna (Normal)	
$S_{e'}$	155 MPa	$S_{e'}$	155 MPa
S_e	88,02 MPa	S_e	88,02 MPa
S_m	279,0 MPa	S_m	232,5 MPa
b	-0,167	b	-0,1406
a	883,08	a	613,76
$S(N)$	193,04 MPa	$S(N)$	173,4 MPa

Tabela 3. Resultados dos cálculos para o elemento BC Perfil Tubular (28,6x3,35)

$S_{e'}$	155,0 MPa
S_e	86,025 MPa
S_m	232,5 MPa (Normal)
b	-0,1436
a	626,90
$S(N)$	169,58 MPa

Com os dados da simulação estática, podemos iniciar a análise dinâmica, utilizando as informações de saída como entrada de dados para a simulação dinâmica. Ressalta-se que consideramos o caso do carregamento com amplitude constante para resistência à fadiga, utilizando o critério de Goodman, seguido do resultado do conjunto de fatores de redução da resistência (carregamento, tamanho, superfície, temperatura e confiabilidade) e, por último, o número de ciclos, que foi de 9.000.

Com os dados de entrada no software, pode-se rodar a simulação do quadro treliçado, coluna e travessa frontal e posterior. Os resultados da simulação podem ser vistos nas Fig. (6) a Fig. (11) a seguir.

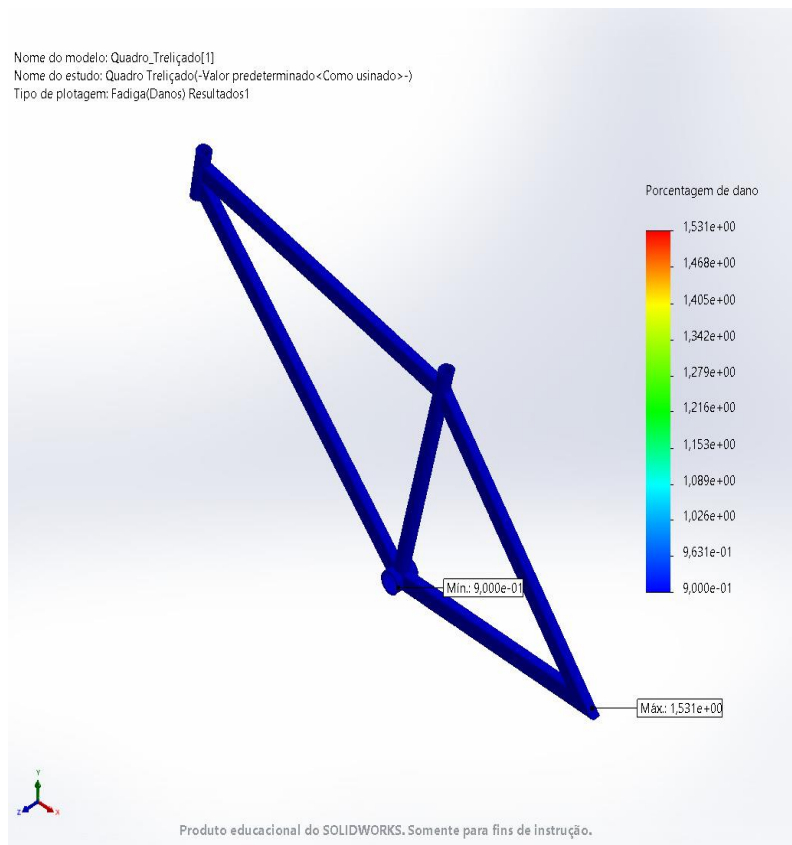


Figura 6. Análise de fadiga porcentagem ao dano do quadro treliçado

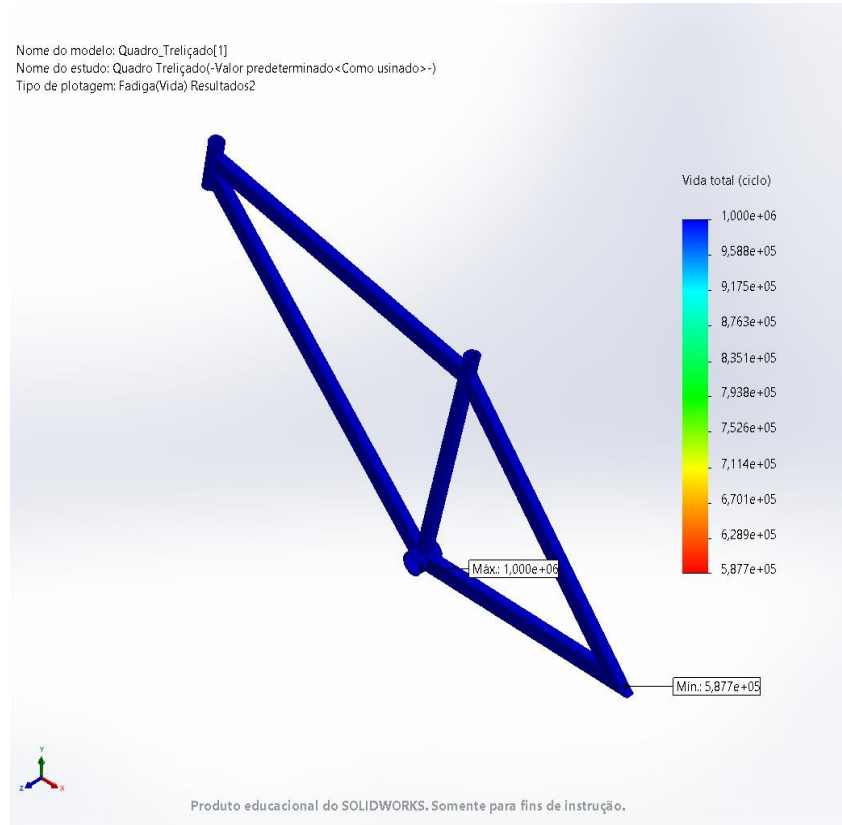


Figura 7. Análise de fadiga vida total do quadro treliçado

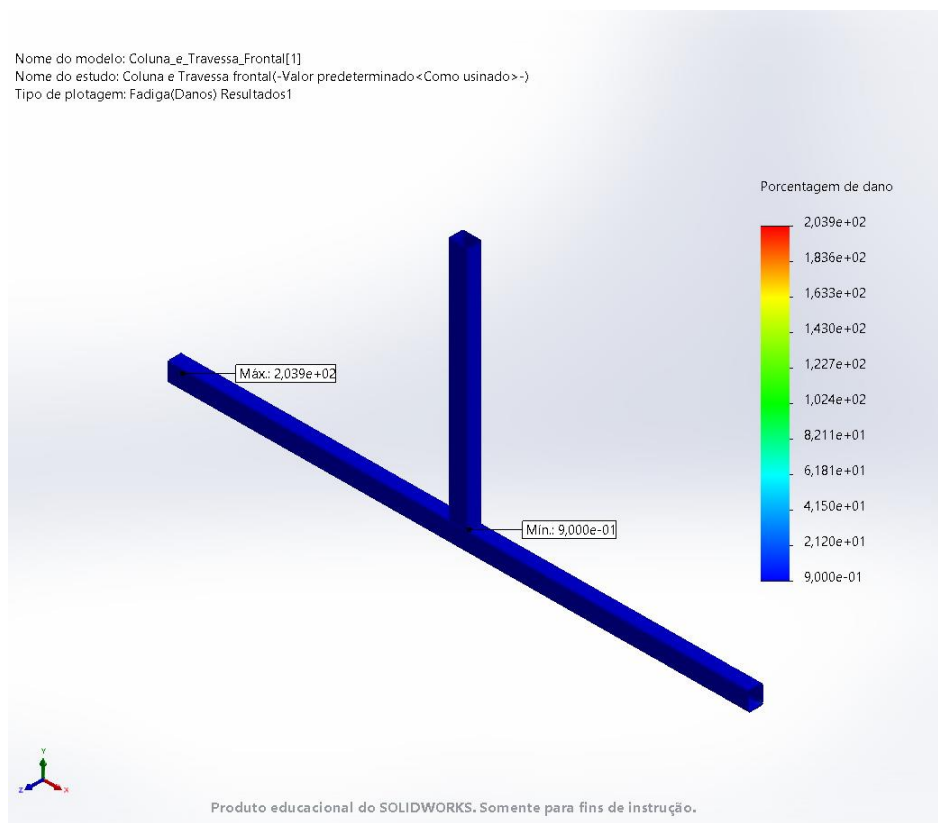


Figura 8. Análise de fadiga porcentagem ao dano da coluna e travessa frontal

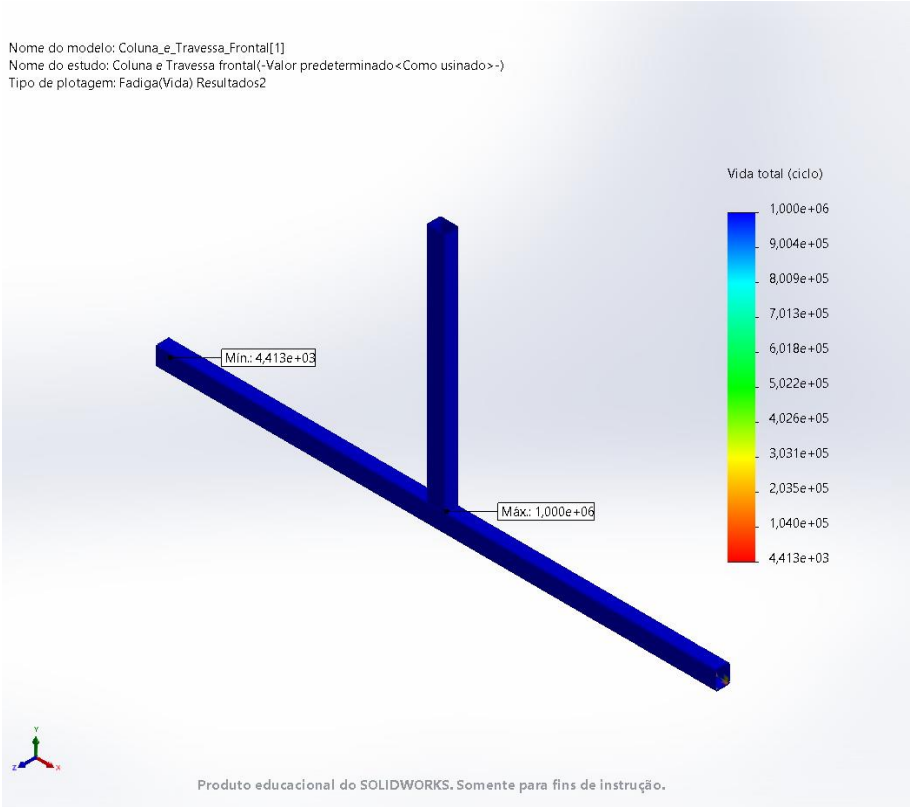


Figura 9. Análise de fadiga vida da coluna e travessa frontal

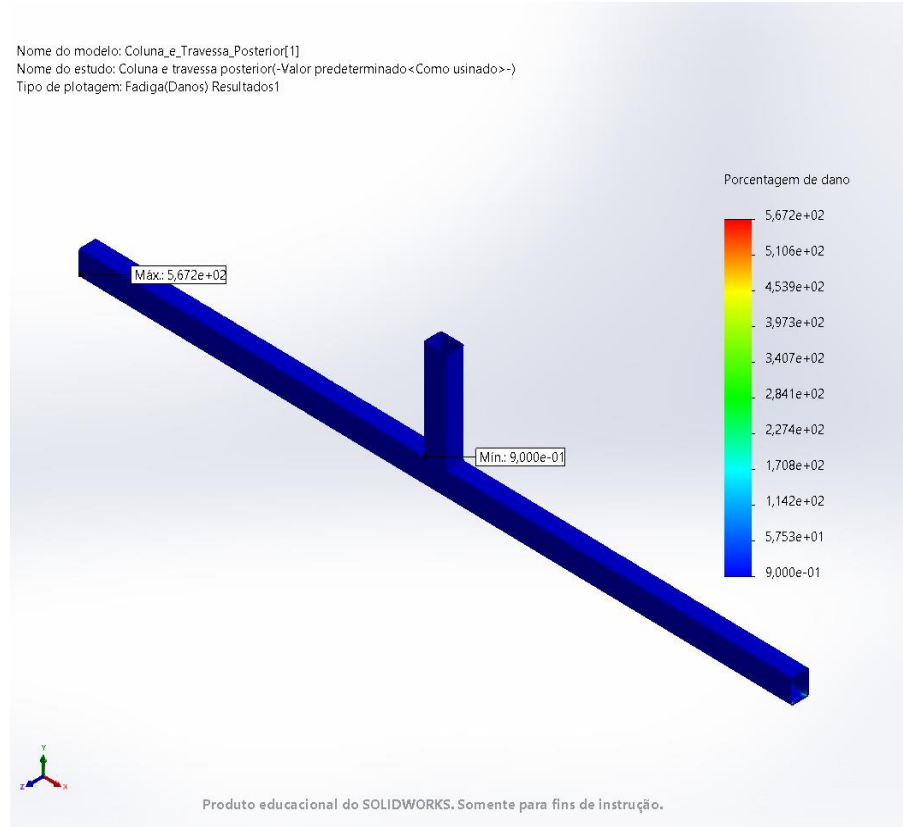


Figura 10. Análise de fadiga porcentagem ao dano da coluna e travessa posterior

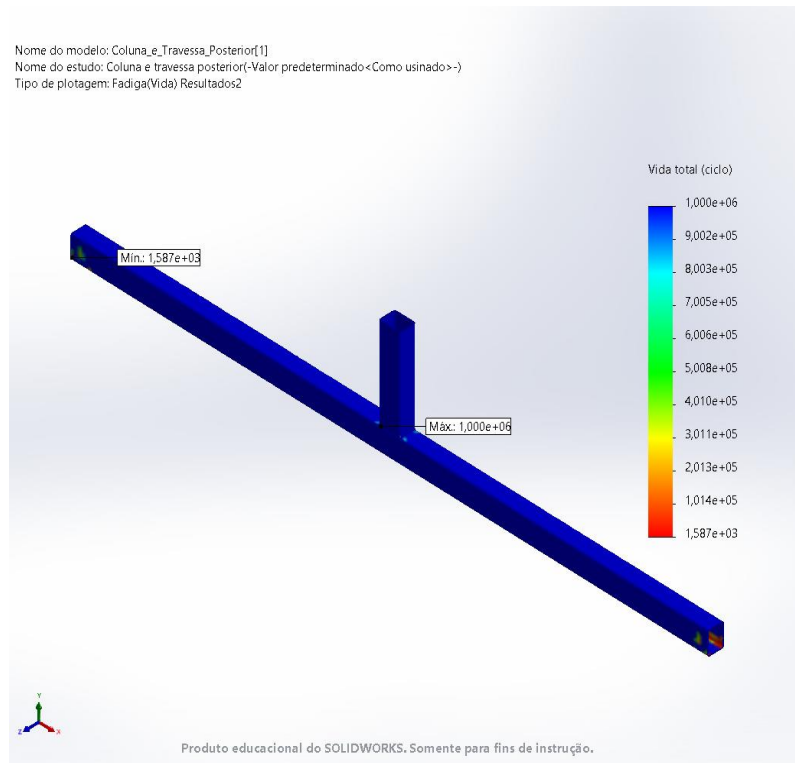


Figura 11. Análise de fadiga vida total da coluna e travessa frontal

3. RESULTADOS

Com os dados da simulação pode-se observar nas Fig. (6) e Fig. (7) que para o quadrado treliçado, temos vida infinita e não há indícios de porcentagem ao dano visível para coluna e travessa, tanto na frontal quanto na posterior Fig. (8), Fig. (9), Fig. (10) e Fig. (11) a conclusão é análoga. Portanto, para o período de missão do projeto temos a garantia que o produto não falhará por fadiga.

Os resultados da Tab. (1), Tab. (2) para perfis retangulares e Tab. (3) perfil tubular reforçam a conclusão da análise anterior, os resultados da Tab. (1) referentes aos elementos observa-se que o limite de fadiga corrigido está bem abaixo do limite de fadiga do material. Para coluna e travessa os resultados das Tab. (2) e (3), chega-se a mesma conclusão, pois para ambos o limite de fadiga corrigido é muito menor que limite de fadiga do material. Estes dados reforçam a confiabilidade estrutural para o período de missão 5 anos proposto para este projeto.

Para trabalhos futuros pode-se complementar com outras simulações como por exemplo, rigidez do conjunto, ruído, movimento, flutuabilidade etc.

4. CONCLUSÕES

- Vida infinita para quadro, coluna e travessa.
- Nas regiões de engastes há uma pequena concentração de tensão nas travessas frontal Fig. (9) e posterior Fig. (11).
- Não há porcentagem ao dano no quadro, coluna e travessa Fig. (6), Fig. (8) e Fig. (10).
- Com base nos resultados dos cálculos e simulação todo o conjunto (quadro, coluna e travessa) atenderão a condição de projeto com relação a carga solicitada.

5. AGRADECIMENTOS

Manifesto meu agradecimento ao Instituto Federal do Rio de Janeiro Campus Paracambi por disponibilizar recursos, equipamentos e espaço físico, pois não seria possível a realização do projeto.

Ao Professor Daniel Oliveira de Lima, gostaria expressar minha gratidão, cuja orientação, paciência e conhecimento foram fundamentais para realização deste projeto.

Gostaria de expressar minha sincera gratidão aos colegas do grupo de pesquisa do Projeto da bicicleta aquática Bruno Ferreira dos Santos e Mateus Turíblio e Silva Moreira pelo empenho, pela dedicação e pela troca enriquecedora de ideias ao longo do desenvolvimento deste projeto.

Por fim agradeço à Deus por propiciar-me saúde e condição para enfrentar e vencer mais este desafio.

6. REFERÊNCIAS

- Almeida, J. C. de. 2012 *Projeto mecânico: enfoque baseado na fadiga e na mecânica da fratura*. São Paulo. Editora Eduardo Blücher. 2.^a edição revisada e ampliada.
- ANSI/AISC 360-16, 2016. Specification for Structural Steel Buildings. Chicago.
- ASTM International. 2021. ASTM A500/A500M-21: *Standard Specification for Cold-Formed Welded and Seamless Carbon Steel Structural Tubing in Rounds and Shapes*. West Conshohocken.
- Callister, J. R, William, D., 2002. *Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma introdução*. Rio de Janeiro. Editora LTC. 1^a edição.
- Fonseca, Jr, Taylor, M. I., 2013. Métodos de previsão da curva deformação-vida em fadiga para ligas de alumínio AA6261-T6 e AA6351-T6.
- IBGE, 2010. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Pesquisa de Orçamentos Familiares: 2008-2009 – Antropometria e estado nutricional de crianças, adolescentes e adultos no Brasil*. RJ.
- Norton, R. L., 2013. *Projeto de máquinas: uma abordagem integrada*. Porto Alegre. Editora Bookman, 4^a edição.
- Shigley, J. E.; Mischke, C. R.; Budynas, R. G. 2004. *Projeto de engenharia mecânica*. São Paulo. Editora McGraw-Hill, 7^a edição.
- Silva, F. de A, et al, 2016. *Análise de falha dinâmica em carregamento axial de eixo de transmissão utilizando o método dos elementos finitos*, Exata - EP. São Paulo, v. 14, n. 2, p. 207-219.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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