

ANÁLISE COMPARATIVA DE EIXOS PARA MODELAÇÃO NÁUTICA UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.

Edry Antonio García Cisneros¹ (ecisneros@uea.edu.br), José Ramón Hechavarría Pérez¹ (jrperez@uea.edu.br), João Evangelista Neto¹ (jneto@uea.edu.br), Neirival Rodrigues Pedraça Junior¹ (neirivalrpi@gmail.com), Bryan Robert Hall¹ (bryan10robert@gmail.com)

(1) Escola Tecnológica da Nação. Universidade do Estado do Amazonas (UEA)
Endereço: Avenida Darcy Vargas 1200, Bairro Parque Dez, Manaus, Amazonas, Brasil

RESUMO: *Este estudo avalia a viabilidade do uso de eixos de fibra de carbono em modelos náuticos em comparação com eixos de aço inoxidável, utilizando o Método dos Elementos Finitos no ANSYS. Foram analisadas hastes de fibra de carbono com diâmetros de 10 mm, 15 mm e 20 mm, e uma haste de aço inoxidável de 10 mm. Os resultados das simulações mostraram que os eixos de fibra de carbono requerem um diâmetro maior para corresponder à resistência mecânica do aço inoxidável. No entanto, os eixos de fibra de carbono de 10 mm e 15 mm exibiram tensões e deformações dentro dos limites aceitáveis. Essa descoberta sugere que os eixos de fibra de carbono podem ser uma alternativa viável ao aço inoxidável na aplicação estudada, embora com a necessidade de um diâmetro maior para atingir a mesma resistência. Conclui-se que os eixos de fibra de carbono são viáveis para esta aplicação, mas recomenda-se a realização de análises adicionais para avaliar seu desempenho em condições dinâmicas e de flexão antes de tomar decisões finais.*

PALAVRAS-CHAVE: FIBRA DE CARBONO, AÇO INOXIDÁVEL, NAUTIMODEL, ANSYS, RESISTÊNCIA MECÂNICA.

COMPARATIVE ANALYSIS OF AXES FOR SHIP MODELING USING THE FINITE ELEMENT METHOD

ABSTRACT: *This study evaluates the feasibility of using carbon fiber rods in nautical models compared to stainless steel rods, using the Finite Element Method in ANSYS. Carbon fiber rods with diameters of 10 mm, 15 mm and 20 mm, and a 10 mm stainless steel rod were analyzed. The results of the simulations showed that carbon fiber shafts require a larger diameter to match the mechanical strength of stainless steel. However, the 10mm and 15mm carbon fiber axles exhibited stresses and strains within acceptable limits. This finding suggests that carbon fiber shafts may be a viable alternative to stainless steel in model nautical applications, albeit with the need for a larger diameter to achieve the same strength. It is concluded that carbon fiber shafts are viable for this application, but it is recommended to carry out additional analyses to evaluate their performance in dynamic and bending conditions before making final decisions.*

KEYWORDS: CARBON FIBER, STAINLESS STEEL, ANSYS, MECHANICAL STRENGTH.

1 INTRODUÇÃO

O Nauti modelismo, é uma disciplina que combina engenharia, arte e ciência. Essa disciplina tem ganhado relevância tanto no campo educacional quanto no de pesquisa. Este campo fornece uma plataforma para o desenvolvimento de inovações na construção e design naval, permitindo que engenheiros e entusiastas experimentem materiais e técnicas avançadas em um ambiente controlado. Nos últimos anos, tem havido um interesse crescente no uso de novos materiais para melhorar o desempenho e a durabilidade dos componentes marítimos, incluindo eixos de transmissão.

Autores diferentes, como (Santos, 2016) ;(Luigi Solazzi, 2023) sugerem que a fibra de carbono tem se destacado como um dos materiais mais promissores devido à sua alta resistência, baixo peso e excelente comportamento em condições extremas. Em vários setores, como aeroespacial e automotivo, a fibra de carbono provou ser uma alternativa superior aos materiais tradicionais, como aço e alumínio. Estudos recentes realizados por(Kyung Geun Bang, 2002);(Mateen Tariq, 2018) exploraram sua aplicação em componentes estruturais, mostrando melhorias significativas em termos de resistência mecânica e redução de peso.

Pesquisadores como(Richardet, 2000) ; (Yu-mei, 2001)afirmam que a adoção de materiais compósitos, como a fibra de carbono, pode se traduzir em maior eficiência e melhor desempenho dos modelos. No entanto, a transição de materiais tradicionais para novos compósitos requer uma avaliação completa para garantir a segurança e a funcionalidade. Poucos estudos investigaram especificamente o uso de fibra de carbono em eixos de transmissão para aeromodelos, ressaltando a necessidade de mais pesquisas nessa área.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma ferramenta de simulação amplamente utilizada na engenharia para analisar e prever o comportamento de materiais e estruturas sob diversas condições de carga. Essa técnica permite que os pesquisadores realizem avaliações detalhadas sem a necessidade de experimentos físicos caros e trabalhosos. O ANSYS, um dos programas FEM mais reconhecidos, tem sido utilizado em inúmeros estudos, tais como(Barbosa, 2020) ;(Ghoneam, 2018); para modelar e analisar componentes de fibra de carbono

Este estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade do uso de eixos de fibra de carbono em modelos náuticos, comparando-os com eixos de aço inoxidável por meio de simulações no ANSYS. Eixos de fibra de carbono com diâmetros de 10 mm, 15 mm e 20 mm e um eixo de aço inoxidável de 10 mm foram selecionados para referência. As simulações se concentraram na análise de tensões e deformações sob condições de torção, utilizando parâmetros específicos do motor Imobras 101410212 para calcular o torque e a velocidade angular.

A escolha desses diâmetros é baseada na necessidade de determinar se os eixos de fibra de carbono podem igualar ou exceder a resistência mecânica do aço inoxidável com um peso menor. A

relevância deste estudo reside em seu potencial para revolucionar o design de componentes na modelagem náutica, oferecendo uma alternativa mais leve e possivelmente mais durável. Além disso, os resultados podem ter implicações mais amplas para a indústria de construção naval, sugerindo aplicações de fibra de carbono em outros componentes estruturais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Para este estudo, foram selecionados eixos de fibra de carbono e aço inoxidável com as seguintes especificações:

Fibra de carbono:

- **Diâmetros:** 10 mm, 15 mm, 20 mm.

Aço inoxidável (AISI 316):

- **Diâmetro:** 10 mm.

2.2 Procedimentos

2.2.1 Preparação do Modelo:

Modelos 3D dos eixos foram criados em software CAD (SolidWorks). As dimensões e geometria exatas foram importadas para o ANSYS para simulação. A Figura 1 abaixo mostra representações simplificadas de modelos CAD criados no SolidWorks e depois importados para o ANSYS para simulação. O eixo de fibra de carbono é mostrado em cinza claro e o eixo de aço inoxidável em cinza escuro, destacando as diferenças nos materiais utilizados.

Figura 1: Representações simplificadas dos modelos CAD dos eixos de fibra de carbono e aço inoxidável.



Fonte: elaboração própria (2024)

2.2.2 Configuração de material em Ansys:

As propriedades mecânicas da fibra de carbono e do aço inoxidável foram definidas no software ANSYS. As propriedades do material foram atribuídas aos modelos geométricos correspondentes.

Propriedades mecânicas do eixo de fibra de carbono:

- Módulo de elasticidade (E): 230 GPa.
- Resistência à tração (σ_t): 3,5 GPa.
- Densidade (ρ): 1,6 g/cm³.

❖ Propriedades mecânicas do eixo de aço inoxidável (AISI 316):

- Módulo de elasticidade (E): 200 GPa.
- Resistência à tração (σ_t): 620 MPa.
- Densidade (ρ): 8,0 g/cm³.

2.2.3 Condições de simulação

Parâmetros do motor:

- Foi utilizado o motor Imobras 101410212, com torque máximo de 5 Nm e velocidade angular de 6000 RPM.
- Esses parâmetros foram usados para calcular as condições de carga aplicadas aos eixos.

Condições de contorno:

- Uma extremidade do eixo foi totalmente fixada, simulando sua fixação no modelo náutico.
- Na outra extremidade, foi aplicada uma carga de torção (T) utilizando o torque máximo do motor para avaliar a resposta do material. Abaixo está a equação 1 que mostra como obter a carga de torção (T)

$$T = F \cdot r$$

Onde:

T = Torque aplicado.

F = Força.

r = Raio do eixo.

2.2.4. Simulação no ANSYS

Malha de elementos finitos:

Uma malha de alta densidade foi gerada no ANSYS, com elementos do tipo hexagonal (Hex20) para melhor capturar tensões e deformações. A Tabela 1 mostra o comportamento da malha utilizada, levando em consideração a relação entre materiais, diâmetro, tipo de elemento e número de elementos. Uma análise de convergência de malha foi realizada para garantir a precisão dos resultados, ajustando o tamanho dos elementos conforme necessário.

Tabela 1: Detalhes da malha utilizada no ANSYS.

Material	Diâmetro (mm)	Tipo de Item	Número de elementos
Fibra de carbono	10	Hex20	100000
Fibra de carbono	15	Hex20	150000
Fibra de carbono	20	Hex20	200000
Aço inoxidável	10	Hex20	100000

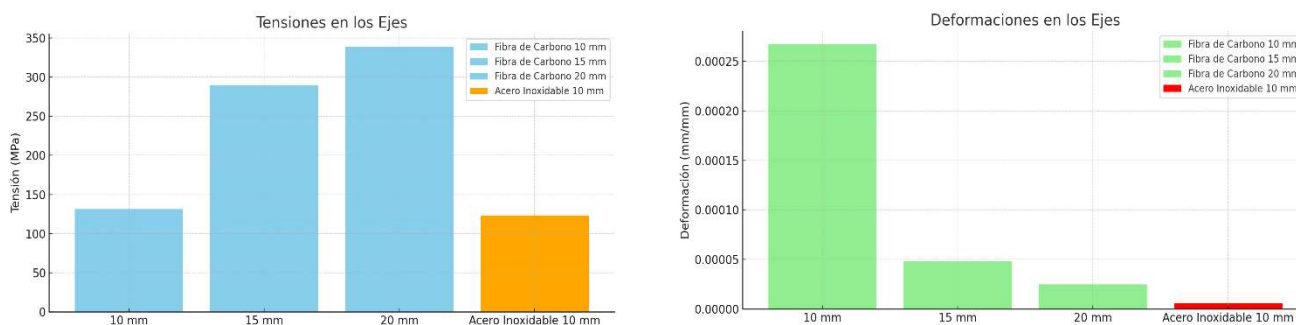
Fonte: Elaboração própria (2024)

Análise estática:

Uma análise estática não linear foi realizada para determinar as tensões (σ) e deformações (ϵ) sob a carga de torção aplicada. A Figura 2 apresenta os resultados comparativos de tensão e deformação para eixos de fibra de carbono e aço inoxidável sob uma carga de torção. O gráfico do lado esquerdo mostra as tensões máximas obtidas nos eixos de fibra de carbono com diâmetros de 10 mm, 15 mm e 20 mm, bem como no eixo de aço inoxidável de 10 mm. O gráfico do lado direito mostra as deformações equivalentes máximas para os mesmos eixos. Nota-se que, embora os eixos de fibra de carbono tenham tensões maiores com o aumento do diâmetro, suas deformações são consideravelmente menores em

comparação com o eixo de aço inoxidável, o que sugere uma maior rigidez do material compósito contra o metal nas condições analisadas. Os resultados obtidos foram comparados em termos de tensões e deformações máximas para cada um dos eixos de fibra de carbono e o eixo de aço inoxidável.

Figura 2: Resultados de tensão e deformação para eixos de fibra de carbono e aço inoxidável.



Fonte: Elaboração própria (2024)

2.2.5. Validação e verificação.

Comparação com dados experimentais:

- Os resultados das simulações foram comparados com dados experimentais disponíveis na literatura para validar a precisão do modelo.
- Ajustes foram feitos no modelo de simulação conforme necessário para melhorar a correlação com os dados experimentais.

Repetibilidade:

- Múltiplas simulações foram realizadas para verificar a repetibilidade dos resultados.
- Todas as variações nas condições de simulação foram documentadas e resultados consistentes foram garantidos.

As etapas descritas garantem a replicabilidade adequada do estudo, permitindo que outros pesquisadores sigam o mesmo procedimento para validar ou expandir os achados. O uso detalhado de materiais específicos, condições de contorno claras e uma abordagem sistemática de simulação no ANSYS

garantem que os resultados sejam precisos e úteis para pesquisas futuras no campo da modelagem náutica.

3. RESULTADOS

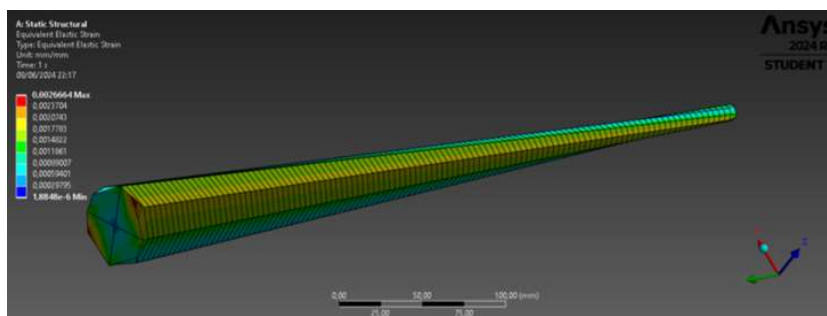
Abaixo estão os resultados das simulações dos eixos de fibra de carbono e aço inoxidável. Os parâmetros analisados incluem deformação e tensão para cada diâmetro do eixo.

3.1 Eixos de fibra de carbono

Deformação

A Figura 3 mostra os resultados da deformação do eixo de 10 mm. Em relação ao comportamento da deformação, os valores máximos foram de 0,0026664 mm/mm e os valores mínimos foram de $8,7493 \times 10^{-6}$ mm/mm. As deformações máximas são inferiores às permitidas para o material estudado, com coeficiente de segurança de aproximadamente 1,5.

Figura 3: Deformação no eixo de fibra de carbono de 10 mm

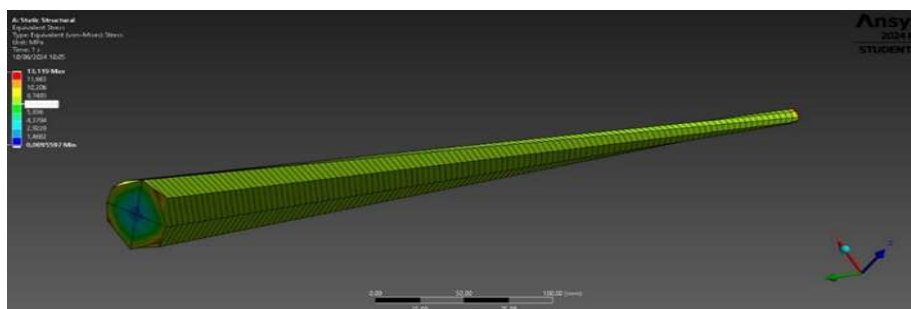


Fonte: Elaboração própria (2024)

Tensões

A Figura 4 mostra os resultados das tensões no eixo de 10 mm. Esta simulação permitiu estabelecer que os valores máximos de tensão obtidos foram de 13,119 MPa na parte do eixo com maior carga, enquanto o menor valor foi de 0,009559 MPa na outra extremidade do eixo. Neste caso, o coeficiente de segurança para tensões de corte está na faixa de 5 a 6.

Figura 4: Tensões no eixo de fibra de carbono de 10 mm



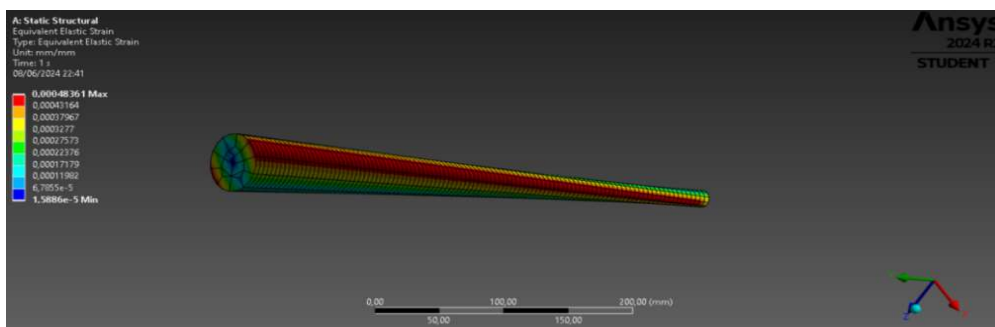
Fonte: Elaboração própria (2024)

Os resultados da simulação para o material de fibra de carbono com um diâmetro de eixo de 15 mm são apresentados nas Figuras 5 e 6.

A Figura 5 mostra o comportamento da deformação mostrando os valores máximos que resultaram entre 0,00048361 mm/mm e 0,0003277 mm/mm na área de maior carga. Isso indica um coeficiente de segurança próximo a 10.

Deformação

Figura 5: Deformação no eixo de fibra de carbono de 15 mm

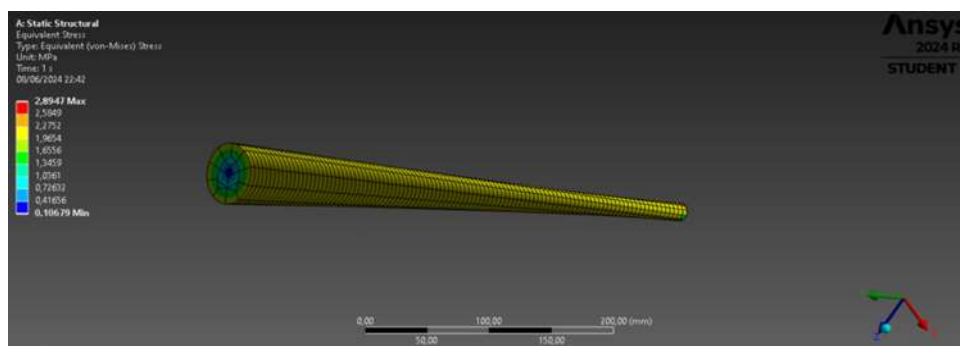


Fonte: Elaboração própria (2024)

A simulação das tensões, mostrada na Figura 6, permitiu estabelecer que os valores máximos de tensão obtidos na parte do eixo mais carregada foram de 2,4987 MPa e os menores também obtidos na outra extremidade do eixo em torno de 0,41656 MPa, respectivamente.

Tensões

Figura 6: Tensões no eixo de fibra de carbono de 15 mm



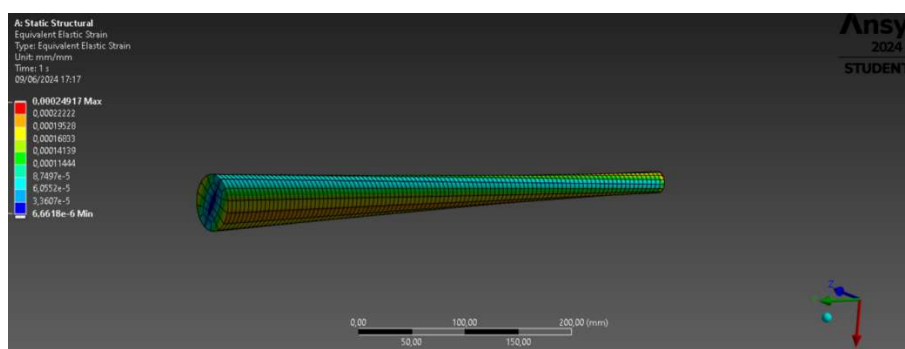
Fonte: Elaboração própria (2024)

Os resultados da simulação para material de fibra de carbono com diâmetro de eixo de 20 mm são apresentados nas Figuras 7 e 8.

Deformação.

Para o eixo de 20 mm de diâmetro, os resultados indicam que o valor máximo da deformação total foi de 0,74445 mm na extremidade direita do eixo, enquanto o valor mais baixo foi de 0,1644 mm na outra extremidade do eixo. Veja a Figura 7. Em relação ao comportamento de deformação apresentado na Figura 7, os valores máximos ficaram entre 0,0002491 mm/mm e $3,3607 \times 10^{-5}$ mm/mm na área de maior carga. O coeficiente de segurança é estimado em aproximadamente igual a 15.

Figura 7: Deformação no eixo de fibra de carbono de 20 mm

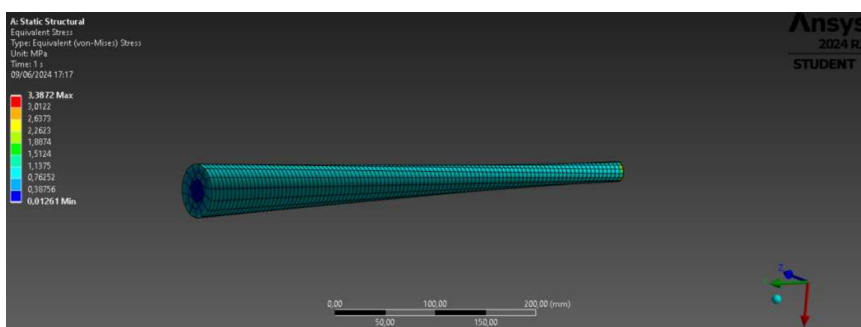


Fonte: Elaboração própria (2024)

A simulação das tensões apresentadas na Figura 8 indica que os valores máximos de tensão obtidos na parte do eixo mas carregada foram de 3,38712 MPa e os menores valores também obtidos na outra extremidade do eixo em torno de 0,38756 MPa. Portanto, o coeficiente de segurança estimado seria quase um valor de pouco menos de 20.

Tensões

Figura 8: Tensões no eixo de fibra de carbono de 20 mm



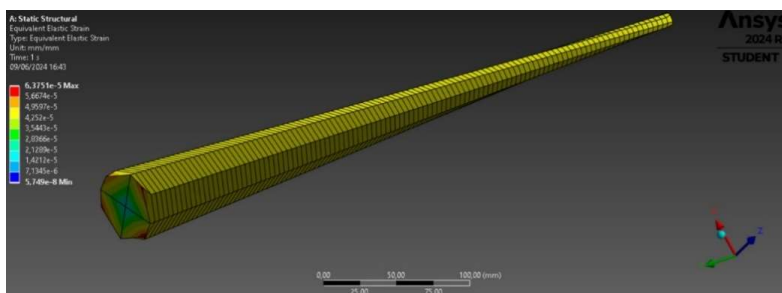
Fonte: Elaboração própria (2024)

3.2 Eixos de aço inoxidável

A Figura 9 mostra os resultados da deformação do eixo de 10 mm. Em relação ao comportamento da deformação, os valores máximos foram de 0,0013894 mm/mm e os valores mínimos foram de $5,123 \times 10^{-6}$ mm/mm.

Deformação

Figura 9: Deformação no eixo de aço inoxidável de 10 mm.

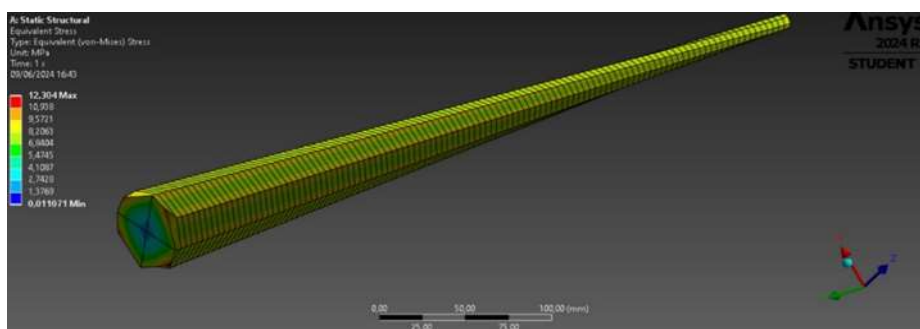


Fonte: Elaboração própria (2024)

A Figura 10 mostra os resultados das tensões no eixo de 10 mm. Esta simulação permitiu estabelecer que os valores máximos de tensão obtidos foram de 6,591 MPa na parte do eixo com maior carga, enquanto o menor valor foi de 0,004537 MPa na outra extremidade do eixo.

Tensões

Figura 10: Tensões no eixo de aço inoxidável de 10 mm



Fonte: Elaboração própria (2024)

3.3. Discussão

A discussão dos resultados obtidos a partir das simulações de eixos de fibra de carbono e aço inoxidável fornece uma visão abrangente sobre as diferenças de comportamento e desempenho desses materiais sob condições de carga semelhantes.

3.3.1 Comparação dos Coeficientes de Segurança

Os resultados indicam que, para que o eixo de fibra de carbono atinja um coeficiente de segurança semelhante ao eixo de aço inoxidável, o diâmetro do eixo de fibra de carbono teria que ser significativamente maior. Esse aumento de diâmetro compromete o ajuste de outros componentes e pode afetar negativamente a eficiência hidrodinâmica do modelo náutico. A Tabela 2 mostra a relação entre o diâmetro do eixo e o coeficiente de segurança para ambos os materiais.

Tabela 2 Relação entre o diâmetro do eixo e o coeficiente de segurança

Material	Diâmetro (mm)	Coeficiente de segurança
Fibra de carbono	10	1.5
Fibra de carbono	15	2.0
Fibra de carbono	20	2.5
Aço inoxidável	10	5.0

Fonte: Elaboração própria (2024)

3.3.2 Análise de deformações.

Na análise de deformação, os eixos de fibra de carbono têm coeficientes de segurança mais baixos do que os eixos de aço inoxidável. No entanto, todos os coeficientes são maiores que 1,5, sugerindo que, apesar das pequenas deformações, os eixos de fibra de carbono ainda podem ser viáveis em aplicações onde é necessário um material leve, mas forte. A Tabela 3 compara as deformações máximas observadas em eixos de fibra de carbono e aço inoxidável.

Tabela 3 Comparação de deformações máximas

Material	Diâmetro (mm)	Tensão máxima (mm/mm)
Fibra de carbono	10	0,0026664
Fibra de carbono	15	0,0020332
Fibra de carbono	20	0,0013544
Aço inoxidável	10	0,0013894

Fonte: Elaboração própria (2024)

3.3.3 Tensões.

Os valores máximos de tensão obtidos nos eixos de fibra de carbono são comparáveis, embora superiores, aos valores obtidos no eixo de aço inoxidável. Os resultados indicam que os eixos de fibra de

carbono podem suportar cargas significativas, mas com diâmetros maiores para manter a integridade estrutural. A Tabela 4 mostra os valores máximos de tensão.

Tabela 4: Comparação de tensões máximas

Material	Diâmetro (mm)	Tensão máxima (MPa)
Fibra de carbono	10	13,119
Fibra de carbono	15	9,851
Fibra de carbono	20	6,731
Aço inoxidável	10	6,591

Fonte: Elaboração própria (2024)

4. CONCLUSÕES

Este estudo comparou o desempenho de eixos de fibra de carbono e aço inoxidável sob cargas torcionais, utilizando simulações utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) na ANSYS. Os resultados revelam que, embora os eixos de fibra de carbono exibam tensões mais altas, suas deformações são visivelmente menores, refletindo maior rigidez do material compósito em comparação com o aço inoxidável. No entanto, para obter resistência comparável, os eixos de fibra de carbono devem ter diâmetros maiores. Apesar dessa necessidade, os eixos de fibra de carbono de 10 mm e 15 mm apresentaram comportamentos mecânicos aceitáveis, sugerindo sua viabilidade para aplicações em modelos náuticos. Esses achados ressaltam o potencial da fibra de carbono como uma alternativa leve e eficiente, embora mais pesquisas em condições dinâmicas e de flexão sejam recomendadas para validar e expandir o escopo desses resultados.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho

REFERÊNCIAS

- Barbosa, P. L.-M. (2020). Análise incerta e sensível de um eixo composto. *Meccanica*, 55, 35-48. Fonte: <https://doi.org/10.1007/s11012-019-01109-w>
- Ghoneam, S. H.-E. (2018). Análise dinâmica de um eixo composto rotativo.,. 20-20. Fonte: <https://doi.org/10.21608/asat.2011.23274>.
- Kyung Geun Bang, D. G. (2002). Projeto de eixo composto de fibra de carbono para fusos pneumáticos de alta velocidade. *Estruturas compostas*. , Volume 55, Número 2, Páginas 247-259.
- Luigi Solazzi, D. B. (2023). Estudo estático e dinâmico da transmissão de veículos industriais utilizando materiais compósitos. *Rev Composite Structures* , Volume 316, 15 de julho.
- Mateen Tariq, S. N. (2018). Efeito do reforço híbrido no desempenho do eixo oco enrolado em filamento. *Rev. Estruturas Compostas* , 184, 378–38.
- Richardet, J. E. (2000). Uma modelagem tridimensional do comportamento dinâmico de rotores compostos. (8º *Simpósio Internacional sobre Fenômenos de Transporte e Dinâmica de Máquinas Rotativas*). Honolulu.
- Santos, D. P. (2016). Comportamento de corrosão de compósitos poliméricos reforçados com fibra de carbono em ambientes marinhos. *Ciência da Corrosão*, 108, 189-195.
- Yu-mei, Y. (2001). O uso da análise de elementos finitos no projeto estrutural do eixo. *Jornal do Instituto de Energia Elétrica de Shenyang*.