INSTITUTO FEDERAL DA BAHIA
CAMPUS JEQUIÉ
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MARINILTON JOSÉ OLIVEIRA LIMA JÚNIOR

ANÁLISE DE CAVITAÇÃO EM HÉLICES DE EMBARCAÇÕES

Jequié-BA
2025

MARINILTON JOSÉ OLIVEIRA LIMA JÚNIOR

ANÁLISE DE CAVITAÇÃO EM HÉLICES DE EMBARCAÇÕES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina de TCC 2 do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia.

Orientadora: Professora Núbia Moura Ribeiro

Jequié-BA
2025

MARINILTON JOSÉ OLIVEIRA LIMA JÚNIOR

ANÁLISE DE CAVITAÇÃO EM HÉLICES DE EMBARCAÇÕES

A banca examinadora, abaixo listada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso "Análise de Cavitação em Hélices de Embarcações" elaborado por "Marinilton José Oliveira Lima Júnior" como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharelado em Engenharia Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia.

Jequié-BA, 23/07/2025

Comissão Examinadora

Professora Núbia Moura Ribeiro - IFBA
(Orientadora)

Prof. Me. Luis Fernando Barbosa Brito - IFBA

Prof. Dr. José Josimar Soares - IFAM

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus, em nome de Jesus Cristo, por ter me sustentado e fortalecido durante toda a minha caminhada acadêmica. Sua presença constante foi meu alicerce nos momentos mais desafiadores.

À minha família, expresso minha profunda gratidão por todo o apoio financeiro, pelas palavras de motivação e pelo amor incondicional que me impulsionaram a continuar, mesmo diante das adversidades.

À minha namorada, Ana Clara, que esteve ao meu lado nos últimos três anos da faculdade, meu sincero agradecimento. Sua companhia, paciência e incentivo nos momentos difíceis foram fundamentais para que eu seguisse em frente com determinação.

Por fim, registro minha imensa gratidão à minha orientadora, Núbia Moura Ribeiro, cuja dedicação, atenção e orientação ímpares marcaram profundamente esta etapa tão importante da minha formação. Sua orientação não só contribuiu para o desenvolvimento deste trabalho, mas também para meu crescimento como estudante e futuro profissional.

"Sede firmes, inabaláveis e sempre abundantes na obra do Senhor, sabendo que o vosso trabalho não é em vão."

1 Coríntios 15:58

ANÁLISE DE CAVITAÇÃO EM HÉLICES DE EMBARCAÇÕES

Resumo

O presente estudo investiga a ocorrência de cavitação em hélices de barcos, com foco na comparação qualitativa entre os resultados obtidos por simulações CFD e dados experimentais da hélice *INSEAN E779A*. O objetivo é validar a metodologia de simulação adotada, verificando sua capacidade de representar adequadamente a presença do fenômeno da cavitação, sem, contudo, realizar medições quantitativas dos seus parâmetros. A metodologia seguiu uma abordagem sequencial, iniciando com a modelagem da hélice no software *SolidWorks* com base em parâmetros geométricos definidos. Em seguida, a geometria foi refinada no *ANSYS SpaceClaim* para garantir maior precisão nas simulações. No *ANSYS*, foi criado um volume de controle para delimitar a região de escoamento do fluido, com definição das condições de contorno, utilizando água como fluido de trabalho em suas fases líquida e vapor. A malha foi gerada de forma a capturar adequadamente as variações de pressão e os efeitos relacionados à cavitação. Os resultados obtidos foram analisados quanto à presença ou ausência da cavitação, e comparados com dados experimentais disponíveis na literatura, permitindo avaliar a efetividade do modelo computacional proposto e validar a metodologia utilizada na análise.

Palavras-chave: hélices de barcos; *INSEAN E779A*; simulações CFD; *ANSYS*.

Abstract

This study investigates the occurrence of cavitation in boat propellers, focusing on a qualitative comparison between results obtained through CFD simulations and experimental data for the INSEAN E779A propeller. The objective is to validate the adopted simulation methodology by verifying its ability to adequately represent the presence of cavitation, without performing quantitative measurements of its parameters. The methodology followed a sequential approach, starting with the modeling of the propeller in SolidWorks based on defined geometric parameters. The geometry was then refined in ANSYS SpaceClaim to ensure greater precision in the simulations. A control volume was created in ANSYS to define the fluid flow region, where boundary conditions were established using water as the working fluid in both liquid and vapor phases. The mesh was generated to accurately capture pressure variations and cavitation-related effects. The results were analyzed in terms of the presence or absence of cavitation and compared with experimental data from the literature, allowing the evaluation of the effectiveness of the proposed computational model and the validation of the simulation methodology.

Keywords: Boat propellers; INSEAN E779A; CFD simulations; ANSYS.

Lista de figuras

Figura 1 – Danos Causados pela Cavitação em uma Hélice. 1
Figura 2 – A hélice de parafuso de Hooke (1683). 4
Figura 3 – Hélice *INSEAN E779A*. 5
Figura 4 – Danos Causados pela Cavitação 8
Figura 5 – Diagrama de Fases da Água. 9
Figura 6 – Diferentes Condições de Cavitação. 10
Figura 7 – Fluxograma da Metodologia. 15
Figura 8 – *INSEAN E779A* modelagem vista isométrica. 16
Figura 9 – Ilustração do domínio computacional. 18
Figura 10 – Aparência da Hélice translucida. 19
Figura 11 – Hélice e região periférica. 19
Figura 12 – Refinamento local da hélice. 20
Figura 13 – Linhas de velocidade do escoamento - vista lateral. 22
Figura 14 – Linhas de velocidade do escoamento - vista isométrica. 22
Figura 15 – Resultado para J=0,71 / 3000 rpm. 23
Figura 16 – Resultado para J=0,77 / 2400 rpm. 23
Figura 17 – Resultado para J=0,83 / 1800 rpm. 24
Figura 18 – Resultado para J=0,9 / 1500 rpm. 24
Figura 19 – Resultado para valores de J maior que 0,9 25
Figura 20 – Cavitação artificial (em razão da ausência de eixo de acoplamento). . . 26
Figura 21 – Outro ângulo da cavitação artificial. 26
Figura 22 – Variação do Tempo de Simulação em Função do Coeficiente de Avanço. 28
Figura 23 – Verificação visual da primeira simulação (J=0,71 e RPM=3000). 29
Figura 24 – Verificação visual da segunda simulação (J=0,77 e RPM=2400). 29
Figura 25 – Verificação visual da terceira simulação (J=0,83 e RPM=1800). 30
Figura 26 – Verificação visual da quarta simulação (J=0,9 e RPM=1500). 30

Lista de quadros

Quadro 1 – Dados da hélice. 6
Quadro 2 – Relação entre Coeficiente de Avanço e Número de Cavitação. 20
Quadro 3 – Parâmetros ultilizado nas simulações. 21

Sumário

1 –Introdução 1

1.1 Definição do Problema 2

1.2 Objetivos 2

1.2.1 Objetivo Geral 2

1.2.2 Objetivos Específicos 2

2 –Referencial Teórico 3

2.1 Princípios de Funcionamento de Hélices 3

2.1.1 Passo e Diâmetro 3

2.1.2 Velocidade de Rotação 4

2.2 Contexto Histórico 4

2.3 Hélice Selecionada: Detalhes e Justificativa 5

2.4 Cavitação em Hélices de Embarcações 6

2.5 Hidrodinâmica Aplicada à Propulsão por Hélices 8

2.5.1 Pressão e Cavitação 8

2.5.2 Regimes de Funcionamento da Hélice 9

2.5.3 Arrasto e Sustentação 11

2.6 Análise Numérica 11

2.6.1 Métodos dos Volumes Finitos 11

2.6.2 Geração de Malha 12

2.6.3 Equações Governantes 12

3 –Metodologia 14

3.1 Delimitação do Estudo 15

3.2 Modelagem da hélice 16

3.3 Análise Usando Mecânica dos Fluidos Computacional (CFD) 16

3.3.1 Equação Governante 17

3.3.2 Domínio Computacional 18

3.3.3 Malha 18

3.3.4 Condições de contorno 20

4 –Resultados 22

4.1 Apresentação dos resultados das simulações 22

4.2 Tempo de simulação 27

4.3 Comparação com dados experimentais 28

5 –Discussões 31

5.1 Limitações do Estudo e Propostas para Trabalhos Futuros 32

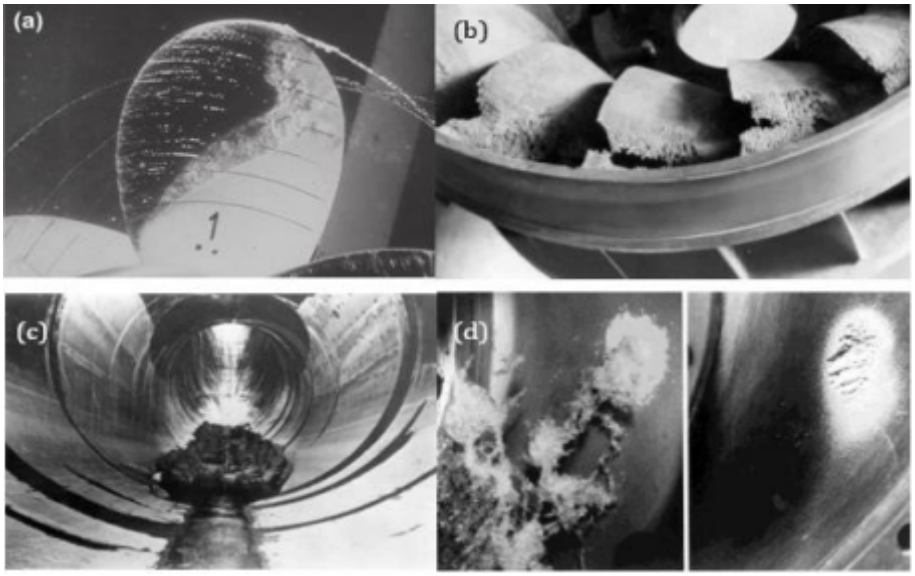
Referências 34

1 Introdução

Quando a pressão de um líquido diminui abaixo de sua pressão de vapor, surge o fenômeno da cavitação, que resulta na criação de bolhas de vapor que, ao colapsarem, podem gerar impactos significativos sobre as características operacionais de hélices subaquáticas. Esse fenômeno provoca uma série de efeitos adversos, incluindo a redução da eficiência hidrodinâmica, variações no torque, desgaste do material, e a potencial diminuição da vida útil da hélice devido a esforços excessivos nas superfícies das pás.

A cavitação é um fator crítico no desempenho de embarcações, especialmente em contextos operacionais onde as condições de velocidade e pressão contribuem para sua ocorrência. Compreender esse fenômeno e suas implicações é essencial para mitigar os impactos negativos, otimizando o funcionamento das hélices e aumentando sua durabilidade (Carlton, 2018). A figura 1 ilustra os impactos que uma hélice pode sofrer quando submetida a um regime de cavitação excessivo, sendo eles: **(a)** Danos na cavitação de folha e nuvem juntamente com um vórtice de ponta em uma pá de hélice; **(b)** Danos por cavitação nas lâminas na descarga de uma Turbina Francis; **(c)** Danos à cavitação na parede de concreto de 15,2 m de diâmetro; **(d)** Vista axial da entrada do dano por cavitação e cavitação no cubo ou na placa de base de um impulsor da bomba centrífuga.

Figura 1 – Danos Causados pela Cavitação em uma Hélice.



Fonte: Carlton (2012, p. 209-250).

1.1 Definição do Problema

A cavitação em hélices subaquáticas ocorre quando a pressão nas superfícies das pás da hélice cai abaixo da pressão de vapor do líquido, ocasionando a formação de bolhas de vapor que colapsam ao migrarem para regiões de maior pressão. Esse colapso pode gerar ondas de choque que afetam o desempenho hidrodinâmico da embarcação e provocam danos estruturais às pás, comprometendo a eficiência do sistema de propulsão e reduzindo a vida útil da hélice.

Tradicionalmente, a investigação desse fenômeno é realizada por meio de testes experimentais em túneis de cavitação, que, embora eficazes, demandam infraestrutura complexa e recursos elevados. Nesse cenário, as simulações computacionais, por meio da dinâmica dos fluidos computacional (CFD), surgem como uma alternativa promissora para prever a ocorrência da cavitação de forma mais acessível e prática.

Diante disso, a seguinte questão orienta este estudo: as simulações computacionais são capazes de representar adequadamente a ocorrência do fenômeno da cavitação em hélices subaquáticas, quando comparadas qualitativamente com dados experimentais disponíveis? Para responder a essa pergunta, esta pesquisa realiza simulações no software *ANSYS* utilizando a hélice *INSEAN E779A* como modelo, buscando validar qualitativamente a metodologia adotada por meio da comparação com dados experimentais e registros fotográficos obtidos na literatura especializada.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Validar, qualitativamente, uma metodologia de simulação para cavitação em hélices subaquáticas por meio da comparação com dados e imagens obtidos por experimentos disponíveis na literatura.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Modelar uma hélice subaquática para uso no ANSYS.
- Realizar uma análise por meio de CFD (mecânica dos fluidos computacional).
- Comparar os resultados das simulações com resultados de experimentos disponíveis na literatura com a mesma hélice.

2 Referencial Teórico

2.1 Princípios de Funcionamento de Hélices

O termo hélice representa um conjunto de pás com um mesmo centro, cujo eixo, ao ser girado, gera propulsão. Para atuar como instrumento de propulsão ou de tração, a hélice normalmente está acoplada a um motor que movimenta o fluido ao seu redor, convertendo energia rotacional em translacional. Assim, o motor, com a hélice, desloca o fluido e a embarcação à qual está acoplada. As pás de uma hélice atuam como asas e produzem força de acordo com o princípio de Bernoulli e a 3ª lei de Newton, criando uma diferença de pressões entre ambas as superfícies das pás (Sampaio, 2006). Portanto, hélices são dispositivos rotativos projetados para gerar força propulsora, baseando-se em princípios de ação e reação.

Segundo a empresa Imperial (2025) existem basicamente dois tipos de hélices, sendo eles: hélice de passo fixo e hélice de passo controlável. O passo de uma hélice é a distância teórica que uma pá de hélice avançaria em uma rotação completa, caso se deslocasse através de um meio sólido, semelhante a um parafuso girando em uma rosca. No que diz respeito ao número de pás, *"Hélices de 4 pás se destacam no manuseio de peso aumentado e fornecem estabilidade excepcional, tornando-as ideais para barcos muito carregados ou condições de águas agitadas. Seu design distribui o empuxo de forma mais uniforme, o que melhora o manuseio em baixa velocidade e minimiza a cavitação"* (CaptainPropeller, s.d.). Por outro lado, a NauticExpo (sem paginação) afirma que *"hélices de três pás são os mais utilizados em embarcações de recreio, pois representam o melhor equilíbrio entre desempenho, velocidade máxima e consumo. Os hélices de quatro pás e os hélices de cinco pás oferecem uma melhor aceleração e reduzem significativamente as vibrações"*.

2.1.1 Passo e Diâmetro

O passo de uma hélice é uma medida teórica que indica a distância que a hélice deslocaria no fluido (água ou ar) em uma revolução completa, sem considerar o deslizamento. Ele é definido como o deslocamento linear que as pás da hélice proporcionariam no sentido do eixo de rotação se não houvesse perda de eficiência devido a fatores como atrito ou cavitação. Nas palavras de Rocha (2019, p. 28), em seu estudo, *"O passo é o deslocamento que uma hélice proporcionaria no sentido do seu eixo de rotação, ao completar uma revolução. Esta definição é similar ao avanço proporcionado pelo aperto em uma volta de um parafuso"*. O mesmo autor trata o diâmetro de uma hélice como sendo a distância total entre as extremidades opostas das pás da hélice, medida em linha reta e

passando pelo centro de rotação (o eixo da hélice). Em outras palavras, é o tamanho do círculo descrito pelas extremidades das pás quando a hélice está girando.

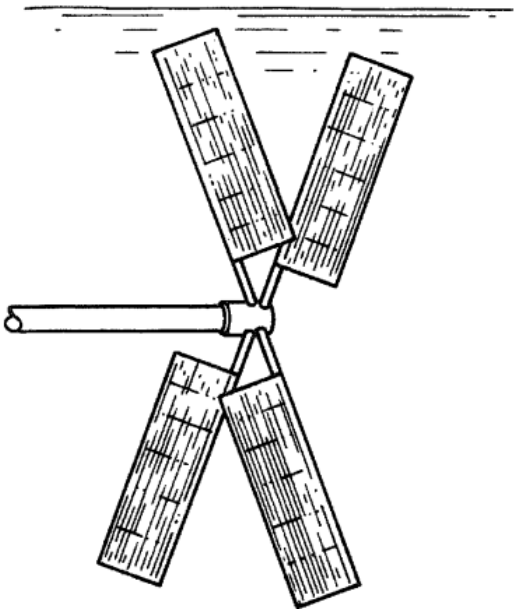
2.1.2 Velocidade de Rotação

A velocidade de rotação de uma hélice é a quantidade de rotações completas que ela realiza por unidade de tempo, geralmente medida em rotações por minuto (RPM). Esse fator é um dos principais determinantes da formação da cavitação. Faixas de rotação elevadas aumentam a velocidade relativa do fluido em relação às pás, reduzindo a pressão local e gerando bolhas de vapor (Bosschers, 2018).

2.2 Contexto Histórico

O desenvolvimento da propulsão por hélices começou com inspirações em dispositivos como a hélice de parafuso ilustrada na figura 2, e evoluiu com o trabalho de engenheiros como Robert Hooke (Carlton, 2018). No entanto, o foco desta pesquisa está nas aplicações modernas e no uso de ferramentas avançadas para análise e melhoria de projetos.

Figura 2 – A hélice de parafuso de Hooke (1683).



Fonte: Carlton (2018, p. 1).

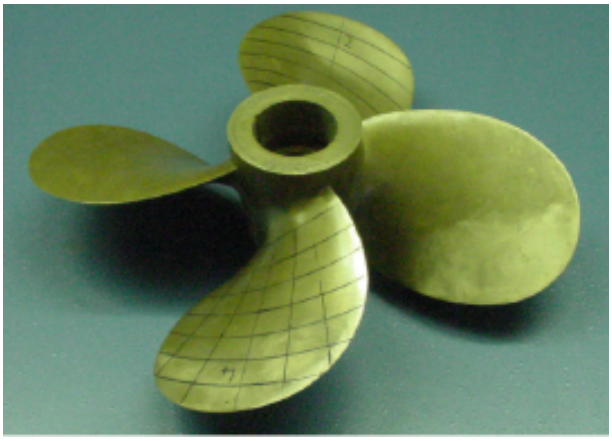
Segundo Sampaio (2006), já no início do século 20, nos transportes marítimos, a hélice em parafuso havia substituído a roda de água, pois as hélices eram mais eficientes, tinham menor tamanho, seu sistema de transmissão era menos complexo e eram menos

susceptíveis a danificar-se, especialmente se usadas em guerra. Ainda no século 20, alguns anos mais tarde, as hélices mais usadas tinham duas pás que, de perfil, tinham o tamanho equivalente ao de uma rotação dum parafuso correspondente em diâmetro; desse fato surgiu a designação de passo da hélice.

2.3 Hélice Selecionada: Detalhes e Justificativa

Como visto na seção 2.1, as hélices de 4 pás são comumente utilizadas em grandes embarcações, como navios, enquanto as hélices de 3 pás são mais comuns em embarcações de recreio. Adicionalmente, em embarcações de grande porte é comum o uso de hélices de passo variável, que oferecem maior flexibilidade e eficiência em diferentes condições de operação. Já as embarcações de recreio geralmente adotam hélices de passo fixo, devido à sua simplicidade e menor custo. Considerando que o objetivo deste estudo é prever a cavitação e prolongar a vida útil das hélices, torna-se evidente que as hélices de embarcações comerciais, com seu custo de produção mais elevado, são de maior interesse, tornando mais vantajoso prolongar sua vida útil. Considerando essa análise, foi escolhido como modelo de hélice para este trabalho o modelo batizado como *INSEAN E779A Marine Propeller* que já foi amplamente utilizado em estudos e análises por diversas razões técnicas e práticas, pois é bem documentado e possui uma vasta quantidade de dados experimentais e numéricos disponíveis na literatura. Isso facilita a validação de simulações computacionais, como as realizadas em CFD (Dinâmica de Fluidos Computacional). Mais que isso, esse modelo possui uma geometria que representa bem hélices genéricas utilizadas em embarcações comerciais. Isso a torna ideal para estudos de desempenho, análise de cavitação e otimização de hélices. A figura 3 ilustra a hélice *INSEAN E779A* e o quadro 1 contém os dados descritivos.

Figura 3 – Hélice *INSEAN E779A*.



Fonte: Salvatore, Pereira et al. (2006, p. 2).

Quadro 1 – Dados da hélice.

Parâmetro	**Valor**
Diâmetro do propulsor	227,27 mm
Número de pás	4
Razão de passo (nominal)	1,1
Ângulo de inclinação na ponta da pá	$4°48'$ (positivo)
Inclinação (nominal)	$4°35'$ (para frente)
Razão da área expandida	0,689
Diâmetro do cubo (na linha de ref. do propulsor)	45,53 mm
Comprimento do cubo	68,30 mm

Fonte: Shouman e Helal (2021, p. 153).

Legenda:

- **Diâmetro do propulsor:** Tamanho total da hélice, medido de ponta a ponta.
- **Razão de passo:** Representa a relação entre o deslocamento teórico da hélice e seu diâmetro.
- **Ângulo de inclinação na ponta da pá:** O ângulo de curvatura na extremidade das pás.
- **Inclinação:** A curvatura geométrica das pás em direção à linha de eixo, normalmente indicada como positiva (para frente) ou negativa (para trás).
- **Razão da área expandida:** Refere-se à proporção entre a área total das pás e a área de um círculo formado pelo diâmetro da hélice.
- **Diâmetro do cubo:** O tamanho do cubo da hélice na linha de referência do propulsor, que conecta as pás ao eixo.
- **Comprimento do cubo:** O comprimento do cubo da hélice ao longo de seu eixo.

2.4 Cavitação em Hélices de Embarcações

Cavitação é um fenômeno hidrodinâmico que ocorre quando a pressão local em um fluido cai abaixo de sua pressão de vapor, resultando na formação de bolhas de vapor que colapsam em áreas de maior pressão. Esse colapso gera forças intensas que podem causar danos estruturais às pás da hélice e comprometer o desempenho hidrodinâmico da embarcação (Bosschers, 2018). De acordo com Queiroz (2012), a cavitação decorre da transmissão de demasiada potência à hélice. Quando há alta velocidade de rotação ou quando há grande carga na hélice, ou seja, alto coeficiente de sustentação nas pás, a pressão na entrada de escoamento das pás pode atingir valores abaixo da pressão de vapor da água, criando uma bolsa de vapor, que impede a transmissão eficiente de força ao fluido. Este efeito dispersa energia, gera ruído na hélice em razão do colapso das bolhas de vapor,

resultando em erosão da superfície das pás devido às ondas de choque nessas superfícies. Ao aumentar a profundidade de submersão da hélice, a cavitação pode ser reduzida porque a pressão hidrostática afeta os valores da pressão de vapor. Esse comportamento está diretamente relacionado ao princípio de Bernoulli, segundo o qual, em um escoamento constante de fluido ideal, o aumento da velocidade do fluido implica uma diminuição da pressão estática. Dessa forma, quanto maior a rotação da hélice (RPM) e/ou maior a velocidade relativa do escoamento ao seu redor, maior é a probabilidade da pressão atingir valores inferiores à de vapor da água, promovendo o surgimento da cavitação.

O Princípio de Bernoulli, formulado por Daniel Bernoulli no século 18, descreve a conservação da energia em um fluido em movimento, estabelecendo uma relação entre pressão, velocidade e energia potencial gravitacional. A equação 1 representa a forma mais comum desse princípio.

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h = \text{constante} \tag{1}$$

Legenda:

- P = pressão estática (Pa)
- ρ = densidade do fluido (kg/m^3)
- v = velocidade do fluido (m/s)
- g = aceleração da gravidade (9,81 m/s^2)
- h = altura em relação a um nível de referência (m)
- $\frac{1}{2}\rho v^2$ = energia cinética por unidade de volume (pressão dinâmica)
- $\rho g h$ = energia potencial gravitacional por unidade de volume (pressão hidrostática)

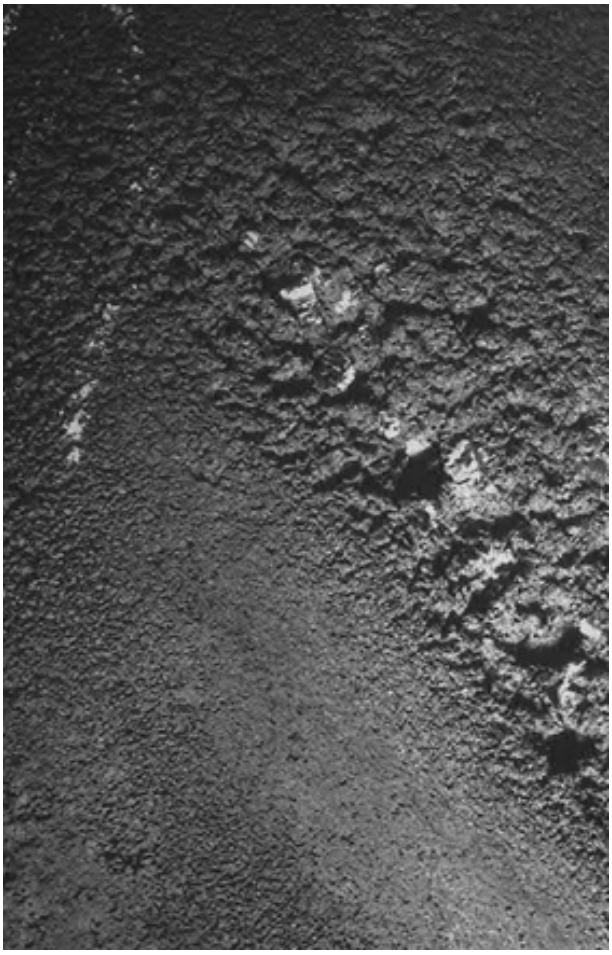
Essa equação mostra que a energia total por unidade de volume (pressão + cinética + potencial) permanece constante ao longo de uma linha de corrente:

Se a velocidade do fluido aumenta, a pressão ou a altura devem diminuir.

Se a altura aumenta (como em um tubo vertical), a pressão ou a velocidade podem diminuir.

Segundo Carlton (2018) os efeitos da cavitação são críticos pois reduzem a eficiência de propulsão, aumentam o desgaste do material e diminuem a vida útil das hélices. A compreensão das condições que favorecem a cavitação é essencial para otimizar projetos de hélices e evitar faixas de rotação críticas. A figura 4 ilustra o desgaste nas hélices.

Figura 4 – Danos Causados pela Cavitação



Fonte: Carlton (2018, p. 570).

2.5 Hidrodinâmica Aplicada à Propulsão por Hélices

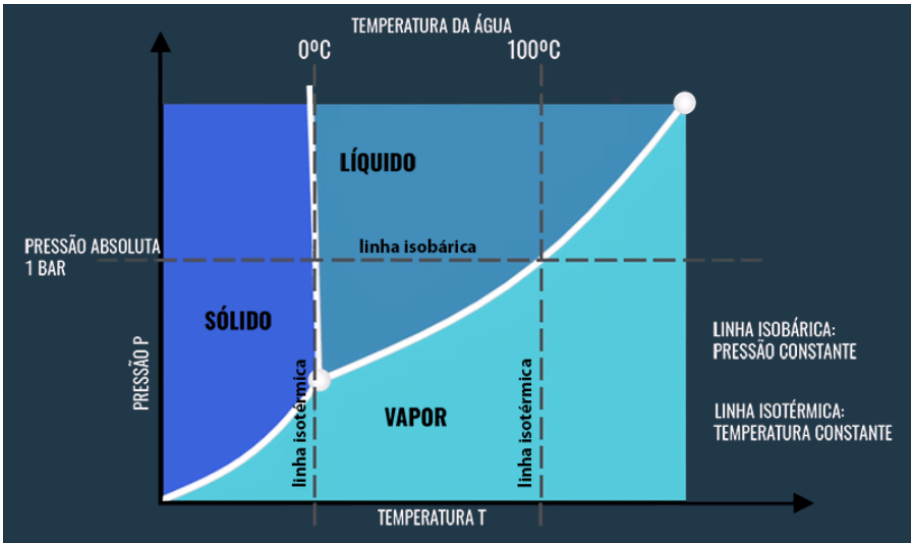
A hidrodinâmica estuda o comportamento de fluidos em movimento e sua interação com superfícies sólidas. A geometria do objeto é de grande importância para prever seu comportamento quando submerso e para cada geometria de hélice, há uma hidrodinâmica e aplicação diferentes (Renilson, 2015).

2.5.1 Pressão e Cavitação

A pressão de vapor é a pressão exercida pelo vapor de uma substância quando está em equilíbrio com sua fase líquida ou sólida, a uma temperatura específica. Essa pressão depende tanto da natureza da substância quanto da temperatura. Em geral, quanto maior a temperatura, maior será a pressão de vapor, uma vez que a substância tende a evaporar mais facilmente. A pressão de vapor, portanto, é uma medida que revela a tendência de uma substância se transformar em vapor.

No gráfico mostrado na figura 5, é possível observar que, para uma temperatura constante, a água pode estar ou não na fase de vapor, dependendo da pressão aplicada. Isso explica a formação de bolhas de vapor nas hélices, mesmo na ausência de aquecimento da água.

Figura 5 – Diagrama de Fases da Água.



Fonte: Tetralon.com.br (2023, sem paginação)

2.5.2 Regimes de Funcionamento da Hélice

De acordo com Carlton (2018), a pressão desempenha um papel crucial na formação da cavitação. Em hélices submersas, áreas de baixa pressão podem surgir na superfície das pás devido à alta velocidade de rotação, causando a vaporização do fluido. A hélice pode ser submetida a três principais regimes de funcionamento: sem cavitação, com cavitação e com supercavitação. Esses regimes são determinados pela variação da pressão nas lâminas da hélice em função da rotação e da interação com o fluido circundante. Esses três principais tipos de regimes de funcionamento são descritos a seguir:

Regime não cavitante: No regime sem cavitação, a pressão nas lâminas da hélice se mantém acima da pressão de vapor do fluido, o que evita a formação de bolhas de vapor. Nesse regime, a hélice opera de forma eficiente, sem perda de desempenho, e a interação entre a hélice e o fluido é estável. A eficiência de propulsão é alta, pois a energia gerada pela hélice é transmitida de forma eficaz ao fluido, sem a interferência dos efeitos negativos da cavitação. Este regime é desejável, pois garante o máximo desempenho da hélice.

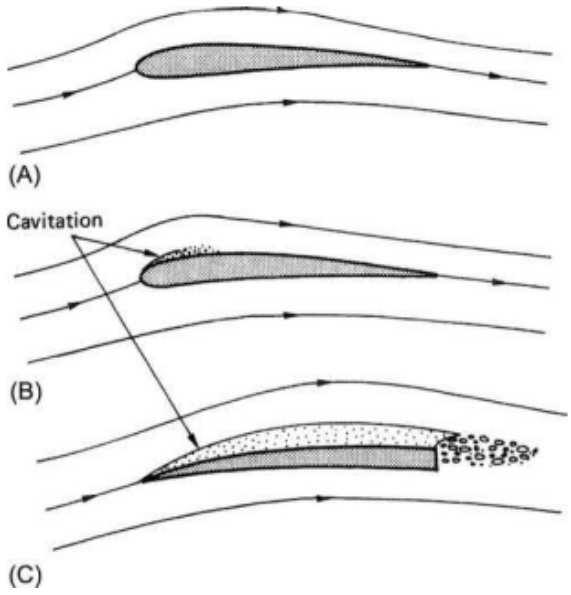
Regime com Cavitação À medida que a rotação da hélice aumenta, a pressão nas regiões próximas às lâminas pode cair abaixo da pressão de vapor do fluido, iniciando

o processo de cavitação. Nesse regime, bolhas de vapor começam a se formar em áreas de baixa pressão, o que pode resultar em uma redução na eficiência de propulsão. Além disso, a cavitação causa flutuações na pressão e gera ruídos, o que pode afetar a operação da embarcação. O impacto do colapso das bolhas de vapor nas superfícies das lâminas também pode causar danos estruturais, como erosão e desgaste. Esse regime é, portanto, indesejável, pois compromete tanto a eficiência quanto a durabilidade da hélice.

Regime de Supercavitação O regime de supercavitação ocorre quando a pressão na superfície da hélice cai ainda mais, a ponto de a cavitação não ocorrer apenas nas regiões de baixa pressão, mas se espalhar por toda a área da lâmina, formando uma bolha de vapor contínua ao redor da hélice. Nesse regime, a hélice opera dentro de uma bolha de vapor, o que reduz drasticamente a resistência do fluido e permite que a embarcação atinja velocidades muito altas. No entanto, a supercavitação é um fenômeno complexo que exige um design especializado da hélice e não é sempre desejável para todas as embarcações, uma vez que pode reduzir o controle e a manobrabilidade.

Esses três regimes demonstram como a cavitação, em suas diferentes formas, pode afetar o desempenho da hélice e da embarcação. A compreensão dessas condições é essencial para projetar hélices mais eficientes e operá-las dentro de faixas de rotação ideais, evitando os efeitos adversos da cavitação enquanto se maximiza a propulsão. Esses regimes podem ser vistos na figura 6.

Figura 6 – Diferentes Condições de Cavitação.



Fonte: Carlton (2018, p. 13).
Regimes de operação: **(A)** Regime não cavitante; **(B)** Regime com cavitação; **(C)** Regime de supercavitação.

2.5.3 Arrasto e Sustentação

Segundo Silva Gomes et al. (2011), o arrasto e a sustentação são esforços hidrodinâmicos que dependem de fatores de forma e são difíceis de identificar experimentalmente. A sustentação atua perpendicularmente à direção do fluxo, enquanto o arrasto atua paralelamente a essa direção. Hélices bem projetadas devem minimizar o arrasto e maximizar a sustentação, mesmo em condições adversas de operação.

2.6 Análise Numérica

A análise numérica refere-se ao uso de métodos matemáticos computacionais para resolver equações complexas que descrevem o escoamento de fluidos em torno da hélice. Em especial, utiliza-se a Dinâmica dos Fluidos Computacional do inglês *Computational Fluid Dynamics* (CFD) para simular o comportamento do fluido, (Lindau et al., 2005).

2.6.1 Métodos dos Volumes Finitos

O Método dos Volumes Finitos (MVF) constitui uma técnica numérica amplamente empregada na simulação computacional de fenômenos físicos, com destaque nas áreas da Mecânica dos Fluidos e da Transferência de Calor. Trata-se de uma abordagem essencial para a resolução de equações diferenciais parciais (EDPs), as quais modelam o comportamento de sistemas físicos complexos, como o escoamento de fluidos em condutos, a condução térmica em meios sólidos e, em contextos mais abrangentes, a propagação de ondas eletromagnéticas, (Eymard; Gallouët; Herbin, 2000).

O MVF baseia-se na subdivisão do domínio físico de interesse em uma estrutura de malha formada por pequenas regiões chamadas volumes de controle. Esses volumes podem assumir diferentes formas, conforme a complexidade e os requisitos do problema. Dentro de cada volume, as variáveis físicas, como velocidade, pressão e temperatura, são estimadas por valores médios, partindo do pressuposto de que essas grandezas permanecem praticamente constantes em cada subdivisão. Essa suposição torna-se válida quando a malha é suficientemente refinada, permitindo uma representação precisa das variações locais no domínio analisado.

O Método dos Volumes Finitos (MVF) resolve as equações diferenciais parciais por meio da aplicação do Princípio da Conservação, que afirma que a variação temporal de uma grandeza física em um volume de controle é determinada pelo fluxo líquido dessa grandeza através das suas faces. A partir desse princípio, obtém-se um sistema de equações algébricas para cada volume, que pode ser solucionado numericamente, possibilitando a

obtenção de aproximações das propriedades físicas em todo o domínio analisado (Eymard; Gallouët; Herbin, 2000).

2.6.2 Geração de Malha

A geração de malha no *ANSYS* consiste no processo de subdivisão do domínio geométrico de um modelo em pequenos elementos discretos, chamados de células ou elementos finitos. Essa discretização é fundamental para a realização de simulações numéricas, pois permite a aproximação das soluções das equações governantes do problema em cada um desses elementos. A qualidade da malha, incluindo o tamanho, a forma e a distribuição dos elementos, influencia diretamente a precisão e a eficiência computacional da análise. No ANSYS, a geração de malha pode ser controlada por parâmetros que ajustam o refinamento local ou global, visando equilibrar a acurácia dos resultados com o custo computacional (Ashgriz; Mostaghimi, 2002).

2.6.3 Equações Governantes

A análise das características do escoamento de um fluido requer a solução das equações de continuidade, quantidade de movimento e energia, conhecidas coletivamente como Equações de Navier-Stokes (Temam, 2024). Essas equações diferenciais parciais, formuladas no século 19, não possuem soluções analíticas gerais. Entretanto, é possível obter soluções aproximadas por meio da discretização e resolução numérica. As equações que governam o escoamento são adaptadas conforme as condições específicas do problema. As expressões mais comuns das equações são:

Equação da continuidade:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0$$

Equações da quantidade de movimento:

$$\nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}$$

$$\nabla \cdot (\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho g$$

$$\nabla \cdot (\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}$$

Equação da Energia:

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho e \vec{V}) = -p \vec{\nabla} \cdot \vec{V} + \vec{\nabla} \cdot (\lambda \nabla T) + q + \Phi$$

Onde:

- ρ é a densidade do fluido;
- u é a componente da velocidade na direção x;
- $\mathbf{V} = (u, v, w)$ é o vetor velocidade tridimensional;
- p é a pressão;
- h é a entalpia específica;
- e é a energia interna específica;
- T é a temperatura;
- λ é a condutividade térmica;
- q é a taxa de calor gerado ou absorvido por unidade de volume;
- Φ representa o trabalho realizado por forças externas por unidade de massa;
- τ é a tensão de cisalhamento.

3 Metodologia

O desenvolvimento deste trabalho segue uma abordagem estruturada e sequencial para alcançar os objetivos propostos. Inicialmente, a hélice subaquática escolhida para a análise, a *INSEAN E779A*, foi modelada no *software SolidWorks*, levando em consideração os parâmetros geométricos apresentados no quadro 1. A precisão nesta modelagem é essencial para que os resultados das simulações posteriores sejam realistas e representativos da realidade.

Após a conclusão da modelagem, a hélice foi exportada para o ambiente de simulação do *ANSYS*, especificamente para a seção *Geometry*. Neste ponto, foi utilizado o *SpaceClaim*, uma ferramenta dentro do *ANSYS* que permite a edição e o refinamento da geometria do modelo. O objetivo desta etapa foi garantir que a geometria estivesse otimizada para a simulação, minimizando erros e assegurando que a análise fosse realizada de maneira eficiente e precisa. O refinamento da geometria também evita problemas durante a geração da malha, um dos passos cruciais para o sucesso da simulação.

Uma vez que a geometria esteja devidamente refinada, foi necessário criar uma cápsula que envolvesse a hélice. Esse envoltório tem a função de delimitar a região onde o fluido será escoado durante a simulação. No *ANSYS*, a definição clara da entrada e da saída do fluido é um passo fundamental, pois estas condições de contorno são essenciais para garantir a precisão dos resultados.

Em seguida, foi gerada uma malha utilizando a ferramenta de *mes*h do *ANSYS*. A criação da malha tem como objetivo aproximar a geometria real da hélice da estrutura computacional utilizada nas simulações. O sucesso dessa etapa depende da geração de uma malha suficientemente refinada para captar as variações de pressão e temperatura de forma precisa, sem que haja um aumento significativo no custo computacional.

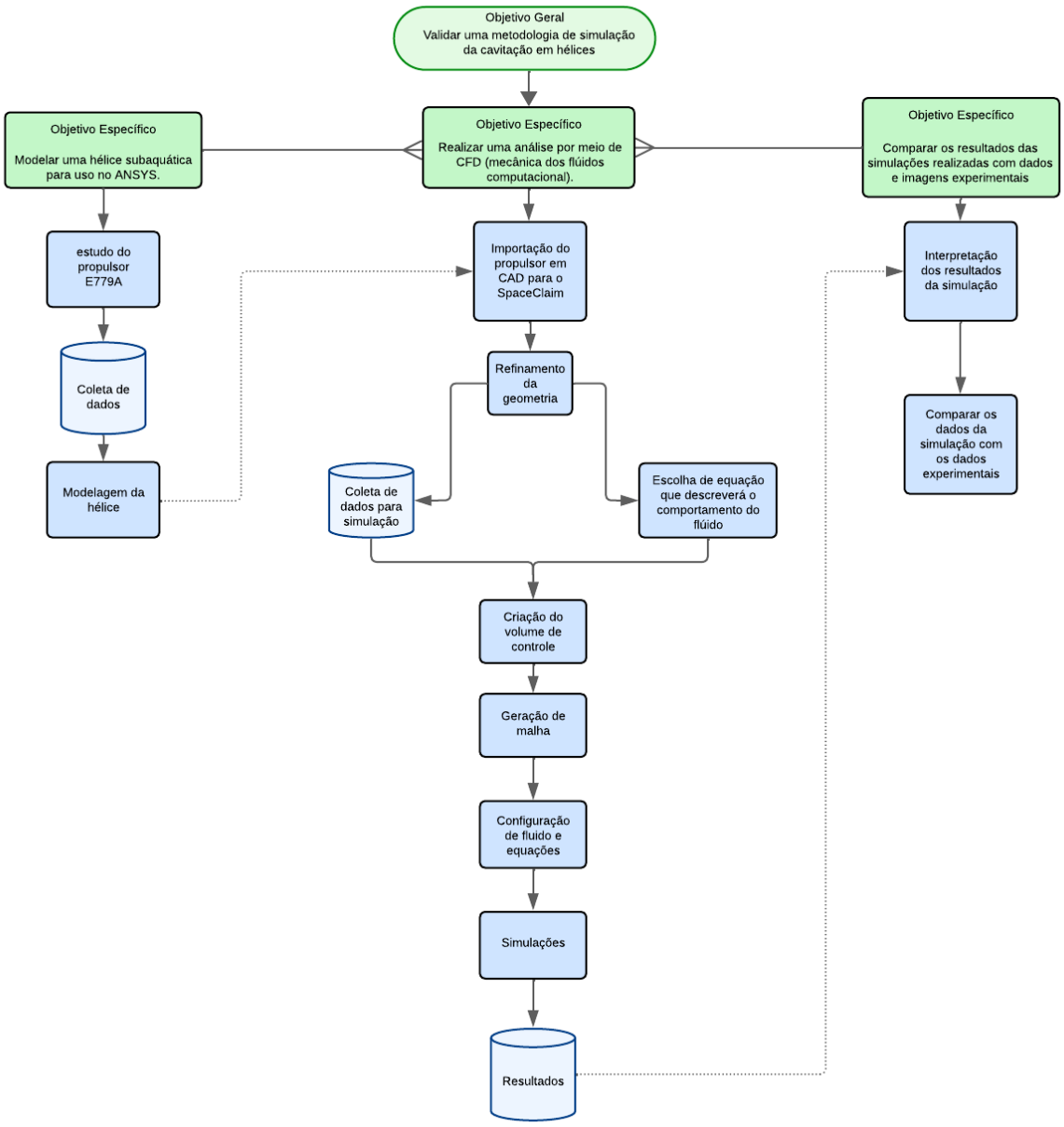
Foi então configurado o fluido a ser simulado: água em duas fases (líquida e vapor), permitindo a análise dos efeitos associados à cavitação. A simulação busca identificar as condições em que a cavitação ocorre, avaliando a temperatura e a pressão no líquido ao redor da hélice. A presença de vapor indica a formação do fenômeno.

Para fazer uma análise visual sobre a presença de vapor, a estratégia foi a utilização de malhas de contorno (*contour plots*), utilizando escalas de cores que evidenciem a presença de vapor por meio de tons quentes. Essa visualização permite constatar graficamente a ocorrência da cavitação e facilita a comparação qualitativa com os dados experimentais.

Ao final da simulação os resultados foram analisados com o objetivo de verificar se a ocorrência de cavitação está condizente com com dados experimentais do propulsor,

de modo a validar a eficácia da metodologia empregada.

Figura 7 – Fluxograma da Metodologia.



Fonte: O autor (2025).
o fluxograma foi criado através da ferramenta *LUCID*.

3.1 Delimitação do Estudo

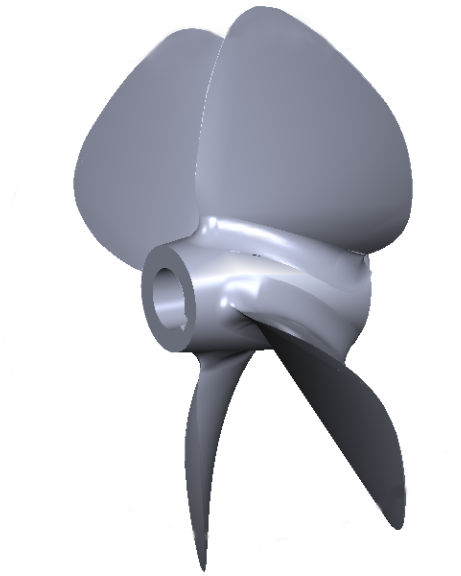
O presente estudo restringe-se a uma análise específica da cavitação em uma hélice, realizada por meio de simulações computacionais. A investigação terá caráter qualitativo,

consistindo na comparação visual das imagens geradas pelas simulações com imagens oriundas de experimentos conduzidos em condições reais. Não serão considerados dados numéricos ou quantitativos sobre a cavitação, como índices ou parâmetros medidos experimentalmente. Dessa forma, o trabalho limita-se à identificação e avaliação preliminar do fenômeno, configurando uma etapa inicial para pesquisas futuras que possam incorporar análises quantitativas e validação experimental.

3.2 Modelagem da hélice

Seguindo os dados com as dimensões apresentadas no quadro 1, foi modelada a hélice no *software SolidWorks*. A figura 8 ilustra o resultado da modelagem.

Figura 8 – *INSEAN E779A* modelagem vista isométrica.



Fonte: O autor (2025).

3.3 Análise Usando Mecânica dos Fluidos Computacional (CFD)

A simulação de escoamentos turbulentos pode ser realizada por meio de diferentes técnicas numéricas, que adotam distintas abordagens para representar os fenômenos envolvidos. A primeira abordagem é a solução numérica direta (DNS, do *inglês Direct Numerical Simulation*), que resolve todas as escalas turbulentas diretamente, mas com grande custo computacional. Também existe a simulação de grandes escalas (LES, do inglês *Large Eddy Simulation*), que combina métodos determinísticos e estatísticos para representar as grandes estruturas turbulentas enquanto modela as menores. Finalmente, estão os métodos baseados na média das equações de Navier-Stokes, conhecidos como

RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*), que utilizam modelos estatísticos para representar os efeitos da turbulência, (Chung, 2002).

A simulação numérica da cavitação em hélices de embarcações requer modelos turbulentos que equilibrem fidelidade e viabilidade computacional. Métodos de DNS (Simulação Numérica Direta) resolvem todas as escalas turbulentas, mas tornam-se inviáveis devido à altíssima exigência de malha e tempo de cálculo. Já LES (Simulação de Grandes Escalas) captura mais detalhes turbulentos que o RANS, mas ainda demanda malhas muito refinadas e pequenos passos de tempo, elevando drasticamente o custo computacional, (Oprea; Bulten, 2009). Para o projeto de hélices que exige inúmeras simulações de desempenho e cavitação, é crucial encontrar um equilíbrio entre acurácia computacional e tempo; por isso, o modelo RANS é amplamente usado na indústria naval por oferecer um compromisso razoável, ele exige malhas moderadas e passos de tempo maiores, reduzindo o custo computacional, enquanto mantém precisão aceitável para fenômenos de cavitação.

3.3.1 Equação Governante

A técnica RANS possui 3 modelos de equações, são eles: K_e e K_w e $SSTK_w$. O modelo K_e pertence à classe de modelos de duas equações, nos quais são adicionadas duas equações de transporte para duas grandezas turbulentas, nesse caso, as duas grandezas turbulentas são a energia cinética turbulenta K e a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta e. O modelo K_e é mais largamente empregado e validado, e está incorporado na maioria dos códigos de CFD sendo considerado padrão para aplicações gerais da indústria (ANSYS, 2018). Por outro lado, (Castro, 2006), define que a grande desvantagem do modelo K_e é que suas constantes foram determinadas para escoamentos na camada limite, sem gradientes adversos de pressão. O modelo K_e é amplamente utilizado em fluxos isotrópicos ou em escoamentos relativamente estáveis, sendo robusto em grandes escalas, mas com limitações em fluxos com gradientes de velocidade elevados. Já o modelo K_w se destaca em simulações de escoamentos próximos a superfícies, como em análises de cavitação em hélices, devido à sua maior sensibilidade às condições de contorno e melhor desempenho em regiões com gradientes de velocidade acentuados.

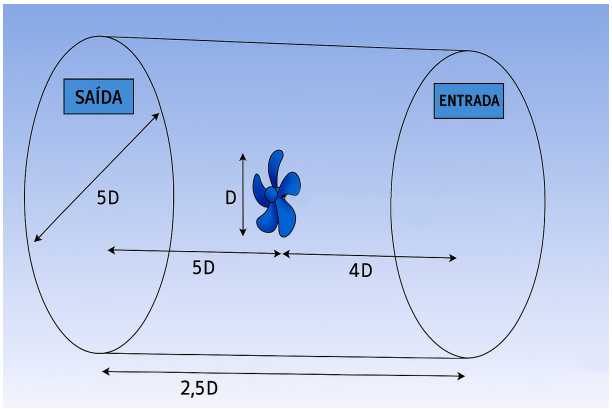
O modelo K_w também pertence à classe de modelos de duas equações, uma para a energia cinética turbulenta (K) e outra para a frequência específica de dissipação (w). Esse modelo destaca-se por apresentar melhor desempenho na modelagem de escoamentos próximos às paredes e em regiões com separação do fluxo, sendo mais adequado para capturar efeitos das regiões próximas da camada limite. No entanto, a desvantagem é que, em algumas situações, ele pode ter dificuldades em simular escoamentos livres e tende a apresentar menor precisão na modelagem de escoamentos que ocorrem longe das paredes (Mahu; Popescu, 2011).

O modelo $SSTK_w$ do inglês, *Shear Stress Transport*, é um modelo de turbulência desenvolvido para combinar as vantagens dos modelos K_e e K_w. Ele utiliza o modelo K_w na região próxima às paredes, onde este apresenta maior precisão, e gradualmente faz a transição para o modeloK_e nas regiões afastadas da parede, onde este é mais robusto. Essa formulação híbrida melhora a capacidade de prever corretamente a separação do escoamento induzida por gradientes adversos de pressão, além de fornecer maior estabilidade numérica e melhor desempenho em escoamentos complexos. Por esses motivos, o modelo $SSTK_w$ é amplamente utilizado em aplicações envolvendo superfícies aerodinâmicas e hidrodinâmicas, como hélices, turbinas e asas (Ozden; Tari, 2010). Portanto, este foi o modelo adotado no presente estudo.

3.3.2 Domínio Computacional

Para simulações envolvendo fluidos incompressíveis, é fundamental que o domínio computacional seja significativamente maior do que a geometria de interesse, a fim de garantir a precisão dos resultados. Após a realização de diversos testes de convergência, identificou-se que a configuração mais eficiente em termos de custo computacional e tempo de convergência consiste em posicionar a entrada do domínio a uma distância de 4 vezes o diâmetro da hélice, a saída a uma distância de 5 vezes e o diâmetro com tamanho de 5 vezes esse mesmo diâmetro. A figura 9 ilustra o domínio computacional.

Figura 9 – Ilustração do domínio computacional.



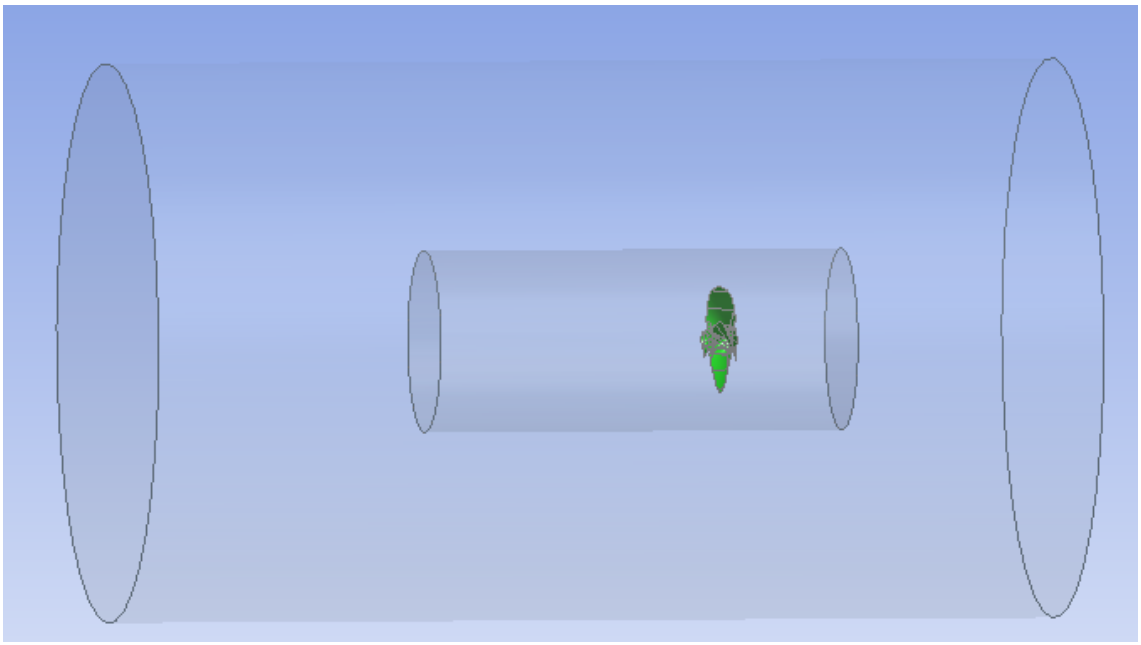
Fonte: O autor (2025).
Onde **D** corresponde ao diâmetro da hélice.

3.3.3 Malha

Optou-se por um refinamento ortogonal da malha com elementos de no máximo 2 milímetros nas regiões críticas próximas à hélice, visando capturar com maior precisão os gradientes de pressão e velocidade. Para as regiões periféricas, menos sensíveis às variações do escoamento, foi adotado um tamanho de elemento de 7 milímetros, a fim

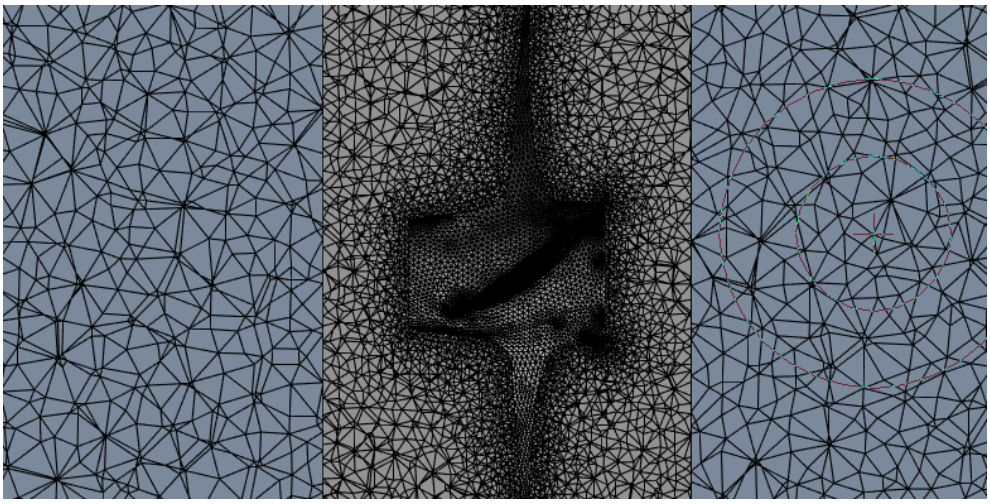
de otimizar o custo computacional sem comprometer a qualidade da simulação. A escolha pela qualidade ortogonal é uma prática comum em estudos envolvendo fluidos. No entanto, a decisão de adotar um refinamento de 2 e 7 milímetros é subjetiva e fica a critério do autor da simulação, essa decisão considera o equilíbrio entre a qualidade da representação do escoamento e o esforço computacional, uma vez que refinamentos mais intensivos demandam maior capacidade de processamento. O presente modelo totalizou o número de 1.621.549 (um milhão, seiscentos e vinte e um mil, quinhentos e quarenta e nove) elementos. As figuras 10, 11 e 12 ilustram esse refinamento.

Figura 10 – Aparência da Hélice translucida.



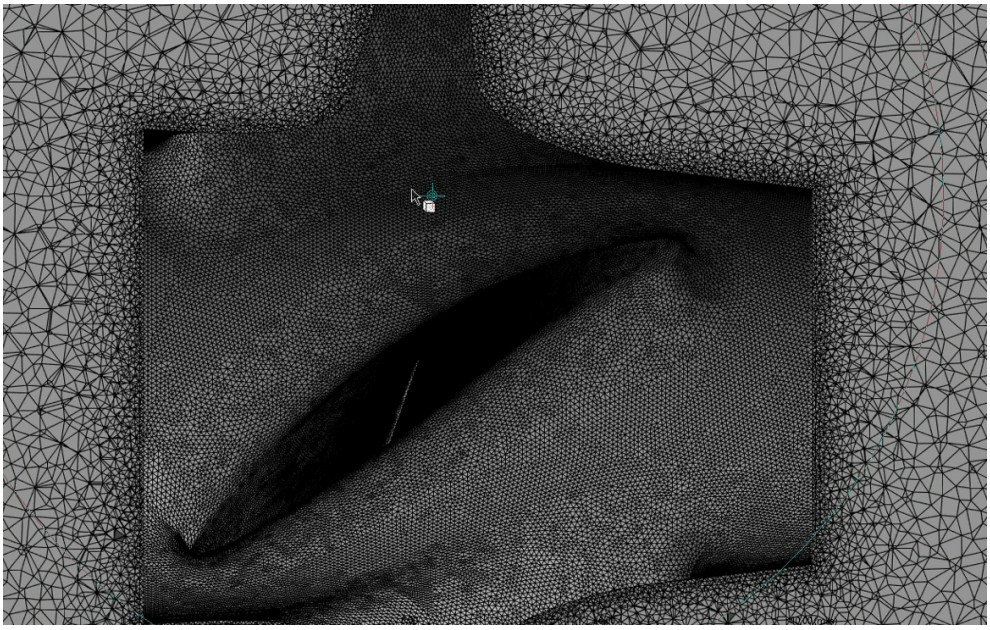
Fonte: O autor (2025).

Figura 11 – Hélice e região periférica.



Fonte: O autor (2025).

Figura 12 – Refinamento local da hélice.



Fonte: O autor (2025).

3.3.4 Condições de contorno

A simulação numérica foi realizada em uma faixa de coeficientes de avanço correspondente àquela utilizada nos experimentos conduzidos por Pereira, Salvatore e Di Felice (2004) e Salvatore, Streckwall e Van Terwisga (2009), com o objetivo de verificar qualitativamente a ocorrência de cavitação nas mesmas condições operacionais.

Os valores atribuídos ao coeficiente de avanço são descritos no quadro 2:

Quadro 2 – Relação entre Coeficiente de Avanço e Número de Cavitação.

Coeficiente de Avanço	**Índice de cavitação**
J = 0,90	$\sigma = 4,455$
J = 0,83	$\sigma = 2,063$
J = 0,77	$\sigma = 1,783$
J = 0,71	$\sigma = 1,763$

Fonte: Dados retirados dos estudos de Pereira, Salvatore e Di Felice (2004) e Salvatore, Streckwall e Van Terwisga (2009).

Legenda:

- **Coeficiente de avanço (J):** Relação entre a velocidade de avanço e a rotação da hélice.
- **Índice de cavitação (σ):** Parâmetro adimensional que indica a suscetibilidade à cavitação.

Para obter esses valores, são utilizadas várias rotações da hélice (1500 rpm, 1800 rpm, 2400 rpm e 3000 rpm). O quadro 3 contém todas as variáveis de cada execução de simulação.

Quadro 3 – Parâmetros ultilizado nas simulações.

n (rps)	v_a **(m/s)**	**J**	σ
25	5,10	0,90	4,455
30	5,65	0,83	2,063
40	6,99	0,77	1,783
50	8,00	0,71	1,763

Fonte: O autor (2025).
Dados retirados dos estudos de Pereira, Salvatore e Di Felice (2004) e Salvatore, Streckwall e Van Terwisga (2009).

Legenda:

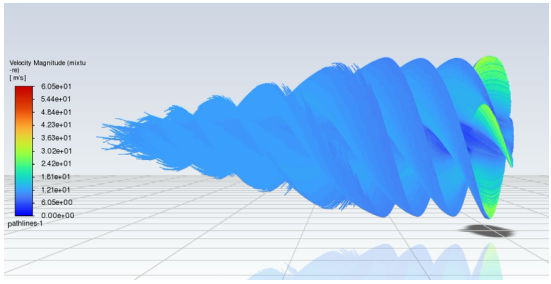
- n **(rps):** Rotação da hélice em rotações por segundo.
- v_a **(m/s):** Velocidade de avanço da hélice.
- J**:** Coeficiente de avanço.
- σ**:** Índice de cavitação.

A velocidade v_a, apresentada no quadro 3 com os parâmetros das simulações, foi utilizada como a velocidade de entrada do escoamento, sendo definida no *ANSYS* como *velocity inlet*, bem como as velocidades de rotação da hélice também descrita no mesmo quadro.

4 Resultados

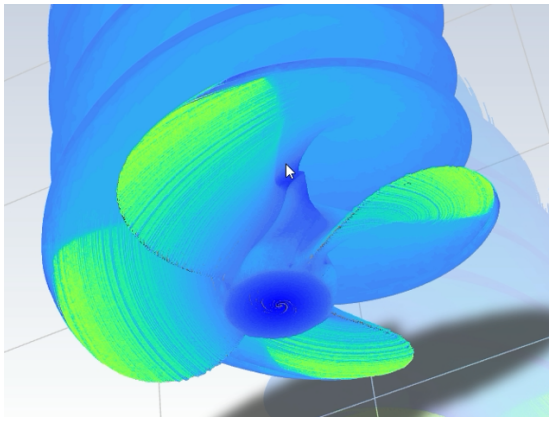
Como discutido na seção 2.4, a cavitação ocorre quando a pressão local de um fluido cai abaixo de sua pressão de vapor. No caso das hélices, esse fenômeno tende a se manifestar, principalmente, nas regiões de ataque das pás. Durante as simulações computacionais, torna-se mais evidente por que essas áreas são as mais propensas à cavitação, especialmente quando se utilizam ferramentas do *ANSYS* para plotar linhas de velocidade. Dessa forma, ao analisar as figuras 13 e 14, que mostram linhas de velocidade do escoamento, observa-se que as regiões de maior velocidade concentram-se nas bordas de ataque do propulsor, o que justifica a maior suscetibilidade dessa área à formação de cavitação.

Figura 13 – Linhas de velocidade do escoamento - vista lateral.



Fonte: O autor (2025).

Figura 14 – Linhas de velocidade do escoamento - vista isométrica.



Fonte: O autor (2025).

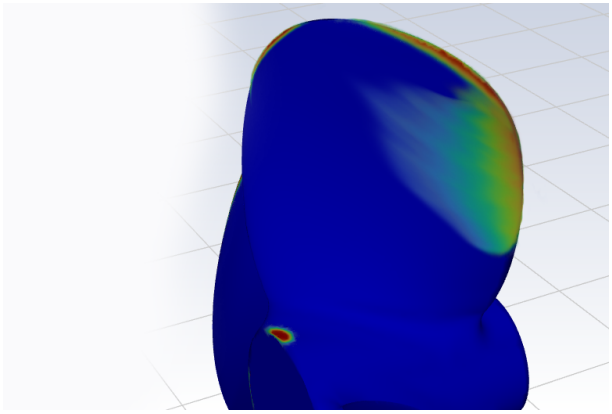
Os resultados obtidos por meio das simulações apresentaram-se compatíveis com os dados experimentais encontrados por Pereira, Salvatore e Di Felice (2004) e Salvatore, Streckwall e Van Terwisga (2009), uma vez que a ocorrência e a ausência do fenômeno verificaram-se sob as mesmas condições em ambos os casos. Essa concordância evidencia a confiabilidade da metodologia empregada no presente estudo.

4.1 Apresentação dos resultados das simulações

Conforme abordado na seção 3.3, a hélice experimental foi submetida a diferentes valores de coeficiente de avanço (J) e rotações por segundo (rps), conforme estudos de Pereira, Salvatore e Di Felice (2004) e Salvatore, Streckwall e Van Terwisga (2009). Esses valores estão contidos no quadro 3. De modo análogo, nas simulações computacionais, a hélice modelada foi exposta aos mesmos parâmetros operacionais. Observou-se que a

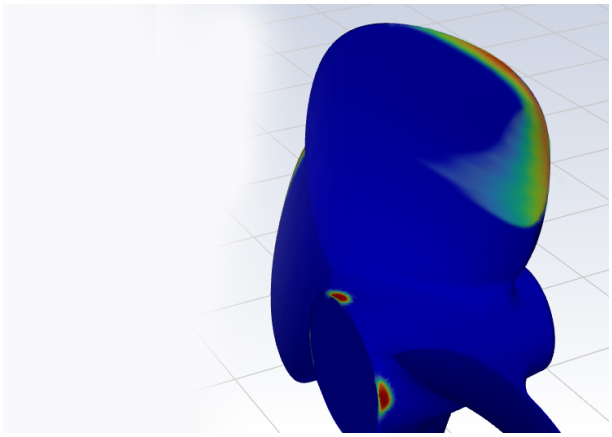
cavitação foi detectada significativamente somente para valores abaixo de $J = 0,9$, enquanto, para valores de J superiores a $0,9$, o fenômeno evidenciou-se qualitativamente indetectável. As Figuras 15 e 16 correspondem, respectivamente, aos regimes operacionais com $J = 0,71$ e $J = 0,77$. Nessas condições, observa-se que a cavitação apresenta-se de forma mais extensa, sendo qualitativamente mais evidente em ambas as representações. Nessas figuras, as regiões destacadas por colorações mais quentes indicam zonas de cavitação. Pode-se observar, ainda, que a cavitação nesses regimes não se restringe somente às regiões periféricas da hélice, estendendo-se por uma área consideravelmente ampla ao longo da superfície da lâmina.

Figura 15 – Resultado para J=0,71 / 3000 rpm.



Fonte: O autor (2025).

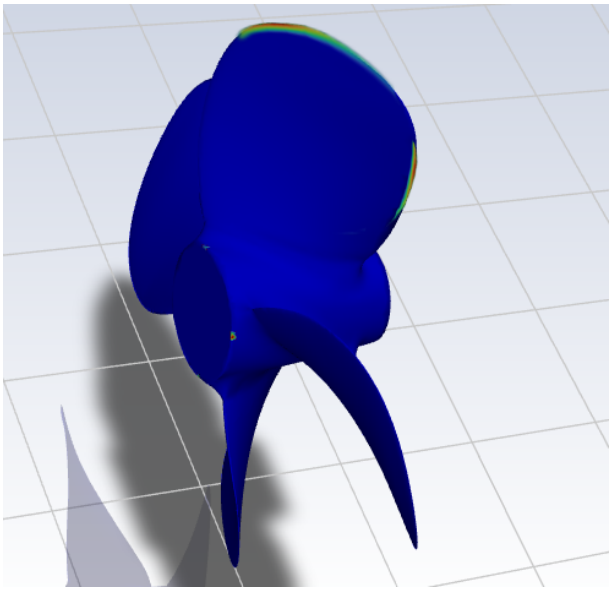
Figura 16 – Resultado para J=0,77 / 2400 rpm.



Fonte: O autor (2025).

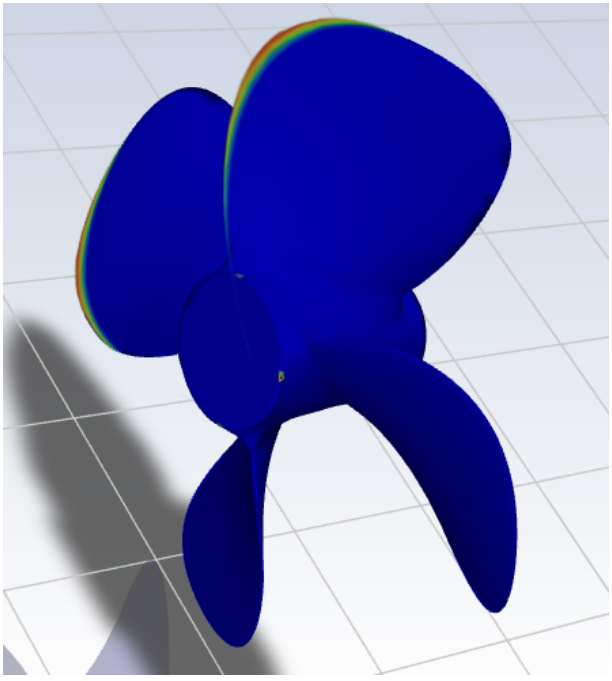
Já as figuras 17 e 18 ilustram, respectivamente, os valores de $J = 0,83$ e $J = 0,9$, nesses regimes operacionais, verifica-se que a cavitação não se propaga por áreas mais extensas da lâmina, permanecendo predominantemente restrita às regiões de ataque. Ademais, mesmo nessas regiões, a intensidade da cavitação é notavelmente reduzida em comparação aos casos anteriores, e a Figura 19 representa os cenários simulados para valores de $J > 0,9$.

Figura 17 – Resultado para J=0,83 / 1800 rpm.



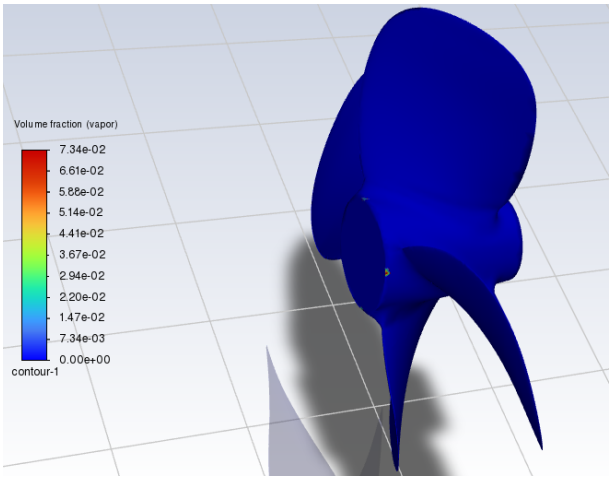
Fonte: O autor (2025).

Figura 18 – Resultado para J=0,9 / 1500 rpm.



Fonte: O autor (2025).

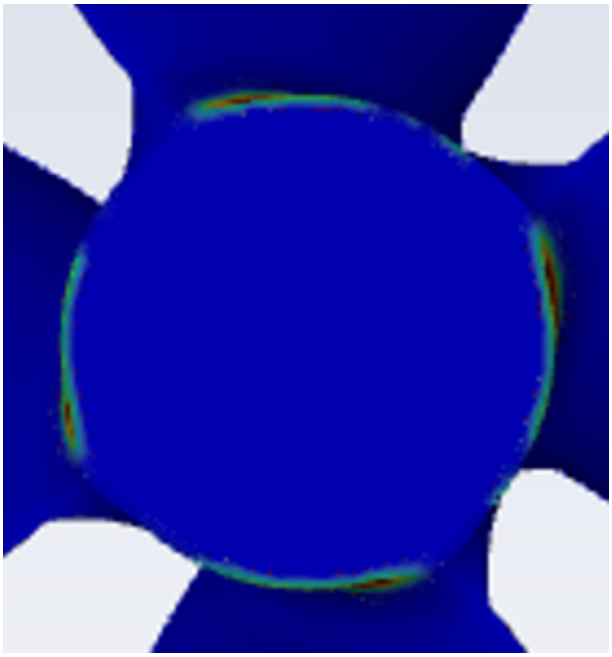
Figura 19 – Resultado para valores de J maior que 0,9



Fonte: O autor (2025).

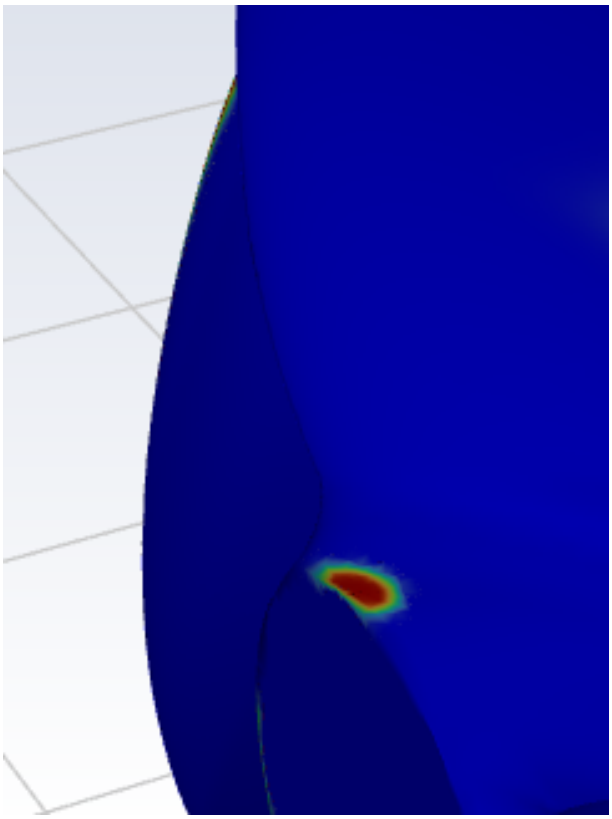
É importante destacar que a região evidenciada com cavitação nas figuras 20 e 21, na porção central da hélice simulada, não possui correspondência física relevante no experimento. Isso ocorre porque, na simulação, a hélice foi representada isoladamente, sem o acoplamento ao eixo central utilizado no modelo experimental. Em razão dessa ausência, a geometria simulada apresenta cantos vivos e descontinuidades na região central, características que favorecem artificialmente a formação de cavitação nesse ponto. Assim, a presença de cavitação nessa área específica não reflete o comportamento real do escoamento ao redor do propulsor e, portanto, não deve ser considerada na análise dos resultados. Essa limitação é inerente à simplificação geométrica adotada na modelagem numérica e não compromete a validade das comparações realizadas nas regiões funcionais da hélice.

Figura 20 – Cavitação artificial (em razão da ausência de eixo de acoplamento).



Fonte: O autor (2025).

Figura 21 – Outro ângulo da cavitação artificial.



Fonte: O autor (2025).

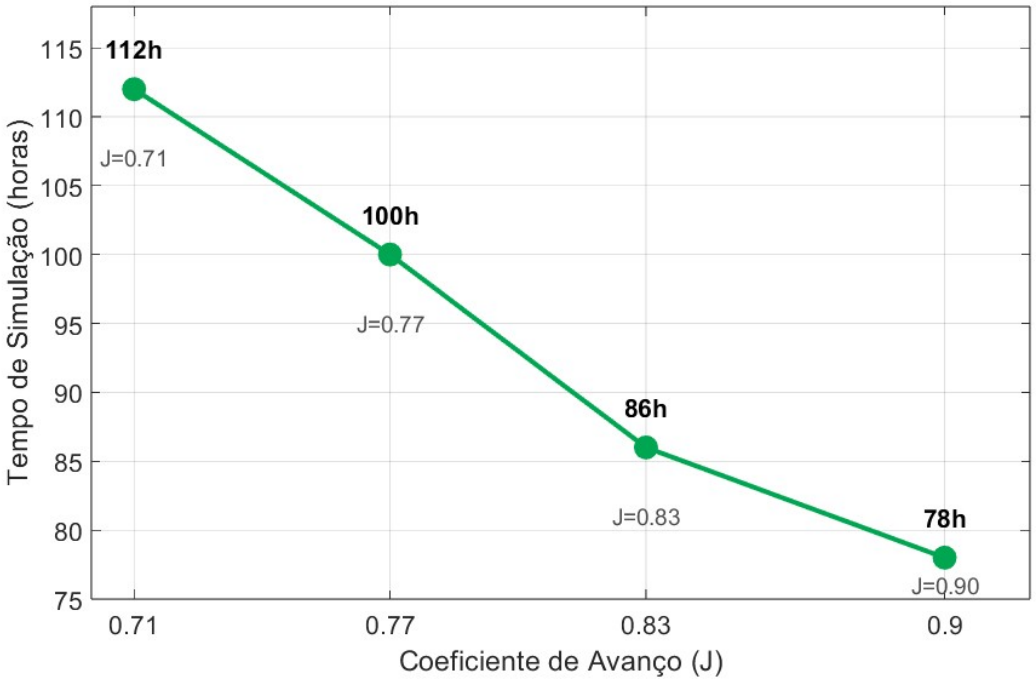
4.2 Tempo de simulação

Durante a realização das simulações no ANSYS, foi observado que o tempo computacional variou significativamente conforme os parâmetros de operação da hélice, especialmente em relação ao coeficiente de avanço (J). Constatou-se que simulações com altas rotações e baixos valores do coeficiente de avanço apresentaram maior tempo de processamento, enquanto simulações com baixos valores de RPM e coeficientes de avanço mais elevados exigiram menor tempo computacional.

Essa diferença pode ser explicada pelo comportamento do escoamento ao redor da hélice. Em altas rotações e baixos coeficientes de avanço, o escoamento relativo sobre as pás se torna mais intenso, gerando gradientes de pressão e velocidade mais pronunciados. Esse tipo de condição favorece o surgimento de cavitação e aumenta a complexidade da simulação, exigindo que o *solver* (componente que resolve numericamente as equações de *Navier-Stokes*) do *ANSYS* capture variações rápidas e localizadas nos campos de pressão, densidade e fração de vapor. Como consequência, o número de iterações para a convergência aumenta, bem como o tempo total de simulação.

Por outro lado, quando o coeficiente de avanço é elevado e a rotação da hélice é mais baixa, o escoamento tende a ser mais suave e estável, com gradientes menos acentuados. Nessas condições, a ocorrência de cavitação é menos provável, o que reduz a necessidade de cálculos associados à mudança de fase do fluido (de líquido para vapor) e diminui a quantidade de iterações necessárias para atingir a convergência, resultando em um tempo de simulação menor. A figura 22 ilustra a relação entre o tempo de simulação e o coeficiente de avanço.

Figura 22 – Variação do Tempo de Simulação em Função do Coeficiente de Avanço.



Fonte: O autor (2025).

4.3 Comparação com dados experimentais

Com o intuito de facilitar a análise comparativa, a hélice utilizada nas simulações foi posicionada em um ângulo visual aproximado àquele registrado nas imagens experimentais disponíveis nos estudos de Pereira, Salvatore e Di Felice (2004) e Salvatore, Streckwall e Van Terwisga (2009). Ressalta-se, ainda, que as condições operacionais correspondentes a cada combinação de número de avanço (J) e rotação (RPM) encontram-se descritas no quadro 3.

A Figura 23 apresenta uma comparação entre o registro experimental da hélice (à esquerda) e os resultados obtidos por meio da simulação numérica realizada neste estudo (à direita), ambos sob as mesmas condições operacionais. Observa-se que, nessas condições, ocorre o fenômeno de cavitação tanto na imagem experimental quanto na simulação. Na visualização numérica, as regiões destacadas por colorações mais quentes indicam zonas de cavitação, cuja distribuição espacial apresenta notável semelhança com o padrão observado experimentalmente. Essa correspondência, tanto em termos de forma quanto de localização, evidencia que o modelo computacional empregado é capaz de representar qualitativamente o comportamento físico do escoamento cavitante.

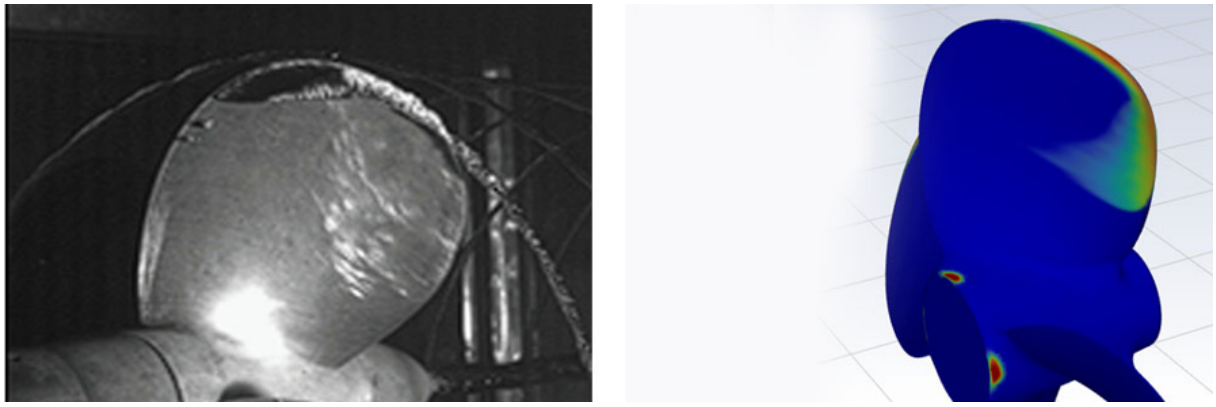
Figura 23 – Verificação visual da primeira simulação (J=0,71 e RPM=3000).



Fonte: O autor (2025).

A figura 24 apresenta o segundo conjunto comparativo entre os dados experimentais e os resultados obtidos. Em ambas as abordagens, verifica-se a ocorrência de cavitação, evidenciada pelas regiões claras na imagem experimental e pelas áreas com coloração quente na simulação. Observa-se uma boa concordância visual quanto à forma e à localização do fenômeno. Nota-se, ainda, que a extensão da cavitação foi levemente recuada em comparação ao caso anterior, o que pode ser atribuído ao aumento do coeficiente de avanço e à redução da rotação da hélice. Essa mudança operacional influenciou diretamente o regime de escoamento, resultando em uma menor intensidade cavitante, o que reforça a sensibilidade do modelo numérico às variações nas condições de contorno.

Figura 24 – Verificação visual da segunda simulação (J=0,77 e RPM=2400).

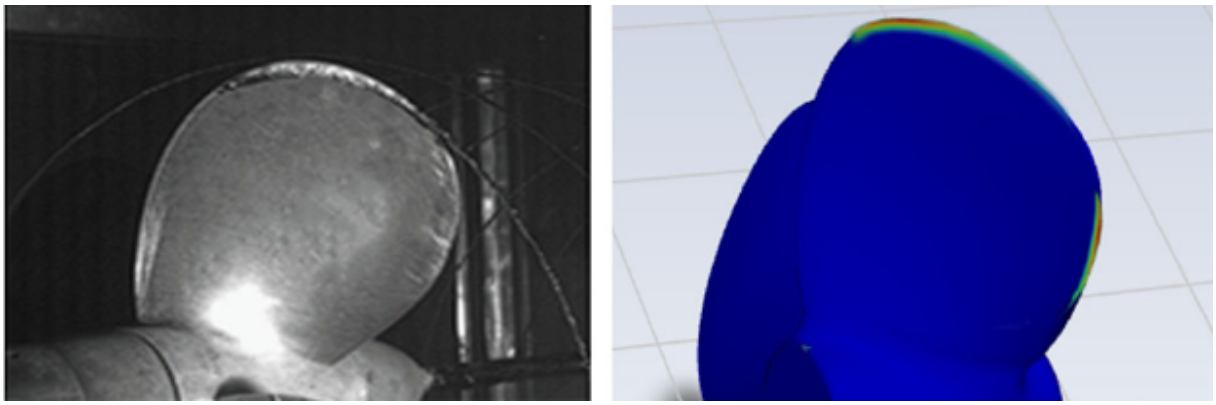


Fonte: O autor (2025).

O terceiro caso analisado apresentou as alterações visuais mais significativas dentre os cenários comparados. Observou-se um recuo expressivo da zona de cavitação, que passou a concentrar-se predominantemente nas extremidades das pás, sem se propagar para outras regiões do propulsor. Ainda assim, verifica-se uma boa concordância qualitativa entre os dados experimentais e os resultados obtidos na simulação realizada neste estudo,

tanto em termos de localização quanto de padrão da cavitação observada. A figura 25 ilustra esse cenário.

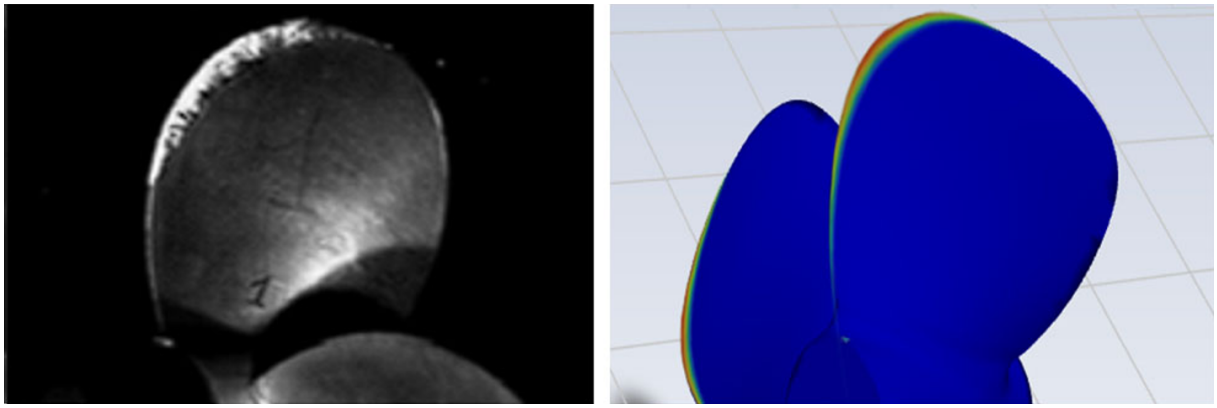
Figura 25 – Verificação visual da terceira simulação (J=0,83 e RPM=1800).



Fonte: O autor (2025).

Último caso comparado também apresentou regiões onde ocorreu cavitação, e uma ótima semelhança com os registros experimentais.

Figura 26 – Verificação visual da quarta simulação (J=0,9 e RPM=1500).



Fonte: O autor (2025).

5 Discussões

Ao comparar os resultados obtidos nas simulações com os registros experimentais, observa-se que a simulação correspondente ao menor valor de rotação (1500 rpm) foi aquela que apresentou a melhor concordância qualitativa com os padrões de cavitação observados no experimento. Essa maior semelhança pode ser atribuída a uma combinação de fatores relacionados tanto à física do escoamento quanto às limitações inerentes à modelagem computacional.

Em primeiro lugar, deve-se considerar que, em regimes de rotação mais baixa, o escoamento em torno das pás da hélice tende a apresentar características mais estáveis. Com a redução do número de rotações, há uma diminuição na intensidade dos gradientes de pressão e de velocidade, implicando em um ambiente de simulação mais controlado do ponto de vista numérico. Isso permite que os algoritmos utilizados nos métodos de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) consigam capturar com maior precisão os efeitos físicos envolvidos na formação de cavitação. Em contrapartida, simulações realizadas em regimes de alta rotação frequentemente enfrentam maiores desafios relacionados à estabilidade numérica, à necessidade de malhas mais refinadas em regiões críticas e à ocorrência de artefatos que não refletem fielmente a realidade física observada nos experimentos.

Além disso, a cavitação em rotações mais elevadas tende a ocorrer de maneira mais intensa, abrangente e, por vezes, imprevisível, especialmente quando a modelagem da geometria apresenta simplificações relevantes. No presente estudo, por exemplo, a hélice foi simulada de forma isolada, sem a presença do eixo ou do cubo central que a conecta à embarcação. Essa ausência cria regiões com geometria artificialmente abrupta (cantos vivos), que favorecem o surgimento de cavitação não representativa, especialmente sob altas cargas hidrodinâmicas. Em baixa rotação, esses efeitos são significativamente mitigados, permitindo que a cavitação observada seja mais fiel ao comportamento real do fluido em torno da hélice.

Do ponto de vista físico, também é importante considerar a influência do coeficiente de avanço (J) sobre o fenômeno de cavitação. Com o aumento de J, que ocorre quando a velocidade de avanço da embarcação é maior em relação à rotação da hélice, há uma tendência de redução da cavitação. Isso se traduz em menores quedas de pressão nas superfícies das pás e, portanto, menor propensão à formação de cavidade de vapor. No caso da simulação com 1500 rpm e J=0,9, as condições são mais suavizadas, permitindo que a formação de cavitação ocorra de forma mais concentrada, discreta e próxima ao padrão experimental, ao invés de se alastrar de maneira exagerada, como ocorre nos casos com menor J e maior RPM. Portanto, a melhor correspondência observada entre simulação e experimento no caso de menor rotação não é fruto do acaso, mas reflete uma

interação mais equilibrada entre a representação física do escoamento, a fidelidade geométrica do modelo computacional e a estabilidade dos métodos numéricos utilizados. Este resultado destaca a importância de escolher cuidadosamente os parâmetros operacionais ao se realizar simulações com objetivo comparativo, especialmente quando se trata de fenômenos sensíveis como a cavitação.

5.1 Limitações do Estudo e Propostas para Trabalhos Futuros

Embora este estudo tenha adotado uma abordagem robusta ao utilizar simulações numéricas em regime transiente para analisar a ocorrência de cavitação na hélice *INSEAN E779A*, algumas limitações devem ser consideradas quanto à abrangência e profundidade dos resultados obtidos.

A principal limitação reside na ausência da mensuração direta do índice de cavitação (variável adimensional), esse parâmetro é usado para caracterizar a suscetibilidade do escoamento ao fenômeno cavitante. Embora os valores de cavitação utilizados nas condições de contorno tenham sido extraídos da literatura, o estudo não realizou o cálculo específico desse índice com base nas pressões obtidas durante as simulações devido ao refinamento da malha ser insuficiente para a obtenção de valores numéricos de cavitação. A determinação local ou global do índice de cavitação permitiria uma análise mais quantitativa e criteriosa, fortalecendo a correlação entre os dados simulados e os fenômenos físicos observados. Adicionalmente, vale ressaltar a importância de considerar, em estudos futuros, a possibilidade de realizar simulações utilizando dados representativos da água salgada. A composição da água do mar difere significativamente da água doce, especialmente em termos de densidade, viscosidade e pressão de vapor, parâmetros que influenciam diretamente o comportamento do escoamento e a ocorrência da cavitação. Assim, a inclusão da água salgada como condição de contorno em simulações CFD ampliaria a aplicabilidade dos resultados, tornando-os mais representativos para operações marítimas reais e possibilitando uma avaliação mais precisa da suscetibilidade da hélice à cavitação em ambientes oceânicos.

Além disso, recomenda-se a investigação comparativa entre diferentes modelos de turbulência, com o objetivo de identificar aquele que apresenta maior concordância com dados quantitativos disponíveis na literatura.

Diante dessas limitações, propõem-se, como perspectivas para trabalhos futuros:

- Aumentar o refinamento da malha nas zonas de interesse (como bordas das pás e regiões de baixa pressão), a fim de obter dados mais precisos de pressão e permitir a análise quantitativa da cavitação.

- Realizar uma análise quantitativa dos efeitos da cavitação, incluindo a avaliação de perdas de empuxo, torque, eficiência hidrodinâmica e possíveis danos estruturais.
- Investigar o impacto de diferentes modelos de turbulência na previsão da cavitação, visando melhorar a precisão das simulações em regimes complexos.
- Realizar simulações com dados para água salgada.

Referências

ANSYS, INC. **ANSYS fluent user's guide, release 19.0**. ANSYS Inc, Canonsburg, 2018.

ASHGRIZ, Nasser; MOSTAGHIMI, Javad. Fluid flow handbook. **An introduction to computational fluid dynamics**, University of Toronto. Canada: McGraw-Hill Professional, 2002.

BOSSCHERS, Johan. **Propeller tip-vortex cavitation and its broadband noise**, 2018.

CAPTAINPROPELLER. **Hélices de 3 pás vs. 4 pás: Qual é a diferença entre hélices de barco?** Acessado em: 1 jan. 2025. Disponível em: <https://captainpropeller.com/pt/blog/four-blade-prop-vs-three/>.

CARLTON, John. **Marine propellers and propulsion**. Butterworth-Heinemann, 2012.

_____._____. Butterworth-Heinemann, 2018.

CASTRO, Carlos José Rocha de Oliveira. **Simulação da interação casco-propulsor de uma embarcação usando mecânica dos fluidos computacional (CFD).** 2006. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.

CHUNG, TJ. **Computational fluid dynamics**. Cambridge university press, 2002.

EYMARD, Robert; GALLOUËT, Thierry; HERBIN, Raphaèle. Handbook of numerical analysis. **Finite volume methods**, Elsevier, 2000.

IMPERIAL, Marinha. **Hélice**. Acessado em: 01 jan. 2025. 2025. Disponível em: <https://marinaimperial.com.br/helice/#:~:text=H%C3%A1%20basicamente%20dois%20tipos%2C%20sendo,e%20h%C3%A9lice%20de%20passo%20control%C3%A1vel>.

LINDAU, Jules W et al. **Propeller cavitation breakdown analysis**, 2005.

MAHU, Răzvan; POPESCU, Florin. **Mathematical Modeling in Civil Engineering**. NREL PHASE VI ROTOR MODELING AND SIMULATION USING ANSYS FLUENT 12.1., 2011.

NAUTICEXPO. **Como escolher uma hélice**. Acessado em: 12 jan. 2025. sem paginação. Disponível em: <https://guide.nauticexpo.com/pt/como-escolher-um-helice/>.

OPREA, Iulia; BULTEN, Norbert. **RANS simulations of a 3D sheet-vortex cavitation**, 2009.

OZDEN, Ender; TARI, Ilker. Shell side CFD analysis of a small shell-and-tube heat exchanger. **Energy conversion and management**, Elsevier, 2010.

PEREIRA, Francisco; SALVATORE, Francesco; DI FELICE, Fabio. **Measurement and modeling of propeller cavitation in uniform inflow**. J. Fluids Eng., 2004.

QUEIROZ, Fernando Ribeiro. **Avaliação de cavitação em turbinas hidráulicas por emissão acústica**. Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

RENILSON, M. Submarine Hydrodynamics. **SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology**, 2015.

ROCHA, Lucas Machado. **Estudo e dimensionamento de hélices para propulsão aeronáutica**. 2019. Tese (Doutorado) – Master's thesis, Federal University of Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brazil.

SALVATORE, Francesco; PEREIRA, Francisco et al. **Description of the INSEAN E779A propeller experimental dataset**. Institute of Marine Engineering CNR-INM: Singapore, 2006.

SALVATORE, Francesco; STRECKWALL, Heinrich; VAN TERWISGA, Tom. **Propeller cavitation modelling by CFD-results from the VIRTUE 2008 Rome workshop**. In: PROCEEDINGS of the first international symposium on marine propulsors, Trondheim, Norway. 2009.

SAMPAIO, Marcos Guedes Vaz. **Uma contribuição à história dos transportes no Brasil: a companhia baiana de navegação a vapor (1839-1894)**. 2006. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.

SHOUMAN, Mohamed R; HELAL, Mohamed M. **Influence of Marine Propeller Geometry on Turbulence Model Selection for CFD Simulations**. Marine Technology Society Journal, Marine Technology Society, 2021.

SILVA GOMES, Samuel da et al. **Controle do veículo subaquático tatuí utilizando estrutura variável**. VETOR-Revista de Ciências Exatas e Engenharias, 2011.

TEMAM, Roger. **Navier–Stokes equations: theory and numerical analysis**. American Mathematical Society, 2024.

TETRALON.COM.BR. 2023. Disponível em: <`Tetralon.com.br`>.