

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA NAVAL

DIOGO SGROTT

ANÁLISE COMPUTACIONAL (CFD) EM HÉLICE DANIFICADO POR CAVITAÇÃO E  
BIOINCRUSTAÇÃO

Joinville

2017

DIOGO SGROTT

ANÁLISE COMPUTACIONAL (CFD) EM HÉLICE DANIFICADO POR CAVITAÇÃO E  
BIOINCRUSTAÇÃO

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Naval, no Curso de Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina, no Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Dr. Thiago Pontin Tancredi

Joinville

2017

DIOGO SGROTT

**ANÁLISE COMPUTACIONAL (CFD) EM HÉLICE DANIFICADO POR  
CAVITAÇÃO E BIOINCRUSTAÇÃO**

Este trabalho foi julgado e aprovado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Naval pela comissão examinadora e pelo curso de graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville, 21 de junho de 2017

---

Prof. Luis Fernando Peres Calil, Dr. Eng.  
Coordenador do Curso

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

Prof. Thiago Pontin Tancredi, PhD.  
Orientador

---

Prof. Lucas Weihmann, Dr. Eng.

---

Prof. André Mitsuo Kogishi, Dr. Eng.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por todas as bênçãos concedidas nos momentos de angústia e dificuldade.

Aos meus pais, Josemir e Teresinha, por todo apoio concedido, paciência e esforços imensuráveis de me ajudar a concluir a minha formação acadêmica.

A minha irmã e cunhado, Roger e Michele, que junto com meus pais não mediram esforços em me ajudar nos momentos em que mais precisei.

À minha família pela união e apoio concedido.

A todos os professores por ajudar a construir minha vida acadêmica, ceder conhecimento e por estarem dispostos a prestar auxílio a qualquer momento.

Agradeço a empresa CD-Adapco por ceder a licença acadêmica a universidade, pois sem esse apoio não seria possível realizar o presente trabalho.

A todos os meus amigos, ou irmãos da vida, que de certa forma foram essenciais para minha formação pessoal, pois estiveram comigo em momentos de alegrias e tristezas. Mesmo não interferindo na produção deste trabalho, os mesmos foram decisivos em me apoiar nas decisões em que tive que tomar, conselhos e convivência. Por serem muitos nomes, vou citá-los como grupo de amigos: amigos do ensino médio, de Melbourne/FL, de New Orleans/LA, da Família Cuervo, da Escola Municipal Prof<sup>a</sup>. Virgínia Soares, aos meus amigos da dança de salão e aos amigos que fiz durante o curso de Eng. Naval. Espero que todos se sintam representados, porque a ajuda de vocês foi realmente indispensável para mim.

Ao meu orientador, Thiago Pontin Tancredi, por assumir o compromisso de ocupar o pouco tempo que tinha para me ajudar a cumprir essa etapa da minha vida. O senhor foi extremamente importante ao me orientar, corrigir meus erros, me mostrar a direção certa a seguir e em todas as conversas que tivemos.

Por fim, agradeço a todos que de certa forma foram essenciais na minha formação e na formação deste trabalho.

## RESUMO

A propulsão é um dos principais sistemas associados ao desempenho de uma embarcação. Mesmo que existam outras formas de propulsão, tais como o vento e o jato-bomba, o propulsor do tipo hélice persiste como o mais utilizado na indústria naval. Um hélice mal dimensionado pode diminuir drasticamente a eficiência propulsiva de uma embarcação de grande porte. Existem diversos problemas que podem resultar de um mal dimensionamento, tais como baixa eficiência, vibração e cavitação. Todavia, mesmo com um dimensionamento correto, durante a vida útil do hélice, tanto a cavitação do fluido, quanto microrganismos presentes na água, podem atacar a superfície do propulsor, modificando a geometria e a rugosidade, eventualmente reduzindo sua eficiência propulsiva e causando desbalanceamento. Em vista disso, esse trabalho tem como objetivo verificar os efeitos de cavitação e incrustação (adicionando rugosidade ao propulsor), quantificando a perda de eficiência propulsiva em virtude dos defeitos superficiais oriundos da cavitação e bioincrustação. A metodologia do trabalho consiste em modelagens de hélices da Série B-Wageningen, e a simulação utilizando um modelo completo de *Computational Fluid Dynamics* (CFD) através da abordagem *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS), considerando o modelo de turbulência K-Epsilon. Qualitativamente, os resultados obtidos foram muito consistentes com a literatura, apresentando redução de eficiência em todas as situações realizadas com acréscimo de rugosidade. No entanto, quantitativamente o modelo carece de malhas mais refinadas e padrões de rugosidade compatíveis com os observados em trabalhos de campo, conforme discutido na seção de resultados.

**Palavras-chave:** Hélice, Cavitação, Bioincrustação, Série B-Wageningen.

## ABSTRACT

The propulsion is one of the main systems associated to the performance of a ship. Even if there are plenty of other ways to generate propulsion, as wind or water-jet, the propeller is still the most used in the naval industry. A no well dimensioned propeller may decrease drastically the propulsive efficiency of a large vessel. There are many problems that can be resulted from a poor project, such as low efficiency, vibration and cavitation. However, even a correct scaling, while the lifespan of a propeller, either the fluid cavitation or microorganisms present in water, may attack the surface of the propeller. This attack can change the geometry and the roughness of the propeller, and eventually, reduce its propulsive efficiency and cause imbalance. Because of that, this paper will verify the effects of the cavitation and biofouling (adding roughness to the propeller) quantifying the decrease of propulsive efficiency caused by the surface imperfections made by cavitation and biofouling. The methodology of this paper consists in modeling propellers from Wageningen B-Series and simulating a complete model of Computational Fluid Dynamics (CFD) through the Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) method. This simulation considers a K-Epsilon turbulence method. Qualitatively, the obtained results were consistent to the literature since it presents reduction of efficiency in all situations created with the roughness added. Notwithstanding, quantitatively, the model needs a more refined mesh and patterns of roughness comparable to the ones observed in the fieldwork, according to the notes discussed in the results section.

**Keywords:** Propeller, Cavitation, Biofouling, Wageningen B-Series.

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

apud	Citado por, conforme ou segundo.
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
IMO	International Maritime Organization
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i>
DFC	Dinâmica dos Fluidos Computacional
MVF	Método dos Volumes Finitos
TBT	Tributilestanho
$K_T$	Coefficiente de empuxo
$K_Q$	Coefficiente de torque
$\eta_0$	Eficiência propulsiva em águas abertas
J	Coefficiente de avanço
BAR	Razão entre a área expandida do hélice pela área desenvolvida
Z	Número de pás de um hélice
P/D	Razão entre o passo e o diâmetro do hélice
n	Rotação do fluido ao redor do hélice (Hz)
D	Diâmetro do hélice
T	Empuxo
Q	Torque
$V_A$	Velocidade de avanço
$\rho$	Densidade ( $\text{kg/m}^3$ )
NA	Não aplicável

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – ROV avaliando condição de hélice .....	14
Figura 2 – Ilustração das partes que integram um hélice .....	19
Figura 3 – Representação das áreas que compõem um hélice.....	20
Figura 4 – Diâmetro e passo de um hélice: (a) Hélice com diâmetro de 13,75 polegadas e passo de 21 polegadas; (b) Hélice com diâmetro de 16 polegadas e passo de 13 polegadas. ....	21
Figura 5 – Ângulo de Inclinação: (a) Pás sem inclinação; (b) Pás com inclinação de 15°.....	21
Figura 6 – Ilustração dos tipos de hélice: (a) Redondo; (b) Banana; (c) Veloz; (d) Econômico; (e) Kaplan; (f) Superfície.....	23
Figura 7 – Ilustração da distribuição de pressões em um hélice .....	24
Figura 8 – Tipos de cavitação em propulsores: (a) Cavitações do tipo folha e nuvem, com influência de cavitação tipo vórtice na ponta da pá. (b) Cavitação tipo bolha no meio do comprimento da pá. (c) Cavitação tipo vórtice no cubo do hélice. (d) Cavitação tipo vórtice junto da ponta das pás. ....	25
Figura 9 – Incrustação na região submersível de uma embarcação .....	27
Figura 10 – Resumo das etapas para formação de bioincrustação .....	28
Figura 11 – Gráfico B4.45 (Séries B-Wageningen) .....	32
Figura 12 – Superfícies bioincrustadas artificialmente: (a) Superfície bioincrustada com graxa de lítio impregnado com terra de diatomáceas com 1mm de espessura; (b) Superfície bioincrustada com cimento com uma menor espessura.....	35
Figura 13 – Hélice sob efeito de cavitação na ponta das pás .....	36
Figura 14 – Exemplo de dados de entrada no programa PropCad para geração de um hélice da série B-Wageningen. ....	37
Figura 15 – Ligação da nuvem de pontos do hélice através do programa Rhinoceros. ....	38
Figura 16 – Vista projetada do hélice após criação das superfícies. ....	38
Figura 17 – Fechamento da superfície vazada da pá do hélice. ....	39
Figura 18 – Finalização do hélice.....	39
Figura 19 – Criação dos planos 3D sobre a superfície de uma das pás do hélice .....	40
Figura 20 – Defeitos criados sobre a superfície da pá.....	41
Figura 21 – Dimensões do tanque de simulação .....	42
Figura 22 – Fluxograma da metodologia de simulação de um hélice em águas abertas através do programa STAR-CCM+ .....	43
Figura 23 – Categorias de possíveis erros de superfície.....	44
Figura 24 – Diagnóstico de erro no programa CFD .....	45
Figura 25 – Determinação das regiões rotacionais e estáticas.....	45
Figura 26 – Divisão das superfícies e curvas da região rotacional.....	46
Figura 27 – Divisão da região estática.....	47
Figura 28 – Refinamento da malha em regiões da extremidade e defeitos das pás. ....	49
Figura 29 – Representação do tanque criado para simulação.....	50
Figura 30 – Gráfico $K_T$ , $K_Q$ e $\eta_0$ .....	53



Figura 31 – Comparação do erro relativo em função de J.....	56
Figura 32 – Detalhe do hub na entrada do fluido .....	57
Figura 33 – Representação gráfica entre a teoria da Série B e as simulações de um hélice perfeito e um hélice cavitado .....	60
Figura 34 – Comparação entre teoria e simulações do hélice P/D=1.0; BAR=0.8; Z=4 .....	60
Figura 35 – Representação gráfica entre a teoria da Série B e as simulações de um hélice perfeito e um hélice cavitado .....	61
Figura 36 – Comparação entre teoria e simulações do hélice P/D=1.4; BAR=0.8; Z=4 .....	61
Figura 37 – Representação gráfica entre a teoria da Série B e as simulações de um hélice perfeito e um hélice cavitado .....	62
Figura 38 – Comparação entre teoria e simulações do hélice P/D=1.0; BAR=1.0; Z=4 .....	62
Figura 39 – Representação gráfica entre a teoria da Série B e as simulações de um hélice perfeito e um hélice cavitado .....	63
Figura 40 – Comparação entre teoria e simulações do hélice P/D=1.4; BAR=1.0; Z=4 .....	63
Figura 41 – Representação gráfica entre a teoria da Série B e as simulações de um hélice perfeito e um hélice bioincrustado .....	66
Figura 42 – Comparação entre teoria e simulações do hélice P/D=1.0; BAR=0.8; Z=4 .....	66
Figura 43 – Representação gráfica entre a teoria da Série B e as simulações de um hélice perfeito e um hélice bioincrustado .....	67
Figura 44 – Comparação entre teoria e simulações do hélice P/D=1.4; BAR=0.8; Z=4 .....	67
Figura 45 – Representação gráfica entre a teoria da Série B e as simulações de um hélice perfeito e um hélice bioincrustado .....	68
Figura 46 – Comparação entre teoria e simulações do hélice P/D=1.0; BAR=1.0; Z=4 .....	68
Figura 47 – Representação gráfica entre a teoria da Série B e as simulações de um hélice perfeito e um hélice bioincrustado .....	69
Figura 48 – Comparação entre teoria e simulações do hélice P/D=1.4; BAR=1.0; Z=4 .....	69
Figura 49 – Gráfico da eficiência em função de J entre o hélice com parâmetros: P/D=1.0; BAR=0.8; Z=4 cavitados e bioincrustados .....	70
Figura 50 – Gráfico da eficiência em função de J entre o hélice com parâmetros: P/D=1.4; BAR=0.8; Z=4 cavitados e bioincrustados .....	70
Figura 51 – Gráfico da eficiência em função de J entre o hélice com parâmetros: P/D=1.0; BAR=1.0; Z=4 cavitados e bioincrustados .....	71
Figura 52 – Gráfico da eficiência em função de J entre o hélice com parâmetros: P/D=1.4; BAR=1.0; Z=4 cavitados e bioincrustados .....	71
Figura 53 – Exemplo de parametrização da região rotacional .....	77
Figura 54 – Tabulação dos valores encontrados para cada coeficiente.....	78
Figura 55 – Comparação dos coeficientes de empuxo e torque entre os hélices danificados ..	82
Figura 56 – Comparação dos coeficientes de empuxo e torque entre os hélices danificados ..	82
Figura 57 – Comparação dos coeficientes de empuxo e torque entre os hélices danificados ..	83
Figura 58 – Comparação dos coeficientes de empuxo e torque entre os hélices danificados ..	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Range de aplicação da Série B-Wageningen .....	31
Tabela 2 – Parâmetros dos hélices utilizados como objeto de estudo .....	37
Tabela 3 – Redução e adição de massa causados pela cavitação e bioincrustação, respectivamente .....	41
Tabela 4 – Parametrização das sub-regiões da região estática .....	48
Tabela 5 – Parametrização do J e VA.....	51
Tabela 6 – Parâmetros dos hélices analisados .....	54
Tabela 7 – Comparação entre teoria e simulação do hélice: P/D=1.0; BAR=0.8; Z=4 .....	55
Tabela 8 – Comparação entre teoria e simulação do hélice: P/D=1.4; BAR=0.8; Z=4 .....	55
Tabela 9 – Comparação entre teoria e simulação do hélice: P/D=1.0; BAR=1.0; Z=4 .....	55
Tabela 10 – Comparação entre teoria e simulação do hélice: P/D=1.4; BAR=1.0; Z=4 .....	55
Tabela 11 – Comparação entre o hélice 1 livre de defeitos superficiais e o hélice 1 com defeitos oriundos da cavitação .....	58
Tabela 12 – Comparação entre o hélice 2 livre de defeitos superficiais e o hélice 2 com defeitos oriundos da cavitação .....	58
Tabela 13 – Comparação entre o hélice 3 livre de defeitos superficiais e o hélice 3 com defeitos oriundos da cavitação .....	58
Tabela 14 – Comparação entre o hélice 4 livre de defeitos superficiais e o hélice 4 com defeitos oriundos da cavitação .....	59
Tabela 15 – Comparação entre o hélice 1 livre de defeitos superficiais e o hélice 1 com defeitos oriundos da bioincrustação.....	64
Tabela 16 – Comparação entre o hélice 2 livre de defeitos superficiais e o hélice 2 com defeitos oriundos da bioincrustação.....	64
Tabela 17 – Comparação entre o hélice 3 livre de defeitos superficiais e o hélice 3 com defeitos oriundos da bioincrustação.....	65
Tabela 18 – Comparação entre o hélice 4 livre de defeitos superficiais e o hélice 4 com defeitos oriundos da bioincrustação.....	65
Tabela 19 – Comparação entre teoria e simulação do hélice nº 1 .....	79
Tabela 20 – Comparação entre teoria e simulação do hélice nº 2 .....	79
Tabela 21 – Comparação entre teoria e simulação do hélice nº 3 .....	79
Tabela 22 – Comparação entre teoria e simulação do hélice nº 4 .....	79
Tabela 23 – Comparação entre o hélice 1 livre de defeitos superficiais e o hélice 1 com defeitos oriundos da cavitação .....	80
Tabela 24 – Comparação entre o hélice 2 livre de defeitos superficiais e o hélice 2 com defeitos oriundos da cavitação .....	80
Tabela 25 – Comparação entre o hélice 3 livre de defeitos superficiais e o hélice 3 com defeitos oriundos da cavitação .....	80
Tabela 26 – Comparação entre o hélice 4 livre de defeitos superficiais e o hélice 4 com defeitos oriundos da cavitação .....	80
Tabela 27 – Comparação entre o hélice 1 livre de defeitos superficiais e o hélice 1 com defeitos oriundos da bioincrustação.....	81

Tabela 28 – Comparação entre o hélice 2 livre de defeitos superficiais e o hélice 2 com defeitos oriundos da bioincrustação.....	81
Tabela 29 – Comparação entre o hélice 3 livre de defeitos superficiais e o hélice 3 com defeitos oriundos da bioincrustação.....	81
Tabela 30 – Comparação entre o hélice 4 livre de defeitos superficiais e o hélice 4 com defeitos oriundos da bioincrustação.....	81

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	16
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>17</b>
2.1	HÉLICE	17
2.1.1	Componentes do Propulsor	18
2.1.2	Dimensões de um hélice	19
2.1.3	Tipos de hélice	22
2.2	FENÔMENOS QUE ALTERAM A RUGOSIDADE SUPERFICIAL DO PROPULSOR	23
2.2.1	Cavitação	23
2.2.2	Bioincrustação	26
2.2.2.1	Processo de adesão e colonização da bioincrustação	27
2.2.2.2	Bioincrustação em estruturas submersas	28
2.3	MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS	29
2.4	SÉRIES B-WAGENINGEN	30
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>34</b>
3.1	METODOLOGIA PARA CRIAÇÃO DE UM MODELO CAD DE UM HÉLICE BASEADO NA SÉRIE B-WAGENINGEN	36
3.1.1	Metodologia usada para danificar um hélice	40
3.2	METODOLOGIA PARA SIMULAÇÃO DE UM HÉLICE EM ÁGUAS ABERTAS ATRAVÉS DO PROGRAMA STAR-CCM+	42
3.2.1	Importação da geometria no programa STAR-CCM+	43
3.2.2	Verificando defeitos superficiais	43
3.2.3	Determinação das regiões de análise do hélice	45
3.2.4	Modelo matemático de turbulência	48
3.2.5	Criação da malha	48
3.2.6	Variação dos valores de J para cada simulação	50
3.2.7	Simulação	52
3.2.8	Pós simulação	52
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>54</b>
4.1	COMPARAÇÃO ENTRE TEORIA E SIMULAÇÃO	54

4.2	COMPARAÇÃO ENTRE UM HÉLICE LIVRE DE DEFEITOS SUPERFICIAIS E UM HÉLICE COM DEFEITOS ORIUNDOS DA CAVITAÇÃO .....	58
4.3	COMPARAÇÃO ENTRE UM HÉLICE LIVRE DE DEFEITOS SUPERFICIAIS E UM HÉLICE COM DEFEITOS ORIUNDOS DA BIOINCRUSTAÇÃO.....	64
4.4	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS ENCONTRADOS ENTRE HÉLICES CAVITADOS E BIOINCRUSTADOS.....	70
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>72</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	73
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>74</b>
	<b>APÊNDICE A – EXEMPLO DE PARAMETRIZAÇÃO DA REGIÃO ROTACIONAL .....</b>	<b>77</b>
	<b>APÊNDICE B – EXEMPLO DE TABULAÇÃO DOS VALORES ENCONTRADOS PARA CADA COEFICIENTE .....</b>	<b>78</b>
	<b>APÊNDICE C – TABULAÇÃO DA COMPARAÇÃO ENTRE TEORIA E SIMULAÇÃO DE HÉLICES LIVRES DE DEFEITOS SUPERFICIAIS .....</b>	<b>79</b>
	<b>APÊNDICE D – TABULAÇÃO DA COMPARAÇÃO ENTRE SIMULAÇÕES DE HÉLICES LIVRES DE DEFEITOS SUPERFICIAIS E HÉLICES COM DEFEITOS ORIUNDOS DA CAVITAÇÃO .....</b>	<b>80</b>
	<b>APÊNDICE E – TABULAÇÃO DA COMPARAÇÃO ENTRE SIMULAÇÕES DE HÉLICES LIVRES DE DEFEITOS SUPERFICIAIS E HÉLICES COM DEFEITOS ORIUNDOS DA CAVITAÇÃO .....</b>	<b>81</b>
	<b>APÊNDICE F – COMPARAÇÃO ENTRE COEFICIENTES DE EMPUXO E TORQUE DOS HÉLICES DANIFICADOS .....</b>	<b>82</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Novos tipos de navios e diferentes aplicações continuam sendo desenvolvidas em resposta a fatores econômicos, sociais e técnicos, incluindo mudanças entre a área de velocidade operacional e preço do combustível. Essas evoluções em designs de navios dependem de estimativas confiáveis do sistema propulsivo da embarcação. Existe uma grande necessidade de minimizar potência, consumo de combustível e custos operacionais motivados por ideais ambientais e perspectiva econômica. (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2008, p. 15)(tradução nossa).

A estimativa do sistema propulsivo de uma embarcação é crucial para o processo de projeto e funcionamento de um navio. A determinação do sistema propulsivo faz com que o projetista tenha a capacidade de determinar o tamanho e massa dos motores responsáveis pela propulsão do navio, isso faz com que seja estimado o consumo de combustível e custos operacionais durante o trajeto da embarcação. (MOLLAND et al., 2008).

Apesar do hélice normalmente estar submerso e, fora da visão dos usuários da embarcação, o propulsor é um elemento complexo, tanto no sentido hidrodinâmico, quanto estrutural (CARLTON, 2007). Mesmo que seu peso e tamanho não cheguem a uma porcentagem significativa, considerando toda a embarcação, é importante que o sistema propulsivo esteja idealmente dimensionado e esteja em boas condições.

Tendo em vista a importância da propulsão para uma embarcação, sabe-se que existem diversos tipos de propulsores, por exemplo propulsão a vento ou jato-bomba. Entretanto, a utilização de hélices ainda é o sistema propulsivo mais utilizado nas embarcações atuais.

Atualmente, mesmo que muitas das atuais embarcações estão sendo equipadas com motores elétricos para evitar maiores danos ao meio ambiente, muitas outras utilizam motores a diesel para seu sistema propulsivo.

Para melhor visualizar a importância da eficiência propulsiva, foi criado um exemplo baseado no preço do *Bunker*, que é o combustível utilizado nos motores marítimos a diesel, no dia 07/06/2017 (BUNKER INDEX, 2017) e considerado o motor S90ME-C9.2GI (MAN, 2017). Neste exemplo, o motor consome cerca de 163 gramas de combustível por kWh. Considerando que a eficiência propulsiva ( $\eta_D$ ) é uma combinação da eficiência do casco ( $\eta_H$ ), rotativa ( $\eta_{RR}$ ) e do propulsor em águas abertas ( $\eta_0$ ), e fosse igual a 0.60 (potência requerida

igual a 44 kW), esta embarcação teria um gasto anual com combustível (considerando dias corridos, sem paradas em portos) de aproximadamente 63000 toneladas de combustível, resultando em um custo de quase US\$ 30.8 milhões.

Caso uma embarcação sofra com perda de eficiência propulsiva, esses gastos serão elevados, já que será necessário mais potência para que a embarcação mantenha a mesma velocidade. Considerando a redução da eficiência propulsiva ( $\eta_D$ ) para 0.55 (potência requerida igual a 48kW), esta mesma embarcação e com o mesmo motor, gastaria aproximadamente 68700 toneladas de combustível, e conseqüentemente US\$ 33.5 milhões. Em outras palavras, a perda da eficiência propulsiva resultou em um acréscimo de 9% dos gastos com combustível.

Já que, durante a operação de uma embarcação, o sistema propulsivo é responsável por grande parte dos custos da embarcação, deve-se analisar com cuidado todo o sistema propulsivo, desde seu dimensionamento até sua manutenção. Ou seja, mesmo com um dimensionamento perfeito, o hélice ao estar em funcionamento está sujeito a outros problemas que podem ocasionar na redução da eficiência propulsiva, tais como cavitação, erosão e bioincrustação.

“Cavitação é um fenômeno da mecânica dos fluidos, que pode ocorrer sempre que um fluido é usado em uma máquina que induz flutuações de pressão e velocidade do mesmo.” (CARLTON, 2007, p. 207) (tradução nossa). Ou seja, qualquer projeto que envolva bomba, hélice, turbinas, entre outros, corre o risco de sofrer danos ou perda de eficiência resultantes deste fenômeno.

Popularmente, pensa-se que a água depende apenas da temperatura para entrar em ebulição, entretanto, baixas pressões também podem ocasionar a ebulição.

No caso de propulsores do tipo hélice, o movimento das pás induz o aceleração do fluido, conseqüentemente aumentando a velocidade no entorno do propulsor. Esse aumento de velocidade provoca a redução da pressão, gerando regiões de baixa pressão no entorno do propulsor.

Essa queda de pressão faz com que a água se transforme em vapor, e essas bolhas de vapor podem ou não implodir junto à superfície do hélice. Com o tempo, a repetição constante desse processo provoca danos ao hélice, os quais são percebidos na eficiência da embarcação, já que há queda de empuxo, erosão das pás e aumento de vibrações providas do hélice. “Cavitação é um fenômeno que ocorre em hélices com grande carga. O qual, a partir de um valor crítico de revoluções, provoca uma repentina queda de pressão no fluido e conseqüentemente perda de empuxo”. (SAHOO, 2015, p. 174).

Incrustação é, basicamente, uma crosta formada por biorganismos existentes na água. Segundo Kempin (2003), em operação, a água viaja pelas pás do hélice em alta velocidade e é essencial que a superfície esteja perfeitamente suave. Em determinados espaços de tempo, organismos marinhos existentes na água (cracas, corais, algas, etc.) se alojam na superfície do hélice criando algumas protuberâncias as quais influenciam diretamente no balanceamento, causando aumento de consumo de combustível e vibração. Flemming et al. (2002) cita que todas as superfícies submersas estão sujeitas a esse fenômeno, ou seja, acúmulo de material micro ou macro biológico, como é mostrado na Figura 1, onde existe um ROV (veículo submarino operado remotamente) avaliando as condições do hélice.

Figura 1 – ROV avaliando condição de hélice



Fonte: NUTECMAR (2017).

Como forma de evitar incrustação, nos anos 70 foi descoberto o tributilestano (TBT), material que possibilitou que grande parte da frota mundial de embarcações pudesse navegar sem perdas provindas de bioincrustação. Entretanto, pesquisas mostraram que o material afeta o sistema endócrino e provoca má formação em espécies aquáticas, ou seja, fêmeas estavam desenvolvendo órgãos reprodutores masculinos. (YEBRA; KIIL; DAM-JOHANSEN, 2004 abud MICHELS, 2014). Por conta disso, em 2008, a International Maritime Organization (IMO) proibiu o uso de TBT com fins anti-incrustantes.

A proibição do TBT para fins anti-incrustantes, abriu algumas frentes de pesquisas promissoras contra bioincrustação. Uma delas é feita pela Nippon Paint com um copolímero capaz de auto polimento, e a segunda baseia-se em revestimentos com base em elastômeros de silicone para diminuir a adesão de microrganismos. (MICHELS, 2015) e, uma terceira é



baseada na utilização de um pigmento chamado dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ) que é resistente a ataques de grande parte dos agentes orgânicos e inorgânicos (ZANELLA, 2016).

Considerando apenas a bioincrustação, segundo a International Maritime Coatings (IMC), uma embarcação que navega por seis meses seguidos pode sofrer um acréscimo de 40% no consumo de combustível e um acréscimo entre 6 e 80% em sua força de arrasto. Caso não existissem métodos preventivos contra a bioincrustação, o prejuízo financeiro da frota mundial de embarcações poderia chegar a US\$7 milhões. (GAMA, PEREIRA; COUTINHO, 2009).

Como ambos os fenômenos (cavitação e bioincrustação) interferem na eficiência operacional de uma embarcação, existem muitas pesquisas no âmbito da engenharia naval nessas áreas tendo como objetivo principal a redução nas despesas financeiras destes custos, sem afetar o meio ambiente. (IMO, 2002). Nesta perspectiva, esse trabalho pretende demonstrar computacionalmente os efeitos causados em hélices com defeitos oriundos da cavitação e bioincrustação, comparando a eficiência propulsiva de casos idealizados de ambos os fenômenos, com aquelas observadas em condições ideais.

Para modelagem do hélice, primeiramente será utilizado a Série B-Wageningen, cuja utilização é uma técnica tradicional para o dimensionamento de propulsores. (SAHOO, 2015). Após a dimensionalização do hélice, os pontos de curva do design do mesmo serão obtidos através do programa PropCad, para então ser finalizado nos programas Rhinoceros e SolidWorks.

Uma vez modelado o propulsor, a eficiência propulsiva será estimada usando o método CFD, por meio do programa CFD STAR-CCM+, permitindo analisar a eficiência do sistema propulsivo em águas abertas, buscando verificar se tal técnica é capaz de captar a influência da rugosidade na eficiência do propulsor.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Analisar, através de métodos computacionais, a perda de eficiência propulsiva em águas abertas de hélices da Série B-Wageningen com defeitos oriundos da erosão por cavitação e acúmulo de bioincrustação, verificando se essa técnica permite captar tal influência.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

1. Determinar, através da Série B-Wageningen, um hélice típico para ser analisada como valor de referência;
2. Indicar possíveis resultados de cavitação e incrustação baseado na teoria já existente;
3. Modelar computacionalmente o hélice usando os programas CAD PropCad, Rhinoceros e SolidWorks;
4. Analisar o hélice modelado usando o programa de CFD STAR-CCM+ e gerar resultados referentes a eficiência propulsiva em águas abertas do propulsor;
5. Construir, a partir do modelo de referência, um novo modelo, incluindo uma rugosidade por meio da adição de um perfil superficial compatível com a erosão do propulsor causada pela cavitação;
6. Construir, a partir do modelo de referência, um novo modelo, incluindo uma rugosidade por meio da adição de um perfil superficial compatível com os efeitos do acúmulo da bioincrustação incrustação;
7. Comparar resultados teóricos e computacionais e citar razões de possíveis erros encontrados;

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica é composta por todo estudo literário relevante que deverá substanciar o desenvolvimento realizado. (PORTAL EDUCAÇÃO, 2013). Para isso, inicia-se com uma discussão geral para que no fim possa convergir a um debate relacionando ao objetivo principal da pesquisa, esclarecendo suas teses e lacunas que possam servir de apoio. (ASSIM SE FAZ, 2016).

### 2.1 HÉLICE

A escolha do sistema propulsivo é uma das fases mais importantes no projeto de uma embarcação. (COSTA; ALHO, 2010), cuja a finalidade é a de gerar movimento linear.

Embora existam diversos tipos de propulsores, tais como *water-jets*, propulsores azimutais e cicloidais; o sistema propulsivo mais amplamente utilizado consiste de propulsores do tipo hélice com eixos fixos<sup>1</sup>. (TRINDADE, 2012). Segundo Passos (2013), esses propulsores transformam energia rotacional em uma força axial resultado do escoamento do fluido pelas pás.

Segundo MAN Diesel & Turbo (20--), sistemas propulsivos com hélices podem ser divididos em dois grandes grupos: passo fixo<sup>2</sup> e passo variável. Embora a utilização de hélices de passo variável introduza complexidade elétrica-mecânica ao sistema, a variação do passo

---

<sup>1</sup> Hélice com eixos fixos são hélices que não são responsáveis pelas manobras das embarcações, diferentes de hélices azimutais, por exemplo.

<sup>2</sup> Hélice com passo fixo são hélices, os quais as pás estão fixadas no cubo formando uma unidade integral, não havendo possibilidade de variação do passo do hélice.

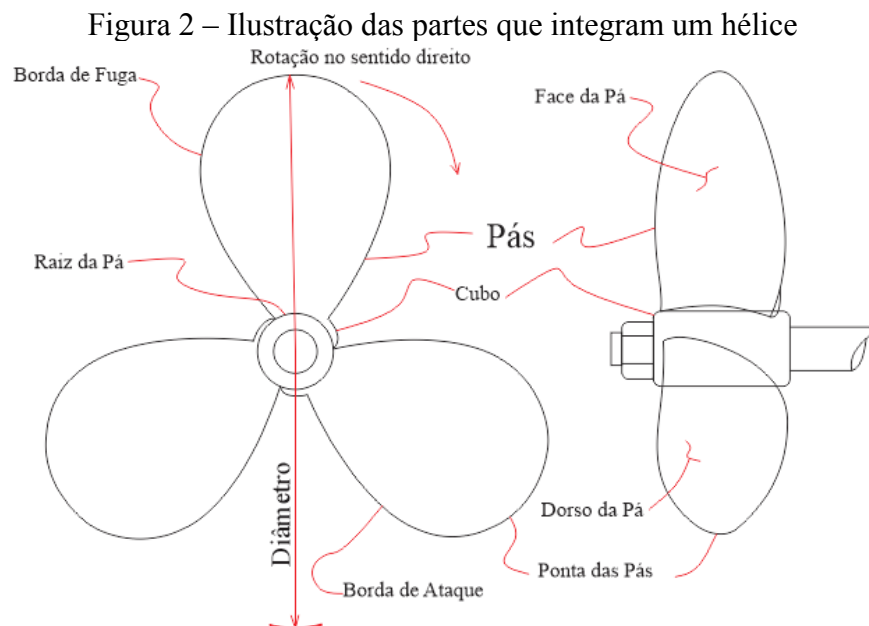
permite que o propulsor mantenha um rendimento aproximadamente constante para diferentes condições de mar e velocidade.

Embarcações de grande porte (porta-contêiner, graneleiros, navios-tanque) usualmente utilizam propulsores com passo fixo já que viajam longos períodos de tempo com velocidade constante e a diferença da eficiência entre hélices com passo fixo e variável não é suficiente para cobrir os gastos de instalação. Por outro lado, embarcações Ro-Ro e Ferries, que necessitam de alta manobrabilidade, escolhem pelo propulsor com passo variável. (MAN DIESEL & TURBO, 20--).

### 2.1.1 Componentes do Propulsor

É muito importante ter conhecimento das partes que integram um hélice visando compreender os elementos que definem a eficiência do propulsor, sendo vital para a obtenção de um resultado satisfatório com alto índice de eficiência propulsiva. (LOPES, 2003). As diferentes partes que integram o hélice são mostradas na Figura 2.

- a. Cubo (*Hub*): É a base das pás do propulsor. É um disco central, rígido e vazado para que o eixo possa ser encaixado. Raramente seu diâmetro é inferior a 14% do diâmetro do hélice;
- b. Chaveta: É um prisma esbelto colocado ao longo do eixo do propulsor, o qual transmitirá o torque do eixo para o propulsor;
- c. Pás: São chapas destorcidas que se projetam do eixo. A rotação das mesmas transforma o torque do eixo em força axial para que a embarcação entre em movimento;
- d. Face e Dorso das Pás: A face da pá é a região de alta pressão, o qual realizará o deslocamento da água para que a embarcação se mova. Enquanto que o dorso da pá é a região de baixa pressão;
- e. Raiz e Ponta da Pá: Raiz é região onde a pá fica em contato com o cubo, onde é fixada. Ponta da pá é a região mais extrema e distante da raiz. A distância entre as duas é chamada de comprimento da pá;
- f. Bordos de Ataque e de Fuga: Bordo de ataque é a região da pá que penetra o fluido a ser deslocado. Bordo de fuga é a região por onde o fluido escapa do hélice em alta velocidade.



Fonte: Lopes (2003, p. 15) modificada pelo Autor.

### 2.1.2 Dimensões de um hélice

Exatamente como as partes de um propulsor, suas dimensões influenciam na eficiência propulsiva encontrada no final de um projeto. (LOPES, 2003).

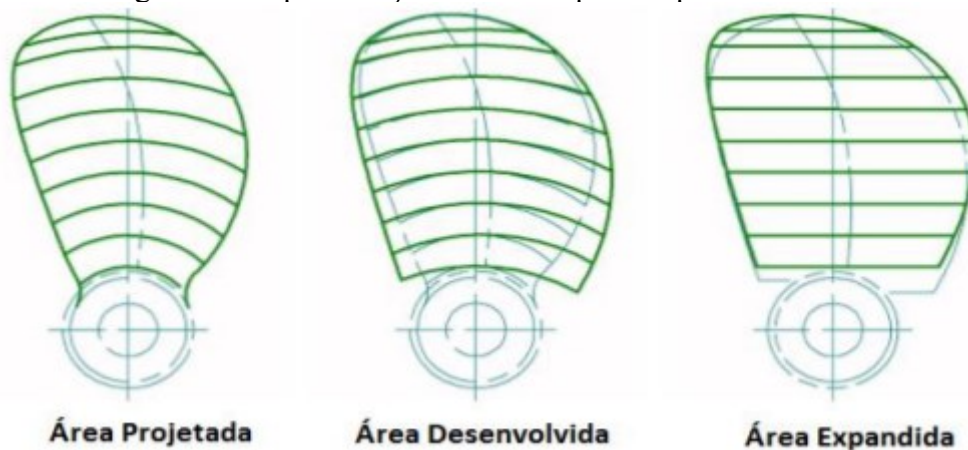
- a. Diâmetro: É o dobro da máxima distância entre o centro do eixo até a ponta da pá. (PASSOS, 2013). Uma outra forma de definir esse valor é analisar o diâmetro da circunferência criada pela trajetória da ponta das pás. Deve-se levar em consideração que grandes embarcações necessitam de grandes hélices, porém um hélice superdimensionado gera mais resistência para a embarcação, portanto tem-se que dimensionar o hélice ideal para a embarcação e o peso da carga que a mesma deve transportar. (LOPES, 2003);
- b. Passo: É a distância linear que a embarcação se move durante uma rotação do hélice. Se um hélice recebe a seguinte nomenclatura 14"x19" significa que seu diâmetro é de 14 polegadas e seu passo é de 19 polegadas. (LOPES, 2003);
- c. Ângulo de Inclinação da Pá: É o ângulo formado entre uma normal que sai do cubo e uma linha que liga a mesma posição do cubo com a ponta da pá. Grandes ângulos de inclinação geralmente melhoram a capacidade do propulsor para operar em

situações como a cavitação, entretanto, em casos de embarcações mais leves e de alta velocidade, grande ângulo de inclinação do hélice pode causa instabilidade já que o hélice induz a proa da embarcação a ficar mais elevada, e conseqüentemente mais propensa a decolar. (SAHOO, 2015);

- d. **Área Projetada:** Considera-se área projetada como a área do hélice projetada em um plano, ou seja, imagina-se colocar uma lâmpada na frente de um propulsor, a área projetada seria a sombra na parede. (SAHOO, 2015);
- e. **Área Expandida:** Área expandida é a multiplicação da área total de uma pá pelo número de pás. (SAHOO, 2015);
- f. **Área Desenvolvida:** Área do círculo formada pela rotação das pás. (SAHOO, 2015).

A Figura 3 representa as três áreas diferentes da pá de um hélice.

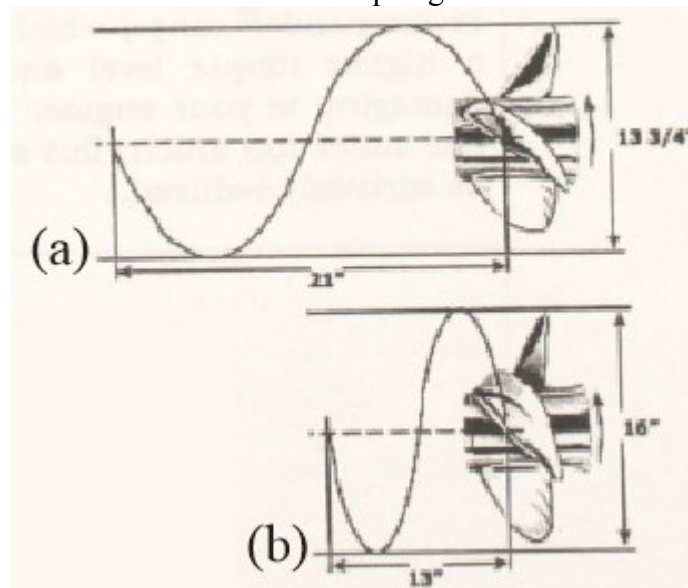
Figura 3 – Representação das áreas que compõem um hélice



Fonte: Paulino (2015)

Na Figura 4 são mostrados dois hélices com diferentes relações P/D. Na parte superior é mostrado um hélice com diâmetro de 13,75 polegadas e um passo de 21 polegadas. Na figura inferior é mostrado um hélice com um diâmetro de 16 polegadas e um passo de 13 polegadas.

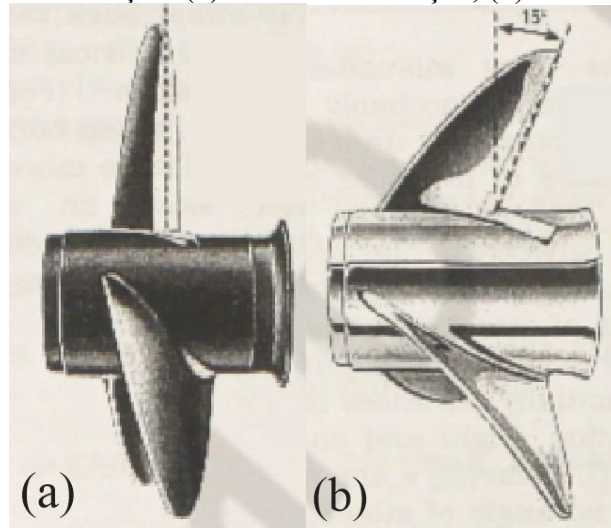
Figura 4 – Diâmetro e passo de um hélice: (a) Hélice com diâmetro de 13,75 polegadas e passo de 21 polegadas; (b) Hélice com diâmetro de 16 polegadas e passo de 13 polegadas.



Fonte: Sahoo (2015, p. 108).

A Figura 5 ilustra o ângulo de inclinação da pá (rake), onde pode ser visualizado mais facilmente os pontos de medição para determinar o ângulo.

Figura 5 – Ângulo de Inclinação: (a) Pás sem inclinação; (b) Pás com inclinação de 15°.



Fonte: Sahoo (2015, p. 110).

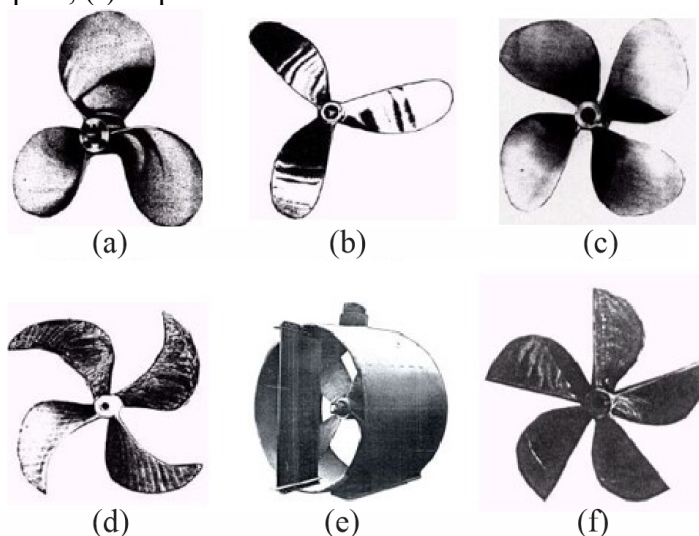
### 2.1.3 Tipos de hélice

Existem diversos tipos de hélice, os principais são citados abaixo e ilustrados na Figura 6. (LOPES, 2003).

- a. Redondo: Mais utilizado em cascos não planantes. A raiz de suas pás é mais larga, evitando danos graves em caso de impactos. Possui a melhor eficiência em manobras de ré.
- b. Banana: Comumente utilizado por fábricas japonesas, é um propulsor que apresenta baixa probabilidade de cavitação como um limitador. Boa eficiência em alta velocidade, portanto é muito utilizado em embarcações de recreio ou cargas leves.
- c. Veloz: Hélice preferido para cascos de fibra por ser capaz de alcançar altas velocidades. Com pás triangulares, não há efeito de cavitação, portanto aumentando o rendimento do conjunto barco/motor/propulsor em alta velocidade.
- d. Econômico: Inicialmente pensava-se em criar um hélice silencioso, portanto ao invés de haver o impacto cortante na água pela borda de ataque, existe um leve empurrar da água. Após testes, descobriu-se que há uma economia de 2,5 a 5% de combustível.
- e. Kaplan: Característicos em embarcação onde a função principal é força. O mesmo geralmente é instalado dentro de um duto. A instalação do duto provoca um crescimento no empuxo em baixa velocidade (9 a 10 nós) e em casos de mesmo *Bollard Pull*, existe uma economia de 8 a 10% de combustível.
- f. Superfície: Esse tipo de hélice funciona metade submerso e metade fora da água, utilizando a cavitação para amplificar o empuxo gerado pelo propulsor. Com isso, esse tipo de hélice é especialmente utilizado em embarcações com alta velocidade final (entorno de 40 nós) pois possui menor arrasto.



Figura 6 – Ilustração dos tipos de hélice: (a) Redondo; (b) Banana; (c) Veloz; (d) Econômico; (e) Kaplan; (f) Superfície.



Fonte: Lopes (2003, p. 27-31).

## 2.2 FENÔMENOS QUE ALTERAM A RUGOSIDADE SUPERFICIAL DO PROPULSOR

### 2.2.1 Cavitação

Cavitação é um fenômeno da mecânica dos fluidos, o qual pode ocorrer sempre que um fluido é utilizado em uma máquina que induz flutuações de pressão e velocidade no fluido. Conseqüentemente, bombas, turbinas, hélices, rolamentos e até mesmo o corpo humano, por exemplo o coração e juntas do joelho, são todos exemplos de máquinas onde pode ocorrer conseqüências destrutivas por causa da cavitação. (CARLTON, 2007, p. 207) (tradução nossa).

Cavitação pode ser considerada como uma extensão do que é popularmente conhecido como evaporação, na qual a água sofre ebulição quando atinge 100°C. Observa-se que o mesmo líquido, ao ser aquecido no alto de uma grande montanha, sofrerá ebulição numa temperatura menor. Esse exemplo define o fenômeno da cavitação, no qual a temperatura é mantida próximo a uma constante e a pressão varia na frente e no dorso das pás do hélice, levando a evaporação do fluido no entorno da pá.

Considerando Bernoulli, sabe-se que para que a energia mecânica seja mantida, um fluido ao ser acelerado, sofre com a queda de pressão e vice-versa, desde que a comparação seja feita na mesma altura (h). Essa queda de pressão resulta na evaporação do fluido.

Segundo Do Vale (2003), cavitação é um dos assuntos mais estudados quando se trata de hélices, já que é um fator limitante para o projeto e traz grandes preocupações para os projetistas, pois pode causar vibração, queda de empuxo e erosão nas pás.

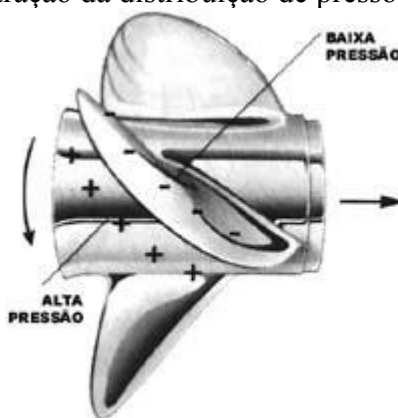
A cavitação não necessariamente ocorre por causa do hélice, caso haja irregularidades no casco da embarcação, caixa de engrenagens ou qualquer outro problema que gere regiões de baixa e alta pressão, a cavitação pode ser um problema. (LOPES, 2003).

Segundo Fox (2006), quando a pressão local cai abaixo da pressão de vapor líquido, o mesmo passará para o estado de vapor instantaneamente, tornando o escoamento em um escoamento transiente. As bolhas de cavitação (vapor ou cavidade no líquido), criadas nas regiões de baixa pressão (dorso da pá), implodem assim que se afastam dessas regiões, criando ondas de choque agressivas e em alta pressão. É esse efeito que causa deformações e irregularidades em um hélice. (ÇENGEL; CIMBALA, 2007).

A causa da cavitação pode ser desde uma irregularidade no bordo de ataque de uma das pás do hélice, alguma porosidade na superfície da pá ou ser resultado de um hélice mal projetado. (PESCAR E NAVEGAR, 2011).

A Figura 7 apresenta um hélice que empurraria a embarcação para a direita, ilustrando as regiões de alta e baixa pressão.

Figura 7 – Ilustração da distribuição de pressões em um hélice



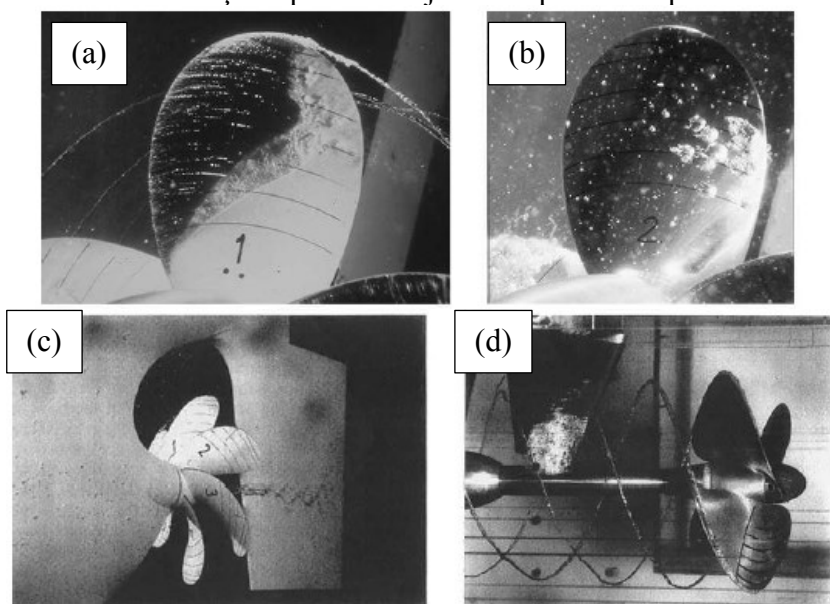
Fonte: Navegar e Pescar (2011).

Cavitação em hélices navais pode ser dividida em quatro tipos citados a seguir e ilustrados na Figura 8: (CARLTON, 2007).

- a. Folha: Quando operando em sua rotação normal (positiva), esse tipo de cavitação aparece no dorso das pás. Cavitação tipo folha ocorre por causa do ângulo de ataque da pá (caso cresça em magnitude), onde a cavitação cresce radialmente e na direção do comprimento da pá, formando uma folha acima da pá que pode se estender de acordo com a geometria da pá e com as condições do ambiente;

- b. Bolha: Influenciada primeiramente pelos componentes que causam alta sucção de pressão na região do meio do comprimento das pás. A relação entre a curvatura da pá e a sua espessura também influenciam nesse tipo de cavitação. A cavitação tipo bolha ocorre principalmente no meio da pá e regiões de máxima espessura, onde as bolhas crescem e estouram rápido;
- c. Nuvem: Encontrada principalmente atrás de cavitações tipo folha, são bem estabilizadas com a formação de pequenos vórtices através de pequenas bolhas de cavitação. Apresenta uma aparência de uma nuvem de pequenas bolhas de cavitação;
- d. Vórtices: Pode ocorrer no bordo de ataque, na ponta das pás ou no cubo de acordo com a criação de regiões de baixa pressão pela rotação do hélice. Geralmente não ocorre cavitação no cubo do hélice, mas sob a influência da convergência do propulsor em um cone e a rotação de cada pá o mesmo é altamente susceptível a cavitação. Em relação a cavitação na ponta das pás, a mesma é primeiramente observada longe da pá, mas assim que o vórtice se torna mais estável, com o aumento da carga no hélice ou com a redução do número de cavitação, o mesmo se fixa no hélice.

Figura 8 – Tipos de cavitação em propulsores: (a) Cavitações do tipo folha e nuvem, com influência de cavitação tipo vórtice na ponta da pá. (b) Cavitação tipo bolha no meio do comprimento da pá. (c) Cavitação tipo vórtice no cubo do hélice. (d) Cavitação tipo vórtice junto da ponta das pás.



Fonte: Carlton (2007, p. 214).

Em um meio ideal, onde o hélice atuaria apenas contra a água, haverá cavitação apenas se a pressão atingir a pressão de vapor na temperatura do fluido. Porém, em um meio não ideal, ou em mares e rios, existem micropartículas e ar dissolvido na água, o que faz com que a pressão de vapor seja atingida em valores muito maiores do que os ideais. (TRINDADE, 2012).

Observa-se na literatura muitos métodos para estimar o fenômeno da cavitação, os quais são usados ainda na fase de projeto conceitual e na fase do projeto preliminar para definir as características do sistema propulsivo da embarcação. Entre os métodos mais difundidos, destaca-se a proposta de Burrill (1943). (SAHOO, 2015).

O método de Burrill prevê cavitação através de uma relação entre o empuxo do hélice e o número de cavitação a 0,7 do raio do hélice. O método é composto por uma equação que depende basicamente do empuxo da embarcação, área projetada de uma pá, velocidade relativa da água na posição 0,7 do raio do hélice e na densidade. Já o número de cavitação é uma relação entre as pressões atmosféricas, a profundidade do propulsor, a densidade, velocidade de avanço da embarcação, rotação e diâmetro do hélice.

### **2.2.2 Bioincrustação**

Define-se bioincrustação como um processo decorrente da colonização de algas, bactérias e/ou invertebrados sésseis na superfície de equipamento ou embarcação submersa, podendo ser natural (madeira, rocha) ou industrializada (embarcações, plataformas, tanques). (GAMA et al., 2009). Seguindo a mesma direção, Flemming et al. (2002) diz que todas as superfícies submersas estão sujeitas a esse fenômeno, ou seja, acúmulo de material micro ou macro biológico.

Além de servir como transporte para organismos invadirem diferentes regiões do globo, a rugosidade criada pela incrustação aumenta o arrasto da embarcação, aumentando o consumo de combustível e a poluição do ar. (COUTINHO, 2009).

Eventualmente, levando em consideração a diferença de velocidade do casco em movimento e do hélice em rotação, é mais comum encontrar incrustação em cascos. Porém, embarcações que permaneçam consideráveis períodos de tempo com o hélice desligado podem sofrer com o mesmo problema em seus hélices, o qual é objeto de estudo desse trabalho, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Incrustação na região submersível de uma embarcação



Fonte: SailBrasil News (2014).

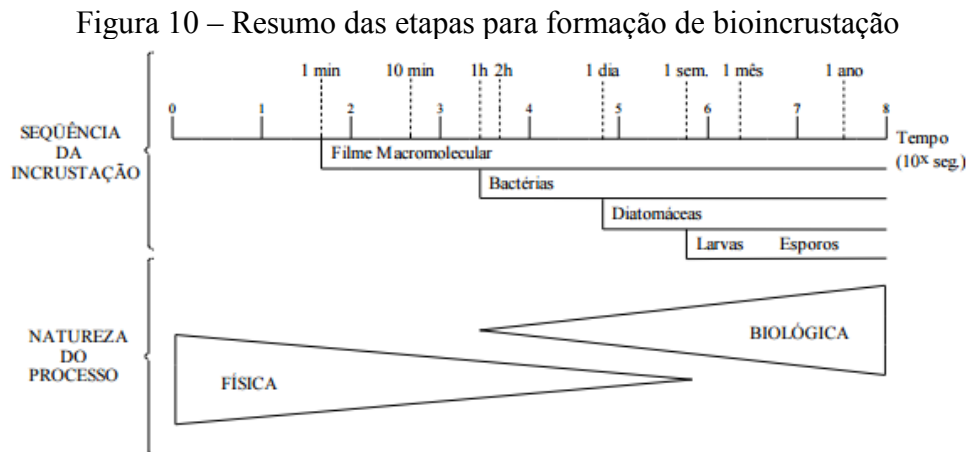
#### 2.2.2.1 Processo de adesão e colonização da bioincrustação

Registrada como a primeira forma de vida na Terra, datada em aproximadamente 3,5 bilhões de anos, e presente até os dias de hoje (SCHOPF; HAYES; WALTER; 1983), a bioincrustação é um problema em diversas áreas da indústria e basicamente se originam a partir de biofilmes microbianos. (FLEMMING et al., 2009).

O desenvolvimento do biofilme depende da rugosidade da superfície, intensidade de luz e existência de colonizadores primários ou adultos; podendo ser dividido em seis etapas (GAMA et al., 2009):

- a. Absorção de moléculas orgânicas para a superfície submersa, fazendo com que a mesma seja mais susceptível a ação das bactérias;
- b. Atração química das células microbianas;
- c. Adesão das mesmas na superfície submersa e condicionada (reversível);
- d. Adesão das mesmas na superfície submersa e condicionada, envolvendo fixação por fibrilas macromoleculares (irreversível);
- e. Expansão metabólica dos microrganismos, ampliando sua capacidade de fixação e espessura do filme;
- f. Crescimento de uma população bacteriana secundária e adesão de material particulado.

Essas etapas definem a criação de microincrustantes, para ser, posteriormente, a fonte de desenvolvimento de macro organismos ou macroincrustação, como cracas e esponjas, conforme demonstrado na Figura 10.



Fonte: Gama et al. (2009, p. 11).

#### 2.2.2.2 Bioincrustação em estruturas submersas

Embora a indústria naval considere a incrustação como sinônimo de prejuízo, Xavier et al. (2003) mostra que existe o lado positivo do biofilme, como a utilização do mesmo para filtragem de água e de efluentes em estações de tratamento. Em contrapartida, Gama et al. (2009, p. 318) argumenta que “Estima-se que, em escala global, sejam gastos pelo menos 450 milhões de dólares ao ano com a prevenção da bioincrustação, e que se este montante não fosse gasto, os prejuízos anuais seriam da ordem de 7 bilhões de dólares”.

Bioincrustação pode seriamente impactar na eficiência operacional de um navio. Consumo de combustível representa cerca de 50% dos custos operacionais da Indústria de Transporte Marítimo. Anualmente, é estimado que 180 milhões de toneladas de combustível são consumidos mundialmente, com um preço aproximado de US\$23 bilhões (US\$150 por tonelada). (IMC, 20--, p. 3) (tradução nossa).

Tendo como base diferentes referências, é difícil prever o aumento no consumo de combustível de uma embarcação por conta da bioincrustação. Segundo a IMC (20--), o consumo de combustível em uma embarcação pode aumentar em até 40%, porém isso depende da espécie da bioincrustação, pois em um caso menos agressivo, uma embarcação

completamente incrustada apenas por algas resulta em um aumento de 10% de consumo de combustível. Seguindo a mesma linha de raciocínio, Gama et al. (2009) estima que uma embarcação a 6 meses navegando (sem docagem durante esse período) pode sofrer um acréscimo de 35 a 50% no consumo de combustível por conta da bioincrustação.

Já em relação ao hélice, uma superfície incrustada pode afetar a eficiência negativamente entorno de 19%. (WALKER et al, 2014).

Como o custo da docagem de uma embarcação de grande porte pode ultrapassar US\$5 milhões (FELIPPE, 2012), é extremamente importante desenvolver meios para evitar a bioincrustação, motivando pesquisas sobre o assunto visando maximizar o tempo entre docagens dos navios.

Nos anos 1970, foi descoberto o tributilestanho (TBT), material que transformou a industrial naval e propiciou que 70% das embarcações mundiais pudessem navegar com uma superfície lisa e quase sem perda de rendimento por causa da incrustação.

No entanto, descobriu-se que o material afetava o sistema endócrino e provocava má formação em espécies aquáticas. (YEBRA; KIIL; DAM-JOHANSEN, 2004 apud MICHELS, 2014, p. 26), além de ser tóxico para os trabalhadores que entram em contato com o produto.

Em função disto, em 2003 iniciou-se a discussão sobre a proibição do uso de TBT com fins anti-incrustação, e em 2008 a proibição foi confirmada. (IMO, 2002).

### 2.3 MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

O método dos volumes finitos foi criado por McDonald, MacCormack e Paullay por volta da década de 70, desde então, este método ganhou espaço e se tornou muito utilizado entre várias áreas da ciência. (OSSES, 2016). Segundo Vaz Junior (2015), o método dos volumes finitos é comumente usado com um conjunto de malhas estruturadas para representar um volume conhecido através da integração de equações diferenciais.

Segundo Pozrikidis (2016) a computação numérica vem crescendo graças ao baixo custo comparado com técnicas experimentais práticas, que possuem um valor mais elevado. Além disso, Vaz Junior (2015) também cita a versatilidade dos programas computacionais, porém traz o fator de que muitos modelos matemáticos são de difícil modelamento numérico, e por isso, hipóteses são assumidas para simplificar a solução.

Entre os diversos métodos numéricos capazes de representar o método dos volumes finitos, a Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC), ou mais comumente conhecida como

*Computational Fluid Dynamics* (CFD), é capaz de analisar numericamente o volume sob efeito da dinâmica dos fluidos.

O advento do computador digital nos últimos 40 anos forneceu uma terceira alternativa para a análise do movimento dos fluidos: a simulação numérica. Essa área do conhecimento, que complementa as análises teóricas e as técnicas experimentais da mecânica dos fluidos, recebeu o nome de dinâmica de fluidos computacional (DFC). Apesar de ser uma área nova, a DFC está em pleno desenvolvimento e expansão, já sendo utilizada por pesquisadores nas áreas de, entre outras, medicina, meteorologia, e engenharias. (FORTUNA, 2000, p. 13).

Entre os diversos parâmetros programáveis que serão citados no decorrer do trabalho, um dos principais é a malha estrutural utilizada para representar o volume a ser analisado. Segundo Passos (2013), caso uma malha que represente o volume estudado seja muito refinada (diversas células para representar um volume), o tempo de simulação será maior, já que haverá uma maior quantidade de informações geradas; entretanto, malhas de tamanho exagerado não representam um resultado real. Por isso, é necessário buscar um tamanho ideal para a malha, que proporcione um balanço entre a precisão das respostas obtidas e o custo computacional exigido pela simulação.

As características do modelo hidrodinâmico desenvolvido, os parâmetros utilizados e as hipóteses da ferramenta adotadas serão discutidos ao longo do capítulo da metodologia do trabalho.

## 2.4 SÉRIES B-WAGENINGEN

Séries sistemáticas tem o simples objetivo de reunir dados semelhantes para serem analisados estatisticamente. Por exemplo, utiliza-se uma amostragem de um tipo de hélice para que seja feito um banco de dados para geração de novas hélices com a mesma característica.

As forças e momentos produzidos pelo hélice são expressados nas suas formas fundamentais como série de termos adimensionais. (CARLTON, 2007). Como uma das mais antigas formas de determinar a geometria de um hélice, as séries B-Wageningen são muito utilizadas de acordo com a simplicidade que seus polinômios foram criados. (RACHWALIK, 2013).

A primeira descrição completa de parâmetros geométricos das Séries B-Wageningen foi desenvolvida em 1940 no Netherlands Ship Model Basin (NSMB), em Wageningen, Holanda. Foram utilizados alguns barcos que foram construídos sob



uma série de estudos, dos quais foram criados gráficos hidrodinâmicos para cada hélice. Esses gráficos foram de ótima ajuda para logo identificar padrões de design de hélice. Esses padrões descreveram gráficos que podiam ser utilizados para rapidamente escolher um hélice para o navio. (RACHWALIK, 2013, p. 11) (tradução nossa).

As embarcações de estudo citadas anteriormente, compunham uma frota de 120 navios, e os gráfico obtidos foram feitos através de diversas regressões polinomiais. (BERNITSAS; RAY; KINGLEY, 1981). Primeiramente foram feitos testes para duas, três e quatro pás por hélice, após quarenta anos foram desenvolvidos parâmetros para cinco, seis e sete pás por hélice. (DANG; VAN DEN BOOM; LIGTELIJN, (201-). De acordo com a série, existem diversas combinações que podem ser feitas na geração de um hélice, conforme mostrado na Tabela 1. A partir das curvas criadas, as mesmas foram equacionadas possibilitando uma gama infinita de combinações.

Tabela 1 – Range de aplicação da Série B-Wageningen

	Mínimo	Máximo
Coefficiente de avanço (J)	0	1.4
Razão passo pelo diâmetro (P/D)	0.5	1.4
Razão entre áreas (BAR)	0.30	1.05
Número de pás (Z)	2	7

Fonte: Bernitsas et al. (1981)

Os polinômios gerados expressam graficamente os coeficientes de empuxo, torque e eficiência em águas abertas em termos de número de pás, razão entre áreas da pá, razão entre passo e diâmetro e coeficiente de avanço. (BERNITSAS et al., 1981).

Os coeficientes gerados foram então corrigidos por Lerbs, utilizando o número de Reynolds. (OOSTERVELD; VAN OOSSANEN, 1975). Segundo Sahoo (2015), os coeficientes podem ser obtidos através das equações 2.1, 2.2 e 2.3.

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (2.1)$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (2.2)$$

$$J = \frac{V_A}{nD} \quad (2.3)$$

$K_T$  – Coeficiente de Empuxo;

$K_Q$  – Coeficiente de Torque;

$T$  – Empuxo [N];

$Q$  – Torque [Nm];

$\rho$  - Densidade do fluido [ $\text{kg/m}^3$ ];

$n$  – Rotação do hélice [Hz];

$D$  – Diâmetro do hélice [m];

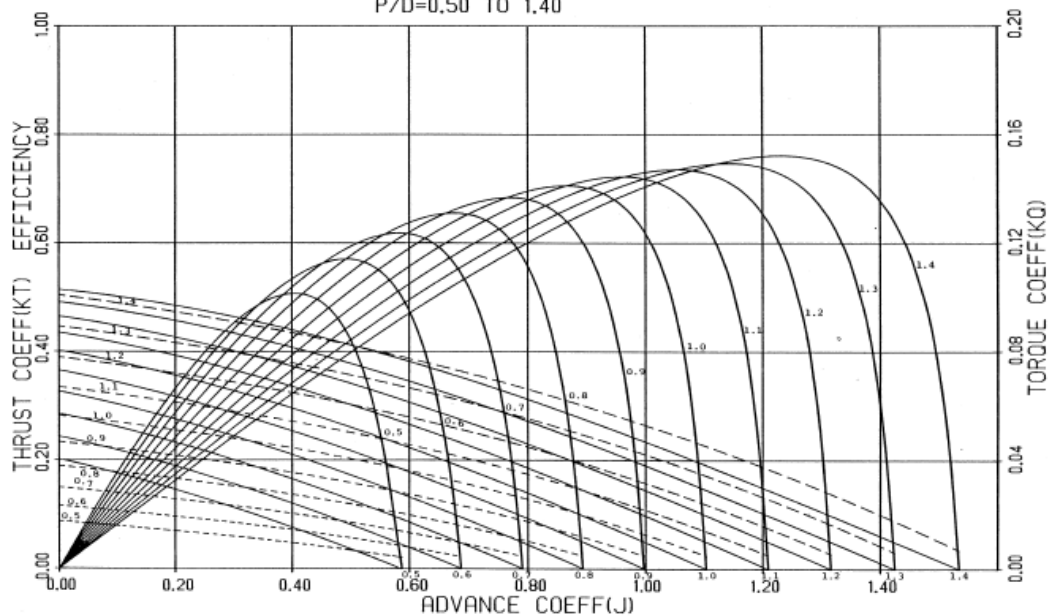
$J$  – Coeficiente de avanço;

$V_A$  – Velocidade de avanço [m/s].

Utilizando as equações acima, pode-se achar o valor dos coeficientes e aplica-los nos gráficos da Série-B. Para isso, é necessário saber o número de pás, a razão entre áreas da pá e razão entre passo e diâmetro, além do coeficiente de avanço que foi formulado acima, Equação 2.3. A Figura 11 demonstra um dos gráficos da série.

Figura 11 – Gráfico B4.45 (Séries B-Wageningen)

FIGURE 36. WAGENINGEN B-SERIES PROPELLERS  
FOR 4 BLADES  $AE/AO = 0.450$   
 $P/D = 0.50$  TO  $1.40$



Fonte: Bernitsas et al. (1981, p. 54).

No caso, o gráfico mostrado na Figura 11 é chamado de B4.45, ou seja, Série B, com 4 pás, razão entre áreas igual à 0,45, variando a razão entre passo e diâmetro de 0,5 a 1,4. O eixo horizontal representa o coeficiente de avanço (J), o eixo vertical a esquerda representa o

coeficiente de empuxo ( $KT$ ) e a eficiência em águas abertas ( $\eta_o$ ), o eixo vertical a direita representa o coeficiente de torque ( $KQ$ ). As linhas contínuas que apenas sofrem queda, representam o coeficiente de empuxo, enquanto as linhas pontilhadas; o coeficiente de torque. As curvas que formam uma parábola representam a eficiência em águas abertas.

Portanto, esse gráfico, permite determinar qual a melhor geometria, ou seja, aquele com maior eficiência, para um propulsor B4.45. O uso de diferentes gráficos, com diferentes números de pás e razões de aspecto, permite que se determine a melhor eficiência entre toda a série de hélices ensaiados.

Esse processo é conhecido como integração casco-hélice e, que permite selecionar o hélice mais adequado (com maior eficiência) para a embarcação. Porém, o intuito do presente trabalho é discutir o efeito que uma superfície rugosa tem sobre a eficiência de um propulsor em águas abertas e por isso, essa discussão foge ao escopo proposto.

### 3 METODOLOGIA

O presente trabalho aplica em uma metodologia experimental, onde, segundo a Universidade Anhembi Morumbi (2016), tem-se como objetivo extremar o fenômeno, levantar hipóteses, definir métodos e ferramentas e sujeitar o fenômeno à experimentação em condições controladas. Na abordagem proposta, a experimentação consiste nas simulações dos casos extremados considerados.

Segundo a definição da Universidade Anhembi Morumbi, o objeto de estudo é o hélice, extremado em efeitos de cavitação e bioincrustação, modelado através dos programas PropCad, Rhinoceros e SolidWorks, e simulado computacionalmente através do programa CFD STAR-CCM+.

Baseando-se nos objetivos específicos do projeto, o primeiro listado definirá o hélice típico da Série B-Wageningen.

Após a determinação da geometria básica do propulsor, é necessário que o mesmo seja modelado em um programa CAD, para que futuramente sejam feitas as simulações. Para isso, os programas PropCad, Rhinoceros e SolidWorks serão combinados para que a modelagem do hélice seja realizada.

O *software* PropCad é um programa específico para modelar a geometria de propulsores, sendo que os dados de entrada são os parâmetros básicos que descrevem a geometria do hélice. Além disso, o *software* foi escolhido por sua ampla utilização na engenharia naval e sua facilidade de manuseio.

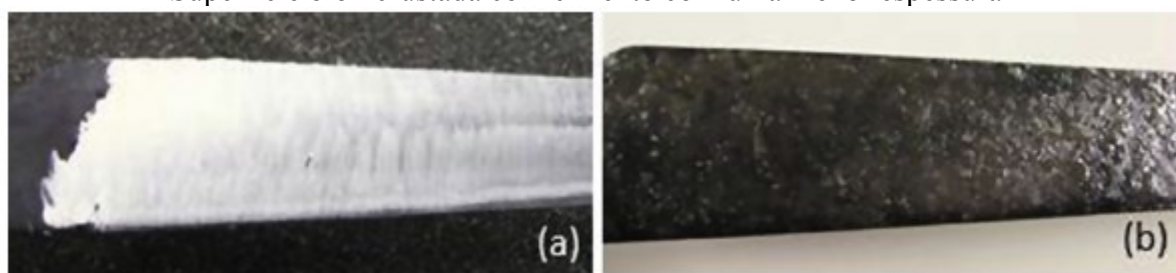
Entretanto, o PropCad não entrega como arquivo final um arquivo utilizável em *softwares* de simulação. Para que isso seja feito, haverá a combinação do mesmo com os programas Rhinoceros e SolidWorks. Assim, no programa Rhinoceros será feita a combinação dos pontos gerados pelo programa PropCad, para que então, possa ser gerado um sólido através do programa SolidWorks, o qual é capaz de exportar a modelagem através de um arquivo compatível com o *software* STAR-CCM+, onde foram feitas as simulações.

Como não é de conhecimento do autor *softwares* que simulam bioincrustação em hélices, é necessário a realização de aproximações baseando-se em Walker et al (2014), onde estudos experimentais foram feitos em uma turbina de duas pás. O hélice não foi imerso em

uma solução favorável para a criação de bioincrustação, mas tendo como base estudos anteriores, os pesquisadores aplicaram dois tipos de material rugoso nas superfícies do hélice que se assemelham a uma superfície bioincrustada.

Através do programa SolidWorks, foram adicionados ao hélice superfícies rugosas para simular o efeito da bioincrustação e uma superfície erodida pela cavitação. Ambas as superfícies alteradas devem, em teoria, modificar a eficiência do propulsor. A Figura 12 mostra dois tipos de bioincrustação simuladas em pás de hélices. A bioincrustação criada na Figura 12 (a) representa uma rugosidade irregular com no máximo 1mm de espessura. A bioincrustação ilustrada na Figura 12 (b) retrata uma superfície menos severa, ou seja, menor espessura, representando uma bioincrustação criada por cracas e briozoários incrustantes.

Figura 12 – Superfícies bioincrustadas artificialmente: (a) Superfície bioincrustada com graxa de lítio impregnado com terra de diatomáceas com 1mm de espessura; (b) Superfície bioincrustada com cimento com uma menor espessura



Fonte: Walker et al (2014, p. 259)

Como base de análise, o arquivo CAD com o hélice em perfeitas condições deve ser importado no programa STAR-CCM+ para que os resultados ideais sejam obtidos. O uso do programa STAR-CCM+ é amplamente documentado e vastamente conhecido por ser uma aplicação robusta e confiável para aplicação de técnicas de simulação, utilizando abordagens CFD.

Uma vez que não existem muitas referências sobre a modelagem de bioincrustação em hélice, considerou-se neste estudo os mesmos parâmetros propostos por Walker et al (2014), no qual é considerada uma rugosidade de aproximadamente 1mm.

Em relação a cavitação, esse fenômeno cria danos na superfície do hélice, alterando a rugosidade da superfície erodida. A Figura 13 ilustra um hélice cavitado no bordo das pás, cuja cavitação é chamada de cavitação do tipo vórtice na ponta das pás.

Figura 13 – Hélice sob efeito de cavitação na ponta das pás



Fonte: BoatTest (2009)

Ambas as situações serão comparadas com o resultado obtido do hélice em condições ideais. A comparação do resultado deve determinar a perda de eficiência que o propulsor sofrerá em virtude da modificação da rugosidade resultante dos fenômenos de cavitação e bioincrustação.

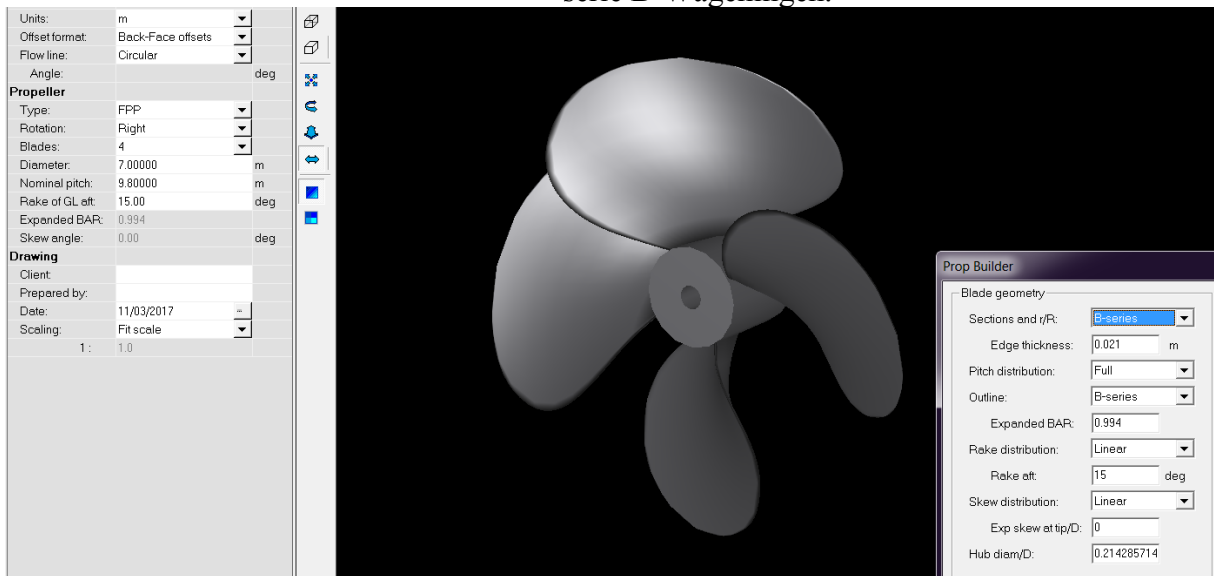
### 3.1 METODOLOGIA PARA CRIAÇÃO DE UM MODELO CAD DE UM HÉLICE BASEADO NA SÉRIE B-WAGENINGEN

Nesta secção será descrita a modelagem do hélice e a construção dos modelos hidrodinâmicos analisados, incluindo a modelagem da rugosidade considerada.

A criação do modelo CAD de um hélice pertencente a Série B-Wageningen inicia-se com a exportação da geometria a partir do programa PropCad, cujo hélice modelado é apresentado na Figura 14.

Conforme pode ser observado na Figura 14, são mostrados os parâmetros de entrada responsáveis pela geração do hélice selecionado para o estudo. No total foram gerados quatro hélices diferentes, que são apresentados na Tabela 2, onde  $D_C$  é o diâmetro do cubo e  $D_E$  é o diâmetro do eixo. Esses parâmetros foram definidos a fim de comparar a possibilidade de alguma relação na variação de  $P/D$  e  $BAR$ , com a perda da eficiência causada pelo aumento da rugosidade.

Figura 14 – Exemplo de dados de entrada no programa PropCad para geração de um hélice da série B-Wageningen.



Fonte: O Autor (2017).

Tabela 2 – Parâmetros dos hélices utilizados como objeto de estudo

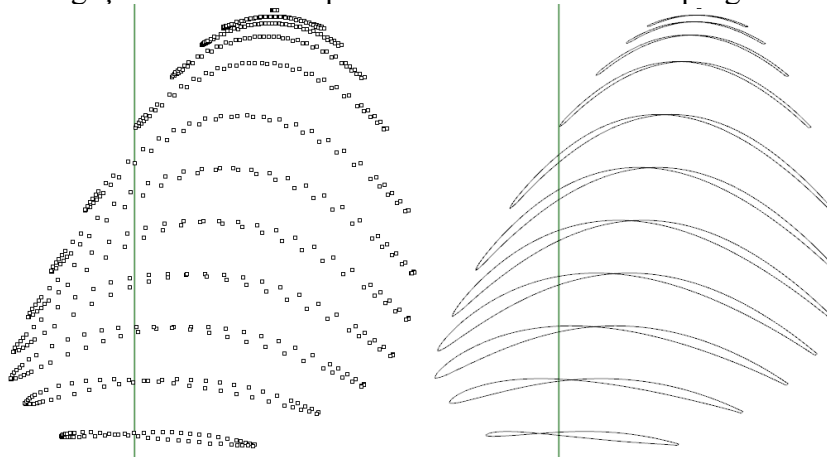
Nº	D (m)	D <sub>C</sub> (m)	D <sub>E</sub> (m)	Z	P/D	BAR
1	7	1.42	0.71	4	1.0	0.8
2	7	1.42	0.71	4	1.4	0.8
3	7	1.42	0.71	4	1.0	1.0
4	7	1.42	0.71	4	1.4	1.0

Fonte: O Autor (2017).

Uma vez modelado, a geometria do propulsor é exportada no formato *.txt*, o qual é um documento com as coordenadas da nuvem de pontos gerada pelo PropCad. Então, o arquivo pode ser aberto por qualquer programa compatível.

Em teoria, essa importação poderia ser feita direta no programa SolidWorks, já que o mesmo foi utilizado para criar o sólido final para a simulação. Porém, houveram alguns problemas na utilização da função macro e na importação do arquivo; por este motivo, um programa intermediário foi utilizado, Rhinoceros, para realizar a junção da nuvem de pontos gerados pelo PropCad e criar as linhas que servem como forma das pás do hélice.

Figura 15 – Ligação da nuvem de pontos do hélice através do programa Rhinoceros.

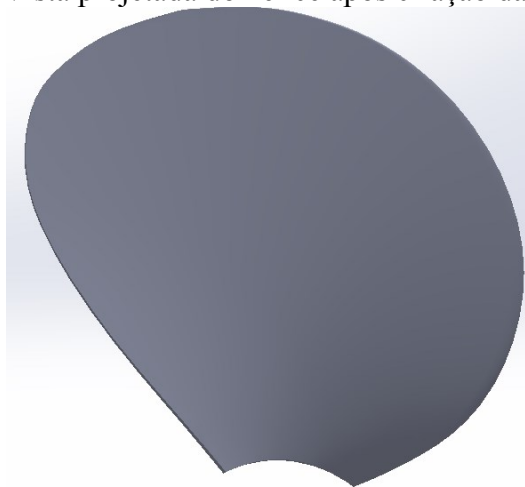


Fonte: O Autor (2017).

Como pode ser observado na Figura 15, as curvas do hélice foram criadas oriundas da nuvem de pontos geradas pelo programa PropCad. Para que as curvas ficassem suaves e seguissem o padrão da nuvem, foi utilizada a função curva através de pontos (*curve through points*) do programa Rhinoceros. A exportação do arquivo foi feita pela extensão *.IGS* para ser importada no programa SolidWorks.

Após a importação do arquivo *.IGS* no programa SolidWorks, as 36 (trinta e seis) curvas criadas foram unidas em 12 (doze) curvas através da função *Curva Composta* para que então houvessem doze curvas que limitassem a geometria de uma pá do hélice. A Figura 16 mostra o formato de hélice em uma vista projetada após a utilização da função *Superfície por Loft*, a qual cria uma interpolação entre as curvas selecionadas, gerando a superfície do hélice.

Figura 16 – Vista projetada do hélice após criação das superfícies.

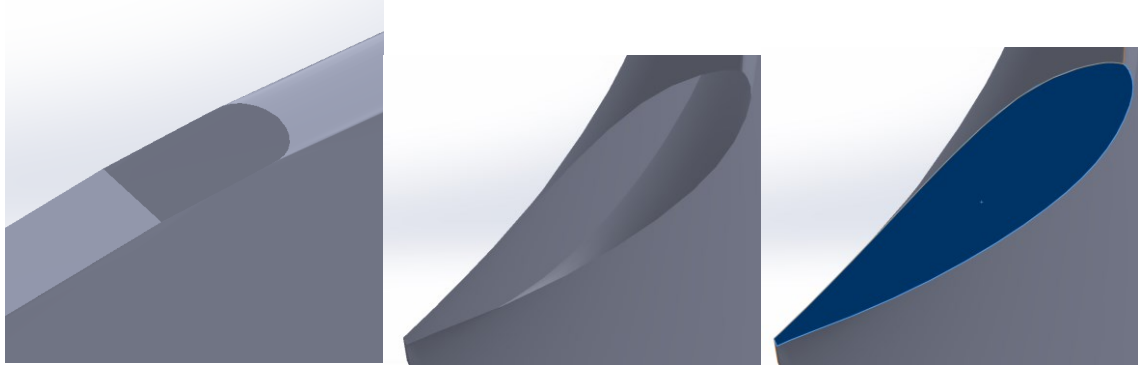


Fonte: O Autor (2017).



Porém, a função *Loft* apenas gera as superfícies da face e do dorso do hélice, não realizando o fechamento da geometria em sua base e seu topo. Esses problemas foram solucionados utilizando a função *Superfície Limite*, onde seleciona-se as curvas que limitam a criação de uma nova superfície. As Figura 17 (a) e (b) representam a geometria aberta no topo e na base, respectivamente. A Figura 17 (c) mostra a base do hélice fechada através da função *Superfície Limite*, o mesmo foi feito no topo da pá.

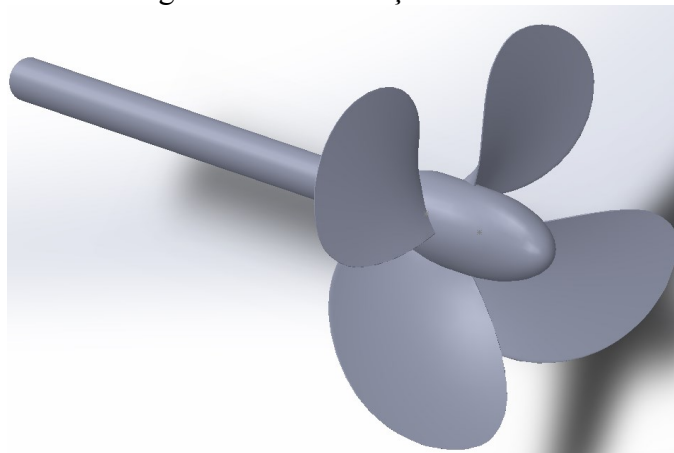
Figura 17 – Fechamento da superfície vazada da pá do hélice.



Fonte: O Autor (2017).

Após a criação das duas superfícies de fechamento do hélice, o mesmo ainda não é um sólido, sendo oco internamente, portanto, quando fosse retirado material para simular a cavitação, o hélice seria oco internamente. A ausência de material no interior da pá muda a inércia do propulsor que passa a desenvolver uma dinâmica não realista. Para resolver este problema, foi utilizada a função *Costurar Superfície*, e ativada a opção *Tentar formar um sólido*; isso faz com que agora a pá seja um sólido delimitada pelas superfícies de face, dorso e as superfícies de fechamento da pá.

Figura 18 – Finalização do hélice



Fonte: O Autor (2017).

Com a criação de uma pá finalizada, pode-se utilizar o *Padrão Circular* para criar as outras três pás do hélice. Além disso, foram criados o cubo (*hub*) e o eixo (*shaft*), citados na Tabela 2, do hélice como mostrado na Figura 18.

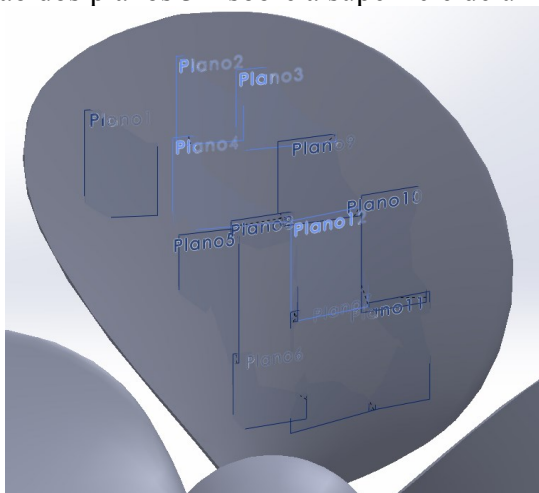
Por fim a geometria final exportada no formato Parassolid para o programa CFD STAR-CCM+.

### 3.1.1 Metodologia usada para danificar um hélice

Seguindo o objetivo deste trabalho, deve-se comparar um hélice perfeito com dois tipos de hélice, um com defeitos oriundos da cavitação e outro da bioincrustação. Para isso, o mesmo arquivo CAD foi utilizado como base para a criação dos defeitos no programa SolidWorks.

A introdução da rugosidade foi realizada a partir de planos 3D criados sobre a superfície de uma das pás do hélice, como mostrado na Figura 19. Esses planos servirão de base para que seja criada a imperfeição sobre as faces das pás dos hélices. Uma imperfeição ideal seria definida por camadas de rugosidades não uniformes sobre a pá do hélice, a qual poderia ser negativa (retirada de material do hélice, cavitação) ou positiva (depósito de material orgânico, bioincrustação).

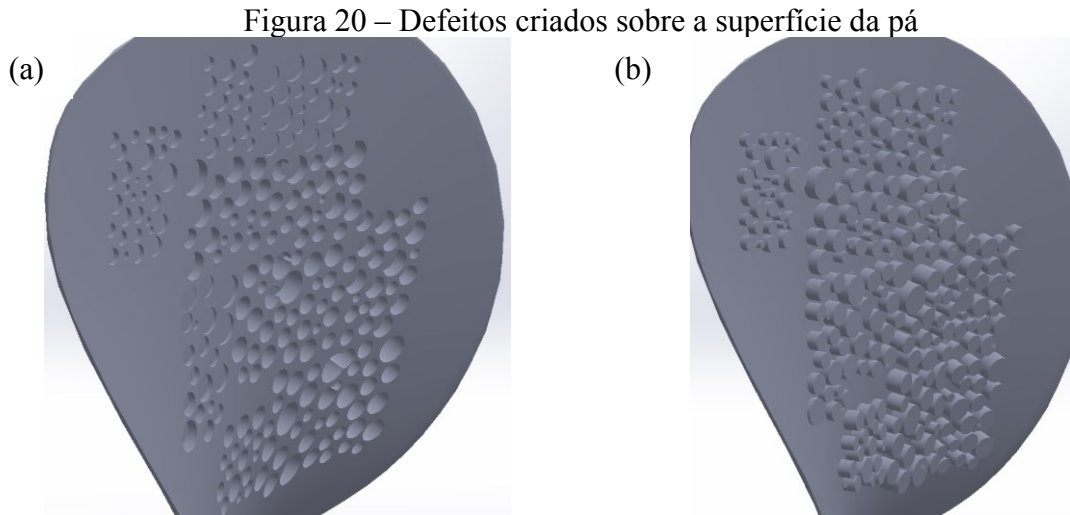
Figura 19 – Criação dos planos 3D sobre a superfície de uma das pás do hélice



Fonte: O Autor (2017).

Para que seja mais simples e rápida a simulação, decidiu-se que essa rugosidade não uniforme seria representada por diversos cilindros de tamanhos diferentes desenhados nos planos criados. Como pode ser visto na Figura 20 (a), os cilindros foram utilizados para retirar

material, utilizando a ferramenta *Corte Extrudado*, para simular um hélice com defeitos sofridos pela cavitação. Já a Figura 20 (b), representa a simulação criada para representar hélices com defeitos oriundos da bioincrustação, onde os cilindros foram utilizados para simular o depósito de material não uniforme sobre a pá. Neste último caso, foi utilizada a ferramenta *Ressalto Extrudado*.



Fonte: O Autor (2017).

A rugosidade criada foi repetida para as outras pás dos hélices. Para que a comparação seja justa, os mesmos pontos criados para cavitação, foram utilizados para bioincrustação. Portanto, a partir dos hélices perfeitos, de 25 a 30% das superfícies das pás foram danificadas com a remoção ou adição de material, resultando na redução média de 5% de massa (cavitação) e acréscimo médio de 6% de massa (bioincrustação) em relação ao hélice perfeito, como pode ser visto na Tabela 3.

Tabela 3 – Redução e adição de massa causados pela cavitação e bioincrustação, respectivamente

	Redução de massa causado pela cavitação	Adição de massa causada pela bioincrustação
P/D=1.0; BAR=0.8; Z=4	5.04%	5.97%
P/D=1.4; BAR=0.8; Z=4	4.25%	6.89%
P/D=1.0; BAR=1.0; Z=4	5.44%	7.77%
P/D=1.4; BAR=1.0; Z=4	4.17%	5.64%
Média	4.64%	6.43%
Desvio Padrão	0.62%	0.96%

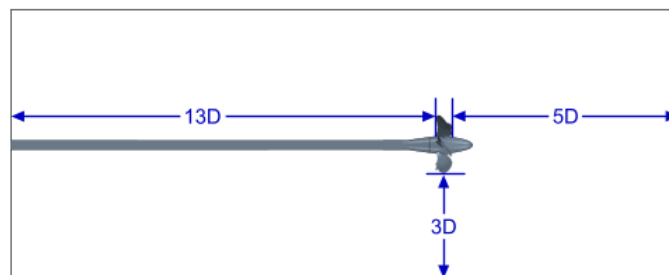
Fonte: O Autor (2017).

### 3.2 METODOLOGIA PARA SIMULAÇÃO DE UM HÉLICE EM ÁGUAS ABERTAS ATRAVÉS DO PROGRAMA STAR-CCM+

Para a simulação no programa STAR-CCM+ primeiramente foi realizado o tutorial diversas vezes para melhor entendimento dos procedimentos, e entendimento do programa. O tutorial é cedido pela CD-Adapco (2017) junto com a instalação do programa e é específico para simulações de hélice em águas abertas. Neste capítulo, deve-se observar que a mesma metodologia foi utilizada para todas as simulações, diferindo apenas no refinamento da malha nos detalhes das pás com defeitos de cavitação e bioincrustação e na quantidade de iterações.

A simulação consiste na criação de um tanque onde existe fluxo de água doce através de um hélice. Ou seja, neste tipo de simulação, o hélice não rotaciona, e sim o fluido ao redor do hélice. O tamanho do tanque é padronizado em função do diâmetro “D” do hélice, conforme mostrado na Figura 21.

Figura 21 – Dimensões do tanque de simulação



Fonte: O Autor (2017).

Como pode ser observado na Tabela 2, primeiramente desejava-se a simulação de um hélice com 7m de diâmetro. Porém, por motivos computacionais (capacidade de memória do computador utilizado<sup>3</sup>) os hélices foram reduzidos em escala para 250mm de diâmetro. Esse diâmetro é o mesmo utilizado no tutorial do programa. Por consequência da redução em escala

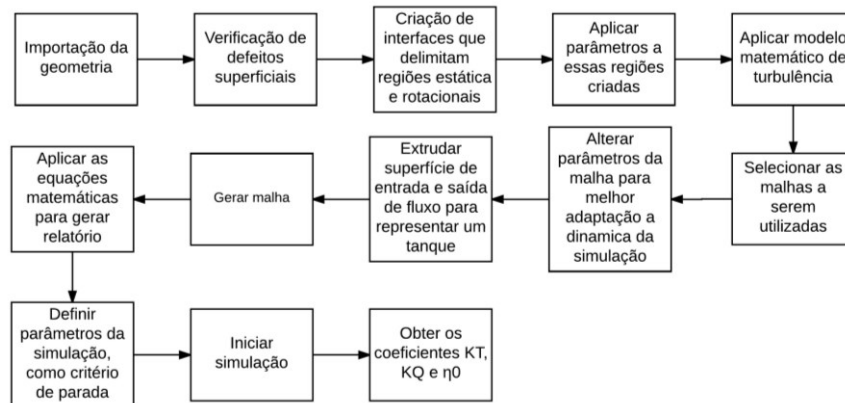
---

<sup>3</sup> Processador – Intel® Core™ i7-4700MQ CPU @ 2.40GHz; Memória (RAM) – 16 GB; Sistema operacional de 64 Bits; Versão do programa STAR-CCM+ – 11.02.010-R8

da geometria do hélice, o tamanho da sua malha pode ser diminuído. Com isso, a simulação de um hélice, considerando cinco valores de  $J$ , pode ser finalizado em um tempo máximo de 72h.

A Figura 22 mostra, a partir desta etapa do projeto até a análise pós-simulação, um fluxograma que melhor simplifica a sequência da metodologia utilizada.

Figura 22 – Fluxograma da metodologia de simulação de um hélice em águas abertas através do programa STAR-CCM+



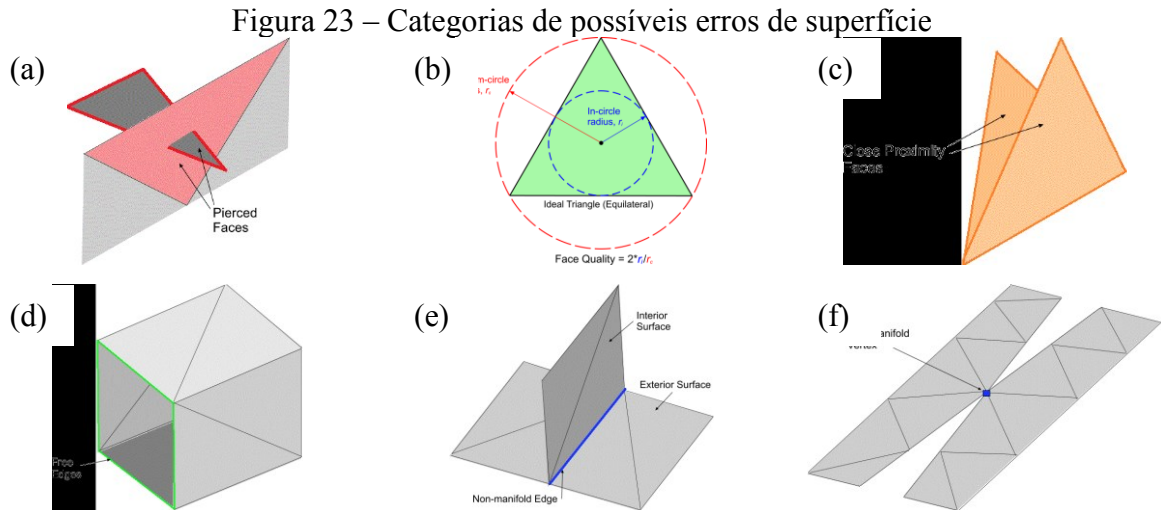
Fonte: O Autor (2017).

### 3.2.1 Importação da geometria no programa STAR-CCM+

A importação do arquivo Parassolid foi feita através da opção *Import Surface Mesh* do programa STAR-CCM+.

### 3.2.2 Verificando defeitos superficiais

O programa STAR-CCM+ disponibiliza uma função chamada de *Repair Surface Mesh*, a qual diagnostica e repara possíveis erros na geração das superfícies e curvas importadas.



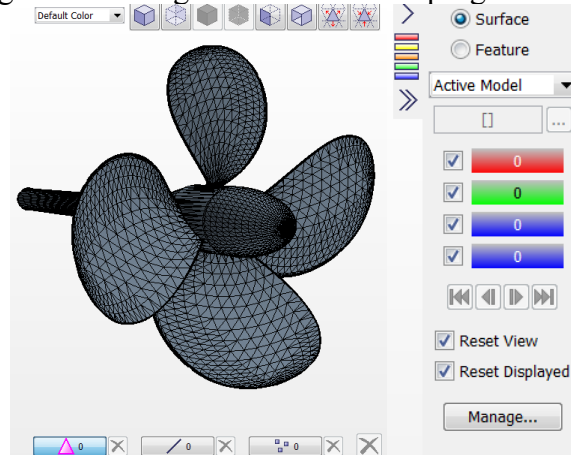
Fonte: CD-adapco STAR-CCM+ (2017).

Como mostra a Figura 23, existem seis possíveis erros em superfícies:

- a) *Pierced Faces*: uma face perfurada é uma face que tem intersecção de uma ou mais arestas de outra face;
- b) *Face Quality*: é uma medida de qualidade, onde é analisada a similaridade entre a face criada e a face ideal (triângulo equilátero);
- c) *Face Proximity*: é a razão entre a distância entre uma face e a face vizinha pelo tamanho da sua própria face, indicando possíveis dobras ou quinas (não deve ser menor do que 0.05);
- d) *Free Edges*: são arestas que estão ligadas a apenas uma face;
- e) *Non-manifold Edges*: quando uma aresta é compartilhada por duas ou mais superfícies;
- f) *Non-manifold Vertices*: ocorre quando duas faces não possuem nenhuma outra conexão entre elas além do ponto indicado.

Inicialmente, o próprio programa gera uma malha na importação do arquivo, porém, a malha gerada não será usada futuramente, e, por isso ela não é considerada nesse diagnóstico de erros; portanto os erros de Qualidade de Face (*Face Quality*) e Proximidade de Faces (*Face Proximity*) são desconsiderados. Como pode ser visto na Figura 24, não há nenhum erro considerável no hélice de referência utilizado neste trabalho.

Figura 24 – Diagnóstico de erro no programa CFD



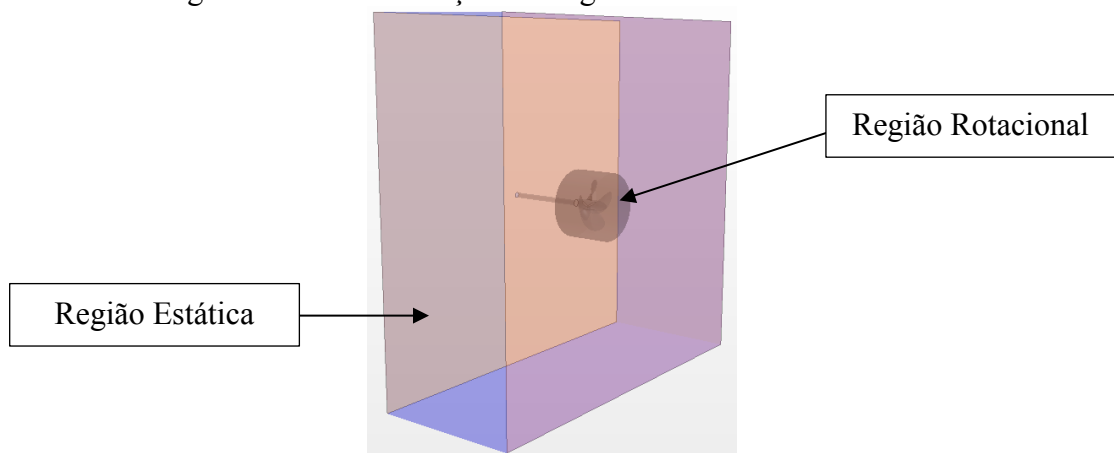
Fonte: O Autor (2017).

### 3.2.3 Determinação das regiões de análise do hélice

Nessa seção, o hélice é dividido em duas regiões: estática e rotacional. Para isso, foram criados dois sólidos que limitam as duas regiões. Como foi seguido o mesmo diâmetro do hélice do tutorial do programa, as dimensões sugeridas dos sólidos não foram alteradas.

Como pode ser observado na Figura 25, foi criado um cilindro com diâmetro igual a 0.325m que delimita a região rotacional e um paralelepípedo com altura e largura de 0.875m e espessura de 0.705m.

Figura 25 – Determinação das regiões rotacionais e estáticas.



Fonte: O Autor (2017).

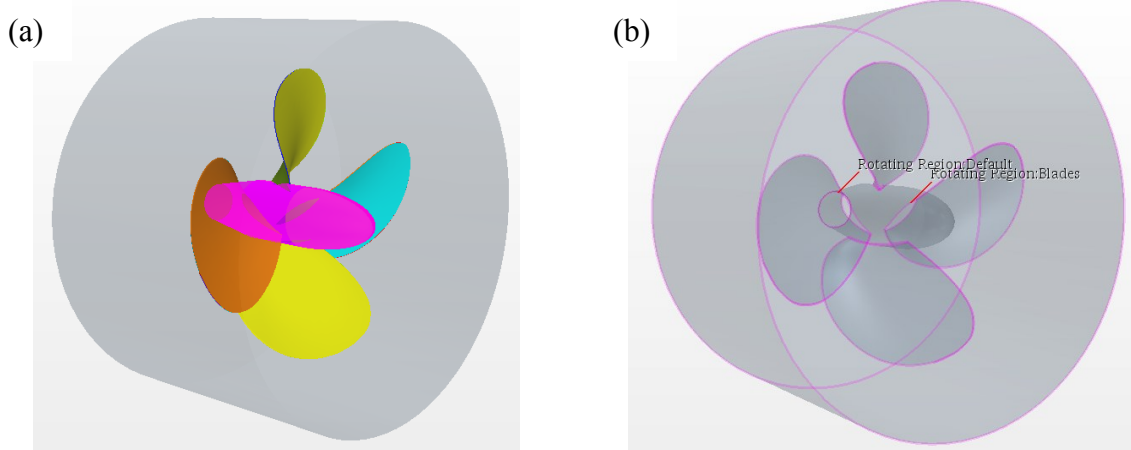
A região estática, que é extrudada no decorrer do trabalho, representa os limites do tanque; já a região rotacional representa a região de rotação do propulsor. Como a simulação não considera a rotação do arquivo em CAD, a região rotacional foi criada para simular a

rotação do fluido, e conseqüentemente, simular a rotação do hélice. Neste momento, o arquivo CAD já não é mais utilizado na simulação, já que foi utilizada uma ferramenta de subtração de corpos, onde a região rotacional adquire as características do hélice.

Após a finalização das alterações do CAD, existem duas regiões diferentes: região rotacional e estática. Porém, ainda não existe uma definição do que é pá, cubo ou eixo nessas regiões. Por esse motivo, deve-se dividir cada região em suas respectivas superfícies utilizando as funções *Split by Patch* para as superfícies e *Split Non-Contiguous* para curvas.

A região rotacional foi dividida em interface (região cilíndrica em cinza, que limita a região rotacional), pás (*blades*) e cubo em rosa (*hub*) como pode ser visto na Figura 26 (a). Além da divisão das superfícies, a região rotacional exige que as curvas representadas sejam divididas pois é necessário destacar as arestas das pás na criação da malha a ser analisada. Utilizando a função *Split Non-Contiguous*, as curvas da região rotacional foram divididas em arestas da interface e arestas das pás, como mostra a Figura 26 (b).

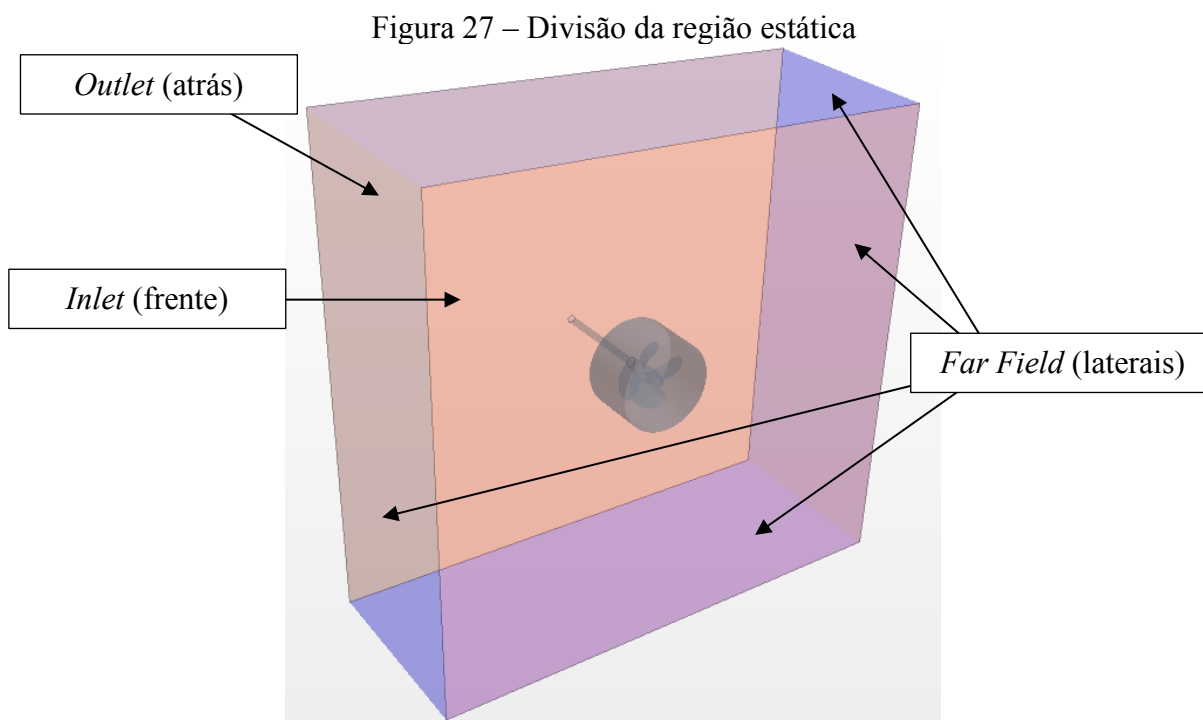
Figura 26 – Divisão das superfícies e curvas da região rotacional



Fonte: O Autor (2017).

A região estática foi dividida em campo de ligação (superfícies que ligam as superfícies de entrada e saída de fluxo, *far field*), entrada (*inlet*), saída (*outlet*), interface e eixo (*shaft*) como pode ser visto na Figura 27.





Fonte: O Autor (2017).

Como citado anteriormente, as superfícies que compõem a interface aparecem nas duas regiões por serem as superfícies que interligam ambas as regiões. Portanto, é necessário indicar no programa que essas regiões são interligadas pela interface; isso pode ser feito selecionando ambas as superfícies (região estática e rotacional) e selecionando a opção *Create a Weak In-Place Contact*.

Após separar as regiões em sub-regiões, deve-se mudar os parâmetros da condição de contorno de cada região. As subdivisões da região rotacional devem ser do tipo “parede” (*wall*) e devem ser categorizadas de acordo com suas superfícies. Por exemplo, no Apêndice A é representada a subdivisão das pás (*blades*), tipo *wall*, região da superfície das pás (*Part Surfaces: Rotating Regions – Blades*). Além disso, na aba *tools > reference frames* deve-se criar uma condição rotacional, 15Hz nesse caso, para simular a rotação do fluido; isso também deve ser alterado na região rotacional.

A região estática é um pouco mais complexa, pois exige mais alterações nos parâmetros de condição de contorno. Essas alterações podem ser melhor visualizadas na Tabela 4. As sub-regiões da interface e do eixo (*shaft*) seguem com o mesmo critério da região rotacional.

Tabela 4 – Parametrização das sub-regiões da região estática

Far Field	Part Surfaces: Far Field Type: Symmetry Plan	Representa que todo plano que liga a entrada e saída de fluxo é simétrico
Inlet	Part Surfaces: Inlet Type: Velocity Inlet	Representa a superfície de entrada do fluxo
Outlet	Part Surfaces: Outlet Type: Pressure	Representa a diferença de pressão que é criada na saída do hélice

Fonte: O Autor (2017).

### 3.2.4 Modelo matemático de turbulência

Para determinação dos resultados encontrados no trabalho, foi utilizado o modelo RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*). Este modelo consiste na descrição do campo de fluidos através do valor médio das variáveis (temperatura, velocidade e densidade) e suas variações.

Após determinar como o campo de fluido será analisado, deve-se aplicar qual o modelo de análise de turbulência será utilizado. Segundo CD-adapco (2017), o modelo *K-Epsilon* é o modelo numérico mais utilizado entre as aplicações industriais. Este, é baseado em duas equações: a primeira, rege a distribuição da energia cinética média local do movimento flutuante ( $\kappa$ ); a segunda rege a dissipação média da energia cinética ( $\epsilon$ ) por conta da turbulência do sistema (BRANDI, 2005).

Com a determinação do modelo de turbulência a ser utilizado, é sugerido pela CD-adapco (2017) que o modelo complementar *Realizable Two-Layer K-Epsilon* fosse utilizado. O mesmo utiliza uma equação otimizada para determinar a dissipação de energia cinética e expressa um novo coeficiente como função das propriedades do fluido e da turbulência. Este modelo foi escolhido por melhor solucionar estudos com malhas mais finas.

### 3.2.5 Criação da malha

Para iniciar a determinação da malha, deve-se definir quais tipos de malha serão utilizados. Consultando a documentação do programa, pode-se entender melhor quais os tipos de malha devem ser utilizados. Segundo a CD-adapco (2017), a função *surface remesher* é necessária para gerar uma malha triangular e mais detalhada sobre o CAD; a opção *trimmer* faz com que a malha seja predominantemente formada por hexaedros, fazendo com que haja

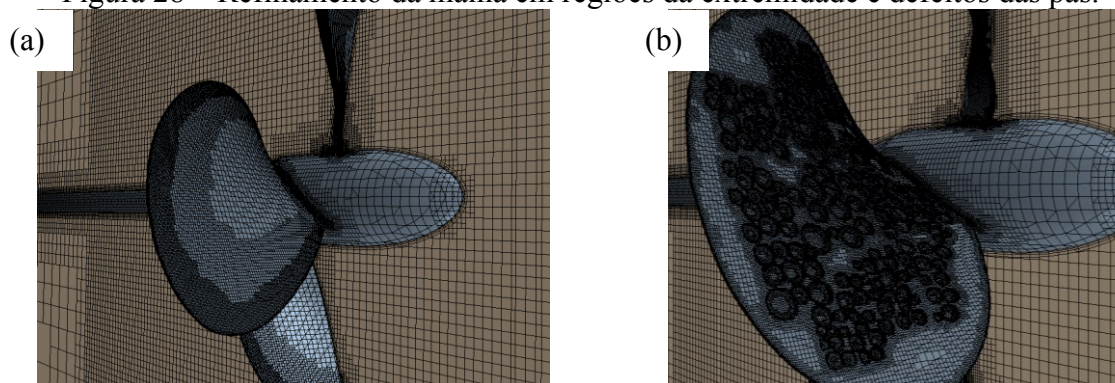
aumento do tamanho da malha em pontos não tão relevantes; a malha *Prism Layer Mesher* é ideal para melhorar a acuracidade da solução do fluido e, por fim, a malha *extruder* é basicamente utilizada para estender a malha, tipicamente utilizada entre a entrada e saída do fluxo.

Embora o programa sugira uma malha padronizada, deve-se alterar os parâmetros das mesmas para melhor adaptação a dinâmica da simulação a ser realizada.

Como base para análise, iniciou-se o trabalho com a utilização da malha de 1mm, com refinamentos em regiões de maior destaque. Este primeiro resultado encontrou erros relativos de 5% em comparação com os resultados experimentais da Série B. Porém, por motivos computacionais, as simulações estavam levando dias para serem concluídas e, visando a quantidade de simulações que deveriam ser feitas, a dimensão da malha foi alterada. Como segunda tentativa, foi utilizada uma malha de 5mm, ocorrendo o mesmo problema que anteriormente. Na terceira tentativa e no decorrer do trabalho, foi utilizada uma malha de 9mm, sacrificando a precisão do trabalho, porém alcançando pelo menos resultados qualitativos, permitindo a criação de discussão e conclusões.

A malha utilizada de 9mm possui refinamentos nas regiões de maior destaque, como defeitos de cavitação e bioincrustação ou extremidades das pás. Por isso, em hélices perfeitas, a malha é de 9mm com refinamentos nas pontas das pás e ligação com o cubo, Figura 28 (a). Já em hélices com defeitos provindos da cavitação e bioincrustação, além das regiões já citadas, houve também um refino nas faces defeituosas, Figura 28 (b).

Figura 28 – Refinamento da malha em regiões da extremidade e defeitos das pás.



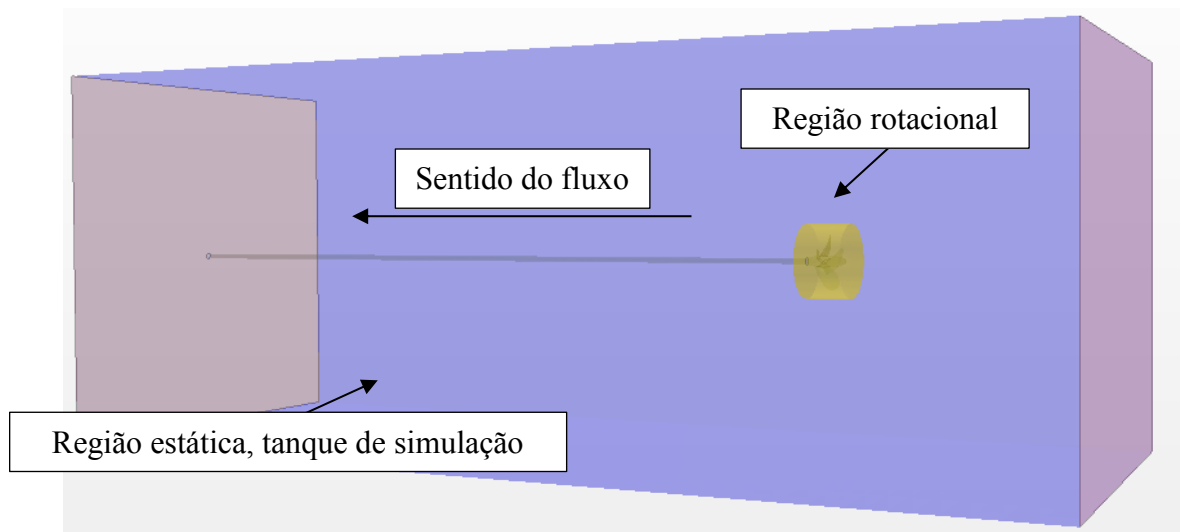
Fonte: O Autor (2017).

Após a definição do valor base da malha, os principais parâmetros alterados são o refino da malha na superfície da pá (95% de redução do valor base), bordo das pás e nos defeitos (98% de redução do valor base na ponta das pás e nos defeitos e 95% ao redor dos mesmos) e

acréscimo de 1600% do valor base nas regiões onde o refino da malha não é importante, como na entrada e saída do fluxo. Além desses refinamentos, deve-se criar um cilindro ao redor do hélice para definir o volume de controle. Este cilindro é diferente do citado na Seção 3.2.3, já que antes devia-se criar uma interface entre as regiões estática e rotativa. A malha no volume de controle é isotrópica e possui metade do tamanho da malha base.

Para finalizar a criação da malha, deve-se observar que o tanque de simulação ainda não foi totalmente criado. Portanto, deve-se extrudar a entrada do fluido em 1m e a saída em 3m. Esses valores foram definidos pela Figura 21, para que a entrada do fluido ficasse a uma distância de cinco vezes o diâmetro do hélice. Assim, como na criação do paralelepípedo já foi considerado um comprimento de 0.705m, foi extrudado 1m no sentido da entrada do fluido e 3m no sentido da saída, como mostra a Figura 29. Outro fato que pode ser visualizado na Figura 29 é o sentido do fluxo de fluido, pois o mesmo não é tão auto ilustrativo.

Figura 29 – Representação do tanque criado para simulação



Fonte: O Autor (2017).

Após a extrusão das extremidades do tanque, a malha final foi gerada e os detalhes da mesma podem ser vistos na Figura 28.

### 3.2.6 Variação dos valores de J para cada simulação

O coeficiente de avanço (J) é um dos principais parâmetros de avaliação do hélice. O mesmo é formado basicamente por duas parcelas de velocidade: rotacional (em um caso real é dada pela rotação do hélice, neste caso é a velocidade de rotação do fluido ao redor do hélice) e a velocidade linear (velocidade de avanço). A Equação 5.1 é a equação que rege o parâmetro

do coeficiente de avanço, sendo que  $D$  é o diâmetro do hélice,  $n$  é a rotação do fluido ao redor do hélice e  $VA$  é a velocidade de avanço.

$$J = \frac{VA}{Dn} \quad (5.1)$$

Na simulação CFD, a rotação do fluido ao redor do hélice foi fixada em 15Hz, o diâmetro do hélice (como pode ser visto na Tabela 2) é de 0.25m e a velocidade de avanço é ajustada pelo programa STAR-CCM+ para o  $J$  desejado. Ou seja, a simulação irá verificar a eficiência propulsiva em águas abertas em alguns  $J$  entre 0.6 e 1.4, sendo que  $n$  (Hz) e  $D$  (m) são fixos. Para que o  $J$  seja simulado corretamente, a variável  $VA$  é ajustada pelo programa automaticamente, como pode ser visto na Tabela 5.

Tabela 5 – Parametrização do  $J$  e  $VA$

$J$	$n$ (Hz)	$D$ (m)	$VA$ (m/s)
0.6	15	0.25	2.25
0.8	15	0.25	3.00
1.0	15	0.25	3.75
1.4	15	0.25	4.50

Fonte: O Autor (2017).

Deste modo, pode-se ajusta a variação do coeficiente de avanço ( $J$ ) na simulação de acordo com a Equação 5.2.

$$J = 0.6 + 0.1i \quad (5.2)$$

Onde  $i$  aumenta em uma unidade a cada 500 iterações. De acordo com a CD-adapco (2017), esse valor é suficiente para que  $J$  convirja em um valor. Desse modo,  $J$  varia de 0.6 a 1.4 a cada 0.1 para conseguir criar um gráfico mais refinado em condições de hélice perfeito (sem defeitos superficiais). Entretanto, para conseguir o mesmo gráfico refinado em condições de hélice defeituoso, a simulação demoraria aproximadamente 140h e esse tempo não era viável. Por isso, nessas condições foi utilizada a Equação 5.3 para variação do  $J$ , pois o tempo de simulação pode ser reduzido para um pouco mais da metade.

$$J = 0.6 + 0.2i \quad (5.3)$$

Ou seja, em simulações com hélices perfeitos, foram realizadas um total de 4000 iterações, já para hélices defeituosos foram realizadas um total de 2500 iterações. Deve-se observar que a quantidade de iterações não altera os resíduos encontrados em cada simulação, pois a diferença de iteração advém da quantidade de J analisados, e não do número de iterações por J.

### 3.2.7 Simulação

O programa STAR-CCM+ já possui uma rotina habilitada a integrar o campo de pressões na superfície do hélice de tal sorte a calcular a força total longitudinal (empuxo) e rotacional (torque).

Para quantificar os resultados finais do coeficiente de empuxo ( $K_T$ ), coeficiente de torque ( $K_Q$ ) e eficiência propulsiva em águas abertas ( $\eta_0$ ), foram gerados relatórios de empuxo (T) e torque (Q) na região rotacional (pás e cubo). Baseando-se nesses relatórios de torque e empuxo, pode-se aplicar as Equações 5.4, 5.5 e 5.6 para determinar os coeficientes.

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (5.4)$$

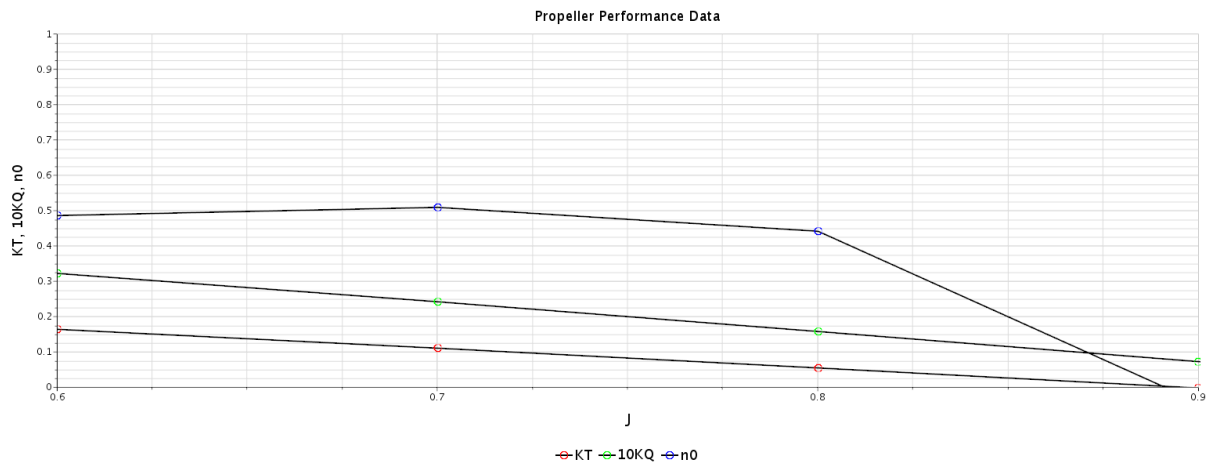
$$K_Q = 10 \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (5.5)$$

$$\eta_0 = \frac{J K_T}{\pi K_Q} \quad (5.6)$$

Onde J é o coeficiente de avanço empregado na simulação,  $\rho$  é a densidade da água ( $998.68 \text{ kg/m}^3$ ), n é a rotação do hélice em Hz (neste caso, essa rotação é aplicada no fluido) e D é o diâmetro em m. Deve-se observar que a Equação 5.5 é multiplicada por dez (10), a fim de gerar os resultados graficamente na mesma ordem de grandeza dos demais coeficientes.

### 3.2.8 Pós simulação

Finalizando as iterações, deve-se gerar uma tabela com os resultados obtidos dos coeficientes  $K_T$ ,  $K_Q$ ,  $\eta_0$  e J. Essa tabela servirá para gerar o gráfico final que sintetiza os dados desejados.

Figura 30 – Gráfico  $K_T$ ,  $K_Q$  e  $\eta_0$ 

Pode-se notar pela Figura 30 que mesmo com a tentativa de suavizar a curva, é necessário que o programa avalie um maior número de  $J$ , o que pode ser feito com um computador com maior capacidade, pois aumentaria o número de iterações em quinhentas vezes por  $J$ . O próprio programa STAR-CCM+ possui a opção de ver os valores de cada coeficiente nos valores de  $J$  que passaram pelas iterações, como mostra a Apêndice B.

Pode-se observar na Figura 30 que existem alguns valores negativos, isso se dá ao fato de que a partir de determinado  $J$  os coeficientes ficam negativos porque o empuxo e o torque são também negativos. Além disso, nota-se na terceira coluna ( $\eta_0$ ) das tabelas do Apêndice C, que em alguns casos os valores da eficiência ultrapassam 1.0. Isso ocorre porque o valor da eficiência propulsiva em águas abertas é encontrado através de uma formulação, onde o resultado (quando  $K_T$  e  $K_Q$  são negativos) ultrapassa 100%; por isso, tais dados são ignorados por serem conceitualmente irrealistas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo é apresentada a análise das simulações realizadas através do programa STAR-CCM+, no qual foram utilizados os modelos CAD obtidos através de uma combinação dos programas PropCad, Rhinoceros e SolidWorks. Primeiramente, são apresentados uma comparação entre os resultados provindos da análise CFD de um hélice com superfície sem danos e os resultados teóricos da Série B-Wageningen. Após a discussão dos primeiros resultados, foram aplicados defeitos oriundos de cavitação e bioincrustação nas pás dos hélices. Os dados obtidos foram então comparados com os resultados originalmente obtidos na simulação de um hélice perfeito da Série B-Wageningen.

### 4.1 COMPARAÇÃO ENTRE TEORIA E SIMULAÇÃO

A primeira etapa de simulações foi feita apenas com hélices sem defeitos superficiais. Foram analisados quatro hélices diferentes, os quais serão comparados com os resultados provindos da teoria da Série B-Wageningen.

Preliminarmente, foi decidido quais os hélices seriam testados, os parâmetros dos mesmos são apresentados na Tabela 6. Para maior facilidade de entendimento, a numeração citada na Tabela 6 continuará sendo utilizada nas próximas análises.

Tabela 6 – Parâmetros dos hélices analisados

<b>Nº</b>	<b>D (m)</b>	<b>Z</b>	<b>P/D</b>	<b>BAR</b>
<b>1</b>	0.25	4	1.0	0.8
<b>2</b>	0.25	4	1.4	0.8
<b>3</b>	0.25	4	1.0	1.0
<b>4</b>	0.25	4	1.4	1.0

Fonte: O Autor (2017).

Após a definição dos hélices a serem analisados, as etapas descritas na Seção 3.2 foram seguidas para todos os quatro hélices definidos. Além disso, os valores de referência foram



obtidos analisando-se os gráficos oriundos da Série B-Wageningen. Os resultados teóricos e computacionais são sintetizados nas Tabela 7 a 10 e no Apêndice C.

Deve-se lembrar que por mais que os erros relativos estejam altos, esse resultado já era esperado a partir do momento onde a precisão foi sacrificada ao aumentar o tamanho da malha. Sendo assim, o objetivo do trabalho era verificar se a metodologia do trabalho seria capaz de captar o efeito sobre a eficiência propulsiva em decorrência da rugosidade criada na superfície da pá. Uma análise mais refinada resultaria em um custo computacional maior.

Tabela 7 – Comparação entre teoria e simulação do hélice: P/D=1.0; BAR=0.8; Z=4

J	Erro Relativo		
	0.6	0.8	1.0
KT	27.36%	56.19%	NA
10KQ	14.20%	32.77%	NA
n0	14.82%	34.54%	NA

Fonte: O Autor (2017).

Tabela 8 – Comparação entre teoria e simulação do hélice: P/D=1.4; BAR=0.8; Z=4

J	Erro Relativo			
	0.6	0.8	1.0	1.2
KT	13.79%	19.94%	33.23%	71.02%
10KQ	6.15%	11.34%	21.73%	46.45%
n0	7.78%	9.39%	14.54%	45.76%

Fonte: O Autor (2017).

Tabela 9 – Comparação entre teoria e simulação do hélice: P/D=1.0; BAR=1.0; Z=4

J	Erro Relativo		
	0.6	0.8	1.0
KT	24.18%	55.31%	NA
10KQ	9.04%	28.13%	NA
n0	16.14%	37.81%	NA

Fonte: O Autor (2017).

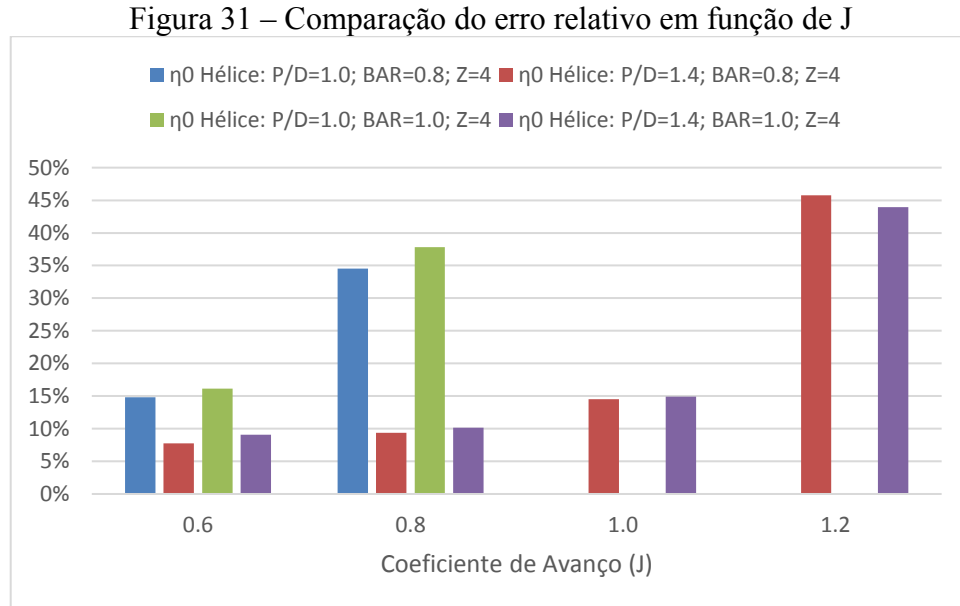
Tabela 10 – Comparação entre teoria e simulação do hélice: P/D=1.4; BAR=1.0; Z=4

J	Erro Relativo			
	0.6	0.8	1.0	1.2
KT	9.07%	15.54%	28.71%	66.79%
10KQ	-0.14%	5.80%	16.57%	40.80%
n0	9.06%	10.16%	14.91%	43.96%

Fonte: O Autor (2017).

Pode-se perceber nas Tabela 7 a 10 que o erro relativo entre a teoria e simulação CFD não está dentro de um padrão aceitável, conforme é mostrado na Figura 31, a qual representa o erro relativo entre teoria e simulação de hélices livres de defeitos superficiais em função do

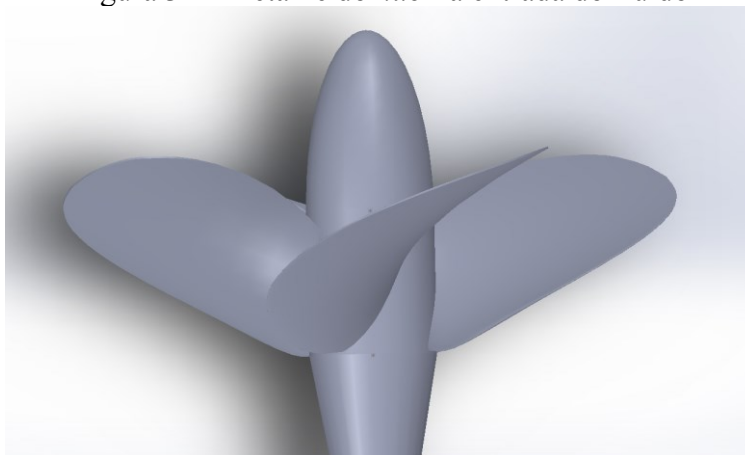
coeficiente de avanço. Vale lembrar que  $J$  a partir de 1.0 é válido apenas para dois dos hélices estudados.



Fonte: O Autor (2017).

Para que o mesmo seja aperfeiçoado, existem alguns pontos no CAD que devem ser alterados. O primeiro passo seria o aperfeiçoamento do CAD na saída do programa SolidWorks, pois por razões desconhecidas, o programa SolidWorks não estava reconhecendo a importação do arquivo via macro; por esta razão, foi utilizado o *software* Rhinoceros e, essa mudança contínua pode alterar algumas propriedades do CAD;

- a) A partir da Figura 32, observa-se o detalhe da entrada do fluido no hélice. Não foi encontrado pelo autor nenhuma padronização do formato do *hub* para testes computacionais de hélices. Foram feitos dois testes, com formato de elipse e esférico. Através da comparação de ambos se chegou à conclusão de que o *hub* com finalização em forma de elipse se aproximava mais do resultado teórico. Portanto, foi assumido que o mesmo teria um formato elipsoidal, que além da comparação feita pelo autor, possui um formato similar do exemplo do hélice padrão utilizado no tutorial do programa STAR-CCM+;
- b) O refinamento da malha é outra sugestão de aperfeiçoamento da simulação, pois foi utilizada uma malha um pouco grotesca (9mm como base e refinamentos nos pontos de análise) que poderia ser refinada; houve a tentativa de refinamento para 5mm de base da malha, porém, o tempo de simulação foi triplicado e não foi possível manter este padrão.

Figura 32 – Detalhe do *hub* na entrada do fluido

Fonte: O Autor (2017).

A partir dos pontos citados acima, pode-se perceber que a partir de algumas alterações o erro relativo poderia ser reduzido quando o coeficiente de avanço não for muito alto já que existe outra razão para o erro relativo aumentar de acordo com o acréscimo em  $J$ .

Este outro fator a ser visto nas Tabela 7 a 10, é que com o aumento do coeficiente de avanço ( $J$ ), o erro relativo aumenta; isso provavelmente ocorreu por algum descolamento da camada limite durante a simulação, ou seja, o aumento da velocidade do fluido provocou um aumento do arrasto do sistema; essa teoria pode validar a redução do empuxo, torque e consequentemente da eficiência da simulação em relação a teoria. Para apoiar a teoria, foi feita uma simulação do Hélice 1 a partir de  $J = 0.2$ , no caso, a diferença entre o coeficiente de eficiência em águas abertas caiu para a segunda casa decimal, mostrando que quanto maior o  $J$ , maior o erro causado pelo descolamento da camada limite. Em decorrência ao fato de que houve caimento dos coeficientes nas simulações CFD, alguns parâmetros não puderam ser comparados, já que os coeficientes eram iguais a zero; nestes casos, o erro relativo não é aplicável (NA).

Realizando uma comparação não ideal, existem estudos (DE ARAUJO, 2014) sobre comparação de resistência ao avanço por CFD, onde o aumento do número de Froude ocasionou o aumento do erro relativo em comparação com os resultados experimentais. Portanto, é conhecido que com o aumento de  $J$ , o erro relativo teria a possibilidade de aumentar. Seguindo a mesma linha de raciocínio, o mesmo fenômeno ocorreu na simulação de Da Silva (2016), onde observou-se que o erro relativo aumentou com o acréscimo de  $J$ .

Foi feito um último teste para gerar uma comparação, onde a frequência de rotação do fluido era de  $1/3$  da frequência de rotação utilizada em todas as simulações. Ou seja, com uma frequência de 5Hz, os resultados encontrados foram muito parecidos com os encontrados nas

outras simulações, havendo um erro médio de 3.5%, indicando que os valores usados nas simulações são adequados.

#### 4.2 COMPARAÇÃO ENTRE UM HÉLICE LIVRE DE DEFEITOS SUPERFICIAIS E UM HÉLICE COM DEFEITOS ORIUNDOS DA CAVITAÇÃO

Após as simulações com os hélices livres de defeitos superficiais, as etapas citadas nas Seções 3.1.1 e 3.2 foram seguidas para todos os quatro hélices simulados com defeitos oriundos da cavitação. Essas rugosidades negativas adicionadas abrangeram entre 25 e 30% das pás dos hélices, ou seja, aproximadamente 75% das pás do hélice ainda estava intacta. Como citado na Seção 3.1.1, isso resultou na redução de 5% do volume do hélice. As Tabelas 11 a 14 apresentam os erros relativos da simulação dos hélices cavitados e dos hélices livres de defeitos superficiais.

Tabela 11 – Comparação entre o hélice 1 livre de defeitos superficiais e o hélice 1 com defeitos oriundos da cavitação

Hélice: P/D=1.0; BAR=0.8; Z=4		
	CAVITAÇÃO	
J	0.6	0.8
KT	4.42%	14.47%
10KQ	-6.19%	-14.18%
n0	9.99%	25.10%

Fonte: O Autor (2017).

Tabela 12 – Comparação entre o hélice 2 livre de defeitos superficiais e o hélice 2 com defeitos oriundos da cavitação

Hélice: P/D=1.4; BAR=0.8; Z=4				
	CAVITAÇÃO			
J	0.6	0.8	1	1.2
KT	2.24%	3.81%	7.83%	33.61%
10KQ	-1.65%	-2.29%	-4.15%	-12.52%
n0	3.82%	5.96%	11.50%	41.00%

Fonte: O Autor (2017).

Tabela 13 – Comparação entre o hélice 3 livre de defeitos superficiais e o hélice 3 com defeitos oriundos da cavitação

Hélice: P/D=1.0; BAR=1.0; Z=4		
	CAVITAÇÃO	
J	0.6	0.8
KT	5.15%	19.94%
10KQ	-12.26%	-27.32%
n0	15.51%	37.12%

Fonte: O Autor (2017).

Tabela 14 – Comparação entre o hélice 4 livre de defeitos superficiais e o hélice 4 com defeitos oriundos da cavitação

Hélice: P/D=1.4; BAR=1.0; Z=4				
J	CAVITAÇÃO			
	0.6	0.8	1	1.2
KT	3.79%	4.92%	9.59%	45.89%
10KQ	-3.19%	-5.11%	-8.25%	-19.21%
n0	6.76%	9.55%	16.48%	54.61%

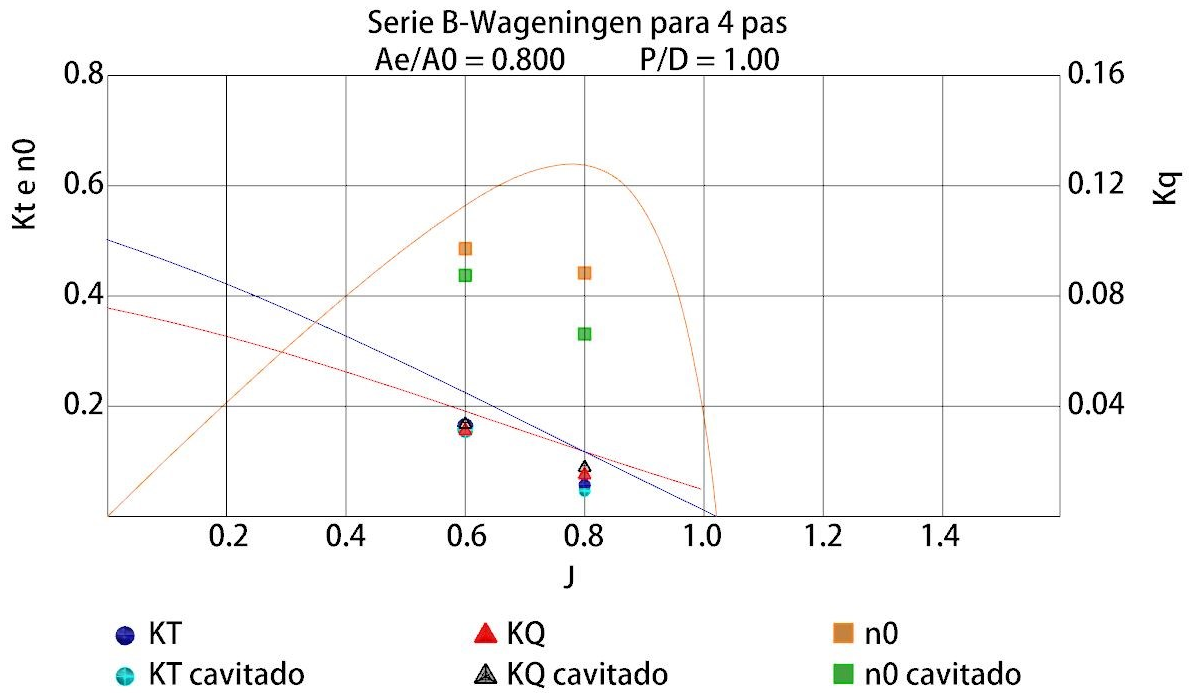
Fonte: O Autor (2017).

Pode-se observar nas Tabela 11 a 14, que como esperado, houve uma redução na eficiência e no coeficiente de empuxo e um acréscimo no coeficiente de torque, já que é necessário mais torque para manter a rotação. Novamente, com o aumento da velocidade do fluido, o erro relativo também aumentou, isso sugere que pode ter havido um aumento de turbulência, e possivelmente ocasionando o descolamento da camada limite.

Como citado na teoria sobre a rugosidade criada por seres microbiológicos (bioincrustação), era esperado que uma rugosidade negativa também causasse a redução da eficiência propulsiva em águas abertas de um hélice. Portanto, pode-se ter como base os resultados esperados, onde espera-se uma redução do coeficiente de empuxo de até 45% dependendo do coeficiente de avanço. Portanto, como a maior redução do coeficiente de empuxo foi de 45,89% no hélice 4, Tabela 14, pode-se dizer que o resultado está dentro do esperado. (WALKER et al, 2014).

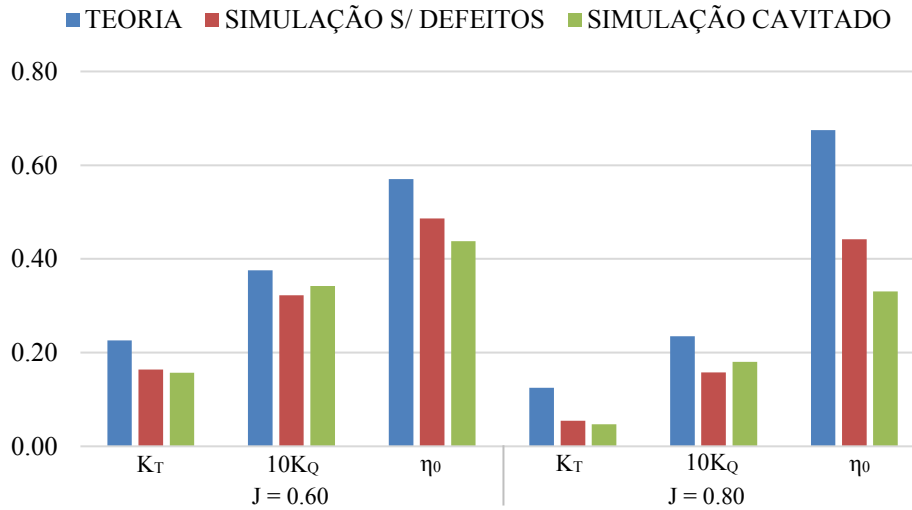
Para melhor visualização dos resultados encontrados, os gráficos provindos da Série B-Wageningen foram editados, mostrando as curvas de cada hélice com os resultados encontrados. Através das Figura 33 a 40, pode-se observar que as curvas representam as curvas da Série B, e os traços representam os resultados encontrados com a simulação CFD. Os coeficientes  $K_T$ ,  $K_Q$  e  $\eta_0$  representam os resultados de um hélice livre de defeitos superficiais oriundos da simulação; e os coeficientes com a palavra “cavitado” representam os resultados encontrados pela simulação de um hélice com defeitos superficiais oriundos da cavitação.

Figura 33 – Representação gráfica entre a teoria da Série B e as simulações de um hélice perfeito e um hélice cavitado



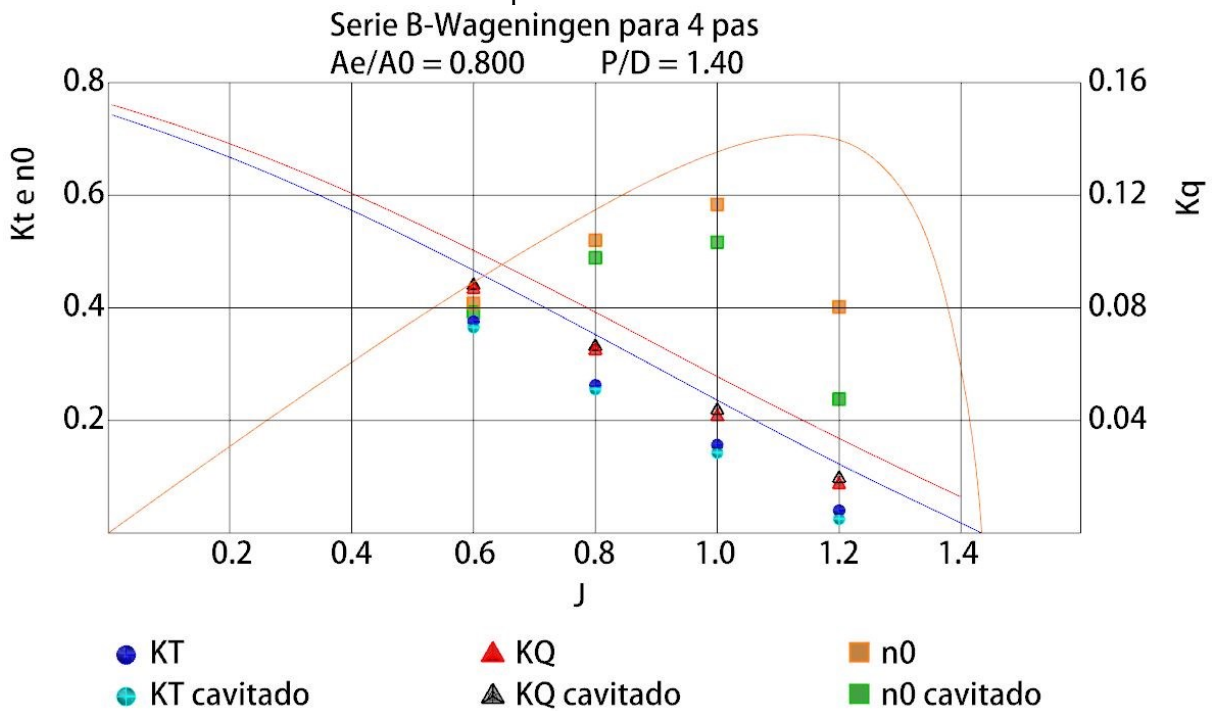
Fonte: Bernitsas et al. (1981, p. 49) modificado pelo autor.

Figura 34 – Comparação entre teoria e simulações do hélice P/D=1.0; BAR=0.8; Z=4



Fonte: O Autor (2017).

Figura 35 – Representação gráfica entre a teoria da Série B e as simulações de um hélice perfeito e um hélice cavitado



Fonte: Bernitsas et al. (1981, p. 49) modificado pelo autor.

Figura 36 – Comparação entre teoria e simulações do hélice  $P/D=1.4$ ;  $BAR=0.8$ ;  $Z=4$

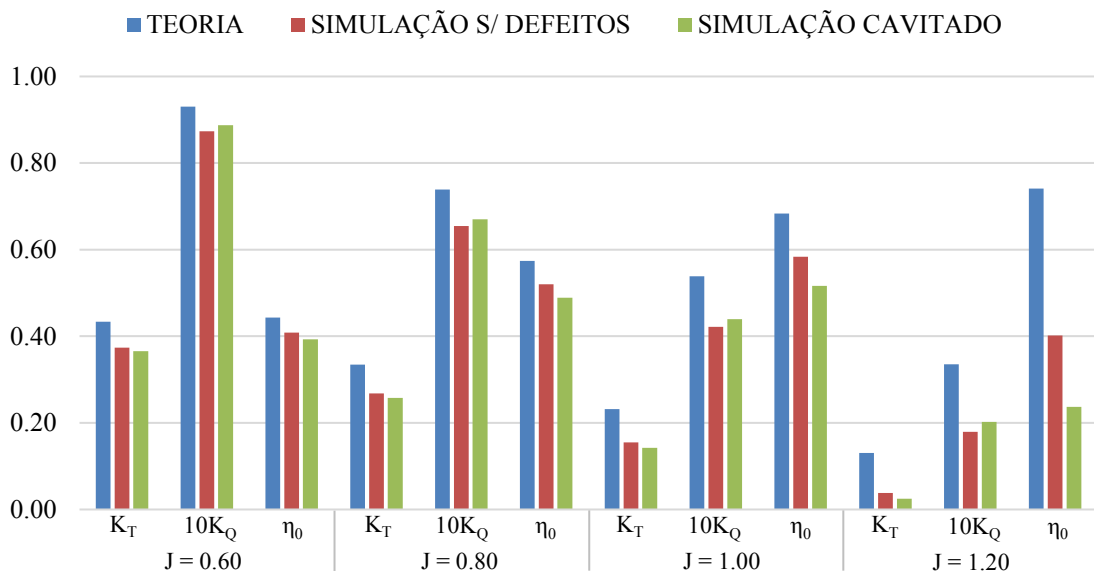
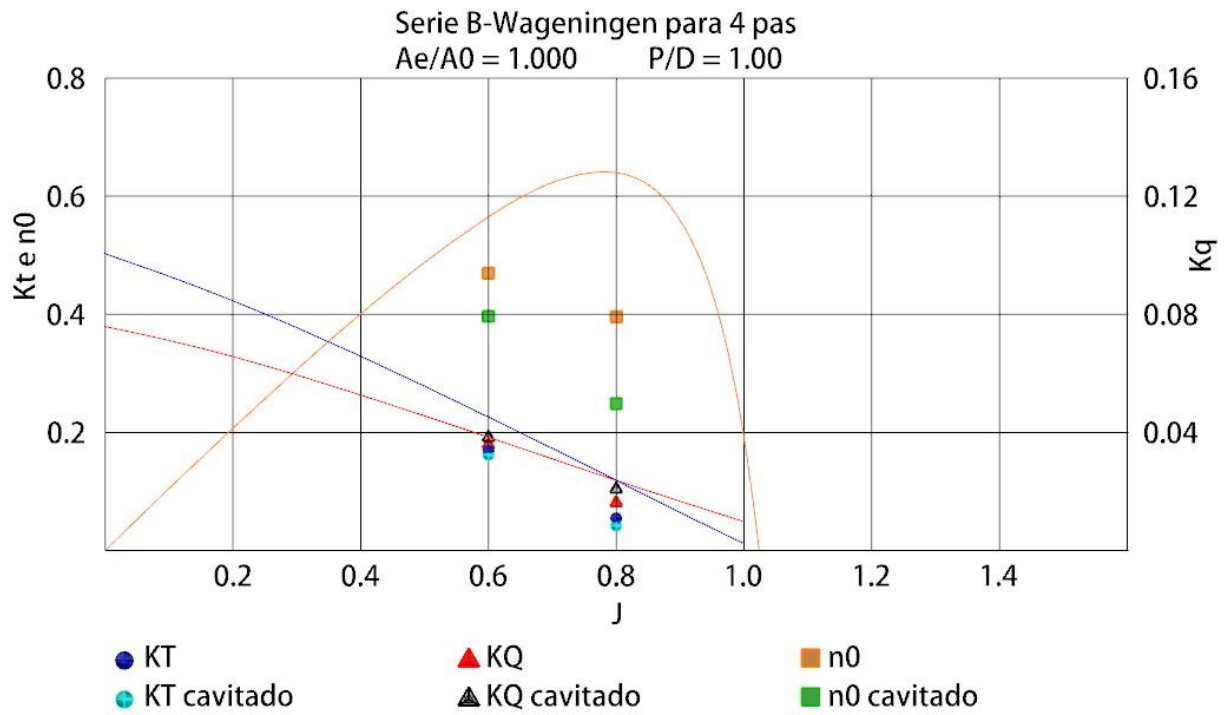


Figura 37 – Representação gráfica entre a teoria da Série B e as simulações de um hélice perfeito e um hélice cavitado



Fonte: Bernitsas et al. (1981, p. 53) modificado pelo autor.

Figura 38 – Comparação entre teoria e simulações do hélice P/D=1.0; BAR=1.0; Z=4

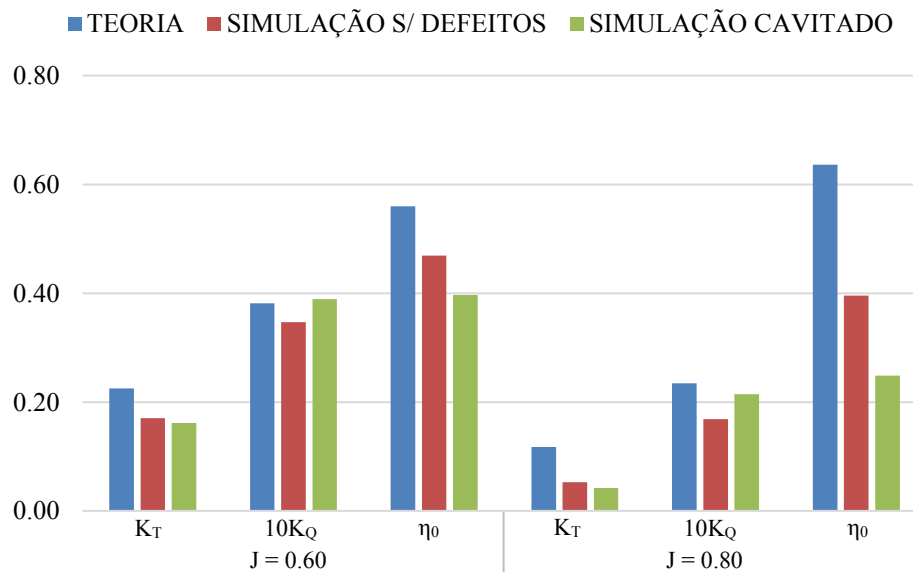
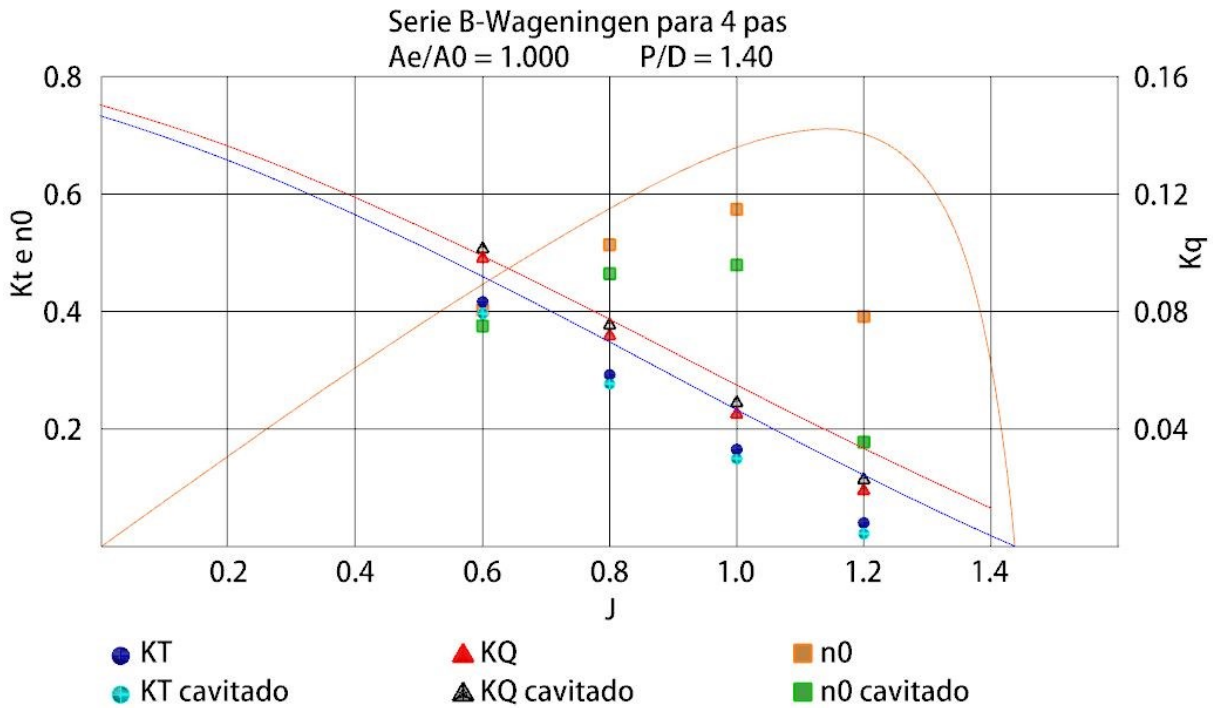


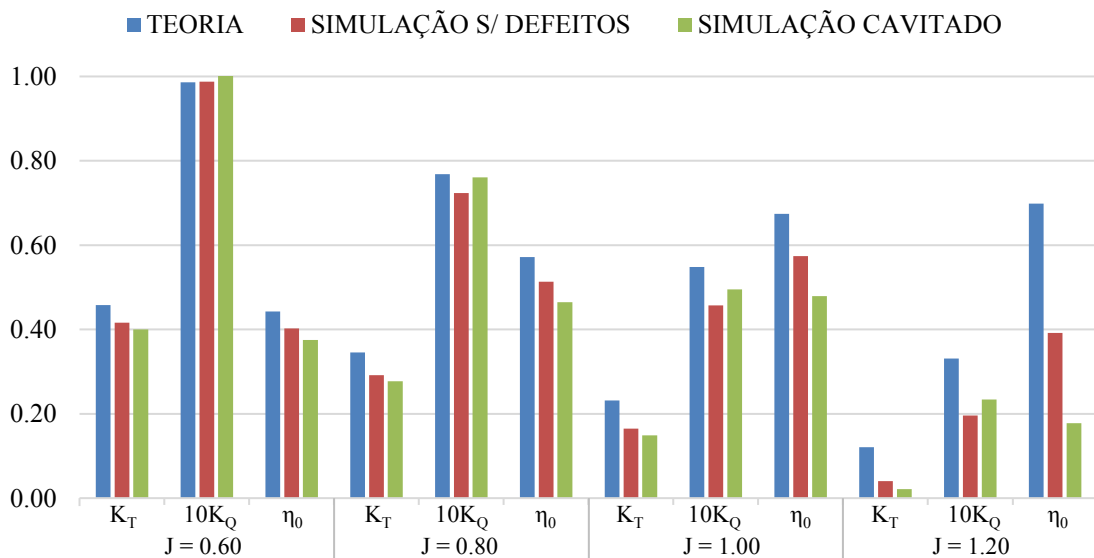


Figura 39 – Representação gráfica entre a teoria da Série B e as simulações de um hélice perfeito e um hélice cavitado



Fonte: Bernitsas et al. (1981, p. 53) modificado pelo autor.

Figura 40 – Comparação entre teoria e simulações do hélice P/D=1.4; BAR=1.0; Z=4



Fonte: O Autor (2017).

### 4.3 COMPARAÇÃO ENTRE UM HÉLICE LIVRE DE DEFEITOS SUPERFICIAIS E UM HÉLICE COM DEFEITOS ORIUNDOS DA BIOINCRUSTAÇÃO

Após as simulações com os hélices livres de defeitos superficiais e com defeitos provindos da cavitação, as etapas citadas nas Seções 3.1.1 e 3.2 foram seguidas para todos os quatro hélices simulados com defeitos oriundos da bioincrustação. Essas rugosidades positivas adicionadas abrangeram entre 25 e 30% das pás dos hélices, mantendo de 70 a 75% da pá do hélice intacta. Como citado na Seção 3.1.1, isso resultou na adição média de 6% do volume do hélice. As Tabelas 15 a 18 apresentam os resultados encontrados para os hélices simulados e a comparação com os resultados encontrados na simulação dos hélices com superfícies livres de defeitos. É importante lembrar que o resultado encontrado nesta seção não há nenhuma relação com o encontrado na Seção 4.2, pois os hélices defeituosos foram simulados de forma independente, a única relação foi a tentativa de manter a área da rugosidade entre 25 e 30% do tamanho da pá.

Tabela 15 – Comparação entre o hélice 1 livre de defeitos superficiais e o hélice 1 com defeitos oriundos da bioincrustação

Hélice: P/D=1.0; BAR=0.8; Z=4		
	BIOINCRUSTAÇÃO	
J	0.6	0.8
KT	3.99%	10.78%
10KQ	-21.64%	-56.12%
n0	21.07%	42.85%

Fonte: O Autor (2017).

Tabela 16 – Comparação entre o hélice 2 livre de defeitos superficiais e o hélice 2 com defeitos oriundos da bioincrustação

Hélice: P/D=1.4; BAR=0.8; Z=4				
	BIOINCRUSTAÇÃO			
J	0.6	0.8	1	1.2
KT	2.22%	3.79%	7.81%	33.34%
10KQ	-1.66%	-2.30%	-4.17%	-12.56%
n0	3.82%	5.95%	11.50%	40.78%

Fonte: O Autor (2017).

Tabela 17 – Comparação entre o hélice 3 livre de defeitos superficiais e o hélice 3 com defeitos oriundos da bioincrustação

Hélice: P/D=1.0; BAR=1.0; Z=4		
	BIOINCRUSTAÇÃO	
J	0.6	0.8
KT	8.10%	22.69%
10KQ	-43.45%	-103.75%
n0	35.94%	62.06%

Fonte: O Autor (2017).

Tabela 18 – Comparação entre o hélice 4 livre de defeitos superficiais e o hélice 4 com defeitos oriundos da bioincrustação

Hélice: P/D=1.4; BAR=1.0; Z=4				
	BIOINCRUSTAÇÃO			
J	0.6	0.8	1	1.2
KT	4.75%	5.58%	10.24%	41.76%
10KQ	-5.15%	-10.13%	-19.10%	-53.06%
n0	9.41%	14.26%	24.64%	61.95%

Fonte: O Autor (2017).

Nota-se que hélices com defeitos superficiais causados pela bioincrustação também apresentam redução na eficiência propulsiva em águas abertas e no coeficiente de empuxo e um acréscimo no coeficiente de torque. E do mesmo modo que na Seção 4.2, existe a possibilidade de ter havido descolamento da camada limite ao aumentar a velocidade do fluido. Além do descolamento da camada limite, já era esperado uma redução da eficiência com o aumento da velocidade do fluido, pois segundo Walker et al (2014), a perda de empuxo, e consequentemente eficiência, de um hélice com bioincrustação varia de acordo com seu Número de Reynolds, ou seja, sua velocidade.

O teste criado por Walker et al (2014) utilizou dois hélices tipo fólio, ambos cobertos com materiais para simular a bioincrustação, sendo um caso com rugosidade mais suave e outro mais severo. O hélice foi testado dentro de um tanque de provas e de um túnel de vento. Segundo os autores, a perda de empuxo entre um hélice suave e um rugoso estaria entre 32 e 45%, porém o resultado encontrado foi de 11% de redução.

Considerando um intervalo entre 11 e 45% de redução do coeficiente de empuxo, pode-se dizer que os resultados encontrados neste trabalho são satisfatórios, já que existem muitas possibilidades de aperfeiçoamento e refino do modelo.

Para melhor visualização dos resultados encontrados, os gráficos provindos da Série B-Wageningen foram editados, mostrando as curvas de cada hélice com os resultados encontrados. Através das Figura 41 a 48, pode-se observar que as curvas representam as curvas da Série B, e os traços representam os resultados encontrados com a simulação CFD. Os



Figura 43 – Representação gráfica entre a teoria da Série B e as simulações de um hélice perfeito e um hélice bioincrustado

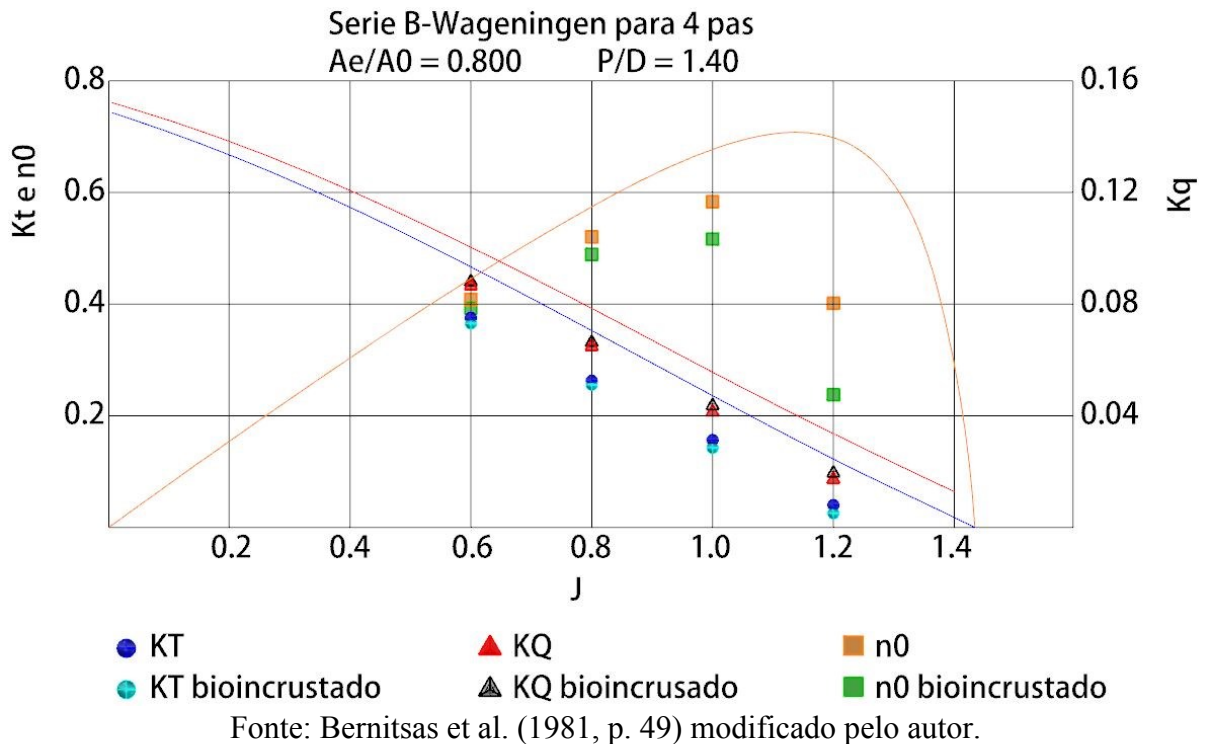


Figura 44 – Comparação entre teoria e simulações do hélice P/D=1.4; BAR=0.8; Z=4

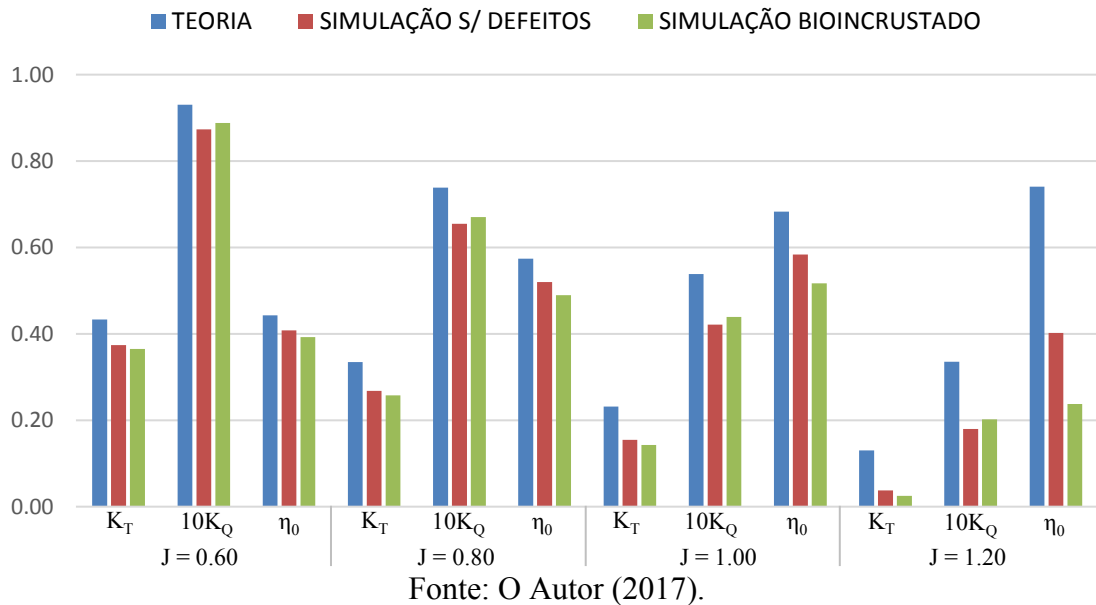


Figura 45 – Representação gráfica entre a teoria da Série B e as simulações de um hélice perfeito e um hélice bioincrustado

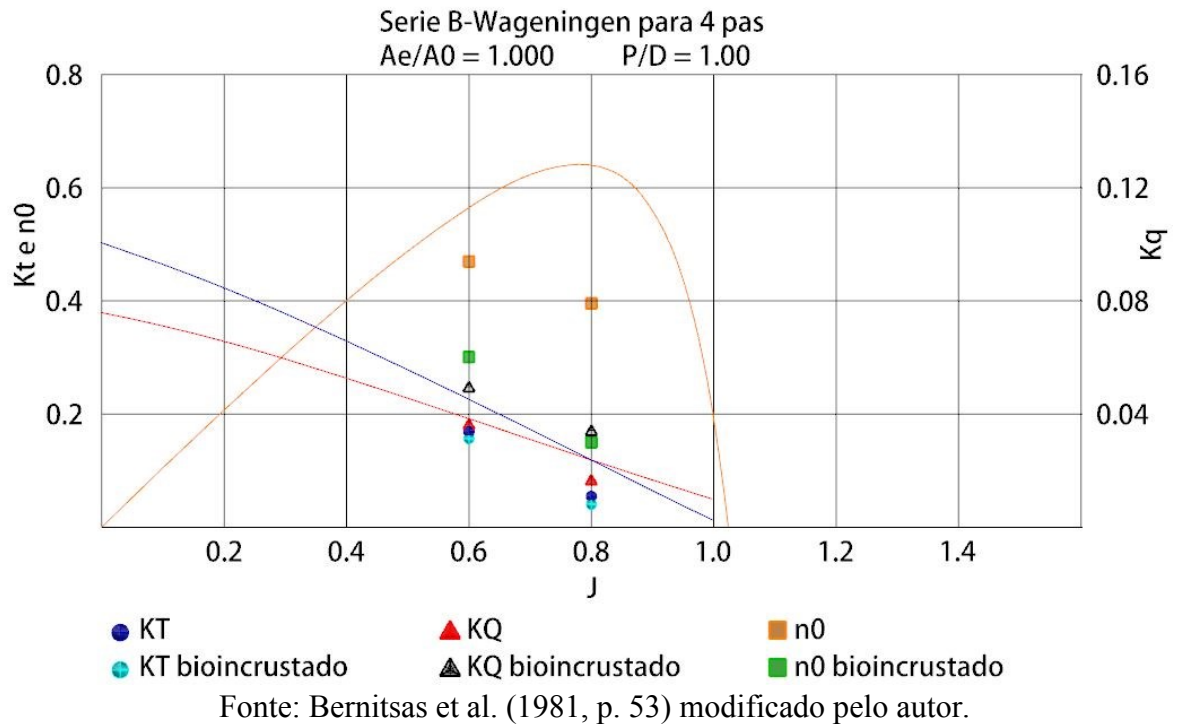


Figura 46 – Comparação entre teoria e simulações do hélice  $P/D=1.0$ ;  $BAR=1.0$ ;  $Z=4$

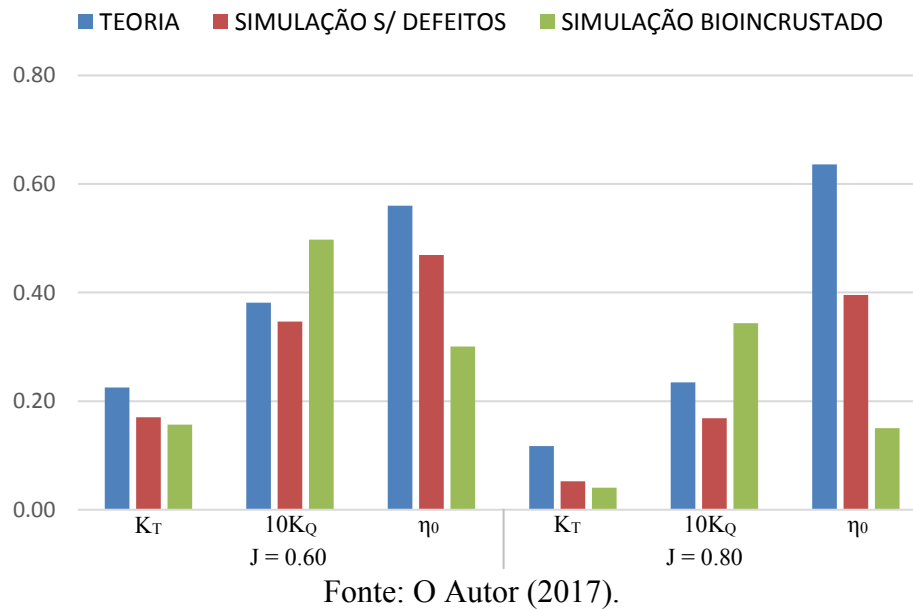
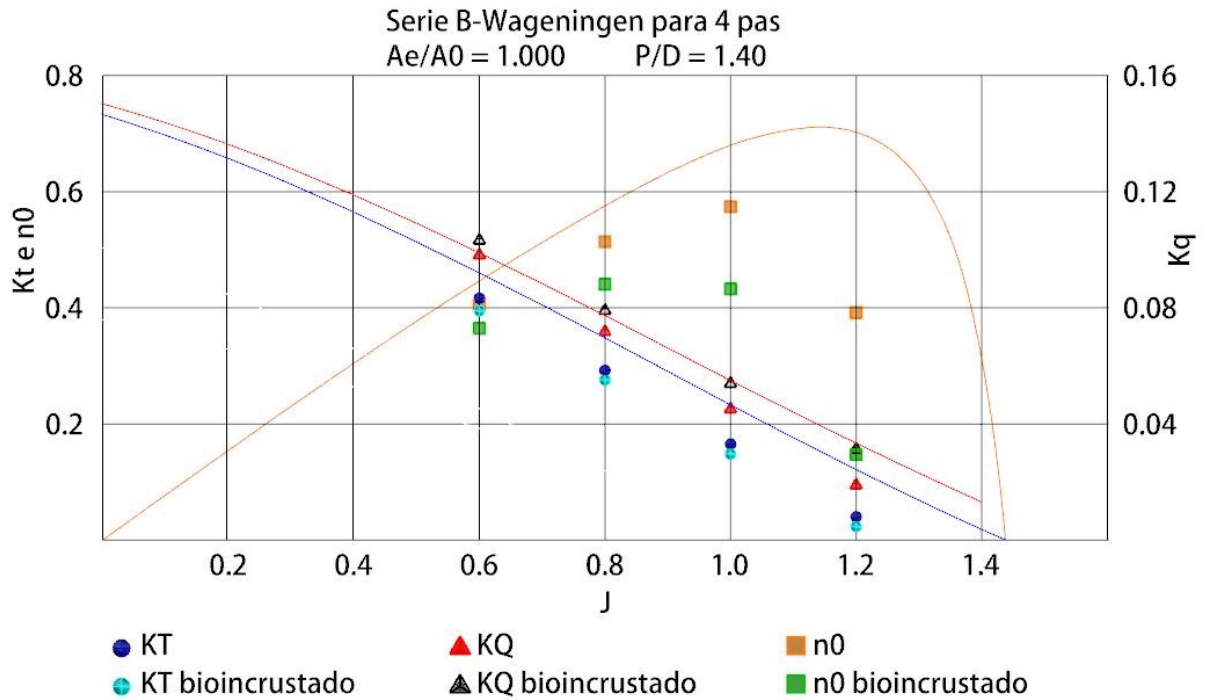
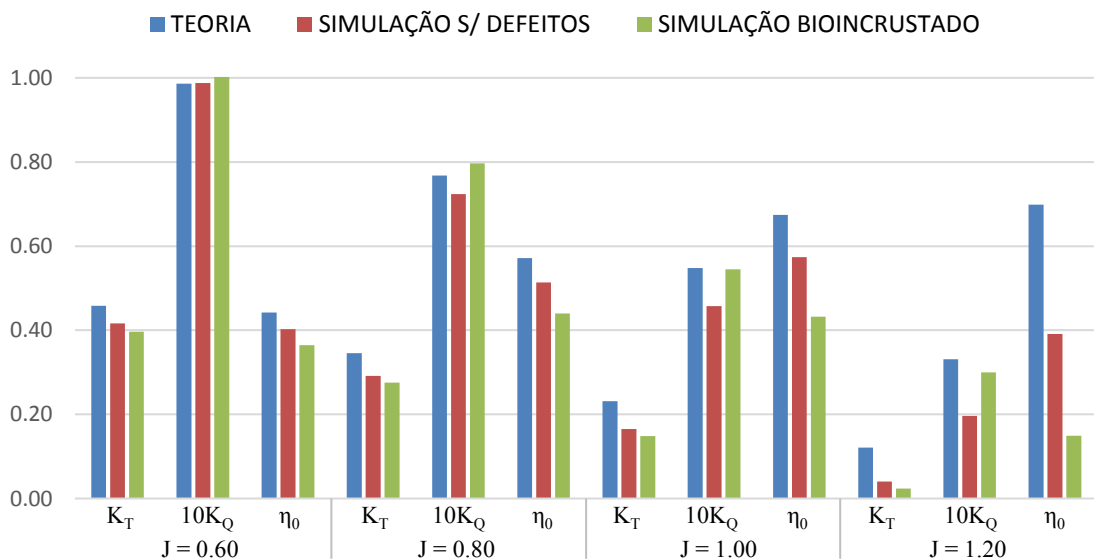


Figura 47 – Representação gráfica entre a teoria da Série B e as simulações de um hélice perfeito e um hélice bioincrustado



Fonte: Bernitsas et al. (1981, p. 53) modificado pelo autor.

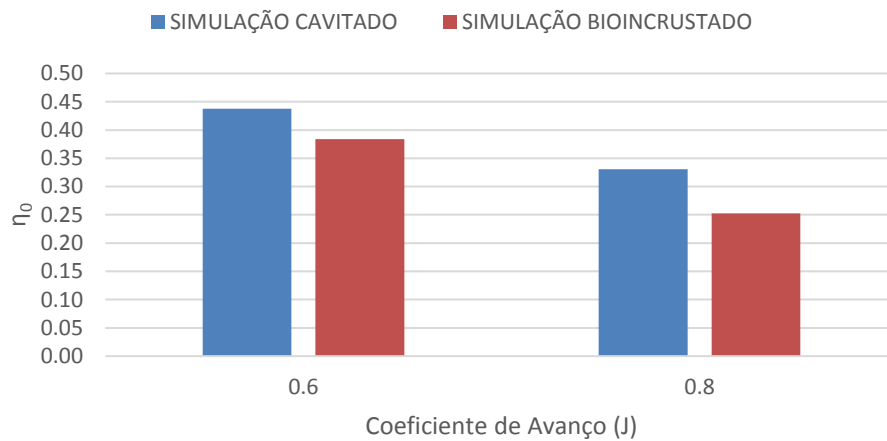
Figura 48 – Comparação entre teoria e simulações do hélice P/D=1.4; BAR=1.0; Z=4



#### 4.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS ENCONTRADOS ENTRE HÉLICES CAVITADOS E BIOINCRUSTADOS

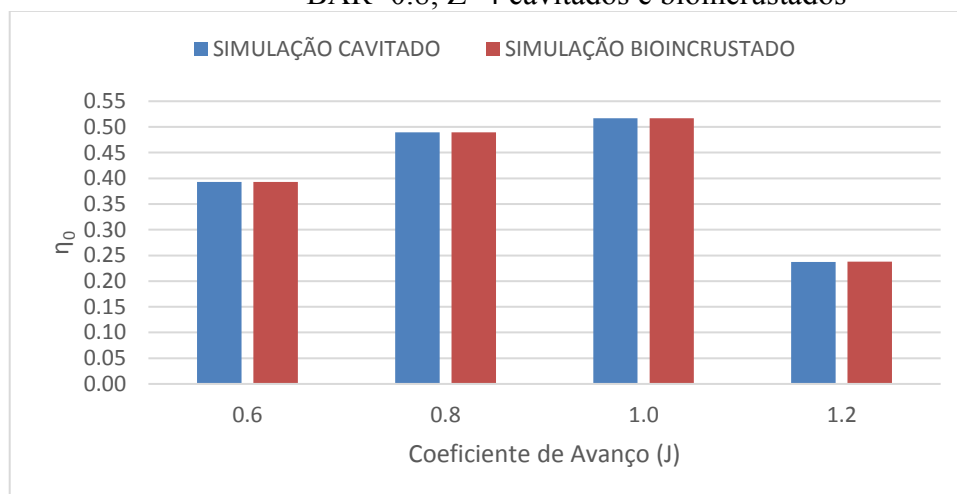
A partir do momento em que as simulações desejadas foram finalizadas, pode-se comparar se em algum dos casos existe uma discrepância de resultados. Para isso, as Figura 49 a 52 trazem as comparações dos hélices simulados em ambas as situações (cavitado e bioincrustado) em função de J.

Figura 49 – Gráfico da eficiência em função de J entre o hélice com parâmetros: P/D=1.0; BAR=0.8; Z=4 cavitados e bioincrustados



Fonte: O Autor (2017).

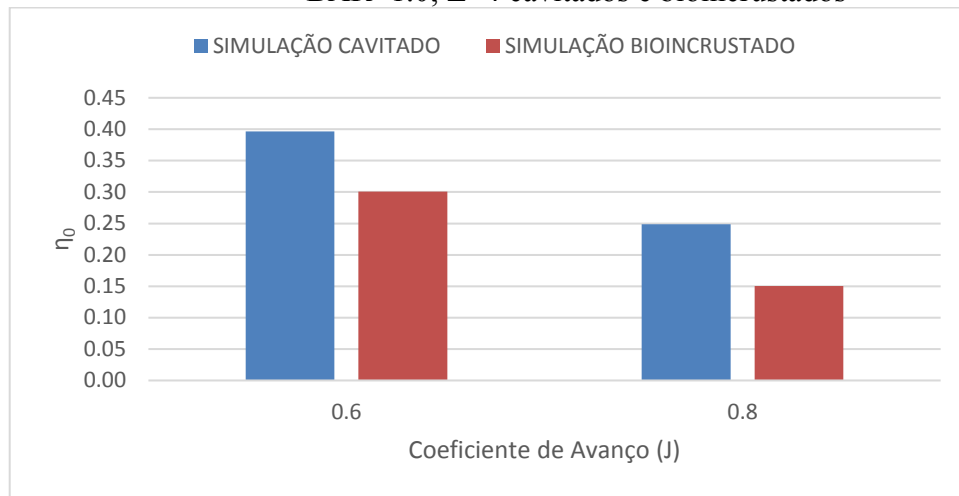
Figura 50 – Gráfico da eficiência em função de J entre o hélice com parâmetros: P/D=1.4; BAR=0.8; Z=4 cavitados e bioincrustados



Fonte: O Autor (2017).

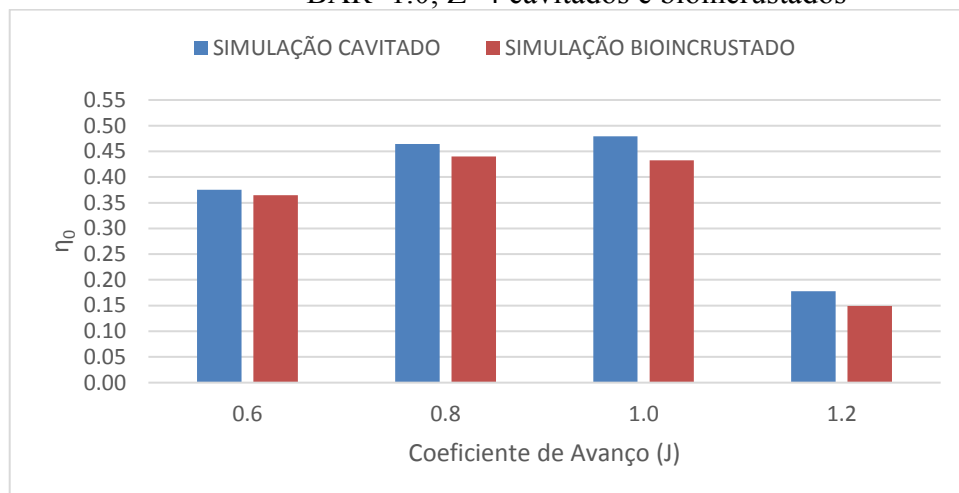


Figura 51 – Gráfico da eficiência em função de J entre o hélice com parâmetros: P/D=1.0; BAR=1.0; Z=4 cavitados e bioincrustados



Fonte: O Autor (2017).

Figura 52 – Gráfico da eficiência em função de J entre o hélice com parâmetros: P/D=1.4; BAR=1.0; Z=4 cavitados e bioincrustados



Fonte: O Autor (2017).

Através dos gráficos mostrados, é possível perceber que em condições de P/D mais altos, o resultado encontrado é bastante semelhante. Diferente dos casos onde o P/D é menor, nestes casos é notório que os hélices bioincrustados tiveram maior queda de eficiência. Porém, em todos os casos a eficiência foi menor em hélices bioincrustados, possivelmente porque o relevo na superfície do hélice cause maior turbulência no fluido. As comparações entre os coeficientes de empuxo e torque dos hélices defeituosos podem ser vistas no Apêndice F.

Outra análise que pode ser feita é que o aumento de J não fez com que a diferença de eficiência entre as condições analisadas aumentasse de forma considerável.

## 5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho visava avaliar a influência da rugosidade causada pela cavitação e pela bioincrustação na eficiência propulsiva de um propulsor do tipo hélice com geometria pertencente a Série B-Wageningen. Em se tratando de um trabalho preliminar, esperava-se avaliar se a metodologia utilizada permitiria captar tal influencia.

Após muitas horas de pesquisa e simulações, pode-se concluir que os resultados obtidos pelas simulações vieram de encontro com os resultados esperados e descritos nas referências utilizadas. Mesmo com a teoria do descolamento da camada limite, nota-se que, comparando hélices livres de defeitos superficiais e hélices com rugosidades, existe uma redução na eficiência propulsiva em hélices defeituosos.

Por outro lado, ainda que não tenha sido possível uma comparação com baixo erro relativo, entre simulação e um caso teórico baseado nos gráficos oriundos da Série B-Wageningen, por motivos computacionais, o objetivo do trabalho era a comparação por métodos numéricos entre hélices livres de defeitos superficiais e hélices com defeitos. Entre essa comparação, pode-se notar que, como foi mantido um padrão entre os defeitos de cavitação e bioincrustação (mesma área), pode-se comparar se um dos defeitos é mais prejudicial na eficiência propulsiva de uma embarcação.

Em praticamente todas as variações de  $J$ , a eficiência foi menor quando o hélice possuía defeitos provindos da bioincrustação, provavelmente porque esse relevo criava maior interferência na turbulência gerada na superfície do hélice. Essa comparação ficou ainda maior em hélices onde o  $P/D$  era menor. Porém não foi possível encontrar um valor médio comparativo entre hélices cavitados e bioincrustados que abrange todos os casos.

De forma geral, o presente trabalho atingiu o objetivo de comparar computacionalmente hélices perfeitos e defeituosos, mostrando a importância de realizar a manutenção dos hélices para evitar uma considerável perda da eficiência propulsiva.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Através do conhecimento e experiência adquiridos ao desenvolver o presente trabalho, tendo como base as dificuldades encontradas e os resultados obtidos, propõem-se para trabalhos futuros:

- Refinar a malha utilizada nas simulações CFD;
- Realizar um estudo mais aprofundado com uma maior gama de variação dos parâmetros dos hélices;
- Modelar perfis de rugosidade mais realista na superfície do hélice;
- Analisar diferentes perfis de rugosidade, compatíveis com diferentes graus de danos no propulsor;
- Avaliar a influência que a porcentagem da área afetada tem sobre a perda de eficiência do propulsor.

## REFERÊNCIAS

- ASSIM SE FAZ. **Como fazer fundamentação teórica**. Assimsefaz, 2016. Disponível em: <<http://www.assimsefaz.com.br/sabercomo/como-fazer-fundamentacao-teorica>>. Acesso em: 19 jun. 2016.
- BERNITSAS, M. M.; RAY, D.; KINLEY, P. **KT, KQ, and efficiency curves for the Wageningen B-series propellers**. Michigan, USA: University Of Michigan, 1981.
- BOATTEST. **Does your prop have decret cavitation?** Boattest, 2009. Disponível em: <[https://www.boattest.com/view-news/3643\\_does-your-prop-have-secret-cavitation](https://www.boattest.com/view-news/3643_does-your-prop-have-secret-cavitation)>. Acesso em: 12 jun. 2016.
- BRANDI, A. C. **Estratégias "upwind" e modelagem k-epsilon para simulação numérica de escoamentos com superfícies livres em altos números de Reynolds**. 2005. 88 p. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Ciências de Computação e Matemática Computacional, Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, ICMC/USP, SP, 2005.
- BUNKER INDEX. **Bunker index MDO**. Disponível em: <[http://www.bunkerindex.com/prices/bixfree.php?priceindex\\_id=4](http://www.bunkerindex.com/prices/bixfree.php?priceindex_id=4)>. Acesso em: 07 jun. 2017.
- CARLTON, J. **Marine propellers and propulsion**. 2nd. ed. Burlington: Elsevier Ltd, 2007.
- CD-Adapco, Computational Dynamics-Analysis & Design Application Company Ltd. **Guia do usuário Star-CCM+**, versão 11.02.010-R8. Estados Unidos da América, 2017.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, John M. **Mecânica dos fluidos: Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Mcgraw – Hill, 2007.
- COUTINHO, R. **Ecologia marinha aplicada: a bioincrustação em estruturas construídas pelo homem e como vetor de introdução de espécies**. Arraial do Cabo, RJ: Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, 2009.
- DA SILVA, V. G. **Análise CFD de um hélice da Série B com diferentes ângulos de caimento**. 2016. 77 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Centro de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.
- DANG, J.; BOOM, H. J. J. van Den; LIGTELIJN, J. Th. **The Wageningen C- and D-series propellers**. [S. l.]: Marin, 201-.
- DE ARAUJO, M. F. B. P. **Estimativa do fator de forma e da resistência ao avanço de embarcações através da dinâmica dos fluidos computacional**. 2016. 77 p. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Engenharia Naval e Oceânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP, 2014.
- FELIPPE, R. L. S. **Preparativos e logística de uma docagem: docagem para navios tanque de acordo com os padrões da TRANSPETRO e os desdobramentos para os Navios Tanque da**

Marinha do Brasil. 2012. 185 p. TCC (Graduação) - Curso de Curso de Política e Estratégia Marítima, Escola de Guerra Naval, Rio de Janeiro, 2012.

FLEMMING, H. C. et al. **Marine and industrial biofouling**: Springer series on biofilms. 4. ed. Los Angeles, USA: Springer, 2009.

FORTUNA, A. de O. **Fluis Dynamics**: Theory, Computation, and Numerical Simulation. 3. ed. Springer, 2016.

FOX, R. W.; MCDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

GAMA, B. A. P. da; PEREIRA, Renato C.; COUTINHO, Ricardo. **Bioincrustação marinha**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2009.

GARCIA, J. A. **Estudo da influência das condições do ambiente marinho para validação de reservatório de testes laboratoriais relacionados aos efeitos de bioincrustação**. 2015. 85 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Centro de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.

INTERNATIONAL MARINE COATINGS (IMC). **Coatings technology**: What is Fouling? [S. l.]: IMC, [201-].

INTERNATIONAL MARINE ORGANIZATION (IMO). **Anti-fouling systems**. Londres: IMO, 2002.

JUNIOR, M. V. **Introdução ao método de volumes finitos**. 2015. 103p. Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, Joinville, SC. 2015

KEMPIN, R. **Prevention of marine encrustation on bronze propellers**. AUS nº US6521114 B1, 21 ago. 1997, 18 fev. 2003. Disponível em: <<https://www.google.com/patents/US6521114>>. Acesso em: 05 maio 2016.

LIMA, C. **HÉLICES: Os conceitos básicos (parte 1)**. [S. l.]: Navegar & Pescar, 2011. Disponível em: <<http://navegarepescar.blogspot.com.br/2011/06/helices-os-conceitos-basicos-parte-1.html?view=snapshot>>. Acesso em: 02 jun. 2016.

LOPES, F. A. C. **Estimativa de propriedades mecânicas e análise estrutural via método de elementos finitos de hélices navais produzidos na Amazônia**. 2003. 168 p. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Belém, Universidade Federal do Paraná, Belém, 2003.

MAN DIESEL & TURBO (Alemanha). **Marine Engine**. Alemanha, 2013. Disponível em: <<http://www.doosanengine.com/common/pdf/product/Doosan-MAN02.pdf>>. Acesso em: 07 jun. 2017.

MICHELS, R. **Projeto conceitual de um reservatório para avaliação dos fenômenos da bioincrustação em estruturas navais**. 2014. 80 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Centro de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2014.

MOLLAND, A. F.; TURNOCK, S. R.; HUDSON, D. A. **The maritime engineering reference book**: A guide to ship design, construction and operation. Burlington, Ma, USA: Elsevier, 2008.

OOSTERVELD, M. W. C.; VAN OOSSANEN, P. **Further computer-analyzed data of the Wageningen B-screw series**. Rotterdam, Netherlands: International Shipbuilding Progress, 1975.

OSSES, J. **O método de volumes finitos**. ESSS, 2016. Disponível em: <<http://www.esss.com.br/blog/2016/12/o-metodo-de-volumes-finitos/>>. Acesso em: 05 jan. 2017.

PASSOS, N. C. de S. T. **Análise de procedimentos numéricos para simulação de fluxo bifásico em meios porosos heterogêneos**. 2013. 15p. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC RJ, Rio de Janeiro. 2013

PAULINO, J. V. P. dos M. **Otimização de hélices em motores de combustão interna para utilização em plataformas marítimas autônomas (cascos-planantes)**. 2015. 234 p. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Ciências Militares Navais, na especialidade de Engenheiro Naval, Escola Naval, RJ, 2015.

PORTAL EDUCAÇÃO. **Fundamentação teórica**. [S. l.]: Portal Educação, 2013. Disponível em: <<http://www.portaleducacao.com.br/pedagogia/artigos/31156/fundamentacao-teorica>>. Acesso em: 19 jun. 2016.

POTTER, M. C.; WIGGERT, D. C. **Mecânica dos fluidos**. 3. ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.

POZRIKIDIS, C. **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos: Conceitos básicos e aplicações**. Editora da Universidade de São Paulo EDUSP, SP, 2000.

RACHWALIK, A. **Parametric B-Wagenigen screw model: Verify compliance CFD computation with hydrodynamics plots**. 2013. 63 p. Tese (Doutorado) - Curso de Ocean Engineering, Ocean Engineering and Ship Technology, Gdansk University Of Technology, Gdarsk, Pol, 2013.

SAHOO, P. K. **Design of marine propulsion system**. Melbourne, FL, USA: Florida Institute of Technology, 2015.

SAILBRASIL. **Anti-incrustante: quando o barato sai caro**. São Paulo: Sailbrasil News, 2014. Disponível em: <<http://www.sailbrasil.com.br/index.php?pg=jornal&tag=anti-incrustante>>. Acesso em: 26 maio 2016.

TRINDADE, J. **Motores de combustão interna: Engenharia de máquinas marítimas**. Rio de Janeiro: Enidh, 2014.

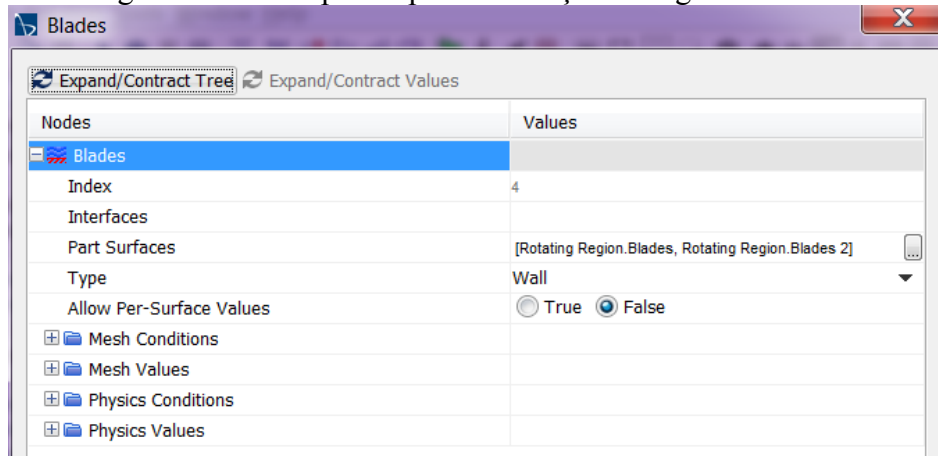
UNIVERSIDADE ANHEMBI MORUMBI (São Paulo). **Metodologia da pesquisa científica**. São Paulo: Universidade Anhembi Morumbi, [2016]. Disponível em: <[http://www2.anhembi.br/html/ead01/metodologia\\_pesq\\_cientifica\\_80/lu07/lo3/index.htm](http://www2.anhembi.br/html/ead01/metodologia_pesq_cientifica_80/lu07/lo3/index.htm)>. Acesso em: 12 jun. 2016.

WALKER, J. M. et al. Experimental and numerical studies of blade roughness and fouling on marine current turbine performance. **Renewable Energy: An International Journal**, Kidlington, UK, v. 1, n. 66, p.257-267, jun. 2014.

ZANELLA, M. R. B. **Avaliação das propriedades antincrustantes de partículas de TiO<sub>2</sub> dispersas em tinta**. 2016. 59 p. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Naval, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.

**APÊNDICE A – EXEMPLO DE PARAMETRIZAÇÃO DA REGIÃO ROTACIONAL**

Figura 53 – Exemplo de parametrização da região rotacional



Fonte: O Autor (2017).

## APÊNDICE B – EXEMPLO DE TABULAÇÃO DOS VALORES ENCONTRADOS PARA CADA COEFICIENTE

Figura 54 – Tabulação dos valores encontrados para cada coeficiente

coeficiente	4 pás: KT Monitor: Expression	coeficiente	4 pás 2: 10KQ Monitor: Expression	coeficiente	4 pás 3: n0 Monitor: Expression
0.6	0.164107	0.6	0.322285	0.6	0.486053
0.7	0.110691	0.7	0.242071	0.7	0.509228
0.8	0.054786	0.8	0.157903	0.8	0.441586
0.9	-2.166368E-3	0.9	0.072637	0.9	-4.27035E-2
1	-6.051714E-2	1	-1.611706E-2	1	5.973623
1.1	-1.232074E-1	1.1	-1.141848E-1	1.1	1.888281
1.2	-1.941909E-1	1.2	-2.289156E-1	1.2	1.619496
1.3	-2.753172E-1	1.3	-0.36269	1.3	1.569952

Fonte: O Autor (2017).



## APÊNDICE C – TABULAÇÃO DA COMPARAÇÃO ENTRE TEORIA E SIMULAÇÃO DE HÉLICES LIVRES DE DEFEITOS SUPERFICIAIS

Tabela 19 – Comparação entre teoria e simulação do hélice nº 1

Hélice: P/D=0.8; BAR=1.0; Z=4						
J	Teoria			Simulações		
	0.6	0.8	1.0	0.6	0.8	1.0
KT	0.2259	0.1251	0.0233	0.1641	0.0548	0.0000
10KQ	0.3756	0.2349	0.0905	0.3223	0.1579	0.0000
n0	0.5706	0.6746	0.4164	0.4861	0.4416	0.0000

Fonte: O Autor (2017).

Tabela 20 – Comparação entre teoria e simulação do hélice nº 2

Hélice: P/D=1.4; BAR=0.8; Z=4								
J	Teoria				Simulações			
	0.6	0.8	1.0	1.2	0.6	0.8	1.0	1.2
KT	0.4334	0.3344	0.2317	0.1304	0.3737	0.2677	0.1547	0.0378
10KQ	0.9305	0.7387	0.5388	0.3353	0.8733	0.6549	0.4217	0.1795
n0	0.4429	0.5742	0.6831	0.7409	0.4084	0.5202	0.5838	0.4019

Fonte: O Autor (2017).

Tabela 21 – Comparação entre teoria e simulação do hélice nº 3

Hélice: P/D=1.0; BAR=1.0; Z=4						
J	Teoria			Simulações		
	0.6	0.8	1.0	0.6	0.8	1.0
KT	0.2250	0.1173	0.0116	0.1706	0.0524	0.0000
10KQ	0.3813	0.2347	0.0974	0.3468	0.1687	0.0000
n0	0.5598	0.6364	0.1976	0.4695	0.3957	0.0000

Fonte: O Autor (2017).

Tabela 22 – Comparação entre teoria e simulação do hélice nº 4

Hélice: P/D=1.4; BAR=1.0; Z=4								
J	Teoria				Simulações			
	0.6	0.8	1.0	1.2	0.6	0.8	1.0	1.2
KT	0.4578	0.3455	0.2314	0.1211	0.4163	0.2918	0.1650	0.0402
10KQ	0.9861	0.7681	0.5482	0.3312	0.9874	0.7235	0.4574	0.1961
n0	0.4425	0.5714	0.6744	0.6985	0.4024	0.5134	0.5739	0.3915

Fonte: O Autor (2017).

## APÊNDICE D – TABULAÇÃO DA COMPARAÇÃO ENTRE SIMULAÇÕES DE HÉLICES LIVRES DE DEFEITOS SUPERFICIAIS E HÉLICES COM DEFEITOS ORIUNDOS DA CAVITAÇÃO

Tabela 23 – Comparação entre o hélice 1 livre de defeitos superficiais e o hélice 1 com defeitos oriundos da cavitação

Hélice: P/D=1.0; BAR=0.8; Z=4				
	SEM DEFEITO		CAVITAÇÃO	
J	0.6	0.8	0.6	0.8
KT	0.1641	0.0548	0.1569	0.0469
10KQ	0.3223	0.1579	0.3422	0.1803
n0	0.4861	0.4416	0.4375	0.3308

Fonte: O Autor (2017).

Tabela 24 – Comparação entre o hélice 2 livre de defeitos superficiais e o hélice 2 com defeitos oriundos da cavitação

Hélice: P/D=1.4; BAR=0.8; Z=4								
	SEM DEFEITO				CAVITAÇÃO			
J	0.6	0.8	1.0	1.2	0.6	0.8	1	1.2
KT	0.3737	0.2677	0.1547	0.0378	0.3653	0.2575	0.1426	0.0251
10KQ	0.8733	0.6549	0.4217	0.1795	0.8877	0.6700	0.4392	0.2020
n0	0.4084	0.5202	0.5838	0.4019	0.3928	0.4892	0.5166	0.2371

Fonte: O Autor (2017).

Tabela 25 – Comparação entre o hélice 3 livre de defeitos superficiais e o hélice 3 com defeitos oriundos da cavitação

Hélice: P/D=1.0; BAR=1.0; Z=4				
	SEM DEFEITO		CAVITAÇÃO	
J	0.6	0.8	0.6	0.8
KT	0.1706	0.0524	0.1618	0.0420
10KQ	0.3468	0.1687	0.3893	0.2147
n0	0.4695	0.3957	0.3967	0.2488

Fonte: O Autor (2017).

Tabela 26 – Comparação entre o hélice 4 livre de defeitos superficiais e o hélice 4 com defeitos oriundos da cavitação

Hélice: P/D=1.4; BAR=1.0; Z=4								
	SEM DEFEITO				CAVITAÇÃO			
J	0.6	0.8	1.0	1.2	0.6	0.8	1	1.2
KT	0.4163	0.2918	0.1650	0.0402	0.4005	0.2775	0.1492	0.0218
10KQ	0.9874	0.7235	0.4574	0.1961	1.0189	0.7605	0.4952	0.2337
n0	0.4024	0.5134	0.5739	0.3915	0.3752	0.4644	0.4793	0.1777

Fonte: O Autor (2017).

## APÊNDICE E – TABULAÇÃO DA COMPARAÇÃO ENTRE SIMULAÇÕES DE HÉLICES LIVRES DE DEFEITOS SUPERFICIAIS E HÉLICES COM DEFEITOS ORIUNDOS DA CAVITAÇÃO

Tabela 27 – Comparação entre o hélice 1 livre de defeitos superficiais e o hélice 1 com defeitos oriundos da bioincrustação

Hélice: P/D=1.0; BAR=0.8; Z=4				
	SEM DEFEITO		BIOINCRUSTAÇÃO	
J	0.6	0.8	0.6	0.8
KT	0.1641	0.0548	0.1576	0.0489
10KQ	0.3223	0.1579	0.3920	0.2465
n0	0.4861	0.4416	0.3836	0.2524

Fonte: O Autor (2017).

Tabela 28 – Comparação entre o hélice 2 livre de defeitos superficiais e o hélice 2 com defeitos oriundos da bioincrustação

Hélice: P/D=1.4; BAR=0.8; Z=4								
	SEM DEFEITO				BIOINCRUSTAÇÃO			
J	0.6	0.8	1.0	1.2	0.6	0.8	1	1.2
KT	0.3737	0.2677	0.1547	0.0378	0.3653	0.2576	0.1427	0.0252
10KQ	0.8733	0.6549	0.4217	0.1795	0.8878	0.6700	0.4393	0.2021
n0	0.4084	0.5202	0.5838	0.4019	0.3928	0.4893	0.5167	0.2380

Fonte: O Autor (2017).

Tabela 29 – Comparação entre o hélice 3 livre de defeitos superficiais e o hélice 3 com defeitos oriundos da bioincrustação

Hélice: P/D=1.0; BAR=1.0; Z=4				
	SEM DEFEITO		BIOINCRUSTAÇÃO	
J	0.6	0.8	0.6	0.8
KT	0.1706	0.0524	0.1567	0.0405
10KQ	0.3468	0.1687	0.4975	0.3437
n0	0.4695	0.3957	0.3008	0.1501

Fonte: O Autor (2017).

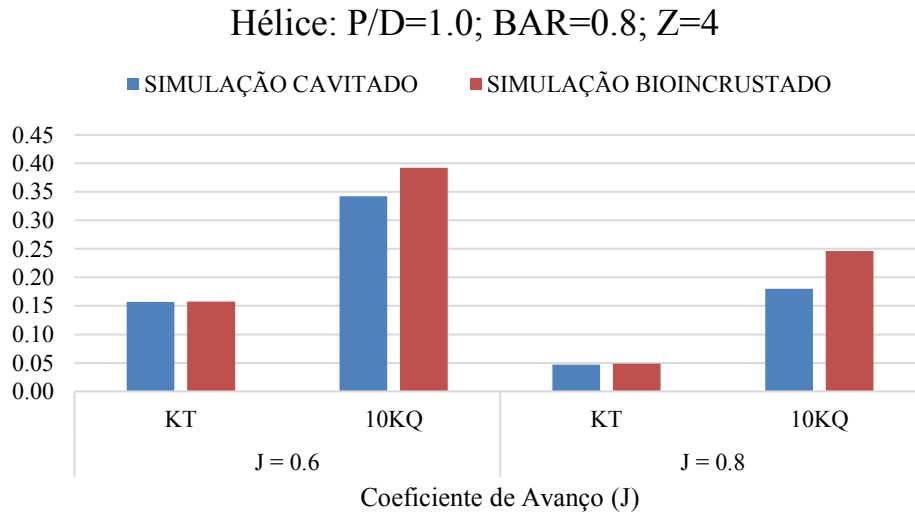
Tabela 30 – Comparação entre o hélice 4 livre de defeitos superficiais e o hélice 4 com defeitos oriundos da bioincrustação

Hélice: P/D=1.4; BAR=1.0; Z=4								
	SEM DEFEITO				BIOINCRUSTAÇÃO			
J	0.6	0.8	1.0	1.2	0.6	0.8	1	1.2
KT	0.4163	0.2918	0.1650	0.0402	0.3965	0.2756	0.1481	0.0234
10KQ	0.9874	0.7235	0.4574	0.1961	1.0382	0.7968	0.5448	0.3001
n0	0.4024	0.5134	0.5739	0.3915	0.3645	0.4401	0.4325	0.1490

Fonte: O Autor (2017).

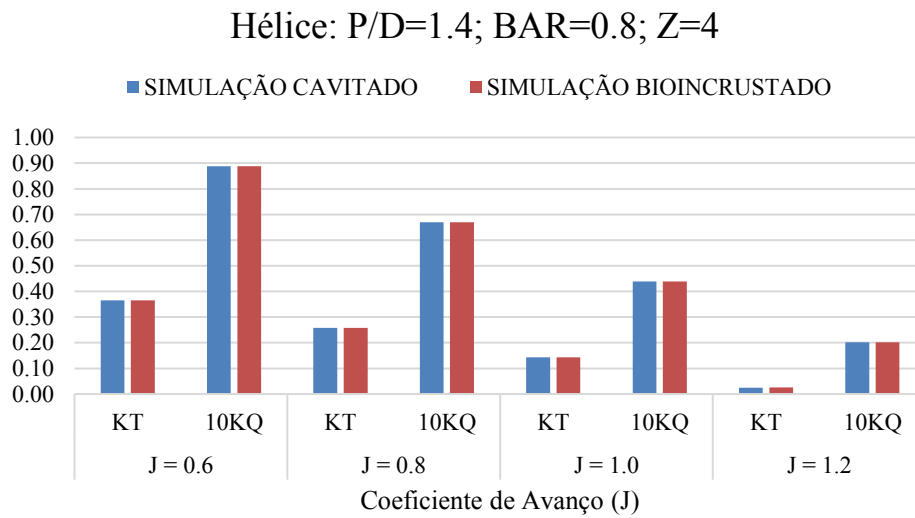
## APÊNDICE F – COMPARAÇÃO ENTRE COEFICIENTES DE EMPUXO E TORQUE DOS HÉLICES DANIFICADOS

Figura 55 – Comparação dos coeficientes de empuxo e torque entre os hélices danificadas



Fonte: O Autor (2017).

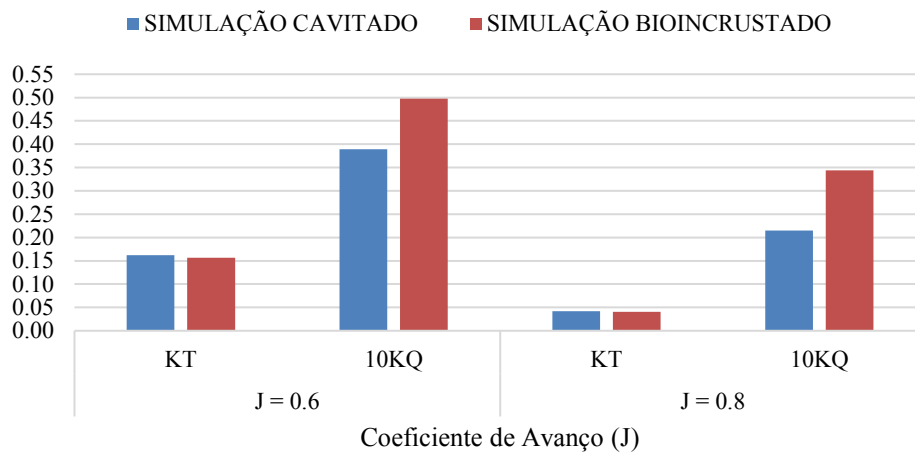
Figura 56 – Comparação dos coeficientes de empuxo e torque entre os hélices danificadas



Fonte: O Autor (2017).

Figura 57 – Comparação dos coeficientes de empuxo e torque entre os hélices danificadas

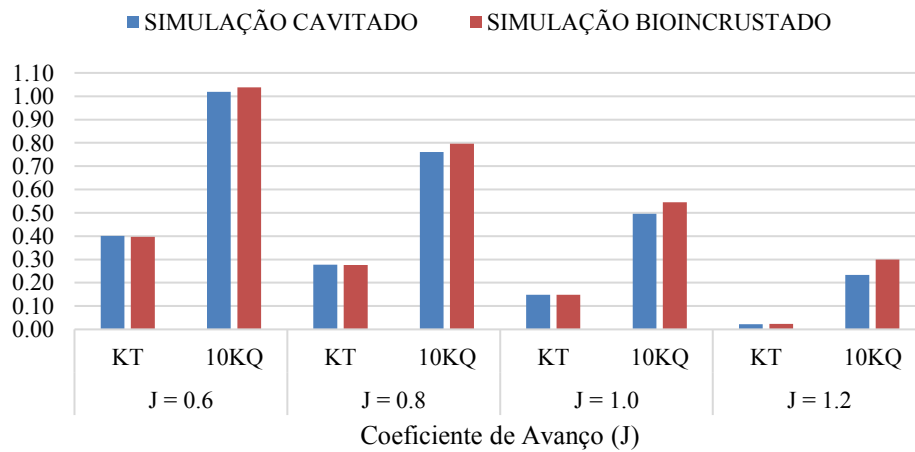
Hélice:  $P/D=1.0$ ;  $BAR=1.0$ ;  $Z=4$



Fonte: O Autor (2017).

Figura 58 – Comparação dos coeficientes de empuxo e torque entre os hélices danificadas

Hélice:  $P/D=1.4$ ;  $BAR=1.0$ ;  $Z=4$



Fonte: O Autor (2017).