

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

VICTOR GONÇALVES DA SILVA

**ANÁLISE CFD DE UM HÉLICE DA SÉRIE B COM DIFERENTES
ÂNGULOS DE CAIMENTO**

Joinville
2016

VICTOR GONÇALVES DA SILVA

**ANÁLISE CFD DE UM HÉLICE DA SÉRIE B COM DIFERENTES
ÂNGULOS DE CAIMENTO**

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 Campus de Joinville.

Orientador: Dr. Thiago Pontin Tancredi

Joinville

2016

VICTOR GONÇALVES DA SILVA

**ANÁLISE CFD DE UM HÉLICE DA SÉRIE B COM DIFERENTES
ÂNGULOS DE CAIMENTO**

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, 08 de julho de 2016

Prof. Thiago Pontin Tancredi, PhD.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Thiago Pontin Tancredi, PhD.
Orientador

Prof. Lucas Weihmann, Dr. Eng.

Prof. Luiz Eduardo Bueno Minioli, Eng.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por todas as bençãos concedidas.

Aos meus pais, Giovani e Leonice, por tudo que fizeram por mim, não medindo esforços para tornar a minha formação acadêmica possível.

À minha família, pela união e sintonia que mesmo à distância ajudaram nas dificuldades encontradas durante estes anos de faculdade.

Aos meus colegas e amigos, por dividirem comigo momentos de alegria e até os de tristeza durante toda a graduação.

A todos os meus professores, por ajudar a construir toda minha base de conhecimento e por estarem sempre dispostos a responder qualquer dúvida.

À professora Lenaide Innocente, pelo auxílio dado na formatação e verificação da ortografia no trabalho de conclusão de curso.

À professora da disciplina de Planejamento do Trabalho de Conclusão de Curso, Vanessa Aparecida Alves de Lima, por guiar nos primeiros passos do trabalho, fazendo-me pensar em um tema que poderia gerar estudos futuros em um possível mestrado.

Ao meu orientador, Thiago Pontin Tancredi, por assumir o compromisso junto a mim de fazer com que este trabalho contribuísse com a comunidade acadêmica dando um passo além nesta área do conhecimento que ainda é insípida no Brasil.

Ao senhor Orival Izidoro Ferreira, pela oportunidade de estágio na área de hélices dentro da Strauhs que foi fundamental para a etapa de modelagem do hélice que pôde ser feito durante o estágio.

Ao meu supervisor de estágio, Adairton Soares, pelo conhecimento compartilhado na área de hélices e por ter contribuído com ideias como a de estudar o ângulo de caimento.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma ajudaram nesta jornada.

RESUMO

O principal poder de dissuasão de um submarino reside em sua capacidade de permanecer oculto e para tal ele tem que emitir o menor nível de ruído possível. Existem diversas fontes de ruído em um submarino, contudo o maior responsável pela emissão de ruído externo é o propulsor devido a cavitação. Sendo assim, este trabalho teve o objetivo de estudar o ângulo de caimento que é um parâmetro geométrico do hélice com o intuito de reduzir a emissão de ruídos gerado pelo mesmo sem prejudicar significativamente sua eficiência propulsiva, para esse fim utilizou-se simulações computacionais. Quatro hélices da série B com ângulo de caimento de 15°, 10°, 0° e -10° foram simulados no STAR-CCM+ e o resultado obtido apontou que um hélice com caimento positivo possui uma menor emissão de ruídos se comparados aos outros, porém possui uma eficiência em águas abertas (η_o), menor que o hélice sem caimento.

Palavras-chave: Série B de Wageningen, Curvas de Desempenho, Ângulo de Caimento, Fluidodinâmica Computacional, Emissão de Ruído.

ABSTRACT

The main power of dissuasion of a submarine consists in her ability to remain hidden and for emitting the lowest possible level of noise. There are many sources of noise in a submarine, however the biggest responsible for it is the propeller, due to cavitation. Thus this work aimed to study the rake angle, which is a geometric parameter of the propeller, to reduce noise emissions generated by the propeller without significant losses in its propulsion efficiency, using computational simulations for this. Four B series propellers with rake angles of 15, 10, 0 and -10 degrees were simulated on STAR-CCM+ and the result showed that a propeller with a positive rake angle provided a lower level of noise emission compared to the others, but it has a lower open-water efficiency compared to a propeller with no rake angle.

Key words: Wageningen B-series, Performance Curves, Rake, Computational Fluid Dynamics, Noise Emission.

LISTA DE SIGLAS

CAD – Computer Aided Design ou Desenho Assistido por computador.

CAE – Computer Aided Engineering ou Engenharia Auxiliada por Computador.

CFD – Computational Fluid Dynamics ou Fluidodinâmica computacional.

MEF – Método de elementos finitos.

MVF – Método de volumes finitos.

POP – Propeller Optimization Program ou programa de otimização de hélice

BF – Bordo de fuga

BA – Bordo de ataque

EMX – Espessura máxima

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - EVOLUÇÃO DOS SUBMARINOS QUANTO A DIMINUIÇÃO DO NÍVEL DE EMISSÃO DE RUÍDOS.....	8
FIGURA 2 - DESENHO DAS PARTES DO HÉLICE	12
FIGURA 3 - CAIMENTO (RAKE) E SKEW	13
FIGURA 4 - HÉLICE DE 24 POLEGADAS.....	14
FIGURA 5 - GRÁFICO GERADO NO POP DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DO HÉLICE.....	15
FIGURA 6 - VON MISES X QUALIDADE DA MALHA	17
FIGURA 7 - PASSAGEM DE FLUIDO NO HÉLICE	18
FIGURA 8 - ETAPA DE VALIDAÇÃO DO PROGRAMA CFD	20
FIGURA 9 - CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UM HÉLICE DA SÉRIE B COM 4 PÁS E $AE/A0=0.550$	22
FIGURA 10 - DESENHO DAS COORDENADAS 2D DO PERFIL 20%	24
FIGURA 11 - ROTAÇÃO DO PERFIL 20% EM RELAÇÃO AO PLANO XY.....	25
FIGURA 12 - CURVA ATRAVÉS DE PONTOS XYZ	26
FIGURA 13 - PERFIS.....	26
FIGURA 14 - PERFIS E CURVAS	27
FIGURA 15 - CONTROLE DA CURVATURA COM SPLINE.....	28
FIGURA 16 - CRIANDO SUPERFÍCIES COM OS PERFIS.....	28
FIGURA 17 - MODELANDO A PÁ COM “LOFT”	29
FIGURA 18 - DESENHANDO O BOSSO	30
FIGURA 19 - ADICIONANDO O RAIOS DE CURVATURA ENTRE O BOSSO E A PÁ	30
FIGURA 20 - GERANDO AS OUTRAS PÁS.....	31
FIGURA 21- HÉLICE B-TROOST	32
FIGURA 22 - HÉLICES DA SÉRIE B VARIANDO O ÂNGULO DE CAIMENTO.....	34
FIGURA 23 - TANQUE DE ÁGUA VIRTUAL.....	35
FIGURA 24 - REPRESENTAÇÃO DO POSICIONAMENTO DO HÉLICE EM RELAÇÃO A UMA EMBARCAÇÃO	36
FIGURA 25 - REGIÕES ESTÁTICA E DE ROTAÇÃO.....	36
FIGURA 26 - CURVAS DELIMITANDO AS BORDAS DA PÁ DO HÉLICE.....	37
FIGURA 27 - FECHANDO DETALHES NA GEOMETRIA	38
FIGURA 28 - MALHA CRIADA.....	40
FIGURA 29 - PROPRIEDADES DO FLUXO DE ÁGUA.....	42
FIGURA 30 - DADOS EXPERIMENTAIS E DE SIMULAÇÃO DO HÉLICE SVA	44
FIGURA 31 - IMPORTANDO HÉLICE NO STAR-CCM+	45
FIGURA 32 - VERIFICANDO ERROS	46
FIGURA 33 - TIPOS DE ERRO NA MALHA	47
FIGURA 34 - ROTACIONANDO O HÉLICE.....	48

FIGURA 35 - DESENHANDO CIRCULO NO STAR-CCM+	49
FIGURA 36 - RESSALTO EXTRUDADO ASSIMETRICAMENTE	49
FIGURA 37 - RESSALTO EXTRUDADO SIMETRICAMENTE	50
FIGURA 38 - FERRAMENTA "SUBTRACT BODIES"	51
FIGURA 39 - SELECIONANDO O BOSSO EM "SPLIT BY PATCH"	52
FIGURA 40 - SUPERFÍCIES DA REGIÃO ESTÁTICA	52
FIGURA 41 - ALTERANDO "PARTS" NA REGIÃO ESTÁTICA E DE ROTAÇÃO	53
FIGURA 42 - ADICIONANDO O PLANO NA CENA.....	54
FIGURA 43 - MALHA DO HÉLICE DA SÉRIE B.....	55
FIGURA 44 - RESÍDUOS DO CÁLCULO.....	56
FIGURA 45 - CENA ESCALAR	57
FIGURA 46 - SELECIONANDO A FUNÇÃO.....	58
FIGURA 47 - PRESSÃO NA FACE DO HÉLICE DA SÉRIE B 0,4J.....	58
FIGURA 48 - DADOS DE ENTRADA NO POP	59
FIGURA 49 - COMPARAÇÃO DOS DADOS DA SIMULAÇÃO E DA SÉRIE B	60
FIGURA 50 - GRÁFICO COM O NÍVEL DE PRESSÃO E EFICIÊNCIA EM ÁGUAS ABERTAS.....	62
FIGURA 51 - GRÁFICO DO COEFICIENTE DE EMPUXO (KT).....	63
FIGURA 52 - GRÁFICO DO COEFICIENTE DE TORQUE (KQ)	64
FIGURA 53 - GRÁFICO DA EFICIÊNCIA DO HÉLICE EM ÁGUAS ABERTAS (η_o)	65
FIGURA 54 - CAMPO DE PRESSÃO NO DORSO PARA J=0.4	70
FIGURA 55 - CAMPO DE PRESSÃO NO DORSO PARA J=0.5	71
FIGURA 56 - CAMPO DE PRESSÃO NO DORSO PARA J=0.6	72
TABELA 1 - DEFINIÇÃO DAS PARTES DO HÉLICE	11
TABELA 2 - TERMOS DAS EQUAÇÕES DOS COEFICIENTES DO HÉLICE	15
TABELA 3 - COORDENADAS HORIZONTAIS DE CADA PERFIL.....	23
TABELA 4 - COORDENADAS DO DORSO E DA FACE DE CADA PERFIL.....	23
TABELA 5 - COORDENADAS 2D DO PERFIL 20%.....	24
TABELA 6 - CURVAS AUXILIARES	25
TABELA 7 - TIPO DE MALHA.....	38
TABELA 8 - N° DE ITERAÇÕES E COEFICIENTE DE AVANÇO	41
TABELA 9 - N° DE ITERAÇÕES E VELOCIDADE DE AVANÇO V_A	41
TABELA 10 - ERRO DE KT, 10KQ E η_o	44
TABELA 11 - DEFINIÇÃO DOS TIPOS DE ERROS ENCONTRADOS NA MALHA.	47
TABELA 12 - N° DE ITERAÇÕES E COEFICIENTE DE AVANÇO PARA O HÉLICE DA SÉRIE B.....	55
TABELA 13 - N° DE ITERAÇÕES E VELOCIDADE DE AVANÇO PARA O HÉLICE DA SÉRIE B	56
TABELA 14 - ERRO DE KT, 10KQ E η_o PARA O HÉLICE DA SÉRIE B	60

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
OBJETIVOS	9
ESTRUTURA DO TRABALHO	10
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1 HÉLICE	11
2.1.1 Partes do hélice.....	11
2.1.2 Parâmetros geométricos do hélice	12
2.1.3 Coeficientes do hélice em águas abertas.....	14
2.2 MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS	16
2.3 CAVITAÇÃO.....	17
3 METODOLOGIA	19
4 MODELAGEM DO HÉLICE DA SÉRIE B.....	22
4.1 DADOS DO HÉLICE ESCOLHIDO	22
4.2 GERANDO OS PONTOS NA PLANILHA DO “EXCEL”	24
4.3 PASSANDO AS CURVAS PARA O <i>SOLIDWORKS</i>	26
4.4 CRIANDO SUPERFÍCIES COM OS PERFIS.....	28
4.5 MODELANDO A PÁ COM “LOFT”	28
4.6 DESENHANDO O BOSSO.....	29
4.7 ADICIONANDO O RAIOS DE CURVATURA ENTRE O BOSSO E A PÁ	30
4.8 GERANDO AS OUTRAS PÁS	31
4.9 IMPORTANDO E/OU SALVANDO.....	32
5 MODELAGEM DE HÉLICES DA SÉRIE B VARIANDO O ÂNGULO DE CAIMENTO	33
6 METODOLOGIA PARA SIMULAÇÃO DE UM HÉLICE EM ÁGUAS ABERTAS	35
6.1 CARREGANDO O ARQUIVO DE SIMULAÇÃO	36
6.2 REVENDO A GEOMETRIA.....	37
6.3 DEFININDO A MALHA.....	38
6.4 GERANDO A MALHA.....	39
6.5 CONFIGURANDO AS CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	40
6.6 CRIANDO RELATÓRIOS PARA OS DADOS DO HÉLICE	42
6.7 MONITORANDO OS DADOS DO HÉLICE	43
6.8 EXECUTANDO A SIMULAÇÃO	43

6.9	PLOTANDO OS DADOS DO HÉLICE.....	43
7	SIMULAÇÃO EM ÁGUAS ABERTAS DE UM HÉLICE DA SÉRIE B	45
7.1	IMPORTANDO O ARQUIVO DO HÉLICE DA SÉRIE B.....	45
7.2	VERIFICANDO DEFEITOS	46
7.3	POSICIONANDO O HÉLICE	48
7.4	EDITANDO O HÉLICE COM A FERRAMENTA 3D-CAD DO STAR-CCM+	48
7.5	DIVIDINDO AS SUPERFÍCIES DA REGIÃO ESTÁTICA E DE ROTAÇÃO	51
7.6	CRIANDO A INTERFACE ENTRE A REGIÃO ESTÁTICA E DE ROTAÇÃO ..	53
7.7	ATUALIZANDO A REGIÃO ESTÁTICA E DE ROTAÇÃO.....	53
7.8	ALTERANDO A MALHA.....	54
7.9	CRIAÇÃO DA CENA COM A MALHA	54
7.10	MUDANDO AS CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	55
7.11	EXECUTANDO A SIMULAÇÃO	56
7.12	PÓS-PROCESSAMENTO.....	57
7.13	PLOTANDO OS DADOS DO HÉLICE.....	59
8	ANÁLISE DO ÂNGULO DE CAIMENTO NO DESEMPENHO DE UM HÉLICE DA SÉRIE B	62
9	CONCLUSÃO	66
	REFERÊNCIAS.....	68
	APÊNDICE A – RESULTADO DO CAMPO DE PRESSÃO NO DORSO.....	70

1 INTRODUÇÃO

*O principal poder ofensivo e defensivo de um submarino reside em sua capacidade de permanecer oculto nas profundezas do mar.
(BRUEL & KJAER, 2009, p. 1, Tradução livre)*

Para que um submarino militar se aproxime sem ser notado, ele não pode emitir ruídos, pois segundo Mulcahy et al. (2014), um dos principais métodos utilizados na identificação de navios e submarinos navais baseia-se nos sinais de ruído irradiado. Portanto, quanto menor for a emissão sonora de um submarino, melhor é sua discrição, diminuindo as chances de que outras embarcações detectem sua assinatura acústica e, portanto, estabeleçam sua posição.

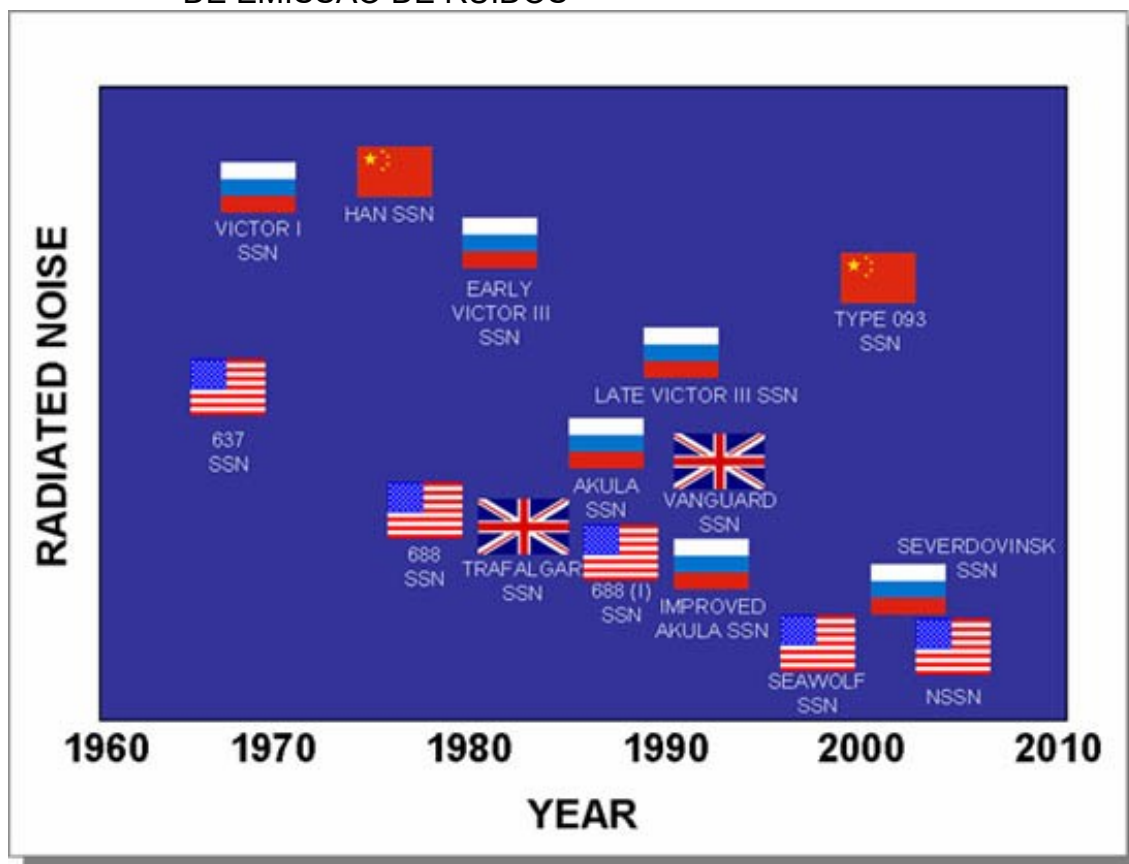
A interferência gerada pelo ruído externo, causada principalmente pelo propulsor, também pode diminuir a eficácia dos sensores do próprio submarino (MULCAHY et al. 2014). Além disso, segundo Chekab et al. (2013), pode prejudicar a vida marinha, como por exemplo interferir com os sistemas de ecolocalização de baleias e golfinhos. Quanto ao ruído interno, que advém de diversas fontes, mas principalmente dos motores, pode prejudicar a saúde auditiva da tripulação.

Comparando o nível de emissão de ruídos por submarinos de diversos países através da Figura 1, nota-se uma evolução da diminuição de emissão sonora de ruídos, portanto certamente existe um estudo nessa área motivando o desenvolvimento de novas tecnologias em outras nações.

O nível de decibéis emitido por cada submarino não é declarado na Figura 1. Este tipo de informação não é facilmente revelada, pois o estudo da emissão de ruído é um segredo de estado e um importante tema de pesquisa, carente de desenvolvimento no Brasil.

Sabe-se que grande parte da emissão sonora de um submarino deve-se ao sistema propulsor. Como o nível de decibéis segundo LEWIS (2007) não é um parâmetro encontrado com facilidade, uma alternativa é a análise e eventual comparação dos hélices que caracterizam a assinatura acústica dos submarinos. Porém, mesmo imagens dos hélices não são normalmente divulgadas, e segundo Galante (2009), as fotos que são divulgadas provavelmente não mostram o hélice definitivo instalado nos submarinos.

FIGURA 1 - EVOLUÇÃO DOS SUBMARINOS QUANTO A DIMINUIÇÃO DO NÍVEL DE EMISSÃO DE RUÍDOS



Fonte: Worldwide Submarine Challenges (1996) Office of Naval Intelligence, Washington, D.C.¹

Tendo em vista que o propulsor é o maior responsável pelo ruído externo e que a comparação dos hélices não pode ser feita através de imagens, pretende-se fazer a comparação dos propulsores através de análise computacional. Porém não se encontra os modelos dos propulsores reais utilizados nos submarinos, portanto será pegado um hélice de uma série sistemática com dados conhecidos e será alterado um parâmetro geométrico do mesmo, verificando a influência deste parâmetro na

¹ Segundo LEWIS (2009) a referência da Figura 1 é o *Worldwide Submarine Challenges 1996*, contudo a mesma não se encontra mais disponível no site do *Office of Naval Intelligence*.

emissão de ruídos. O ruído emitido em um hélice esta essencialmente ligado a presença de cavitação que tem como agente a queda de pressão, portanto na análise CFD foi estimado o campo de pressão e os hélices com maiores emissões de ruídos foram classificados de acordo com a queda de pressão.

É importante observar que além da questão sonora, fundamental em projetos de submarinos, o propulsor é ainda um dos principais elementos que definem a eficiência da instalação propulsora de uma embarcação. A dependência das características geométricas de um propulsor na eficiência no desempenho de uma embarcação motivam ainda mais estudos paramétricos envolvendo projeto de propulsores.

Este trabalho segue neste contexto e propõe analisar um dos parâmetros que caracteriza a geometria do propulsor e que tem sido menos estudado na literatura quanto a emissão de ruídos que é o ângulo de caimento das pás. Porém é importante citar dois autores, CHEKAB (2013) que estuda diversos parâmetros geométricos que reduzem o ruído e PADOVEZI (1997) que estuda o caimento, mas sem a abordagem da redução de ruído emitido.

OBJETIVOS

O objetivo proposto é avaliar, através de pesquisas bibliográficas quais parâmetros podem alterar o nível de ruído emitido por um propulsor do tipo hélice. Variar parametricamente o ângulo de caimento do hélice e verificar o seu efeito na emissão de ruídos através de métodos computacionais.

Para a efetivação do objetivo geral proposto, este trabalho propõe:

1. Caracterizar os principais parâmetros que descrevem a geometria de um propulsor do tipo hélice;
2. Selecionar um hélice típico (Série B) para ser usado no estudo paramétrico proposto;
3. Modelar em um programa CAD (Desenho Assistido por computador) um hélice da série B de Wageningen com ângulo de caimento zero e outros três hélices em função do primeiro com ângulo de caimento -10° , 10° e 15° ;

4. Simular o hélice com ângulo de caimento 15° e obter os valores de coeficiente de empuxo (KT), coeficiente de torque (KQ) e eficiência do hélice em águas abertas (η_0) para diferentes valores de coeficiente ao avanço (J) e comparar com os dados da série sistemática;
5. Analisar através de métodos computacionais quatro propulsores com ângulo de caimento diferente e por consequência um empuxo distinto.

ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho segue apresentando inicialmente o capítulo de fundamentação teórica que tem o papel de embasamento científico do que será apresentado a seguir. Na parte de metodologia é apresentado os passos que serão seguidos para abordar o problema em questão que é a análise CFD de um hélice da série B com diferentes ângulos de caimento.

O trabalho segue a linha de raciocínio apresentada na metodologia e primeiro é apresentado o desenvolvimento do hélice da série B sem caimento no capítulo de modelagem do hélice da série B e após é mostrado como foi feito a modelagem dos outros três hélices com caimento de -10° , 10° e 15° em função do primeiro hélice modelado.

Antes de simular o hélice da série B, foi necessário um capítulo que mostra como é feita a simulação de um hélice já estudado seguindo a metodologia para a simulação de um hélice em águas aberta no STAR-CCM+.

Seguindo a mesma metodologia o hélice da série B com 15° de caimento é finalmente simulado no capítulo de simulação em águas abertas de um hélice da série B. Os resultados dos hélices com caimento 15° , 10° , 0° e -10° são então comparados e discutidos no capítulo de análise do ângulo de caimento no desempenho de um hélice da série B.

Para finalizar o trabalho, foi feito o capítulo de conclusão onde os resultados são comentados e são sugeridos futuros trabalhos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem o intuito de apresentar os principais fundamentos teóricos que servem de embasamento científico para a realização da análise paramétrica de um propulsor do tipo hélice.

A fundamentação teórica é, segundo (GIL, 2002, p. 162), “dedicada à contextualização teórica do problema e a seu relacionamento com o que tem sido investigado a seu respeito” e, portanto, esclarecerá as contribuições proporcionadas por investigações anteriores.

2.1 HÉLICE

2.1.1 Partes do hélice

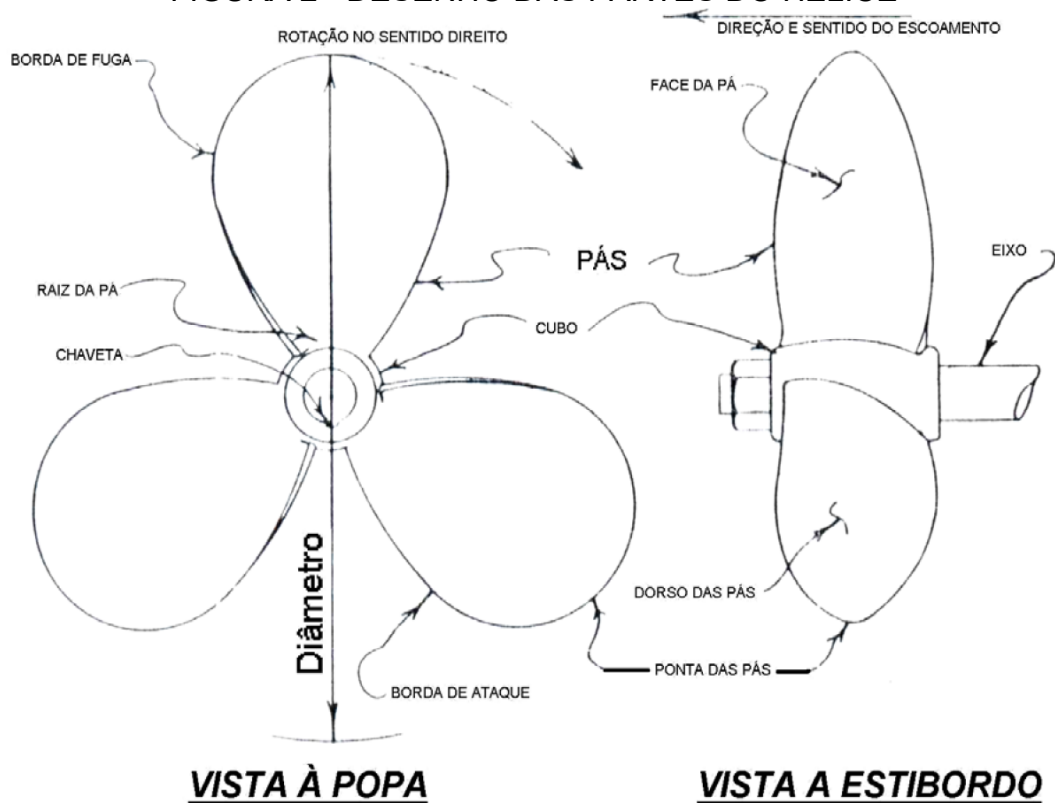
As partes do hélice são mostradas na figura 2 e apresentam termos que foram usados durante o trabalho. Cada parte é explicada na tabela 1, segundo LOPES (2003).

TABELA 1 - DEFINIÇÃO DAS PARTES DO HÉLICE

Parte do hélice	Definição
Cubo ou Bosso	Disco central e rígido, vazado para possibilitar o encaixe no eixo, considerado a base das pás
Chaveta	Longo e estreito corte prismático na parte interna do bosso para o encaixe no eixo
Pás	Barbatanas ou chapas torcidas que se projetam do cubo
Face e Dorso das pás	A face da pá do propulsor é a região de alta pressão e o dorso é a parte de baixa pressão
Raiz e Ponta da Pá	A raiz da pá é a região onde a pá fica totalmente vinculada ao cubo e a ponta da pá é a região da pá mais longe do bosso
Bordas de Ataque e de Fuga	A borda de ataque é a região da pá que penetra o fluido e a borda de fuga é a última região de contato do fluido com a pá

Fonte: Próprio autor, adaptado de LOPES (2003)

FIGURA 2 - DESENHO DAS PARTES DO HÉLICE



Fonte: LOPES (2003)

2.1.2 Parâmetros geométricos do hélice

Um hélice é composto por diversos parâmetros geométricos, os quais serão discutidos nesta sessão. Segundo Chekab et al. (2013) esses parâmetros podem reduzir as oscilações de pressão no hélice e por consequência diminuir de maneira eficaz o ruído irradiado. O autor também sugere que as seguintes medidas devem ser tomadas para reduzir o nível de ruído de um propulsor:

1. Aumento da assimetria do contorno das pás ("Skew")
2. Aumento do número de pás
3. Aumento da área projetada do hélice
4. Distribuição adequada do passo
5. Modificações geométricas no bordo de fuga
6. Diminuir a espessura da pá

Segundo Chekab et al. (2013):

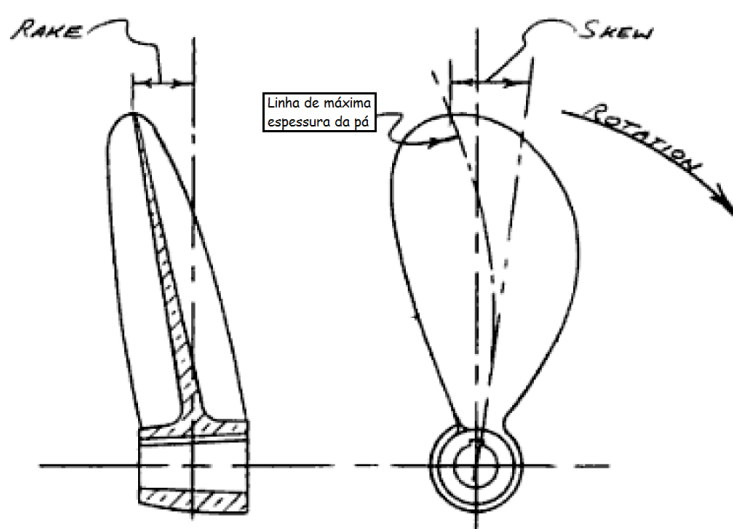
“[...] aumento no número de pás 3-5 pode conduzir a uma redução de aproximadamente 55% no ruído propagado do hélice. Além disso, com um aumento no ângulo skew 12-40 graus, uma redução de ruído média de 48% pode ser obtida”.

Observa-se que um parâmetro geométrico que não é analisado por este autor é o ângulo de caimento. Assim, com o intuito de contribuir com a comunidade acadêmica, o parâmetro que será analisado no presente trabalho, visando se obter um propulsor com uma melhor relação de ruído e eficiência propulsiva será o ângulo de caimento que, em inglês, é conhecido como “*Rake*”.

Segundo Padovezi (1997), pode-se definir o ângulo de caimento como sendo uma inclinação do eixo das pás no sentido longitudinal da embarcação, a qual ajuda a aumentar a distância entre as pás e o casco, possibilitando hélices com maior diâmetro, porém isso introduz maiores momentos que obrigam a adoção de maiores espessuras nas raízes das pás.

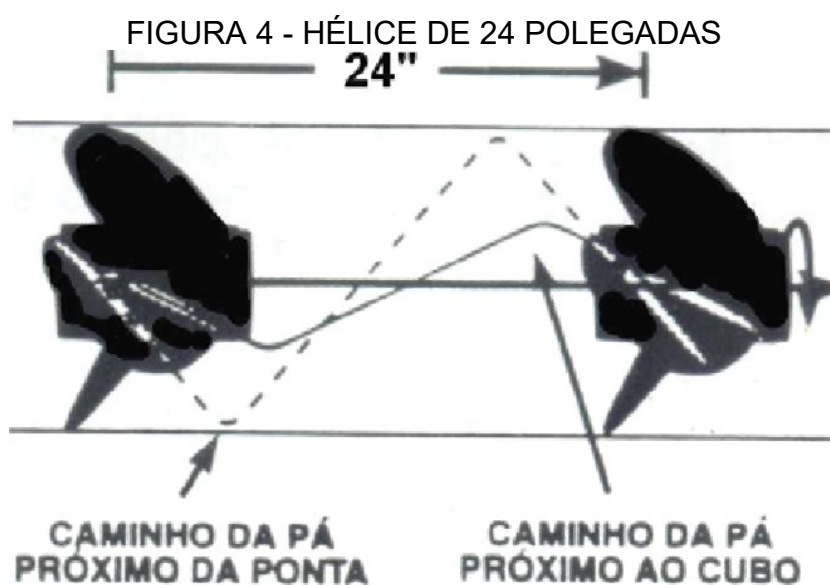
O skew ou assimetria do contorno das pás é um parâmetro importante abordado por Chekab e definido por GERR (2001) como um ângulo que representa a assimetria do contorno da linha de máxima espessura da pá como é mostrado na figura 3.

FIGURA 3 - CAIMENTO (RAKE) E SKEW



Fonte: GERR (2001), modificado pelo autor

Outra medida sugerida por Chekab et al. (2013) que pode reduzir o nível de ruído e precisa ser abordada por não ser autoexplicativa é a distribuição adequada do passo, pois com base em Padovezi (1997), o passo pode diminuir o carregamento das pontas das pás a fim de diminuir intensidades de cavitação e, conseqüentemente, de ruído. De acordo com LOPES (2003), o passo é expresso em termos da distância percorrida pela embarcação, um exemplo pode ser visto na figura 4 que mostra um hélice cujo passo é de 24 polegadas, que significa teoricamente, o hélice desloca-se 24 polegadas para frente em cada rotação completa.



Fonte: LOPES (2003)

2.1.3 Coeficientes do hélice em águas abertas

As relações adimensionais dependentes das características do propulsor são basicamente o coeficiente de avanço (J), o coeficiente de empuxo (K_T), o coeficiente de torque (K_Q) e a eficiência do hélice em águas abertas (η_o):

$$J = \frac{V_A}{n \cdot D} \quad (2.1)$$

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (2.2)$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (2.3)$$

$$\eta_o = \frac{J K_T}{2\pi K_Q} \quad (2.4)$$

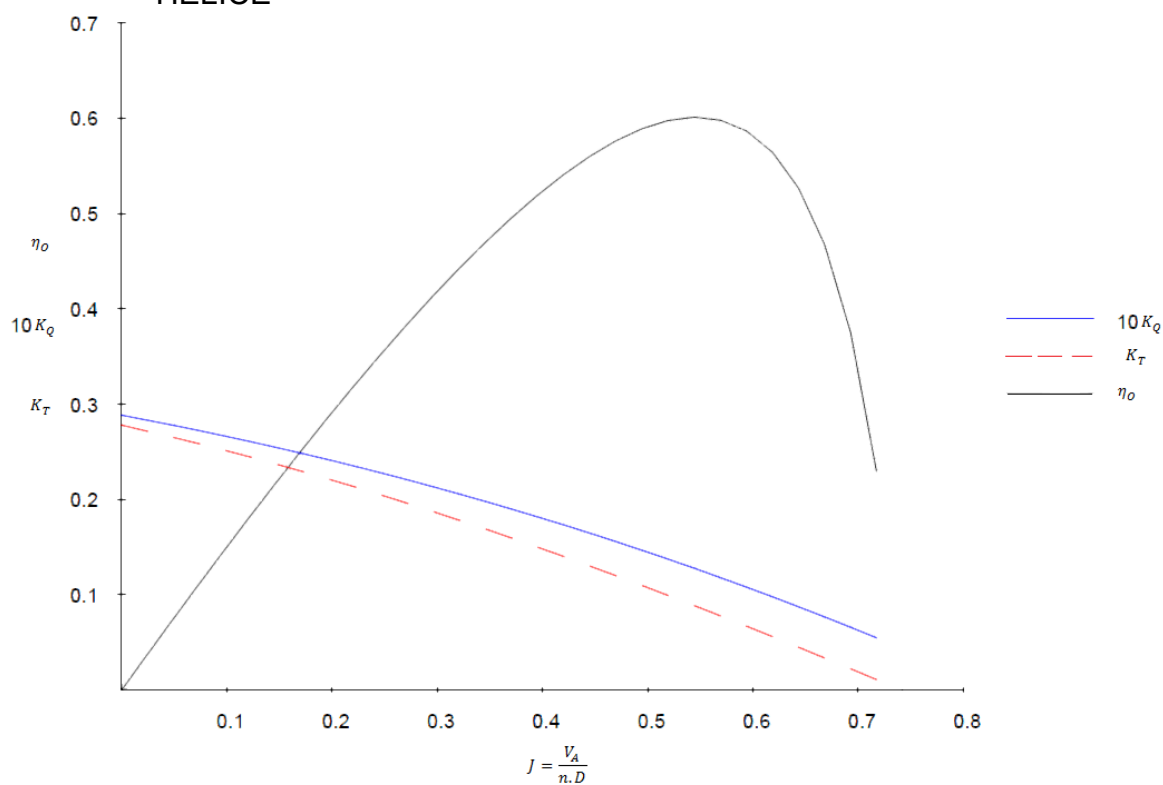
Na tabela 2 são apresentados os termos das equações das relações adimensionais e na figura 5 são apresentados as curvas características típica de um propulsor da série B que tem caimento de 15°.

TABELA 2 - TERMOS DAS EQUAÇÕES DOS COEFICIENTES DO HÉLICE

Termo da equação	Definição
V_A	Velocidade de avanço do hélice
n	Rotação do hélice [RPM]
D	Diâmetro do hélice [m]
T	Empuxo fornecido pelo hélice
ρ	Densidade do fluido
Q	Torque do propulsor

Fonte: Próprio autor

FIGURA 5 - GRÁFICO GERADO NO POP DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DO HÉLICE



Fonte: Próprio autor

2.2 MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

Segundo (GONÇALVES, 2007), pode-se entender o Método dos Volumes Finitos (MVF) como:

“O MVF utiliza como ponto de partida a forma integral da equação da conservação. O domínio de solução é dividido num número finito de volumes de controle (VC) contíguos, e a equação da conservação é aplicada a cada VC. No centroide de cada VC localiza-se um nó computacional, no qual são calculados os valores das variáveis, sendo os valores das variáveis nas superfícies dos VC obtidos por interpolação em função dos valores nodais (centro do VC). Os integrais de volume e de superfície são aproximados usando fórmulas de quadratura apropriadas. Como resultado, obtém-se uma equação algébrica para cada VC, na qual aparecem os valores das variáveis no nó em causa e nos nós vizinhos. (GONÇALVES, 2007, p. 16)”

Para a simulação do escoamento ao redor do hélice será utilizado um programa que use as formulações do método dos volumes finitos (MVF) que utiliza aproximações para as integrais de volume e de superfície, sendo parecido com o Método dos Elementos Finitos (MEF), com a diferença que, no MEF, as equações são multiplicadas por uma função peso antes de serem integradas sobre todo o domínio (GONÇALVES, 2007).

Como existem diferentes programas que utilizam o MVF, a tarefa do autor foi encontrar um programa *Computer Aided Engineering* (CAE) ou Engenharia Auxiliada por Computador que possua elementos que descrevam o fenômeno estudado, dando uma resposta mais aproximada do real. Devido a existência de licenças estudantis disponíveis no Laboratório de Simulação Naval da UFSC/Joinville, o programa STAR-CCM+ foi o escolhido como ferramenta robusta e confiável para a aplicação da análise de CFD proposta.

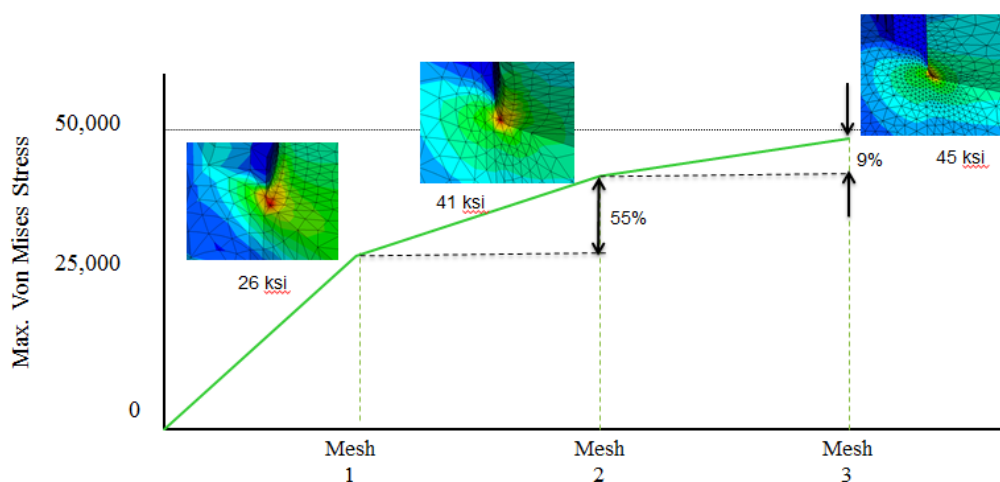
A aplicação de métodos numéricos como o CFD necessita do estabelecimento de uma série de parâmetros que serão melhor discutidos ao longo do capítulo de desenvolvimento. No entanto, uma característica presente em todos os métodos que dependam do particionamento de um domínio contínuo em

elementos discretos (malha) é a influência que o refino (tamanho dos elementos) tem sobre os resultados aferidos. Sobre isso observa-se que:

“A estrutura, o componente mecânico ou, de forma geral, o corpo contínuo é subdividido em um número finito de partes, conectados entre si por intermédio de pontos discretos, que são chamados de Nós” (ALVES, 2007, p. 11)

Essa mesma abordagem se aplica em MVF, cujo número de partes é determinado através da convergência de malha, onde refina-se a malha até que o seu resultado torne constante sem a necessidade de um maior refino que prejudique o tempo computacional, como o exemplo mostrado na figura 6.

FIGURA 6 - VON MISES X QUALIDADE DA MALHA

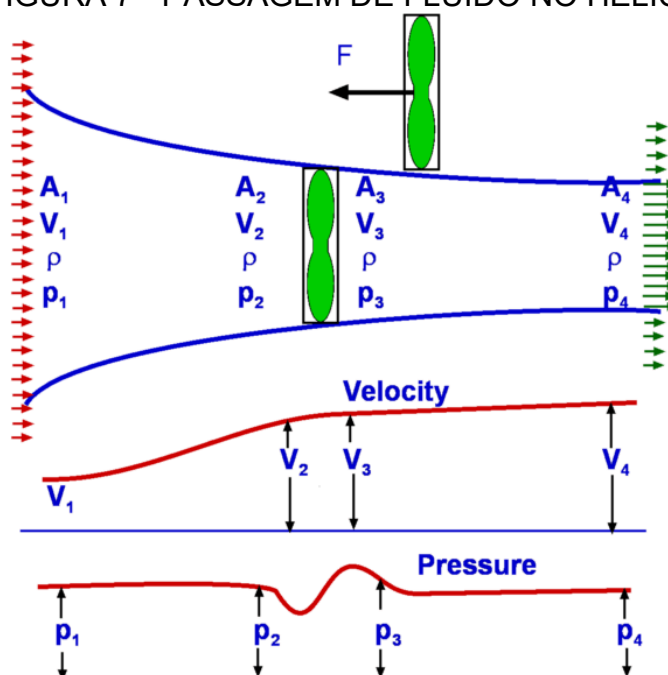


Fonte: AUTODESK (2016)

2.3 CAVITAÇÃO

Durante a operação de um hélice, o fluido é acelerado, ou seja, a velocidade antes da passagem do fluido (V_2) é menor que a velocidade depois da passagem pelo propulsor (V_3) e, segundo o Princípio de Bernoulli, a pressão antes do hélice (P_2) no dorso do hélice é menor que a pressão depois da passagem do fluido (P_3) na face do hélice. Essa diferença de pressão gera uma força de propulsão (F) que é chamada de empuxo representada na figura 7.

FIGURA 7 - PASSAGEM DE FLUIDO NO HÉLICE



Fonte: University of Sydney (2005)

Embora a geração de propulsão seja o objetivo principal de um hélice, a queda de pressão provocada pela aceleração do fluido pode resultar na evaporação do fluido, gerando bolhas de ar que reduzem a eficiência do propulsor e podem, eventualmente, causar o desgaste mecânico das pás. Esse fenômeno é denominado cavitação.

A cavitação normalmente é evitada em virtude da queda de empuxo, da erosão das pás e do aumento das vibrações induzidas pelo propulsor. Portanto, um dos pontos importantes ao projetar um propulsor é verificar se ocorrerá cavitação através do diagrama de *Burriel*.

No caso do projeto de submarinos, a cavitação também amplia significativamente a assinatura sonora da instalação propulsora. Portanto, para fim de comparação dos hélices com diferentes ângulos de caimento, será analisada a pressão e o hélice com maior queda de pressão terá mais cavitação, logo, por consequência, provavelmente apresentará maior emissão de ruídos.

O campo de pressões durante o funcionamento do propulsor será obtido diretamente da análise computacional do escoamento. Já a análise de emissão de ruído será feita de maneira qualitativa baseado na observação da queda de pressão ocorrente no fluxo do escoamento.

3 METODOLOGIA

A metodologia do trabalho será a de uma pesquisa experimental que segundo GIL (2002, p. 48), consiste essencialmente em:

“Determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis capazes de influenciá-lo e definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto”.

Desta forma, o propulsor do tipo hélice é o objeto de estudo deste projeto e as variáveis capazes de influenciá-lo são os parâmetros que descrevem a geometria do propulsor, os quais foram abordados na fundamentação teórica. O controle das variáveis será feito através do programa de modelagem *Computer Aided Design* (CAD) ou Desenho Assistido por computador e os efeitos serão observados com o programa CAE.

A primeira etapa do projeto consiste em modelar um propulsor com um programa de desenho CAD. Neste trabalho foi escolhido o programa *Solidworks*, dada a experiência pré-existente do autor e também pelo fato de a Universidade possuir licenças acadêmicas disponíveis para o uso.

O próximo passo do projeto consiste em exportar a geometria 3D criada no programa de desenho para um programa CAE e, para isso, foi usado o formato de arquivo denominado Parasolid. Esta escolha deve-se ao fato deste formato ser aquele que melhor representa o desenho feito com o CAD no programa CAE. Portanto, antes de escolher o formato de arquivo foi necessário escolher o programa CAE. O *STAR-CCM+* foi escolhido por possuir as ferramentas necessárias para a interação entre o fluido e a estrutura, ou seja, por possuir métodos associados a CFD (Dinâmica dos fluidos computacional ou *Computational Fluid Dynamics*), sendo amplamente reconhecimento como uma ferramenta robusta e confiável.

Visando assegurar o correto uso das ferramentas, foi realizada uma validação do processo desenvolvido. Nesta etapa, foi analisado um hélice de geometria e desempenho conhecidos. A adequação dos resultados obtidos com aqueles observados na literatura de referência serviram de indicadores sobre a

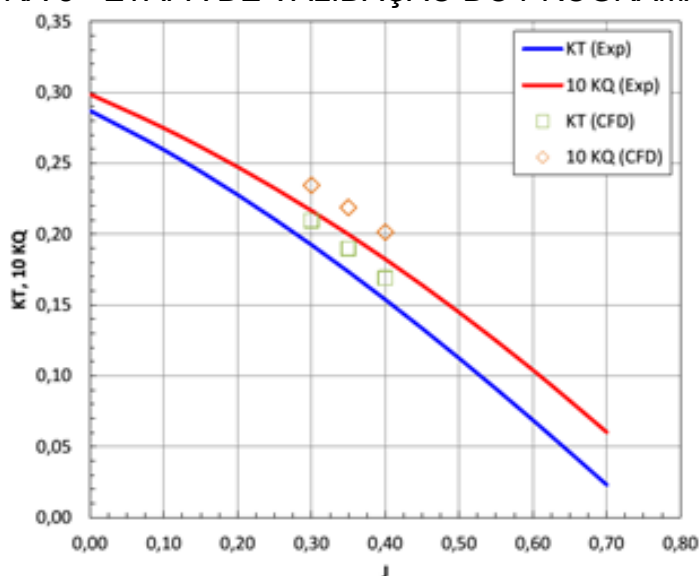
adequação da metodologia proposta para a estimativa de desempenho de propulsores do tipo hélice.

Os resultados analisados são o coeficiente de empuxo (KT), o coeficiente de torque (KQ) e a eficiência do hélice em águas abertas (η_0), os quais sintetizam o desempenho de um propulsor quando operando em águas abertas.

Para garantir que o hélice simulado tenha resultados conhecidos, optou-se por utilizar um modelo 3D com as características geométricas de um propulsor da série sistemática Wageningen, as quais já possuem curvas de desempenho obtidas experimentalmente.

O procedimento adotado é análogo ao proposto por Alho (2013) e cujo um exemplo da etapa de validação pode ser visto na figura 8, onde as linhas são os resultados experimentais originalmente publicadas na série sistemática e os pontos são os cálculos feitos pelo programa CFD.

FIGURA 8 - ETAPA DE VALIDAÇÃO DO PROGRAMA CFD



Fonte: Alho (2013)

Além das curvas de eficiência, a partir da análise CFD foi estimado o campo de pressão de cada geometria de hélice estudada e será comparada a queda de pressão, onde as maiores quedas de pressão podem resultar em processos de cavitação e, eventualmente, maior emissão de ruídos.

Para reduzir o nível de ruído, o parâmetro geométrico escolhido para ser variado e analisado foi o ângulo de caimento. Neste contexto serão comparados

inicialmente 4 propulsores, um com ângulo de caimento de -10° , um com 0° , um com 10° e outro com 15° .

A geometria do hélice com 0° de caimento será inicialmente desenhada, enquanto que as demais geometrias serão construídas com base em um procedimento proposto e que será apresentado no capítulo de modelagem de hélices da série B variando o ângulo de caimento.

Para cada propulsor será gerado um modelo CAD, e feita a análise do nível de pressão. No final os resultados serão plotados em um gráfico com a queda de pressão pela a eficiência propulsiva.

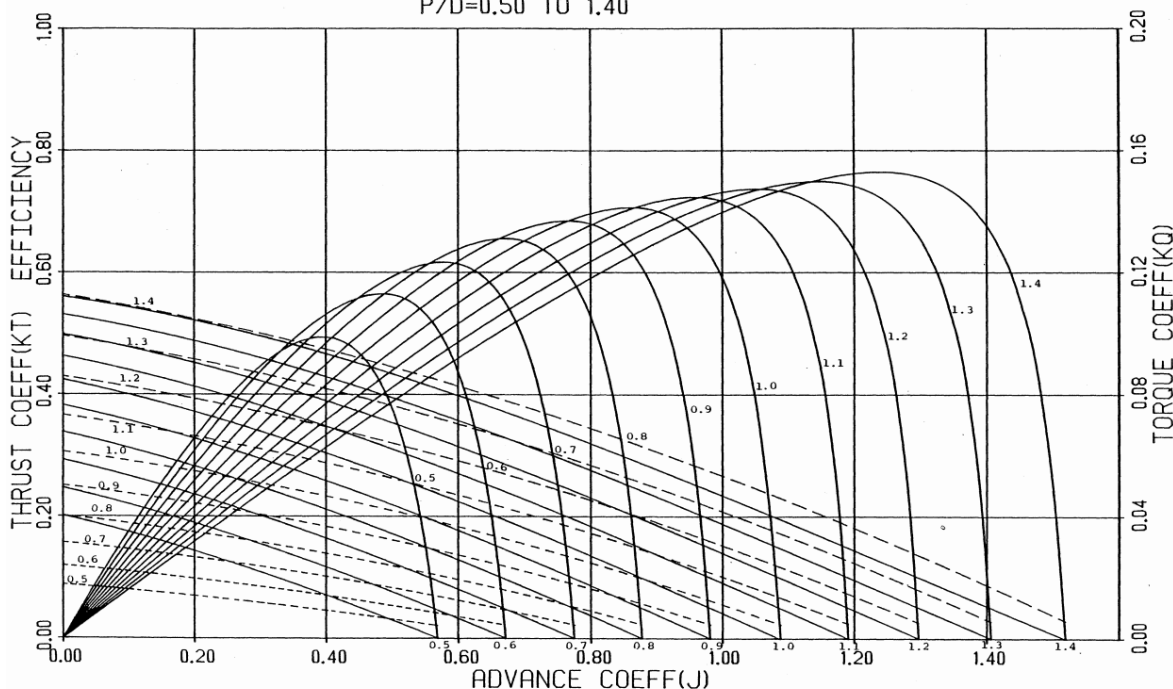
Como o ângulo de caimento afeta o empuxo, o nível de ruído não pode ser comparado diretamente. Para comparar diretamente o nível de ruído de cada propulsor com ângulo de caimento diferente, outros parâmetros teriam de mudar para manter a mesma eficiência propulsiva, tornando o problema uma análise multi-objetivo.

4 MODELAGEM DO HÉLICE DA SÉRIE B

A série B de Wageningen possui um perfil assimétrico com a geratriz e foi o tipo de hélice escolhido para este trabalho de conclusão de curso por possuir, segundo Padovezi (1997), um grande número de dados disponíveis, inclusive com previsões de cavitação. Nos tópicos a seguir serão apresentados, detalhadamente, os passos da modelagem do hélice da série B que utiliza uma planilha eletrônica do tipo "Excel" e o programa CAD "Solidworks". O hélice cujas curvas características podem ser vistas na figura 9 possui como padrão um caimento de 15°, porém neste capítulo o hélice será modelado com um ângulo de caimento de 0°.

FIGURA 9 - CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UM HÉLICE DA SÉRIE B COM 4 PÁS E $AE/A0=0.550$

FIGURE 38. WAGENINGEN B-SERIES PROPELLERS
FOR 4 BLADES $AE/A0 = 0.550$
 $P/D=0.50$ TO 1.40



Fonte: BERNITSAS (1981)

4.1 DADOS DO HÉLICE ESCOLHIDO

Esta sessão tem o objetivo de fornecer informações precisas do hélice da série B analisado com o intuito de possibilitar a reprodução dos resultados. O hélice

sem caimento, possui 4 pás e razão de área (AE/A0) de 0.55. Possui uma relação P/D de aproximadamente 0.7, por ter um diâmetro de 1440 mm e passo de 960 mm.

Os valores (em milímetros) apresentados nas tabelas 3 e 4 foram calculados por Chow Chin Chien seguindo as formulas de OOSTERVELD e OOSANEM (1974). Estas tabelas foram fornecidas durante o estágio na empresa Strauhs Equipamentos e Fundição Ltda e foram o ponto de partida para o desenho 3D do hélice sem caimento.

TABELA 3 - COORDENADAS HORIZONTAIS DE CADA PERFIL

Distância do perfil em relação ao raio do hélice	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	95%	100%
Distância da origem até o Bordo de fuga	126	144	162	177	190	202	209	204	187	87
Distância da origem até o Bordo de ataque	203	228	244	249	243	223	180	110	49	0
Distância do Bordo de fuga até o Bordo de ataque	329	372	405	426	433	425	390	313	236	0
Passo	789	852	912	952	960	960	960	960	960	960
Distância da espessura máxima até o bordo de ataque	115	130	141	151	168	188	186	157	118	87

Fonte: Próprio autor, com dados de Chow Chin Chien

TABELA 4 - COORDENADAS DO DORSO E DA FACE DE CADA PERFIL

Coordenadas do Dorso de cada perfil														
Raio	Espessura máxima até BF					EMX	Espessura máxima até BA							
	100%	80%	60%	40%	20%		0%	20%	40%	60%	80%	90%	95%	100%
20%	23.9	31.9	43.4	52.0	57.7	59.8	58.7	55.3	49.2	40.3	34.2	30.3	28.0	
30%	19.1	27.4	38.4	46.6	52	53.7	52.7	49.1	43.2	34.8	28.8	25	22.1	
40%	13.5	22.7	33.4	41.2	46.2	47.6	46.4	43	37.3	29.3	23.2	19.4	16.6	
50%	8.5	18	28.4	35.7	40.2	41.5	40.3	37.2	31.5	23.8	17.4	13.7	11.6	
60%	5.8	14.2	23.8	30.2	34.3	35.4	34.7	31.8	26	18.3	12.3	9	7.6	
70%	3.5	11.5	19.6	24.9	28.3	29.3	28.6	26	21.1	14.4	9.7	6.7	3.5	
80%	3.0	9.5	15.7	19.8	22.4	23.2	22.5	19.8	15.9	11	7.3	5.2	3.0	
90%	3.0	7.7	12	14.9	16.6	17.1	16.6	14.9	12	7.7	5.5	4.3	3.0	
95%	3.0	7.4	10.1	12.5	13.7	14.1	13.7	12.5	10.1	7.4	5	4	3.0	
100%		1.3	2.3	3.7	4.5	6.5	4.5	3.7	2.3	1.3	0.7	0.5		

Coordenadas da Face de cada perfil														
Raio	Espessura máxima até BF					EMX	Espessura máxima até BA							
	100%	80%	60%	40%	20%		0%	20%	40%	60%	80%	90%	95%	100%
20%	17.9	10.9	6.5	3.3	0.9		0.3	1.7	4.4	9.3	12.9	15.5	22	
30%	13.6	6.6	3.1	0.9			0.2	0.7	2.5	5.9	8.7	10.6	16.6	
40%	8.5	3	0.7					0.1	0.8	2.8	4.9	6.4	11.6	
50%	4	0.7							0.1	0.7	1.8	3	7.1	
60%	1.8										0.2	0.7	3.6	

Fonte: Próprio autor, com dados de Chow Chin Chien

4.2 GERANDO OS PONTOS NA PLANILHA DO “EXCEL”

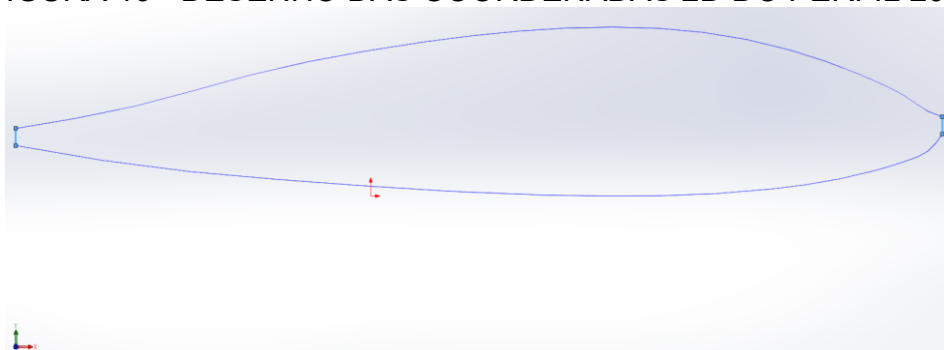
Primeiro as tabelas 3 e 4 com os dados do perfil tiveram seus perfis transformados em coordenadas 2D no “Excel”. Para isso foi feita a tabela para cada perfil em um determinado raio e no caso demonstrado na tabela 5, que possui os valores em milímetros, é para o perfil em 20% do raio do hélice e o desenho do perfil com as coordenadas X e Y pode ser visto na figura 10.

TABELA 5 - COORDENADAS 2D DO PERFIL 20%

	Raio 20%	Espessura máxima até BF					EMX 0%	Espessura máxima até BA						
		100%	80%	60%	40%	20%		20%	40%	60%	80%	90%	95%	100%
Face	X	-126,0	-83,2	-40,4	2,4	45,2	88,0	111,0	134,0	157,0	180,0	191,5	197,3	203,0
	Y	17,9	10,9	6,5	3,3	0,9	0,0	0,3	1,7	4,4	9,3	12,9	15,5	22,0
Dorso	X	-126,0	-83,2	-40,4	2,4	45,2	88,0	111,0	134,0	157,0	180,0	191,5	197,3	203,0
	Y	23,9	31,9	43,4	52,0	57,7	59,8	58,7	55,3	49,2	40,3	34,2	30,3	28,0

Fonte: Próprio autor

FIGURA 10 - DESENHO DAS COORDENADAS 2D DO PERFIL 20%



Fonte: Próprio autor

Para preencher a tabela, primeiro foi calculada a distância na direção “x” da espessura máxima (EMX):

$$\text{Distância EMX} = \text{Bordo de Ataque} - \text{Distância EMX até o bordo de ataque}$$

Com isso foi possível calcular o valor de “x” do bordo de fuga (BF) e do bordo de ataque (BA):

$$X_{BF} = P. (BF + \text{Dist. EMX}) + \text{Dist. EMX} \quad (4.1)$$

$$X_{BA} = P. (\text{Dist. EMX até BA}) + \text{Dist. EMX} \quad (4.2)$$

Sendo o “P” das fórmulas a porcentagens mostradas na tabela 5 e representam a distância entre o ponto desejado e a espessura máxima.

Os valores de “x” são os mesmos na face e no dorso, já os valores de “y” foram retirados diretamente da tabela 4 e são diferentes no dorso e na face.

Para transformar os perfis 2D para 3D, foram usadas as seguintes fórmulas deduzidas por relações trigonométricas, onde o “ângulo” usado nas formulas é representado na figura 11 tendo como exemplo o perfil em 20% do raio:

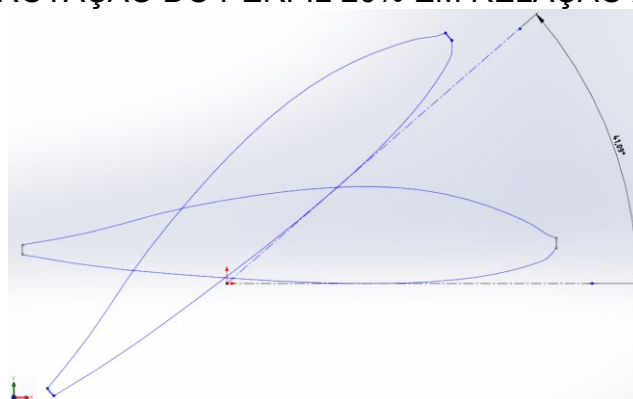
$$X = x \cdot \cos(\hat{\text{ângulo}}) - y \cdot \sin(\hat{\text{ângulo}}) \quad (4.3)$$

$$Y = y \cdot \cos(\hat{\text{ângulo}}) + x \cdot \sin(\hat{\text{ângulo}}) \quad (4.4)$$

$$Z = \text{Raio} \cdot \sin\left(\cos^{-1}\left(\frac{x}{\text{Raio}}\right)\right) \quad (4.5)$$

$$\hat{\text{Ângulo}} = \text{Tg}^{-1}\left(\frac{\text{Passo}}{2 \cdot \pi \cdot \text{Raio}}\right) \quad (4.6)$$

FIGURA 11 - ROTAÇÃO DO PERFIL 20% EM RELAÇÃO AO PLANO XY



Fonte: Próprio autor

Para facilitar a união entre o Bosso e a pá, foi criado um perfil adicional que foi feito deslocando o perfil com 20% do raio em “Z” até ele entrar no Bosso. Curvas foram criadas para facilitar a união dos perfis no programa e elas foram compostas por pontos máximos e mínimos em X e Y de cada perfil como mostra a tabela 6.

TABELA 6 - CURVAS AUXILIARES

Curva auxiliar	Definição
Pontos de EMX	Curva com os pontos de espessura máxima no dorso de cada perfil
Linha de EMX (y=0)	Curva com os pontos de espessura máxima na face de cada perfil
Linha de x máximo	Curva composta por pontos do bordo de ataque de cada perfil
Linha de x mínimo	Curva composta por pontos do bordo de fuga de cada perfil

Fonte: Próprio autor

No caso do hélice em estudo, existem duas linhas de x máximo e duas linhas de x mínimo. Devido a espessura no bordo de ataque e no bordo de fuga.

4.3 PASSANDO AS CURVAS PARA O SOLIDWORKS

As coordenadas do dorso e da face de cada perfil foram passadas para um arquivo “*.txt”. Ao abrir o *solidworks*, criou-se um novo documento e selecionou-se uma peça 3D e em “Recursos”. Logo em seguida, selecionou-se a opção “curva através de pontos XYZ”, como pode ser visto na figura 12, no qual se passou os dados do arquivo “*.txt”.

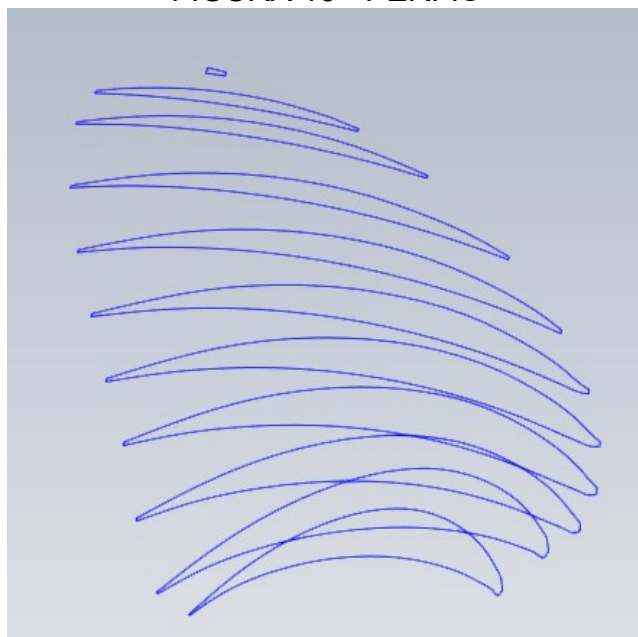
FIGURA 12 - CURVA ATRAVÉS DE PONTOS XYZ



Fonte: Próprio autor

O processo repetiu-se para todos os dorsos e as faces dos perfis que foram unidos por retas, e o resultado disso pode ser visto na figura 13.

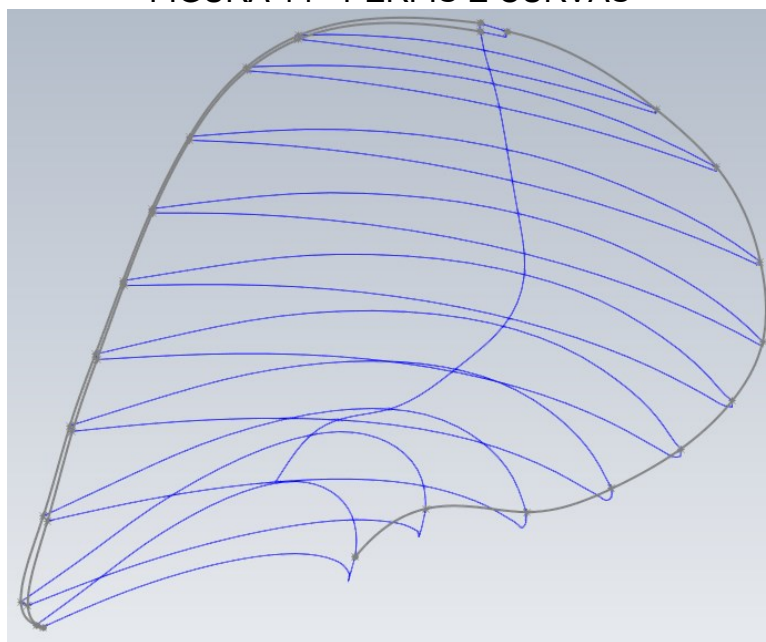
FIGURA 13 - PERFIS



Fonte: Próprio autor

Utiliza-se o mesmo processo à curva compostas por pontos de espessura máxima, que se transferiu para o *Solidworks*. Na figura 14, pode ser visto as curvas de máximos e mínimos que foram escolhidas para definirem os limites da pá: Duas curvas de mínimo de “x”, a curva de máxima espessura e a curva de “x” máximo considerando a espessura.

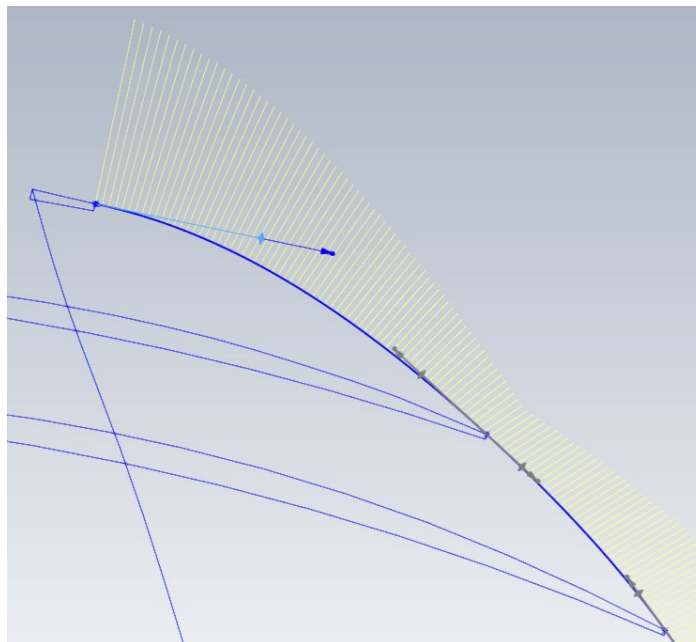
FIGURA 14 - PERFIS E CURVAS



Fonte: Próprio autor

As curvas das linhas de x máximo e mínimo para o *Solidworks* foram passadas ponto a ponto em um esboço 3D e não como um arquivo de texto como visto anteriormente. Após colocar todos os pontos, os mesmos foram unidos por *spline* para fim de obter um melhor controle da curvatura que se mostra na figura 15.

FIGURA 15 - CONTROLE DA CURVATURA COM SPLINE

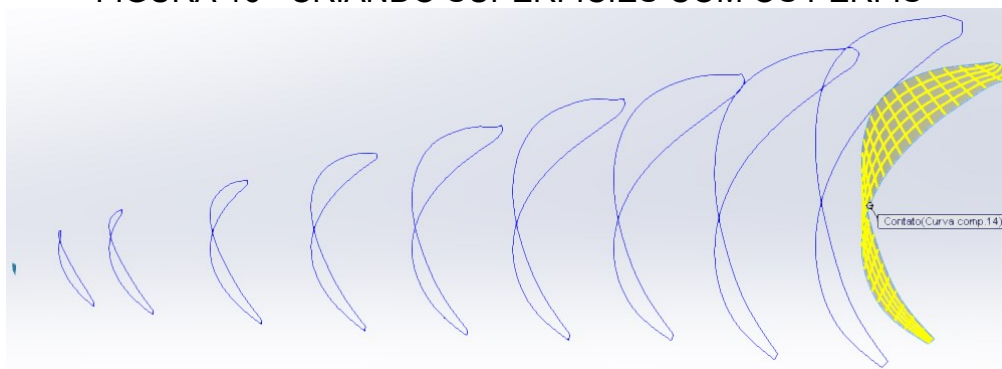


Fonte: Próprio autor

4.4 CRIANDO SUPERFÍCIES COM OS PERFIS

Para criar as superfícies, foi usada a opção “Superfície preenchida” e selecionou-se uma das curvas que descrevem o perfil (figura 16). O processo foi feito para o primeiro e último perfil para fechar a geometria da pá.

FIGURA 16 - CRIANDO SUPERFÍCIES COM OS PERFIS



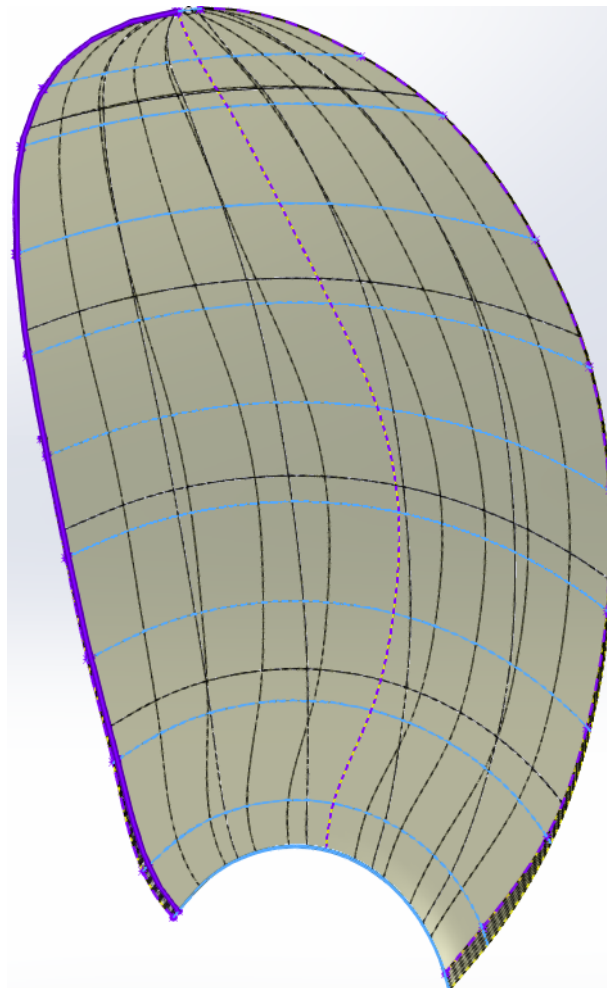
Fonte: Próprio autor

4.5 MODELANDO A PÁ COM “LOFT”

Na parte de “Recursos” selecionou-se “Ressalto/Base por *loft*”, que é um recurso do Solidworks capaz de criar corpos sólidos unindo dois ou mais perfis,

depois selecionou-se as superfícies dos perfis por ordem e em Curvas-guia. As 4 curvas que representam os pontos máximos e mínimos em X e Y de cada perfil foram selecionadas.

FIGURA 17 - MODELANDO A PÁ COM "LOFT"



Fonte: Próprio autor

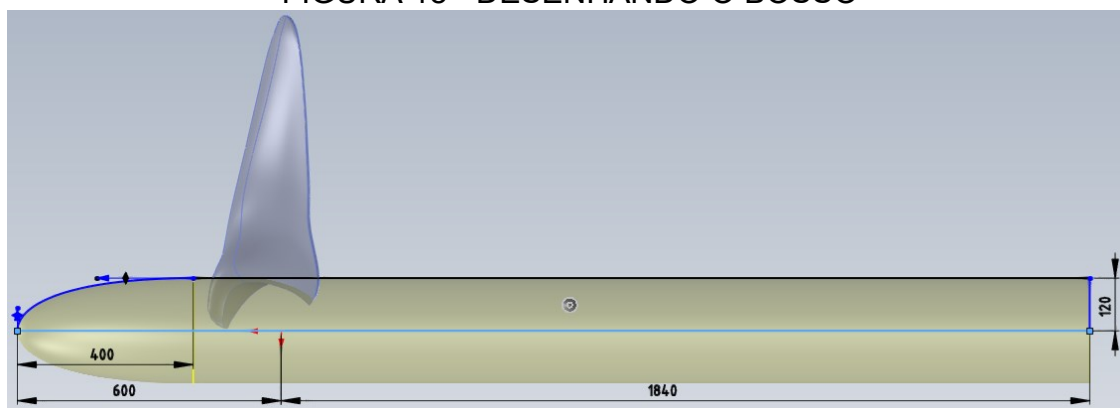
A figura 17 ilustra este processo, no qual a opção "Mesclar faces tangentes" foi desmarcada para um melhor contorno da pá.

4.6 DESENHANDO O BOSSO

Selecionou-se o plano direito e foi feito um esboço do Bosso com o desenho 2D representando a geometria tipicamente observada. Após o esboço feito, selecionou-se "Ressalto/Base revolucionado" na parte de "Recursos" e escolheu-se o eixo de revolução como demonstra a figura 18. Além do bosso é desenhado um

longo eixo e um perfil para direcionar o escoamento para fazer a simulação em águas abertas.

FIGURA 18 - DESENHANDO O BOSSO

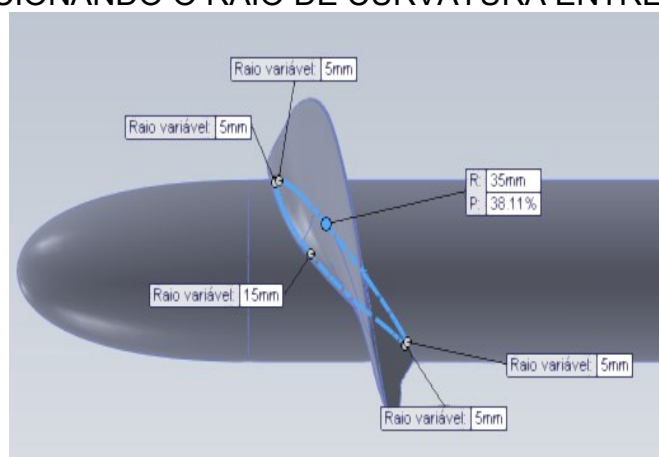


Fonte: Próprio autor

4.7 ADICIONANDO O RAIOS DE CURVATURA ENTRE O BOSSO E A PÁ

Em Recursos clicou-se no ícone de “Filete” e a opção de “Filete variável” foi selecionada, aplicou-se o filete nas arestas que ligam o Bossa e a pá. A partir deste processo, definiu-se o raio máximo, e foi mudado o valor do raio para um valor menor no bordo de fuga e no bordo de ataque. Essa etapa é demonstrada na figura 19.

FIGURA 19 - ADICIONANDO O RAIOS DE CURVATURA ENTRE O BOSSO E A PÁ

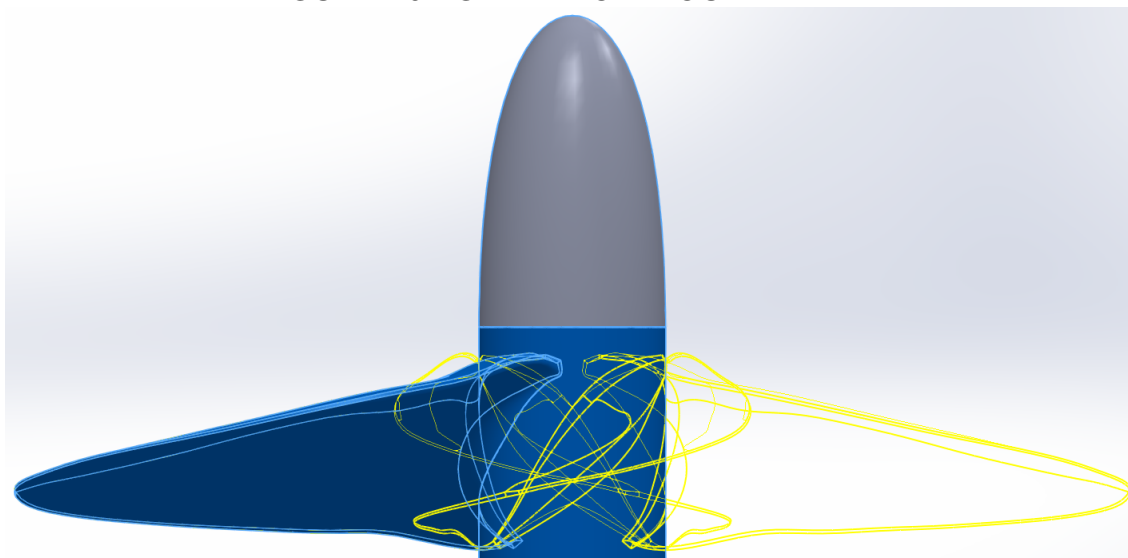


Fonte: Próprio autor

4.8 GERANDO AS OUTRAS PÁS

O *Loft* e o filete recém criado foram selecionados e clicou-se em “Padrão circular” para gerar as outras pás. Na parte de parâmetros, selecionou-se a face cilíndrica do Bosso e o ângulo foi mantido em 360°. O número do padrão circular também foi mantido em 4, e o “padrão de geometria” marcou-se nas “opções”, como pode ser visto na figura 20.

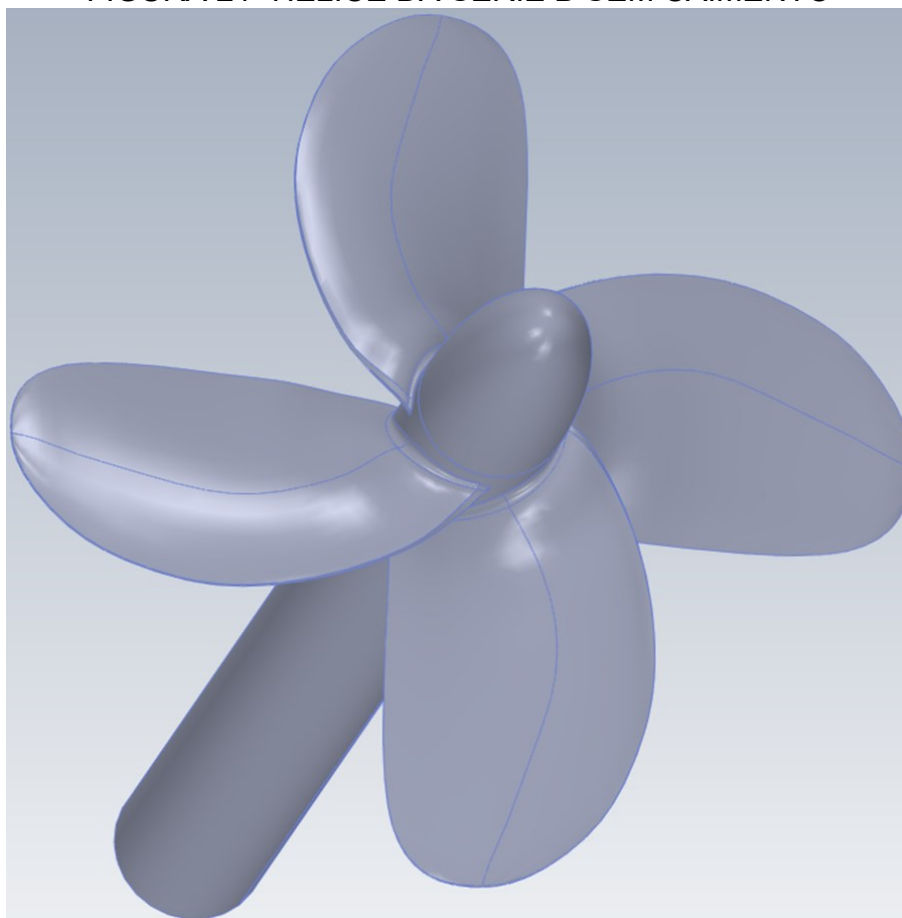
FIGURA 20 - GERANDO AS OUTRAS PÁS



Fonte: Próprio autor

Ao clicar em “OK” pôde ser visto que a geometria do hélice ficou completa como é mostrado na figura 21.

FIGURA 21- HÉLICE DA SÉRIE B SEM CAIMENTO



Fonte: Próprio autor

4.9 IMPORTANDO E/OU SALVANDO

O *solidworks* oferece várias opções de tipo de arquivo. Após diversos testes, recomenda-se salvar o arquivo como peça (*.prt;*.sldprt) e salvar uma cópia do arquivo no formato Parasolid (*.x_t), para que esta possa ser mais facilmente importada pelo STAR-CCM+.

5 MODELAGEM DE HÉLICES DA SÉRIE B VARIANDO O ÂNGULO DE CAIMENTO

Segundo Padovezi (1997), uma das vantagens de hélices da série B é a possibilidade de adaptação de sua geometria. Neste caso, o parâmetro geométrico que será alterado será o ângulo de caimento.

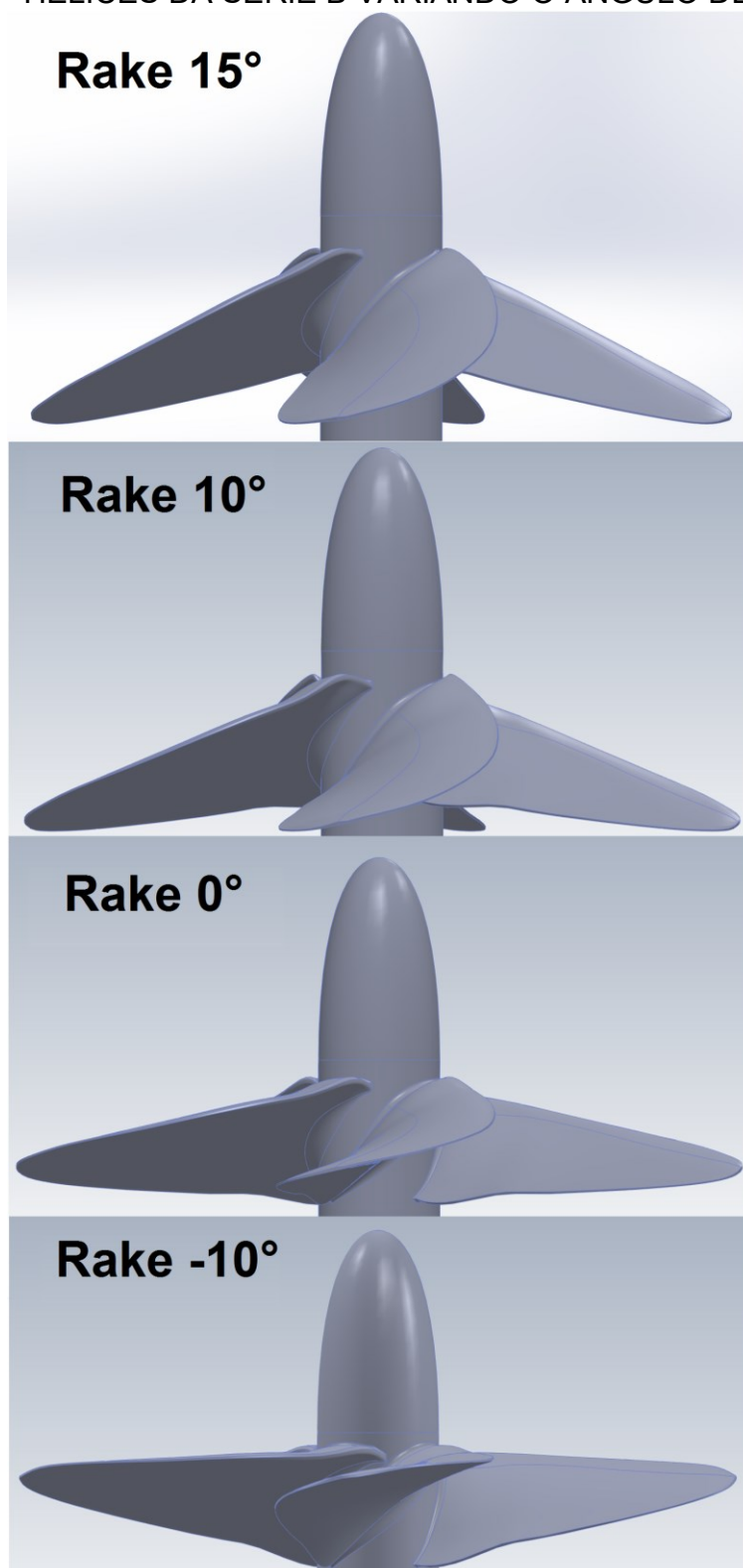
O processo para a criação do hélice é idêntico ao do capítulo anterior sendo a única alteração o deslocamento de pontos de cada perfil no plano YZ. Portanto, o valor de X não é alterado e os novos valores de Y e Z são calculados de acordo com as seguintes formulas deduzidas por trigonometria, onde o " α_{rake} " é o ângulo de caimento:

$$Y_{rake} = Y \cdot \cos(\alpha_{rake}) + Z \cdot \sin(\alpha_{rake}) \quad (5.1)$$

$$Z_{rake} = Z \cdot \cos(\alpha_{rake}) + Y \cdot \sin(\alpha_{rake}) \quad (5.2)$$

As curvas compostas por pontos máximos e mínimos em X e Y, de cada perfil, tiveram que ser refeitas em função do ângulo de caimento. Na figura 22 foi feita a comparação através das imagens de hélices com diferentes valores de ângulo de caimento.

FIGURA 22 - HÉLICES DA SÉRIE B VARIANDO O ÂNGULO DE CAIMENTO



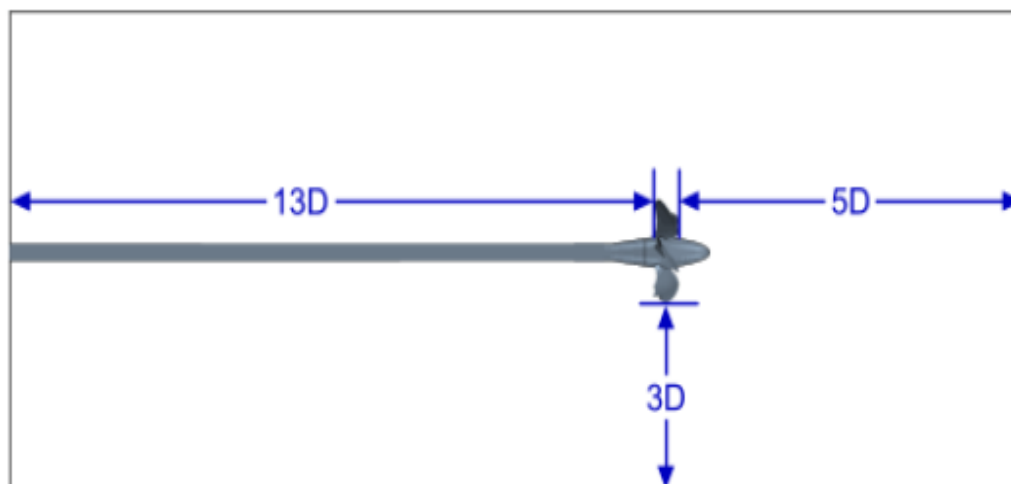
Fonte: Próprio autor

6 METODOLOGIA PARA SIMULAÇÃO DE UM HÉLICE EM ÁGUAS ABERTAS

A *CD-adapco* (2014) oferece um guia do usuário junto com o programa *STAR-CCM+*, e neste guia existe um capítulo falando sobre a simulação de propulsores operando em águas abertas. Neste guia utilizou-se um hélice de passo controlável com geometria e os dados experimentais fornecidos pela *SVA* (2013). Os passos do tutorial foram seguidos com o intuito de compreender como funciona a simulação e aprender a usar o programa e serão mostrados neste capítulo do trabalho.

Na simulação o hélice é colocado em um tanque virtual como apresentado na figura 23 que mostra as dimensões do tanque em função do diâmetro do hélice. Um fato importante é que este tipo de simulação consiste em deixar o hélice parado e fazer o fluido ir de encontro com as pás.

FIGURA 23 - TANQUE DE ÁGUA VIRTUAL

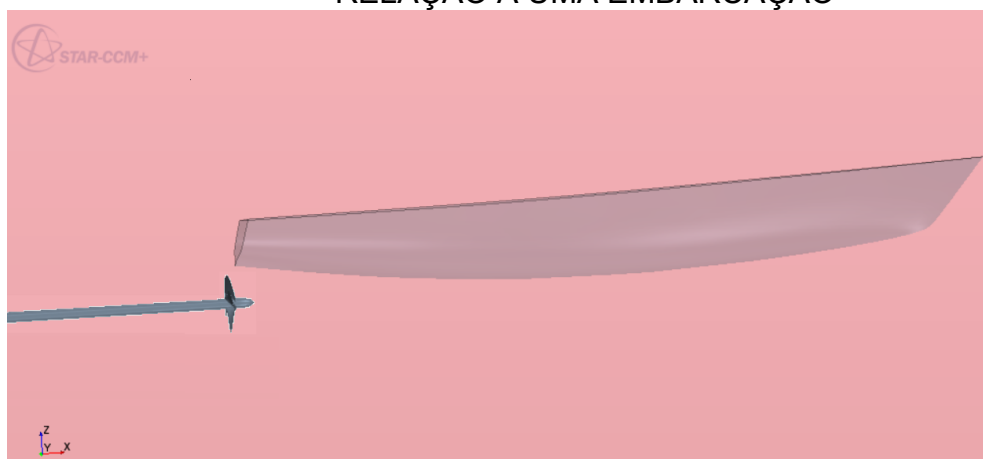


Fonte: *CD-adapco* (2014)

Outro fato importante que deve ser mencionado é o sentido do escoamento na simulação em águas abertas que não é tão intuitivo, para representá-lo foi feita a figura 24 que mostra como o hélice estaria direcionado em relação a uma embarcação, porém devesse ressaltar que a simulação em águas abertas não tem a presença da embarcação, sendo a figura 24 somente para representação. Como já citado na parte de modelagem, foi desenhado um longo eixo junto ao bosso e um perfil que serve para direcionar o escoamento. Estes dois elementos foram feitos

para a simulação em águas abertas e não devem ser confundidos como parte do eixo propulsor de uma embarcação.

FIGURA 24 - REPRESENTAÇÃO DO POSICIONAMENTO DO HÉLICE EM RELAÇÃO A UMA EMBARCAÇÃO

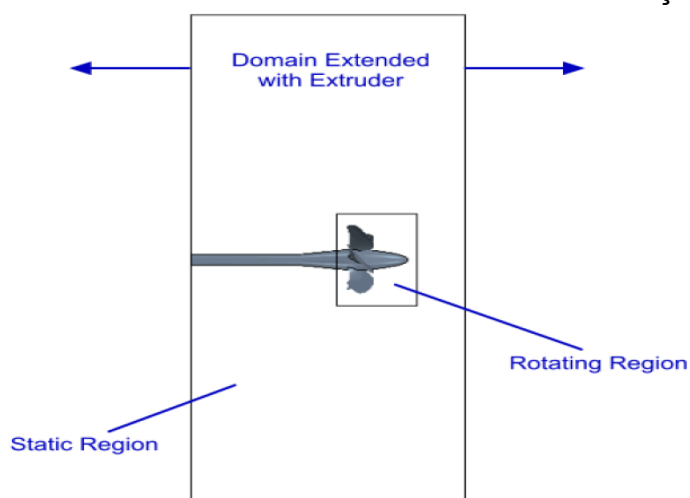


Fonte: Próprio autor

6.1 CARREGANDO O ARQUIVO DE SIMULAÇÃO

A primeira etapa do tutorial consiste em carregar um arquivo de simulação que é fornecido dentro do diretório do *STAR-CCM+* que contém objetos de simulação pré-definidos como a geometria do hélice, propriedades da água (densidade 998.67 kg/m^3 e viscosidade dinâmica 0.001068 Pa-s) e, até mesmo, a região estática e de rotação mostradas na figura 25.

FIGURA 25 - REGIÕES ESTÁTICA E DE ROTAÇÃO

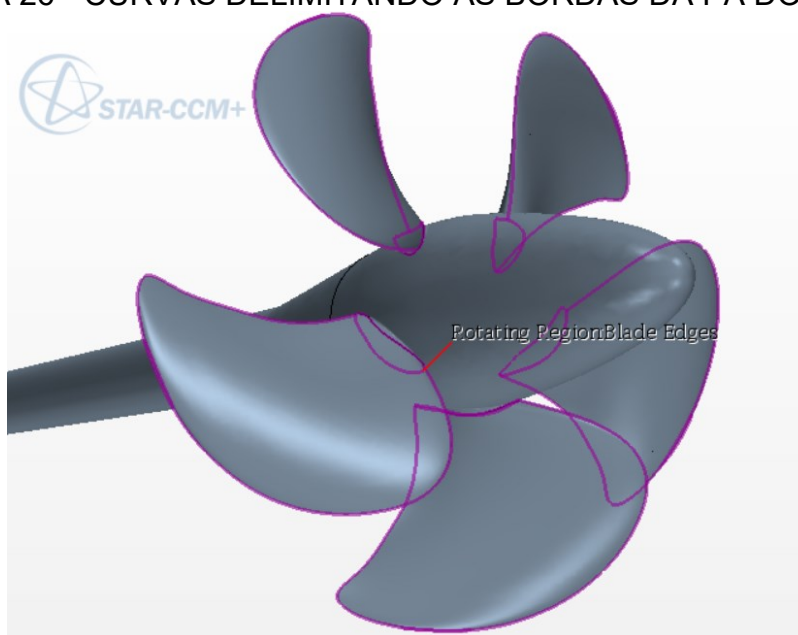


Fonte: *CD-adapco* (2014)

6.2 REVENDO A GEOMETRIA

Como dito na etapa anterior a geometria é pré-definida no arquivo de simulação, portanto nesta etapa do tutorial são mostradas algumas recomendações e não passos a serem seguidos. A primeira recomendação é usar curvas delimitando as bordas da pá do hélice, como mostrado na figura 26, para poder capturar a forma da pá até mesmo com uma malha relativamente mais grossa.

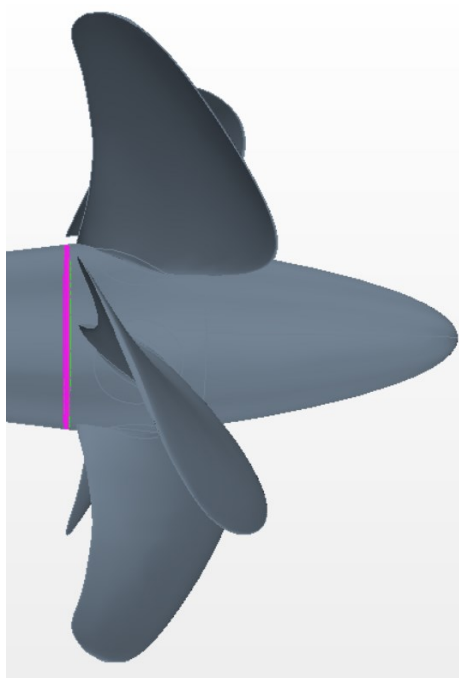
FIGURA 26 - CURVAS DELIMITANDO AS BORDAS DA PÁ DO HÉLICE



Fonte: Próprio autor

Outra recomendação é deixar a geometria fechada. No caso do hélice da SVA (2013) existia um espaço que foi preenchido usando as ferramentas de modelagem 3D do próprio STAR-CCM+, como mostra a figura 27.

FIGURA 27 - FECHANDO DETALHES NA GEOMETRIA



Fonte: Próprio autor

6.3 DEFININDO A MALHA

Como já exposto na fundamentação teórica, a malha é refinada até que o seu resultado torne constante sem a necessidade de um maior refino que prejudique o tempo computacional. Uma solução para obter resultados mais precisos é utilizar uma malha mais refinada apenas nas regiões de maior interesse para a modelagem do fenômeno. O tipo de malha escolhido é mostrado na tabela 7, e são descritos, segundo as recomendações contidas em *CD-adapco* (2014).

TABELA 7 - TIPO DE MALHA

Tipo de malha	Definição
Surface Remesher	Modelo necessário para geometrias criadas em geometrias CAD importadas ou criadas em "3D-CAD"
Trimmer	Usa uma malha predominantemente hexahedral que é eficiente no preenchimento de grandes volumes e usa menos memória por celular do que a malha poliédrica
Prism Layer Mesher	Usado para criar uma camada de células prisma ao lado da parede que é essencial para escoamentos turbulentos
Extruder	Usado para estender a malha

Fonte: Próprio autor

De acordo com o tutorial, primeiro foi definido os valores de referência junto com o valor da base que no caso foi 9 mm. Os demais valores do tamanho da malha são definidos como uma porcentagem do valor da base. Onde a parte com maior refino são as curvas que delimitam as bordas da pá mostradas na figura 26 com 5% do valor da base, sendo que as pás foram definidas com uma malha com 25% do valor da base e a interface entre as regiões com 50%.

Outra área com um maior refino é a folga que existe entre o bosso e as pás, por se tratar de um hélice de passo controlável. Para capturar com precisão o fenômeno de camada limite a porcentagem da espessura mínima foi de 1%. As superfícies externas da região estática foram a que tiveram a malha mais grossa com 1600% do valor base.

A área em torno do hélice foi refinada e criou-se um cilindro que envolve as pás e o bosso. Esse cilindro é usado para criar um controle volumétrico com uma malha de 50% do valor da base.

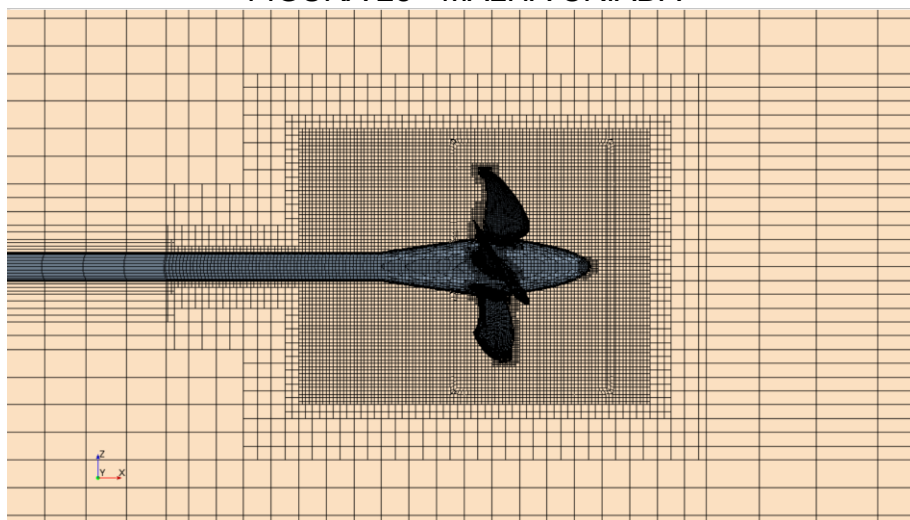
O tanque, representado na figura 23, não foi inteiramente desenhado na parte de geometria sendo cortado na entrada e saída de fluxo. A região de domínio estático cortada foi estendida por extrusão de malha na entrada e saída de fluxo como mostra a figura 25. Com isso obteve-se as dimensões corretas do tanque virtual. Este processo gera uma malha esticada, poupa esforços computacionais, e isso foi possível, pois o fluxo nestas regiões é geralmente perpendicular às faces da malha que não são esticadas.

6.4 GERANDO A MALHA

A malha foi definida na etapa anterior, assim pode-se gerar a malha selecionando "*Volume Mesh*" e bastou esperar até que o processo terminasse. O processo demorou aproximadamente 10 minutos como o tutorial havia previsto.

Para visualizar a malha criada foi utilizada uma cena que está entre os objetos de simulação pré-definidos. A "*Mesh Scene*" foi selecionada e foi aplicado a representação do "*Volume Mesh*" e o resultado pode ser visto na figura 28.

FIGURA 28 - MALHA CRIADA



Fonte: Próprio autor

6.5 CONFIGURANDO AS CONDIÇÕES DE CONTORNO

A maioria das condições de contorno, como as propriedades do fluido, já estão entre os objetos de simulação pré-definidos. Nesta parte será definido a velocidade de avanço (V_A), existente na entrada de fluxo. A velocidade de avanço (V_A) é definida através do coeficiente de avanço (J) como mostra a equação 2.1 na fundamentação teórica. Para fazer isso no programa são definidos algumas funções:

$$i = \text{floor} (\$Iteration/501) \quad (6.1)$$

$$J = 0.6 + 0.2 * \$i \quad (6.2)$$

$$D = 0.25 \text{ m} \quad (6.3)$$

$$n = 15 \text{ rps} \quad (6.4)$$

$$VA = \$J * \$n * \$D \quad (6.5)$$

Onde o diâmetro do hélice (D) e a sua rotação (n) foram dados fornecidos pela CD-adapco (2014) de acordo com o hélice da SVA (2013). Sendo “ i ” um número inteiro que começa em zero e a cada 500 iterações aumenta em um, fazendo com que J varie como observado na tabela 8. Conseqüentemente os valores da velocidade de avanço (V_A) variam conforme a tabela 9, fazendo com que a cada 500 iterações seja analisada uma única velocidade de avanço na simulação.

TABELA 8 - Nº DE ITERAÇÕES E COEFICIENTE DE AVANÇO

Iterações	Coeficiente de avanço (J)
500	0.6
1000	0.8
1500	1.0
2000	1.2
2500	1.4

Fonte: Próprio autor

TABELA 9 - Nº DE ITERAÇÕES E VELOCIDADE DE AVANÇO V_A

Iterações	Velocidade de avanço (V_A) [$m.rad/s$]
500	4.5π
1000	6π
1500	7.5π
2000	9π
2500	10.5π

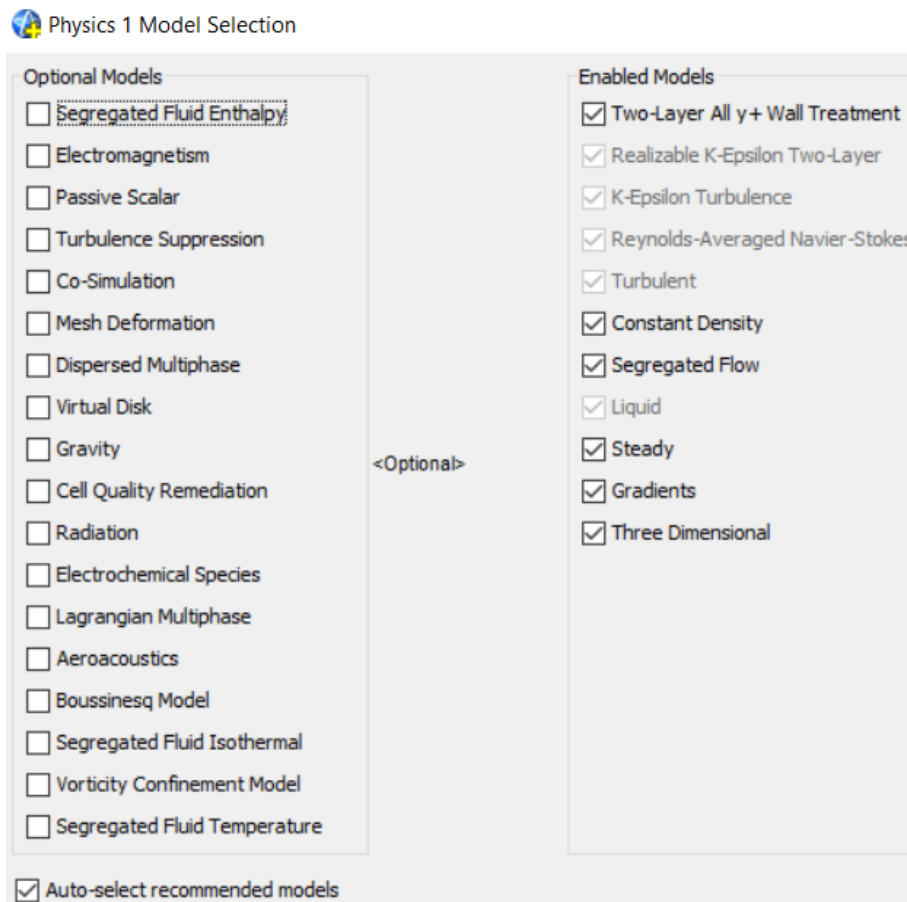
Fonte: Próprio autor

A velocidade de avanço (V_A) é aplicada na entrada de fluxo como uma função escalar e é aplicada na condição inicial como um vetor com coordenadas $[-1 * V_A, 0.0, 0.0]$.

Usualmente os gráficos de desempenho de propulsores são definidos de acordo com o Coeficiente de Avanço. Por isso, para se obter valores de J precisos, a opção foi determinar a velocidade de avanço a partir do J desejado e das características geométricas do propulsor.

Outro objeto de simulação pré-definido é o “Physics” que traz propriedades do fluxo de água e é apresentado na figura 29, onde destaca-se o modelo K-Epsilon como o modelo de turbulência mais utilizado neste tipo de simulação e que segundo a *CD-adapco* (2014) é um modelo de duas equações em que equações de transporte são resolvidos pela energia cinética turbulenta e a sua taxa de dissipação. No STAR-CCM+ existem 8 formas do modelo K-Epsilon, portanto para ser mais específico neste caso está sendo usado o modelo “Realizable Two-Layer K-Epsilon”, conforme recomendação encontrada em *CD-adapco* (2014).

FIGURA 29 - PROPRIEDADES DO FLUXO DE ÁGUA



Fonte: Próprio autor

6.6 CRIANDO RELATÓRIOS PARA OS DADOS DO HÉLICE

Nesta parte foram criados relatórios para o coeficiente de empuxo (KT), coeficiente de torque (KQ) e para a eficiência do hélice em águas abertas (η_0). Para isso foi usada a função de campo da densidade da água (ρ) que é um dos objetos de simulação pré-definidos.

No STAR-CCM+ na parte de “Report” foi gerado um novo relatório para a força (T) e para o momento (Q) no boss, e nas pás tendo como direção respectivamente [1.0, 0.0, 0.0] e [-1.0, 0.0, 0.0]. Para gerar os relatórios para os dados do hélice foi criado um novo “Report” contendo as seguintes expressões:

$$KT = \$TReport / (\$rho * pow(\$n, 2) * pow(\$D, 4)) \quad (6.6)$$

$$KQ = \$QReport / (\$rho * pow(\$n, 2) * pow(\$D, 5)) \quad (6.7)$$

$$h0 = (\$KTReport / \$KQReport) * (\$JReport / (2 * 3.1428571429)) \quad (6.8)$$

Que correspondem as equações 2.2, 2.3 e 2.4 apresentadas na fundamentação teórica.

6.7 MONITORANDO OS DADOS DO HÉLICE

Para monitorar os dados do hélice foram criados mais relatórios para as expressões de coeficiente de avanço (J) e para 10 vezes o coeficiente de torque (KQ) que é necessário para plotar o gráfico:

$$J = \$J \quad (6.9)$$

$$10KQ = \$KQReport * 10 \quad (6.10)$$

Foram criados monitores para os valores de J, 10KQ, KT e η_0 que salvam valores destas variáveis a cada 500 iterações de acordo com a variação do coeficiente de avanço (J).

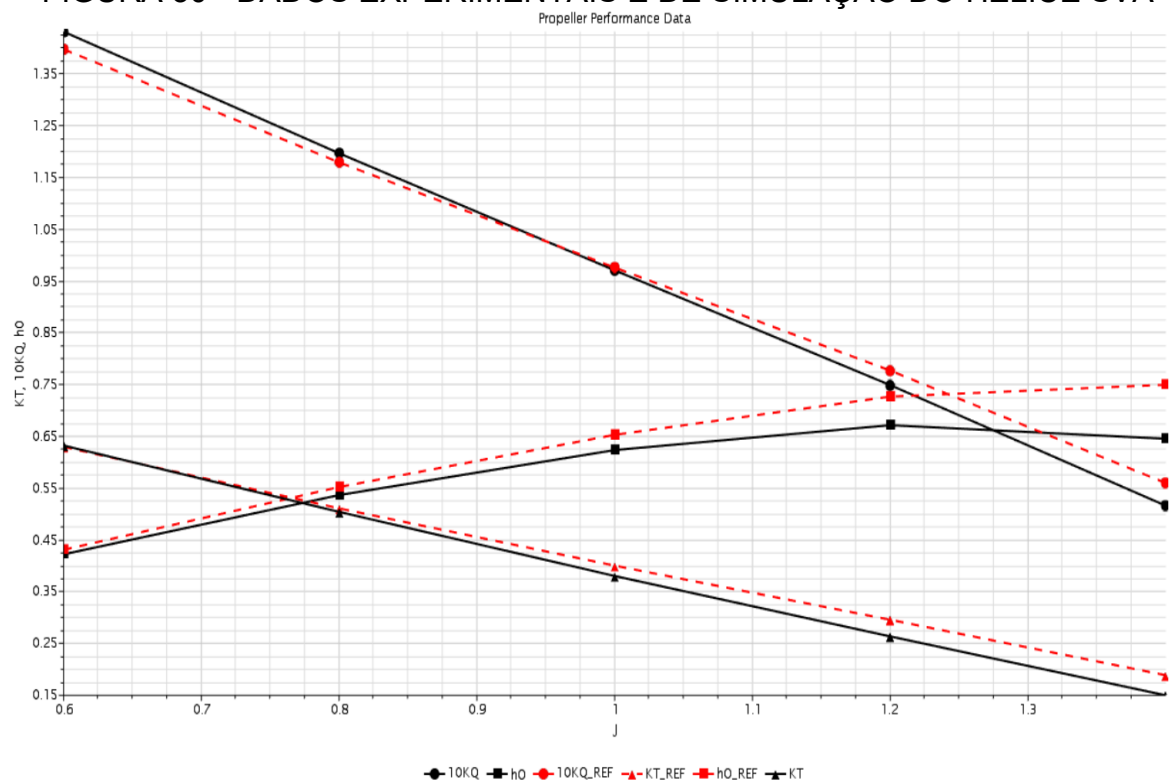
6.8 EXECUTANDO A SIMULAÇÃO

Antes de realizar a simulação é estabelecido um valor máximo de 2500 iterações gerando os valores de J que foram mostrados na parte das configurações das condições de contorno. A simulação para cada valor de coeficiente de avanço (J) levou em torno de seis horas totalizando trinta horas, em um processador com dois núcleos, para completar a determinação das curvas de desempenho do propulsor analisado descritas por 5 valores do coeficiente J.

6.9 PLOTANDO OS DADOS DO HÉLICE

Ao fim da simulação os monitores de J, 10KQ, KT e η_0 foram exportados e salvos como um arquivo “*.csv” e posteriormente importados como uma tabela para o *STAR-CCM+*. A tabela foi plotada dentro do próprio programa em um gráfico mostrado na figura 30, onde as curvas em preto são os calculados na simulação e as curvas em vermelho são dados experimentais fornecidos pela *SVA* que é mais um dos objetos de simulação pré-definidos. O gráfico que se apresentou no tutorial é idêntico ao calculado na simulação, o qual mostra que os passos foram seguidos corretamente e a simulação ocorreu como esperado.

FIGURA 30 - DADOS EXPERIMENTAIS E DE SIMULAÇÃO DO HÉLICE SVA



Depois de encontrar os pontos, os dados foram passados para o “Excel” e foi possível calcular o erro existente entre os dados experimentais e os dados obtidos na simulação CFD, os quais são mostrados na tabela 10. Nota-se na tabela que à medida que o valor do coeficiente de avanço (J) aumenta, os valores de $10KQ$, KT e η_0 vão diminuindo em relação aos dados experimentais. Isso faz com que o erro seja máximo no ponto de maior eficiência do hélice em águas abertas.

TABELA 10 - ERRO DE KT , $10KQ$ E η_0

J	Erro no KT	Erro no KQ	Erro η_0
0.6	0.40%	2.43%	-2.02%
0.8	-1.33%	1.49%	-2.81%
1.0	-5.00%	-0.55%	-4.51%
1.2	-10.91%	-3.62%	-7.61%
1.4	-20.65%	-7.83%	-13.93%

Fonte: Próprio autor

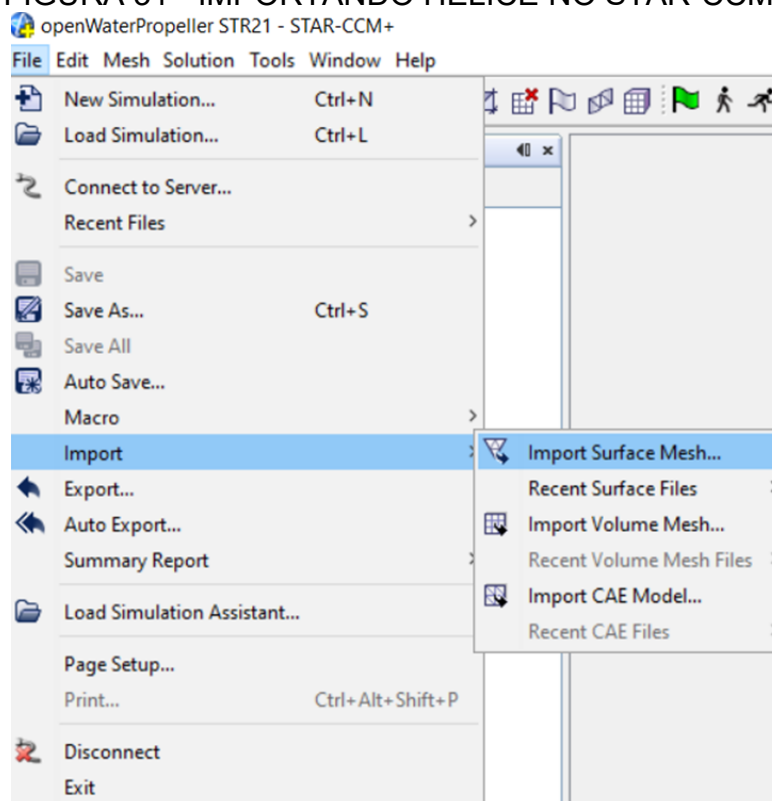
7 SIMULAÇÃO EM ÁGUAS ABERTAS DE UM HÉLICE DA SÉRIE B

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento da simulação de um hélice da série B sem caimento. Para simular o novo hélice foi usado o arquivo com todas as configurações estabelecidas no capítulo anterior, modificando-se a malha e os resultados obtidos.

7.1 IMPORTANDO O ARQUIVO DO HÉLICE DA SÉRIE B

Para importar a geometria do hélice da série B foi selecionado a opção “*Import Surface Mesh*” no *STAR-CCM+* como mostra a figura 31. Selecionou-se o arquivo no formato Parassolid (*.x_t) como indicado no capítulo de modelagem de um hélice da série B.

FIGURA 31 - IMPORTANDO HÉLICE NO STAR-CCM+

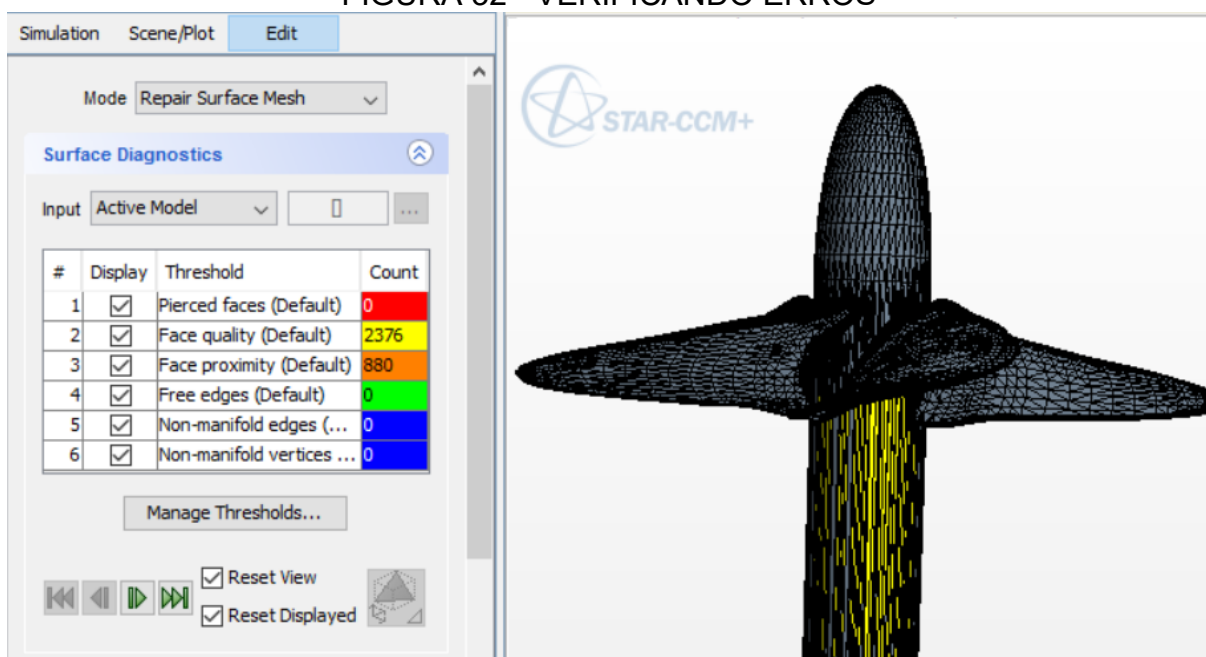


Fonte: Próprio autor

7.2 VERIFICANDO DEFEITOS

A geometria do arquivo *Parassolid* importado para o programa é interpretada por faces e curvas. Para verificar se o desenho 3D do hélice foi interpretado corretamente, verificou-se se o hélice possui algum defeito de modelagem, utilizando a ferramenta “*Repair Surface Mesh*” que é mostrada na figura 32.

FIGURA 32 - VERIFICANDO ERROS



Fonte: Próprio autor

A malha que é apresentada, formada por faces triangulares, gerou-se ao importar o hélice e não é a malha que será utilizada. Portanto, os erros de “*Face quality*” e “*Face proximity*”, não são relevantes por terem mais relação com a qualidade da malha que será usada. No entanto os erros que poderiam prejudicar a simulação não estão presentes no hélice.

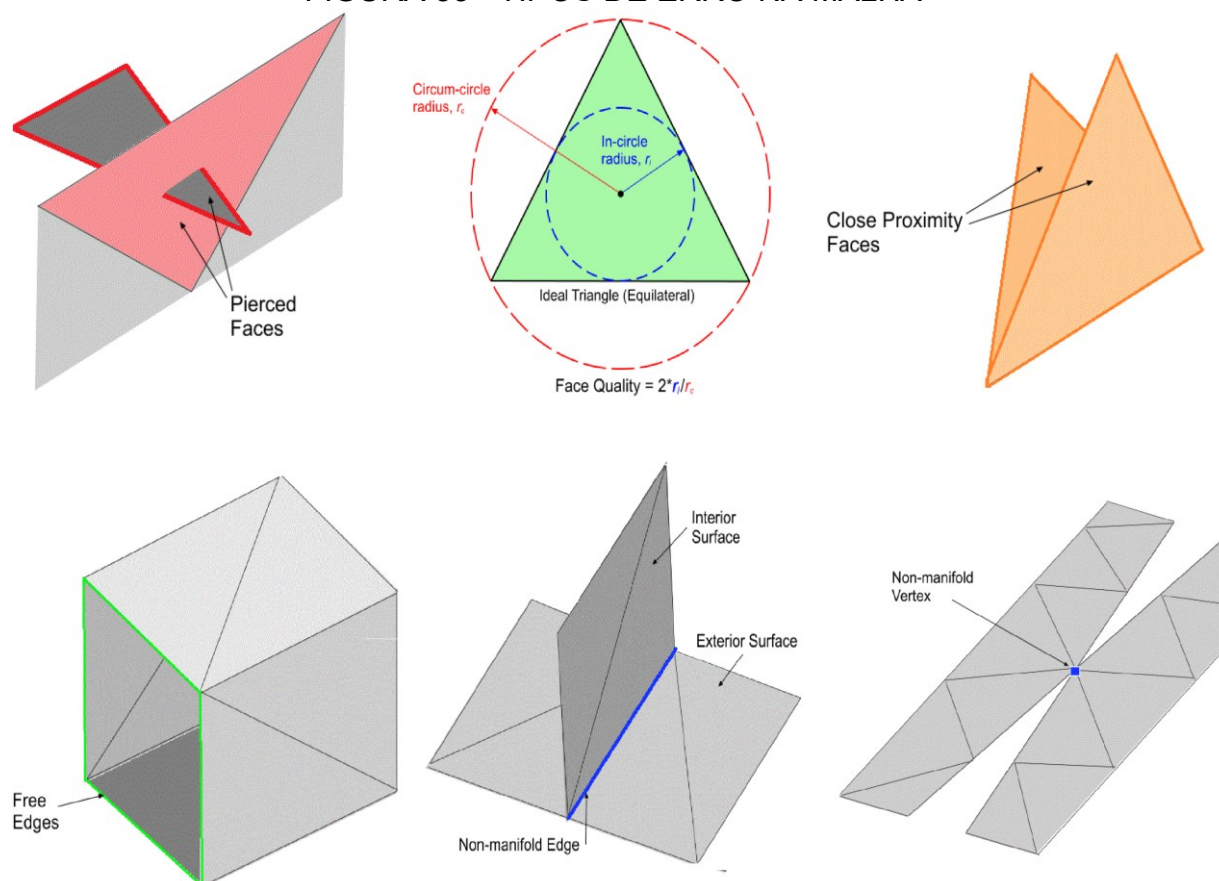
Os tipos de erro que são apontados na figura 32 são exemplificados na figura 33 e são descritos, segundo a *CD-adapco* (2014) na tabela 11.

TABELA 11 - DEFINIÇÃO DOS TIPOS DE ERROS ENCONTRADOS NA MALHA

Erro de malha	Definição
Pierced Faces	Faces que sofrem intersecção de uma ou mais faces
Face Quality	Qualidade da face medida em comparação a um triângulo equilátero
Face Proximity	Proximidade da face é a razão entre a distância entre a face mais próxima e o seu tamanho que não deve ser menor que 0,05
Free Edges	São vértices de uma face que não estão ligados à outra face
Non Manifold Edges	Quando duas ou mais faces compartilham o mesmo vértice
Non Manifold Vertices	Duas ou mais faces ligadas apenas pelo vértice

Fonte: Próprio autor

FIGURA 33 - TIPOS DE ERRO NA MALHA

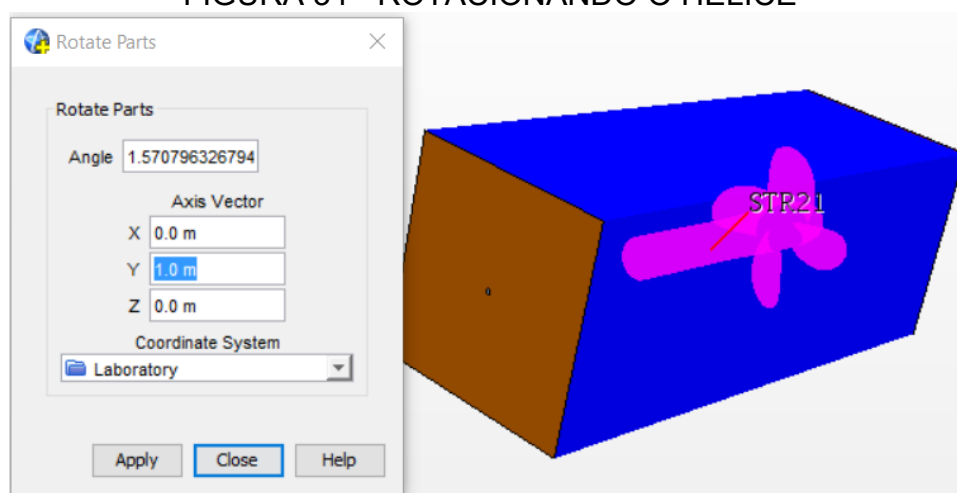


Fonte: CD-adapco (2014) modificado pelo próprio autor

7.3 POSICIONANDO O HÉLICE

Ao importar o hélice notou-se que ele não estava voltado para a mesma direção que o hélice da SVA e, portanto, foi necessário rotacioná-lo 90° em x e 90° em y. Para isso usou-se o comando “*Rotate Parts*” como mostra a figura 34, onde é usado o ângulo em radianos.

FIGURA 34 - ROTACIONANDO O HÉLICE

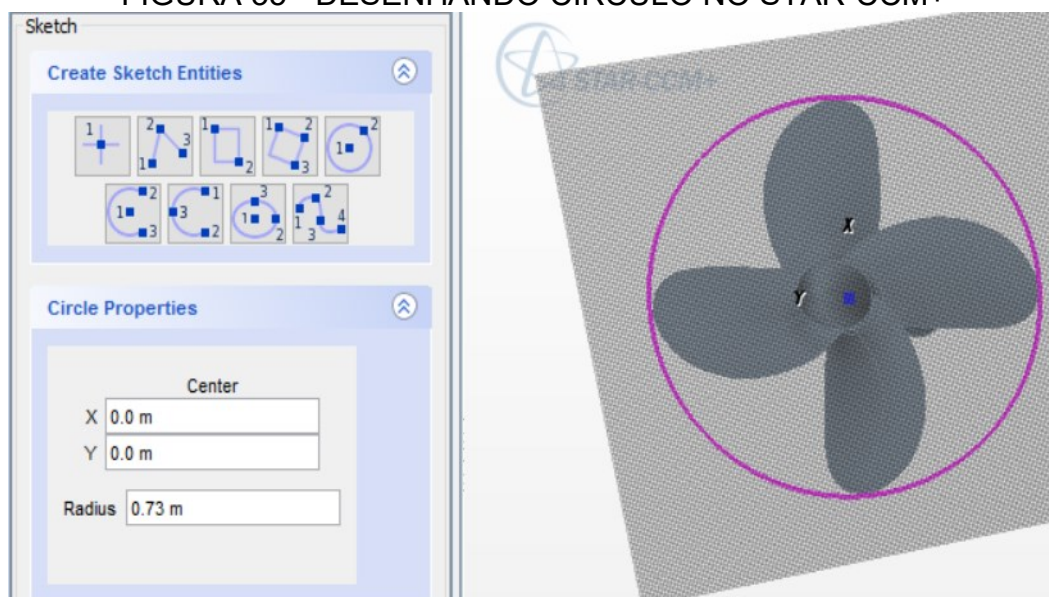


Fonte: Próprio autor

7.4 EDITANDO O HÉLICE COM A FERRAMENTA 3D-CAD DO STAR-CCM+

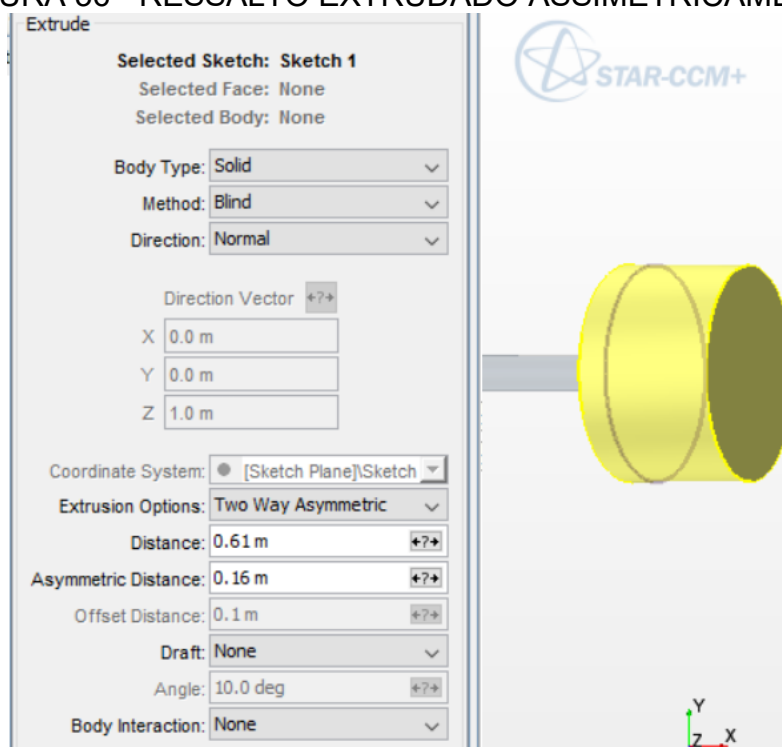
Nesta etapa efetuou-se desenhos com o intuito de definir a região estática e de rotação. Para desenhar a interface entre a região estática e de rotação, um círculo de raio pouco maior que o do hélice foi desenhado no plano YZ como mostrado na figura 35. A seguir foi feito um ressalto extrudado assimetricamente como mostra a figura 36 cobrindo todo o bossô.

FIGURA 35 - DESENHANDO CIRCULO NO STAR-CCM+



Fonte: Próprio autor

FIGURA 36 - RESSALTO EXTRUDADO ASSIMETRICAMENTE

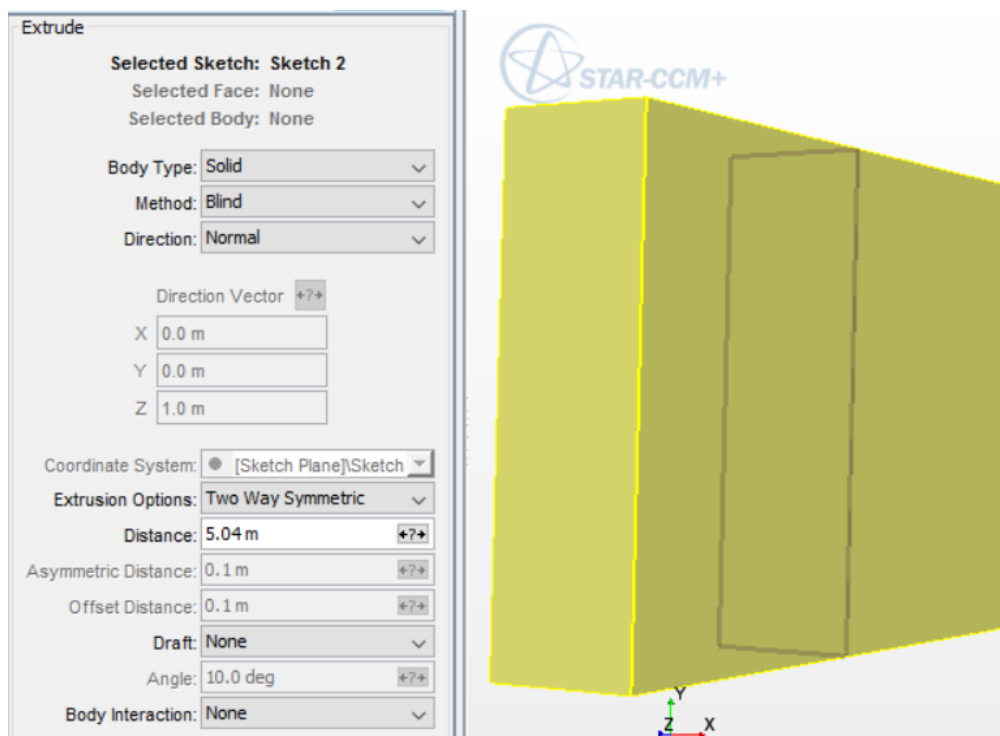


Fonte: Próprio autor

Um retângulo foi desenhado no plano XY com as dimensões do tanque virtual descontando a parte que será estendida por extrusão de malha na entrada e

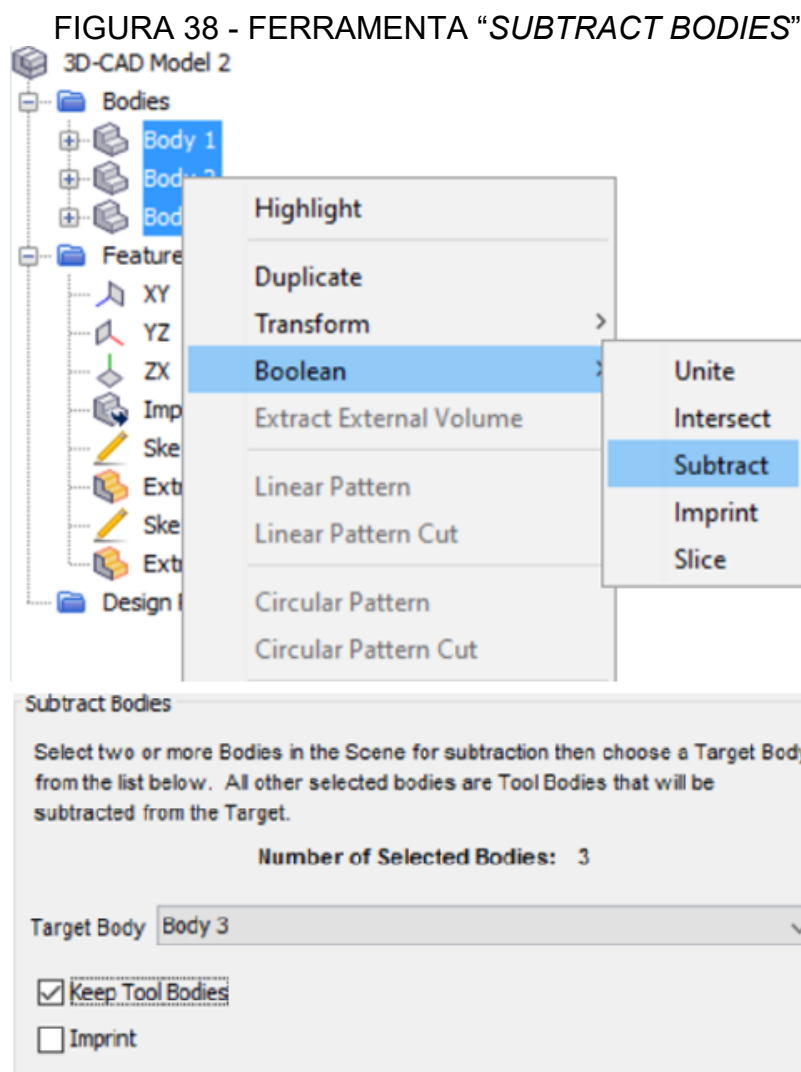
na saída de fluxo. O retângulo criado foi extrudado simetricamente respeitando as dimensões do tanque como pode ser visto na figura 37.

Figura 37 - RESSALTO EXTRUDADO SIMETRICAMENTE



Fonte: Próprio autor

As estruturas criadas são subtraídas para criar os volumes de controle com a ferramenta “Subtract Bodies” apresentada na figura 38 que tem como resultado a formação da região estática. Para formar a região rotacional em que se usou o mesmo processo, mas foi selecionado apenas o hélice e o cilindro criado que é o alvo da subtração.



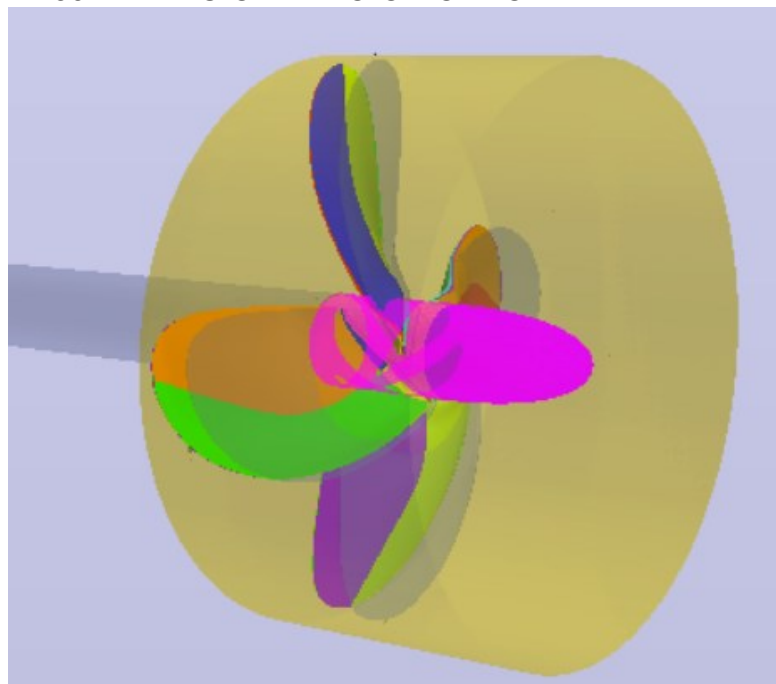
Fonte: Próprio autor

O “*Body 2*” e o “*Body 3*” foram renomeados respectivamente para “*Rotating Region*” e “*Static Region*” e a partir deles foram criados duas “*parts*” através do comando “*New geometry Part*”.

7.5 DIVIDINDO AS SUPERFÍCIES DA REGIÃO ESTÁTICA E DE ROTAÇÃO

Na região de rotação as superfícies foram divididas em bosso (*hub*), pás (*blades*) e interface. As superfícies que compõem a interface já estavam separadas e, portanto, ela só foi renomeada. A ferramenta usada para dividir as superfícies foi o “*Split by Patch*”. Tais superfícies formam o bosso e foram selecionadas para dividir a superfície do hélice como mostra a figura 39. Já as pás do hélice foram formadas com as superfícies que sobraram desta divisão.

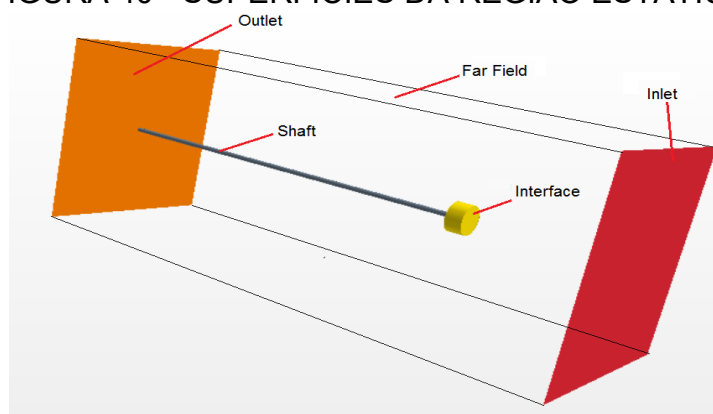
FIGURA 39 - SELECIONANDO O BOSSO EM "SPLIT BY PATCH"



Fonte: Próprio autor

Na região estática, as superfícies que compõe o eixo já estavam separadas e, portanto, só foi necessário renomeá-las para "Shaft". As outras superfícies da região estática foram divididas, usou-se a ferramenta "Split by Patch", em entrada de fluxo (*Inlet*), saída de fluxo (*Outlet*) e as faces que ligam a entrada e a saída de fluxo (*Far Field*). Formou-se a interface com as superfícies que sobraram desta divisão. A figura 40 mostra uma imagem em 3D representando todas as superfícies que compõe a região estática após as divisões efetuadas.

FIGURA 40 - SUPERFÍCIES DA REGIÃO ESTÁTICA



Fonte: Próprio autor

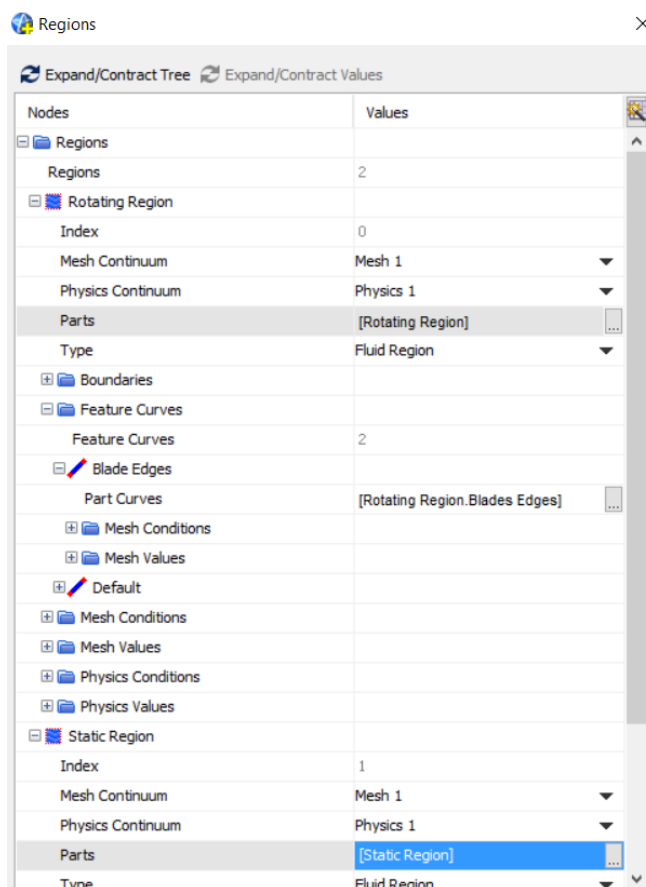
7.6 CRIANDO A INTERFACE ENTRE A REGIÃO ESTÁTICA E DE ROTAÇÃO

As superfícies chamadas de “interface”, presente tanto na região estática, quanto na de rotação, foram selecionadas para criar o contato entre as regiões usando a ferramenta “*create weak in-place contact*”.

7.7 ATUALIZANDO A REGIÃO ESTÁTICA E DE ROTAÇÃO

As regiões foram atualizadas para o novo hélice, alterando “Parts” na região estática e de rotação como mostra a figura 41. Como os nomes das superfícies estavam correspondendo ao do hélice da SVA a parte de “Boundaries” foi alterada automaticamente, porém, a curva que delimita as bordas da pá do hélice foi alterada manualmente em “*Blade Edges – Part Curves*” como, também, mostra a figura 41.

FIGURA 41 - ALTERANDO “PARTS” NA REGIÃO ESTÁTICA E DE ROTAÇÃO



Fonte: Próprio autor

7.8 ALTERANDO A MALHA

Para alterar a malha, três alterações foram necessárias. A primeira foi mudar o valor da base da malha para 50 mm, que foi um número escolhido devido ao diâmetro do hélice da série B ser 5.76 vezes maior que o da SVA.

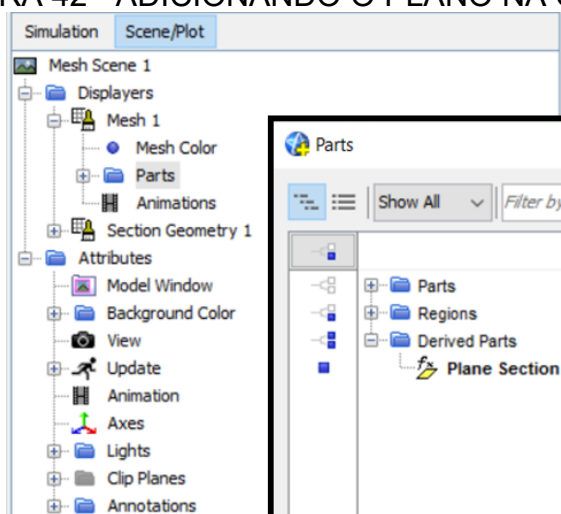
A segunda alteração foi nas dimensões do cilindro que envolve as pás e o bosso, que teve um novo raio de 0.8 m, o qual começou em 0.9 m e terminou em -0.66 m em “x”.

Por último, o valor de extrusão de malha para obter as dimensões corretas do tanque virtual na entrada de fluxo foi mudado para 6 metros e na saída foi mudado para -17 metros em “x”.

7.9 CRIAÇÃO DA CENA COM A MALHA

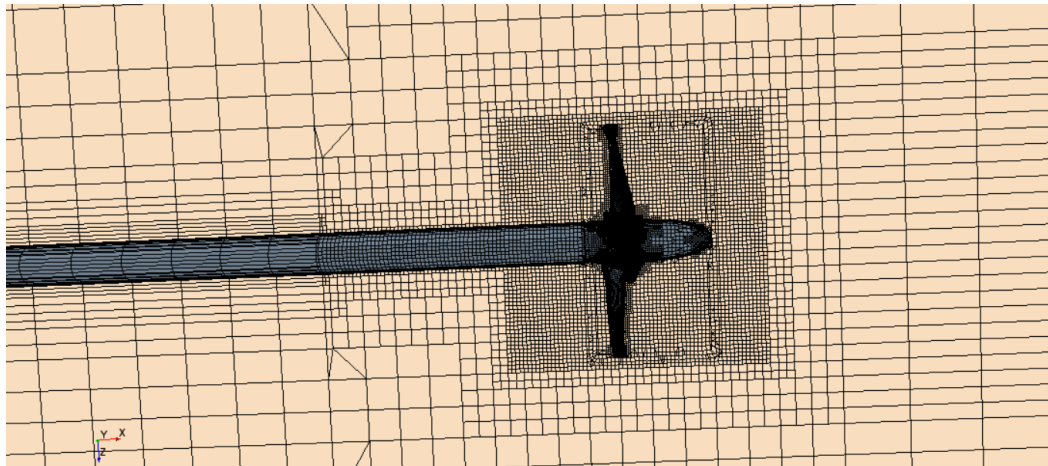
Uma nova cena que mostra a malha foi criada em “*Scenes - New Scene - Mesh*” e um novo plano com origem em zero e com coordenadas [0 m, -1 m, 0 m] foi criado em “*Derived Parts – New Part – Section - Plane*”. O plano criado foi adicionado na cena como mostra a figura 42 e as superfícies que não são necessárias foram escondidas. As pás, o bosso, o eixo e o plano foram mantidos e o resultado pode ser visto na figura 43.

FIGURA 42 - ADICIONANDO O PLANO NA CENA



Fonte: Próprio autor

FIGURA 43 - MALHA DO HÉLICE DA SÉRIE B



Fonte: Próprio autor

7.10 MUDANDO AS CONDIÇÕES DE CONTORNO

Em “Reference Frames” a rotação foi estabelecida em 400 rpm que é a rotação para o qual o hélice foi projetado e os valores das condições de contornos foram alterados para:

$$J = 0.1 + 0.1 * \$i \quad (7.1)$$

$$D = 1.44 \text{ m} \quad (7.2)$$

$$n = 6.66666667 \text{ rps} \quad (7.3)$$

Sendo que o “i” continuou um número inteiro que começa em zero e a cada 500 iterações aumenta em um, fazendo com que J varie conforme a tabela 12. Conseqüentemente, os valores da velocidade de avanço (V_A) variam segundo a tabela 13.

TABELA 12 - Nº DE ITERAÇÕES E COEFICIENTE DE AVANÇO PARA O HÉLICE DA SÉRIE B

Iterações	Coefficiente de avanço (J)
500	0.1
1000	0.2
1500	0.3
2000	0.4
2500	0.5
3000	0.6

Fonte: Próprio autor

TABELA 13 - Nº DE ITERAÇÕES E VELOCIDADE DE AVANÇO PARA O HÉLICE DA SÉRIE B

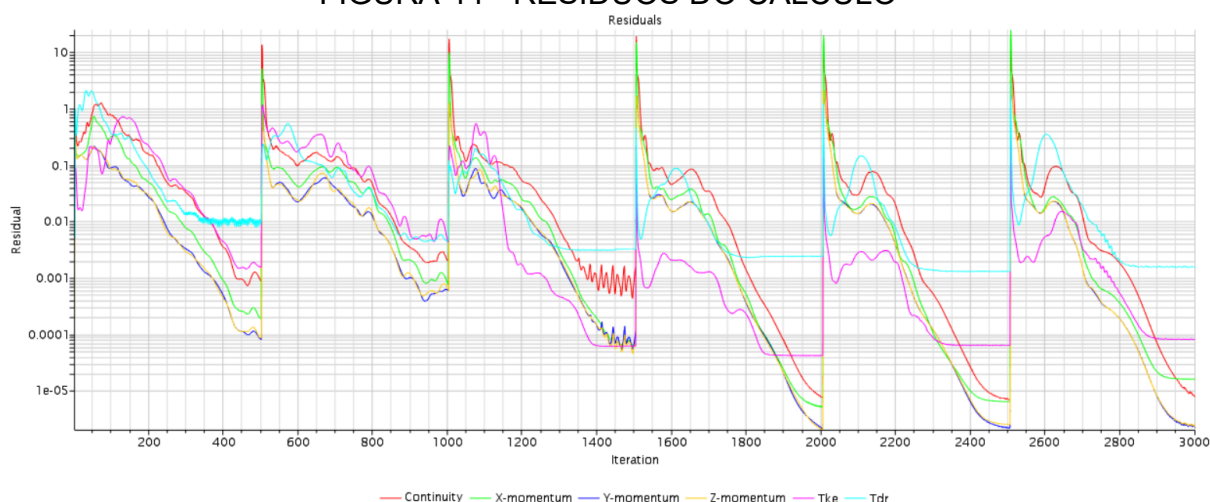
Iterações	Velocidade de avanço (V_A) [$m. rad/s$]
500	1.92π
1000	3.84π
1500	5.76π
2000	7.68π
2500	9.6π
3000	11.52π

Fonte: Próprio autor

7.11 EXECUTANDO A SIMULAÇÃO

A simulação utilizou 3000 iterações e os resíduos do cálculo podem ser vistos na figura 44.

FIGURA 44 - RESÍDUOS DO CÁLCULO



Fonte: Próprio autor

Foi feito um teste para 1000 iterações por valor de coeficiente de avanço (J) e os valores de $10KQ$, KT e η_0 só estavam diferentes a partir da sexta casa decimal, provando que com 500 iterações a simulação já estabilizou.

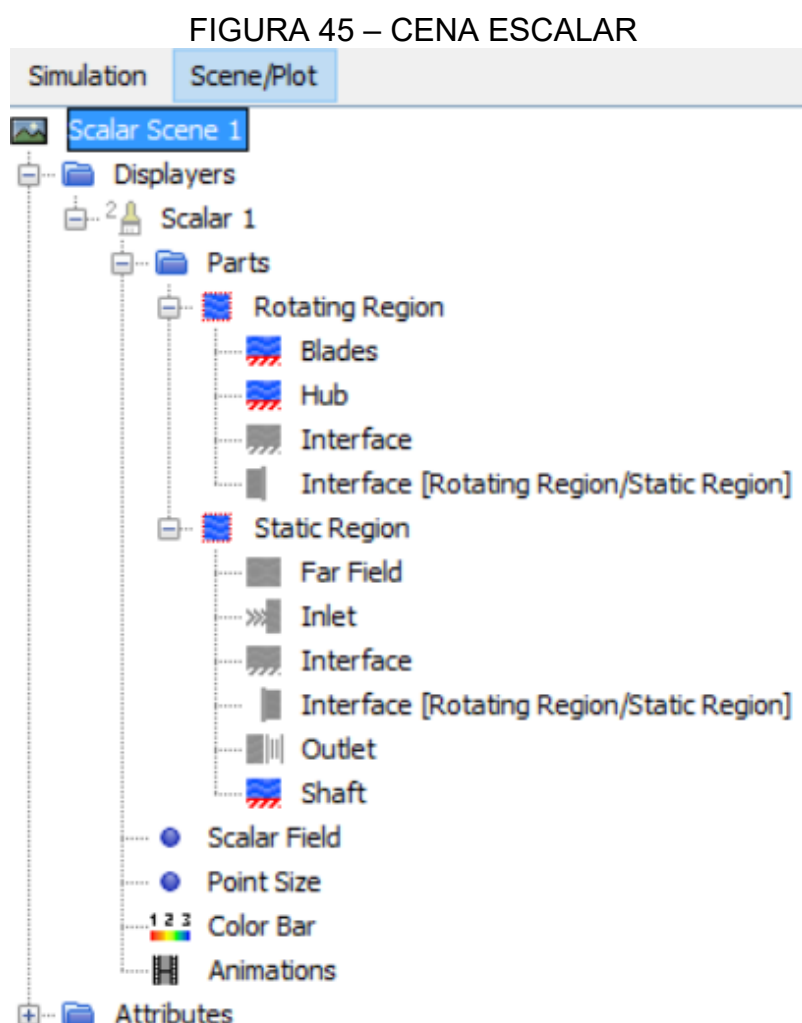
Outro teste também foi feito para verificar se a simulação estava estabilizada: mudou-se o valor base da malha para 40 mm e os valores de $10KQ$, KT e η_0 não chegaram nem à 1% de diferença com os valores calculados com um valor base de 50 mm que é 20% maior. Diminuir o valor da base melhorou os resultados, porém isso teve um custo computacional mais elevado fazendo com que a

simulação demorasse mais tempo e, portanto, para as próximas simulações esta mudança não foi usada.

7.12 PÓS-PROCESSAMENTO

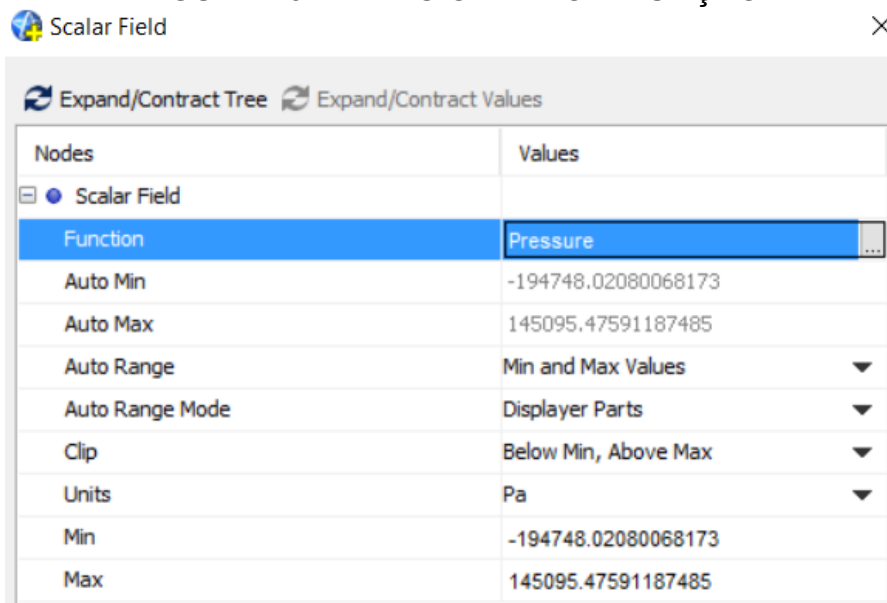
Para comparar os hélices será calculado a pressão mínima de cada hélice e para isso foi criado uma cena escalar em “*Scenes - New Scene -Scalar*”, e para exibição foram selecionados as pás, o bosso e o eixo dentro das regiões como mostra a figura 45.

Na figura 46, pode ser visto que a pressão mínima para o hélice da série B com 0.4 de coeficiente de avanço (J) é de -194.7 kPa. Para visualizá-la foi necessário selecionar “*Scalar Field*” e alterar a função para “*Pressure*”.



Fonte: Próprio autor

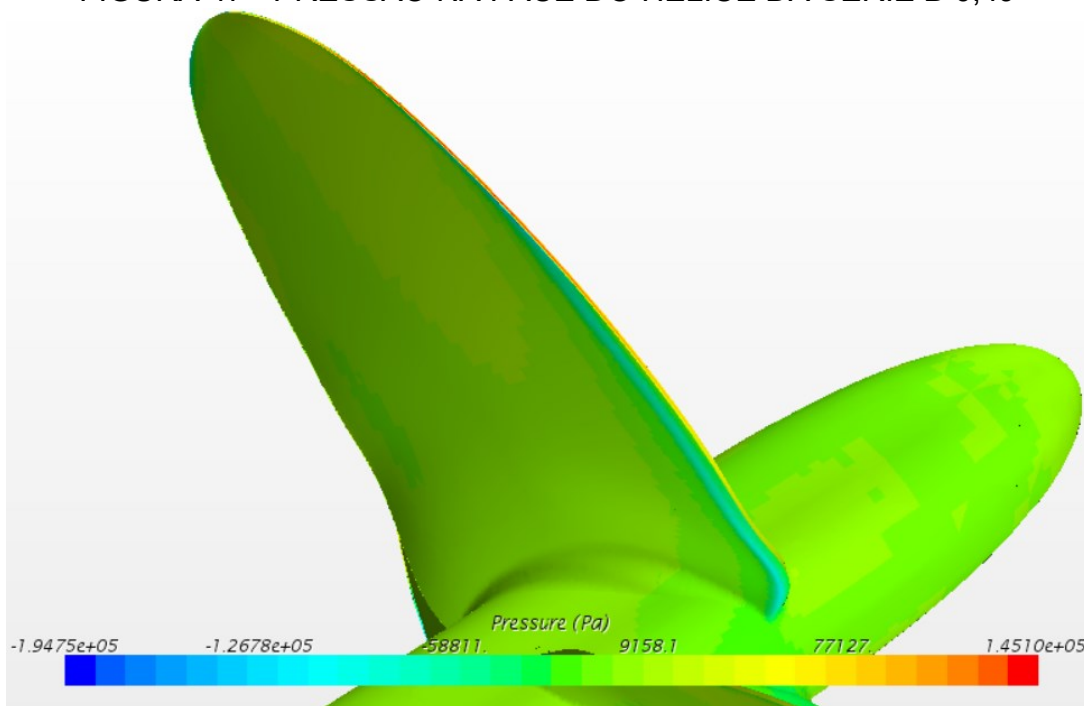
FIGURA 46 - SELECIONANDO A FUNÇÃO



Fonte: Próprio autor

Na figura 47 é mostrado o resultado de pressão na face de uma das pás do hélice quando o coeficiente de avanço (J) é 0.4.

FIGURA 47 - PRESSÃO NA FACE DO HÉLICE DA SÉRIE B 0,4J

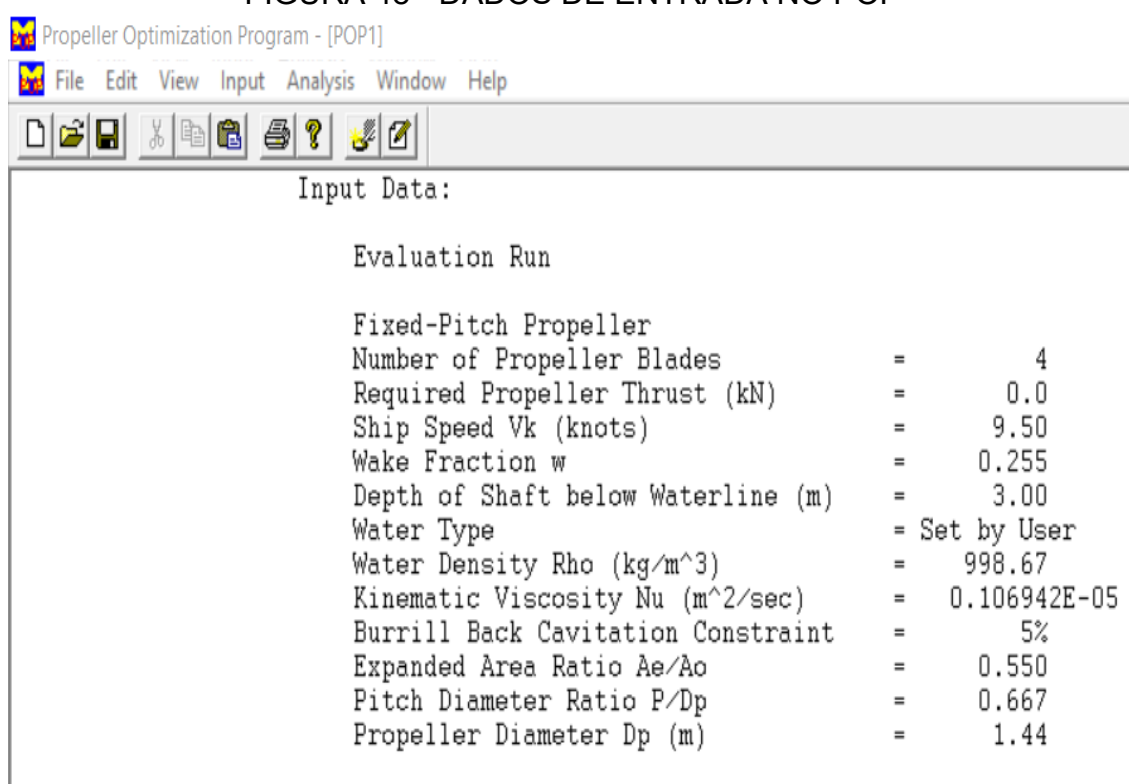


Fonte: Próprio autor

7.13 PLOTANDO OS DADOS DO HÉLICE

Para poder comparar os resultados obtidos na simulação, é necessário obter o gráfico com os dados da série sistemática de *Wageningen* e para isso usou-se o POP (*Propeller Optimization Program*). Esse é um programa desenvolvido por LI (1997), no qual o desempenho de um hélice da série B é calculado por meio dos parâmetros que descrevem a geometria do propulsor. Os dados de entrada da geometria analisada são apresentados na Figura 48.

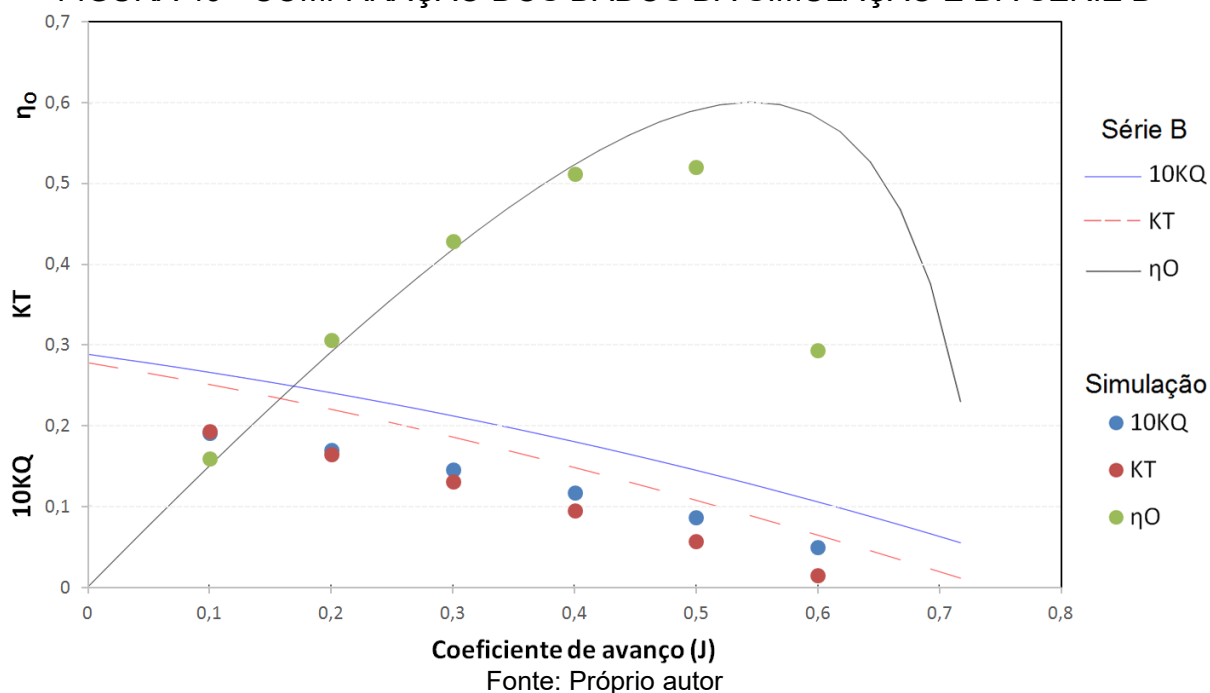
FIGURA 48 - DADOS DE ENTRADA NO POP



Fonte: Próprio autor

Os monitores de J , $10KQ$, KT e η_o foram exportados e salvos como um arquivo "*.csv", e plotados no Excel dentro do gráfico gerado no POP, como pode ser visto na figura 49. A série B utiliza um caimento padrão de 15° , portanto os valores dos coeficientes foram tirados da simulação do hélice com 15° de caimento que seguiu os mesmos passos para realizar a simulação apresentados neste capítulo.

FIGURA 49 - COMPARAÇÃO DOS DADOS DA SIMULAÇÃO E DA SÉRIE B



O erro foi calculado e é mostrado na tabela 14. Nota-se na tabela que, assim como no exemplo do erro calculado na tabela 10, à medida que o valor do coeficiente de avanço (J) aumenta os valores de 10KQ, KT e η_0 vão diminuindo em relação aos dados experimentais.

TABELA 14 - ERRO DE KT, 10KQ E η_0 PARA O HÉLICE DA SÉRIE B

J	Erro no KT	Erro no KQ	Erro η_0
0.1	-23.01%	-27.86%	6.09%
0.2	-25.31%	-28.78%	4.76%
0.3	-29.18%	-31.41%	2.40%
0.4	-35.19%	-34.15%	-2.19%
0.5	-46.78%	-39.93%	-11.85%
0.6	-75.83%	-52.47%	-49.56%

Fonte: Próprio autor

Os erros obtidos na tabela 14 possuem uma média de valores superior aos erros encontrados na tabela 10. Entretanto, a principal fonte de erros pode ser o próprio método que não é preciso. Isso pode ser devido a erros da instabilidade da resposta devido ao número de iterações feitos e/ou o erro devido à convergência do resultado que é obtida ao refinar a malha.

Mesmo utilizando um método com mais precisão agregando elevado custo computacional, pode ser que o erro esteja mais relacionado ao desenho 3D, e não representar exatamente o hélice da série B. A diferença pode estar na geometria do bosso que não é especificada pela série, na curvatura entre os perfis principalmente na ponta da pá ou no contato entre o bosso e a raiz da pá que teve que ser feita criando um perfil adicional.

Outro ponto importante para ser observado, é que a tabela apresenta o maior erro quando o valor do coeficiente de avanço (J) é 0.6. Que é um ponto de descendência da curva de eficiência do hélice em águas abertas (η_o) que, normalmente, é evitado como ponto de operação do propulsor. Se este ponto for desconsiderado, a média de erros do hélice diminui sendo menor que a média de erros da eficiência em águas abertas do hélice do tutorial o qual foi analisado no capítulo anterior.

8 ANÁLISE DO ÂNGULO DE CAIMENTO NO DESEMPENHO DE UM HÉLICE DA SÉRIE B

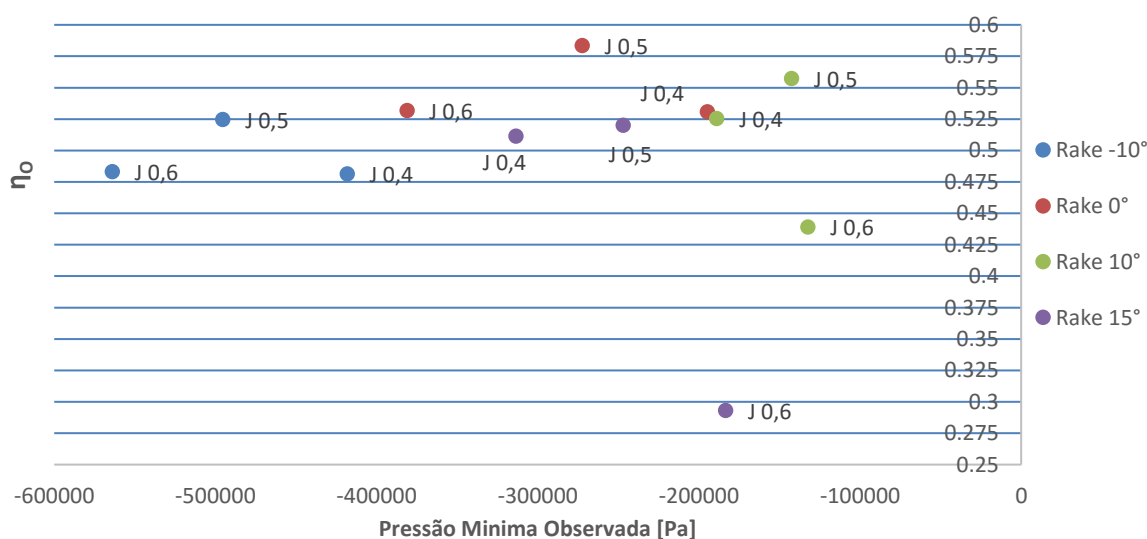
Neste capítulo é apresentada a principal contribuição deste trabalho, que é a análise paramétrica da influência do ângulo de caimento no desempenho de um hélice da série B.

A simulação de cada hélice estudada seguiu os mesmos passos e considerações da análise apresentada no capítulo anterior. Para facilitar o processo de simulação para os hélices de ângulo de caimento 15° , 10° e -10° foi usado o arquivo de simulação feito para o hélice de ângulo de caimento 0° , com isso não foi necessário alternar novamente a malha e nem as condições de contorno, visto que todas as curvas e superfícies tem o mesmo nome em cada um dos 4 modelos analisados.

Com o intuito de fazer a comparação entre os hélices, fez-se a simulação para os valores de coeficiente de avanço (J) próximos ao ponto de eficiência máxima e, para cada valor de J, foi determinada a pressão mínima observada ao longo do escoamento e o campo de pressão de cada hélice encontrasse no apêndice A.

O valor da pressão mínima representando a queda de pressão e a eficiência do hélice em águas abertas em cada um dos hélices analisados é mostrada na figura 50.

FIGURA 50 - GRÁFICO COM O NÍVEL DE PRESSÃO E EFICIÊNCIA EM ÁGUAS ABERTAS



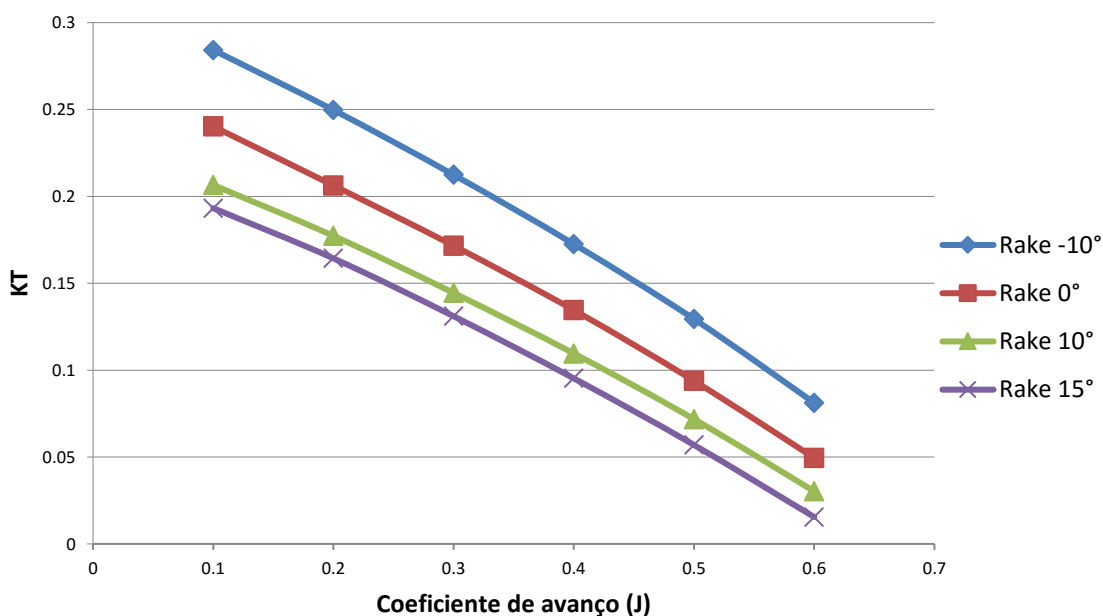
Fonte: Próprio autor

Se o objetivo do projeto é obter um hélice de máxima eficiência e mínima queda de pressão (maior valor de pressão observada), a partir da análise do gráfico da figura 50, pode se notar que para cada ponto de operação (J) a escolha do “melhor” hélice ficaria entre o hélice com ângulo de caimento de 0° (que tem uma maior eficiência (η_0)) e o hélice com ângulo de caimento de 10° (que apresenta menor queda de pressão).

Nota-se que para nenhum valor de coeficiente de avanço J o hélice com ângulo de caimento negativo apresentou melhor desempenho, justificando o porquê este tipo de geometria não é usualmente utilizada em embarcações.

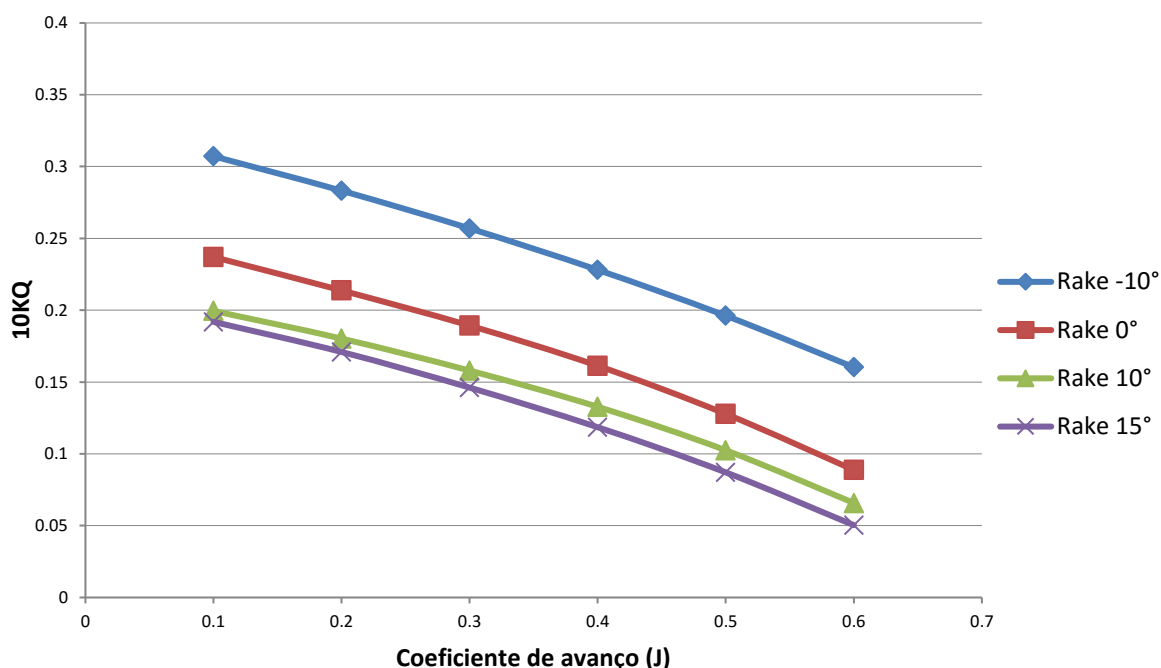
No entanto, observando as curvas de coeficiente de empuxo (KT) e de coeficiente de torque (KQ), figuras 51 e 52, observa-se que a utilização de ângulos de caimento negativos provoca maiores valores em ambos os coeficientes.

FIGURA 51 - GRÁFICO DO COEFICIENTE DE EMPUXO (KT)



Fonte: Próprio autor

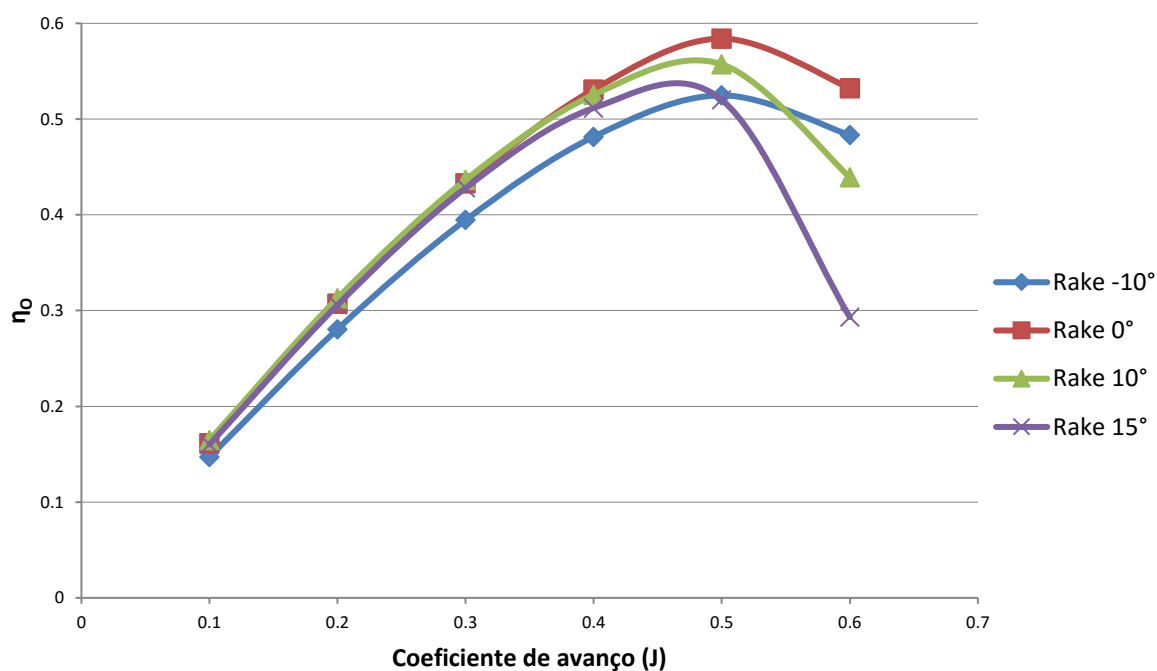
FIGURA 52 - GRÁFICO DO COEFICIENTE DE TORQUE (KQ)



Fonte: Próprio autor

Por fim, na figura 53 são apresentadas as curvas de eficiência dos 4 hélices analisados. Observa-se que os pontos fora da região de máxima eficiência apresentaram maiores eficiências para o hélice com ângulo de caimento de 10°. No entanto, esse comportamento se inverte e, na região de máxima eficiência, passa a ter uma eficiência menor que o hélice com ângulo de caimento de 0°.

Também pode se observar na figura 53 que o hélice com caimento de 15° teve uma menor eficiência em águas abertas em todos os pontos de operação quando comparado com os hélices com caimento 0° e 10°. Quanto ao hélice com caimento negativo, ele apresentou a menor eficiência nos primeiros pontos de operação, porém quando o coeficiente de avanço ficou em 0.5 apresentou uma eficiência maior que o hélice com 15° de caimento e quando o coeficiente de avanço ficou em 0.6 teve uma eficiência maior que os hélices com 10° e 15° de caimento.

FIGURA 53 - GRÁFICO DA EFICIÊNCIA DO HÉLICE EM ÁGUAS ABERTAS (η_o)

Fonte: Próprio autor

Algo interessante que também pode ser observado no gráfico da figura 50 é que à medida que o coeficiente de avanço (J) aumenta a queda de pressão também aumenta para os hélices com ângulo de caimento de 0° e -10° . Porém para os hélices com ângulo de 10° e 15° ocorre o comportamento inverso.

Ao escolher um hélice com o ângulo de caimento positivo deve-se tomar cuidado com outro parâmetro, que não está sendo analisado neste trabalho, que é a eficiência à ré, porque segundo Padovezi (1997), os hélices com esta assimetria apresentam eficiência em operações à ré muito menores que a eficiência avante quando comparados com hélice sem caimento. Portanto aumentar o caimento não é recomendado para embarcações que exijam operações a ré.

9 CONCLUSÃO

Apresentou-se neste trabalho um procedimento para análise computacional de hélices usando o método CFD. A partir do procedimento proposto, foi realizado um estudo da influência do ângulo de caimento no desempenho de um propulsor da série B, cujas conclusões são apresentadas a seguir.

O caimento ajuda a aumentar a distância entre as pás e o casco. Este distanciamento pode contribuir com a diminuição da vibração no hélice a qual pode eventualmente reduzir a emissão de ruído. Portanto, para trabalhos futuros, seria interessante analisar o hélice em conjunto com o casco realizando a autopropulsão, tornando a análise mais precisa ao adicionar mais parâmetros que podem influenciar a geração de ruídos.

O aumento da distância entre as pás e o casco também contribui com a possibilidade de utilizar hélices com maior diâmetro segundo Padovezi (1997). Neste trabalho um dos objetivos foi manter todos os parâmetros constantes e alterar apenas o ângulo de caimento, porém em trabalhos futuros seria importante comparar um hélice sem caimento com outro com caimento que mesmo inclinado teria o mesmo diâmetro do hélice com ângulo de caimento de 0° .

Este novo hélice com caimento e maior diâmetro poderia ter uma maior eficiência avante e uma menor queda de pressão quando comparado com o sem caimento. Porém, o hélice com maior ângulo de caimento, provavelmente, continuará tendo uma menor eficiência em operações à ré e, vale lembrar, que segundo Padovezi (1997) o aumento do diâmetro irá gerar maiores esforços estruturais obrigando a adoção de maiores espessuras nas raízes das pás, o que irá influenciar os resultados.

Neste trabalho foi decidido seguir uma abordagem de redução de ruído diferente das alternativas propostas por Chekab et al. (2013), analisando a influência do ângulo de caimento na queda de pressão ao longo do escoamento. Porém, para trabalhos futuros pretende-se seguir a abordagem do autor e analisar com CFD os diferentes métodos investigados por ele de redução de ruído, principalmente o número de pás e o *skew*.

Outro parametro que pode ser estudado, em futuros trabalhos, é a utilização de dutos (na polpa ou cobrindo o hélice) que segundo Chekab et al. (2013) é um

método de fácil implementação que reduz o ruído irradiado e aumenta a eficiência do hélice, tornando-se a melhor escolha para embarcações já construídas.

Com os resultados obtidos na simulação, é possível afirmar que adicionar um ângulo de caimento positivo gerou uma redução da queda de pressão do hélice da série B estudado, o que reduz a incidência de cavitação e, por consequência, eventualmente, diminui a emissão de ruídos gerados pelo hélice. Porém isso tem como consequência a redução da eficiência do hélice em águas abertas, quando comparado ao hélice com 0° de caimento, e isso faz com que este parâmetro seja menos vantajoso para ser alterado, se comparado com os outros métodos apresentados por Chekab et al. (2013).

REFERÊNCIAS

ALHO, A. T. P. **Development of a CFD model for Simulation of self-propulsion tests.** In: **ESSS CONFERENCE & ANSYS USERS MEETING.** Atibaia, São Paulo, 23 a 25 de Abril de 2013. Disponível em < http://www.esss.com.br/events/ansys2013/brazil/pdf/24_5_1600.pdf>. Acessado em: 18.jun.2015.

ALVES F.; Avelino. **Elementos finitos: A base da tecnologia CAE.** São Paulo: Érica, 2007, 5. ed.

AUTODESK. **AUTODESK NASTRAN IN-CAD 2016.** Disponível em: < <http://help.autodesk.com/view/NINCAD/2016/ENU/?guid=GUID-2CB5E408-C795-41EE-9F83-B311BFD99FB0>>. Acessado em: 20.junho.2016

BERNITSAS, M., RAY e KINLEY D. P. **Kt, Kq and efficiency curves for the Wageningen B-series propellers.** Technical report, Department of Naval Architecture and Marine Engineering College, The University of Michigan, Ann Arbor (1981)

BRUEL & KJAER. **Keeping Quiet About DCNS.** 2009. Disponível em: < <http://www.bksv.com/NewsEvents/Waves/Articles/Older/keeping-quiet-about-dcns> >. Acessado em: 11.maio.2015

CD-adapco, Computational Dynamics-Analysis & Design Application Company Ltd. **Guia do usuário STAR-CCM+**, versão 9.06 (2014), "Moving Reference Frames: Marine Propeller in Open Water". Estados Unidos da América, 2014.

CHEKAB, M. A. F. et al. **Investigation of Different Methods of Noise Reduction for Submerged Marine Propellers and Their Classification.** American Journal of Mechanical Engineering. v.1, n. 2, p. 34 - 42, 2013.

GALANTE, A. **Ah, os hélices.** 2009. Disponível em: < <http://www.naval.com.br/blog/2009/06/29/ah-os-helices/>>. Acessado em: 09/05/2015.

GERR, D. **Propeller Handbook.** International Marine Publishing, 2001.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GONÇALVES, N. D. F. **Método dos volumes finitos em malhas não estruturadas.** Dissertação (Mestrado). Universidade do Porto, Faculdade de Ciências, Departamento de Matemática Aplicada/Departamento de Matemática Pura, Porto, Portugal. 2007.

LEWIS, J. **China's Noisy New Boomer.** In: **Arms Control Wonk.** 24.nov.2009. Disponível em: < <http://lewis.armscontrolwonk.com/archive/2544/chinas-noisy-new-boomer> >. Acessado em: 11.maio.2015

LEWIS, J. **HOW CAPABLE IS THE 094?** 31.jul.2007. Disponível em: <<http://www.armscontrolwonk.com/archive/201579/how-capable-is-the-094-23/>>. Acessado em: 11.maio.2015

LI, J. T. **POP (Propeller Optimization Program) Interface 1.0 – Visual C++**. Universidade de Michigan, Department of Naval Architecture and Marine Engineering. 1997.

LOPES, F. A. C. **Estimativa de Propriedades Mecânicas e Análise Estrutural Via Método de Elementos Finitos de Hélices Navais Produzidas na Amazônia**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade Federal do Pará, Centro tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica, Pará, Brasil. 2003.

MULCAHY, M. L. et al. N. **Optimisation applied to composite marine propeller noise. INTER-NOISE and NOISE-COM**. In: Congress and Conference Proceedings. Institute of Noise Control Engineering. Anais... v. 249, n. 3, pp. 4012-4019, Melbourne, Australia, oct. 2014.

OOSTERVELD, M. W. C. e OOSANEM, P. V. “**Further Computer-Analyzed Data of the Wageningen B-Screw Series**”, IV International Symposium on Ship Automation, Genova, Italia, Nov, 1974.

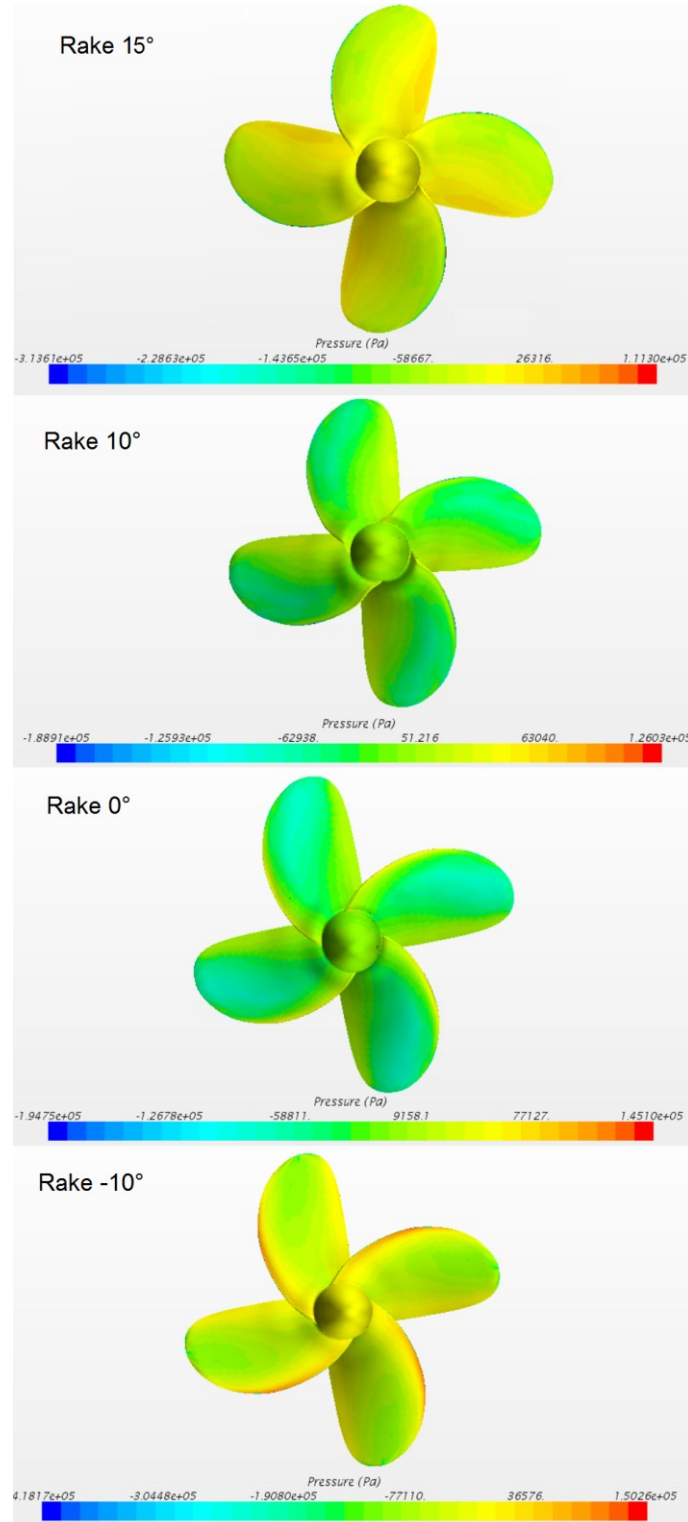
PADOVEZI, C. **Aplicação de resultados de escala real no projeto de hélices de embarcações fluviais**. 87 f. 1997. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 1997.

SVA, Schiffbau-Versuchsanstalt Potsdam. **Potsdam Propeller Test Case Materials (PPTC) VP1304**. Disponível em: <http://www.sva-potsdam.de/pptc_data.html#geometry>. Acessado em: 07/06/2016.

University of Sydney, Aerospace, Mechanical & Mechatronic Eng. **Froude's Propeller Theory**. Disponível em: <http://www-mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/aerothermal_dvd_only/aero/fprops/cvanalysis/>. Acessado em: 20.junho.2016

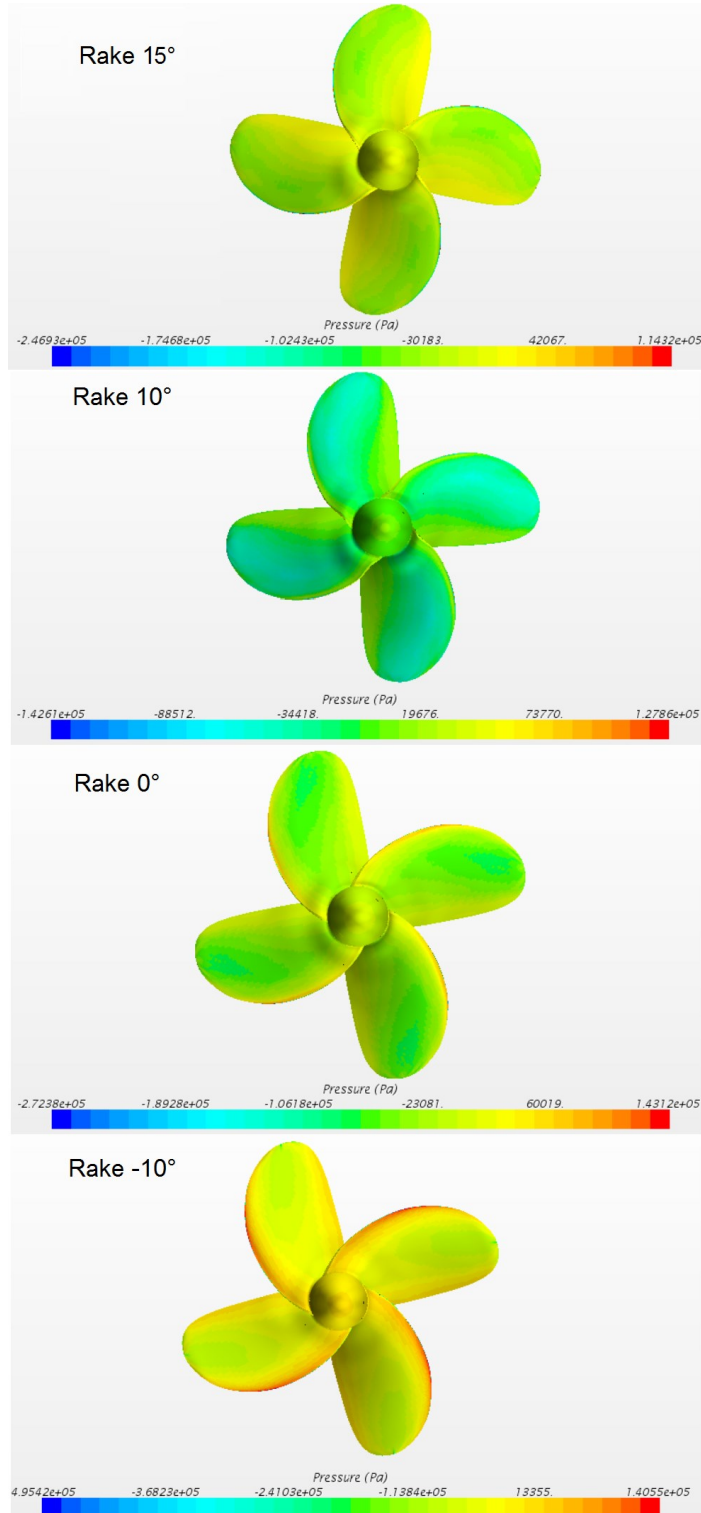
APÊNDICE A – RESULTADO DO CAMPO DE PRESSÃO NO DORSO

FIGURA 54 - CAMPO DE PRESSÃO NO DORSO PARA $J=0.4$



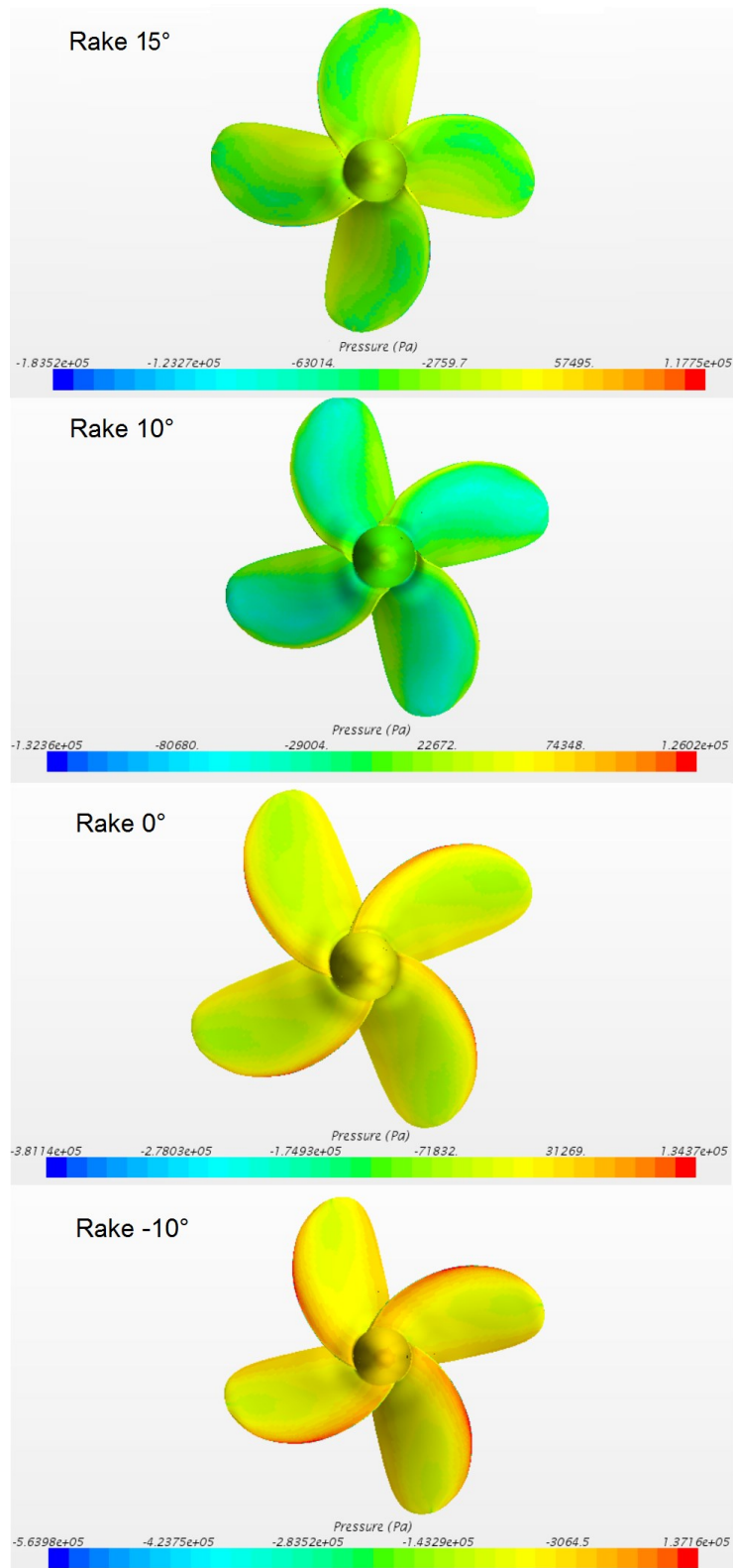
Fonte: Próprio autor

FIGURA 55 - CAMPO DE PRESSÃO NO DORSO PARA J=0.5



Fonte: Próprio autor

FIGURA 56 - CAMPO DE PRESSÃO NO DORSO PARA J=0.6



Fonte: Próprio autor