

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

WESLEY GIOVANELLA BENTO

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO SISTEMA PROPULSOR APLICADO A UM MODELO  
DE UM REBOCADOR EM ESCALA REDUZIDA

Joinville

2017

WESLEY GIOVANELLA BENTO

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO SISTEMA PROPULSOR APLICADO A UM MODELO  
DE UM REBOCADOR EM ESCALA REDUZIDA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Dr. Eng. Lucas Weihmann

Joinville

2017

WESLEY GIOVANELLA BENTO

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO SISTEMA PROPULSOR APLICADO A UM MODELO  
DE UM REBOCADOR EM ESCALA REDUZIDA

Esta Monografia foi julgada e aprovada como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Naval pela comissão examinadora pelo curso de graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville, 29 de novembro de 2017.

Banca Examinadora:

---

Dr. Eng. Lucas Weihmann  
Presidente / Orientador

---

Dr. Eng. Tiago Vieira da Cunha  
Membro

---

Dr. Eng. Ricardo Aurélio Quinhões Pinto  
Membro

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a oportunidade de cursar um curso de Engenharia Naval em uma das melhores universidades do país, embora esses anos de formação acadêmica tenham sido extremamente difíceis.

Agradeço ao apoio psicológico de motivação da minha família, minha mãe, minha vó, meus tios, meu pai que inclusive me auxiliou na realização dos ensaios presentes aqui nesta monografia. Agradecimento especial a minha esposa, que sempre esteve ao meu lado me motivando a sempre estudar um pouco mais.

Agradeço aos meus colegas de classe pelos grupos de estudo, que sempre solucionavam aquelas dúvidas inquietantes.

Agradeço ao meu orientador que me guiou no decorrer deste trabalho e a todo o corpo docente que contribuíram para a minha formação acadêmica, em especial a cinco professores que considero excelentes no ramo acadêmico.

## RESUMO

O hélice é um dos mecanismos mais utilizados para transferir potência mecânica em empuxo propulsivo. Por essa razão, o correto dimensionamento do hélice utilizado na embarcação impacta fortemente no desempenho do sistema propulsivo. Para auxiliar nesse dimensionamento, existem séries de hélices bem estabelecidas e com características distintas para cada tipo de aplicação, sendo a mais conhecida a Série B-Troost de Wageningen, destinada aos hélices de navios mercantes. Nesta monografia, foi realizado o dimensionamento do hélice pela Série-B para um modelo em escala reduzida de um rebocador utilizado na competição DUNA, considerando a geometria do casco e a potência do motor utilizado. Posteriormente, realizou-se a construção e testes em tanques de provas simplificados, comparando dados de desempenho como empuxo, cavitação e velocidades obtidos com o hélice projetado e outro hélice comercial, amplamente utilizado em modelos de embarcações. Como o esperado, os testes comprovam o embasamento teórico e a superioridade no desempenho do hélice projetado para cada situação.

**Palavras-chave: Hélice. Cavitação. Empuxo. Bollard Pull.**

## **ABSTRACT**

The propeller is one of the mechanisms most used to transfer mechanical power in propulsive thrust. For this reason, the correct dimensioning of the propeller used in the vessel, has a strong impact on the performance of the propulsive system. To assist in this design, there are well-established series of propellers with different characteristics for each type of application, the best known being the Wageningen B-Series, intended for propellers of merchant ships. In this monograph, the design of the propeller was carried out by the B-Series for a small scale model of a tug used in the DUNA competition, considering the hull geometry and the engine power used. Subsequently, the construction and tests were carried out in simplified test tanks, comparing performance data such as thrust, cavitation and speeds obtained with the projected propeller and other commercial propeller, widely used in boat models. As expected, the tests prove the theoretical basis and superiority in propeller performance designed for each situation.

**Keyword: Propeller. Cavitation. Bollard Pull. Thrust.**

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Rebocador de propulsão convencional de 2 hélices. ....	16
Figura 2 - Rebocador de propulsão azimutal de 2 hélices.....	17
Figura 3 - Rebocador de Propulsão Voit Schneider. ....	18
Figura 4 - Ensaio de bollard pull real.....	19
Figura 5 - Representação dos parametros do hélice. ....	20
Figura 6 - Diferença de pressão em um perfil.....	21
Figura 7 - Passo do hélice. ....	22
Figura 8 - Aspecto geométrico das pás da Série B-Troost.....	25
Figura 9 - Diagrama de águas abertas Série B-Troost.....	27
Figura 10 - Tipos de cavitação, (a) cavitação tipo bolsa, (b) cavitação tipo bolha, (c) cavitação tipo vórtice do eixo e (d) cavitação de vórtice de extremidade da pá.....	28
Figura 11 - Exemplo de cavitação de vórtice entre o hélice e o casco.....	28
Figura 12 - Diagrama de Burrill.....	31
Figura 13 - Erosão da superfície das pás do hélice. ....	32
Figura 14 - Modelagem do casco.....	34
Figura 15 - Distância utilizada entre o hélice e o casco.....	36
Figura 16 - Curvas da pá gerados pelo comando de Splines.....	41
Figura 17 - Resultado final da geometria do hélice.....	41
Figura 18 - Hélices impressas em 3D.....	42
Figura 19 - Material cortado (esquerda) e proceso de conformação (direita). ....	43
Figura 20 - Processo de brasagem (esquerda) e suavização de cantos vivos (direita). ....	43
Figura 21 - Helices finalizadas (esquerda) e montagem na embarcação (direita).....	44
Figura 22 - Hélices comerciais utilizadas pela equipe. ....	45
Figura 23 - Ensaio de <i>bollard pull</i> . ....	48
Figura 24 - Desenho esquemático do percurso no ensaio de velocidade. ....	51
Figura 25 - Diagrama de rotação e torque do motor CC em série.....	55
Figura 26 - Diagrama de Burrill para o hélice projetado em escala reduzida. ....	56
Figura 27 - Ensaio de cavitação do Hélice 80mm.....	57
Figura 28 - Ocorrência de cavitação no Hélice 80mm.....	57
Figura 29 - Verificação da cavitação de vórtice entre o hélice e o casco.....	58
Figura 30 - Ensaio de Cavitação no Hélice 47mm.....	58
Figura 31 - Deslocamento vertical na extremidade do eixo.....	59
Figura 32 - Formação de ondas transversais pelo casco. ....	63
Figura 33 - Esteira de Kelvin em águas profundas. ....	63

Figura 34 - Gráfico de Wigley. ....	64
Figura 35 - Interação onda e casco com $F_n = 0,53$ .....	64

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva de potência do motor utilizado na competição.....	35
Gráfico 2 - Diagrama em águas abertas hélice B 3-100.....	38
Gráfico 3 - Diagrama de Burrill para o hélice selecionado.....	39
Gráfico 4 - Dados de rotação e empuxo do Hélice 80mm. ....	52
Gráfico 5 - Dados de rotação e empuxo do Hélice 47mm. ....	53
Gráfico 6 - Comparação de empuxo entre os hélices.....	54
Gráfico 7 - Velocidade da embarcação com Hélice 80mm.....	60
Gráfico 8 - Velocidade da embarcação com Hélice 47mm.....	60
Gráfico 9 - Comparativos de velocidades.....	61
Gráfico 10 - Comparativo de velocidade adimensional.....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Séries sistemáticas de hélices.....	23
Tabela 2 - Número de pás e a razão de área considerada nos ensaios da Série B- <i>Troost</i> . ....	24
Tabela 3 - Parâmetro e coeficientes da embarcação em estudo. ....	34
Tabela 4 - Dados nominais do motor utilizado na competição. ....	35
Tabela 5 - Parâmetros de entrada na caixa redução do propulsor. ....	37
Tabela 6 - Dados do hélice selecionado. ....	38
Tabela 7 - Critérios de cavitação do hélice selecionado.....	39
Tabela 8 - Dados de entrada no <i>software</i> de modelagem paramétrica da série B. ....	40
Tabela 0 - Dados do hélice comercial. ....	44
Tabela 10 - Dados dos propulsores. ....	45
Tabela 11 - Itens utilizados nos ensaios. ....	46
Tabela 12 - Condições ambientais nos ensaios. ....	47
Tabela 13 - Faixa de rotação para cada élice.....	49
Tabela 14 - Cálculo de velocidade para a embarcação. ....	50
Tabela 15 - Percurso da embarcação no ensaio de velocidade.....	51

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

BAR – Razão entre áreas  $A_e/A_o$

DUNA – Desafio Universitário de Nautidesign

FPS – Quadros por segundo

$F_n$  – Número de Froude

RPM – Revoluções por minutos

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>15</b>
2.1	CLASSIFICAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DE REBOCADORES .....	15
2.1.1	Rebocadores com propulsão convencional .....	15
2.1.2	Rebocadores com propulsão azimutal .....	16
2.1.3	Rebocadores com propulsão cicloidal .....	17
2.2	BOLLARD PULL .....	18
2.3	SISTEMA DE PROPULSÃO .....	19
2.3.1	Propulsor do tipo hélice.....	20
2.3.2	Séries sistemáticas .....	22
2.3.3	Série sistemática de Wageningen .....	23
2.4	CAVITAÇÃO .....	27
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>33</b>
3.1	DADOS DO CASCO E MOTORES .....	33
3.2	DIMENSIONAMENTO DO HÉLICE .....	36
3.3	MODELAGEM DO HÉLICE.....	40
3.4	FABRICAÇÃO DO HÉLICE .....	42
3.5	CARACTERÍSTICAS DO HÉLICE ANTIGO .....	44
3.6	PREPARAÇÃO DO MODELO E EQUIPAMENTOS .....	46
3.6.1	Ensaio de tração estática – bollard pull .....	47
3.6.2	Ensaio de cavitação .....	49
3.6.3	Ensaio de velocidade .....	50
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES DOS ENSAIOS.....</b>	<b>52</b>
4.1	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE BOLLARD PULL .....	52
4.2	ANÁLISE DOS RESULTADOS DE BOLLARD PULL.....	53
4.3	RESULTADOS DO ENSAIO DE CAVITAÇÃO.....	56
4.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS DE CAVITAÇÃO .....	59

4.5	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE VELOCIDADE .....	60
4.6	ANÁLISE DOS RESULTADOS DE VELOCIDADES.....	62
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>66</b>
5.1	SUGESTÃO DE TRABALHO FUTURO.....	67

## 1 INTRODUÇÃO

Toda embarcação necessita de um dispositivo cuja finalidade é a geração de uma força propulsiva. Um dos dispositivos mais empregados comercialmente para esta finalidade é o hélice, onde qualquer ganho no desempenho representa aumento de velocidade ou economia de combustível (TRINDADE, 2012).

É importante observar que o projeto de um sistema propulsor depende das características geométricas e a aplicação de cada embarcação, o que requer atenção para cada novo projeto. Por este motivo, as pesquisas buscam otimizar o desempenho do sistema propulsivo.

A complexidade do correto dimensionamento do hélice implica, geralmente, em realizar a seleção do hélice próximo ao final da espiral de projetos (LAMB, 2003), por depender da escolha do motor, caixa de redução e velocidade de cruzeiro da embarcação.

A eficiência e durabilidade do propulsor está diretamente relacionado à capacidade do material resistir as solicitações como esforços mecânicos, vibrações e cavitação, que ocorrem durante o funcionamento do hélice, causando deformação e defeitos superficiais nas pás. Deve-se, portanto, analisar a utilização de materiais com propriedades mecânicas que melhor se adequem à situação. (CARLTON, 2007).

É de responsabilidade do engenheiro naval realizar a seleção do hélice buscando o maior empuxo, eficiência ou velocidade do sistema propulsivo respeitando as características de aplicação de cada embarcação.

Tendo em vista promover o interesse de estudantes de engenharia de todo o Brasil, todos os anos desde 2013, ocorre na cidade de Joinville o evento de Desafio Universitário de Nautidesign (DUNA), realizado pelo Curso de Engenharia Naval do Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina, envolvendo mais de 300 participantes, na maioria deles estudantes de engenharia naval. Nesta competição, todos os modelos possuem o mesmo motor e são submetidos a provas de força, manobras e velocidade. Por este motivo, um correto dimensionamento do sistema propulsivo, que consiga fornecer o maior

empuxo possível para a embarcação e ao mesmo tempo uma boa velocidade, é chave para um bom projeto.

O rebocador que servirá de base para os cálculos e testes tem participado da competição, sempre com um hélice para lanchas, o mais tradicional no ramo de nautimodelismo, porém, o baixo desempenho do sistema propulsivo gerou a necessidade de um projeto mais elaborado.

Embora o intuito deste trabalho tenha o foco na realização experimental e análise dos resultados, vale relatar todo o processo realizado pelo autor até chegar aos experimentos e aos resultados. Com essa perspectiva, este relatório explica como foram realizados o projeto e a fabricação do novo hélice para o modelo no DUNA-2016 e a adequação do sistema de transmissão aos novos motores do DUNA-2017. A realização dos ensaios de empuxo, cavitação e velocidade do conjunto casco-hélice, para avaliar o novo desempenho comparado ao antigo hélice e analisando possíveis melhorias do sistema propulsivo projetado para o modelo da Equipe Greyjoy para a competição DUNA-2017.

Espera-se ao final do trabalho obter um procedimento racional e consistente para a seleção do propulsor por meio da Série B-Troost bem como a fabricação e ensaio, visando obter um projeto eficiente do propulsor tipo hélice. Como resultado secundário, espera-se verificar se o desenvolvimento do hélice trouxe ganhos significativos para o barco de competição e se os resultados obtidos foram satisfatórios.

## OBJETIVOS

### **Objetivo Geral**

Respeitando as regras de motorização estipuladas para a Competição DUNA-2017 e geometria do casco utilizada pela Equipe Greyjoy, quantificar e avaliar o desempenho do hélice projetado especificamente para a competição DUNA-2016 modificado para o DUNA-2017 e do hélice obtido comercialmente e utilizado pela equipe na competição DUNA-2015.

### **Objetivos Específicos**

1. Detalhar o procedimento utilizado para o dimensionamento do sistema propulsivo pela série B-Troost para o DUNA-2017;
2. Detalhar os procedimentos da modelagem e a fabricação do sistema propulsivo;
3. Realizar ensaios de empuxo, cavitação e velocidade que cada sistema propulsivo proporciona à embarcação.
4. Comparar o desempenho obtido com ambos os sistemas propulsivos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os fundamentos teóricos e práticos sobre rebocadores e propulsores navais que serão utilizados como base no desenvolvimento desta monografia.

### 2.1 CLASSIFICAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DE REBOCADORES

Diversos aspectos podem ser considerados para estabelecer a capacidade de reboque de um rebocador. Abaixo estão listados algumas delas:

- Tipo de propulsão;
- Força de tração estática (*bollard pull*);

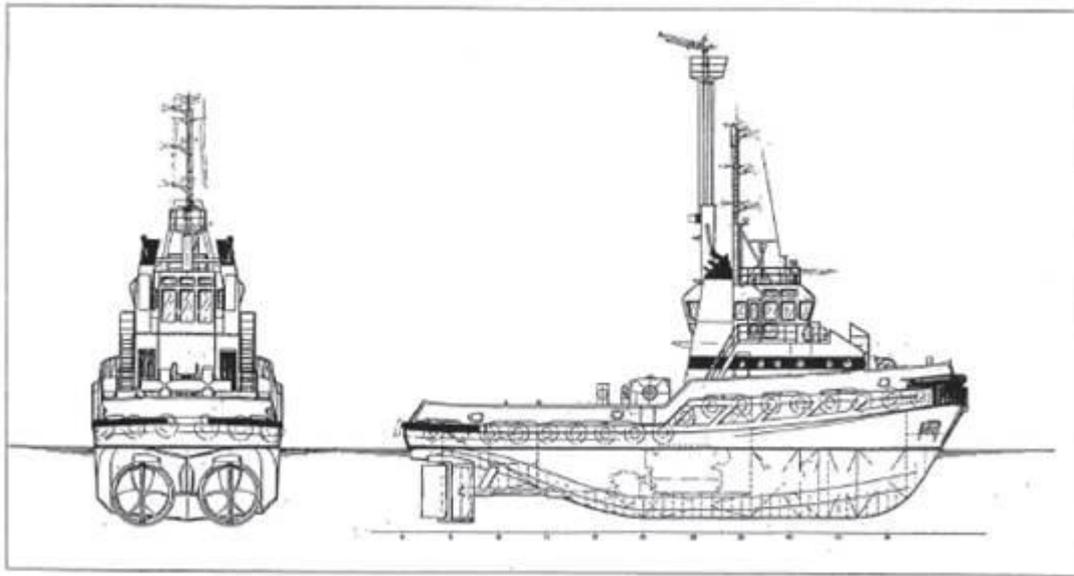
Apesar de potência e força de tração estática serem geralmente as características mais destacadas na qualificação de um rebocador, é a combinação das duas variáveis listadas acima que vai definir a manobrabilidade do rebocador, assim como as suas limitações durante a utilização (SILVA, 2002).

Uma tentativa simples de classificar diferentes tipos de rebocadores pode ser baseada no tipo de propulsão. Com base nesse critério, podemos estabelecer os seguintes tipos mais utilizados.

#### 2.1.1 Rebocadores com propulsão convencional

São os tipos de rebocadores mais antigos ainda em operação, podendo ter um ou mais hélices de passo fixo. Possuem capacidade de manobra limitada e sua utilização requer atenção constante nas situações que possam comprometer o controle mais ativo do navio rebocado, como atracação de navio em situação de corrente marítima. Outro fator a ser destacado, é a força de tração a ré ser, geralmente, muito menor que força de tração a vante.

Figura 1 - Rebocador de propulsão convencional de 2 hélices.



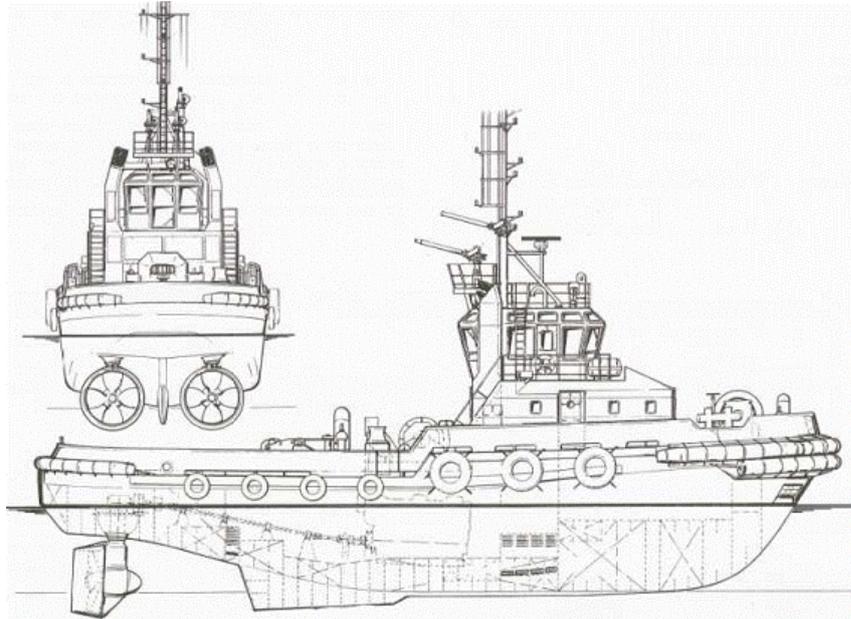
Fonte: Hensen (2003).

Na Figura 1 é mostrado um exemplo de rebocador com propulsão tradicional composto por dois hélices e um aperfeiçoamento deste sistema, o Tubulão-Kort. São tubos fixos que envolvem o hélice, organizando o fluxo de descarga e possibilitando um ganho na tração a vante em até 30%. Os rebocadores de dois hélices têm, basicamente, as mesmas características dos de um hélice. A principal diferença está na possibilidade de usando rotações diferentes em cada sistema de propulsão, criar um binário de forças, o que irá somar à ação do leme para governo. Assim a presença de dois sistemas propulsivo aumenta a manobrabilidade do rebocador.

### **2.1.2 Rebocadores com propulsão azimutal**

Esse tipo de rebocador é revolucionário, se comparado com os de propulsão convencional. O princípio é a substituição do eixo fixo, que produz uma força sempre na direção longitudinal, por um propulsor que pode mudar a direção de sua força para qualquer direção do azimute da embarcação (plano horizontal paralelo à água) como mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Rebocador de propulsão azimutal de 2 hélices.



Fonte: Hensen (2003).

Suas principais qualidades estão na ausência de leme e, praticamente, terem a mesma força de reboque em qualquer direção. O que os tornam muito eficazes em manobras de atracação utilizando o costado dos navios (método puxa-empurra).

### 2.1.3 Rebocadores com propulsão cicloidal

No sistema cicloidal (Voit Schneider como também é conhecido), é um sistema de propulsão composto de dois conjuntos de lâminas verticais móveis fixados a um disco paralelo ao fundo do casco. Os discos giram em velocidade constante, produzindo uma força de intensidade e sentido controlados pela variação do ângulo de cada uma lâmina. A principal vantagem deste tipo de propulsão é a possibilidade da força de reboque atuar em qualquer direção com a mesma intensidade, e a velocidade com que a alteração do sentido da força pode ser feita. Desvantagens são o grande calado para suportar as lâminas e a estrutura de proteção e o formato do fundo do casco como na Figura 3, reto e largo, que pode prejudicar a hidrodinâmica em mar aberto.

Figura 3 - Rebocador de Propulsão Voit Schneider.



Fonte: Hensen (2003).

## 2.2 BOLLARD PULL

A principal forma de se avaliar um rebocador é saber sua capacidade de tração estática máxima, ou seja, qual o maior valor de tração em que a propulsão do rebocador atinge a uma velocidade zero de movimentação e rotação máxima do motor. Na prática esse valor jamais será alcançado em operações normais, pois os hélices alteram a velocidade da água à medida que se movimentam.

Rebocadores, manipuladores de âncoras e outros navios offshore são projetados para fornecer uma grande força de tração a baixa velocidade. Este desempenho chave é testado por meio de um procedimento chamado *Bollard Pull*, onde a linha de reboque está conectada a um poste ou baliza fixa mostrado na Figura 4. Com a potência máxima desenvolvida, a força de tração é então medida por meio de uma célula de carga. Esse valor está documentado no Certificado *Bollard Pull* que desempenha um papel importante na venda e entrega do rebocador, implementação e contratos comerciais.

Figura 4 - Ensaio de bollard pull real.



Fonte: *Dynamic Rigging Hire* (2017)

No Brasil o teste é regulamentado pela Diretoria de Portos e Costas da Marinha através de suas normativas NORMAM 01 ou 02 dependendo da área de atuação do rebocador. Esse teste é obrigatório para todas as embarcações de reboque, sendo de validade máxima de cinco anos.

No passado era obrigatória a presença de um representante da Marinha nos testes de tração estática, sendo aferidas as informações encontradas. Hoje, o único responsável pelo teste é o Engenheiro Naval que deverá realizar o procedimento através do guia padrão citado na NORMAM, não havendo mais ingerência das Capitânicas nos testes. Para a realização e validação dos ensaios, é necessário ficar atento a norma referente aos equipamentos necessários, condições ambientais e procedimento do ensaio.

### 2.3 SISTEMA DE PROPULSÃO

Após a escolha de um tipo de sistema propulsivo que melhor atenda aos requisitos, o correto dimensionamento de um propulsor requer muita atenção. O papel de um propulsor é gerar a força propulsiva (*thrust*). Essa força surge devido a variação da quantidade de movimento do fluido. Simplificando, o propulsor exerce uma força no fluido e o fluido exerce uma força de reação de mesma magnitude e direção oposta sobre o propulsor (Molland, 2008).

As soluções propulsivas são muito diversificadas, mas predominantemente os navios continuam a utilizar hélices simples como meio de propulsão, gerando assim, fonte de muito estudo para garantir o máximo desempenho.

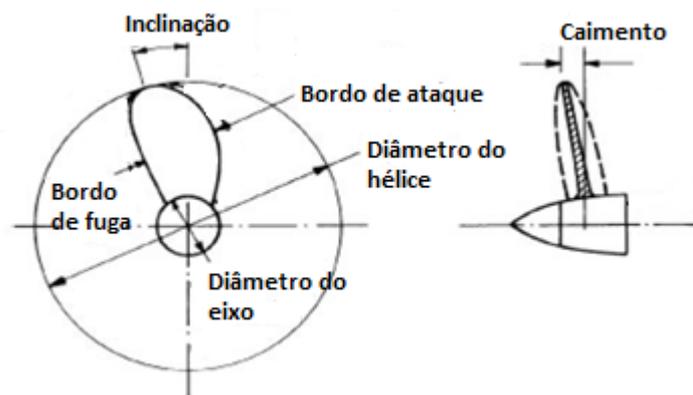
O tipo de propulsor que será estudado daqui em diante será a do tipo hélice simples pela facilidade de construção. Contudo, em rebocadores mais modernos, os sistemas azimutais com a utilização do Tubo *Kort* são os mais utilizados pela maior uniformidade do escoamento na entrada do propulsor e a elevada capacidade de manobra e economia de espaço, fundamentais aos rebocadores portuários (GONÇALVEZ, 2002).

### 2.3.1 Propulsor do tipo hélice

O hélice é um instrumento de propulsão geralmente acoplado a um motor, que empurra o que está em redor, neste caso água, convertendo energia rotacional em translacional e deslocando o objeto a que se encontra acoplado. As pás do hélice agem como asas e produzem força obedecendo ao princípio de Bernoulli e a 3ª lei de Newton, criando uma diferença de pressão entre ambas as superfícies das pás.

O hélice pode ser definido como um conjunto de pás distribuídas uniformemente em torno do cubo montado na extremidade do eixo. Possui uma geometria complexa cujas principais características são apresentadas na Figura 5.

Figura 5 - Representação dos parâmetros do hélice.



Fonte: Trindade (2012, p. 41). Adaptado.

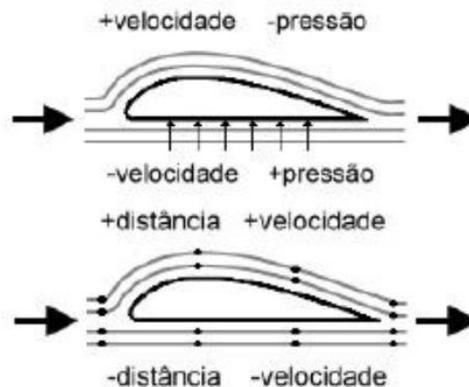
Destacam-se as seguintes áreas, linhas e pontos:

- Bordo de ataque (*leading edge*), a linha frontal onde o fluido encontra a pá;
- Bordo de fuga (*trailing edge*), aresta traseira onde o fluido deixa a pá;
- A extremidade da pá (*tip*) é o ponto de maior raio
- Diâmetro do hélice (*diameter*),  $D$

- Diâmetro do cubo (*boss* ou *hub diameter*),  $d$
- Número de pás do hélice (*propeller blade number*),  $Z$
- Passo do hélice (*propeller pitch*),  $P$
- Área do disco,  $A_o = \pi D^2/4$ ;
- Área projetada, área da projeção das pás num plano normal ao eixo do hélice,  $A_p$
- Área expandida, soma das áreas das faces das pás,  $A_e$
- Deslocamento circunferencial (*skew*)
- Abatimento axial (*rake*).

A diferença de pressão é a responsável pela geração da força propulsiva. Essa diferença ocorre pela geometria da pá do hélice, assim como ocorre na asa de um avião. A Figura 6 representa essa geração de força.

Figura 6 - Diferença de pressão em um perfil.

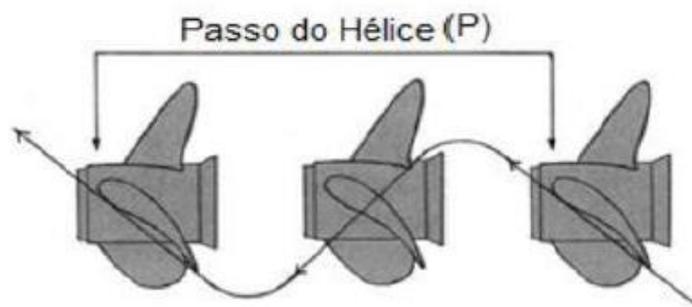


Fonte: Sampaio (2011)

*“A parcela de fluido que passa por cima, ou seja, pelo extradorso, tem de percorrer uma maior distância em relação a que passa por baixo, mas as duas parcelas devem se encontrar novamente no bordo de fuga e ao mesmo tempo. Para que isto seja possível, o fluido que passa por cima é acelerado e conseqüentemente, a pressão estática desta parcela é reduzida em relação a pressão do que passa por baixo. Essa diferença de pressão faz com que o perfil seja empurrado para cima gerando assim sustentação”* (SAMPAIO, 2011).

Outra geometria responsável pela geração de empuxo é o ângulo de hélice, ou mais conhecido como passo do hélice. O passo do hélice é a distância longitudinal percorrida por um ponto do hélice em uma rotação completa como mostrado na Figura 7. Ao dividir essa distância pelo diâmetro do hélice, temos a razão passo diâmetro ( $P/D$ ), relação muito utilizada na seleção do hélice pela característica de influenciar no empuxo do hélice. (PINHEIRO, 2014)

Figura 7 - Passo do hélice.



Fonte: Pinheiro (2014, p. 04).

Ao longo do tempo foram realizados ensaios paramétricos em hélices para se obter os melhores resultados para diferentes tipos de aplicação, buscando sempre maximizar empuxo ou velocidade com a melhor eficiência possível. Esses estudos lavaram a criação de algumas series sistemáticas.

### 2.3.2 Séries sistemáticas

Uma serie sistemática de hélice é um conjunto de hélice obtido por variação sistemática de parâmetros geométricos. Ao longo de décadas, tem sido realizado ensaios em series sistemáticas de propulsores para navios. As principais características de alguns exemplos de séries sistemáticas de hélices propulsores simples de passo fixo estão incluídos na Tabela 1.

Tabela 1 - Séries sistemáticas de hélices.

Série	Nº de modelos	Z	Ae/Ao	P/D	D(mm)
<b>Wageningem B</b>	~120	2-7	0,3-1,05	0,5-1,4	250
<b>Au</b>	34	4-7	0,4-0,758	0,5-1,2	250
<b>Gawn</b>	37	3	0,2-1,1	0,4-2,0	508
<b>KCA</b>	30	3	0,5-1,25	0,6-2,0	406
<b>Newton-Rader</b>	12	3	0,5-1,0	1,05-2,08	254

Fonte: John Carlton (2007, pag. 102).

A série Au é popular no Japão, mas não conseguiu uma divulgação semelhante a Série Wageningen, no entanto, pode ser considerada uma série complementar. A série Gawn caracterizada por um diâmetro maior, consegue reduzir efeitos de escala, assim como a série KCA. A série Newton-Rader compreende um conjunto de hélices com aplicações de propulsão de embarcações rápidas, caracterizado pela sua alta razão de P/D.

O principal objetivo na realização dos ensaios sistemáticos nestes conjuntos de hélices é criar uma base de dados que permita ajudar o projetista a entender os principais fatores que influenciam o desempenho do hélice, bem como a ocorrência de cavitação em várias condições de funcionamento. A construção de diagramas permite ajudar a seleção das características mais apropriadas para uma aplicação em escala do navio.

Outra série de hélice muito importante e utilizada é a Kaplan, projetada para Traineiras, barcos de arrasto, rebocadores e demais embarcações que executam serviços pesados, necessitando de *bollard pull* alto e requisitos de velocidade baixos. Produzidos para operação em Tubos Kort, e aplicações de carga elevada podem desenvolver impulsos substancialmente superior do que hélices livres em velocidade de funcionamento. O sistema Kaplan incorpora seções de plano aerodinâmico nos raios internos e seções em formato de ogiva plana nos raios externos, para impulsão máxima. (CALTON, 2007).

### 2.3.3 Série sistemática de Wageningen

Uma das series sistemáticas de hélices propulsoras mais populares é a série de Wageningen, também conhecida como série B-Troost. Esta série, em que os trabalhos iniciais datam de 1940, é talvez a mais vasta e disponível para estudos (BRINATI, 2010).

Nesta série foram ensaiados cerca de 120 propulsores variando-se o número de pás, o passo e a razão de área expandida pela área do disco ( $A_e/A_o$ ), como pode ser observado na Tabela 2. A razão passo diâmetro permanece constante desde a extremidade da pá até metade do raio do hélice, onde passa a ser reduzida como mostrado na Figura 8 de forma que no bosso a razão de passo seja 80% do valor inicial em hélices de 3 e 4 pás, para uma melhor adaptação do hélice a distribuição de velocidade na esteira da embarcação. Para os hélices com um número de pás maior que 5, essa redução do passo em função do raio do propulsor não existe, além disso, experimentos mostram que a diferença de eficiência devido a essa diminuição do passo é insignificante (LEWIS, 1989).

A nomenclatura dos hélices dessa série é representada primeiramente pela letra B, simbolizando a série, em seguida aparecem o número de pás e a razão de área expandida. Exemplo: Hélice B-3.70 (hélice da série B, com três pás e razão de área de 0,70).

Tabela 2 - Número de pás e a razão de área considerada nos ensaios da Série B-Troost.

Nº de Pás	Razão de área (BAR)				
2	0,30				
3	0,35	0,50	0,65	0,80	
4	0,40	0,55	0,70	0,85	1,00
5	0,45		0,60	0,75	
6	0,50		0,65	0,80	
7	0,55		0,70	0,85	

Fonte: John Carlton (2007, p. 103)

Figura 8 - Aspecto geométrico das pás da Série B-Troost.

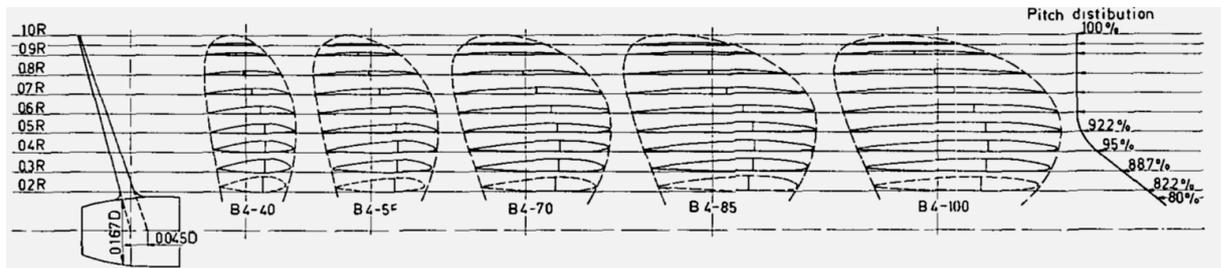
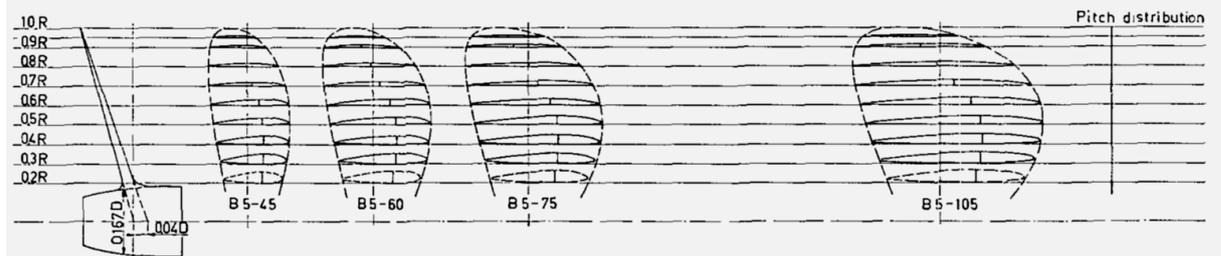


Fig. 1 General plan of B 4 screw series



Fonte: Lewis (1988, p. 186)

Apesar do hélice funcionar na esteira não-uniforme do navio, são realizados ensaios de desempenho em águas abertas, condição sem esteira e uniformidade do fluido. Neste ensaio o modelo do hélice é deslocado com velocidade de avanço  $V_a$  num fluido em repouso. Durante o deslocamento é posto uma rotação constante no hélice (TRINDADE, 2012). São medidas as forças propulsivas  $T$  e de torque  $Q$ , o que geram as características propulsivas em águas abertas. Aplicando a análise dimensional, expressando a dependência dos coeficientes de força propulsiva e de torque dos seguintes grupos adimensionais:

$$J = \frac{V_a}{nD} \quad (1)$$

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

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5} \quad (3)$$

Onde:

- $J$ , coeficiente de avanço [adimensional];
- $K_T$ , coeficiente de empuxo propulsivo [adimensional];
- $K_Q$ , coeficiente de torque aplicado ao eixo [adimensional];
- $V_a$ , velocidade de avanço [m/s];
- $n$ , rotação por segundo [rps];
- $D$ , diâmetro do hélice [m];
- $\rho$ , densidade do fluido [kg/m<sup>3</sup>];
- $T$ , empuxo desempenhado pelo hélice [N];
- $Q$ , torque aplicado ao eixo [N.m];

A eficiência do propulsor, expressa em termos dos coeficientes adimensionais, pode ser calculada pela equação a seguir:

$$\eta_0 = \frac{JK_T}{2\pi K_Q} \quad (4)$$

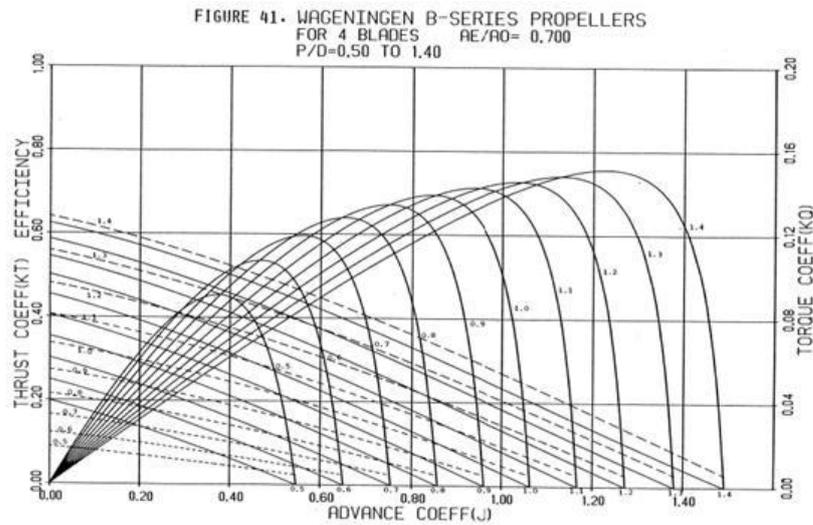
Onde:

- $\eta_0$ , eficiência do propulsor em águas abertas.

Depois de adimensionalizados, os valores medidos da força propulsiva e do torque para vários regimes de funcionamento constituem o “Diagrama em águas abertas” do hélice e a eficiência naquela operação.

Os diagramas são formulados com as curvas características de águas livres, cada curva corresponde a uma razão passo-diâmetro diferente. A Figura 9 apresenta um diagrama para hélices da série B com 4 pás, razão de área de 0,70 e relação de passo-diâmetro variando entre 0,5 até 1,4.

Figura 9 - Diagrama de águas abertas Série B-Troost.



Fonte: Trindade (2012, p. 50)

Após selecionar o hélice que melhor atende aos requisitos, o projetista deve observar se o projeto atende outro requisito, a cavitação, que quando negligenciado pode gerar prejuízos a curto e longo prazo, como redução da força propulsiva, erosão, ruído e vibração (TRINDADE, 2012).

## 2.4 CAVITAÇÃO

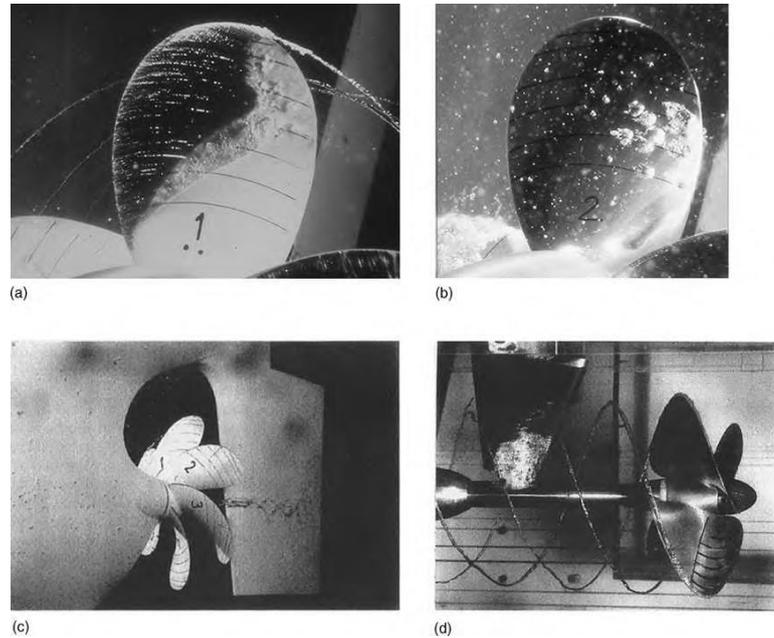
Um dos aspectos mais estudados em propulsores, a cavitação é um fator de limitação ao projeto de um hélice. Explicado como um fenômeno que ocorre a partir de regiões nas pás com pressões abaixo da pressão de vapor da água, formando-se cavidades e/ou bolhas a partir da vaporização da água, a cavitação quase sempre traz grandes preocupações aos projetistas, já que pode apresentar efeitos indesejáveis como queda de empuxo, erosão das pás e aumento de vibração induzidas pelo propulsor.

Segundo Carlton, em um hélice podem ocorrer vários tipos de cavitação:

- Cavitação de bolha;
- Cavitação de bolsa;
- Cavitação na raiz da pá;
- Cavitação de vórtice de extremidade;
- Cavitação de vórtice entre o hélice e o casco;
- Cavitação do cubo do eixo do hélice.

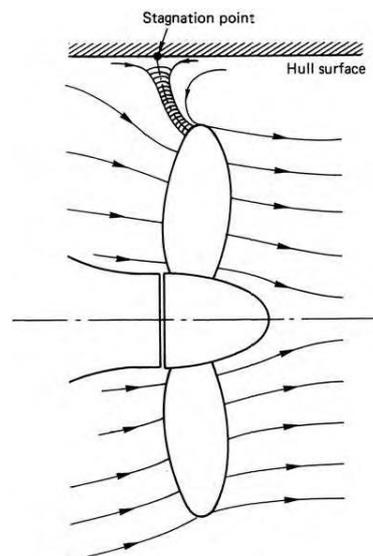
Na Figura 10 e 11 são apresentados alguns exemplos dos tipos de cavitação que podem ocorrer em um hélice.

Figura 10 - Tipos de cavitação, (a) cavitação tipo bolsa, (b) cavitação tipo bolha, (c) cavitação tipo vórtice do eixo e (d) cavitação de vórtice de extremidade da pá.



Fonte: Carlton (2007, p. 214).

Figura 11 - Exemplo de cavitação de vórtice entre o hélice e o casco.



Fonte: Carlton (2007, p. 215).

Esse tipo de cavitação mostrado na Figura 11 ocorre principalmente quando o coeficiente de avanço é muito baixo com alta carga de carregamento. O hélice, na tentativa de continuar a movimentar água, puxa fluxo tanto da proa quanto da popa, criando assim um ponto de estagnação. O vórtice é considerado sendo como uma turbulência e outros distúrbios do fluxo próximo ao casco causando uma rotação sobre o ponto de estagnação. Esse vórtice é então deslocado para longe do casco na passagem da pá do propulsor em direção ao hélice.

Uma das formas mais práticas de prever-se problemas relacionados com cavitação é a utilização do diagrama de Burrill mostrado na Figura 12, baseado em dezenas de ensaios em tuneis de cavitação de hélices de geometrias variadas. O diagrama relaciona pressões presentes nas pás, o coeficiente de carregamento ( $\tau_c$ ) e o número de cavitação relativo a velocidade resultante na seção das pás ( $\sigma_{0,7}$ ). Tanto  $\tau_c$  como  $\sigma_{0,7}$  levam em conta as componentes rotacional e axial das velocidades nas pás. O coeficiente de Burrill é calculado pela Equação 5:

$$\tau_c = \frac{R_t}{\frac{1}{2}\rho V_r^2 A_p} \quad (5)$$

Onde:

- $\tau_c$ , coeficiente de carregamento;
- $R_t$ , Resistência total [N];
- $\rho$ , densidade do fluido [kg/m<sup>3</sup>];
- $V_r^2$ , velocidade radial da pá à 0,7 do raio [m/s];
- $A_p$ , área projetada do hélice [m<sup>2</sup>].

Para a série B, a área projetada pode ser aproximada pela Equação 6:

$$A_p = (1,067 - 0,229 \frac{P}{D}) A_e \quad (6)$$

Onde:

- $A_p$ , área projetada [m<sup>2</sup>];
- $A_e$ , área expandida [m<sup>2</sup>].

$V_r$  é o valor da velocidade local a 0,7 do raio do hélice. Ele compõe a velocidade do fluido com a velocidade radial causada pela rotação do propulsor. Seu valor pode ser calculado pela Equação 7 a seguir:

$$V_r = \sqrt{V_a^2 + (0,7\pi nD)^2} \quad (7)$$

Onde:

- $V_r$ , velocidade local [m/s];
- $V_a$ , velocidade de avanço [m/s];
- $n$ , rotações do propulsor [rps].

No eixo das abscissas do diagrama, encontra-se o número de cavitação que pode ser calculado por:

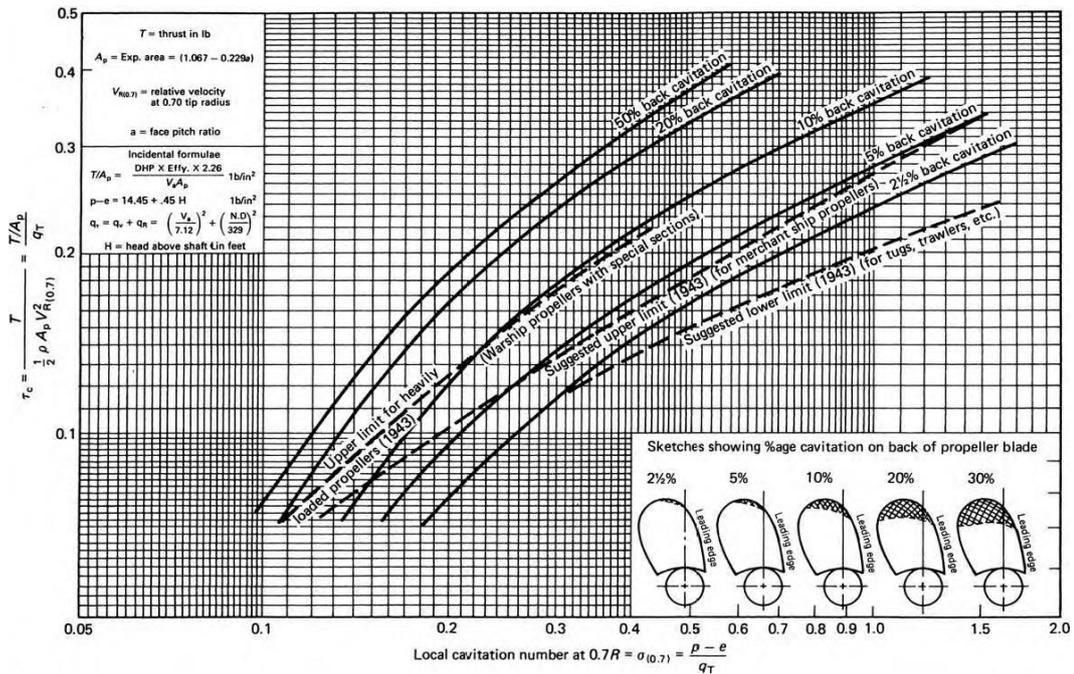
$$\sigma_{0,7} = \frac{\rho g h + P_{atm} - P_v}{\frac{1}{2} \rho V_r^2} \quad (8)$$

Onde:

- $\sigma_{0,7}$ , número de cavitação;
- $\rho$ , densidade do fluido [kg/m<sup>3</sup>];
- $h$ , altura da coluna da água até o eixo do propulsor [m];
- $P_v$ , pressão de vapor do fluido [Pa].
- $g$ , aceleração da gravidade [ $g \cong 9,81$ ];
- $P_{atm}$ , pressão atmosférica [ $P_{atm} \cong 101300$  Pa]

No diagrama de Burrill, são apresentadas as definições de seus parâmetros e as equações aproximadas de suas curvas, que indicam a porcentagem da área das pás cobertas por cavitação no dorso dos hélices. Apesar de ser um método empírico, que apresenta informações quanto ao comportamento aproximado e médio dos hélices, a prática tem demonstrado que seus resultados são confiáveis.

Figura 12 - Diagrama de Burrill.



Fonte: Carlton (2007, p. 221).

A utilização do diagrama de Burrill apenas possibilita estimar a quantidade de cavitação nas pás e verificar se há risco de ocorrer queda de empuxo no hélice, resultante da presença de cavitação excessiva. O diagrama não indica o tipo de cavitação presente nem se há possibilidade de ocorrer erosão por cavitação nas pás.

A ocorrência de erosão por cavitação está ligada principalmente a um dos três casos:

- Hélices de grandes embarcações marítimas, com altos  $C_B$  e grandes diâmetros de hélices, resultando em distribuições de esteira que fazem variar de modo significativo a velocidade resultante em cada pá a medida que ela faz uma rotação de  $360^\circ$ . Nestes casos, mesmo com pequena área das pás cobertas por cavitação, pode ocorrer erosão devido à natureza da cavitação, predominantemente de bolhas. As bolhas se formam e desaparecem através de implosões junto a superfície das pás, por força de variação periódica e abrupta das velocidades na região do hélice (TRINDADE, 2012);
- Ocorrência de velocidade altíssimas de escoamento que levam a pressões locais muito baixas, fazendo com que quaisquer discontinuidades das superfícies das pás se constituam em pontos preferenciais de implosões de bolhas de cavitação;

- c. Presença de cavitação excessiva nas pás, induzindo turbulência local de caráter periódico pode levar a erosão como apresentado na Figura 13. (CARLTON, 2007).

Figura 13 - Erosão da superfície das pás do hélice.



Fonte: Victory Propeller (2014).

No caso dos hélices de embarcações de reboque que apresentam alto carregamento nos hélices, a queda do empuxo devido a cavitação, pode prejudicar o desempenho do sistema propulsor nas funções operacionais, precisando ser muito bem dimensionado para evitar a cavitação. Para um projeto com uma margem maior de segurança contra o efeito da cavitação, foi criada uma linha auxiliar no Diagrama de Burrill, contemplando embarcações como rebocadores, pesca de arrasto e afins.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada nos processos de seleção, fabricação e testes do hélice. Os processos de seleção e de fabricação do hélice foram executados pelo autor em momento anterior a realização deste trabalho, mas foram aqui documentados para servir como referência para outras equipes interessadas no desenvolvimento de seu próprio hélice e para facilitar o entendimento do trabalho.

O processo de fabricação é simplificado, mostrando as principais etapas do processo e ferramentas para a modelagem e construção. Mesmo havendo mudança dos motores do DUNA-2016 para o DUNA-2017, os hélices permaneceram os mesmos, modificando apenas a caixa de redução para adequar os novos motores aos hélices já selecionados e fabricados. É então finalizado a montagem do propulsor ao sistema de transmissão.

Para a realização dos experimentos, foram divididos em três ensaios distintos, cada um com o propósito de analisar um critério específico. O primeiro ensaio analisará o comportamento do empuxo gerado por cada propulsor variando a rotação, neste experimento será utilizado uma balança digital e um tacômetro digital. O segundo ensaio analisará de forma qualitativa a ocorrência de cavitação por meio de gravação de vídeo a uma taxa de 240 quadros por segundo, capacidade máxima do equipamento registrar fotos a cada segundo. E por último, o ensaio de desempenho avaliando a variação da velocidade da embarcação, em função da variação da rotação do propulsor para ambos os propulsores, neste experimento será utilizado novamente o tacômetro para medição da rotação do hélice e uma câmera para medição da velocidade da embarcação.

#### 3.1 DADOS DO CASCO E MOTORES

O desenvolvimento do estudo teve início com o fornecimento dos parâmetros hidrodinâmicos do casco tipo rebocador da Equipe Greyjoy da UFSC- Joinville, os quais são descritos na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetro e coeficientes da embarcação em estudo.

**PARÂMETROS DA EMBARCAÇÃO**

<b>LOA</b>	1,10 m
<b>LPP</b>	1,02 m
<b>B</b>	0,33 m
<b>T</b>	0,13 m
<b>D</b>	0,20 m
<b>CP</b>	0,68
<b>CB</b>	0,45
<b>DESLOCAMENTO</b>	18,6 kg
<b>RECUO DO PROPULSOR</b>	100 mm

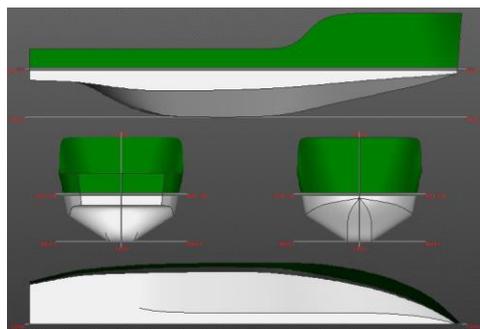
Fonte: Elaborado pelo autor.

Onde:

- LOA, comprimento total da embarcação;
- LPP, comprimento entre perpendiculares;
- B, boca máxima da embarcação;
- T, calado máximo da embarcação;
- D, pontal;
- Cp, coeficiente prismático;
- Cb, coeficiente de bloco;

A modelagem do casco, apresentada na Figura 14, foi realizada para melhor visualização da geometria e auxiliar nos cálculos hidrostáticos do modelo.

Figura 14 - Modelagem do casco.



Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

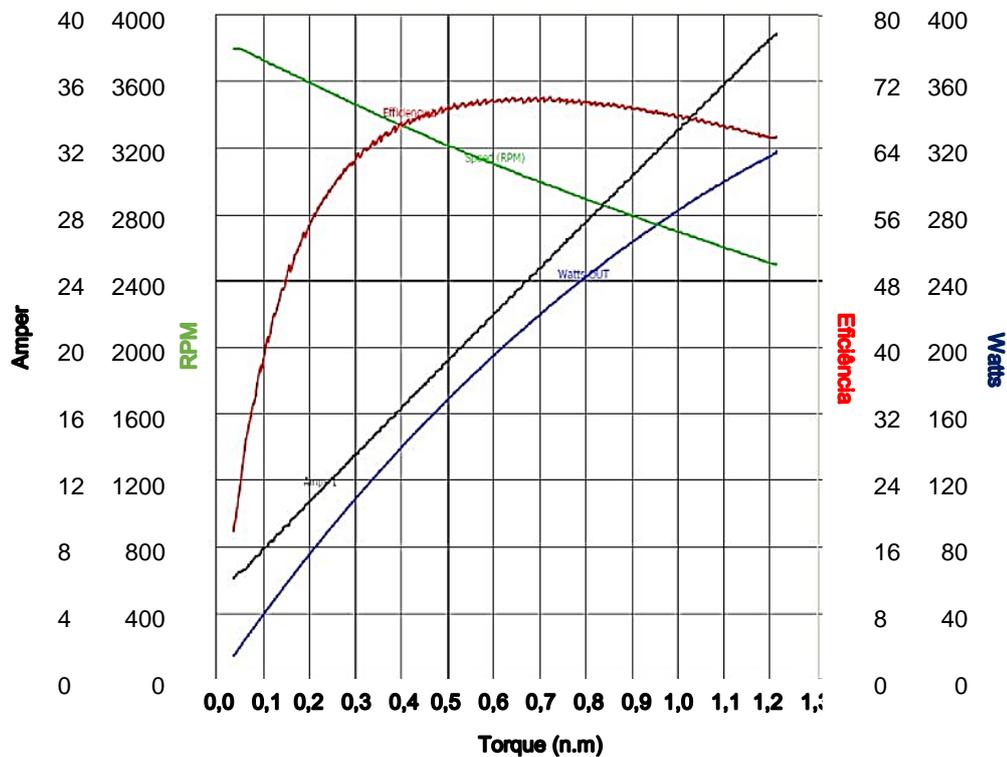
Outro dado fornecido ao projeto são os motores utilizados pela embarcação, que deve ser o mesmo modelo para todos os competidores do DUNA-2017. Os motores permitidos para propulsão são os do modelo Imobras 101410212, estes são motores de corrente contínua universal. Como a competição permite a utilização de até dois motores destinados a propulsão, foram utilizados dois motores para um aumento de potência instalada. Os dados nominais e a curva de potência são mostrados na Tabela 4 e no Gráfico 1.

Tabela 4 - Dados nominais do motor utilizado na competição.

Dados Nominais	
Tensão [V]	13
Corrente [A]	28
RPM [1/min]	2900
Torque [N.m]	0,8
Potência [W]	240
Massa [kg]	2

Fonte: Imobras (2017).

Gráfico 1 - Curva de potência do motor utilizado na competição.



Fonte: Imobras (2017).

Com os dados fornecidos do casco e motor é possível iniciar o dimensionamento do hélice.

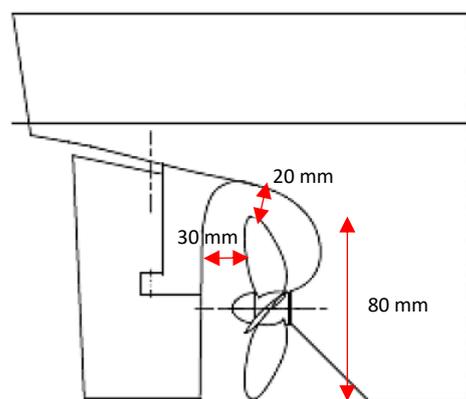
### 3.2 DIMENSIONAMENTO DO HÉLICE

Conforme descrito na fundamentação teórica, utilizou-se a série *B-Troost*, devido a farta literatura disposta sobre o assunto, embora provavelmente a série mais adequada para este tipo de aplicação seja a Série Kaplan. Foi estipulado que o passo do propulsor será fixo com sentido horário e outro com sentido anti-horário.

A seleção dos parâmetros foi realizada a partir das equações de ensaio em águas abertas, conforme procedimento descrito na fundamentação teórica. Visando maximizar o empuxo e a eficiência do propulsor, foi estipulado que o diâmetro do hélice seria o maior possível dentro dos limites do casco.

Conforme projeto preliminar do propulsor, uma distância aceitável entre a extremidade do hélice e o casco é aproximadamente 20% do diâmetro do hélice. Foi então, assumido um hélice com 80% do recuo do propulsor, gerando um hélice com diâmetro de 80mm.

Figura 15 - Distância utilizada entre o hélice e o casco.



Fonte: Carlton (2007, adaptado pelo autor).

Os cálculos para a seleção do propulsor foram realizados utilizando o Excel como ferramenta matemática. O processo de seleção teve como principal objetivo obter o máximo empuxo estático possível, variando a relação  $\frac{P}{D}$  e número de rotações.

Uma vez já estabelecido os motores, é necessário encontrar o coeficiente de torque  $K_q$  que os motores poderão fornecer ao propulsor, utilizando a potência nominal de 240 W com torque de 0,8 N.m e rotação de 2900 rpm. Para um melhor aproveitamento da potência, foram realizadas iterações com diferentes faixas de rotações, simulando uma caixa de redução, alterando a rotação e torque no eixo do propulsor, mas mantendo a do motor na máxima eficiência conforme a curva de potência dos motores, para no fim fornecer um maior empuxo.

Para alterar a rotação proveniente do motor, foi utilizada uma caixa de redução projetada e montada pelo autor. A relação de transmissão utilizada para maximizar o empuxo é de 20/22, resultando em uma velocidade do eixo do propulsor em 3335 rpm.

Vale salientar que como o parâmetro principal de avaliação é o empuxo estático, os maiores valores serão encontrados em  $J$  muito próximos de zero. Os parâmetros de entrada são descritos na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros de entrada na caixa redução do propulsor.

Parâmetros de entrada no eixo do propulsor	
Potência	240 W
Rendimento da transmissão	0,9
Relação de redução	0,87 - [20/23]
Torque	0,619 N.m
$K_q$	0,611

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

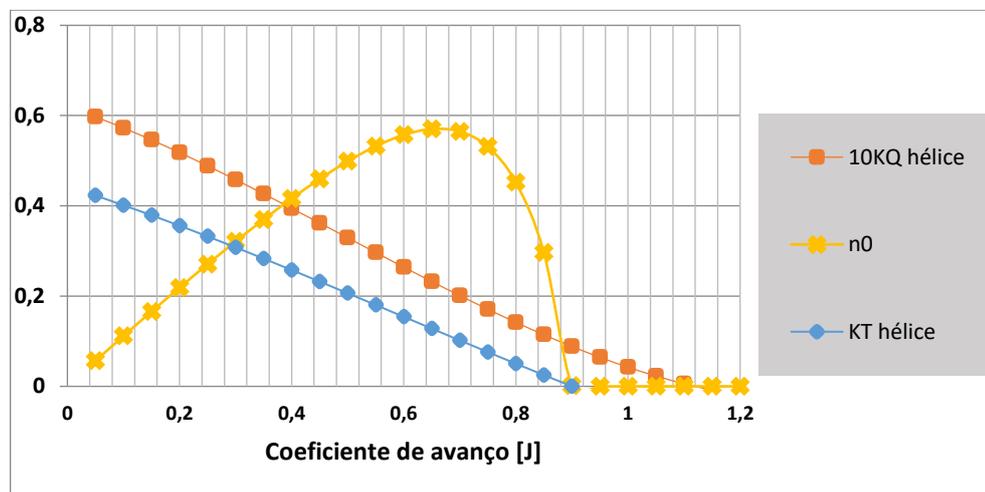
O próximo passo foi selecionar um hélice com o coeficiente de torque  $K_q$  o mais próximo possível, variando a relação  $\frac{P}{D}$ , número de pás e a relação de áreas  $\frac{A_e}{A_0}$ . Após algumas iterações modificando essas variáveis, incluindo a relação de redução (caixa de redução), foi selecionado o hélice com os seguintes dados apresentados na Tabela 6 e Gráfico 2.

Tabela 6 - Dados do hélice selecionado.

Dados do hélice	
Razão passo/diâmetro - $\frac{P}{D}$	0,9
BAR - $\frac{A_e}{A_0}$	1,00
Número de pás	3
Diâmetro	80 mm

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Gráfico 2 - Diagrama em águas abertas hélice B 3-100



Fonte: Elisa Mendes (2015).

Maximizando o empuxo, esse hélice forneceria a embarcação um empuxo teórico final de 5,44 kg em tração estática por hélice, totalizando 10,88 kg à embarcação.

Para validação deste hélice, é necessário verificar o critério de cavitação. Como forma de estimar a resistência total da embarcação, foi proposto que a resistência total em condição de bollard pull é o próprio empuxo fornecido pelo projeto do hélice, ou seja, estaria em equilíbrio. Os termos são calculados e mostrados na Tabela 7:

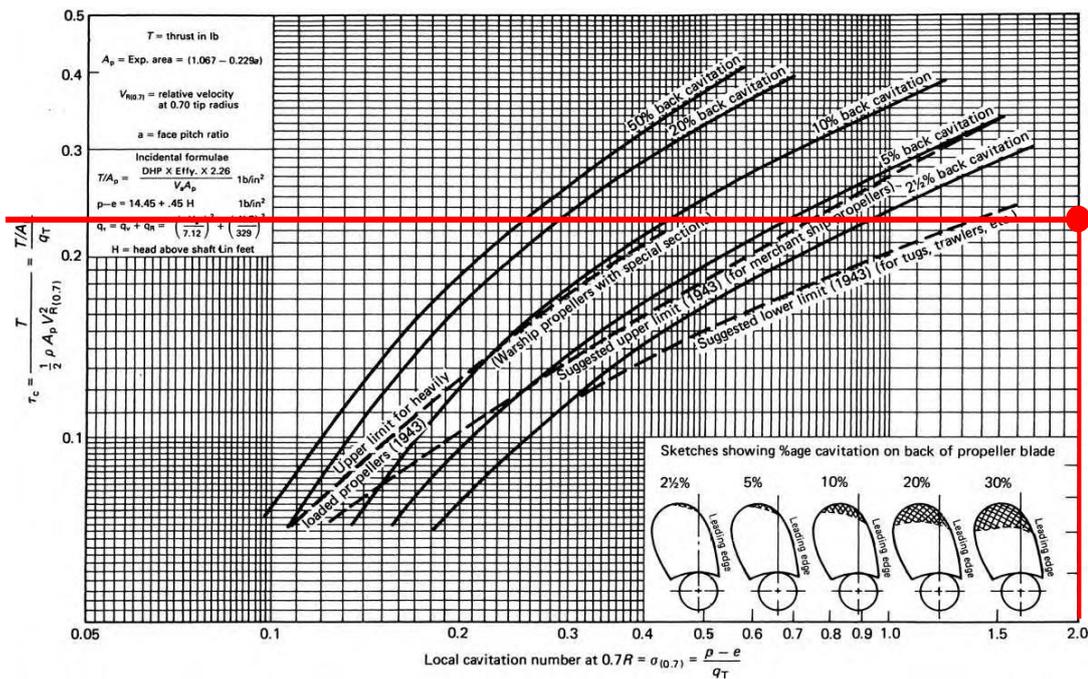
Tabela 7 - Critérios de cavitação do hélice selecionado.

Critérios de cavitação	
$V_r$	9,78 m/s
$A_p$	0,0043 m <sup>2</sup>
$\tau_{0,7}$	2,07
$\tau_c$	0,26

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Aplicando-se os valores calculados na Tabela 7 no Gráfico 3 do diagrama de Burrill, encontra-se o ponto de operação do hélice.

Gráfico 3 - Diagrama de Burrill para o hélice selecionado.



Fonte: Modificado pelo autor (2017).

Visto que nesta configuração a velocidade de avanço é baixa (apenas a de sucção), temos como principal componente de velocidade a rotação do propulsor. Vale a pena ressaltar que as áreas das pás foram superdimensionadas na tentativa de minimizar ou se afastar o máximo possível da curva que descreve os limites de cavitação. Outro aspecto observado durante a seleção do hélice, é um pequeno aumento no  $K_t$  do hélice com elevação da razão de

áreas  $\frac{A_e}{A_0}$  para J muito baixo, apesar desse aumento de área das pás ocasionar um efeito indesejado, o aumento da resistência de atrito das pás com o fluido. Contudo, o aumento do empuxo ocasionado pelo aumento de  $K_t$  é relevante a aplicações de reboque a baixas velocidades, além de fornecer uma margem de segurança maior contra a ocorrência de cavitação.

### 3.3 MODELAGEM DO HÉLICE

Estabelecendo qual será o hélice utilizado, foi realizado a modelagem a fim de auxiliar futuramente na fabricação dos mesmos. Essa modelagem foi realizada com auxílio do software desenvolvido por Lascada (2016) que gera de forma automatizada, as curvas paramétricas dos perfis do hélice para a série B de Wageningen.

Para a geração das curvas paramétricas, é necessário ter como dados de entrada no programa as seguintes informações apresentadas na Tabela 8:

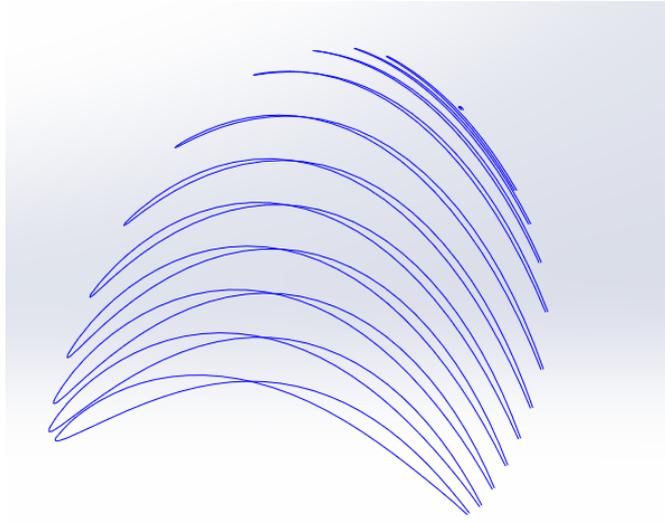
Tabela 8 - Dados de entrada no *software* de modelagem paramétrica da série B.

Dados de entrada no programa	
Diâmetro	80 mm
Número de pás [Z]	3
Razões de áreas [BAR]	1,00
Relação passo-diâmetro [P/D]	0,90

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Inserindo esses dados no software, é gerado as curvas características da geometria da pá em curvas definidas por ponto. Estes pontos foram carregados em outro *software* de modelagem 3D através do comando de *Splines*, formando um esqueleto da geometria da pá conforme a Figura 15.

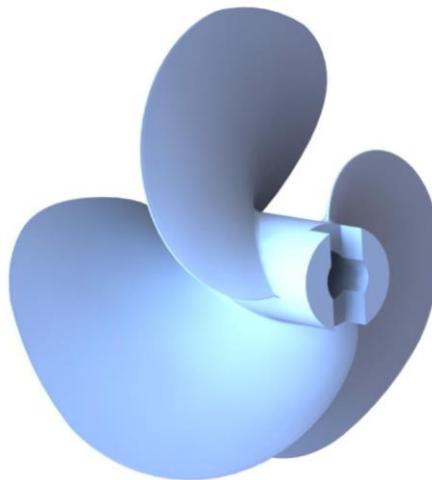
Figura 16 - Curvas da pá gerados pelo comando de Splines.



Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

As *splines* geradas foram unidas em três superfícies com a utilização do comando *Loft*. As superfícies foram unidas para a geração de um sólido e assim, o modelamento por completo do hélice, cujo resultado final pode ser observado na Figura 16.

Figura 17 - Resultado final da geometria do hélice.



Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

### 3.4 FABRICAÇÃO DO HÉLICE

Após o processo de seleção e modelagem do hélice, iniciou-se a etapa de construção. Os métodos de fabricação disponíveis para a fabricação dos hélices foram bem escassos, necessitando das habilidades manuais do autor para conformação manual das chapas utilizando um gabarito um um martelo.

Para auxiliar no processo de conformação, foi realizado a confecção do hélice em escala real 1:1 utilizando uma impressora 3D. Este protótipo da Figura 17 servirá como modelo para a confecção dos gabaritos utilizados na fabricação dos hélices.

Figura 18 - Hélices impressas em 3D.



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

O material escolhido para a fabricação foi o latão devido a sua facilidade de conformação a frio e brasagem. Maiores informações podem ser encontradas na literatura *Marine Propellers and Propulsion*, capítulo 18, onde o autor apresenta uma gama de materiais e suas respectivas características para a aplicação na fabricação de hélices navais. Na Figura 18 é mostrado o material cortado e pronto para a conformação.

Figura 19 - Material cortado (esquerda) e proceso de conformação (direita).



Fonte: Autor (2017).

Logo após esse processo, o conjunto foi posto no gabarito de montagem e realizado a brasagem para união das pás ao eixo. Finalizado o processo de montagem, foi realizado um acabamento superficial com lixa, a fim de tirar todo vestígio da brasagem. A construção do perfil dos bordos de ataque e de fuga foi feita afilando as extremidades seguindo um perfil semi-ogival. É possível observar na Figura 19 que também foi melhorada a região da raiz da pá, suavizando-a para um melhor fluxo e diminuindo as regiões de cantos vivos.

Figura 20 - Processo de brasagem (esquerda) e suavização de cantos vivos (direita).



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Após todo o processo de construção dos hélices, foi realizado uma pintura e polimento para minimizar quaisquer irregularidades na superfície e diminuir a resistência por atrito. Na Figura 20 é possível verificar os hélices finalizados e montados na embarcação.

Figura 21 - Hélices finalizadas (esquerda) e montagem na embarcação (direita).



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

### 3.5 CARACTERÍSTICAS DO HÉLICE ANTIGO

Para realizar os ensaios comparativos, foram adquiridos os hélices que eram utilizados pela embarcação durante a competição nos anos anteriores ao novo propulsor. Por se tratar de um hélice comercial com pouca informação, não se possui a origem da série do hélice. As dimensões apresentadas na Tabela 9, foram medidas pelo próprio autor.

Tabela 9 - Dados do hélice comercial.

Dados do Hélice 47	
Diâmetro	47 mm
Número de pás [Z]	3
Razões de áreas [BAR]	0,95
Relação passo-diâmetro [P/D]	1,6

Fonte: Autor (2017).

Para uma melhor visualização do hélice utilizado, a imagem real dos hélices é apresentada na Figura 21.

Figura 22 - Hélices comerciais utilizadas pela equipe.



Fonte: Autor (2017)

Para uma melhor nomenclatura e visualização das diferenças dos hélices, abaixo na Tabela 10 encontram-se os nomes e os parâmetros de cada hélice

Tabela 10 - Dados dos propulsores.

			
Hélice 80mm		Hélice 47mm	
Diâmetro	80 mm	Diâmetro	47 mm
Número de pás [Z]	3	Número de pás [Z]	3
Razões de áreas [BAR]	1,00	Razões de áreas [BAR]	0,85
Relação passo-diâmetro [P/D]	0,90	Relação passo-diâmetro [P/D]	1,6

Fonte: Autor (2017).

A partir deste ponto os hélices serão referenciados pelos seus respectivos nomes apresentados na tabela.

### 3.6 PREPARAÇÃO DO MODELO E EQUIPAMENTOS

Para a realização dos ensaios, foram necessários adquirir os seguintes itens listados na Tabela 11.

Tabela 11 - Itens utilizados nos ensaios.

Itens utilizados nos ensaios	
Corda	Ø 6 mm x 10 m
Balança digital	0 – 25 kg resolução de 2g
Termômetro digital	-70° C – +90° C resolução 0,1° C
Tacômetro digital	0 – 9999 rpm resolução 0,5 rpm
Voltímetro digital	LiPo 2 – 8 S
Câmera filmadora	Taxa de quadros 240 fps
Câmera filmadora	Taxa de quadros 30 fps
Piscina	7 x 3 x 1,6 m (C x L x P)
Suporte tripé para câmera	0,4 – 1,7 m de altura

Fonte: Autor (2017).

Além dos itens acima, foram utilizados na embarcação todos os itens para o seu funcionamento, como bateria LiPo 3S 5000 mA devidamente carregada, controle, receptor e servos.

Foi tomado o cuidado para que as condições ambientais nos locais de ensaios fossem as mais controladas possíveis, a fim de garantir uma uniformidade dos resultados. Além dos cuidados específicos de cada ensaio, alguns critérios foram aplicados a todos os ensaios como:

- Parada do ensaio na presença de ondas;
- Parada do ensaio na verificação de recirculação do fluido;
- Parada do ensaio na presença de ventos suficientemente fortes para movimentar a embarcação (em todos os ensaios a presença de vento foi insignificante ou nulo).
- Parada do ensaio na queda de 1 volts na bateria.

Algumas outras informações ambientais e dos componentes mensurados durante o ensaio estão mostradas na Tabela 12:

Tabela 1 - Condições ambientais nos ensaios.

	Ensaio de Bollard Pull e Cavitação	Ensaio de Velocidade
Temperatura dos motores	41° C	45° C
Temperatura dos ESC's	35,6° C	37° C
Temperatura da água	20,5° C	21° C
Temperatura do ar	24° C	27° C
Velocidade do vento	Próximo a zero ou nulo	Leve brisa perpendicular ao ensaio

Fonte: Autor (2017).

A aplicação e configuração de cada item será melhor apresentado em cada ensaio.

### 3.6.1 Ensaio de tração estática – bollard pull

Como primeira e principal forma de avaliar o desempenho entre os dois hélices, foi proposto um ensaio quantitativo de tração estática. Para a realização dos ensaios da melhor maneira possível, buscou-se normas que regulamentem este tipo de ensaio como a NORMAM 01. Observou-se que não existe ensaio específico para embarcações elétricas deste porte, portanto, foi proposto algumas modificações ao ensaio normatizado. A norma completa do ensaio encontra-se no ANEXO A.

O local escolhido para o ensaio foi numa piscina respeitando alguns limites estipulados pela norma como:

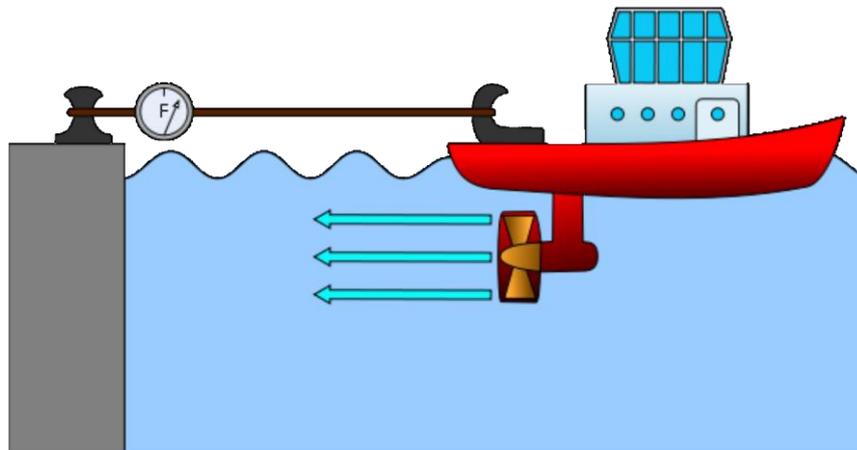
- Profundidade mínima no local do ensaio em um raio de pelo menos quatro vezes o comprimento da embarcação não deverá ser inferior a quatro vezes o seu calado máximo;
- A velocidade do vento durante o ensaio não deverá exceder a 5 m/s.
- O ensaio deverá ser realizado em águas tranquilas.

Outros limites estipulados pela norma não foram atendidos por limitações de espaço e autonomia da bateria:

- Comprimento do cabo deverá ser no mínimo dez vezes o comprimento da embarcação;
- As condições de ensaio devem ser no mínimo igual a 70, 80, 90 e 100% da rotação máxima a ser estipulada pelo interessado tal que esta rotação possa ser mantida por um período de, no mínimo, 30 minutos.

A embarcação foi fixada ao cabo por um olhal na extremidade da popa, esse cabo tem um comprimento total de 5m que, por sua vez, foi fixado à balança digital e amarrado a um ponto fixo na margem da piscina, como é mostrado na Figura 22.

Figura 23 - Ensaio de *bollard pull*.



Fonte: *Wikipedia* (2017).

O ensaio foi realizado em lugar de relativa profundidade em relação a distância de atracação, com finalidade de minimizar interferências com o fundo da piscina. O ensaio foi realizado em local com profundidade de 1,6 metros.

O ensaio foi realizado de modo que pudesse ser mensurado a curva de empuxo x rotação do propulsor. Para tal feito, foram utilizadas duas câmeras para fazer o registro dos equipamentos de medição (tacômetro e balança digital) e posterior verificação dos valores. O ensaio foi realizado de forma escalonada da potência dos motores, elevando a potência no controle em 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, e 100%, deixando a embarcação estabilizar por aproximadamente 5 segundos e realizando medições do empuxo e rotação a cada 1 segundo, até a coleta de aproximadamente 8 medições para cada faixa de rotação.

Para minimizar a queda de potência devido à queda de tensão da bateria, no ensaio foi realizado o controle da tensão da bateria. Foi estipulado que a queda de tensão de 1 volts (12,5 volts carregado) na bateria seria o limite para interrupção dos ensaios e que a bateria fosse novamente recarregada. No ensaio, foi necessário realizar os testes em cinco repetições, iniciando com a potência sempre menor a do último ensaio, para verificar possíveis variações da queda de tensão e cobrir toda a faixa de potência do motor.

### 3.6.2 Ensaio de cavitação

A ocorrência de cavitação é extremamente prejudicial ao sistema propulsivo da embarcação, seja por queda no desempenho ou, em caso extremo, a quebra do propulsor. Nesse âmbito de mensurar a ocorrência da cavitação no Hélice 80mm e no Hélice 47mm, foi proposto um ensaio qualitativo por imagem.

A embarcação foi fixada a um cabo, este por sua vez foi fixado a um ponto fixo na extremidade da piscina, semelhante ao ensaio de tração estática, porém sem a balança digital. Na lateral da embarcação, próximo ao propulsor, foi fixado a câmera esportiva com uma taxa de 240 fps, ou seja, uma taxa de 240 quadros por segundos. Semelhante ao ensaio de tração estática, foi controlada a rotação do propulsor com o auxílio do tacômetro.

O ensaio foi subdividido em 4 ensaios para cada hélice, com a medição ocorrendo em rotações que compreendessem 25, 50, 75 e 100% da rotação de cada propulsor.

O ensaio iniciou primeiramente com o Hélice 80mm variando a rotação de mínima até a máxima como mostrado na Tabela 13 e posteriormente realizado com o Hélice 47mm.

Tabela 13 - Faixa de rotação para cada hélice.

Faixa de operação [rpm]		
	Hélice 80mm	Hélice 47mm
25%	1153,5	1060,5
50%	1646,5	2121,0
75%	2139,0	3181,5
100%	2632,0	4241,5

Fonte: Autor (2017).

### 3.6.3 Ensaio de velocidade

A realização do ensaio de velocidade visa analisar a velocidade média da embarcação com os diferentes sistemas propulsivos. Foi utilizado um tacômetro digital para registrar a rotação do motor e uma câmera filmadora com uma taxa de 30 fps para determinar a velocidade da embarcação.

A velocidade é determinada realizando a medição do número de quadros necessários para o deslocamento de um ponto específico, percorrendo uma distância padrão perpendicular à lente da câmera. Esse número de quadros é determinado utilizando um software de edição de vídeo, informando uma medida padrão de 1,10 m, correspondente ao comprimento máximo da embarcação. Na Tabela 14 é mostrado um exemplo de como são realizados esses cálculos. Essa técnica é simples e não há custos com equipamentos sofisticados, gerando um erro de magnitude aceitável ao experimento, na ordem de aproximadamente 0,0367 m/s. Para reduzir esse erro na medição, precisa-se apenas aumentar a taxa de quadros por segundo.

Tabela 2 - Cálculo de velocidade para a embarcação.

Número de quadros [n]	Distância padrão [dp]	Equação	Velocidade [m/s]
45	1,10 metros	$\frac{30}{n} \times dp$	0,73
25			1,32
14			2,36

Fonte: Autor (2017).

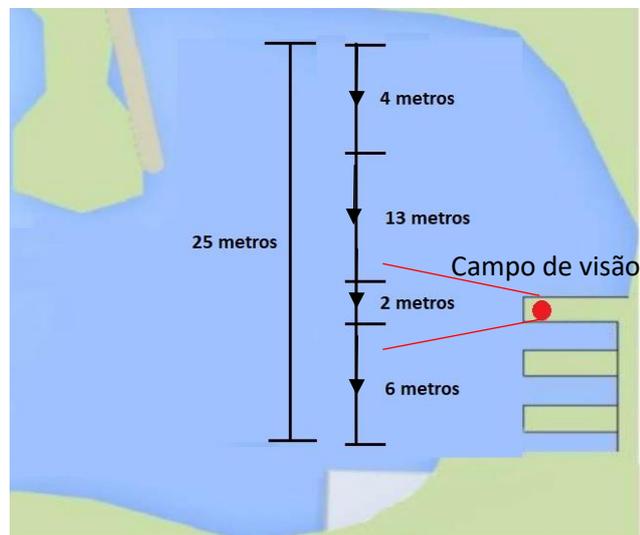
O ensaio foi realizado em um espaço de maiores proporções devido a necessidade de espaço para a embarcação percorrer. O experimento ocorreu em um lago com dimensões de aproximadamente 25 x 60 metros com profundidade de 1,5 metros. As distâncias são mostradas na Tabela 15 e o desenho esquemático do local da câmera e o percurso da embarcação percorrido em cada ensaio na Figura 24.

Tabela 15 - Percurso da embarcação no ensaio de velocidade.

Percurso da embarcação	
Aceleração	4 metros
Estabilização da velocidade	13 metros
Local de medição	2 metros
Desaceleração	6 metros

Fonte: Autor (2017).

Figura 24 - Desenho esquemático do percurso no ensaio de velocidade.



Fonte: Autor (2017).

O ponto vermelho na figura define o local da câmera estacionária que será utilizada para determinar a velocidade da embarcação, esta câmera está apoiada sobre um suporte e com a lente apontada para a esquerda.

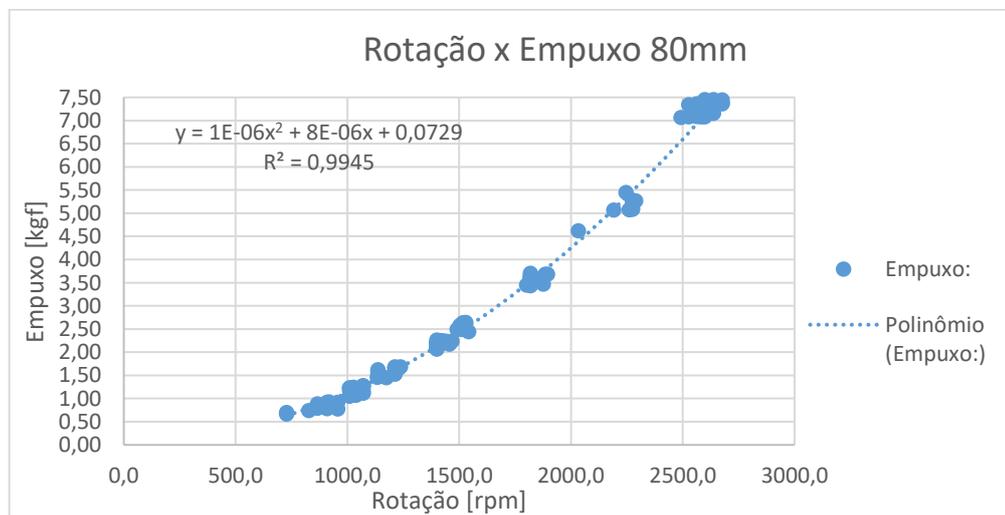
## 4 RESULTADOS E ANÁLISES DOS ENSAIOS

Os resultados dos ensaios serão apresentados e discutidos separadamente para melhor entendimento e organização.

### 4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE BOLLARD PULL

O ensaio foi realizado primeiramente com o Hélices 80mm, que teoricamente apresentaria um melhor desempenho. Para levantar a curva de Rotação X Empuxo foram realizadas 134 medições, os dados coletados são mostrados no Gráfico 4.

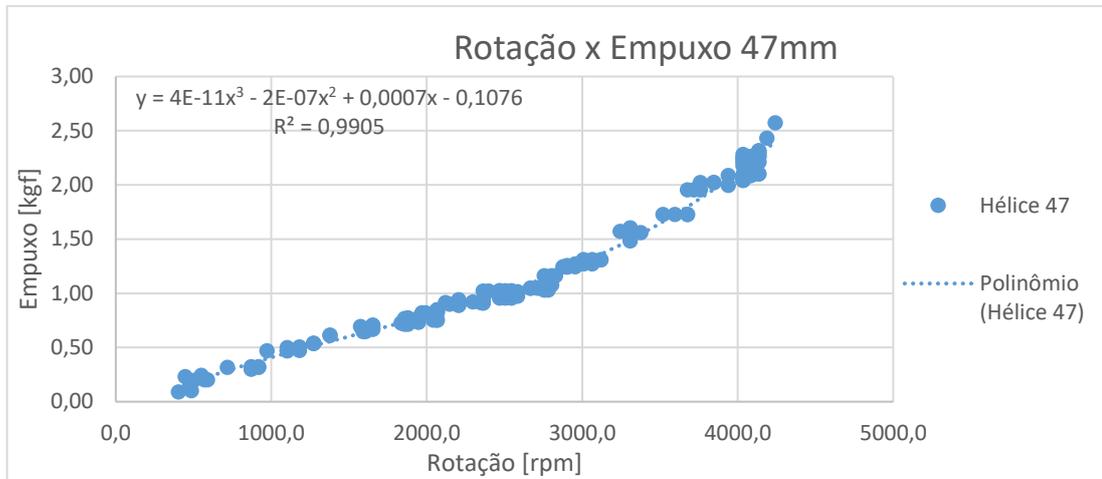
Gráfico 4 - Dados de rotação e empuxo do Hélice 80mm.



Fonte: Autor (2017).

De forma análoga, os ensaios foram realizados utilizando o Hélice 47mm nas mesmas condições que o Hélice 80mm. Contudo, foi realizado um número maior de medições devido a autonomia da bateria, totalizando 162 medições de Rotação X Empuxo. Os dados coletados são mostrados no Gráfico 5.

Gráfico 5 - Dados de rotação e empuxo do Hélice 47mm.



Fonte: Autor (2017).

#### 4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS DE BOLLARD PULL

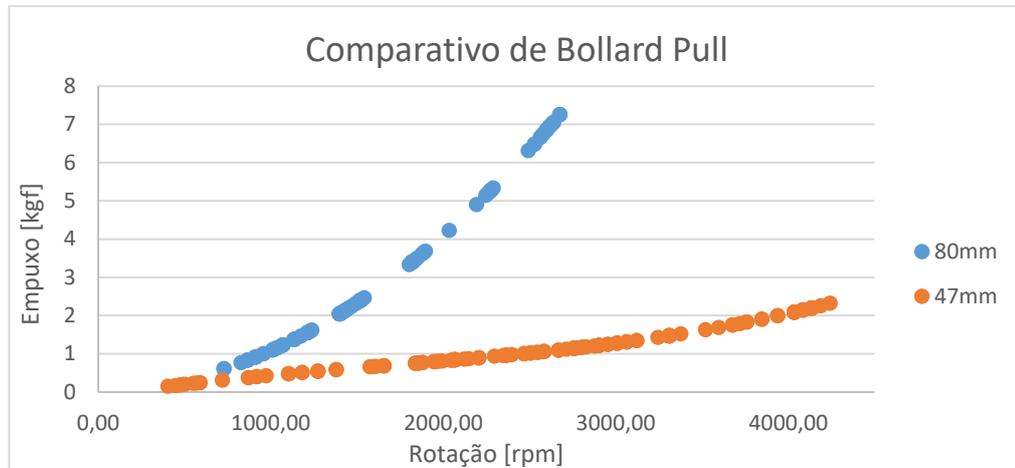
O desempenho do Hélice 80mm foi um pouco abaixo do resultado esperado. Pelo projeto o empuxo deveria ser próximo à 10,9 kg. Possíveis erros da geometria na fabricação e a falta do perfil hidrodinâmico na pá do propulsor podem ter influenciado no resultado. Outra fonte de erro é a tensão aplicada aos motores. A tensão de fábrica estipulada para esses motores é de 13 volts, porém, a bateria fornecia em média apenas 12 volts, o que pode ter contribuído para que o motor não chegasse a rotação de projeto dos hélices que é de aproximadamente 3335 rpm. Nos ensaios a rotação máxima para o Hélice 80mm foi de apenas 2637,36 rpm.

Utilizando a curva de tendência do empuxo do Hélice 80mm mostrada no Gráfico 4, o empuxo fornecido seria de aproximadamente 11,2 kg, muito mais próximo do calculado analiticamente.

O desempenho do Hélice 47mm apresentou um comportamento diferente do Hélice 80mm. A curva que descreve o seu empuxo com o aumento da rotação é uma curva cúbica, como é possível notar no Gráfico 5. O Hélice 47mm apresentou baixo empuxo quando comparado ao Hélice 80mm, provavelmente devido ao seu menor diâmetro.

É importante notar que a rotação do Hélice 47mm é muito maior ao Hélice 80mm, com rotações máxima de 4241,91 e 2637,36 respectivamente. Contudo, o seu menor diâmetro indica ser incapaz de gerar um empuxo próximo do Hélice 80mm nessa faixa de rotações como é apresentado no Gráfico 6.

Gráfico 6 - Comparação de empuxo entre os hélices.



Fonte: Autor (2017).

O ensaio busca primeiramente realizar um comparativo entre os dois propulsores, e para tal feito, a faixa de rotação deveria ser a mesma para reduzir o número de variáveis no problema. Para justificar e entender o porquê da grande variação da faixa de rotação, foram buscadas informações do catálogo do motor, verificando-se tratar de um motor de corrente contínua com o enrolamento de campo ligado em série com o enrolamento da armadura. Esses motores exibem altos torques quando em carga. O torque resistente exigirá maior intensidade de corrente da fonte de alimentação, pois o torque desenvolvido pelo motor é proporcional a esta corrente de armadura. Mas no caso do motor em série, isto produzirá um aumento do fluxo por polo, ou seja, magnetizará mais o motor, pois a corrente de armadura é também a corrente de excitação. A relação entre torque e velocidade do motor de corrente contínua em série é inversa, ou seja, para o acréscimo de torque tem-se o decréscimo de velocidade e vice-versa.

Com o intuito de simplificação de equações e verificar a curva Velocidade-Conjugado do motor série, o circuito magnético do motor não satura. Nesta condição tem-se o fluxo magnético proporcional a corrente de excitação conforme a Equação 8:

$$k\phi = k_1 I_{exc} \quad (8)$$

Onde:

- $k\phi$ , fluxo magnético [Weber];
- $k_1$ , constante construtiva do motor;
- $I_{exc}$ , corrente de excitação da armadura [A]

Mas por característica construtiva do motor série  $I_a = I_{exc}$ , o que produz  $k\phi = k_1 I_a$ . Assim, para um motor série, segue o conjunto de Equações 9, 10 e 11:

$$V_a = R_a I_a + E_a \quad (9)$$

$$k\phi I_a = C_{\acute{u}til} + C_{atrito} \quad (10)$$

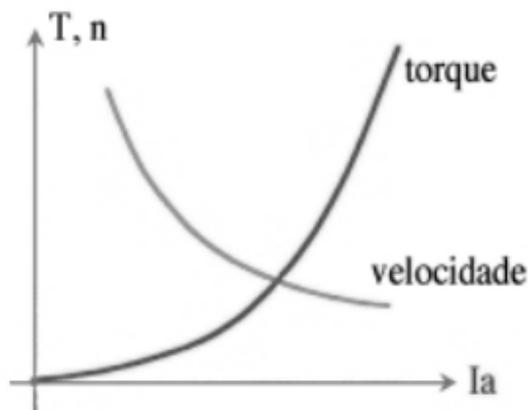
$$E_a = k\phi\omega \quad (11)$$

Onde:

- $V_a$ , tensão aplicado aos terminais das bobinas da armadura [V];
- $R_a$ , resist\^encia das bobinas da armadura \^a passagem da corrente [Ohm]
- $I_a$ , corrente el\^etrica da armadura [A]
- $E_a$ , energia eletromagn\^etica na armadura devido a rota\^c\~ao do rotor;
- $C_{\acute{u}til}$ , carga \acute{u}til aplicada ao eixo do motor [N.m];
- $C_{atrito}$ , carga de atrito com o ar e aos mancais do eixo [N.m];
- $\omega$ , rota\^c\~ao angular do eixo do motor [rad/s]

A Equa\~c\~ao 9 compreende o circuito el\^etrico, a Equa\~c\~ao 10 representa a energia mec\~anica e a Equa\~c\~ao 11 descreve a energia eletromagn\^etica. Esse conjunto de equa\~c\~oes descrevem o comportamento din\~amico do motor que pode ser melhor compreendido na Figura 24.

Figura 25 - Diagrama de rota\~c\~ao e torque do motor CC em s\^erie.

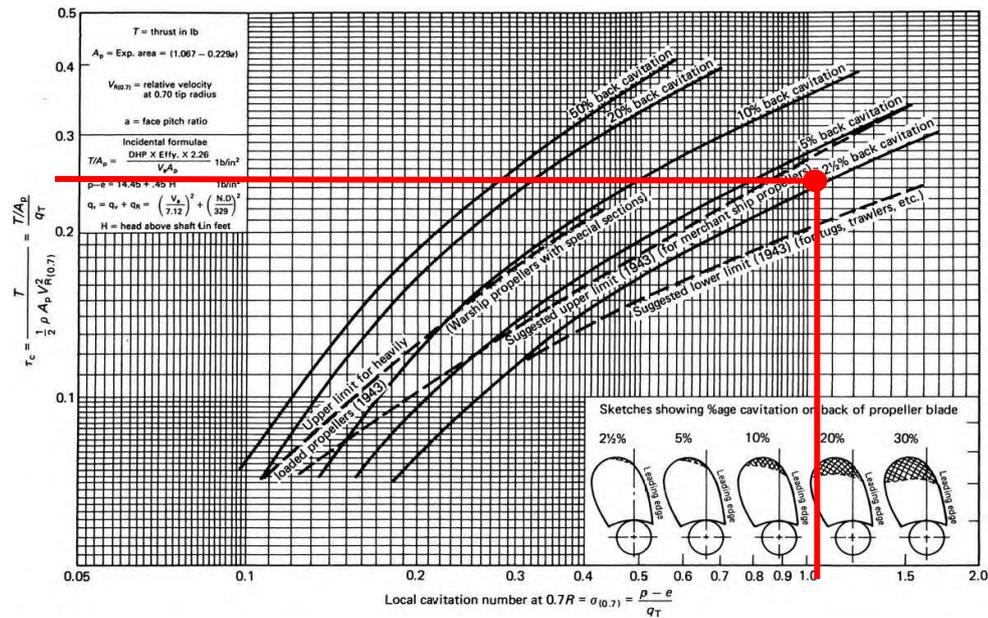


Fonte: Franca (2001)

Outro fator que devemos avaliar no desempenho dos hélices é o fator de escala, ou seja, a diferença dos diâmetros ensaiados. Com o intuito de fornecer uma análise com diâmetros semelhantes, foi realizado novamente os cálculos de empuxo para o hélice projetado, porém, desta vez utilizando o mesmo diâmetro do Hélice 47mm, reduzindo-o em escala até o diâmetro de 47mm. Utilizando a potência do motor para encontrar o novo  $K_q$ , a rotação esperada para o hélice é de 8169 rpm e um empuxo teórico de aproximadamente 3,52 kg, ainda assim, acima do gerado pelo Hélice 47mm.

Verificando a ocorrência de cavitação pelo diagrama de Burrill, o ponto de operação mudou drasticamente, resultando em  $\sigma_{0,7} = 1,01$  e  $\tau_c = 0,25$ , encontrando-se acima do critério de 2% de cavitação, como mostrados na Figura 25.

Figura 26 - Diagrama de Burrill para o hélice projetado em escala reduzida.

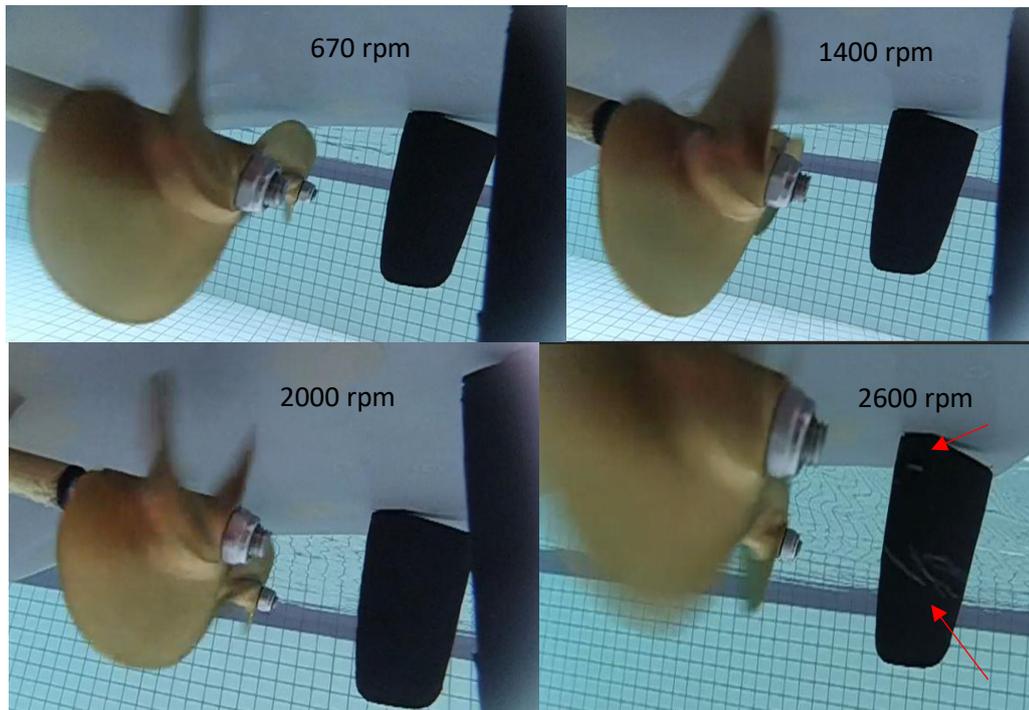


Fonte: John Carlton (adaptado pelo autor, 2017).

#### 4.3 RESULTADOS DO ENSAIO DE CAVITAÇÃO

As imagens capturadas nos ensaios de cavitação são mostradas na Figuras 26, primeiramente para o Hélice 80mm nos quatro pontos de rotação para a medição.

Figura 27 - Ensaio de cavitação do Hélice 80mm.



Fonte: Autor (2017).

Verificando a cavitação apenas em máxima rotação, foram realizados ensaios auxiliares para melhor visualização. Estas imagens são mostradas na Figura 27.

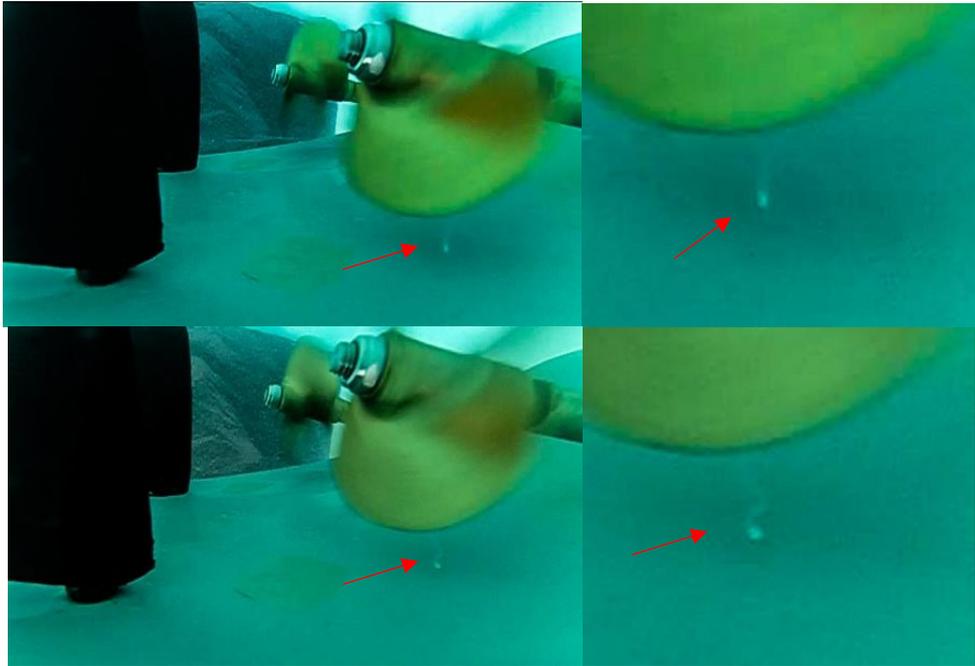
Figura 28 - Ocorrência de cavitação no Hélice 80mm.



Fonte: Autor (2017).

Foi verificado outro fenômeno de cavitação que também pode ocorrer quando o hélice se encontra muito próximo do casco da embarcação ou com velocidade de avanço muito baixo. Este tipo de cavitação é chamado de vórtice entre hélice e o casco e é mostrada em destaque na Figura 28.

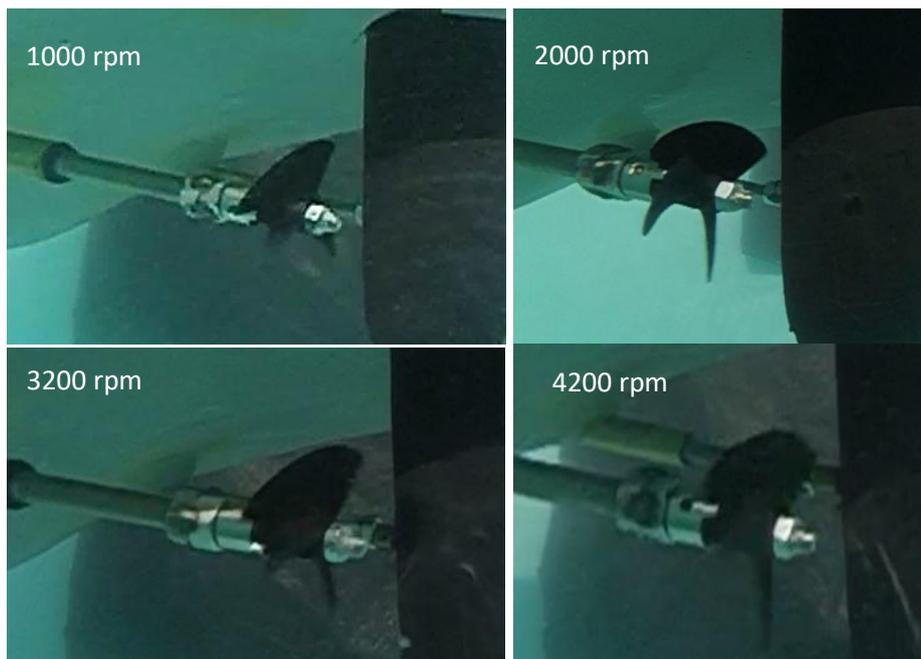
Figura 29 - Verificação da cavitação de vórtice entre o hélice e o casco.



Fonte: Autos (2017).

Seguindo a mesma metodologia, foi ensaiado o teste de cavitação também ao Hélice 47mm. Na Figura 29 são mostradas as imagens capturadas para o Hélice 47mm.

Figura 30 - Ensaio de Cavitação no Hélice 47mm.



Fonte: Autor (2017).

#### 4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS DE CAVITAÇÃO

Os resultados foram muito satisfatórios no requisito cavitação, embora tenham ocorridos pequenos pontos de cavitação no ensaio do Hélice 80mm. Os únicos tipos de cavitação visualizados foram os do tipo vórtice entre hélice e casco e do tipo cubo do eixo, mesmo assim de forma muito suave e pouco frequente. Não foi possível verificar outros tipos de cavitação como o de bolhas ou bolsa no dorso das pás, nem o de vórtice nas extremidades das pás, talvez pelo método utilizado ou pelo fato de não terem ocorrido nos ensaios.

Devido a embarcação estar parada durante o ensaio, a parcela da velocidade de avanço é próxima a zero. Essa condição de ensaio reduz a velocidade de como a pá do hélice encontra o fluido, reduzindo as chances de formação de cavitação. Porém, essa parcela foi desconsiderada pela própria característica de operação deste tipo de embarcação, onde a velocidade de avanço em operação de reboque é muito baixa.

Um fator que pode ter contribuído para a ocorrência da cavitação é a vibração no eixo do hélice. O registro em vídeo forneceu com detalhes o deslocamento vertical formado pela extremidade do eixo durante a rotação. Essa medição foi realizada com o auxílio de uma ferramenta de sobreposição da captura, ajustando pontos em comum e criando regiões denominada “fantasmas”, onde há deslocamentos de objetos na imagem. Após determinar o deslocamento, é realizado a medição desta variação de deslocamento tendo uma medida conhecida e que esteja no plano da medição, neste caso o diâmetro do próprio eixo. Com essa técnica encontrou-se um deslocamento máximo de 1,22 mm em uma rotação completa do propulsor, como pode-se verificar na Figura 30.

Figura 31 - Deslocamento vertical na extremidade do eixo.



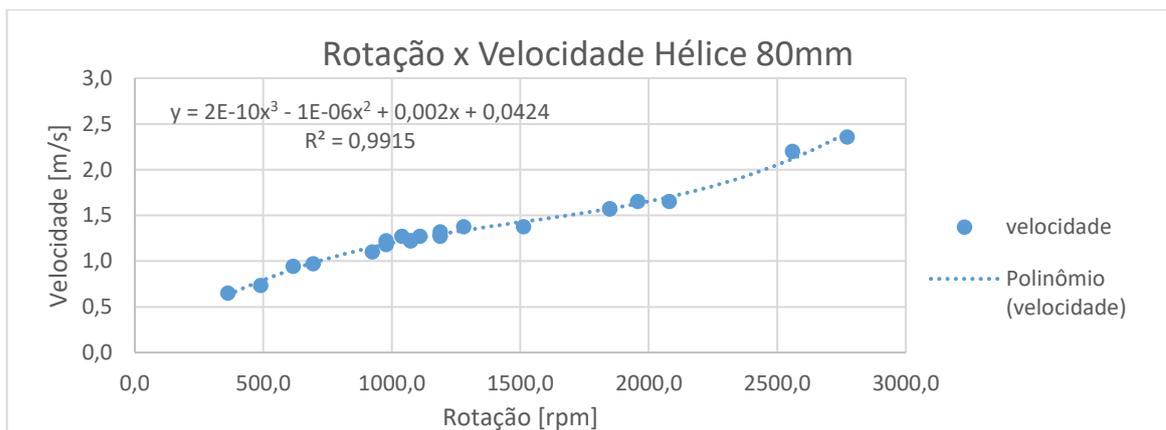
Fonte: Autor (2017).

Para o ensaio do Hélice 47mm não houve sinais de cavitação em nenhuma faixa de rotação. Apesar da rotação ser muito superior ao ensaio anterior, o diâmetro e o carregamento nas pás é muito menor, o que pode ter contribuído ao resultado.

#### 4.5 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE VELOCIDADE

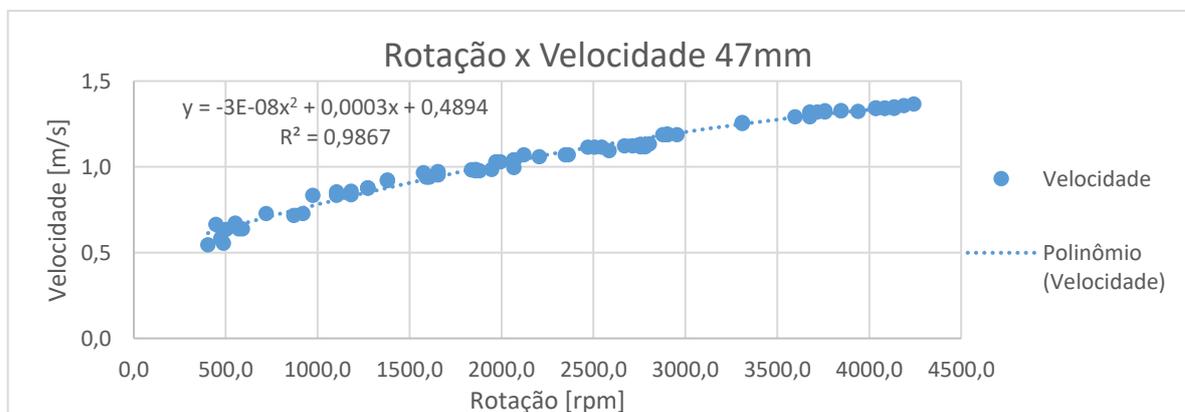
Realizando as medições em vídeo e posteriormente realizando a conversão dos quadros por segundo para a velocidade da embarcação. Foram compilados os dados da velocidade da embarcação em função da faixa de rotação de cada hélice. No Gráfico 7 e Gráfico 8 são mostradas as curvas que descrevem o comportamento da velocidade para o Hélice 80mm e o Hélice 47mm, respectivamente.

Gráfico 7 - Velocidade da embarcação com Hélice 80mm.



Fonte: Autor (2017).

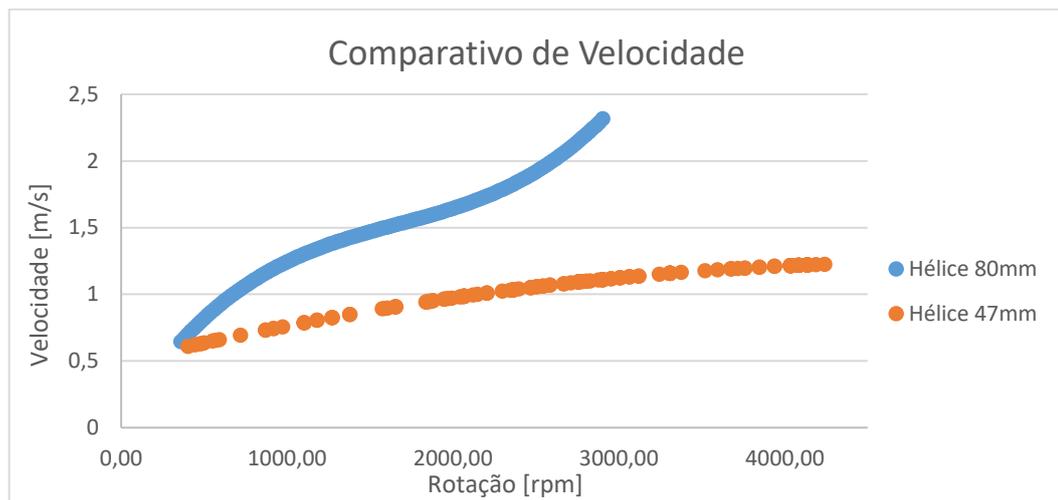
Gráfico 8 - Velocidade da embarcação com Hélice 47mm.



Fonte: Autor (2017).

Para melhor visualizar a diferença entre velocidade e rotação de cada hélice, é proposto um comparativo entre as duas curvas utilizando a ferramenta de curva de tendência. O comparativo é mostrado no Gráfico 9.

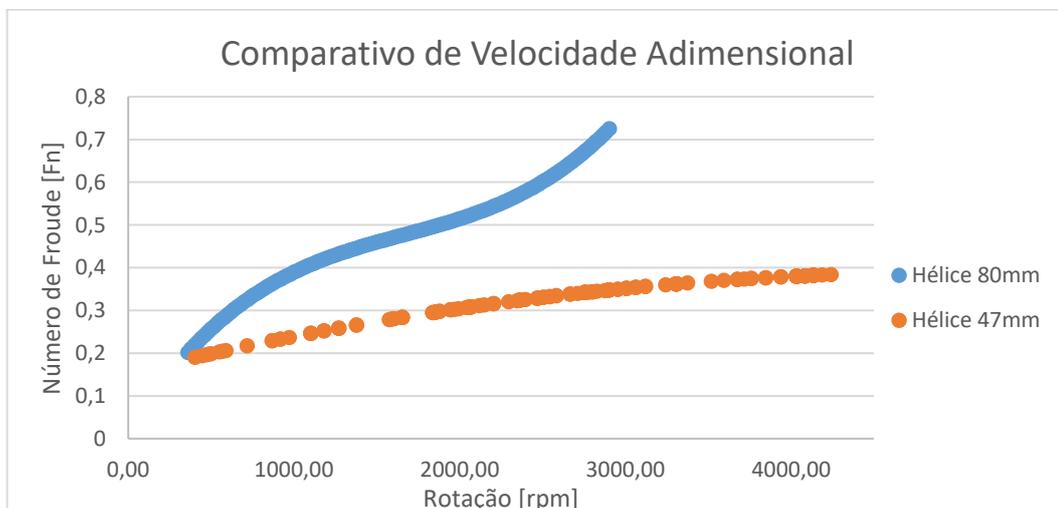
Gráfico 9 - Comparativos de velocidades.



Fonte: Autor (2017).

Outra informação muito importante que pode ser analisada utilizando os gráficos de velocidades é a natureza da resistência hidrodinâmica na embarcação. Tornando a velocidade adimensional, chega-se ao número de Froude (Fn). O Gráfico 10 mostra o Fn em função da rotação dos hélices.

Gráfico 10 - Comparativo de velocidade adimensional.



Fonte: Autor (2017).

#### 4.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS DE VELOCIDADES

O ensaio do Hélice 47mm ocorreu de forma gradativa e suave, embora a curva de empuxo para este hélice possua um comportamento cúbico conforme apresentado no Gráfico 5. Para a velocidade observou-se um comportamento quadrático, onde o aumento da rotação aproxima-se de um valor máximo de velocidade.

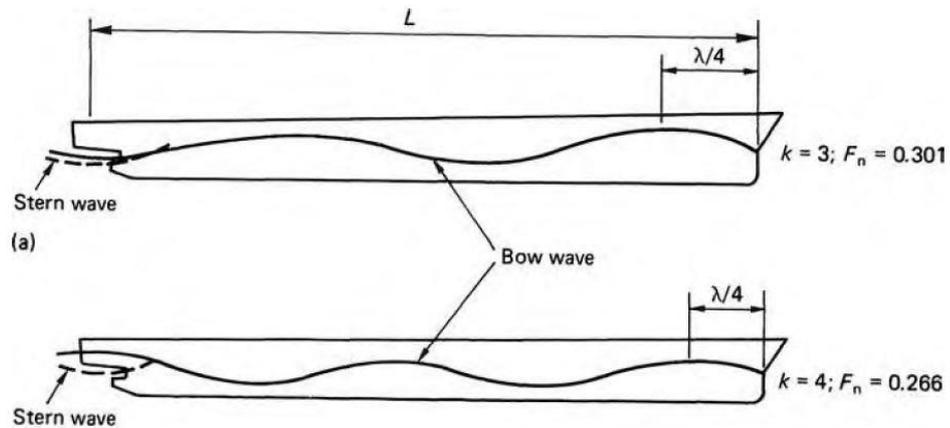
Com o conjunto propulsivo do Hélice 47mm, a velocidade atingida foi de aproximadamente 1,22 m/s. Esta velocidade pode ser considerada alta se confrontarmos com o número de Froude obtido de 0,38 para alguns cascos deslocante.

Analisando o desempenho do novo propulsor, observou-se velocidades muito acima do esperado e às obtidas pela embarcação em outras edições da competição. O alto empuxo gerado pelo propulsor possibilitou atingir velocidades consideradas muito altas para um casco deslocante. Como observado no Gráfico 10, o número de Froude obtido na condição de navegação da embarcação de 0,71, ultrapassando o pico de máxima resistência gerado por ondas. Esse fato pode ser explicado pelo excesso de potência embarcada e transferida de forma mais eficiente ao fluido, possibilitando a navegação a velocidades de aproximadamente 2,36 m/s.

Uma característica que pode ser observado no Gráfico 9 é o comportamento da velocidade em função do aumento da rotação. Observa-se um comportamento de dificultar o aumento da velocidade, necessitando de um aumento cada vez maior da rotação para acrescentar pouco aumento da velocidade. Entretanto, após o ponto de  $F_n = 0,5$  esse comportamento inverte, e o pouco aumento da rotação, aumenta consideravelmente a velocidade da embarcação conforme o Gráfico 10.

Esse comportamento é explicado pela interação construtiva e destrutiva das frentes de ondas criadas pela proa e popa mostradas na Figura 31, denominadas de ondas transversais.

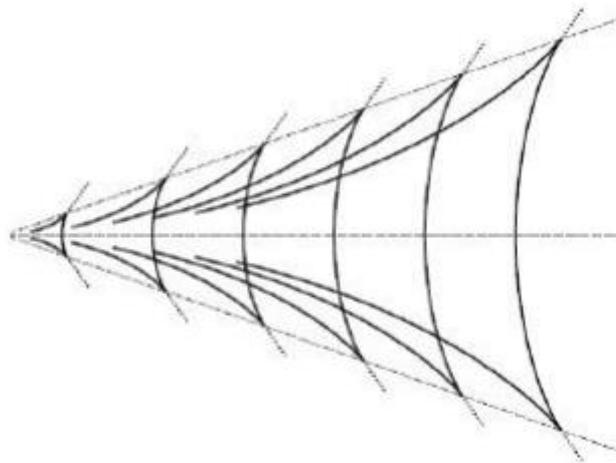
Figura 32 - Formação de ondas transversais pelo casco.



Fonte: John Carlton (2007, pag. 291).

Além desse fenômeno, ocorre a geração de ondas divergentes provenientes do ponto de pressão na proa da embarcação. O movimento da embarcação gera esses dois conjuntos de ondas formando a esteira de Kelvin, uma região em forma de cunha delimitada por linhas que fazem um ângulo de aproximadamente  $19,5^\circ$  com o plano diametral da embarcação, um desenho representativo é mostrado na Figura 32.

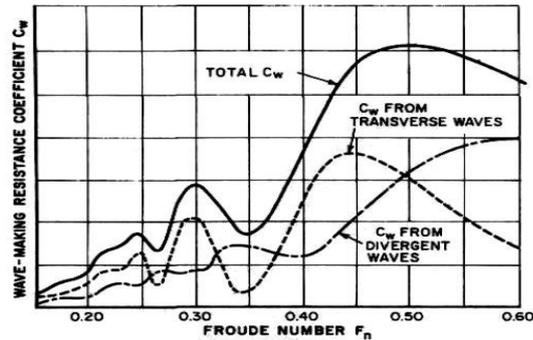
Figura 33 - Esteira de Kelvin em águas profundas.



Fonte: Lighthill (2001).

Com o auxílio do gráfico realizado por Wigley apresentado na Figura 33, onde analisou a contribuição de ondas transversais e divergentes para o coeficiente adimensional de resistência de ondas em função do número de Froude. É possível notar faixas de operação onde a resistência de ondas é minimizada pela interferência de ondas.

Figura 34 - Gráfico de Wigley.



Fonte: Lewis (1988, pag. 24)

Observa-se que até o  $F_n$  de 0,40 a contribuição de resistência das ondas divergentes é baixa, sendo as ondas transversais a maior parcela de resistência. Com o aumento da velocidade chega-se ao pior caso de navegação com número de Froude de 0,5, neste ponto a soma das duas parcelas de ondas atingem o máximo, aumentando a resistência de ondas da embarcação. Após esse ponto a contribuição de ondas transversal diminui tornando a parcela de ondas divergentes dominante na resistência de ondas, diminuindo a resistência total de ondas.

Na Figura 34 uma representação de navegação em ponto crítico, com muita resistência e perturbação na superfície do lago, em destaque a onda formada na popa da embarcação.

Figura 35 - Interação onda e casco com  $F_n = 0,53$ .

Fonte: Autor (2017).

Em **APÊNDICE A** é apresentado uma sequência de imagens com seus respectivos números de Froude, e o padrão de onda formada pela velocidade de deslocamento da embarcação.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho tratou de analisar e comparar dois hélices: o hélice comercial que a embarcação já vinha utilizando em edições anteriores da competição e o novo hélice projetado especificamente para as condições proposta para o DUNA-2017. Esta comparação ocorreu através de ensaios de tração estática, cavitação e velocidade de ambos os sistemas propulsores, procurando atingir os objetivos de selecionar o hélice que proporcionasse a embarcação a maior capacidade de tração estática e velocidade sem a ocorrência do fenômeno de cavitação.

O método de fabricação utilizado foi incomum e de pouco uso na fabricação de hélices, mas conseguiu-se um resultado surpreendente devido aos cuidados com as dimensões e alinhamento de todas as partes, além do acabamento dos bordos, raios na raiz das pás e polimento na superfície do hélice.

O processo de fabricação foi trabalho árduo e muito demorado devido a falta de equipamentos, porém, a dedicação e a atenção aos detalhes possibilitaram a confecção de um hélice com uma qualidade muito boa. Contudo, devido ao método utilizado, não foi possível realizar a confecção do perfil de asa do hélice, responsável parcial da geração de força de sustentação, ficando a cargo do ângulo de ataque a maior parcela de geração de empuxo.

Com o término dos ensaios e posterior análises de cada resultado obtido, constatou-se uma significativa melhora em todos os três tipos de ensaio no novo propulsor, demonstrando a importância do dimensionamento dos hélices principalmente tratando-se de uma competição, evento onde a embarcação é utilizada.

Mesmo utilizando uma série de hélices não muito recomendada para aplicação em embarcações de reboque, conseguiu-se resultados satisfatórios e bem promissores para a embarcação.

Os ensaios de empuxo, cavitação e velocidade foram realizados de forma simples, mas isto não comprometeu a obtenção de dados confiáveis. Os ensaios e o pós processamento de dados foram extensos, acumulando muito tempo na obtenção dos resultados. Os resultados, contudo, indicam que o efetivo dimensionamento do sistema propulsor rendeu resultados muito satisfatórios quando comparado ao hélice que a equipe utilizava. Além desses

resultados, os dados permitiram identificar pontos que necessitam ser melhorados no projeto, como o excesso de vibração no eixo do propulsor e a proximidade do hélice ao casco da embarcação.

A embarcação já vinha sendo a mais rápida em várias edições do DUNA, uma característica que não era tão importante quanto o empuxo gerado, mas que chamou muito a atenção devido a velocidade atingida pela embarcação com o novo sistema propulsivo. A velocidade não havia sido estimada por não conhecer a resistência do casco, porém, o desempenho foi realmente muito melhor quando comparado ao sistema de propulsão antigo.

Embora os ensaios de comparação dos dois hélices não tenham sido realizados nos mesmos diâmetros e mesma rotação de operação. Os resultados dos ensaios se mostraram em aplicação real da embarcação, representando os resultados reais desenvolvidos durante a competição, demonstrando que o diâmetro do hélice é um fator que impacta fortemente no desempenho final do sistema propulsivo.

Os ensaios de cavitação apresentaram bons resultados, fornecendo dados onde o projeto necessita ser melhorado, informações valiosas para a construção do próximo sistema propulsivo.

## 5.1 SUGESTÃO DE TRABALHO FUTURO

Ainda como sugestão de trabalhos futuros, pode-se realizar o dimensionamento de um outro hélice com outra série sistemática, por exemplo a série Kaplan, mais indicada para rebocados e embarcações que apresentam como principal característica alta capacidade de empuxo. Visto que os motores não podem ser trocados e o diâmetro máximo está limitado pela restrição do casco, a utilização de um hélice exclusivo para empuxo poderá aumentar a capacidade da embarcação e maximizar a potência em empuxo, obtendo assim, uma embarcação mais competitiva no evento DUNA ou quaisquer outras aplicações da embarcação para a função de reboque.

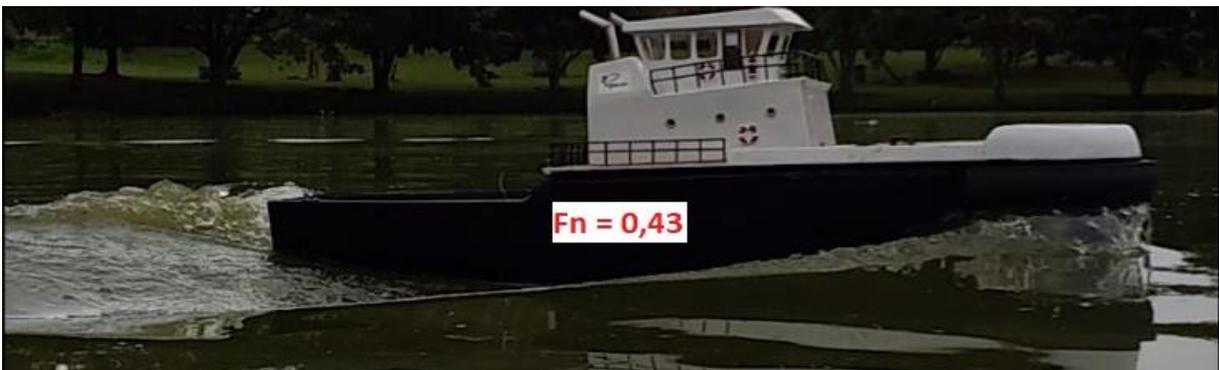
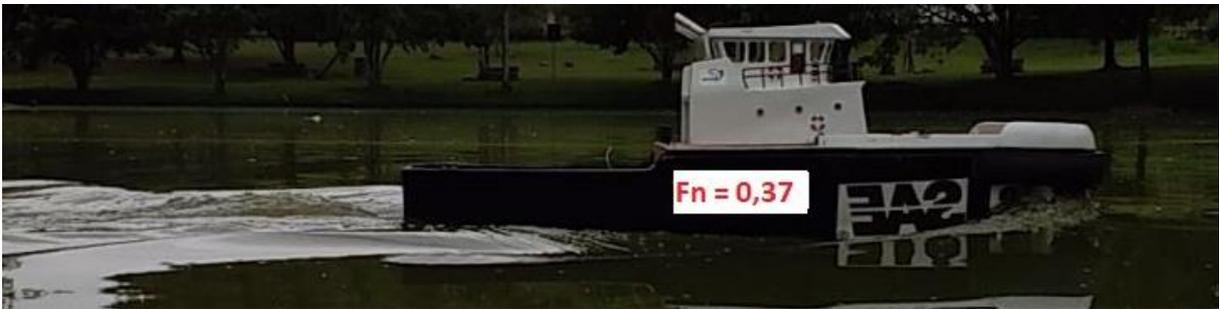
Para as equipes participantes interessadas ao título de Campeão DUNA fica a importância de se projetar um hélice exclusivo a cada embarcação, priorizando a característica fundamental de um rebocador, o empuxo estático.

## REFERÊNCIAS

- CARLTON, John. **Marine propellers and propulsion**. 2. ed. Oxford: Elsevier Ltd, 2007.
- MOLLAND, A.; TURNOC, S; HUDSON, D. **Ship resistance and propulsion: practical estimation of ship propulsive power**. USA: Cambridge University Press, 2011.
- SILVA, Otávio. **Rebocadores portuários**. Conselho Nacional de Praticagem, Rio de Janeiro. 2002.
- MENDES, Elisa. **Procedimento para seleção otimizada de um propulsor da série B**, 2015. p. 81. Monografia. Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville. 2015.
- SAMPAIO, H. *Blog Fl 145: Aviação e informação*. 2011. Disponível em: <<https://fl145.wordpress.com/>>. Acessado em 29 de novembro de 2017.
- LAMB, T. **Ship design and construction**. Jersey City: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2003. Volume I e Volume II.
- HERSEN, Henk. **Tug use in port a practical guide**. The Nautical Institute. 2003
- TRINDADE, Jorge. **Hidrodinâmica e propulsão: engenharia de máquinas marítimas**. Paço de Arcos: ENIDH, 2012.
- BRINATI, Hemani L. PNV 2324 **Instalações de máquinas marítimas**. Universidade de São Paulo, São Paulo. 2010.
- PINHEIRO, T. **Obtenção de torque e empuxo de propulsores através do uso de sistema de medição de eixo por telemetria**. 2014. Monografia (Graduação). Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2014.
- HOLTROP, J; MENNEN, G.G.J. **A statistical power prediction method, international shipbuiding progress**, Vol 25. Outubbro 1978.
- LEWIS, E.V. **Principles of naval architecture: resistance, propulsion and vibration, society of naval architects and marine engineers (SNAME)**. Jersey City, NJ (USA): The Society of Naval.1988. Vol. II.
- FRANÇA, André L. Morelato. **Introdução aos circuitos elétricos**. Universidade Estadual de Campinas, são Paulo, 2001.

## APÊNDICES

## APÊNDICE A – FORMAÇÃO DE ONDAS VARIANDO O NÚMERO DE FROUDE.





## ANEXOS

### ANEXO A – NORMAS ESTIPULADA PELA NORMAM 01 PARA ENSAIO DE TRAÇÃO ESTÁTICO.

#### ENSAIO DE TRAÇÃO ESTÁTICA LONGITUDINAL (*BOLLARD - PULL*)

##### 1 - DOCUMENTAÇÃO

- a) Deverão estar disponíveis a bordo no dia do ensaio, os seguintes documentos:
  - 1) certificados de aferição dos instrumentos de medição;
  - 2) manual da célula de carga; e
  - 3) certificado do cabo de ensaio.
- b) Nas embarcações com Arqueação Bruta superior a 20 deverá, adicionalmente, estar a bordo no dia do ensaio o Memorial Descritivo da embarcação.
- c) Nas embarcações Certificadas classe 1 (EC1) e nas embarcações Classificadas deverão, adicionalmente, estar a bordo no dia do ensaio os seguintes documentos, endossados pela Gerência de Vistorias, Inspeções e Perícias Técnicas (GEVI) - DPC, por uma Entidade Certificadora ou Sociedade Classificadora, conforme o caso:
  - 1) Plano de Arranjo Geral;
  - 2) Folheto de Trim e Estabilidade Definitivo; e
  - 3) Plano de Capacidade.
- d) É recomendável que estejam disponíveis a bordo no dia do ensaio, os seguintes documentos:
  - 1) manual do(s) motor(es);
  - 2) curva "potência x rotação do motor" (fabricante); e
  - 3) especificação do(s) propulsor(es).

##### 2 - EQUIPAMENTOS E ACESSÓRIOS

###### a) Aferição

- 1) Os instrumentos de medição utilizados na realização do teste, deverão estar aferidos por órgão credenciado pelo Instituto Nacional de Metrologia e Qualidade Industrial (INMETRO), com exceção do cronômetro, do anemômetro e da sonda manual.
- 2) A aferição inicial ou posterior do fabricante do equipamento somente será considerada válida caso o mesmo seja credenciado pelo INMETRO.

###### b) Célula de carga e seus acessórios

- 1) O ensaio deverá ser realizado utilizando-se uma célula de carga com resistência suficiente para suportar 1,5 vezes a tração estática prevista. Um equipamento de leitura contínua de força e/ou um equipamento de registro gráfico da tração em função do tempo deverá(ão) ser conectado(s) à célula de carga. Estes equipamentos deverão estar localizados a bordo sendo que, quando isto não for possível, a Entidade Certificadora, a Sociedade Classificadora ou a Diretoria de Portos e Costas (DPC) quando solicitada, deverá ser previamente consultada quanto à possibilidade de adoção de arranjos alternativos.
- 2) A célula de carga usada para o teste deverá ter sido aferida a não mais do que um ano antes do ensaio. Caso a célula de carga tenha sido utilizada em medições dinâmicas (vibrações) ou tenha sofrido choques mecânicos, esta deverá ser novamente aferida independentemente do prazo anteriormente citado.
- 3) A DPC poderá aceitar, mediante prévia consulta, outros equipamentos de medição de força.

###### c) Tacômetro

A leitura das rotações do(s) eixo(s) do(s) motor(es) principal(is) deverá(ão) ser feita(s) através do auxílio de tacômetro(s) digital(is) ótico(s) ou mecânico(s), que deverá(ão) ser independente(s) do(s) motor(s) principal(is).

###### d) Torciômetro

- 1) O uso de torciômetro é facultativo e a sua utilização ou não deverá ser determinada mediante acordo entre os interessados no ensaio.

2) O torçômetro, quando utilizado, deverá possuir características adequadas para a medição do torque esperado.

**e) Cronômetro**

O cronômetro utilizado deverá possuir acumulador de minutos.

**f) Anemômetro**

O anemômetro utilizado deverá ser adequado para utilização em ambientes externos e para permitir a leitura de uma velocidade de 5 m/s.

**g) Correntômetro**

O correntômetro deve permitir leitura de 1 (um) nó e não deve exigir facilidades para a sua operação tais como guincho, sarilho e outros.

**h) Sonda Manual**

Uma sonda manual deverá ser usada para medir a profundidade no local do ensaio. Caso a embarcação possua um ecobatímetro, tal sonda poderá ser dispensada.

**i) Cabo de ensaio e seus acessórios**

1) O cabo de ensaio e seus acessórios deverão estar em bom estado de conservação e possuir uma resistência à tração mínima de três vezes a tração estática esperada. Para uma estimativa preliminar da tração estática esperada, poderão ser utilizados os seguintes valores:

- (a) rebocador com tubulão 'kort' : 0,0165t/BHP instalado;
- (b) rebocador com sistema de propulsão especial: 0,0160t/BHP instalado; e
- (c) rebocador sem tubulão 'kort' : 0,0120t/BHP instalado.

2) O cabo deve possuir um comprimento mínimo de cinco vezes o comprimento da embarcação ou 100 m, o que for maior.

3) O estropo usado para a amarração no cabeço é considerado acessório do cabo.

**j) Cabeço de amarração**

1) O cabeço utilizado deve ser o melhor disponível no local do ensaio no tocante a resistência, estado de conservação e acesso.

2) A escolha do cabeço deve ser feita pelo interessado no ensaio o qual deve ter particular atenção às fundações e base do mesmo.

3) O cabeço deve possuir uma resistência mínima de três vezes a tração estática esperada.

**l) Sistema de Comunicação**

Um sistema de comunicação com equipamento VHF deverá ser estabelecido entre as estações de medida.

### 3 - CONDIÇÕES PARA O ENSAIO

**a) Condições ambientais**

1) A profundidade mínima no local do ensaio em um raio de pelo menos quatro vezes o comprimento da embarcação não deverá ser inferior a quatro vezes o seu calado máximo ou 10 metros, o que for maior. Caso a embarcação seja equipada com propulsor(es) cicloidal(is) ou do tipo "Schottel" localizado(s) abaixo da quilha, esta profundidade não deverá ser inferior a cinco vezes o calado da embarcação ou 10 metros, o que for maior.

2) A velocidade do vento durante o ensaio não deverá exceder a 5 m/s.

3) A corrente durante o ensaio não deverá exceder a 1 (um) nó em qualquer direção.

4) O ensaio deverá ser realizado em águas tranquilas.

#### **b) Condições da embarcação**

1) O teste deverá ser realizado com a embarcação em seu calado máximo de operação, ou seja, com a capacidade máxima de consumíveis e a quantidade de lastro prevista na condição de carga máxima analisada no Folheto de Estabilidade.

2) O trim não deverá ser superior a 2% do comprimento da embarcação (referente à linha d'água de projeto). Este trim deverá estar de acordo com as condições normais de operação da embarcação.

3) Todos os equipamentos auxiliares acionados pelo(s) motor(es) principal(is) ou eixo(s) propulsor(es), durante a operação normal da embarcação, deverão estar acoplados.

4) O(s) motor(es) principal(is) deverá(ão) estar previamente aquecido(s).

#### **4 - PROCEDIMENTO DO ENSAIO**

a) Para a preparação do ensaio deverá ser usada a Lista de Verificação para Ensaio de Tração Estática, constante do Apêndice 3-I-I deste anexo.

b) Durante o ensaio só poderão permanecer no interior da Praça de Máquinas o pessoal encarregado da leitura ou fiscalização da rotação do(s) motor(es), além da guarnição normal de máquinas.

c) As condições de ensaio devem ser no mínimo igual a 70, 80, 90 e 100% da rotação máxima a ser estipulada pelo interessado tal que esta rotação possa ser mantida por um período de, no mínimo, 30 minutos.

d) No caso do ensaio correspondente a condição de 100% da rotação máxima estipulada pelo interessado, a embarcação deverá permanecer nesta rotação por um período mínimo de 30 minutos. Nos intervalos de 5 a 10, 15 a 20 e 25 a 30 minutos de ensaio deverão ser anotados o maior número possível de leituras (no Apêndice 3-I-2 é apresentado um modelo de planilha para facilitar as anotações), sendo que o valor da tração estática correspondente a essa rotação deverá ser igual a média aritmética dos valores médios das leituras de cada intervalo. Não é necessário efetuar qualquer leitura nos períodos de 0 a 5, 10 a 15 e 20 a 25 minutos.

e) As medições da tração estática longitudinal para as demais rotações estabelecidas deverão ser efetuadas por um intervalo mínimo de 3 minutos (no Apêndice 3-I-2 é apresentado um modelo de planilha para facilitar as anotações). Durante esse período deverão ser anotados o maior número possível de leituras, a fim de obter o valor médio de cada rotação.

f) Durante as medições, a embarcação deverá ser mantida em curso fixo, sendo que a aplicação do(s) leme(s) deverá ser minimizada. O cabo de reboque deverá permanecer o mais horizontal possível e estar alinhado com a Linha de Centro da embarcação.

g) O ensaio deverá ser realizado na seqüência crescente de rotação. No espaço de tempo compreendido entre a mudança de rotação do(s) motor(s) não deverá haver decaimento desta, a menos que haja necessidade de realinhamento do curso da embarcação.

h) Caso a embarcação possua sistema de propulsão de passo controlado, o ensaio deve ser realizado mantendo-se a potência máxima do motor estipulada pelo interessado e variando-se o passo nas percentagens estabelecidas no item c) acima.

i) Para a anotação das leituras é recomendado o uso da Lista de Coleta de Dados e Anotação de Resultados, apresentada no Apêndice 3-I-2.

#### **5 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS**

a) Os resultados do ensaio deverão ser apresentados no Certificado de Tração Estática, conforme modelo apresentado no Anexo 3-J, o qual deverá possuir obrigatoriamente,

em anexo, o gráfico "Tração Estática x Rotação do(s) Motor(es)". Opcionalmente poderá ser também anexado o gráfico "Potência x Rotação do(s) Motor(es)".

b) O Certificado de Tração Estática bem como seu(s) anexo(s) deverão possuir a assinatura do Engenheiro Naval responsável, assim como o carimbo informando o número do seu registro no Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia (CREA) e o seu nome completo.

### LISTA DE VERIFICAÇÃO PARA ENSAIO DE TRAÇÃO ESTÁTICA

	SIM	NÃO	N/A
1 - Retirado de bordo e de terra todo o pessoal desnecessário?	[ ]	[ ]	[ ]
2 - Verificada a existência a bordo dos seguintes documentos:			
a) Memorial Descritivo, endossado pela GEVI, Entidade Certificadora ou pela Sociedade Classificadora	[ ]	[ ]	[ ]
b) Plano de Arranjo Geral, endossado pela GEVI, Entidade Certificadora ou pela Sociedade Classificadora	[ ]	[ ]	[ ]
c) Folheto de Estabilidade Definitivo, endossado pela GEVI, Entidade Certificadora ou pela Sociedade Classificadora	[ ]	[ ]	[ ]
d) Plano de Capacidade, endossado pela GEVI, Entidade Certificadora ou pela Sociedade Classificadora	[ ]	[ ]	[ ]
e) Certificado de Aferição da Célula de Carga	[ ]	[ ]	[ ]
f) Certificado de Aferição do Correntômetro	[ ]	[ ]	[ ]
g) Manual da Célula de Carga	[ ]	[ ]	[ ]
h) Certificado do Cabo	[ ]	[ ]	[ ]
3 - O cabeço utilizado para o teste possui resistência mínima de três vezes a tração estática esperada?	[ ]	[ ]	[ ]
4 - Inspeccionado o cabo de reboque e seus acessórios?	[ ]	[ ]	[ ]
5 - O cabo possui um comprimento mínimo de cinco vezes o comprimento da embarcação ou 100 metros, o que for maior?	[ ]	[ ]	[ ]
6 - O cabo possui resistência à tração mínima de três vezes a tração estática esperada? (ver certificado do cabo)	[ ]	[ ]	[ ]
7 - A célula de carga/dinamômetro já foi instalada(o)?	[ ]	[ ]	[ ]
8 - A célula de carga possui resistência suficiente para suportar 1,5 vezes a tração estática esperada?	[ ]	[ ]	[ ]
9 - Verificado o prazo de aferição da célula de carga?	[ ]	[ ]	[ ]
10 - Foi verificada a calibração da célula de carga?	[ ]	[ ]	[ ]
11 - O registrador de força já foi conectado à célula de carga?	[ ]	[ ]	[ ]
12 - O registrador de força está funcionando?	[ ]	[ ]	[ ]
13 - O registrador gráfico de força e/ou rpm já foram conectados à célula de carga?	[ ]	[ ]	[ ]
14 - O registrador gráfico está funcionando?	[ ]	[ ]	[ ]
15 - O(s) registrador(es) foi(foram) "zerados"?	[ ]	[ ]	[ ]
16 - Já foi(foram) colocada(s) a(s) etiqueta(s) no(s) eixo(s) do(s) motor(es) para medição das rotações?	[ ]	[ ]	[ ]
17 - O tacômetro está funcionando?	[ ]	[ ]	[ ]
18 - Verificado o prazo de aferição do tacômetro?	[ ]	[ ]	[ ]
19 - Já foi instalado o torciômetro?	[ ]	[ ]	[ ]
20 - O torciômetro está funcionando?	[ ]	[ ]	[ ]
21 - Os radiocomunicadores estão funcionando?	[ ]	[ ]	[ ]
22 - O anemômetro está funcionando?	[ ]	[ ]	[ ]
23 - O correntômetro está funcionando?	[ ]	[ ]	[ ]
24 - A sonda manual está devidamente marcada?	[ ]	[ ]	[ ]
25 - O cronômetro com acumulador de minutos está funcionando?	[ ]	[ ]	[ ]
26 - Todos os equipamentos auxiliares acionados pelo(s) motor(es) principal(is) durante a operação normal estão acoplados?	[ ]	[ ]	[ ]

27 - Verificar as condições ambientais:

- velocidade do vento ( $v_v$ ): m/s ( $v_v < 5\text{m/s}$ ) [ ] [ ]

- velocidade da corrente ( $v_c$ ): Nó ( $v_c < 1$  nó) [ ] [ ]

- profundidade (h): S  
M ( $h > 4 \times$  calado médio ou 10m, o que for maior) [ ] [ ]

OBS: Se alguma das respostas anteriores (item 27) for **NÃO**, o ensaio não poderá ser realizado pois está em desacordo com as condições ambientais necessárias para a sua realização.

28 - A embarcação se apresenta no calado carregado de projeto? [ ] [ ] [ ]  
(utilizar o folheto de estabilidade e o plano de capacidade)

29 - Os motores estão previamente aquecidos? [ ] [ ]

30 - Presentes no interior da praça de máquinas apenas a guarnição normal e o pessoal encarregado das leituras das rotações e fiscalização? [ ] [ ] [ ]

31 - O cabo está alinhado sobre a linha de centro do rebocador e está o mais horizontal possível? [ ] [ ] [ ]

## LISTA DE COLETA DE DADOS E ANOTAÇÃO DE RESULTADOS

### 1 - Dados da Embarcação:

- Nome/Número de Casco:
- Ano de Construção:
- Estaleiro Construtor:
- Proprietário:
- Interessado:

### 2 - Características do Casco:

- Comprimento Total:
- Boca Moldada:
- Pontal Moldado:
- Calado a Vante:
- Calado a Ré:

### 3 - Características do(s) Motor(es):

	BB	LC	BE
marca			
modelo			
número de série			
potência			
rotação			
redução			

### 4 - Características do(s) Propulsor(es):

- Tipo:
- Diâmetro:
- Quantidade:
- Número de Pás:
- Passo:

### 5 - Local e Condições Ambientais do Ensaio:

- Pontal Moldado:
- Calado a Vante:
- Calado a Ré:

- 6 - Iniciar a realização do ensaio para as condições equivalentes a 70, 80, 90 e 100% da rotação máxima estipulada pelo interessado, em ordem crescente. Fazer as leituras para cada uma das quatro primeiras condições num período mínimo de 3 minutos e para a última condição, fazer as leituras entre os intervalos de 5 a 10, 15 a 20 e 25 a 30 minutos de ensaio. Anotar essas leituras utilizando a tabela da página seguinte.





**VERSO DO CERTIFICADO  
RESULTADO DO ENSAIO**

Condição de Carga	RPM do(s) MCP(s)			Tração	Tração	Tração	Potência (Opcional) (t)
	BB	LC	BE	Máxima (t)	Mínima (t)	Estática (t)	
70%							
80%							
90%							
100%							

Obs.: Quando o sistema de propulsão for de passo controlável, deverão ser colocados na coluna pertinente os valores do passo, ao invés das percentagens das rotações do(s) motor(es).