

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

MARCOS ALEXANDRE KAMIENSKI

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE HÉLICES:  
ENSAIO SIMPLIFICADO DE TRAÇÃO ESTÁTICA

Joinville

2016

MARCOS ALEXANDRE KAMIENSKI

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE HÉLICES:  
ENSAIO SIMPLIFICADO DE TRAÇÃO ESTÁTICA

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: Thiago Pontin Tancredi.

Joinville

2016

MARCOS ALEXANDRE KAMIENSKI

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE HÉLICES:  
ENSAIO SIMPLIFICADO DE TRAÇÃO ESTÁTICA

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

Joinville, 02 de dezembro de 2016

---

Prof. Thiago Pontin Tancredi, PhD.  
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

---

Prof. Thiago Pontin Tancredi, PhD.  
Orientador

---

Prof. Lucas Weihmann, Dr. Eng.

---

Prof. André Mitsuo Kogishi, Dr. Eng.

## RESUMO

Um bom desempenho do sistema propulsivo assegura um ganho a embarcação, pois reduz o consumo de combustível. Embora os usos de técnicas computacionais tenham se desenvolvido nos últimos anos, qualquer novo modelo de hélice ainda requer a realização de testes para garantir um bom rendimento. Assim, é indispensável conhecer os parâmetros que descrevem um hélice, bem como o desempenho obtido, a fim de adequadamente selecionar o hélice, reduzindo o número de ensaios a serem realizados. Submeter o propulsor a testes demanda tempo e custo, circunstâncias indesejadas para o projeto do sistema propulsivo. Este trabalho se insere neste contexto e apresenta a elaboração do projeto de um hélice, percorrendo todas as etapas, desde a seleção dos parâmetros, a fabricação, para ao final realizar um teste de tração estática. O hélice foi fabricado com placas de aço conformadas sobre um molde de madeira, enquanto o ensaio foi realizado em um pequeno tanque, visando quantificar a força de empuxo do hélice assim como analisar sua eficiência. A metodologia proposta foi aplicada ao projeto de um hélice para o barco solar da equipe Babitonga, buscando atingir um resultado superior ao hélice adotado atualmente pela equipe. Os resultados mostraram, que, provavelmente por problemas de fabricação, o hélice projetado e construído apresentou uma capacidade de tração estática inferior aos outros dois hélices ensaiados.

**Palavras-chave:** Hélice. Material. Cavitação. Tração estática.

## **ABSTRACT**

A good performance of the propulsive system ensures a gain to the boat, as it reduces the fuel consumption. Although the uses of computational techniques have developed in recent years, any new propeller model still requires testing to ensure its efficiency and effectiveness. Thus, it is indispensable to know the parameters that describe a propeller, as well as the performance obtained, in order to properly select the propeller, reducing the number of tests to be performed. Submitting the propellant to tests demands time and cost, unwanted circumstances for propulsive system design. This work is inserted in this context and presents the design of a propeller, going through all stages, from the selection of parameters, to the fabrication, in order to carry out a bollard pull test. The propeller was fabricated with shaped steel plates on a wooden mold, while the test was carried out in a small tank, in order to quantify the thrust force of the propeller as well as to analyze its efficiency. The proposed methodology was applied to the design of a propeller for the solar boat of the Babitonga team, seeking to achieve a result superior to the propeller currently adopted by the team. The results showed that, probably due to manufacturing problems, the designed and constructed propeller presented a lower static tensile capacity than the other two propellers tested.

**Keywords:** Propeller. Material. Cavitation. Bollard pull.

## LISTA DE ABREVIACOES

BAR – *Blade area ratio*;

BHP – *brake horse power*;

CAD – *Computer Aided Design*;

CAM – *Computer Aided Manufacturing*;

CNC – *Computer Numerical Control*;

DXF - *Drawing Exchange Format*;

ESC - *Electronic Stability Control*;

ITTC – *International Towing Tank Conference*;

P/D – Razão passo diâmetro;

rpm – *Revolues por minuto*;

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Secção típica de uma pá.....  | 18 |
| Figura 2 - Linhas de referências principais de uma pá.....   | 19 |
| Figura 3 - Rake (caimento).....  | 20 |
| Figura 4 - Geometria do Hélice.....  | 20 |
| Figura 5 - Definição helicoidal do passo.....  | 21 |
| Figura 6 - Teste águas abertas por um carro reboque em tanque de provas.....   | 22 |
| Figura 7 - Bollard pull em condições ideais.....   | 25 |
| Figura 8 - Localização para atracamento: (a) boa localização para o atracamento e (b) má localização para atracamento..... | 25 |
| Figura 9 - Folha e nuvem de cavitação juntamente com um vórtice de ponta.....  | 28 |
| Figura 10 - Diagrama de Burril.....  | 28 |
| Figura 11 - Colapso computadorizada bolha.....   | 29 |
| Figura 12 - Bioencrustação no propulsor.....   | 30 |
| Figura 13 - Ensaio de liquido penetrante. (a) Aplicação de LP e (b) resultado da aplicação do revelador.....               | 31 |
| Figura 14 - Disposição de corpos de prova em na câmara de névoa salina.....  | 32 |
| Figura 15 - Família dos materiais de propulsores.....  | 33 |
| Figura 16 - Tabela típica de comparação dos materiais.....   | 34 |
| Figura 17 - Valores de sobre metal para Usinagem.....  | 36 |
| Figura 18 - Valores típicos para contração.....  | 36 |
| Figura 19 - Escopo de Projeto descrito por Carlton.....  | 38 |
| Figura 20 - Molde para laminação.....  | 39 |
| Figura 21 - Curvas Kq e Kt B3.45.....  | 43 |
| Figura 22 - Etapas para obtenção do melhor Diâmetro e melhor rendimento.....   | 45 |
| Figura 23 - Fluxograma do modelamento do hélice.....   | 46 |
| Figura 24 - Hélice gerado no PROPCAD.....  | 47 |
| Figura 25 - Curvas do propulsor.....   | 47 |
| Figura 26 - Modelamento pá.....  | 48 |
| Figura 27 - Propulsor Final.....   | 49 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 28 - Geometria do modelo de "Fairings" .....  | 49 |
| Figura 29 - Capa do cubo (Domo).....   | 50 |
| Figura 30 - Escopo de Fabricação. ....   | 51 |
| Figura 31 - Modelagem Gabarito. (a) vista superior. (b) Vista Isométrica. ....                       | 52 |
| Figura 32 - Gabarito Madeira. ....   | 53 |
| Figura 33 - Gabarito de madeira. (a) Acabamento dos dois gabaritos. (b) Gabarito Reforçado.<br>..... | 53 |
| Figura 34 - Pá planifica para o corte.....   | 54 |
| Figura 35 - Pá Planificada. ....   | 55 |
| Figura 36 - Posicionamento e fixação da pá no gabarito.....  | 56 |
| Figura 37 - Modelamento da pá.....   | 56 |
| Figura 38 - Resultado da Conformação.....  | 57 |
| Figura 39 - Resultado Acabamento Superficial.....  | 57 |
| Figura 40 - Montagem do Hélice.....  | 58 |
| Figura 41 - Soldagem das pás.....  | 59 |
| Figura 42 - Hélice fabricado.....  | 60 |
| Figura 43 - Mecanismo de ensaio de força de empuxo. ....   | 63 |
| Figura 44 - Dispositivo para balanceamento do hélice.....  | 64 |
| Figura 45 - Pá devidamente Balanceada.....   | 64 |
| Figura 46 - Motor pronto para o ensaio.....  | 65 |



## LISTA DE GRÁFICOS

|   |    |
|---|----|
| Gráfico 1 - Ensaio de tração estática á 75%. .....  | 67 |
| Gráfico 2 - Ensaio de Tração estática á 100%. ..... | 67 |
| Gráfico 3 - Ensaio de tração estática. ....         | 68 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1- Dados da Embarcação .....                         | 40 |
| Tabela 2 - Parâmetros Gerais.....                           | 41 |
| Tabela 3 - Parâmetros definidos pela equipe Babitonga ..... | 42 |
| Tabela 4 - Proposição da pá.....                            | 43 |
| Tabela 5 - Relações de B3.45. ....                          | 43 |
| Tabela 6 - Saída dos dados de interesse. ....               | 44 |
| Tabela 7 - Análise de Cavitação .....                       | 45 |
| Tabela 8 - Dados dos propulsores.....                       | 66 |

## SÚMARIO

|               |   |           |
|---------------|---|-----------|
| <b>1.</b>     | <b>INTRODUÇÃO</b> .....                                 | <b>13</b> |
| 1.1.          | OBJETIVO GERAL .....                                    | 15        |
| 1.2.          | OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....                              | 15        |
| 1.3.          | ESTRUTURA DO DOCUMENTO.....                             | 16        |
| <b>2.</b>     | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....                      | <b>17</b> |
| 2.1.          | HÉLICE .....  | 17        |
| 2.2.          | GEOMETRIA DO HÉLICE .....                               | 18        |
| 2.3.          | ENSAIOS.....  | 22        |
| <b>2.3.1.</b> | <b>Ensaio de águas abertas</b> .....                    | <b>22</b> |
| <b>2.3.2.</b> | <b>Bollard pull</b> .....                               | <b>24</b> |
| <b>2.3.3.</b> | <b>Cavitação</b> .....                                  | <b>27</b> |
| 2.4.          | DESGASTE DO PROPULSOR .....                             | 29        |
| <b>2.4.1.</b> | <b>Corrosão</b> .....                                   | <b>31</b> |
| 2.5.          | MATERIAIS DE PROPULSORES.....                           | 33        |
| 2.6.          | PROCESSO DE FABRICAÇÃO .....                            | 35        |
| <b>2.6.1.</b> | <b>Fundição</b> .....                                   | <b>35</b> |
| <b>2.6.2.</b> | <b>Usinagem</b> .....                                   | <b>36</b> |
| <b>2.6.3.</b> | <b>Laminação</b> .....                                  | <b>38</b> |
| <b>3.</b>     | <b>DESENVOLVIMENTO: FABRICAÇÃO DO HÉLICE</b> .....      | <b>40</b> |
| 3.1.          | SELEÇÃO DO PROPULSOR.....                               | 40        |
| 3.2.          | MODELAGEM.....  | 46        |
| 3.3.          | FABRICAÇÃO DO HÉLICE.....                               | 50        |
| <b>3.3.1.</b> | <b>Modelagem do Gabarito</b> .....                      | <b>51</b> |
| <b>3.3.2.</b> | <b>Pré-usinagem</b> .....                               | <b>54</b> |
| <b>3.3.3.</b> | <b>Delineamento e corte</b> .....                       | <b>54</b> |
| <b>3.3.4.</b> | <b>Conformação Mecânica</b> .....                       | <b>55</b> |
| <b>3.3.5.</b> | <b>Soldagem</b> .....                                   | <b>58</b> |
| <b>3.3.6.</b> | <b>Usinagem</b> .....                                   | <b>59</b> |
| <b>3.3.7.</b> | <b>Acabamento</b> .....                                 | <b>60</b> |
| <b>4.</b>     | <b>DESENVOLVIMENTO: ENSAIO DE TRAÇÃO ESTÁTICA</b> ..... | <b>62</b> |
| 4.1.          | LOCAL .....   | 62        |
| 4.2.          | EXPERIMENTO .....                                       | 63        |

|      |  |           |
|------|--|-----------|
| 4.3. | RESULTADOS.....  | 66        |
| 4.4. | ANÁLISE DOS RESULTADOS. ....   | 68        |
|      | <b>CONCLUSÃO.....</b>  | <b>70</b> |
|      | <b>REFERÊNCIAS.....</b>  | <b>72</b> |
|      | <b>APÊNDICE 1 – RELATÓRIO DE AVALIAÇÃO DA HÉLICE SOLIDWORKS.....</b>   | <b>74</b> |
|      | <b>APÊNDICE 2 – DETALHAMENTO DO PROPULSOR.....</b>   | <b>75</b> |
|      | <b>APÊNDICE 3 – SEÇÕES DE MADEIRA. ....</b>  | <b>76</b> |
|      | <b>APÊNDICE 4 - PROCEDIMENTO PARA MEDIÇÃO DA TRAÇÃO ESTÁTICA LONGITUDINAL (BOLLARD PULL) ADAPTADO PARA UM CATAMARÃ. ....</b> | <b>77</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

Desde e o início da navegação, o estudo de propulsores navais demanda, constantemente, pesquisas que otimizem o desempenho do propulsor, visando o aumento da capacidade e eficiência da embarcação.

É importante observar que o projeto de um propulsor depende fortemente das características da embarcação, e por isso, deve ser feito para cada embarcação analisada. Assim, a busca por melhorar o custo-benefício do sistema propulsivo é assunto ainda hoje em destaque junto a indústria e na academia.

Todo e qualquer avanço representa uma melhora significativa no desempenho geral da embarcação, o qual é atrelado a um ganho econômico, seja por causa do aumento de velocidade, seja por causa da redução do consumo. Por essa razão os testes e estudos de hélices navais são uma das atividades pertencente ao processo de projeto, conforme descrito por Lamb (2003) e por Watson (1998). No entanto, por ser uma tarefa demorada e custosa, o projeto do hélice é elaborado mais ao final da espiral de projeto.

Em muitos casos, empresas terceirizadas fazem análise da necessidade da unidade propulsora e dimensionam o melhor hélice, especialmente em sistemas de propulsão não convencionais como o Z-drive. Essas empresas especializadas comumente já orçam o propulsor junto ao sistema propulsivo completo (motor, caixa de redução, controles e o propulsor).

A utilização de materiais com melhores propriedades mecânicas está ligada diretamente à eficiência e durabilidade de um propulsor. Os efeitos físicos como a cavitação, vibração e esforços mecânicos que ocorrem durante o funcionamento do hélice geram defeitos e deformações na superfície das pás. Segundo Molland (2011), os defeitos e as deformações são indesejáveis, pois podem reduzir a eficiência do propulsor ou causar dano ao sistema. Tais falhas podem ser causadas por uma escolha inadequada de materiais e/ou geometrias inapropriadas para uma determinada condição de operação.

Visando contribuir para o aprofundamento de estudos sobre o desempenho de hélices, este trabalho apresenta uma análise experimental que compara o desempenho de tração estática entre três hélices diferentes, que eventualmente são utilizados na embarcação solar da equipe Babitonga.

A Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), no Centro Tecnológico de Joinville, possui uma embarcação catamarã movida a energia solar que participa anualmente do Desafio Solar Brasil. A cada ano a disputa fica mais intensa e concorrida, motivando a busca por sistemas propulsivos mais eficientes.

Atualmente a equipe dispõe de 2 propulsores que são usados durante as competições. Assim, o objetivo deste trabalho é o de projetar um novo hélice e realizar ensaios de tração estática que visam comparar o novo hélice projetado com os atuais hélices disponíveis pela equipe Babitonga.

Para o projeto do hélice, escolheu-se a série de hélice elaborada por Wageningen em 1981, conhecida como *B-troost*, pois como afirma Carlton (2007, p. 103): “Esta é talvez a mais extensa e amplamente utilizada série de hélice”.

Buscou-se o conjunto de parâmetros que maximizasse a eficiência do propulsor em águas abertas. O propulsor selecionado é o modelo B3.45, o qual será apresentado detalhadamente ao longo do desenvolvimento realizado.

Para a geração da geometria do propulsor escolhido, foi utilizado o programa PROPCAD, que permite gerar as curvas da série B, as quais foram exportadas para o SOLIDWORKS, um programa *Computer Aided Design* (CAD), onde foi feita a modelagem final com os parâmetros necessários para fabricação e detalhamento da peça.

O processo de fabricação se dividiu em diversas etapas construtivas, iniciando com a preparação necessária para aferir a geometria das pás, seguido pelas etapas de delineamento e corte, passado pelos processos de elaboração do molde, conformação a frio, soldagem, usinagem e finalizando com balanceamento e acabamento da superfície.

As pás serão feitas por um processo de conformação a frio utilizando um gabarito esculpido em madeira e que representa a geometria das pás. Já o cubo do hélice será fabricado em um torno mecânico, sendo executado em duas etapas.

Por meio do produto final, a peça será devidamente balanceada e ensaiada em um tanque hidrostático equipado com um motor elétrico e um dinamômetro.

Para testar a eficiência deste propulsor, será realizado o teste de tração estática, considerando alguns dos passos descritos por Carlton (2007), além de seguir os parâmetros regidos pela NORMAN 01 para testes de tração estática, amplamente utilizada nas embarcações rebocadoras.

O estudo também contempla os demais hélices que a equipe Babitonga possui para esta embarcação, submetendo-os as mesmas condições e procedimentos adotados no teste realizado com o hélice projetado e fabricado especialmente para este trabalho.

O sistema propulsivo do Babitonga é composto por um motor elétrico, caixa de redução, bateria, painel solar e uma placa eletrônica capaz de controlar a potência e velocidade do motor.

Inicialmente o local de teste definido seria a marina Portal do Sol, localizado no bairro espinheiros, Joinville-SC durante o período de estofa da maré (período que o mar está mais calmo). No entanto, em virtude da embarcação não estar disponível, o experimento foi feito em um tanque hidrostático disponível na empresa Spiesser Motores Navais.

Os resultados obtidos serão analisados de maneira quantitativa, levando a uma discussão sobre os eventuais motivos que levam as diferenças de desempenho observadas entre os três hélices ensaiados.

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 projetos eficientes de propulsores do 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.

### 1.1. OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma análise experimental em um modelo de hélice da série *B-Troost* otimizado para o Catamarã por meio do teste de tração estática, submeter uma comparação dos resultados obtidos com os hélices existentes para esta mesma embarcação, afim de quantificar o desempenho dos propulsores analisados.

### 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a seleção do propulsor;
- Modelar o hélice proposto utilizando um programa CAD;
- Delinear as pás e o detalhamento para fabricação do propulsor;

- Fabricar o propulsor tipo hélice;
- Submeter o modelo ao teste de *Bollard Pull*;
- Submeter os demais hélices da equipe Babitonga ao teste de *Bollard Pull*;
- Comparar os resultados da força de empuxo;
- Selecionar o melhor modelo para a embarcação;

### 1.3. ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O presente relatório está organizado em 5 capítulos. O primeiro consiste na introdução, que descreve o contexto, a metodologia e os objetivos do trabalho.

No segundo é apresentada a fundamentação teórica que substância o desenvolvimento proposto.

Os capítulos 3 e 4 descrevem a fabricação do propulsor e a realização do ensaio de tração estática, discutindo os resultados obtidos.

Por fim, no último capítulo são apresentadas as conclusões obtidas e as recomendações para futuros trabalhos, sendo seguido pela lista de referências bibliográficas.



## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os fundamentos sobre propulsores navais que baseiam-se no desenvolvimento realizado.

### 2.1. HÉLICE

O hélice foi um dos primeiros e mais antigos sistemas propulsivos inventado ao longa da história para a locomoção das embarcações. Com o passar dos anos ele continua a ser o sistema mais utilizado e constantemente aprimorado para diversas aplicações, tanto na busca de força quanto de eficiência, de acordo com a finalidade do projeto.

Ao longo de toda a trajetória histórica, o projeto e a análise de desempenho dos propulsores tipo hélice evoluíram baseados em três atividades complementares entre si: as teorias de propulsores, as experiências com modelos em escala reduzida e as experiências em escala real ou protótipos. (PADOVEZI, 1997).

Assim, toda e qualquer forma de minimizar os efeitos negativos evidenciados no propulsor constituíram numa melhora significativa, provendo ganhos na eficiência. O controle e entendimento sobre os efeitos mecânicos e hidrodinâmicos aos quais o hélice é submetido fez com que surgissem ferramentas que auxiliassem a otimização dos propulsores.

Tabelas e diagramas feitos a partir de experimentos ajudaram a estabelecer novos parâmetros na seleção e projeto de hélices. Um exemplo clássico é o diagrama de Burril, muito utilizado para obter uma estimativa da cavitação sofrida pela pá, e se ela se tornará prejudicial ao funcionamento do propulsor. (CARLTON, 2007).

Outro avanço que contribui para a evolução do hélice foi o desenvolvimento nos modos de fabricação, que vêm evoluindo e tornando-se capazes de uma usinagem mais uniforme e homogênea.

Usualmente propulsores do tipo hélice podem ser fabricados por três processos de fabricação diferentes: fundição, usinagem e laminação; os quais serão detalhados a seguir. Destaca-se ainda o método artesanal de fabricação, fortemente dependente da habilidade e experiência do fabricante.

## 2.2. GEOMETRIA DO HÉLICE

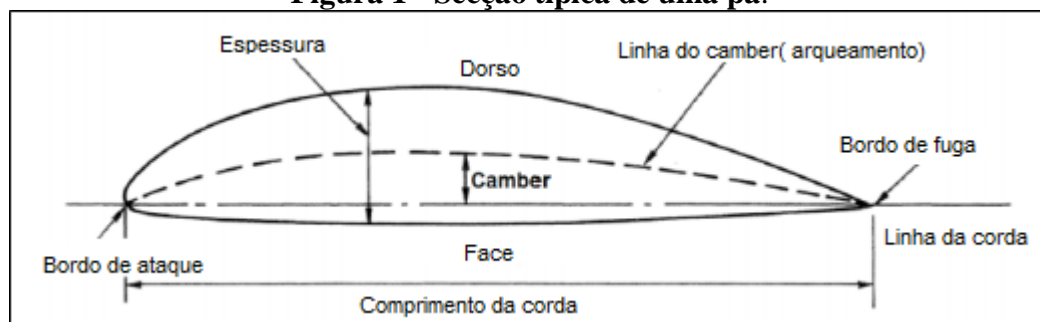
O hélice possui uma geometria complexa, composta por várias linhas que dão um formato único e de difícil modelagem. O hélice é um conjunto de pás distribuídas uniformemente em torno do cubo montado na extremidade da pá. (TRINDADE, 2012).

As características dos propulsores variam de acordo com a finalidade do projetista, que pode buscar eficiência, força hidrodinâmica, velocidade, baixa emissão de ruído, entre outros aspectos que divergem de acordo com a embarcação.

Comumente os parâmetros que descrevem a geometria são determinantes no desempenho do propulsor: o diâmetro, o número de pás, o passo, a relação de área estendida e a área do disco (*Blade Area Ratio – BAR*), o ângulo de caimento e o perfil da pá. (CARLTON, 2007).

As pás são formadas por um conjunto de secções do tipo fólio, cuja rotação provoca a força de sustentação responsável por impulsionar o navio. Na Figura 1 é mostrada uma secção típica, onde é possível observar que a pá possui dois lados e dois bordos. Os dois lados de uma pá consistem no dorso (*suction side*), onde a força de sustentação é gerada, e a face (*pressure side*). Já os dois bordos consistem no bordo de ataque (*leading edge*), linha frontal das pás, e o bordo de fuga (*trailing edge*), aresta atrás das pás. Por fim, a linha que une o bordo de ataque ao de fuga é denominada como corda da secção (*chord*) e que a linha que divide a espessura ao meio, é denominada como *camber*.

**Figura 1 - Secção típica de uma pá.**

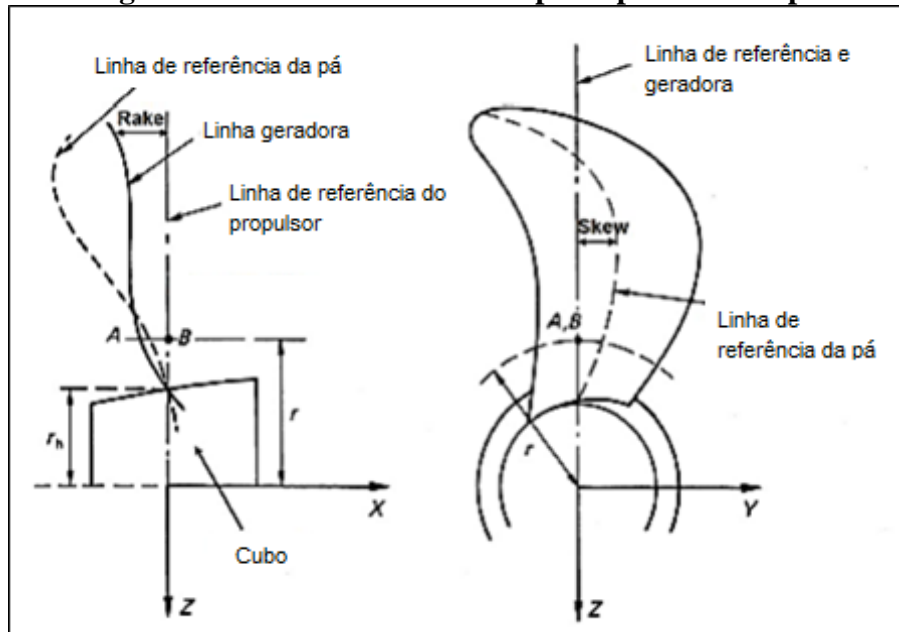


Fonte: Tonacio (2014) - Adaptada.

Para descrever a geometria de uma pá é importante definir duas linhas principais. A primeira, consiste na linha de referência do propulsor, a qual é ortogonal ao eixo e une o ponto

no centro do eixo com o ponto localizado na metade da corda da secção mais próxima ao eixo. A segunda consiste na linha de referência da pá (ou geratriz) e consiste na união de todos os pontos localizados na metade da corda de cada uma das secções da pá. Ambas as linhas são mostradas na Figura 2.

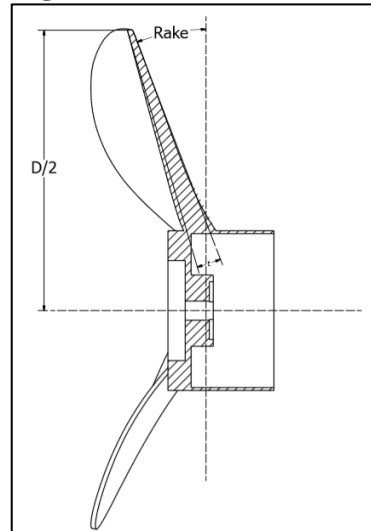
**Figura 2 - Linhas de referências principais de uma pá.**



Fonte: Tonacio (2014) - Adaptada.

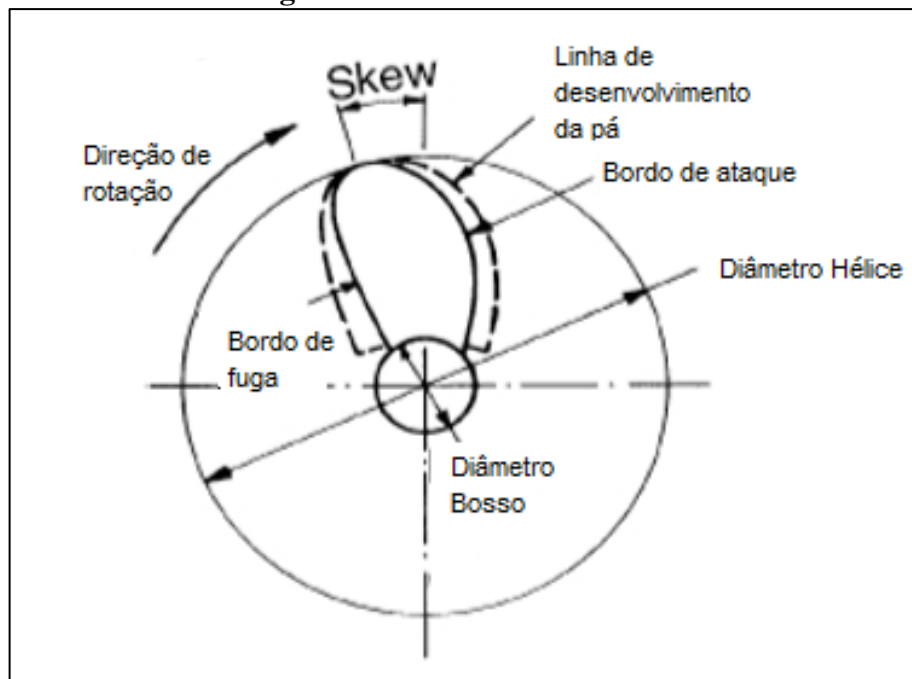
O diâmetro do propulsor consiste no dobro da medida entre a ponta de uma pá e o eixo longitudinal localizado no centro do cubo, conforme visto na Figura 3.

O caimento é uma inclinação do eixo das pás no sentido longitudinal da embarcação, usualmente a ré para aumentar o afastamento entre a ponta da pá e casco. (VOLKER, 2012). Segundo Padovezzi (1997, p.55), o caimento tem como inconveniente a introdução de momentos que obrigam a adoção de maiores espessuras nas raízes das pás.

**Figura 3 - Rake (caimento).**

Fonte: Autor (2016).

O *skew* é o ângulo que, na vista frontal, a linha geratriz faz com a linha de referência ortogonal ao eixo, conforme mostrado na Figura 4. Segundo Padovezzi (1997, p.55) “o *skew* tem grande contribuição na redução de níveis de cavitação intermitente e de vibrações induzidas pelo propulsor em operação”.

**Figura 4 - Geometria do Hélice.**

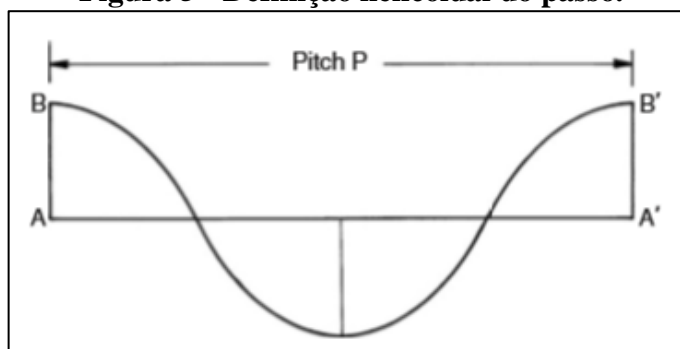
Fonte: Trindade (2012, p. 43) - Adaptada.

De acordo com Padovezzi (1997, p.55) “o caimento e o *skew* não provoca alterações na eficiência dos propulsores em condições normais de operação a avante, mas quando operado a ré da embarcação pode apresentar perdas de eficiência quando comparado a um hélice no qual não apresenta caimento e *skew*”.

Segundo Volker (2012) o passo é o valor que o hélice se desloca no sentido axial do eixo até realizar uma volta completa, ou seja uma revolução, como pode ser visto na Figura 5. Os ângulos variam de acordo com o movimento de translação no eixo axial indo de 0 até o valor final da revolução atingindo 360°.

A relação P/D influi na eficiência do propulsor. É interessante observar que antigamente os projetistas utilizavam a relação de 1.0 como valor padrão, pois oferecia uma eficiência razoável de operação. Atualmente observa-se, que em alguns casos a aplicação de razões maiores até 1.5 proporciona eficiência maiores, embora acima desse valor a tendência é que a eficiência caia. (GERR,1989).

**Figura 5 - Definição helicoidal do passo.**



Fonte: Volker (2012, p. 42).

O número de pás é um parâmetro importante para a indução de vibração no propulsor. Em geral número ímpar de pás, tem característica vibratória melhor que um alto número de pás. Para grandes navios o número de pás característico varia em torno de 4 a 7 pás, já para embarcações menores pode variar de 2 a 4 pás. Quanto menor o número de pás, mais eficiente tende a ser o propulsor, embora produza maior tendência de vibração. (VOLKER, 2012).

## 2.3. ENSAIOS

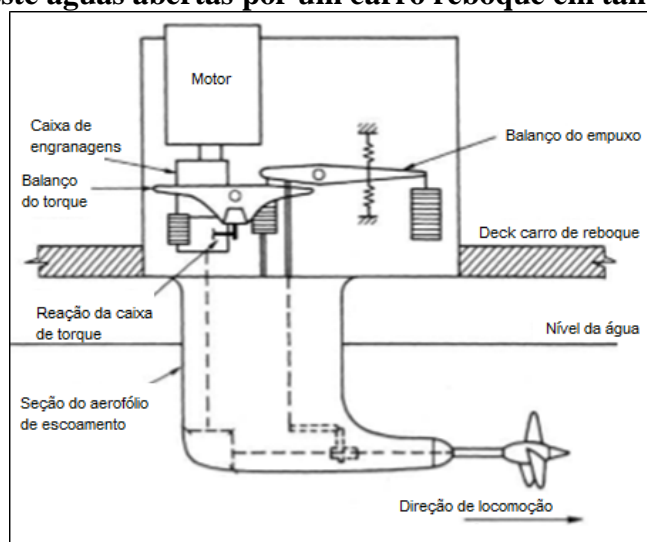
Os ensaios são procedimentos para testar experimentalmente o trabalho teórico produzido. Para os propulsores existe alguns métodos que podem ser utilizados para medir o desempenho e a eficiência de um propulsor. Dentre os ensaios os mais conhecidos destacam-se o de águas abertas para obter os coeficientes de desempenho do propulsor e o *bollard pull* que está mais relacionado com a força de tração estática.

### 2.3.1. Ensaio de águas abertas

O ensaio em águas abertas tem como finalidade determinar as características hidrodinâmicas e a eficiência em águas abertas de um propulsor por meio do escoamento incidente diretamente nas pás em um ambiente controlado, sem interferências à frente do propulsor.

Segundo Carlton (2007), o teste é ambientado em um longo canal de dimensões adequadas para obtenção de regime de águas calmas, onde a velocidade do vento e corrente são próximas a zero<sup>1</sup>.

**Figura 6 - Teste águas abertas por um carro reboque em tanque de provas.**



Fonte: Carlton (2007, pg.305) - Adaptada.

<sup>1</sup> The propeller model is fitted on a horizontal driveway shaft and is moved through the water at an immersion of the shaft axis frequently equal to the diameter of the propeller. (CARLTON, John, 2007, p.304).

O funcionamento de um ensaio de águas abertas é mostrado na Figura 6. A partir de um carro reboque, desloca-se o hélice a uma dada velocidade de avanço  $V_a$  e com um determinado número de rotações. Por meio dos dispositivos instalados no casco (ou carro dinamométrico) são medidos os valores de torque e empuxo.

Repetindo-se o experimento para diferentes valores de rotação e velocidade de avanço, são obtidas as curvas hidrodinâmicas do propulsor em águas abertas, sem a interferências da esteira. Portanto o valor da velocidade de avanço vai ser a velocidade do carro, pois como não há interferências externas influenciando o resultado considera-se  $\omega$  é igual a zero.

$$V_a = V \cdot (1 - \omega) = V$$

$V_a$  - Velocidade de avanço;

$\omega$  - Coeficiente de esteira;

$V$  - Velocidade de serviço.

Assim as curvas são determinadas de acordo com os coeficientes de torque ( $K_q$ ) e empuxo ( $K_t$ ) e a eficiência do hélice ( $n_o$ ), referentes a um coeficiente de avanço  $J$ . Esses coeficientes podem ser determinados seguindo as seguintes equações:

$$K_q = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5}$$

$$K_t = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4}$$

$$J = \frac{V_a}{n \cdot D}$$

$$n_o = \frac{K_t \cdot J}{2 \cdot \pi \cdot K_q}$$

$K_q$  – Coeficiente de torque;

$K_t$  – Coeficiente do empuxo;

$J$  – Coeficiente de avanço;

$D$  – Diâmetro do hélice[m];

$T$  – Empuxo;

$Q$  – Torque;

$\rho$  – Densidade do fluído;

$n$  – Rotação do hélice [rpm];

$n_o$  – Eficiência em águas abertas.

### 2.3.2. *Bollard pull*

A aplicação do teste *bollard pull* já existe há muitas décadas, mas atualmente apresenta vários avanços tecnológicos na obtenção de seus resultados. O registro de dados com maior sensibilidade permite aferir com mais certeza a potência da embarcação.

Em geral o teste é exigido para certificação do sistema propulsivo de modo que é medido por três diferentes definições descritas abaixo:

1. Força de tração máxima, a qual é a média máxima da tensão registada no arame de tração ao longo de um período de um minuto a um local de teste adequado. Como tal, este seria normalmente corresponde ao débito máximo do motor.
2. Força constante de tração, que é a tensão mantida continuamente no fio de reboque que é possível ao longo de um período de cinco minutos, a um local de teste adequado.
3. *Bollard pull* eficaz, que é a força de tração de que o navio pode conseguir em um mar agitado aberto. Uma vez que este não é determinável em um local de teste normal, ele é normalmente caracterizado como certa porcentagem da força de tração constante. Esta fracção é frequentemente tomada como 78 por cento, depois de feito tendo em conta as condições meteorológicas. (CARLTON, John, 2007, p.375).

O *Bollard pull* é caracterizado como um teste de tração, realizado geralmente para embarcações de pequeno e médio porte, como rebocadores, não excluindo a possibilidade da aplicação em grandes navios. O fator principal para o teste é a potência que sai do motor (BHP-*break horse power*), no entanto outros fatores são envolvidos, tais como: tipo do propulsor, bocal do tubo kort<sup>2</sup>, a forma do casco submerso, calado e trim. (GL, 2010).

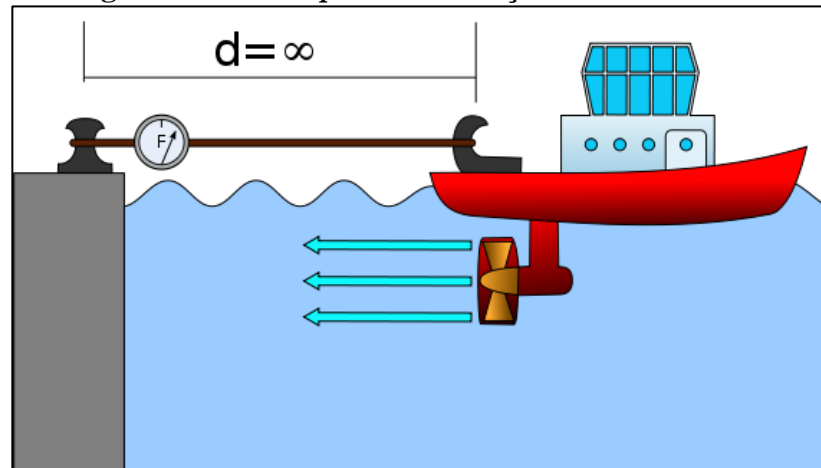
O teste consiste em amarrar um cabo entre o navio e um ponto fixo na costa. Acoplado a esse cabo é instalado um sensor de tensão que irá medir a força de tração que a embarcação impõe ao cabo, conforme o arranjo mostrado na Figura 7.

---

<sup>2</sup> Popularmente chamado de “tubulão”



**Figura 7 - Bollard pull em condições ideais.**

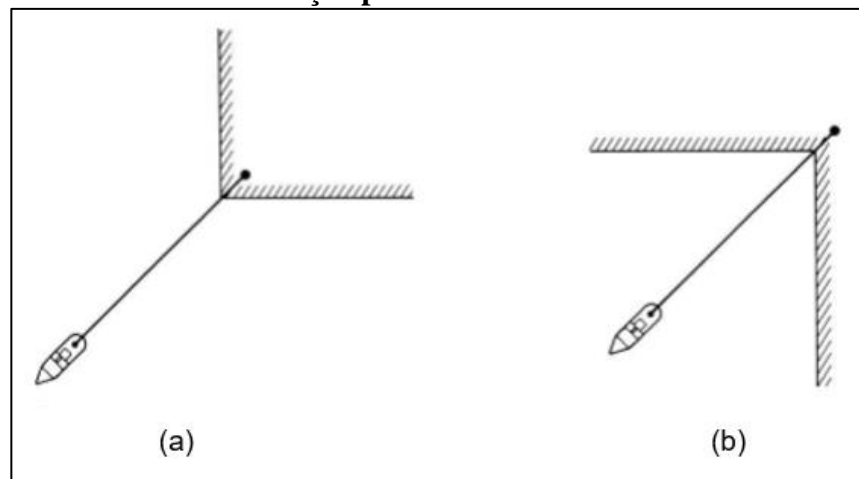


Fonte: <http://www.merequipment.com/introducing-bollard.aspx> (2015).

O ensaio é realizado em lugar de relativa profundidade em relação a distância de atracação, com caracterização de águas profundas. A extensão de água é necessária devido aos efeitos de recirculação providos da rotação dos hélices. Cada ensaio deve se atentar a movimentação da embarcação e a potência instalada.

A configuração dos objetos de ensaio deve obedecer uma ordenação geográfica afim de diminuir a recirculação no teste. Na Figura 8(a) descritas por (CARLTON, 2007) é possível evidenciar um bom exemplo de atracação para o teste, já na Figura 8(b) a configuração promove recirculação que influencia nos resultados.

**Figura 8 - Localização para atracamento: (a) boa localização para o atracamento e (b) má localização para atracamento.**



Fonte: Carlton (2007, p.376).

Ainda para fins de orientação geral é necessário se atentar a algumas condições para um bom julgamento do teste como:

1. A popa da embarcação não deve ser mais perto do que dois comprimentos navio da costa e, em geral, quanto maior a distância torna-se o melhor. 2. O navio deve ter pelo menos um comprimento de navio da água clara da costa em cada feixe. 3. A profundidade da água sob a quilha do navio não deve ser inferior a duas vezes o projeto na popa com uma profundidade mínima de 10 m. 4. Efeitos atuais e de maré devem, idealmente, ser zero, e, conseqüentemente, uma localização doca é preferível deste ponto de vista. Se estes efeitos são inevitáveis, em seguida, o julgamento deve ser realizado no 'top da maré' com uma velocidade da água do ambiente não superior a 0,5 m / s. 5. A condição de vento não deve exceder vigor três ou quatro e do mar ou rio deve ser calmo, sem ondas ou ondas. (CARLTON, John, 2007, p.376).

Além das condições meteorológicas já discutidas acima, é necessário a medida da força de tração, a potência do motor, a rotação do hélice e o passo do hélice se o navio for equipado com um hélice de passo variável.

Para a obtenção dos resultados o sensor de tensão deve estar adequadamente calibrado e necessita estar fixado em paralelo ao final do cabo de atração para evitar influências do ambiente externo, tais como fricção no cavalo de reboque do navio. Preferencialmente, os resultados do estudo devem ser medidos de maneira simultânea e contínua para permitir considerações precisas ao fim da análise.

Para uma estimativa inicial da força do *Bollard pull* é proposto pela Norma da Germanischer Lloyd (GL, 2010), formulações empíricas baseadas no BHP do motor:

$$\text{Rebocador com passo fixo: } BP(t) = \frac{BHP \cdot 0,9 \cdot 1,10}{100}$$

$$\text{Rebocador com hélices de passo fixo e tubo kort: } BP(t) = \frac{BHP \cdot 0,9 \cdot 1,20}{100}$$

$$\text{Rebocadores de hélice de passo variável: } BP(t) = \frac{BHP \cdot 0,9 \cdot 1,25}{100}$$

$$\text{Rebocadores com hélices de passo variável e tubo kort: } BP(t) = \frac{BHP \cdot 0,9 \cdot 1,40}{100}$$

Além das equações propostas pela GL (2010) também existe outras maneiras de obter uma estimativa da força de tração estática. Outra proposta é a de Mertes (2008), que relaciona o diâmetro, eficiências e potência necessária, por meio do equacionamento:

$$BP(\text{ton}) = \sqrt[3]{\frac{\pi \cdot \rho \cdot (D_o \cdot n_{pp} \cdot P_D)^2}{2}}$$

$$n_{pp} = \frac{D_p}{D_o} \cdot \sqrt{\frac{k_t^3}{2 \cdot \pi^3 \cdot k_q^2}} = \frac{\sqrt{\frac{2 \cdot T^3}{\rho \cdot \pi}}}{D_o \cdot P_D} = \frac{n_0}{n_i}$$

$$P_D(\text{BHP}) = 2 \cdot \pi \cdot Q \cdot n$$

$n_{pp}$  – Eficiência da bomba;

$n_i$  – Eficiência ideal;

BP (ton) – Força em toneladas do *bollard pull*;

$D_p$  – Diâmetro do hélice;

$D_o$  – Diâmetro do tubo kort;

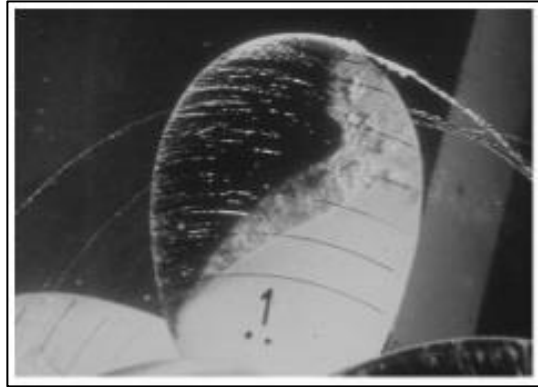
### 2.3.3. Cavitação

O fenômeno denominado cavitação é o principal limitador em um projeto de hélice naval, sendo indispensável ao projeto avaliar e quantificar a influência da cavitação sobre o propulsor.

O fenômeno de cavitação ocorre quando, acelerado pela rotação do hélice, a pressão do fluido cai para abaixo da pressão de vapor do líquido, isto é, a pressão à qual o líquido vaporiza. Quando a pressão de vaporização é alcançada, forma-se uma bolha de vapor d'água, que reduz o desempenho do propulsor e provoca o desgaste da superfície da pá do propulsor.

É importante constatar que a pressão de vapor depende da temperatura, da salinidade e da profundidade do fluido. Assim, cavitação pode ocorrer, em particular, em hélices marítimas onde picos de (sucção) baixa pressão podem surgir, provocando a cavitação no bordo de fuga da pá (folha) e também no dorso posterior da pá (nuvem de bolhas) MOLLAND (2011). Nas regiões afetadas pela cavitação é visível a sua influência como pode ser visto na Figura 9, onde mostra-se uma situação onde a cavitação ocorre em grande parte da pá.

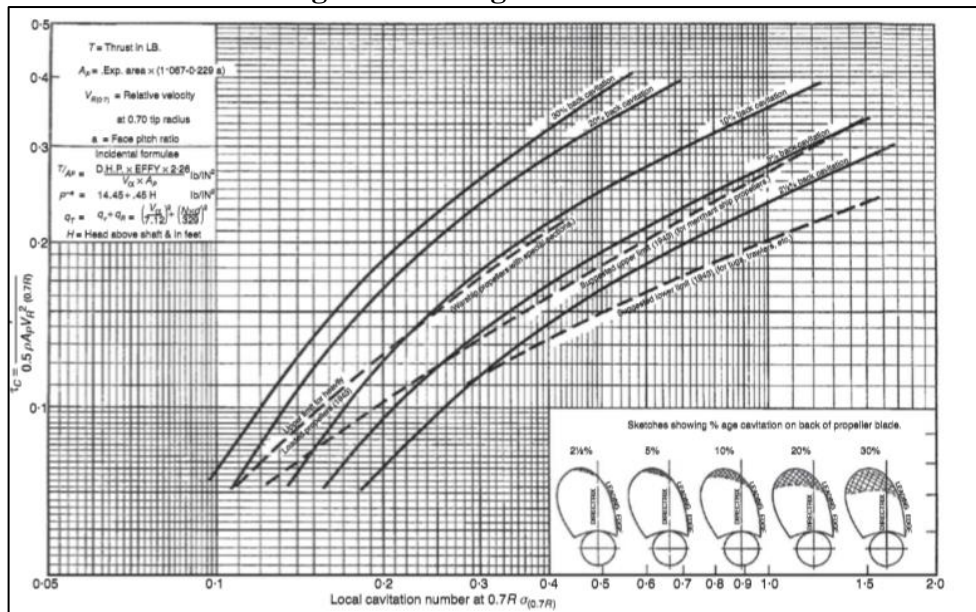
**Figura 9 - Folha e nuvem de cavitação juntamente com um vórtice de ponta**



Fonte: Carlton (2007, p.214)

Uma das formas de avaliar o efeito da cavitação é utilizar a proposta desenvolvida por Burril descrita por Molland (2011). Essa proposta consiste em um diagrama elaborado a partir do desenvolvimento de dezenas de ensaios em túneis de cavitação através de hélices de diferentes tamanhos. No diagrama (Figura 10), é apresentado as definições de parâmetros e equações empíricas aproximadas por curvas, que indicam a porcentagem da área no dorso das pás onde ocorre a cavitação. Apesar de ser um método empírico o diagrama de Burril infere uma estimativa da quantidade de cavitação passível nas pás e possibilita estimar a de torque no hélice.

**Figura 10 - Diagrama de Burril**



Fonte: Carlton (2007, p.221).

O diagrama não possibilita a entendimento do tipo de cavitação que ocorre no hélice, se existe a possibilidade de ocorrência de erosão e o local e/ou ponto de propagação da cavitação.

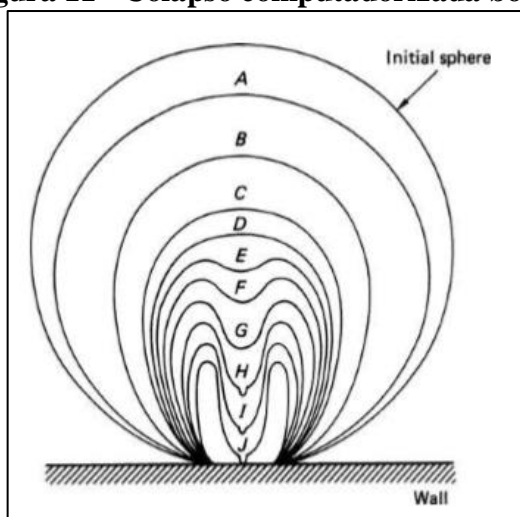
#### 2.4. DESGASTE DO PROPULSOR

O hélice naval sofre grandes desgastes, pois é submetido a uma serie de fenômenos que diminuem consideravelmente a sua vida útil, e em grande parte dos casos, acarreta em uma falha do propulsor.

O desgaste do propulsor geralmente acontece em condições normais de operação devido ao grande número de horas trabalhadas pela embarcação. Um dos problemas mais comuns em propulsores é a ocorrência de desgastes devido a cavitação, que em muitos casos reduz o desempenho e aumenta consideravelmente a cavitação.

O desgaste por cavitação em hélices pode ser atribuído especificamente ao colapso das bolhas de ar em regiões específicas do hélice. Esse colapso acarreta em microerosões em torno das regiões de baixa pressão. O colapso das bolhas pode ser descrito como uma implosão da bolha de ar, que faz com que a água adentre na bolha com uma agulha, promovendo uma fissura no material do hélice, esse fenômeno pode ser visto na Figura 11, descrita por Carlton (2007, p.211).

**Figura 11 - Colapso computadorizada bolha.**



Fonte: Carlton (2007, p.211).

O funcionamento do hélice ao longo do tempo de operação faz com que essas microerosões danifiquem as regiões, propagando trincas e levando a perdas significativas de massa.

Outro fator que pode afetar o hélice é quando o navio fica em *stand bay*, ou seja, esperando algum serviço, a falta de operação da unidade propulsora faz com que o hélice acumule uma grande quantidade de bioincrustação, modificando o desempenho do propulsor, como pode ser visto na Figura 12.

**Figura 12 - Bioincrustação no propulsor.**



Fonte: Autor (2016).

Para evitar o fenômeno de bioincrustação a embarcação é docada para reparo na unidade propulsora efetuando uma análise na unidade propulsora da embarcação. É verificado o propulsor para caso tenha trincas acometidas pelo fenômeno de cavitação, onde é realizado um teste de líquido penetrando.

O procedimento consiste em limpar a incrustação presente, em seguida realizar a desmontagem e uma limpeza superficial por meio de desbaste (lixamento). Em seguida é

aplicado uma solução para preparar a superfície para o líquido penetrante (LP). O ensaio é feito apenas nas regiões de interesse, como a região próxima ao bossô e bordos da pá.

Normalmente o líquido utilizado para a aplicação tem coloração Bordo para identificar as trincas. Assim, após a aplicação no hélice é contabilizado o tempo de ação que demora para o líquido penetrar na peça, decorrido o tempo é feita a limpeza da superfície, como pode ser visto na Figura 13(a).

**Figura 13 - Ensaio de líquido penetrante. (a) Aplicação de LP e (b) resultado da aplicação do revelador.**



Fonte: Autor (2016).

Por fim é borrifado o líquido revelador de cor branca sobre o hélice, revelando os pontos de falha através das manchas absorvidas pelo revelador, o tamanho dos pontos manchados evidência a falha presente na peça. (Figura 13 - b).

#### **2.4.1. Corrosão**

A corrosão do hélice é um fator indesejável para a operação, em especial a oxidação, sendo um aspecto preponderante na definição do material. A partir dessa característica é fato

que grande parte dos materiais metálicos são indispensáveis para fabricação de um hélice devido ao ambiente altamente nocivo ao qual são expostos.

Segundo Callister (2007, p. 456) “A corrosão é um ataque destrutivo e não intencional de um metal, esse ataque eletroquímico começa normalmente pela superfície”. Logo se torna indispensável considerar a oxidação em um propulsor, mesmo em materiais que possuem alta resistência a esse fenômeno.

Também é possível verificar que na afirmação do Callister, define-se que a corrosão é todo ataque destrutivo, onde pode-se caracterizar a cavitação, já vista anteriormente, como uma corrosão do material. Nesse mesmo pensamento o polímero também sofre um tipo de corrosão mesmo não sendo um material metálico, sendo usualmente conhecido como degradação do material.

A oxidação de metais acontece geralmente em sua superfície, acarretando em pás com faces mais rugosas que propagam trincas e aumentam as regiões suscetíveis a cavitação. Assim, também são os materiais poliméricos que sofrem quebras em suas ligações, fragilizando o material.

**Figura 14 - Disposição de corpos de prova na câmara de névoa salina.**



Fonte: Souza (2012, p.362).

Quantificar o quanto um material é resistente a oxidação não é uma tarefa fácil, pois requer a simulação do ambiente salino do mar, exigindo uma câmara na qual se simula um ambiente marinho severo, com concentração de sal e temperatura controlados. Esse tipo de equipamento é chamado de Câmara de Névoa Salina, e pode ser visto na Figura 14. Essa câmara permite a nebulização da solução salina e controle da pressão do ambiente, simulando ciclos de exposição do material ao ambiente nocivo em um tempo mais curto, conforme descrito por Souza (2012).



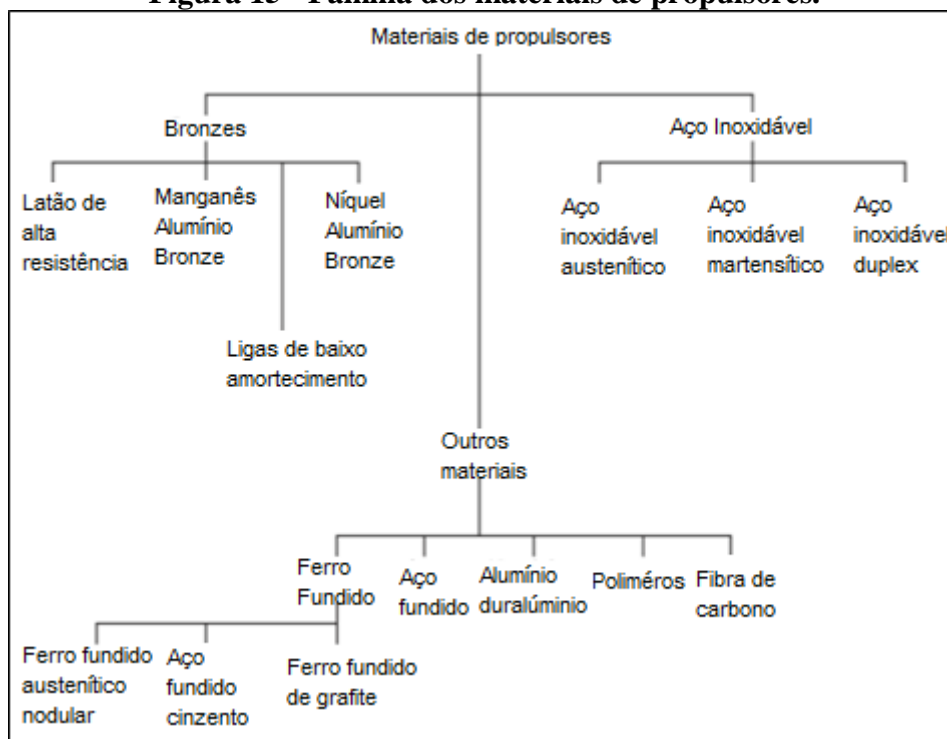
## 2.5. MATERIAIS DE PROPULSORES

Os materiais utilizados atualmente na fabricação de propulsores podem ser genericamente classificados em bronze e aço inoxidáveis. (CARLTON, 2007).

Um exemplo de material muito popular no passado e que perdeu espaço nos dias atuais é o ferro fundido, que possui a característica de absorver vibração. O avanço das propriedades mecânicas, aliada a alta taxa de corrosão do ferro fundido, motivaram o uso de outros tipos de materiais na fabricação de propulsores.

Na Figura 15, proposta por Carlton (2007, p.383), são apresentados os materiais conhecidos que têm sido utilizados na fabricação de hélices navais, abrangendo desde pequenas embarcações até navios de grande porte.

**Figura 15 - Família dos materiais de propulsores.**



Fonte: Carlton (2007, p.383) – Adaptada.

A propriedade requerida para os materiais de hélices navais imprescindivelmente dependerá das condições do navio e efeitos que o hélice estará submetido. No entanto, é especificado uma série de requisitos desejáveis que os materiais devem atender:

1. Alta resistência à corrosão por fadiga na água do mar. 2. Alta resistência à erosão por cavitação. 3. Boa resistência à corrosão geral. 4. Alta resistência ao ataque do impacto e corrosão sob fresta. 5. Alta resistência à relação de peso. 6. Características bom estado de conservação, incluindo soldabilidade e liberdade de craqueamento subsequente. 7. Boas características de fundição. (CARLTON, John, 2007, p.375)

Assim, com base nas propostas é possível escolher um material de acordo com suas aplicações, utilizando a tabela com as propriedades dos materiais da Figura 16. Essa escolha irá influir diretamente no número de ciclos que o propulsor suportará antes de apresentar falha.

**Figura 16 - Tabela típica de comparação dos materiais.**

| <i>Material</i>     |                         | <i>Modulus of elasticity<br/>(kgf/cm<sup>2</sup>)</i> | <i>0.15% proof stress<br/>(kgf/mm<sup>2</sup>)</i> | <i>Tensile strength<br/>(kgf/mm<sup>2</sup>)</i> | <i>Brinell hardness number</i> | <i>Specific gravity</i> | <i>Elongation (%)</i> |
|---------------------|-------------------------|---|--|--|--------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Copper-based alloys | High-tensile brass      | $1.05 \times 10^6$                                    | 19   | 45-60  | 120-165                        | 8.25                    | 28                    |
|                     | High-manganese alloys   | $1.20 \times 10^6$                                    | 30   | 66-72  | 160-210                        | 7.45                    | 27                    |
|                     | Nickel-aluminium alloys | $1.25 \times 10^6$                                    | 27.5   | 66-71  | 160-190                        | 7.6                     | 25                    |
| Stainless steels    | 13% chromium            | $2.0 \times 10^6$                                     | 45.5   | 69.5   | 220                            | 7.7                     | 20                    |
|                     | Austenitic              | $1.9 \times 10^6$                                     | 17   | 50.5   | 130                            | 7.9                     | 50                    |
|                     | Ferritic-austenitic     | $1.8 \times 10^6$                                     | 55   | 80   | 260                            | 7.9                     | 18                    |
| Cast iron           | Grey cast iron          | $1.1 \times 10^6$                                     | —  | 23.5   | 200                            | 7.2                     | —                     |
|                     | Austenitic SG           | $1.1 \times 10^6$                                     | —  | 44   | 150                            | 7.3                     | 25                    |
| Polymers            | Nylon                   | $0.008 \times 10^6$                                   | 1.1  | 4.7  | —                              | —                       | 35                    |
|                     | Fibreglass              | $0.14 \times 10^6$                                    | —  | 20   | —                              | —                       | 1.5                   |

Fonte: Carlton (2007, p.390).

Pela curva de tensão/deformação de um material é possível realizar uma série de análises em torno de suas propriedades, as quais são de suma importância na determinação do material a ser utilizado na fabricação de um propulsor.

Segundo Carlton (2007), as propriedades são importantes do ponto de vista geral de análise de tensão e, especialmente, nos casos em que as capacidades de análise numéricas são usados para determinar as tensões em uma lâmina. Ao determinar a tensão admissível, no entanto, são as propriedades de fadiga que são da maior importância para a estimativa da vida útil de um propulsor.

## 2.6. PROCESSO DE FABRICAÇÃO

O processo de fabricação de um hélice é difícil e requer técnicas de alta precisão e qualidade dos materiais. Os métodos utilizados para fabricação do propulsor têm alta influência na precisão geométrica da forma. Contudo as técnicas não se alteraram com o tempo, podendo ser separadas em três técnicas básicas: fundição, usinagem e laminação.

De acordo com Carlton (2007) o processo de fabricação do hélice está ligada na interpretação do projeto hidrodinâmico, na realidade física e na garantia de que o processo de fabricação não de origem a defeitos e imperfeições que possam causar uma falha em um curto tempo.

A técnica utilizada para a fabricação varia de acordo com a necessidade do solicitante, e as características que se busca. Fabricações de múltiplos propulsores podem exigir técnicas de fabricação diferentes daquelas usadas na fabricação de um único protótipo. Assim, características como: acabamento, tamanho, números de peças, tipo de hélice irão orientar a escolha da melhor técnica a ser usada.

### 2.6.1. Fundição

O processo de fabricação por fundição é um dos mais antigos e tradicionais, sendo o mais utilizado ainda no período atual. Este processo tem como intuito de fabricar o hélice por meio da fundição do metal líquido derramado em uma matriz com a forma desejada. Geralmente é confeccionado um molde para cada hélice, já que em muitos casos é muito difícil alcançar os mesmos parâmetros do projeto a partir de um molde padrão.

O método de fundição pode variar de acordo com o modelo utilizado e a técnica empregada na fundição, variando desde o material que constitui o molde fêmea do hélice quanto ao tipo de protótipo utilizado como macho, podendo ser consumível ou não.

A fundição varia de acordo com cada fabricante, a técnica que cada um utiliza vai de acordo com a estrutura e com o tipo de hélice produzido. O tamanho é fator determinístico para elaboração do processo, cada empresa trabalha com uma técnica individualizada, em função da segurança, da versatilidade, do espaço disponível e dos custos associados à produção.

**Figura 17 - Valores de sobre metal para Usinagem.**

| <b>Espessura aproximada da peça (mm)</b> | <b>Acréscimo médio na superfície do modelo (mm)</b> |                      |                     |
|--|---|----------------------|---------------------|
|  | <b>Aço</b>  | <b>ferro fundido</b> | <b>não-ferrosos</b> |
| <b>até 150</b>                           | 3,2   | 2,4                  | 1,6                 |
| <b>de 150 a 300</b>                      | 4,8   | 3,2                  | 1,6                 |
| <b>de 300 a 500</b>                      | 6,4   | 4,0                  | 2,4                 |
| <b>de 500 a 900</b>                      | 6,4   | 4,8                  | 3,2                 |
| <b>de 900 a 1500</b>                     | 6,4   | 4,8                  | 3,2                 |

Fonte: Metals Handbook, vol. 15.

Uma observação que deve ser feita é a questão de sobre metal para o acabamento, a peça desenvolvida deve ter medidas correspondentes com o que será removido. O superdimensionamento deve ser evitado, pois pode acarretar em retrabalhos e aumentar o custo da fabricação. O sobre metal é variável de acordo com o tipo de material empregado, e com o grau de acabamento que se deseja. Na Figura 17, são apresentados valores típicos de sobre metal usado no processo de fundição com moldagem em areia verde.

**Figura 18 - Valores típicos para contração.**

| <b>Metal</b>         | <b>% linear</b> |
|----------------------|-----------------|
| <b>aço</b>           | 2,0             |
| <b>ferro fundido</b> | 0,5-1,0         |
| <b>ferro nodular</b> | 0,8             |
| <b>alumínio</b>      | 1,7             |
| <b>latão</b>         | 1,3-1,6         |
| <b>zinco</b>         | 2,6             |

Fonte: Padrões de Fabricação para Aços Fundidos.

Um aspecto que deve ser levado em consideração para a fundição é o caso da contração do material, pois cada tipo de material empregado na fundição tende a contrair alguns milímetros devido a reorganização das moléculas durante o resfriamento. A Figura 18, apresenta valores típicos de contração de alguns materiais.

### 2.6.2. Usinagem

O processo de usinagem CNC é deveras atual, mais ainda não representa a maioria na fabricação de propulsores, visto a alta complexidade envolvida na fabricação destes componentes.

A fabricação por meio de usinagem CNC depende muito da tecnologia disponível, como por exemplo, os graus de liberdade do equipamento, o magazine de ferramentas disponíveis e os ângulos de procedimento de usinagem. O processo é muito empregado para acabamentos de peças fundidas, fabricação de moldes fêmea ou machos para fundição e fabricação de hélices de pequeno e médio porte, podendo aplicar-se em peças de grande porte.

Para utilizar o procedimento de usinagem é de fundamental importância o conhecimento do comportamento e da ordem de grandeza dos esforços de corte envolvidos, pois eles afetam a potência necessária para o corte, a capacidade de tolerâncias, a temperatura de corte e o desgaste da ferramenta. (DINIZ, 2013).

Dependendo do equipamento envolvido é necessário realizar várias etapas de usinagem, um exemplo ocorre na usinagem feita em duas etapas de fabricação: primeiramente é feito a usinagem da face frontal do hélice, como em alguns casos os equipamentos não dispõem de um alto número de graus de liberdade é necessário virar a peça, zerar a máquina e iniciar a usinagem do bordo posterior da pá.

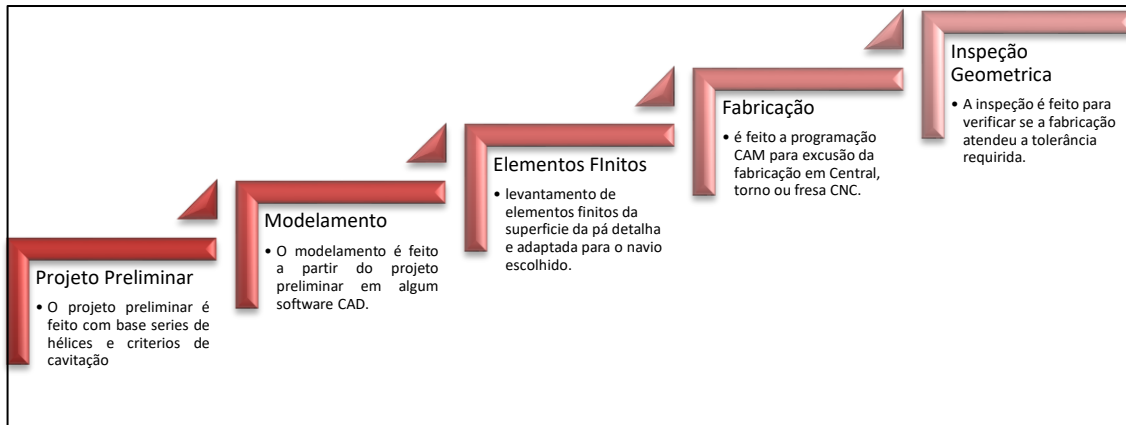
Existe uma literatura significativa sobre processos de usinagem. De maneira geral, a usinagem requer atenção a diversos problemas, tais como: a vibração proveniente da rotação, o arrancamento do material da peça e a fixação da peça na base para usinagem. Afim de evitar tais problemas usualmente as ferramentarias utilizam um molde de suporte para uma das faces usinadas para suportar a força mecânica a qual a base é submetida. A vibração também deriva da espessura da pá, faces muito delgadas e esbeltas acabam por aumentar o nível vibratório em resposta a força de penetração imposta pela ferramenta, podendo fazer com que a ferramenta, ou até mesmo a pá, quebrem.

A usinabilidade é uma propriedade do material intrinsecamente ligada à dureza do material e a sua resistência mecânica, mas também está relacionada com outros fatores como microestrutura, quantidade de aditivos, quantidade de partículas duras, etc. (DINIZ, 2013). É uma propriedade muito importante para aferir uma boa qualidade a peça a ser fabricada

Os Materiais mais utilizados para fabricação de propulsores tipo hélice, tais como bronze, latão ou alumínio tem fácil usinabilidade, não exigem tanto da ferramenta utilizada, provendo um desgaste menor por serem menos rígidos. O alumínio, em geral, pode ser facilmente usinado, exigindo uma baixa energia consumida por unidade de volume do metal

removida. (DINIZ,2013). Tudo isso representa um ganho na fabricação em relação ao custo da produção e operação de hora máquina.

**Figura 19 - Escopo de Projeto descrito por Carlton.**



Fonte: Autor (2016).

Atualmente muitas peças estão sendo fabricadas utilizando esta técnica em um projeto integrado de fabricação. Este projeto integrado é descrito por Carlton (2007), onde as etapas podem ser vistas na Figura 19.

### 2.6.3. Laminação

Os materiais metálicos são, de longa data, os mais utilizados na fabricação de propulsores tipo hélice. No entanto, o avanço no desenvolvimento de materiais compósitos, tem motivado o uso de tais materiais como uma alternativa viável para a fabricação de propulsores do tipo hélice.

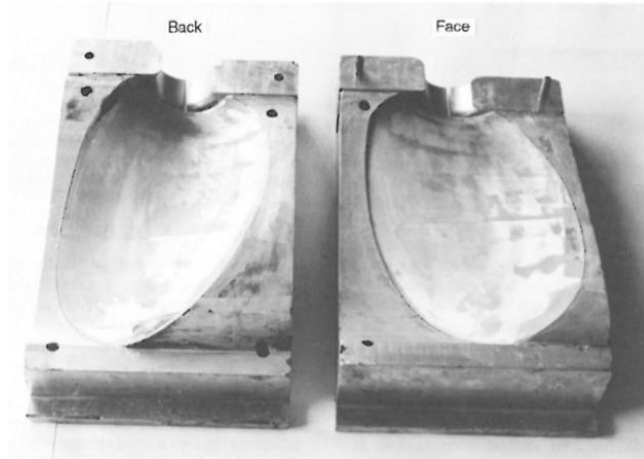
A relação de peso/resistência além da boa resistência a processos de corrosão, tem motivado o uso de materiais compósitos, conforme pode ser visto na Figura 15.

A fabricação por laminação pode ocorrer de diferentes formas, de acordo com a necessidade e a disponibilização dos equipamentos. Assim a variabilidade das técnicas empregadas na laminação faz que esse seja um processo em constante desenvolvimento. Em linhas gerais, a fabricação usando laminação envolve o projeto da pá, a fabricação de um molde, a laminação, a cura, o desmolde e o acabamento. YEO (2014).

Outro método é descrito por MOLLAND (1991) onde o processo de fabricação é realizado usando o processo hand-lay-up utilizando um molde fêmea da face e dorso da pá.

Neste processo o molde é feito em uma central CNC a partir de um bloco de alumínio (Figura 20).

**Figura 20 - Molde para laminação.**



Fonte: Molland (1991, p.46).

Em seu estudo MOLLAND (1991, p.47) conclui que a aplicação adequada dos compósitos e técnicas de laminação resulta em um desempenho satisfatório, mas o custo e a complexidade do formato das pás restringem o método de laminação hand-lay-up em condições normais.

### 3. DESENVOLVIMENTO: FABRICAÇÃO DO HÉLICE

Neste capítulo é apresentado o processo de seleção seguindo as recomendações disposta na International Tank Torking Conference 2008 (ITTC- 2008), para ensaio de águas abertas e de Wageningen (1945), passando pela construção e chegando a aferição das dimensões fabricadas.

#### 3.1. SELEÇÃO DO PROPULSOR

O desenvolvimento do estudo teve início com o fornecimento dos parâmetros hidrodinâmicos do casco do tipo catamarã da equipe Babitonga da UFSC – Joinville, os quais são descritos na Tabela 1.

A partir das características hidrodinâmicas e das informações do sistema propulsivo (motor, redução, eixo, potência, etc.), foram estabelecidos o tipo de série utilizado no projeto, bem como os fatores limitantes para a seleção do propulsor, tais como número de pás e tamanho do propulsor.

**Tabela 1- Dados da Embarcação**

| Parametros da Embarcação: |         |
|---------------------------|---------|
| LBP                       | 6.00    |
| B                         | 2.40    |
| D                         | 0.44    |
| T                         | 0.15    |
| LCB                       | -0.069  |
| Cp                        | 0.58    |
| Cb                        | 0.42    |
| Cstern                    | 10.00   |
| Gravidade                 | 9.81    |
| Massa especifica          | 1025.00 |
| Viscosidade               | 0.00    |

Fonte: Autor (2016).

Conforme descrito na fundamentação teórica, utilizou-se a série *B-Troost*, devido a farta literatura disposta sobre o assunto, e por ser uma das séries mais usadas no mundo. O ângulo de *rake* do hélice foi fixado em 15° padrão da série B, sendo estipulado que o passo do propulsor será fixo com sentido horário.



A seleção dos parâmetros foi feita a partir das equações de ensaio em águas abertas, conforme procedimento descrito na fundamentação teórica, visando maximizar a eficiência, e cujos efeitos de cavitação foram verificados por meio do diagrama de Burril.

Para a realização do procedimento de integração casco-hélice que permite a seleção do propulsor, foram estimados os coeficientes de esteira ('w') e dedução de empuxo ('t') por meio das proposições de Holtrop e Mennen mostrados nas equações abaixo:

$$t = 0.25014 * (L/B) * 0.28956 * \left( \frac{\sqrt{B/T}}{D} \right) * 0.2624 (1 - C_p + 0.0225l * c * b) \\ * 0.01762 + 0.0015 * C_{stern}$$

$$w = [1.095 - 3.4CB + 3.3Cb^2] + \left[ \frac{0.5Cb^2 * (6.5 - L/B)}{L/B} \right]$$

Os resultados dos cálculos são mostrados na Tabela 2.

**Tabela 2 - Parâmetros Gerais.**

| Parametros Gerais: |          |
|--------------------|----------|
| Vs[m/s]            | 5.658    |
| Fr                 | 0.738    |
| Reynolds           | 31478109 |
| w                  | 0.390    |
| t                  | 0.249    |
| Rt[N]              | 294.430  |
| T(empuxo)[N]       | 392.064  |
| Q(torque)[Nm]      | 22.0635  |
| Va[m/s]            | 5.658    |

Fonte: Autor (2016).

Os cálculos para a seleção do propulsor foram feitos utilizando o Excel como ferramenta matemática. O processo de seleção teve início com a determinação dos parâmetros do motor da equipe Babitonga, apresentando a rotação e potência descritos na Tabela 3. O valor do coeficiente de onda foi considerado como nulo, pois os cálculos abrangem uma análise em águas abertas, sem influência da corrente.

**Tabela 3 - Parâmetros definidos pela equipe Babitonga**

| Dados do Motor |        |
|----------------|--------|
| n[rpm]         | 1324.4 |
| Pb(BHP)[kW]    | 3.06   |

Fonte: Autor (2016).

Conforme descrito na fundamentação teórica, baseado em embarcações semelhantes, visando maximizar a eficiência e reduzir a vibração, selecionou-se um hélice de 3 pás.

A seguir, com base no diâmetro do propulsor, no número de pás e no empuxo fornecido, estabeleceu-se a razão  $Ae/Ao$  limite com base na equação de Keller (MOLLAND, 2011). O valor de  $K$  é uma constante que varia de acordo com o número de propulsores e o tipo da embarcação, para este estudo foi utilizado o valor de 0,2 indicado para embarcações com um propulsor (single-screw).

$$BAR = \frac{Ae}{Ao} = \frac{(1.3 + 0.3 * Z) * T}{(Pv - Po) * D^2} + K \quad (4.3)$$

$$T = \frac{Rt}{(1 - t)} \quad (4.4)$$

$Ae$  – área expandida;

$Ao$  – área do disco;

$Pv$  – Pressão de vapor d'água;

$Z$  – Número de pás;

$Rt$  – Resistência ao avanço;

$D$  – Diâmetro do hélice;

$t$  – coeficiente de dedução de empuxo;

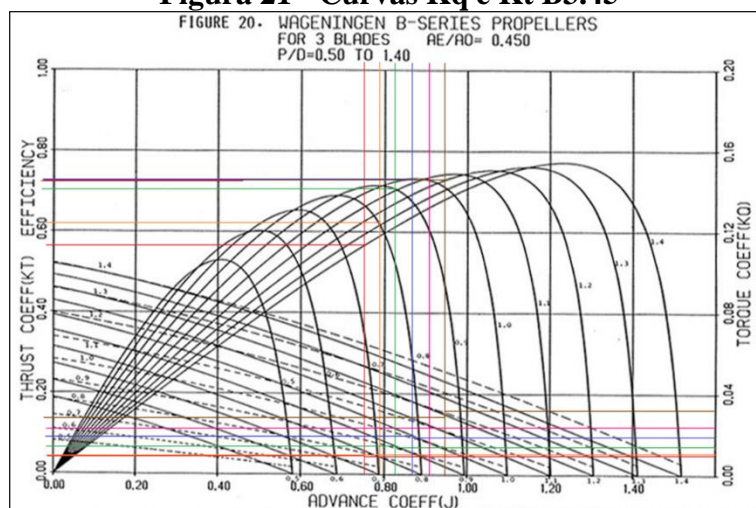
Em seguida por meio da estimativa da razão de área, buscou-se os demais parâmetros que descrevem o hélice, visando maximizar a eficiência e atender aos critérios de cavitação, conforme mostrado na Tabela 4.

**Tabela 4 - Proposição da pá.**

| Parametros para pá: |       |
|---------------------|-------|
| D Inicial           | 0.200 |
| Z                   | 3.000 |
| K                   | 0.200 |
| hs                  | 0.34  |
| Ae/Ao (keller)      | 0.411 |
| $kq/J^5$            | 0.040 |
| Ae/Ao(utilizada)    | 0.450 |

Fonte: Autor (2016).

Com a estimativa inicial chegou-se a número ideal de BAR de 0.45, logo realizando todas as variações para várias relações P/D utilizando o diagrama das curvas da série B para uma pá B3.45 (Figura 21).

**Figura 21 - Curvas Kq e Kt B3.45**

Fonte: Wageningen (1981, p.42).

Obtivemos os valores de  $kq$  e  $kt$  dispostos na Tabela 5, onde foi realizado uma manipulação matemática para a obtenção dos resultados.

**Tabela 5 - Relações de B3.45.**

| J     | $kq$  | P/D   | $kt$  | n, eficiência |
|-------|-------|-------|-------|---------------|
| 0.750 | 0.009 | 0.770 | 0.040 | 0.570         |
| 0.790 | 0.012 | 0.810 | 0.040 | 0.620         |
| 0.830 | 0.016 | 0.900 | 0.060 | 0.700         |
| 0.870 | 0.020 | 1.000 | 0.085 | 0.735         |
| 0.910 | 0.025 | 1.090 | 0.110 | 0.730         |
| 0.950 | 0.031 | 1.190 | 0.140 | 0.725         |

Fonte: Autor (2016).

A partir das informações captadas, foi gerado a melhor relação de P/D para o hélice assim com os parâmetros que compõem essa relação, chegando ao resultado disposto na Tabela 6.

**Tabela 6 - Saída dos dados de interesse.**

| Parametros Gerados |         |
|--------------------|---------|
| D                  | 0.294   |
| T[N] real          | 318.972 |
| P/D                | 1.000   |
| no                 | 0.735   |
| kt                 | 0.085   |
| kq                 | 0.020   |

Fonte: Autor (2016).

Para determinar o melhor propulsor foi estabelecido como critério de avaliação a melhor eficiência, desde que ele fosse aprovado no critério de 0% de cavitação estabelecido no diagrama de Burril. Utilizando o diagrama de Burril (Figura 10), em conjunto com as equações desenvolvidas abaixo, chega-se ao resultado da Tabela 7.

$$\tau_c = \frac{T}{1/2 * \rho * V_r^2 * A_p} \quad (4.6)$$

$$V_r = \sqrt{V_a^2 + (0.7 * \pi * n * D)^2} \quad (4.7)$$

$$A_p = (1.067 - 0.229 * (P/D)) * A_E \quad (4.8)$$

$$\sigma_{0.7R} = \frac{P_o - P_v}{1/2 * \rho * V_r^2} \quad (4.9)$$

T – Torque;

n – rotação;

V<sub>r</sub> – Valor absoluto da velocidade local a 0,7 do raio;

A<sub>p</sub> – área projetada do hélice;

σ<sub>0.7R</sub> – Cavitação a 0,7 do raio;

P<sub>o</sub> – pressão ambiente;

P<sub>v</sub> – pressão de vapor do fluido;

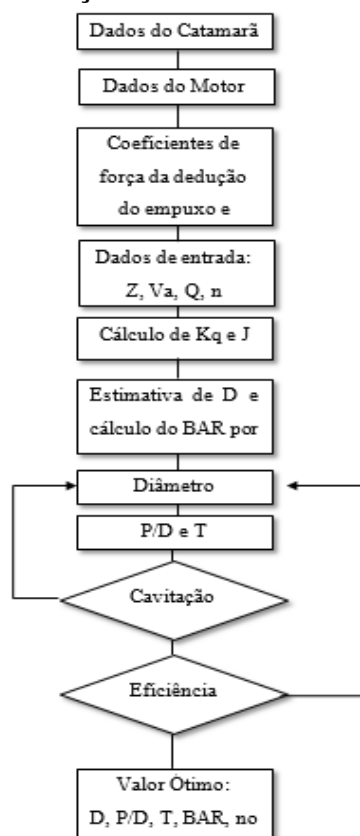
P/D – Relação passo diâmetro;

**Tabela 7 - Análise de Cavitação**

| Cavitação        |          |
|------------------|----------|
| Tc               | 0.266    |
| sigma,0.7        | 0.848    |
| Vr <sup>2</sup>  | 235.688  |
| Vr               | 15.352   |
| Ap               | 0.024    |
| Ae               | 0.028    |
| Ae/Ap            | 1.193    |
| Cavitação a 30%  | Aprovado |
| Cavitação a 20%  | Aprovado |
| Cavitação a 10%  | Aprovado |
| Cavitação a 5%   | Aprovado |
| Cavitação a 2,5% | Aprovado |

Fonte: Autor (2016).

A lógica proposta para a seleção do propulsor foi desenvolvida conforme o fluxograma mostrado na Figura 22, tendo início com a obtenção das informações junto a equipe Babitonga e realizando o processo de integração casco-hélice apresentado nesta secção.

**Figura 22 - Etapas para obtenção do melhor Diâmetro e melhor rendimento**

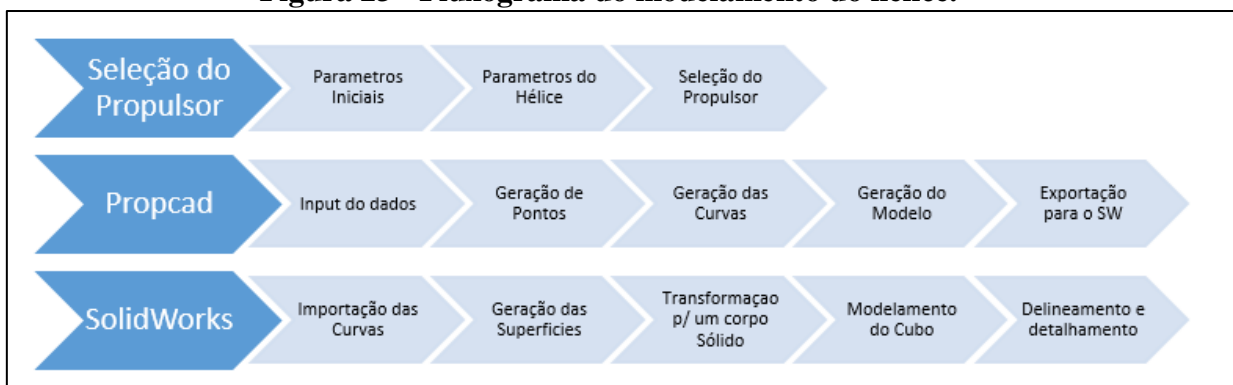
Fonte: Autor (2016).

Não foi estabelecido uma estimativa da força de tração estática do propulsor, pois as equações para esta estimativa abrangem características de embarcações de reboque. Os resultados provenientes destes não se assemelhariam ao valor encontrado.

### 3.2. MODELAGEM

A modelagem foi realizada com o auxílio do programa PROPCAD, inserindo os dados do propulsor definidos na etapa anterior e tendo como retorno a geometria do hélice. O procedimento de modelagem seguiu o fluxograma descrito na Figura 23, englobando as atividade e informações geométricas necessárias para a fabricação.

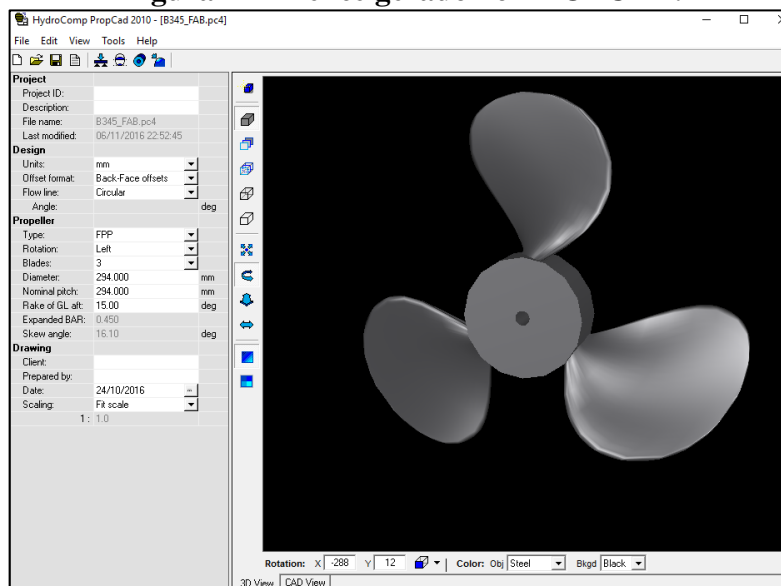
**Figura 23 - Fluxograma do modelamento do hélice.**



Fonte: Autor (2016).

A partir do PROPCAD foi obtido as curvas que descrevem o propulsor selecionado (Figura 24). Em seguida a geometria gerada pelo PROPCAD foi exportada para o programa SOLIDWORKS, para que a modelagem pudesse ser realizada.

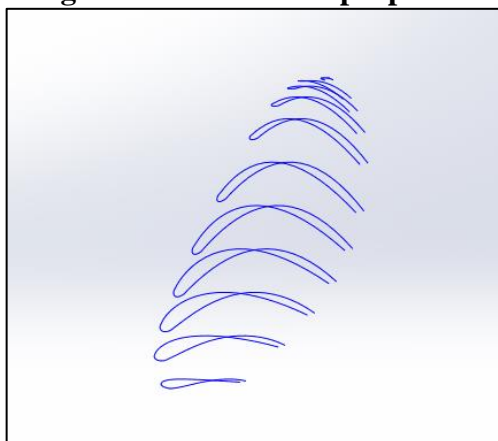
**Figura 24 - Hélice gerado no PROPCAD.**



Fonte: Autor (2016).

Quando convertido para o programa SOLIDWORKS o arquivo importado transmite apenas as curvas, pois o PROPCAD 2010, não é capaz de transmitir as informações de renderização das superfícies para um formato compatível com SOLIDWORKS. Assim na Figura 25 são mostradas as curvas que descrevem as seções referentes a geometria de uma das pás do propulsor.

**Figura 25 - Curvas do propulsor.**



Fonte: Autor (2016).

A partir das curvas importadas, foi utilizado a ferramenta de *loft* de superfície para interpolar as curvas gerando a face frontal e posterior do hélice. Em seguida, utilizando a

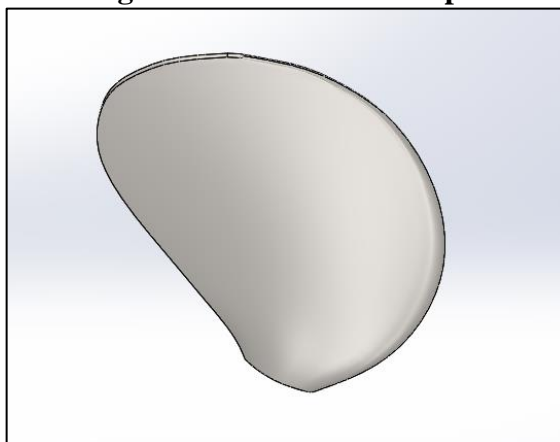
fermenta superfície limite foi feita a modelagem das superfícies que interligam a face e dorso da pá, completando a modelagem do propulsor.

Entretanto, o corpo formado constituía-se apenas de superfícies. Assim foi necessário utilizar a ferramenta de costura de superfícies para gerar um corpo sólido, chegando a formato visto na Figura 26.

Uma vez modelada a pá base, foi utilizada a ferramenta de repetição para gerar as demais pás correspondentes a configuração de três pás definidas no projeto.

Por fim o cubo do hélice foi desenvolvido de acordo com o encaixe no motor. Como a equipe já possui um hélice antigo para este motor, foi modelado o cubo de acordo com acoplamento do hélice já existente.

**Figura 26 - Modelamento pá.**



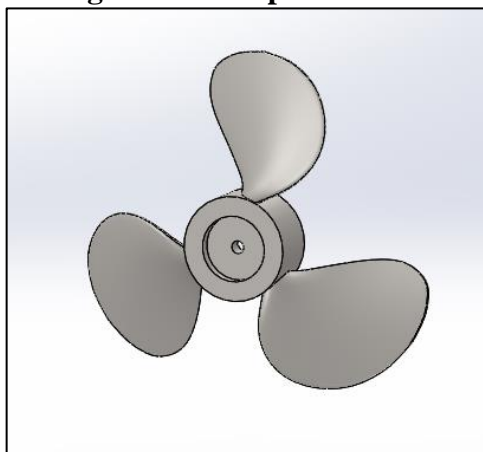
Fonte: Autor (2016).

Utilizando um paquímetro foi retirado informações geométricas do cubo antigo para a modelagem. O acoplamento é feito por meio de um pino que trava o cubo do hélice ao eixo do motor e para que o propulsor não fique frouxo e/ou desalinhado é rosqueado uma porca na parte final desse mesmo eixo, permitindo que ocorra apenas o movimento de rotação ao longo do eixo.

A utilização do SOLIDWORKS permitiu a obtenção da estimativa de peso e volume para a hélice projetado, tendo a massa específica do material e gerando o relatório presente no Apêndice 1. O resultado da modelagem pode ser visto na Figura 27, e o detalhamento no Apêndice 2.



**Figura 27 - Propulsor Final.**



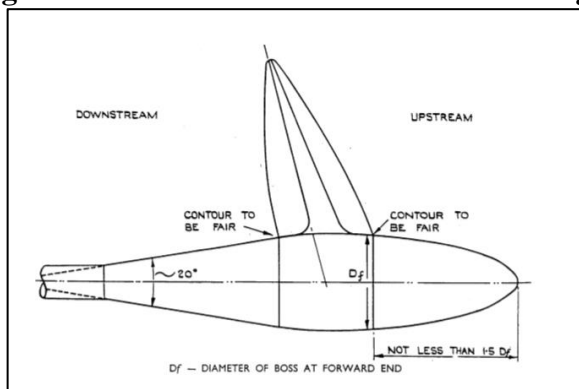
Fonte: Autor (2016).

Com o término de toda cadeia de procedimentos foi alcançado o modelamento final do propulsor com todas as medidas necessárias para a fabricação e conversão do arquivo para uma linguagem CAM.

Afim de evitar perdas na região do bosso do propulsor foi idealizado uma capa para direcionar as linhas de corrente em torno da área frontal, devido ao tipo de acoplamento disposto na região do bosso. Ele ocupa aproximadamente 26% da área de ação das pás sendo necessário desenvolver uma alternativa para evitar a perda eficiência propulsiva, a qual está diretamente relacionada com a área molhada das pás.

O dimensionamento do bosso de acordo com as regras da ITTC não era possível, pois as dimensões exigidas se tornariam exageradas para a fabricação. Segundo a ITTC o comprimento do domo (capa do propulsor), não pode ser menos que 1.5 a 2.0 do diâmetro do propulsor, considerando testes em águas abertas.

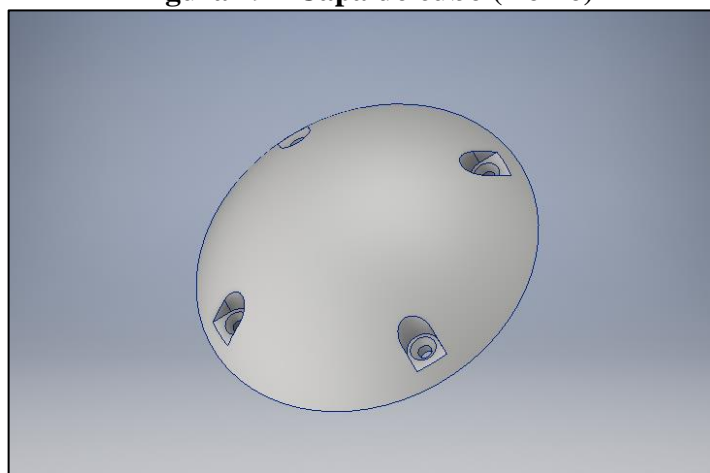
**Figura 28 - Geometria do modelo de "Fairings"**



Fonte: ITTC (2008, pg. 3).

Assim foi idealizado uma dimensão com base no diâmetro do propulsor, de modo que o comprimento “Df” fosse 50% o diâmetro do cubo do hélice, mesmo que este seja inferior ao recomendado pela ITTC. Mesmo assim a ideia é amenizar as perdas, tendo em vista que o propulsor será submetido apenas a testes de *bollard pull*.

**Figura 29 - Capa do cubo (Domo)**



Fonte: Autor (2016).

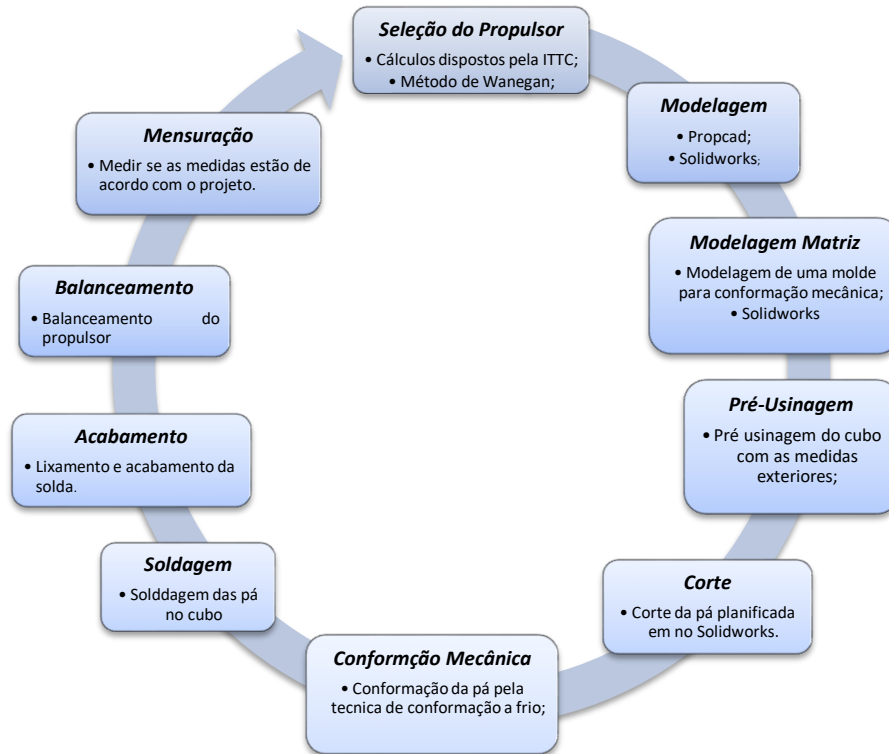
A finalidade dessa capa é também a de proteger a parte interna do acoplamento evitando possíveis corrosões e desgastes indesejáveis durante o funcionamento do hélice. O resultado final é mostrado na Figura 29.

### 3.3. FABRICAÇÃO DO HÉLICE

O processo de fabricação utilizado nesse trabalho utilizou a conformação mecânica junto com a usinagem e soldagem. Idealmente este trabalho considerou utilizar o processo de usinagem CNC, devido a maior precisão na obtenção da geometria complexa do hélice. Mas devido ao alto valor agregado e a falta de parceiros para o mesmo, foi realizado a fabricação com os recursos disponíveis.

Para o processo de fabricação contou-se com o vital apoio do estaleiro Detroit S.A., que permitiu a realização do projeto. O projeto seguiu o desenvolvimento proposto no fluxograma de atividades mostrado na Figura 30. As atividades presentes no fluxograma buscam atender a necessidade do projeto, adequando-se as ferramentas de trabalho disponíveis.

**Figura 30 - Escopo de Fabricação.**



Fonte: Autor (2016).

O processo utilizado para gerar a geometria da pá consiste basicamente em conformar uma chapa metálica em um molde com o formato geométrico requerido e fazer a união ao cubo por meio de um processo de soldagem.

Devido ao processo de fabricação, observa-se que alguns parâmetros foram descaracterizados, como por exemplo, o perfil da pá, pois como a pá foi modelada a partir de uma chapa metálica, tornou-se impossível empregar um perfil naca as pás.

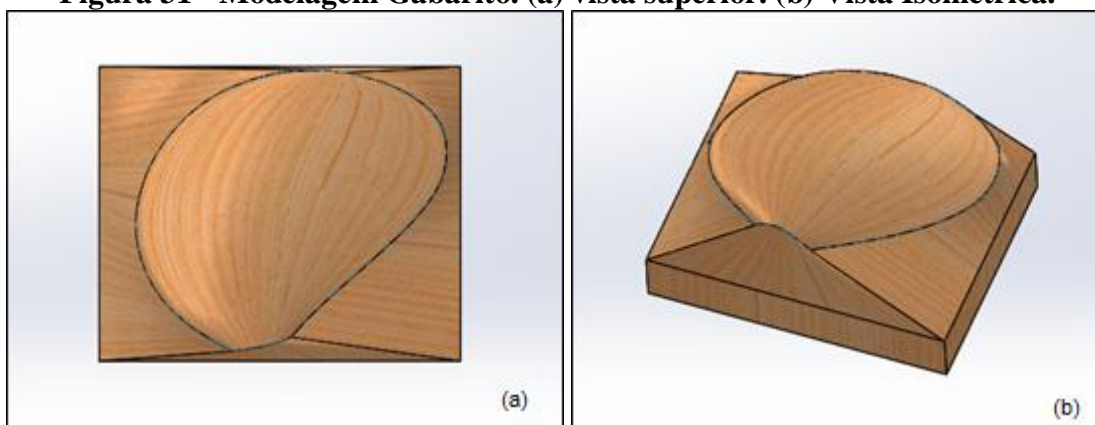
A fabricação da capa do bossô não ocorreu, devido ao tipo de material disponível para a fabricação e a falta de ferramentas disponíveis para gerar a forma semiesférica da capa do bossô. Impossibilitando um estudo sobre a utilização desta capa.

### 3.3.1. Modelagem do Gabarito

Como inicialmente foi realizado a modelagem do propulsor, foi utilizado o mesmo arquivo em CAD para gerar um molde com as dimensões da face do propulsor. Logo, utilizando um software CAD foi feito um bloco abaixo da geometria do hélice, foi optado por deixar o

molde com a parte superior côncava, pois assim facilitaria o processo de conformação mecânica. A partir dos dois sólidos foi feita a união por meio da ferramenta de *Loft* de extrusão, gerando um molde para obtenção da pá, como pode ser visto na Figura 31(a) e (b).

**Figura 31 - Modelagem Gabarito. (a) vista superior. (b) Vista Isométrica.**



Fonte: Autor (2016).

Em seguida foi feito o detalhamento do molde por meio da geração de secções 2D. A ideia para a fabricação do gabarito foi fatiar o molde, ou seja, dividir o desenho em várias seções verticais com uma determinada espessura e uni-las para formar a geometria a ser usada como molde.

O material utilizado para esta tarefa, foram chapas de madeira de 6mm de espessura. A escolha da madeira foi feita por ser maleável a aplicação e poder realizar um acabamento final por meio do processo de lixamento.

Assim o molde foi segmentado em 20 seções, como pode ser visto no Apêndice 3. Em seguida, os desenhos das secções foram impressos e coladas em nas peças de madeira de 150x150 mm, as quais foram cortadas utilizando uma serra fita e unidas com uma cola própria para madeira, resultando na Figura 32.

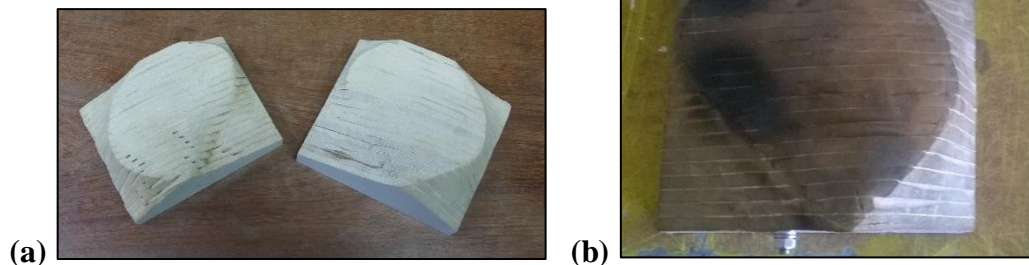
**Figura 32 - Gabarito Madeira.**



Fonte: Autor (2016).

Inicialmente foi realizado a confecção de dois moldes, sendo o primeiro confeccionado para uma primeira análise da força compressiva empregada na fabricação. Devido à perda de informações a cada seção cortada foi necessário efetuar um uma etapa de acabamento após a união das seções, realizando o processo de lixamento até chegar a geometria semelhante à pá do propulsor. (Figura 33 - a).

**Figura 33 - Gabarito de madeira. (a) Acabamento dos dois gabaritos. (b) Gabarito Reforçado.**



Fonte: Autor (2016).

Afim de evitar que durante o processo de conformação a frio as camadas de madeira abram, foi necessário fazer um reforço com parafusos a cada 4 camadas e passar um fuso de fora a fora do gabarito para manter as seções firmes. (Figura 33 - b).

### 3.3.2. Pré-usinagem

Para a fabricação do cubo foi repassado o detalhamento separado para o profissional do torno realizar a usinagem, semelhante ao corte da seção no Apêndice 2, com as cotas e dimensões adequadas para o acoplamento ao motor da equipe Babbitonga. Junto a ferramentaria da Detroit S.A. foi feito o processo de usinagem em um tarugo de Aço carbono 1020.

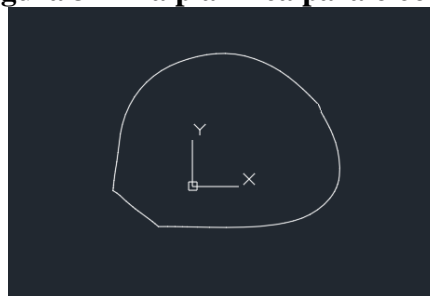
Como medida de prevenção ao aporte de calor proveniente da solda, que pode afetar a peça e distorcer as medidas do cubo, optou-se em apenas usinar a parte exterior do cubo para não obter complicações como a deformação cubo que pode ocasionar em uma mudança da forma circular para um formato oval, interferindo na geometria final do hélice. Também foi deixado um ressalto na parte frontal do mesmo, para facilitar o acoplamento do hélice no torno mecânico após o processo de união das pás.

### 3.3.3. Delineamento e corte

Outro trabalho executado paralelamente a etapa de usinagem do cubo, feito o corte da chapa para a fabricação da pá. Foi necessário delinear a pá, ou seja, planificar a superfície para obter uma superfície plana e assim realizar o devido corte, com as proporções necessárias do tamanho que pode caracterizar posteriormente a geometria da pá.

A planificação pode ser confundida com a projeção da geometria, o que pode acarretar diversos equívocos nos projetos. A fim de obter a geometria correta para a conformação foi utilizado a ferramenta do programa em CAD para planificar a superfície, por meio da ferramenta planificar disponível no SOLIDWORKS, foi obtido o formato característico da pá, visto na Figura 34.

**Figura 34 - Pá planifica para o corte.**



Fonte: Autor(2016).

As informações da geometria planificada da pá foram convertidas do formato DXF para uma linguagem CNC, sendo em seguida, enviadas para a máquina de corte a plasma, a qual realizou o procedimento de corte, resultando na Figura 35. A chapa utilizada para esta fabricação foi de Aço Naval (A36), com espessura de 1/8" ou 3.16mm.

**Figura 35 - Pá Planificada.**



Fonte: Autor (2016).

O Aço A36 é amplamente utilizado na construção naval devido as suas características. Ele apresenta uma boa soldabilidade e possui pequenas quantidades de carbono, sendo praticamente 99% de ferro com baixa resistência mecânica e usinabilidade. É um aço leve, utilizado especialmente em estruturas, mas devido a sua alta propensão a ferrugem, necessita de um revestimento (TRIMETAIS, 2016).

#### **3.3.4. Conformação Mecânica**

A conformação que estava prevista para essa fabricação seria a quente, mais ao realizar o primeiro teste verificou-se que sem um termômetro adequado ficou impossível controlar a conformação, o calor proveniente do maçarico acabou por deformar de maneira indesejada o material. Por ter uma espessura fina, foi visto que apenas com a força manual seria o suficiente para a pá planificada aderir ao formato do gabarito. Logo, empregou-se um método de conformação mecânica a frio, utilizando uma morsa, cunhas de metal, o gabarito e um martelo.

**Figura 36 - Posicionamento e fixação da pá no gabarito.**



Fonte: Autor (2016).

O gabarito foi posicionado na abertura da morsa junto a chapa plana, em seguida foi feito o fechamento da morsa posicionando a pá na posição da cavidade do Gabarito e prendendo de tal modo que as peças estejam fixas, como pode ser visto na Figura 36.

**Figura 37 - Modelamento da pá.**



Fonte: Autor (2016).

A seguir utilizando uma cunha e o martelo, executando consecutivos golpes a chapa, a pá foi conformada até atingir a geometria do molde (Figura 37). O resultado do procedimento é possível visualizar na Figura 38.



**Figura 38 - Resultado da Conformação.**



Fonte: Autor (2016).

Em seguida, afim que todas as pás tenham o mesmo tamanho, colocou-se uma pá sobreposta a outra, as quais foram unidas com dois pontos de solda, um equidistante do outro. Usando uma esmelhiradeira com um disco de desbaste, o tamanho das pás foi corrigido. Em seguida foi feito o lixamento das três peças usando uma esmerilhadeira com um disco de *Flap*, conferindo o acabamento superficial. (Figura 39).

**Figura 39 - Resultado Acabamento Superficial.**



Fonte: Autor (2016).

Após conferir o formato geométrico das pás, foi necessário realizar alguns procedimentos de acabamento, como quebra de quina e lixamento. Primeira foi necessário verificar se todas as três pás atingiram a geometria esperada além de possuírem as dimensões

estabelecidas para o projeto. Assim usando uma trena e paquímetro, determinou-se que as 3 pás apresentavam similaridade geométrica com o projeto.

### 3.3.5. Soldagem

Após o acabamento, realizou-se a união das pás ao cubo. Primeiramente foram feitos dois rasgos na circunferência do cubo, um para marcar o centro e outro para o limite de entorse na raiz. No sentido longitudinal do cubo foi feito três riscos ortogonais equidistantes a 120° um do outro, completando a marcação central da pá.

Para a soldagem foi utilizado uma máquina TIG para operação, o material de adição utilizado foi um arame de Aço Inox 309 com diâmetro de 1.2mm. A máquina foi ajustada pelo operador para uma amperagem em torno de 95~100 A, com uma vazão de 20 l/min de Argônio Puro.

**Figura 40 - Montagem do Hélice.**



Fonte: Autor (2016).

Inicialmente foi feita a montagem da pá, ou seja, o ponteamto da peça na posição estabelecida (Figura 40). Em seguida foi conferido se a montagem estava na posição correta, pois caso contrário seria necessário quebrar o ponto e realizar novamente a montagem.

**Figura 41 - Soldagem das pás.**



Fonte: Autor (2016).

Com a montagem aprovada, foi finalizado o procedimento com a união das pás, soldando-os ao cubo usando os mesmos parâmetros de operação da máquina. (Figura 41).

### **3.3.6. Usinagem**

Com a etapa de soldagem finalizada foi feito o processo de balanceamento e usinagem da região interna do cubo. Primeiramente foi acoplado o ressalto previamente idealizado, prendendo-o a castanha do torno manual e usinando a parte interna do cubo com as medidas estabelecidas.

Logo após a parte interna foi alterado o lado da a peça e realizado a remoção do ressalto de fixação e um rebaixo na parte frontal para o acoplamento posterior da porca de fixação junto ao eixo. A chaveta do hélice foi feita por uma fresadora, que realizou um rasgo horizontal na região interna da peça.

Por fim, utilizando o próprio torno mecânico foi feito o balanceamento do hélice, acoplado a um eixo de 10mm e girando-o no sentido horário, verificando se existe algum desbalanceamento.

O balanceamento é feito dando um impulso em uma das pás, para que ele esteja balanceado é necessário que quando ele estiver perdendo a força, pare com uma das pás perpendicular ao eixo na região superior, sem realizar um contra giro. Caso contrário, é analisado a pá que ficou abaixo do eixo, realizando um desbaste, afim de remover o peso

naquela determinada região. A verificação estará completa assim que atingir a condição estipulada acima.

Está verificação foi feita de maneira abrupta, necessitando posteriormente de um balanceamento mais preciso, utilizando uma ferramenta mais propícia para determinar a condição de balanceamento.

### 3.3.7. Acabamento

Ao final das etapas de fabricação para manter conservado a propriedade do material foi imprescindível uma camada protetora. A fim de conservar o hélice, a peça fabricada foi jateada com granalha para eliminar todas a impurezas superficiais.

**Figura 42 - Hélice fabricado.**



Fonte: Autor (2016).

A pintura realizada foi feita com uma pistola de ar utilizando uma tinta *prime* cinza como primeira camada protetora do metal de base. Posteriormente, foi pintado a pá com uma tinta esmaltada na cor amarela com o objetivo de garantir uma boa rugosidade e permeabilidade da água no contorno da pá. (Figura 42).

Por fim foi feito aferição do peso em relação a avaliação de peso e volume do SOLIDWORKS, assim foi visto que a o hélice apresentou um peso de 1,414 kg, já o software retornou um valor de 2,01 kg (Apêndice 1).

A diferença pode estar caracterizada pela união e acabamento, onde grande parte do material foi consumida aferir uniformidade a geometria da pá. Outra questão que pode ter

relação com essa diferença pode ser a densidade específica implementada no software e densidade real do material.

#### **4. DESENVOLVIMENTO: ENSAIO DE TRAÇÃO ESTÁTICA**

Com a finalidade de atribuir um valor quantitativo para o desempenho do hélice projetado e realizar uma comparação com os demais hélices da equipe Babitonga, foi proposto realizar o teste de tração estática.

Observou-se que não existe nenhum critério específico ou procedimento para realização do teste em embarcações de recreio. Com o intuito de realizar um procedimento coerente de ensaio, optou-se por realizar o experimento seguindo, da melhor maneira possível, as recomendações da NORMAN 01.

Inicialmente foi analisado as proposições dispostas pela NORMAM 01 e feito uma compensação em relação ao catamarã, já que as determinações estão previstas para rebocadores. Logo chegou-se ao procedimento de teste disposto no Apêndice 4.

Para esta análise seria necessário que o barco estivesse pronto. No entanto, devido a uma demora na entrega de equipamentos, o catamarã não ficou pronto em tempo hábil para a realização do teste até a data prevista. Portanto buscou-se uma alternativa para a realização do ensaio de tração estática.

Com o apoio da equipe, contatou-se um dos patrocinadores do Babitonga que dispunha de um pequeno tanque para análise da força propulsiva. Então o ensaio foi realizado na oficina do seu Ernesto Spiesser, fabricante de motores de popa para pequenas embarcações.

A finalidade do teste continuou a mesma, assim como a funcionalidade, mas sendo realizado em um local fechado sem a utilização da embarcação. O arranjo de ensaio utilizado consiste em um encosto para fixar o motor, sobre uma base livre que está conectada a um dinamômetro. Com ação do motor a base se locomove tracionando a ligação entre o tanque com dinamômetro e a base. É importante observar que, no experimento, foi utilizado o mesmo motor utilizado na embarcação da equipe Babitonga, porém foi utilizado uma bateria de potência menor, pois a utilizada em competição não estava disponível.

##### **4.1. LOCAL**

O ensaio foi elaborado em um tanque de tamanho 1100x1100x800 mm que utiliza uma base livre apoiada sobre trilhos na lateral do tanque. A base está interligada por um cabo a borda do tanque. Nesse cabo está fixado um dinamômetro instalado para mensurar a força propulsiva.

O motor é conectado a base móvel e com a partida do motor, a base tende a se movimentar, tracionando o cabo. A força de tração é então medida pelo dinamômetro. O mecanismo é muito similar ao utilizado no ensaio de águas abertas (Figura 6) como pode ser visto na Figura 43.

**Figura 43 - Mecanismo de ensaio de força de empuxo.**



Fonte: Autor (2016).

Este equipamento é utilizado pela empresa para garantir que o motor fabricado com o conjunto de propulsão tipo hélice, possui a potência e força de empuxo especificada. Apesar das condições não serem as ideais, o sistema se faz útil para a finalidade que foi projetado.

#### 4.2. EXPERIMENTO

Para a execução do teste inicialmente foi conferido novamente o balanceamento das hélices por meio de um dispositivo adequado para efetuar a aferição (Figura 44). O processo se fez necessário para que durante a operação não ocorra nenhum “jogo”, ou seja, desalinhamento que possa gerar perturbações vibratórias indesejadas.

**Figura 44 - Dispositivo para balanceamento do hélice**



Fonte: Autor (2016).

Devido ao desbalanceamento encontrado, foi necessário fazer a retirada do material em umas das pás, logo parte da pintura teve que ser removida. (Figura 45). Mediante ao teste foi feito um lixamento para conferir que nenhuma rugosidade interfira na análise.

**Figura 45 - Pá devidamente Balanceada.**



Fonte: Autor(2016).

Em seguida foi feita a verificação do conjunto de dispositivos ligados ao motor, verificando o funcionamento e a eventual necessidade de adaptações. O motor é do tipo DC, junto



a ele está conectado um controlador ESC, um controlador de potência e duas baterias: uma bateria de 5V para o controle da operação direcionada ao ESC e controlador de potência e a outra bateria de 13 V para alimentar o motor. A bateria utilizada no teste foi de chumbo/ácido com 13 V, pois a bateria de lítio de 48 V, ainda não estava disponível.

O motor foi fixado em um encosto acoplado a base, em seguida foi feito o acoplamento do hélice ao eixo, respeitando o sentido de rotação de acordo com o bordo de ataque a qual o hélice está foi projetado (Figura 46).

Antes da partida do motor foi utilizado um cronômetro digital para aferir o tempo decorrido da “corrida”, por meio de uma tabela padronizada foi feita a mensuração da força a cada 15 segundos até o término de 2 minutos.

Antes de iniciar o ensaio, foi verificado qual seria a reação do propulsor aos níveis de potência de 50%, 75% e 100%. Com a avaliação dos níveis de potência, foi observado que os melhores níveis de trabalho foram a 75% e 100% do motor.

**Figura 46 - Motor pronto para o ensaio.**



Fonte: Autor (2016).




Devido ao tanque ter dimensões limitadas, não foi possível evitar que a influência da propulsão influísse no experimento. Durante a operação do motor, observou-se que a água

começa a agitar o tanque, de acordo com cada nível de rotação adotado, gerando um refluxo e fazendo com que a base realizasse um balanço, afetando a propulsão e dificultando a mensuração da força.

#### 4.3. RESULTADOS

Inicialmente foi feito a mensuração das características dos propulsores utilizados no ensaio, para efetuar uma comparação posteriormente. Logo as informações foram dispostas na Tabela 8.

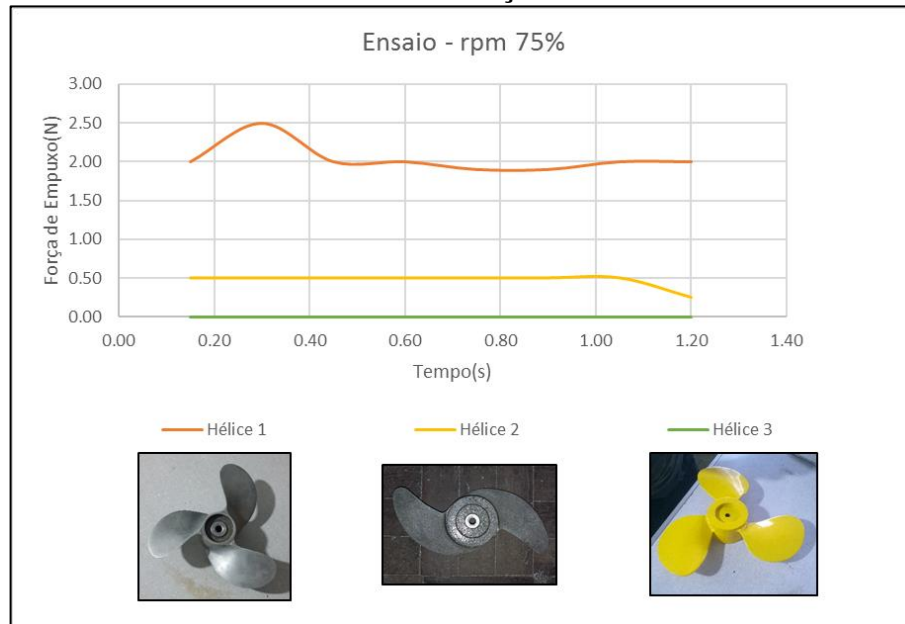
**Tabela 8 - Dados dos propulsores.**

|  |      |  |       |  |       |
|--|------|--|-------|--|-------|
| <b>Hélice 1</b>  |      | <b>Hélice 2</b>  |       | <b>Hélice 3</b>  |       |
| Peso [kg]  | 0.45 | Peso [kg]  | 0.475 | Peso [kg]  | 1.414 |
| Diametro[m]  | 0.22 | Diametro[m]  | 0.275 | Diametro[m]  | 0.294 |
| Número de pás  | 3    | Número de pás  | 2     | Número de pás  | 3     |
| Skew(graus)  | 28   | Skew(graus)  | 19    | Skew(graus)  | 16    |

Fonte: Autor(2016).

O ensaio foi realizado primeiramente com o hélice de melhor desempenho que o Babbitonga possui e que foi fabricado pelo mesmo patrocinador do motor. A característica principal dele é de ter uma boa angulação de *skew* com uma geometria côncava na região pá, fazendo com que tenha uma grande força de empuxo. Durante o ensaio chegou-se a 2,5 kgf com 75% do motor e com a elevação da potência mais que dobrou a sua força atingindo valores de 6,5 kgf, como pode ser visto nos Gráficos 1 e 2.

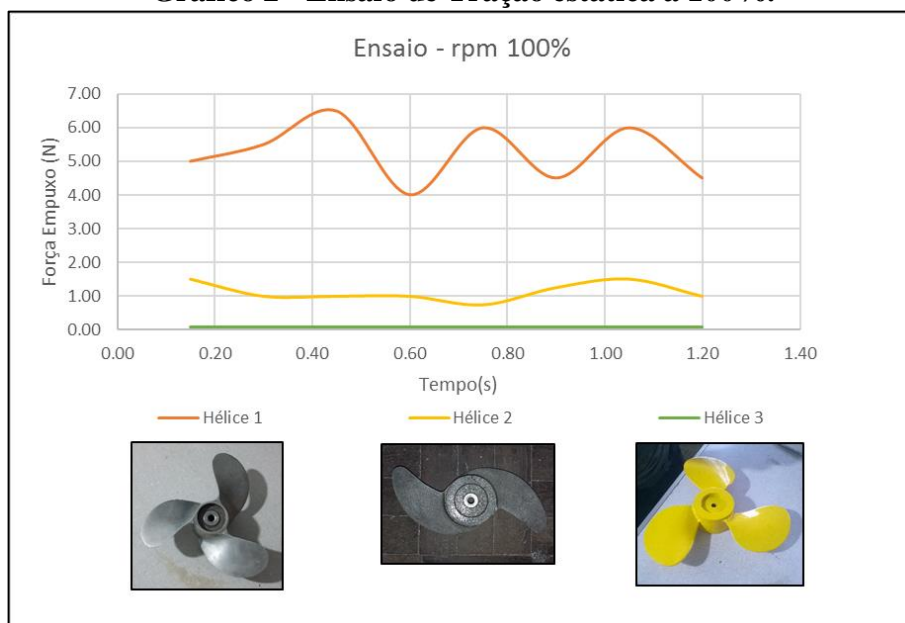
**Gráfico 1 - Ensaio de tração estática a 75%.**



Fonte: Autor (2016).

Em seguida foi realizado o teste em um hélice de 2 pás, com um corpo mais simples, com poucas curvas e com a *skew* constante. O tamanho deste hélice é maior que o anterior, mais não se mostrou ser mais eficiente, a 75% da potência do motor chegou a picos de 0,5 kgf e em 100% o máximo que alcançou foi de 1,5kgf, conforme demonstrado nos Gráficos 1 e 2.

**Gráfico 2 - Ensaio de Tração estática á 100%.**



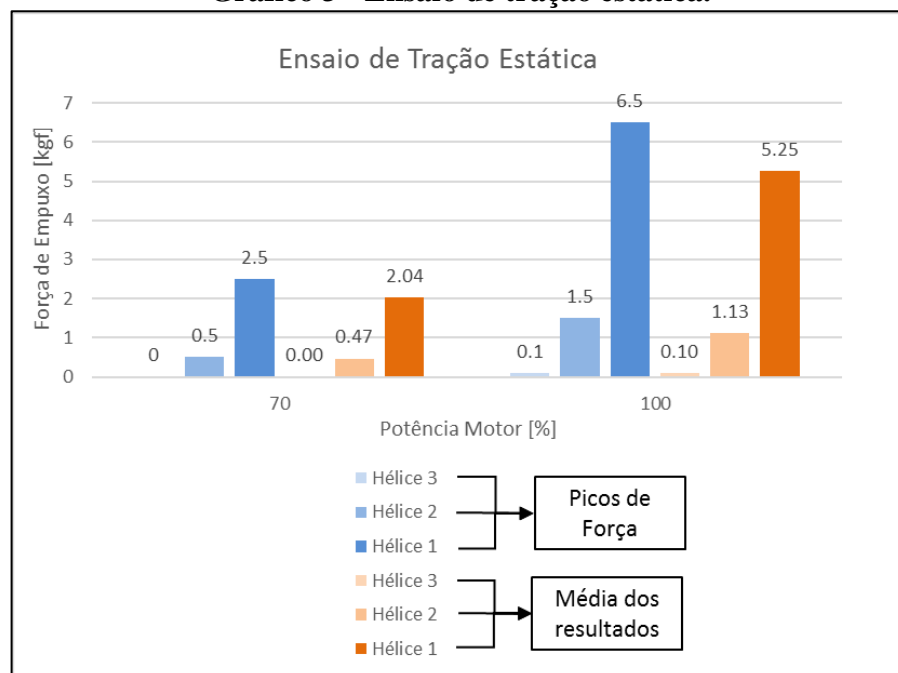
Fonte: Autor (2016).

Por fim foi realizado o teste no hélice desenvolvido neste trabalho com os parâmetros sugeridos pela equipe. Em comparação aos outros dois tem uma relação de BAR e tamanho maior, em contrapartida é mais pesado devido ao material utilizado na fabricação. O desempenho do propulsor durante o teste foi inexpressível, acabou por não atingir os resultados esperados, apesar de não gerar nenhuma cavitação, não conseguiu gerar uma força de empuxo mensurável. Com 75% do motor não conseguiu gerar nenhum resultado, apenas a 100% da força do motor chegou a tracionar o cabo, atingindo 0,1 kgf, com pode ser visto nos Gráficos 1 e 2.

#### 4.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS.

O método de fabricação e considerações no projeto podem ter afetado na geometria do propulsor projetado, fazendo com que os resultados não fossem expressivos, ausência de perfil hidrodinâmico na seção da pá e a falta de *rake* fez com que a água deslocada na região próxima ao cubo não gerasse força de sustentação suficiente para realizar o empuxo, tornando-o ineficiente.

**Gráfico 3 - Ensaio de tração estática.**



Fonte: Autor (2016).

O desempenho do hélice 1 (Atual), foi evidenciado devido ao seu formato geométrico, a curvatura em torno da pá faz com que a água movimentada seja muito maior do que os demais hélices, apresentando picos de força maior, como visto no Gráfico 3. Os contornos geométricos deste hélice tornam-se favoráveis a embarcações de pequeno e médio porte, pois a quantidade de água em torno do hélice é muito menor se comparado a navios como rebocadores e Plataform supply vessel (PSV's).

Durante o ensaio também foi observado que o local de teste não é ideal para a obter resultados mais precisos, pois a dimensões do tanque afetam a mensuração do empuxo. O ideal seria que o tanque possua um comprimento maior para dissipar as ondas geradas pela propulsão. Logo, apenas foi possível obter os picos de força de empuxo gerados pelo hélice.

## CONCLUSÃO

Apresentou-se neste trabalho o desenvolvimento do projeto, fabricação e ensaio de propulsores para embarcações de pequeno porte. A revisão bibliográfica apresentada contribuiu para o desenvolvimento das pesquisas sobre hélices navais e fabricação de propulsores, discutindo temas associados à hidrodinâmica, materiais, soldagem e processos de fabricação. Por fim, a execução do experimento ajudou a compreender os pontos positivos e negativos da geometria do hélice de projeto, assim como dos demais hélices ensaiados.

Durante a execução do trabalho inúmeras dificuldades foram encontradas para a execução da fabricação assim como para a realização dos ensaios. Inicialmente a fabricação previa a utilização de uma máquina CNC. A proposta era fabricar o hélice em um centro de usinagem utilizando o alumínio como material base. No entanto, com o avanço nas etapas do trabalho não foi encontrado um parceiro para a fabricação. Assim, foi necessário desenvolver uma nova técnica de acordo com as “ferramentas” disponíveis. Todo esse processo de desenvolvimento possibilitou aplicar técnicas incomuns para a fabricação de um propulsor, mas muito utilizadas nos estaleiros de embarcações de aço.

Tendo em vista os recursos disponíveis, o resultado da fabricação foi factível para realizar as análises propostas. A forma geométrica da pá foi atingida com sucesso, mais a união da pá ao cubo não ocorreu como o esperado, apresentando um pequeno erro em relação ao *rake*, devido a montagem e união das pás. Acredita-se que esta é uma das etapas que pode ser melhor desenvolvida para trabalhos futuros.

O material utilizado para este trabalho não foi o mais indicado, pois o aconselhado seria a utilização de um material com uma menor densidade para não exigir uma força de inercia maior no eixo do motor. Outra questão importante seria optar por um material resistente a corrosão como o alumínio e o bronze, cuja escolha evitaria a necessidade de aplicar uma camada de tinta protetora sobre a superfície.

Para estudos futuros seria aconselhável a utilização de um conjunto três baterias em série, aumentando a potência do motor para execução do teste, apresentando resultados mais representativos da operação do barco. Entretanto foi possível obter um valor quantitativo da força de empuxo e poder realizar uma comparação entre os três propulsores, mesmo que a potência utilizada não fosse a desejada.

A aquisição de dados mais precisos no ensaio de tração estática não aconteceu devido a estrutura limitada disponível. Para trabalhos futuros seria interessante a utilização de um tanque de maiores dimensões, a fim de evitar o refluxo causado pela ação do propulsor.

Tendo em vista que a embarcação não ficou pronta no tempo estipulado, para execução de novos estudos faz-se necessário a realização do ensaio em campo, em condições de clima e tempo favoráveis, chegando o mais próximo de um teste de *bollard pull*, acarretando em dados reais e provavelmente distintos aos obtidos no tanque.

A seleção do propulsor foi feita em conjunto com a equipe Babitonga atendendo aos requisitos estabelecidos, mesmo que a série B não se mostre para este estudo ser a mais eficiente para pequenas embarcações de lazer.

A modelagem foi executada de acordo com os parâmetros obtidos na seleção do propulsor, cuja geometria descreve o modelo B3.45, construído com o auxílio do programa PROPCAD.

Para um melhor desempenho do hélice fica a sugestão de desconsiderar o critério de cavitação como fator primário para a seleção, adotar um modelo de avaliação mais adequado á embarcações de recreio, pois o critério de eficiência do sistema propulsivo é afetado em caso de grandes cavitações, sendo indispensável a análise, mesmo que o desgaste seja nulo.

Outro aspecto que pode ter contribuído para o baixo desempenho se deve ao fato que o projeto considerou os cálculos para águas abertas, considerando o coeficiente de esteira como zero, podendo não refletir a melhor eficiência para o ensaio de *bollard pull*.

Apesar do propulsor projetado não ter apresentado desempenho melhor ao utilizado atualmente pela equipe, o trabalho cumpriu com os objetivos: fazer a seleção do propulsor, realizar a modelagem, fabricação e o ensaio de *bollard pull* simplificado. O trabalho proporcionou um estudo do escopo geral referente ao projeto de um hélice, abordando um grande número de atividades e possibilitando a recomendação de melhorias nas etapas executadas e podem ser estudadas em trabalhos futuros.

## REFERÊNCIAS

BERTRAM, Volker. **Practical Ship Hydrodynamics**. Oxford: Butterworth-heinemann, 2002.

CARLTON, John. **Marine Propellers and Propulsion**. Oxford: Elsevier Ltd., 2007.

D. O. Souza, N. P. Hammel, W. I. A. Santos, A. H. Ramirez, N. Rojo, I. Costa. **Investigação da corrosividade do ensaio de névoa Salina segundo norma iso 9227**. Instituto de Pesquisas Energéticas de Nucleares (IPEN). Encontro e Exposição Brasileira de tratamento de superfície Latino Americano, 3., 2012.

ITTC 2008. **International Towing Tank Conference**. 25th International Towing Tank Conference. Fukuoka, Japão, 2008. Disponível em: <<http://itcc.sname.org>>. Acesso em: 16 jul. 2016.

TRINDADE, Jorge. **Hidrodinâmica e Propulsão: Engenharia de Máquinas Marítimas**. 2012. Disponível em: <<http://www.enautica.pt/publico/professores/jorgetrindade/HidroProp/Docs/HidroPropulsao.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2016.

K. B. YEO, W.J. LEOW, W. H. CHOONG AND F. M. TAMIRI, 2014. **Hand Lay-Up GFRP Composite Marine Propeller Blade**. Journal of Applied Sciences, 14: 3077-3082.

LAMB, T. **Ship Design and Construction**. Jersey City: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2003. Volume I e Volume II.

MERTES, P. **Aspects of the Design Procedure for Propellers Providing Maximum Bollard Pull**. ITS 2008, Singapura, 20 – 22 mai. 2008.

MOLLAND, A.F.; TURNOCK, S.R.; HUDSON, D.A. **Ship Resistance and Propulsion: Pratical Estimation of Ship Propulsive Power**. New York: Cambridge University Press, 2011. 563 páginas.

NORMAS DA AUTORIDADE MARÍTIMA. **NORMAM 01**. Embarcações Empregadas na Navegação em Mar Aberto. Disponível em: <[https://www.dpc.mar.mil.br/normam/N\\_01/normam01.pdf](https://www.dpc.mar.mil.br/normam/N_01/normam01.pdf)>. Acesso em: 28 julho 2016.

PADOVEZI, Carlos Daher. **Aplicação de resultados de escala real no projeto de hélices de embarcações fluviais**. 1997. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Naval e Oceânica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

SEATTLE. MER Equipment. **BOLLARD Engines & Generators**. Disponível em <<http://www.merequipment.com/introducing-bollard.aspx>>. Acesso:2.nov.2015.



TONACIO, V. **Avaliação de propulsores navais em relação à eficiência e excitação de vibração**. 109 f. 2014. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Naval e Oceânica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2014.

TRIMETAIS INDÚSTRIA METAÚRGICA LTDA. (Guaramirim - Sc). **Aço A36**. 2015. Disponível em: <<http://trimetais.com.br/materiais/aco-a36/>>. Acesso em: 02 set. 2016.

WATSON, D. G. M. **Practical Ship Design**. Oxford, Inglaterra: Elsevier Science, 1998.

## APÊNDICE 1 – RELATÓRIO DE AVALIAÇÃO DA HÉLICE SOLIDWORKS.

Propriedades de massa - Hélice B3.45

Material: ASTM AÇO A36.

Densidade = 7850.00000 quilogramas por metro cúbico

Massa = 2.00573 quilogramas

Volume = 0.00026 metros cúbicos

Área de superfície = 100047.88 milímetros quadrados

Centro de massa: (milímetros)

X = 14.13

Y = -0.02

Z = 0.00

Eixos principais de inércia e momentos de inércia principais: (gramas \* milímetros quadrados), tomado no centro da massa.

$I_x = (0.00, 0.25, 0.97)$   $P_x = 7415632.96$

$I_y = (0.00, -0.97, 0.25)$   $P_y = 7430619.80$

$I_z = (1.00, 0.00, 0.00)$   $P_z = 13613329.04$

Momentos de inércia: (gramas \* milímetros quadrados). Obtido no centro de massa e alinhado com o sistema de coordenadas de saída.

$L_{xx} = 13613328.74$   $L_{xy} = -1305.34$   $L_{xz} = -356.14$

$L_{yx} = -1305.34$   $L_{yy} = 7429649.26$   $L_{yz} = 3688.68$

$L_{zx} = -356.14$   $L_{zy} = 3688.68$   $L_{zz} = 7416603.80$

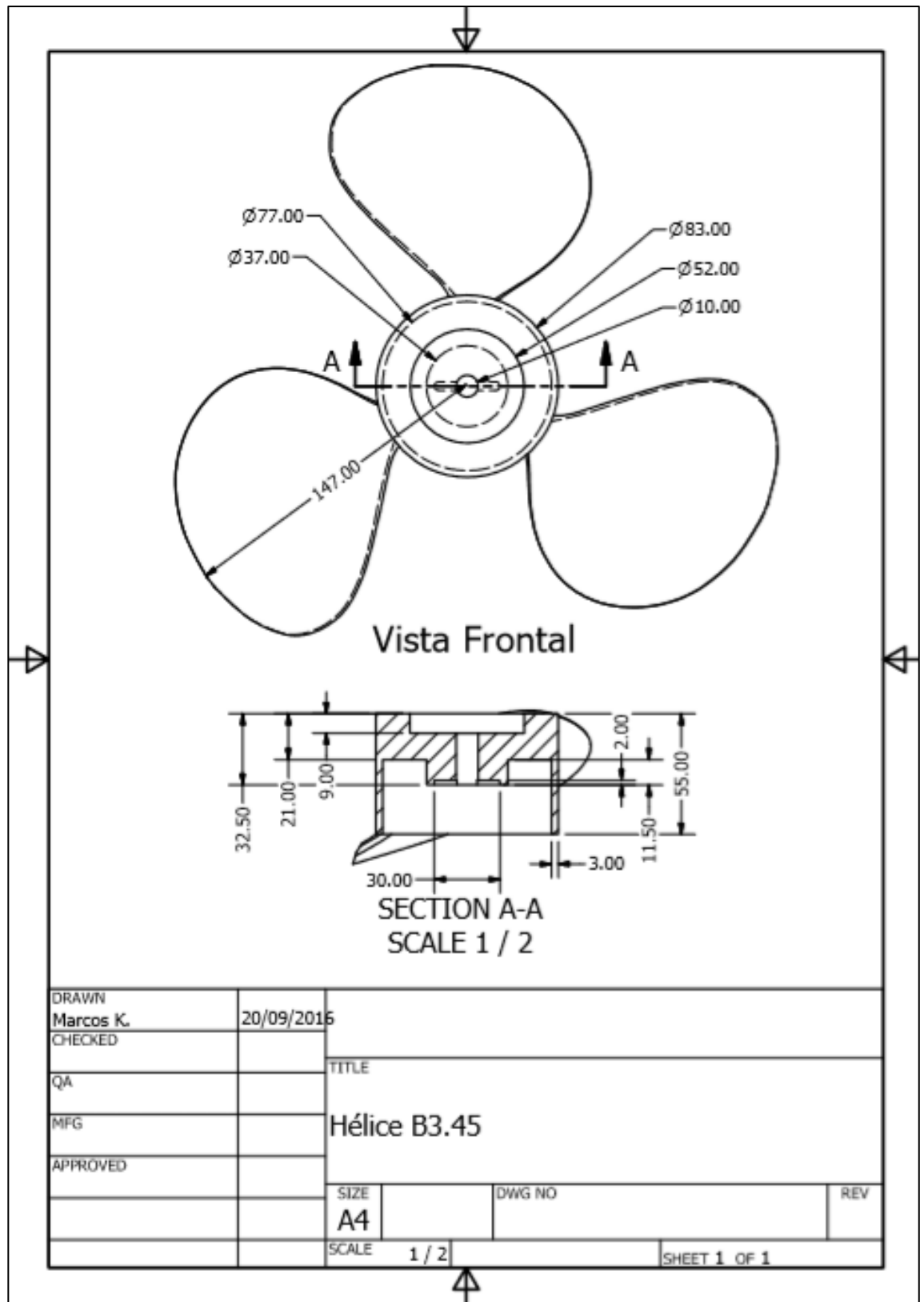
Momentos de inércia: (gramas \* milímetros quadrados). Tomados no sistema de coordenadas de saída.

$I_{xx} = 13613329.31$   $I_{xy} = -1767.10$   $I_{xz} = -244.18$

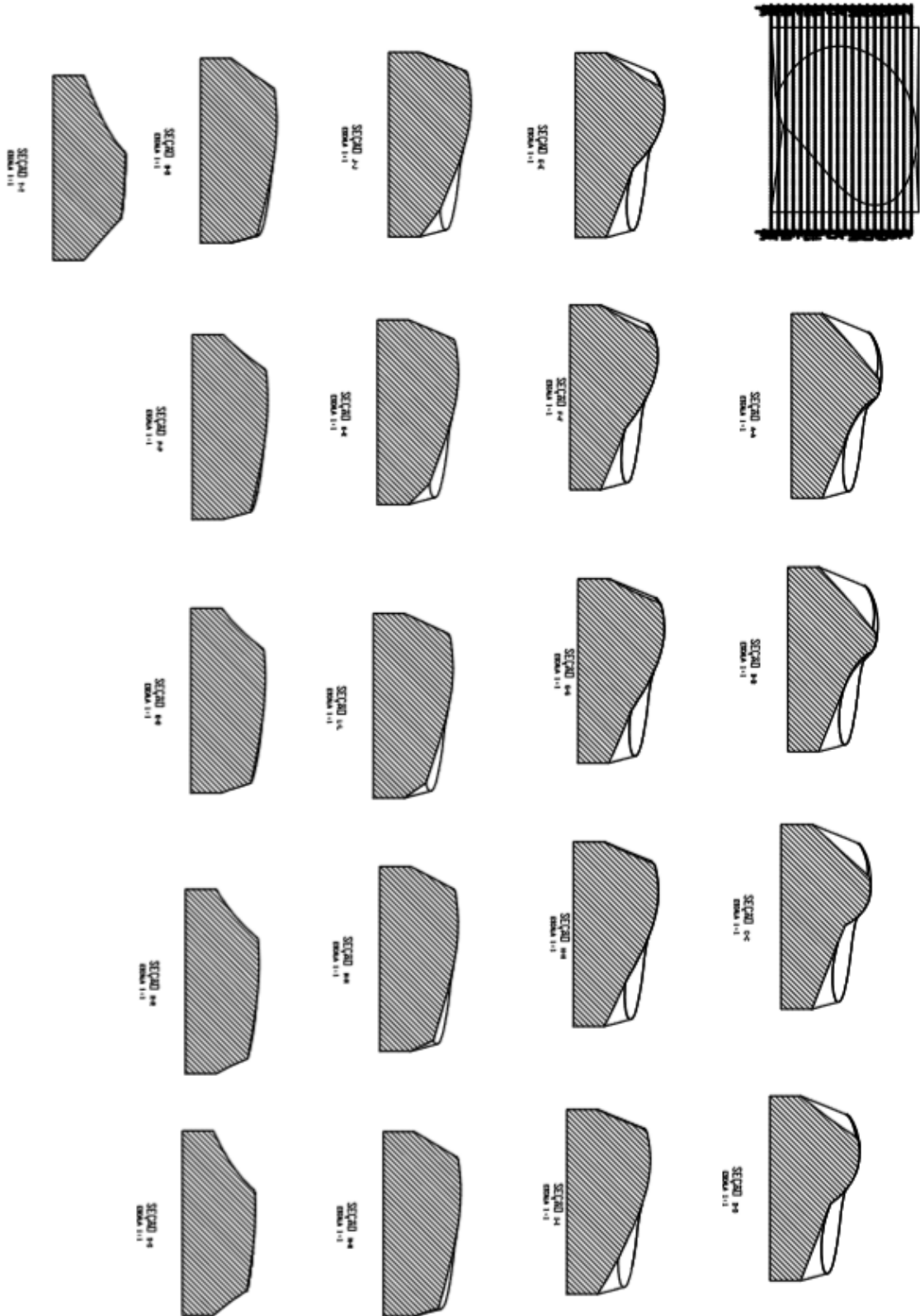
$I_{yx} = -1767.10$   $I_{yy} = 7829996.47$   $I_{yz} = 3688.55$

$I_{zx} = -244.18$   $I_{zy} = 3688.55$   $I_{zz} = 7816951.51$

APÊNDICE 2 – DETALHAMENTO DO PROPULSOR.



APÊNDICE 3 – SEÇÕES DE MADEIRA.



## **APÊNDICE 4 - PROCEDIMENTO PARA MEDIÇÃO DA TRAÇÃO ESTÁTICA LONGITUDINAL (BOLLARD PULL) ADAPTADO PARA UM CATAMARÃ.**

Navio:

Casco nº:

Armador:

Local da prova:

Data da prova:

Horário da prova:

Responsável pela prova:

Responsável pela embarcação:

### **1 - ) GENERALIDADES:**

A medição da tração estática longitudinal (bollard pull) será realizada buscando atender alguma conformidade disposta na NORMAM 01 / 2006 da DPC capítulo 3, seção VI item 0330 e do anexo 3-I e também da ABS Rules for Building and Classing Steel Vessels under 90 meters in Length, Part 5 chapter 8 appendix 2: Guidelines for Bollard Pull Test Procedure.

Os resultados da medição serão apresentados conforme por meio de um formulário desenvolvido semelhante ao anexo 3-J da mesma Normam.

### **2 - ) PROVIDÊNCIAS E CUIDADOS :**

#### **A - ) DOCUMENTOS :**

Os documentos listados abaixo deverão ser levados pela equipe Babitonga:

- Plano de Arranjo Geral.
- Folheto de Trim e estabilidade preliminar;
- Plano de Capacidade;

Outros documentos que também precisam ser levados ao local de teste:

- Manual do Motores;
- Curva de “potência x rotação” do motor;
- Especificação do (s) propulsor (es);
- Plano elétrico da embarcação;

#### **B - ) MATERIAIS E EQUIPAMENTOS :**

Deverão ser providenciados os seguintes materiais e/ou equipamentos:

- Célula de carga com capacidade mínima de suportar 50 kg (1,5 x tração estática estimada),

- Tacômetro digital independente para a leitura da rotação do motor;
- Cronômetro com acumulador de minutos;
- Previsão das correntes do local de testes;
- Cabo de ensaio de aço ou corda com comprimento >10m;
- Ferramentas para montagem e desmontagem dos equipamentos;

### **C - ) CUIDADOS :**

Deverão ser tomados os seguintes cuidados :

- Atenção com o transporte e instalação dos propulsores;
- O cabeço de amarração no cais da prova deverá resistir à pelo menos 50 kg de tração;
- A profundidade no local da prova : A NORMAM 01 preconiza 16 m (5 x calado até a linha de base para embarcações com propulsores azimutais) o ABS recomenda que para embarcações com propulsor tipo azimutal que a profundidade abaixo da quilha seja 2 x o calado da embarcação a meia nau).  
Adotaremos conforme a ABS devido ao porte da embarcação.
- A velocidade do vento não deverá ser maior que 5 m/s;
- A velocidade da corrente marítima não deverá exceder um nó (águas tranqüilas);
- Escolher o posicionamento do rebocador conforme figuras 1 e 2 anexas com relação a corrente e posição do cais;
- Segundo a NORMAM 01 e as regras do ABS o calado médio da embarcação deverá ser o da condição de carga máxima analisada no Folheto de Estabilidade Preliminar;
- Segundo a NORMAM 01 o trim não deverá ser superior a 0,46 m (2% de LWL). O ABS preconiza o trim da operação de reboque desejada;

## **2 - ) PROCEDIMENTOS DO ENSAIO :**

**Estes procedimentos foram estabelecidos buscando assemelhar-se com a NORMAM 01 pois o ABS não preconiza nenhum procedimento além das recomendações já citadas acima)**

a) Para a preparação do ensaio deverá ser usada a Lista de Verificação para Ensaio de Tração Estática, constante do APÊNDICE 3-I-1 da NORMAM01 / 2006 anexado a este procedimento.

c) As rotações de ensaio devem ser: RPM (75%), RPM (100%), devendo permanecer em cada rotação um período mínimo de 3 minutos realizando o procedimento pelo menos 3 vezes.

d) Para o ensaio nas rotações determinadas anteriormente, os intervalos entre cada minuto deverá ser anotado o maior número possível de leituras no Formulário de teste. Durante esse período deverá ser anotado 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 utilização no motor como sistema de governo 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 dos motores não deverá haver diminuição desta, a menos que haja necessidade de realinhamento do curso da embarcação.

## **3 ) APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS**

a) Os resultados do ensaio deverão ser apresentados o formulário de teste (em anexo), o qual deverá possuir obrigatoriamente, em anexo, o gráfico “Tração Estática x Rotação dos Motores”.

Como a potência do motor será medida, apresentar também o gráfico “Potência medida x Rotação dos Motores”.

b) O Folheto de Tração Estática bem como seu (s) anexos (s) deverão possuir a assinatura do professor orientador do TCC como responsável, assim como a assinatura do responsável pela embarcação da equipe Babitonga.

**LISTA DE VERIFICAÇÃO PARA ENSAIO DE TRAÇÃO ESTÁTICA (ANEXO 3-I-1 normam 01)**

|   | SIM                              | NÃO | N/A |
|---|----------------------------------|-----|-----|
| 1 - Retirado de bordo todos os pesos desnecessários?  | [ ]                              | [ ] | [ ] |
| 2 - Verificada a existência a bordo dos seguintes documentos:   |                                  |     |     |
| a) Plano de Arranjo Geral   | [ ]                              | [ ] | [ ] |
| b) Folheto de Estabilidade  | [ ]                              | [ ] | [ ] |
| c) Plano de Capacidade  | [ ]                              | [ ] | [ ] |
| 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?   | [ ]                              | [ ] | [ ] |
| 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 - Foi verificada a calibração da célula de carga? .....   | [ ]                              | [ ] | [ ] |
| 10 - O tempo e clima estão adequados para o teste?  | [ ]                              | [ ] | [ ] |
| 11 - O cronômetro com acumulador de minutos está funcionando?   | [ ]                              | [ ] | [ ] |
| 12 - Todos os equipamentos auxiliares acionados pelo(s) motor(es) principal(is) durante a operação normal estão acoplados?  | [ ]                              | [ ] | [ ] |
| 13 - Verificar as condições ambientais:   |                                  |     |     |
| - velocidade do vento ( $v_v$ ):  | m/s ( $v_v < 5\text{m/s}$ )      | [ ] | [ ] |
| - velocidade da corrente ( $v_c$ ):   | nós ( $v_c < 1$ nó)              | [ ] | [ ] |
| - profundidade (h):   | m ( $h > 2 \times$ calado médio) | [ ] | [ ] |
| OBS : Se alguma das respostas anteriores (item 13) for <b>NÃO</b> , o ensaio não poderá ser realizado pois está em desacordo com as condições ambientais necessárias para a sua realização. |                                  |     |     |
| 14 - Os motores estão previamente aquecidos?  | [ ]                              | [ ] | [ ] |
| 15 - O cabo está alinhado sobre a linha de centro do catamarã e está o mais horizontal possível?  | [ ]                              | [ ] | [ ] |



# FOLHETO DE TRAÇÃO ESTÁTICA

## 1 - Dados da Embarcação:

- Nome / Número do Casco:
- Ano de Construção:
- Equipe:
- Proprietário:
- Interessado:

## 2 - Características do Casco:

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

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

|                 | <b>BB</b> | <b>LC</b> | <b>BE</b> |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|
| 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:



**MODELO DE CERTIFICADO DE TRAÇÃO ESTÁTICA (ANEXO 3- J NORMAM 01)**

| <b>CERTIFICADO DE TRAÇÃO ESTÁTICA</b>   |                          |               |                                |
|---|--------------------------|---------------|--------------------------------|
| NOME DA EMBARCAÇÃO: -<br>ANO DE CONSTRUÇÃO: -<br>EQUIPE: BABITONGA<br>PROPRIETÁRIO: UFSC<br>INTERESSADO: GRADUANDO MARCO ALEXANDRE KAMINSKI |                          |               |                                |
| CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DO CASCO   |                          |               |                                |
| COMP. TOTAL: - m; BOCA MOLDADA: - m; PONTAL MOLDADO: - m  |                          |               |                                |
| CARACTERÍSTICAS DO(S) MOTOR(ES) PRINCIPAL(IS)   |                          |               |                                |
| MARCA:  | MODELO:                  |               |                                |
| Nº DE SÉRIE:  |                          |               |                                |
| POTÊNCIA: -   | HP (KW);                 | ROTAÇÃO: -    | rpm                            |
| QUANTIDADE: -   |                          |               |                                |
| REDUÇÃO:  |                          |               |                                |
| CARACTERÍSTICAS DO(S) PROPULSOR(ES)   |                          |               |                                |
| TIPO: - , modelo -  | ; QUANTIDADE / Nº PÁS: - |               |                                |
| DÍAMETRO: - mm;   | PASSO:                   |               |                                |
| TRAÇÃO ESTÁTICA = t(KN)   |                          |               |                                |
| CONDIÇÕES DE ENSAIO   |                          |               |                                |
| LOCAL:  |                          | DATA:         | HORA:                          |
| VENTO: m/s;   | CORRENTEZA: nós;         | PROFUNDIDADE: | m                              |
| HAV: m;   | HAR: m;                  | TRIM: %;      | LCABO: m                       |
| ANEXOS: ( ) GRÁFICO “TRAÇÃO ESTÁTICA X ROTAÇÃO”   |                          |               |                                |
| ( ) GRÁFICO “POTÊNCIA X ROTAÇÃO” (OPCIONAL)   |                          |               |                                |
| VÁLIDO ATÉ _____ DE _____ DE _____.   |                          |               |                                |
| EMITIDO EM _____ DE _____ DE _____.   |                          |               |                                |
|   |                          |               | _____<br>PROFESSOR RESPONSÁVEL |

**VERSO DO CERTIFICADO  
RESULTADO DO ENSAIO**

| Condição<br>de Carga | RPM do(s) MCP(s) |    |    | Tração     | Tração     | Tração       | Potência        |
|----------------------|------------------|----|----|------------|------------|--------------|-----------------|
|                      | BB               | LC | BE | Máxima (t) | Mínima (t) | Estática (t) | (Opcional) (Kw) |
| 50%                  |                  |    |    |            |            |              |                 |
| 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).