

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

RICARDO BEDIN

**ENSAIO SIMPLIFICADO DE RESISTÊNCIA AO AVANÇO DO MODELO EM
ESCALA REDUZIDA DO CATAMARÃ DA EQUIPE BABITONGA**

Joinville
2016

RICARDO BEDIN

**ENSAIO SIMPLIFICADO DE RESISTÊNCIA AO AVANÇO DO MODELO EM
ESCALA REDUZIDA DO CATAMARÃ DA EQUIPE BABITONGA**

Trabalho apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Naval.

Orientador: Dr. Thiago Pontin
Tancredi

Joinville
2016

Add4GRADEDECIMENTOS

Aos meus pais Ariberto e Maria Bedin, que sempre estiveram ao meu lado me apoiando, independentemente dos meus resultados.

Aos meus irmãos Diogo, Carla e Caroline Bedin, que sempre foram muito prestativos comigo para qualquer necessidade e conselho.

A minha querida namorada Meryellen Felicio, a sua mãe Maria de Lourdes de Borba, a sua irmã Tatiane Felicio e o seu pai Josimiel Felicio que foram minha segunda família nesse período.

Ao meu orientador, Thiago Pontin, pelo tempo dedicado e principalmente pelos inúmeros conselhos e aprendizados passados ao longo de 3 anos de convivência, sempre incentivando muito e trazendo ideias novas que aprimoraram o meu conhecimento.

A equipe Babitonga, por terem me acolhido nesse último ano de graduação e emprestado a estrutura para que meu trabalho fosse realizado. Queria agradecer em especial a Geovana G. Folle que nesses últimos anos me aconselhou e me incentivou para a realização desse trabalho e fez com que eu me sentisse parte da equipe.

À Universidade Federal de Santa Catarina e a todo corpo docente e técnico pelos aprendizados e pelos auxílios e pela oportunidade de eu fazer parte dessa escola de excelência.

Aos todos os meus amigos que me proporcionaram momentos de muita alegria e estiveram comigo nos momentos bons e ruins e me ajudaram a passar por essa fase da vida que com certeza será inesquecível.

RESUMO

Barcos de competição devem seguir um padrão de dimensões, possibilitando uma gama de variações desde que respeitem os regulamentos. As mudanças nos parâmetros do casco para a obtenção de uma melhor eficiência são de suma importância, pois permitem que se obtenha um melhor desempenho da embarcação. Neste contexto, esse trabalho discute a viabilidade no emprego de ensaios simplificados em tanques de prova para o desenvolvimento de barcos de competição. Para a realização da pesquisa, utilizou-se como estudo de caso o casco catamarã utilizado pela equipe Babitonga. O casco analisado foi modelado em um programa CAD e posteriormente analisado usando o método Slender Body, presente na ferramenta MaxSurf. A seguir foi construído um modelo do catamarã na escala de 1:6 visando a realização de ensaios simplificados de resistência ao avanço com diferentes velocidades e diferentes distâncias entre cascos, cujos resultados foram extrapolados para a embarcação em tamanho real. Comparando os resultados obtidos em ambas as abordagens, discutiu-se as diferenças observadas. Embora os resultados não sejam definitivos, sugere-se que a boca de 39 cm oferece a menor resistência ao avanço para o modelo, especialmente na velocidade de operação da embarcação.

Palavras-chave: Barco de competição. Resistência ao avanço. Escala reduzida.

ABSTRACT

Competition boats must follow a pattern of specific dimensions of the regulation. For the parameters of free selections, several variations in geometry and layout could result in an improvement of efficiency and performance, and, consequently, these decisions are extremely important to the ship project. This work discusses the viability of experimental testing of competing boats on towing tank facilities. To realize this search, was used as a case of study, the Babitonga hull catamaran. The hull analyzed was a modeled in a CAD software and then, analyzing used Slender Body method, being at MaxSurf tool. Subsequently, was constructed a catamaran model in scale of 1:6 aiming the simplified tests of ship resistance with different distances between hulls, whose results was extrapolated to the vessel in real size. Comparing the obtained results in both approaches, the differences between, were discussed. Although the results don't be definitive, it is suggested that the beam 39 cm offers the lass ship resistance for the model, especially in catamaran velocities operation.

Keywords: Competition boat. Ship Resistance. Reduced scale

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFD	Computational Fluid Dynamics
DSB	Desafio solar Brasil
ITTC	International Towing Tank Conference
ITTC	International Towing Tank Conference
PU	Poliuretano
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Catamarã Babbitonga na água.....	16
Figura 2 – Distribuição da Resistência ao Avanço.....	20
Figura 3 – Fluxograma de Etapas.	30
Figura 4 – Fluxograma Obtenção do Modelo.....	32
Figura 5 – Balizas Recortadas e Encaixadas no Modelo.....	32
Figura 6 – Casco Pronto com Lastreamento.....	33
Figura 7 – Esboço Geral do Ensaio.	33
Figura 8 – Diagrama de Corpo Livre do Experimento.....	34
Figura 9 - Plano de Balizas.....	38
Figura 10 - Imagem do Catamarã em Escala 1:6 Renderizado.	39
Figura 11 – Longarina com as Balizas dispostas.....	41
Figura 12 – Seções Alinhadas para Recorte.	41
Figura 13 – Caixa para Inserção de Poliuretano Expansível.	42
Figura 14 – Caixa com Poliuretano se Expandindo no seu Interior.	42
Figura 15 – Poliuretano Completamente Expandido Dentro da Caixa e o Resultado.....	43
Figura 16 - Balizas Recortadas.....	44
Figura 17- Balizas Desenhadas na Madeira 2mm.	44
Figura 18 – Picadeiro com Longarina Encaixada.....	44
Figura 19 – Picadeiro com a Longarina e as Balizas Posicionadas.....	45
Figura 20 – Blocos de PU Encaixados sem Lixar.	45
Figura 21 – Casco Lixado.....	46
Figura 22 – Casco com Massa para Reparos Aplicada.	46
Figura 23 - Casco com Tinta Escura Aplicada.....	47
Figura 24 – Dois Picadeiros.....	48

Figura 25 – Na esquerda: Casco Lixado, Na direita: Casco em Processo de Lixa.....	48
Figura 26 – Casco Livre de Imperfeições.....	49
Figura 27 – Cascos Pintados.....	49
Figura 28 – Tubo, Hastes de Madeira e seus Componentes de Fixação.	51
Figura 29 – Haste de Popa Utilizada para União dos Cascos.....	51
Figura 30– Apoio de Fixação Marcado na Figura.....	52
Figura 31 – Hastes Fixadas aos Apoios.....	52
Figura 32 – Modelo com Diferentes Bocas. A-21cm, B-27cm e C-39cm.	53
Figura 33 – Esquema Representativo de como o Calado fora Traçado.....	54
Figura 34 – Linha do Calado.	55
Figura 35 – Modelo com Calado Exatamente na Linha D’água.	55
Figura 36 – Casco Referência Posicionado para Espelhamento.	57
Figura 37 - Modelo com Distância entre Semi Casco de 14 cm.	58
Figura 38 - Modelo com Distância entre Semi Casco de 20 cm	58
Figura 39 – Modelo com Distância entre Semi Casco de 32 cm.....	58
Figura 40 – Casco Importado do Rhinoceros.	59
Figura 41 – Janela para Determinação do Tipo de Casco e Determinação da Meia Boca (MaxSurf®).	60
Figura 42 – Janela para Calibração do Calado.	60
Figura 43 - Escolha do Método para Cálculo da Resistência ao Avanço.....	63
Figura 44 – Formação da Grade de Malha.	64
Figura 45 – Modelo com as Hastes e o Engate de Arame.....	67
Figura 46 – Furo no Poste e Fio de Nylon Cruzando a Piscina.....	68
Figura 47 – Fio Passando pelas Argolas de Plástico	68
Figura 48 – Pontos de Início e Fim de Cronometragem.....	69
Figura 49 – Representação do Poste com seus Elementos e o Peso em Queda Livre.....	70
Figura 50 – Teste Sendo Executado	71

Figura 51 – A - Boca de 21 cm; B - Boca de 27 cm; C - Boca de 39 cm.....	74
Figura 52 – Valores de Froude para Embarcações Deslocantes, Semi-deslocantes e Planantes.	75
Figura 53 - Perfil de Onda Modelo B=21 cm.....	77
Figura 54 - Perfil de Onda Modelo B=27 cm.....	77
Figura 55 – Perfil de Onda Modelo B=39 cm.	77
Figura 56 – Velocidade [m/s] x Massa [g].	81
Figura 57 – Comparação da Resistência ao Avanço Numérica na Escala 1:1.	83
Figura 58 – Curvas de Resistência ao Avanço x Velocidade.	83
Figura 59 – Curvas de Coeficiente de Resistência de Onda pela Velocidade [nós].....	84
Figura 60 – Curva experimental de resistência ao avanço. Escala 1:6.....	86
Figura 61 – Comparação entre método numérico e ensaio: escala 1:6	86
Figura 62 – Curva de Comparação entre os Resultados Reais do Casco Real e Extrapolações Feitas a partir do MaxSurf® e dos Testes.	88
Figura 63 – Componentes da resistência ao avanço obtidas no ensaio de reboque e extrapoladas para a escala 1:1.....	91

TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros Utilizados.....	28
Tabela 2 – Variação de Parâmetros.	35
Tabela 3 – Dimensões da Embarcação Real e do Modelo.	37
Tabela 4 – Propriedades hidrostáticas do modelo CAD.....	40
Tabela 5 – Dados Hidrostáticos do Modelo.	61
Tabela 6 – Valores Gerados pelo MaxSurf, após a Entrada do dado Calado e Aplicado o Fator de Escala.....	62
Tabela 7 – Valores do Catamarã Babitonga Real com o Fator de Escala Aplicado.....	62

Tabela 8 – Análise de Refinamento de Malha.....	65
Tabela 9 – Velocidades Reais e Velocidades Ensaçadas.	75
Tabela 10 – Resistência ao Avanço para Cada Variação Paramétrica.	76
Tabela 11 – Parâmetros do Primeiro Teste.....	78
Tabela 12 – Média de Velocidade e Tempo para cada Variação Paramétrica.	79
Tabela 13 – Massas Utilizadas nos Testes.	80
Tabela 14 – Erro Associado de uma Curva para Outra.	87

LISTA DE SÍMBOLOS (SI)

$(1+k)$	Fator de forma para mono cascos
$(1+\beta k)$	Fator de forma para catamarãs
A_m	Área molhada do casco [m ²]
$C_{T_{cat}}$	Coeficiente de resistência total para catamarãs
C_F	Coeficiente de resistência friccional
C_T	Coeficiente de resistência total
C_W	Coeficiente de resistência de onda
C_{W_m}	Coeficiente de resistência de onda do catamarã modelo
C_{W_s}	Coeficiente de resistência de onda do catamarã real
F_{R_m}	Número de Froude para o catamarã modelo
F_{R_s}	Número de Froude para o catamarã real
R_{T_m}	Resistência total do catamarã modelo [N]
R_{T_s}	Resistência total do catamarã real [N]
R_{W_m}	Resistência de onda do catamarã modelo [N]
R_{W_s}	Resistência de onda do catamarã real [N]
F	Força [N]
Fr	Número de Froude
g	Aceleração da gravidade [m/s ²]
L	Comprimento [m]
L_M	Comprimento do modelo [m]
L_S	Comprimento real da embarcação [m]
m	Massa [kg]
Re	Número de Reynolds
U	Velocidade [m/s]

U_M	Velocidade do modelo [m/s]
U_S	Velocidade real da embarcação [m/s]
ν	Viscosidade [m^2/s]
λ	Fator de escala
σ	Fator de aumento da velocidade entre os cascos
τ	Fator de interferência da resistência de onda
∇	Volume deslocado [m^3]
ρ	Densidade do fluido [kg/m^3]
ϕ	Fator de mudança de campo de pressão em torno do casco isolado

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
1.2	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	17
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	RESISTÊNCIA AO AVANÇO	19
2.2	ESTIMATIVA DE RESISTÊNCIA AO AVANÇO	21
2.2.1	RESISTÊNCIA AO AVANÇO PARA CATAMARÃS	22
2.3	ENSAIOS COM MODELO EM ESCALA REDUZIDA	24
3.	METODOLOGIA	30
3.1	EXPERIMENTO	31
3.2	MODELAGEM E ANÁLISE PARAMÉTRICA	34
4.	DESENVOLVIMENTO	36
4.1.	CONSTRUÇÃO DO MODELO EM ESCALA REDUZIDA	36
4.1.1	FATOR DE ESCALA	36
4.1.2	MODELO CAD DESENVOLVIDO	37
4.1.3	CONSTRUÇÃO DO MODELO	40
4.2.	CALIBRAÇÃO DO MODELO	50
4.2.1	CALIBRAÇÃO DA BOCA	50
4.2.2	CALIBRAÇÃO DO CALADO	54
4.3.	ANÁLISE NUMÉRICA DE RESISTÊNCIA AO AVANÇO DO MODELO	56
4.3.1	CALIBRAÇÃO DA BOCA UTILIZANDO O RHINOCEROS®	56
4.3.2	CALIBRAÇÃO DO CASCO PARA ANÁLISE NUMÉRICA	59
4.3.3	CONFIGURAÇÃO DA ANÁLISE NUMÉRICA	63
4.3.4	PROCEDIMENTO SIMPLIFICADO DE ENSAIO DE REBOQUE	66
4.3.5	MONTAGEM DO EXPERIMENTO	67
4.3.6	MÉTODO DE MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO	69
4.3.7	CALIBRAÇÃO PARA EXPERIMENTO	70
5.	RESULTADOS	72
5.1	PARÂMETROS ANALISADOS EM AMBOS MÉTODOS E RESULTADOS	72
5.1.1	RESULTADOS OBTIDOS NA ANÁLISE NUMÉRICA	73

5.1.1.1 VARIACOES PARAMÉTRICAS E DADOS OBTIDOS NO PROGRAMA-----	73
5.1.1.2 ENSAIOS REALIZADOS VARIAO DA BOCA -----	78
5.1.1.3 TESTES REALIZADOS COM A VARIAO DA MASSA E COM A PRESERVAO DA DISTÂNCIA ENTRE CASCOS-----	79
6. ANÁLISE DOS RESULTADOS-----	82
6.1 RESULTADOS DO PROGRAMA MAXSURF®-----	82
6.2 COMPARAO ENTRE RESULTADOS -----	85
6.3 COMPARAO ENTRE AS CURVAS RESISTÊNCIA-----	87
6.4 FONTES DE ERROS-----	91
6.4.1 MODELO -----	92
6.4.2 INSTRUMENTOS PARA REALIZAO DOS TESTES -----	92
6.4.3 AMBIENTE DE REALIZAO DOS TESTES -----	93
7. CONCLUSOES -----	94
REFERÊNCIAS-----	96
APÊNDICE A – Tempo gasto para fabricao e custos relacionados a ela. -----	97
APÊNDICE B – Tempos obtidos em teste para obteno das velocidades.-----	99
APÊNDICE C – Curvas representativas da Tabela 9-----	101
APÊNDICE D – Curva de resistência ao avanço contendo as velocidades até 8,165 nós e tabela com valores correspondentes. -----	103
ANEXO A – Memorial descritivo do plano de linhas da equipe vento sul. -----	104
ANEXO B - Memorial descritivo UFRJ e dados extrapolados do modelo. -----	106

1. INTRODUÇÃO

Os recursos do planeta são finitos e a manutenção do modo de vida que conhecemos depende essencialmente do uso racional e sustentável de tais recursos. Entre os recursos mais importantes estão os recursos energéticos, utilizados em praticamente todas as atividades humanas: da geração de alimentos a produção de bens de consumo, do transporte à construção, praticamente qualquer atividade humana depende de energia para ser realizada.

O transporte de cargas e pessoas consome uma parcela significativa de tais recursos energéticos, e, apesar de todos os recentes avanços, existem ainda diversas melhorias necessárias à mobilidade urbana em geral.

Atualmente, os principais combustíveis utilizados nos veículos são de fontes não renováveis, cada vez mais escassas no mundo. Este contexto exige o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis, tornando constante a busca por soluções que aumentem a eficiência energética.

Nesse contexto, surgem várias iniciativas de fomentar o desenvolvimento e a utilização eficiente de fontes de energia renováveis, tais como a energia solar. Uma destas iniciativas, que visa estimular alunos e universidades a explorarem tais fontes, são as competições de desempenho envolvendo veículos solares.

A principal competição de barco solar no Brasil é o Desafio Solar Brasil (DSB), que visa o desenvolvimento de novas tecnologias para o aproveitamento da energia existente nos raios solares. Tradicionalmente, essa competição abrange duas classes de cascos: uma com padrão catamarã e outra sem padrão definido, apenas limitado pelas normas gerais da competição. (DSB, 2015)

O DSB propõe que as instituições de ensino projetem e fabriquem os cascos das embarcações, desenvolvendo novas técnicas e alavancando conhecimentos que permitam desenvolvimento tecnológico na Engenharia Naval e também na geração e utilização da energia solar.

A organização da competição fornece placas solares padronizadas para todas as equipes. Portanto, cabe a cada equipe desenvolver um projeto que consiga melhor aproveitar a energia captada por essas placas, concentrando os estudos para o desenvolvimento de projetos eficientes de cascos e instalações propulsoras.

Em 25 de outubro de 2010, estudantes da UFSC de Joinville criaram a equipe Babitonga com a finalidade de construir um catamarã, movido a energia solar, para competir no DSB. Em 2011, em sua primeira participação na competição, a equipe conseguiu boa colocação e, com diversos aperfeiçoamentos no casco e na propulsão, a equipe conseguiu a primeira colocação do Desafio Solar Brasil 2014, se tornando a equipe campeã do DSB na categoria catamarã. A Figura 1 mostra a embarcação Babitonga na água. (DSB, 2015)

Figura 1 – Catamarã Babitonga na água



Fonte: DSB (2015).

A classe Catamarã é uma embarcação semi-deslocante composta por dois cascos unidos por uma haste ou suporte fixo. É um barco que pode desenvolver alta velocidade, desde que possua um projeto eficiente e equilibrado. (MOLLAND, 2008)

Tendo em vista que a obtenção de resultados na competição vem do aperfeiçoamento do projeto e operação da embarcação; e que a cada ano o desafio fica mais competitivo, a finalidade deste estudo visa analisar a influência de parâmetros do projeto na resistência ao avanço do casco, buscando identificar eventuais melhorias que permitam aumentar o desempenho da embarcação.

Entre os diferentes parâmetros associados ao desempenho da embarcação, a resistência ao avanço do casco é fator predominante, pois determina o gasto energético para que a embarcação navegue a uma dada velocidade.

Muitos trabalhos na literatura indicam que diversos parâmetros de um casco podem influenciar em sua resistência ao avanço. Na impossibilidade de se analisar todos os parâmetros possíveis, o presente trabalho objetiva analisar a influência da distância entre cascos na resistência ao avanço da embarcação. A escolha desse parâmetro é oportuna, visto que trata-se de um dos parâmetros de maior relevância associado ao projeto de um catamarã e que, portanto, não pode ser analisado considerando-se apenas um dos cascos da embarcação isoladamente.

O uso de ensaios simplificado em tanque de prova como método deste trabalho para a estimativa de resistência ao avanço se justifica pois, mesmo que simplificados pelos recursos existentes, segundo Molland (2011), esse método é uma das formas mais precisas de se testar a resistência ao avanço de uma embarcação, de forma a testar modificações no casco e no arranjo, visando a melhoria do desempenho da embarcação.

Assim o objetivo proposto do trabalho é analisar diferentes valores de distância entre cascos, visando determinar o valor que minimiza a resistência ao avanço de um catamarã de pequeno porte, utilizando ensaios simplificados com modelos em escala reduzida. Para execução deste objetivo, destacam-se os seguintes objetivos específicos:

1. Determinar as características geométricas e inerciais do catamarã Babitonga;
2. Construir um modelo físico em escala reduzida do catamarã Babitonga;
3. Desenvolver uma metodologia experimental para arrastar o modelo em um tanque ou lago;
4. Calibrar o modelo para que este reproduza as características inerciais da embarcação;
5. Realizar ensaios paramétricos variando o parâmetro estudado;
6. Comparar os resultados experimentais com aqueles obtidos por simulação numérica;
7. Determinar as características ótimas do casco Babitonga;
8. Implementar essas características na embarcação em tamanho real.

1.2 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este relatório é apresentado em 7 capítulos. No primeiro, mostra-se a introdução e a definição do problema estudado, bem como os objetivos propostos. No segundo é apresentada a fundamentação teórica, onde são expostos os principais conceitos que dão corpo ao trabalho.

Cada etapa realizada é fundamentada nesse capítulo. O capítulo 3 apresenta a metodologia para obtenção dos itens a serem analisados, bem como a forma em que serão analisados os resultados dos experimentos a serem feitos.

No capítulo 4 são apresentados os resultados gerados nos trabalhos realizados para obtenção do modelo, tanto na forma computacional como na forma física, calibração do mesmo e montagem e calibração dos testes. O capítulo 5 apresenta os principais resultados decorrentes das análises feitas com o catamarã. Alguns são resultados obtidos em programa computacional e outros resultantes dos ensaios realizados com o modelo.

O capítulo 6 apresenta a análise dos resultados obtidos no capítulo 5, essa análise busca comparar os dois métodos utilizados para obtenção dos resultados. Nesse capítulo são apresentadas as principais fontes de erros relacionadas ao desenvolvimento desse trabalho. Por fim, o capítulo 7 apresenta as principais conclusões referentes a esse trabalho, as principais dificuldades encontradas para a realização do mesmo e sugestões para futuros experimentos dessa natureza.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A busca por resultados satisfatórios faz aumentar a demanda por métodos que abrangem tipos de análise diversificados para obtenção de resultados similares. A motivação para esse tipo de estudo se dá pela necessidade de determinar-se um procedimento estruturado de ensaio simplificado que permita obter-se resultados satisfatórios que contribuam com o desenvolvimento do projeto de embarcações.

Para a determinação deste procedimento serão feitos ensaios simplificados de resistência ao avanço seguindo alguns dos preceitos básicos da hidrodinâmica aplicada em cascos semi-deslocantes.

Neste capítulo são apresentados os fundamentos teóricos que substanciam o desenvolvimento apresentado, versando desde os fundamentos da resistência ao avanço, passando pela elaboração do experimento simplificado, da construção e calibração do modelo, até a análise dos resultados.

2.1 RESISTÊNCIA AO AVANÇO

A estimativa da resistência ao avanço é de fundamental importância para o projeto de uma embarcação, pois é com ela que se dimensiona o sistema propulsivo da embarcação.

Inicialmente, até 1860, a estimativa da resistência ao avanço (bem como o dimensionamento do sistema de propulsão) era feita por tentativa e erro, levando a sistemas ineficientes e a diversos acidentes resultados do mal dimensionamento dos sistemas a bordo. (MOLLAND 2011)

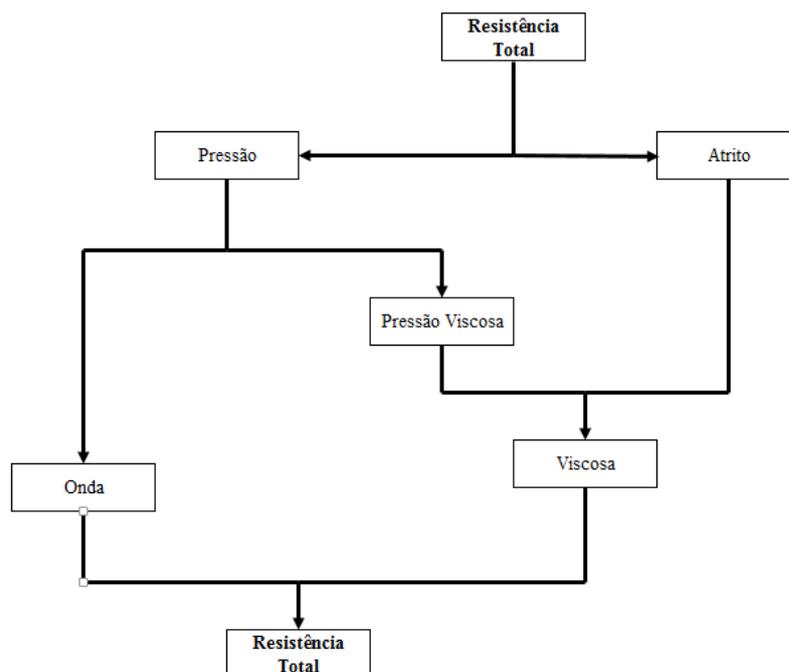
Em 1870, W. Froude iniciou pesquisas para testes de resistência utilizando modelos em escala reduzida, e notou que a resistência causada pela formação de ondas variava de forma sistemática de acordo com a geometria do casco e a velocidade de navegação. Depois desse

estudo pioneiro, outros estudiosos como, Rankine, Taylor, Reynolds, entre outros, começaram a investigar os efeitos das resistências em modelos de casco. (MOLLAND 2011)

Segundo Molland (2011, p. 12), a análise de resistência é composta, essencialmente por 3 parcelas principais, sendo elas:

- 1) Resistência friccional: resultado da viscosidade atuante no escoamento em torno do casco.
- 2) Resistência viscosa de pressão: resultado da integral do campo de pressão no entorno do casco, que devido a viscosidade, é maior avante do corpo do que a ré do corpo.
- 3) Resistência de onda: resultado da geração de ondas oriundas do deslocamento do casco.

Figura 2 – Distribuição da Resistência ao Avanço.



Fonte: O Autor (2016).

É importante observar que diferentes autores agrupam essas parcelas de maneira diferente. Tradicionalmente existem 2 abordagens para agrupar essas parcelas. A primeira abordagem, baseada na natureza das forças atuantes, agrupa a resistência de ondas e a resistência de pressão viscosa em uma parcela denominada “resistência de pressão”. Enquanto que uma segunda abordagem, baseada em energia, agrupa a resistência friccional e a resistência de pressão viscosa em uma única parcela denominada “resistência viscosa”.

Uma maior discussão sobre os mecanismos geradores dessas parcelas foge ao escopo deste trabalho, mas pode ser facilmente encontrada na ampla bibliografia existente sobre o assunto.

2.2 ESTIMATIVA DE RESISTÊNCIA AO AVANÇO

Em se tratando de uma equipe de competição, o projeto da embarcação deve sempre pensar na inovação e melhorias, por isso os testes conduzidos no trabalho servirão para averiguação e modificação visando projetar um novo casco ou adaptar o casco existente para maior eficiência do sistema propulsivo.

Existem alguns métodos para estimar a resistência ao avanço de embarcações, eles podem variar desde métodos tradicionais até mais complexos utilizando-se programas computacionais que utilizam o método CFD. São 4 os métodos básicos existentes, o método tradicional utilizando séries sistemáticas, método da regressão utilizando formulações pré-determinadas por diversos estudiosos, ensaios com modelo físico e a aproximação por CFD. (MOLLAND 2008)

Na realização desse trabalho, o foco se voltará para dois métodos, ensaios com modelo físico e aproximação por programa computacional que utiliza de recursos CFD para gerar resultados. Os experimentos feitos com modelos são amplamente usados na indústria naval, consiste na construção de um modelo físico em escala e o arrasto desse em tanque de provas. O método CFD também é amplamente utilizado na indústria, utiliza o recurso computacional e evita a construção de modelos físicos, porém existem alguns limitantes nesse tipo de teste devido a todos os resultados serem baseados em equações numéricas, sendo que algumas não podem ser estimadas de forma precisa. (MOLLAND 2008).

Apesar da abordagem CFD ter limitantes que impedem a determinação de alguns efeitos que ocorrem no casco, pode-se dizer que é um método preciso devido à complexidade dos programas computacionais disponíveis hoje no mercado. Por isso, para uma melhor estimativa dos resultados, serão comparados os resultados obtidos em modelo físico com os obtidos em CFD.

Os resultados encontrados numericamente foram obtidos através do método Slender Body. Esse método que une modelos empíricos e a análise do escoamento potencial é baseado nos trabalhos de Tuck et al (1999) e Couser et al (1996).

O princípio fundamental desse método baseia-se na análise numérica do escoamento potencial e, devido as hipóteses simplificadoras, pode ser aplicado a qualquer tipo de casco, desde que esse seja esbelto e apresente simetria entre bombordo e boreste. É importante observar que método Slender Body estima apenas a parcela de onda na resistência total. Porém o software MaxSurf Resistance® que contém esse método, também contém outros métodos para o cálculo de resistência. O módulo ITTC'57 será utilizado para o cálculo do coeficiente de atrito (equação 1), enquanto que o fator de forma para catamarãs utilizado é aquele proposto por Molland et al. (2011), segundo procedimento proposto pelos desenvolvedores da ferramenta utilizada. (BENTLEY SYSTEMS, 2013)

$$C_F = \frac{0,075}{(\log Re - 2)^2} \quad (1)$$

Onde:

C_F – Coeficiente friccional;

Re – Número de Reynolds;

Com a resistência ao avanço estimada pelo método numérico pode-se ter uma base da grandeza desses esforços, podendo-se determinar adequadamente os parâmetros que definem o ensaio simplificado a ser realizado, em especial o fator de escala a ser utilizado na construção do modelo.

2.2.1 RESISTÊNCIA AO AVANÇO PARA CATAMARÃS

Existem diversos métodos para estimar o resultado da composição da resistência ao avanço. Os métodos são similares, porém, por utilizar mais pontos para determinar as suas equações, o método de Hugues-Prohaska será utilizado nesse trabalho. A equação 2 apresenta o coeficiente da resistência total que circundam a embarcação. (MOLLAND, 2011).

$$C_T = (1 + k)C_F + C_W \quad (2)$$

Onde:

C_T = Coeficiente de resistência total

$(1+k)$ = Fator de forma para monocascos

C_F = Coeficiente friccional

C_W = Coeficiente de onda

Southampton catamaran series utiliza formulações próximas as de Hugues-Prohaska, porém, como se tratando de multicascos, notou-se que alguns coeficientes deveriam ser acrescentados para representar as interferências que um casco causa no outro. A equação 3 apresenta a formulação voltada para catamarãs. (MOLLAND, 2011).

$$C_{T_{cat}} = (1 + \phi k)\sigma C_F + \tau C_W \quad (3)$$

Onde:

C_F – Coeficiente friccional advinda da correlação ITTC 1957;

C_W – Coeficiente de resistência de onda para um semi casco isolado;

ϕ – Considera a mudança de pressão em torno do casco;

σ – Responde pela mudança da velocidade entre os cascos e é calculado pela integração da resistência friccional pela área molhada;

τ – Fator de interferência de onda;

Para uma maior praticidade, a equação 3 acima, pode ser modificada, agregando em um fator (β) outros dois fatores (ϕ e σ), que juntos representam um fator de interferência viscosa, como apresentado na equação 4.

$$C_{T_{cat}} = (1 + \beta k)C_F + \tau C_W \quad (4)$$

Molland (2011), sugere que os fatores de formas $(1+k)$ e $(1+\beta k)$ podem ser aproximados pelas equações 5 e 6 para cascos que não contenham chine.

$$(1 + k) = 2,76 \left(\frac{L}{\nabla^{1/3}} \right)^{-0,40} \quad (5)$$

$$(1 + \beta k) = 3,03 \left(\frac{L}{\nabla^{1/3}} \right)^{-0,40} \quad (6)$$

Onde:

$(1+\beta k)$ – Fator de forma de interferência viscosa.

$\nabla^{1/3}$ – Raiz cúbica do volume deslocado

Sendo assim a equação 5 representa os monocascos e a equação 6 representa os catamarãs. A ferramenta computacional utilizada neste trabalho (Maxsurf Resistance) já incorpora a correção proposta por Molland no fator de forma presente no método Slender Body.

2.3 ENSAIOS COM MODELO EM ESCALA REDUZIDA

O emprego de ensaios de casco em tanques de prova é procedimento amplamente utilizado, visto que com essa técnica pode-se obter diversas informações que métodos computacionais não conseguem prever com precisão.

O uso de mais de um método é de fundamental importância para a precisão das estimativas, pois como citado, diferentes métodos possuem hipóteses e restrições diferentes. No caso do ensaio com modelos em escala reduzida, a precisão dos resultados está diretamente relacionada com o fator de escala usada nos modelos. Quanto maior o modelo, mais preciso serão os resultados, no entanto, maior será a estrutura física requerida para os experimentos.

Garcia (2014), a partir do trabalho de Chakrabarti (1998) discute um procedimento para a determinação do fator de escala de modelos, com base nas três leis de semelhanças básicas:

- **Semelhança geométrica** ou de forma: considera que a geometria de contorno do modelo e da embarcação iguais. O que significa que a escala entre o modelo (L_M) e a embarcação real (L_S) deve ser constante. Essa razão entre as dimensões lineares do modelo e da embarcação real é denominada: fator de escala (λ).
- **Semelhança cinemática** ou dos movimentos: consiste na igualdade da proporção de velocidade e aceleração entre o modelo e a embarcação real.
- **Semelhança dinâmica:** consiste na proporção entre as diferentes forças e momentos atuantes no modelo e na embarcação real.

O modelo deve seguir leis de semelhança para atender uma escala padrão para todas as análises, sendo essa escala determinada de acordo com o tipo da embarcação e custo da infraestrutura requerida pelo experimento.

Segundo Molland, Turnock e Hudson (2011), para obedecer a lei das semelhanças, as embarcações real e modelo devem atender a todos os 3 tipos de semelhança. No entanto, na grande maioria das vezes, é impossível compatibilizar todas as grandezas envolvidas. Neste caso, o projeto do experimento deve priorizar a semelhança associada a grandeza que se deseja medir.

Um exemplo clássico, ocorre no ensaio utilizado para medir a resistência friccional de uma embarcação. Tipicamente, neste ensaio utiliza-se uma placa plana de área molhada compatível com a área do navio, respeitando-se a semelhança entre as áreas. Neste caso sacrifica-se a semelhança geométrica em pró da semelhança dinâmica das forças de atrito.

É importante observar que a similaridade dinâmica completa visa a conservação dos fenômenos viscosos e potenciais. Para que isso ocorra devem ser considerados constantes, os adimensionais associados a cada um dos fenômenos. Os fenômenos viscosos são compatibilizados quando o adimensional denominado número de Reynolds (Re), expresso na equação 7, é o mesmo tanto para o modelo quanto para a embarcação real. Já os fenômenos potenciais são compatibilizados por meio do adimensional denominado número de Froude (Fr), expresso na equação 8.

$$Re = \frac{U * L}{\nu} \quad (7)$$

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g * L}} \quad (8)$$

Onde:

U = Velocidade [m/s]

L = Comprimento da Embarcação [m]

g = Aceleração da Gravidade [m/s²]

ν = Viscosidade do Fluido [m²/s]

Quando se analisa as equações 7 e 8, pode-se notar que para haver semelhança no número de Re entre o modelo e o casco em escala real, a velocidade do modelo deve ser n vezes maior que a velocidade da embarcação em escala real, sendo n o fator de escala. Outra alternativa seria uma grande variação na gravidade ou na viscosidade do fluido, o que torna inviável o experimento. Conforme já mencionado, a compatibilidade do número de Re pode ser obtida usando um ensaio de placa plana.

Por isso, nos ensaios com modelos de casco, em geral, se mantém o número de Fr constante, já que com isso consegue-se identificar a componente de resistência de ondas, realizando experimentos com velocidades viáveis de serem executadas em tanques de provas usuais.

As equações 9 e 10 apresentam como é possível obter o fator de escala igualando-se o Fr da catamarã real com o Fr do modelo.

$$Fr_s = \frac{U_s}{\sqrt{g * L_s}} \quad (9)$$

$$Fr_m = \frac{U_m}{\sqrt{g * L_m}} \quad (10)$$

$$Fr_s = Fr_m$$

$$\frac{U_s}{\sqrt{g * L_s}} = \frac{U_m}{\sqrt{g * L_m}}$$

$$U_m = U_s * \sqrt{\frac{L_m}{L_s}} = U_m * \sqrt{\lambda}$$

Ou seja:

$$\lambda = \frac{L_m}{L_s}$$

Onde:

Fr_s - Número de Froude do catamarã real

Fr_m - Número de Froude do modelo

L_s - Comprimento do catamarã real

L_m - Comprimento do modelo

U_s - Velocidade do catamarã real

U_m - Velocidade do modelo

λ - Fator de Escala

Como as leis de similaridade não são respeitadas por completo, faz-se ensaios com similaridade incompleta e, para minimizar os efeitos causados pela incompatibilidade do número de Re, podem ser adotadas medidas de correções, conforme descrito por Artmann (2015).

Devido as premissas do parágrafo anterior, foi utilizado o modelo de Froude para se determinar a escala do modelo. A Tabela 1 apresenta os parâmetros da análise dimensional, para os casos de relações mecânicas, apresentados nesse trabalho, são utilizados os

adimensionais M, L e T, que representam, respectivamente, massa, comprimento e tempo. A partir dessas dimensões são determinadas outras grandezas como, força, densidade e pressão. E também é apresentada na Tabela 1 a proporção de escala utilizada para extrapolação dos resultados e obtenção dessas outras grandezas citadas.

Tabela 1 – Parâmetros Utilizados

Variável	Unidade*	Fator de Escala
Comprimento	L	λ
Área	L^2	λ^2
Volume	L^3	λ^3
Tempo	T	$\lambda^{1/2}$
Velocidade	LT^{-1}	$\lambda^{1/2}$
Força	M^2LT^{-2}	λ^3
Massa	M	λ^3

*Sistema Internacional (SI)**

Fonte: Edgard Mulford (2014).

Para se aplicar os fatores de escala, basta dividir a dimensão real por esse fator e automaticamente o valor do modelo é determinado.

Como a estimativa da resistência ao avanço envolve a medida de forças, o comportamento dinâmico do modelo é de extrema relevância para o experimento. Sendo assim, é importante que o modelo tenha características inerciais similares a da embarcação real, possuindo uma distribuição de massa compatível com aquela apresentada no navio real.

O ajuste da distribuição da massa em um modelo é chamado de calibração do modelo. Esse processo considera os fenômenos envolvidos, e dependerá de onde e como serão feitos os ensaios; do tamanho do tanque, dos custos de implementação, além da forma, tamanho e peso do modelo. Por essa razão, o tipo de material que será usado na construção do modelo é fundamental para definir a quantidade de lastro (material adicional) a ser usado, bem como as possibilidades de ajuste das características inerciais (momento de inércia) nos três eixos principais.

Existem dois métodos principais para a extrapolação de ensaios feitos com modelos: uma introduzida por Froude nos anos 1870 e outra por Hughes nos anos 1850. Esses dois

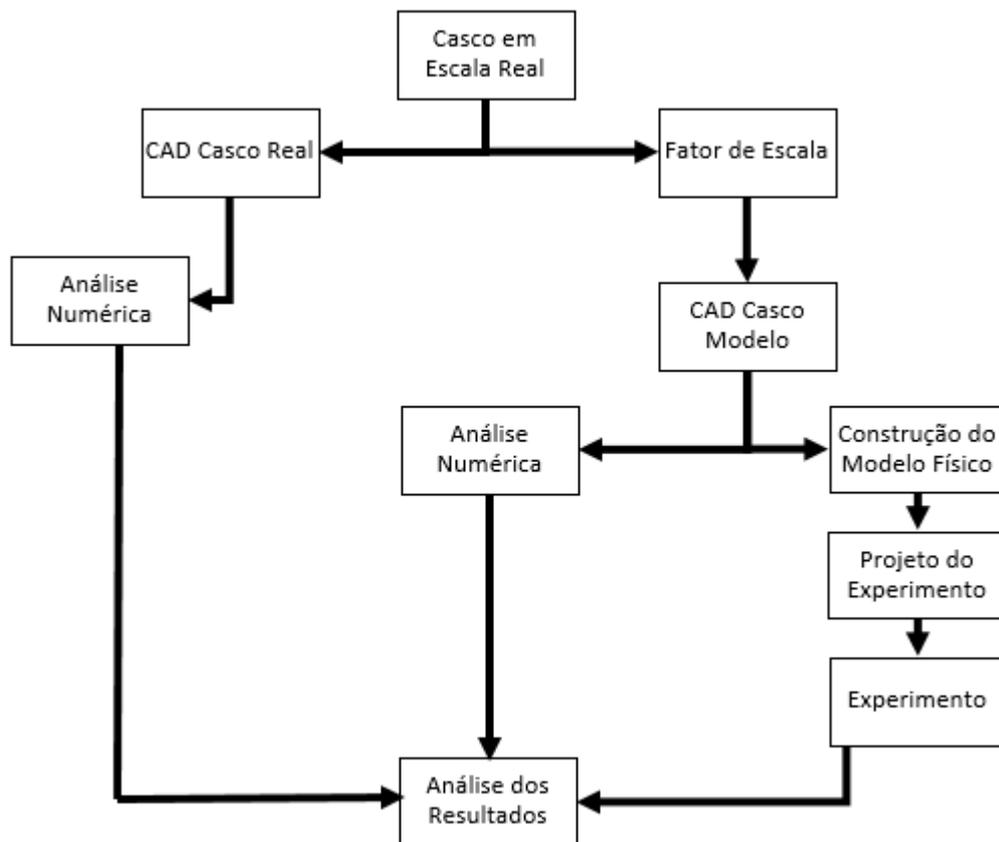
métodos compunham os princípios básicos para extrapolação de resultados e que foi incorporado pela International Towing Tank Conference (ITTC).

A ITTC é um comitê que reúne especialistas em ensaios em tanques de prova, elaborando diretrizes e recomendações para realização de experimentos, bem como para a extrapolação dos resultados, além de certificar tanques quanto a precisão e qualidade de seus experimentos.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos desenvolvidos neste trabalho, bem como as principais técnicas e ferramentas empregadas. O fluxograma apresentado na Figura 3 apresenta as etapas e a sequência hierárquica seguidas para confecção do trabalho.

Figura 3 – Fluxograma de Etapas.



Fonte: O Autor (2016).

O casco a ser desenvolvido apresenta um projeto padrão para todas as equipes da competição DSB e a validação dos resultados depende da análise experimental que será desenvolvida nesse trabalho.

O experimento consiste em construir um casco em escala reduzida de acordo com um fator de escala pré-determinado através das análises obtidas no pré-projeto do catamarã. Essa escala deve ser coerente com a velocidade e dimensões obtidas nos testes numéricos, além de ser viável de ser implementada no procedimento simplificado proposto.

A seguir por meio da ferramenta computacional, determina-se os valores de resistência ao avanço e das características inerciais da embarcação, que servem de base para a fabricação e calibração.

De forma a buscar a correta análise de resistência ao avanço, a construção física de um modelo deve ser feita de tal modo que respeite as escalas e siga os padrões inerciais pré-estabelecidos, conferindo assim, melhores resultados nos ensaios de resistência, devendo-se representar de forma precisa todas as linhas do catamarã.

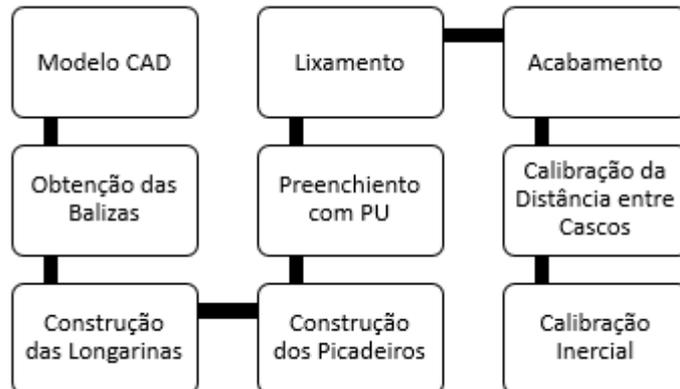
Os resultados obtidos na simulação numérica, servem de base para um confronto de dados com os ensaios em tanque de prova. A variação paramétrica do modelo tanto numericamente como experimentalmente, aumentam ainda mais a precisão dos ensaios, permitindo-se aferir conclusões acerca da variação paramétrica proposta.

3.1 EXPERIMENTO

O modelo CAD será desenvolvido de acordo com as linhas obtidas a partir do plano de balizas feito pela equipe Vento Sul (2009) (APÊNCIDE A). Com essas linhas em mãos, buscar-se-á uma forma de laminação para que os dois cascos do catamarã fiquem semelhantes entre si.

O processo de construção escolhido consiste no alinhamento de balizas equidistantes, cujos espaços serão preenchidos com poliuretano expandido, que por fim será lixado para dar forma ao casco, em procedimento análogo ao realizado por Artmann (2015). O processo de obtenção do modelo segue o fluxograma da Figura 4.

Figura 4 – Fluxograma Obtenção do Modelo.



Fonte: O Autor (2016).

Assim, a construção do modelo em escala reduzida se dará pelo alinhamento das balizas do casco, obtidas a partir do modelo CAD, plotadas em papelão espesso e alinhadas pela linha da quilha. A Figura 5 mostra as balizas recortadas e encaixadas no modelo, já preenchidas com poliuretano e lixadas para adquirirem a forma do casco.

Figura 5 – Balizas Recortadas e Encaixadas no Modelo.



Fonte: Artmann (2015).

Após a conformação do casco utilizando as balizas como molde, é necessário a correções de imperfeições oriundas do processo de fabricação. Por fim é feito o acabamento do casco usando tintas especiais para a pintura do casco, cuja finalidade é impermeabilizar o casco e reduzir o atrito com a água, resultando em uma menor resistência ao avanço. A Figura 6 apresenta um casco exemplo pronto e lastreado.

Figura 6 – Casco Pronto com Lastreamento.

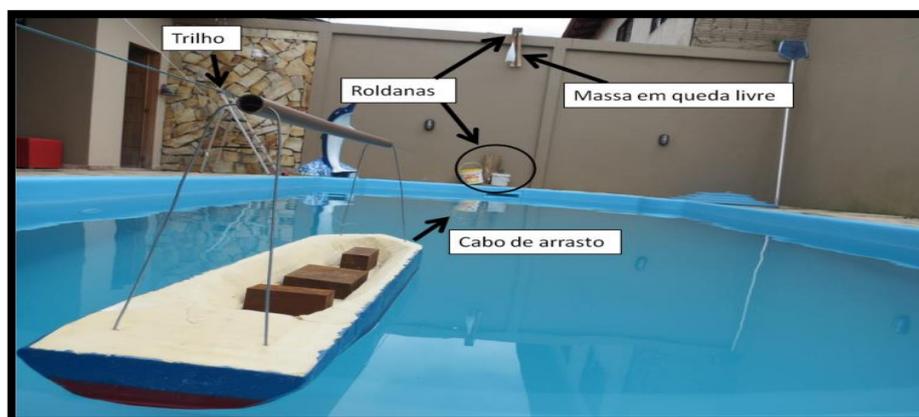


Fonte: Artmann (2015).

O experimento é uma parte importante da análise, pois é nessa etapa que se confrontaram os resultados obtidos numericamente.

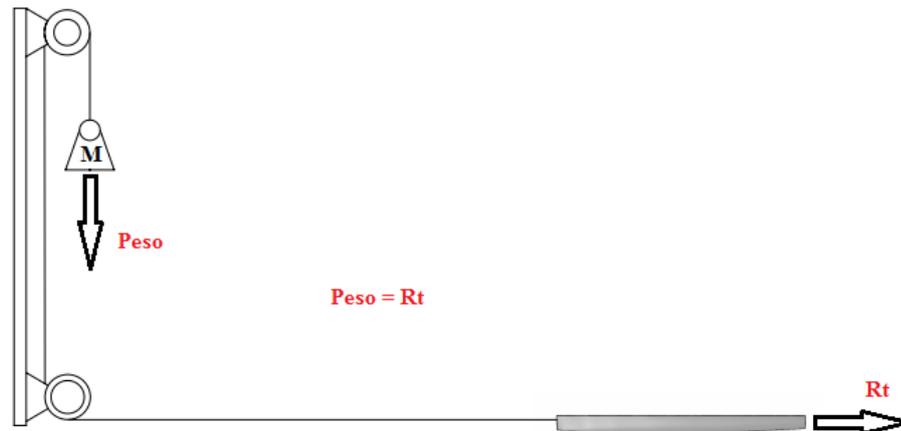
Segundo Artmann (2015) uma forma de se realizar o ensaio de resistência ao avanço em tanques de provas consiste em utilizar a queda livre de massas calibradas, que exercem forças de reboque conhecidas e constantes, medindo-se assim a velocidade que cada força provoca. A força peso resultante da queda livre das massas é transferida ao modelo por meio de fios de Nylon e roldanas. A Figura 7 apresenta um esboço geral do procedimento simplificado de ensaio proposto e a Figura 8 apresenta o diagrama de corpo livre do experimento, onde Peso é a massa equivalente a resistência ao avanço (R_t) multiplicada pela aceleração da gravidade.

Figura 7 – Esboço Geral do Ensaio.



Fonte: Artmann (2015).

Figura 8 – Diagrama de Corpo Livre do Experimento.



Fonte: O Autor (2016).

Assim, o experimento proposto consiste em arrastar o modelo usando a força peso causada pela queda de massas calibradas. O tempo gasto para percorrer um trecho conhecido do tanque determina a velocidade correspondente a força peso exercida, permitindo-se determinar a resistência ao avanço da embarcação, para uma certa velocidade. Repetindo-se o experimento para diferentes valores de massa, é possível determinar a curva de resistência ao avanço do casco.

É importante observar, que tanto o fio de nylon, quanto a polia, produzem perdas decorrentes do atrito, que devem ser consideradas na análise dos resultados. O procedimento adotado, consiste em medir a menor massa que coloca a polia em movimento, e assim estabelecer a perda de força causada pelo atrito do sistema de reboque.

3.2 MODELAGEM E ANÁLISE PARAMÉTRICA

As principais dimensões da embarcação são fornecidas pela organização do DSB e devem ser obedecidas. Com isso a modelagem do casco deve seguir o plano de linhas disponível e as variações paramétricas permitidas são limitadas. Para a modelagem do casco, foi utilizado o programa computacional Rhinoceros®. O modelo CAD foi então importado no MaxSurf®, que permite estimar a resistência ao avanço usando uma abordagem CFD, por meio do método Slender Body, cuja utilização é recomendada para o tipo de embarcação estudada.

A variação paramétrica dos cascos passará por duas etapas, uma será executada no MaxSurf®, onde será testada a resistência ao avanço variando-se a distância entre os cascos. A segunda etapa consiste em fazer a mesma análise em tanque de prova, para poder se ter um parâmetro geral da influência da distância entre cascos na resistência ao avanço da embarcação.

Outro resultado importante, consiste na análise da resistência ao avanço de cada casco isoladamente, embora tal análise não seja possível de ser obtida no tanque de provas, em virtude de limitações físicas impostas pelo arranjo simplificado utilizado. Bem como não é possível variar excessivamente a distância entre cascos para além dos limites estabelecidos nas regras da competição, os quais são reproduzidos no arranjo montado para o experimento.

A Tabela 2 representa as variações de boca propostas que serão realizadas nos ensaios.

Tabela 2 – Variação de Parâmetros.

Distância Entre Cascos [cm]
21
27
39

Fonte: O Autor (2016).

Serão utilizados objetos com pesos diferentes para puxar a embarcação, já que o peso equivalente não será de grandeza significativa. Para calibrar o calado do modelo serão utilizados parafusos de aço dispostos em quantidade e posição para que o barco alcance a linha d'água de projeto.

4. DESENVOLVIMENTO

Apresenta-se neste capítulo o desenvolvimento realizado, destacando-se desde a construção do modelo até a realização dos experimentos, tanto na abordagem numérica, quanto no procedimento experimental simplificado proposto na metodologia.

4.1. CONSTRUÇÃO DO MODELO EM ESCALA REDUZIDA

O catamarã Babitonga foi construído pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), pois na competição, todos os cascos dessa classe devem ser idênticos. Por isso, como a equipe Babitonga não contém o plano de linhas da embarcação, as principais dimensões da embarcação foram extraídas do plano de linhas em um memorial descritivo feito pela equipe Vento Sul (2009) que pode ser verificado no ANEXO A.

A escala do plano de linhas original era de 1:10, ou seja, uma escala que reduz a embarcação à 60 cm, dificultando a análise dos dados gerados pelos testes. Por essa razão realizou-se um estudo mais aprofundado para a escolha das dimensões da embarcação e por consequência do fator de escala.

4.1.1 FATOR DE ESCALA

Conforme já mencionado, o fator de escala do modelo é de fundamental importância para se ter resultados coerentes nos ensaios, e deve ser escolhido de tal forma que seja viável a realização dos experimentos. Leva-se em consideração o tamanho do tanque de ensaio, os recursos disponíveis e principalmente, a precisão disponível nos instrumentos de medida e nas técnicas de construção do modelo.

Levando em conta todos esses fatores, foi escolhido um fator de escala geométrico que abrangesse as especificações e que atendesse todas as características pré-estabelecidas. A Tabela 3 apresenta esse fator aplicado as dimensões da embarcação e algumas variáveis presentes nesse trabalho, de acordo com o apresentado na Tabela 1 na fundamentação teórica.

Tabela 3 – Dimensões da Embarcação Real e do Modelo.

	Real	Modelo
λ	1:6	
L [cm]	600	100
B [cm]	47	7,83
Pontal [cm]	44	7,33
Calado [cm]	14,6	2,43
V _{máx} [m/s]	5,7	2,31
Massa [kg]	300	1,39

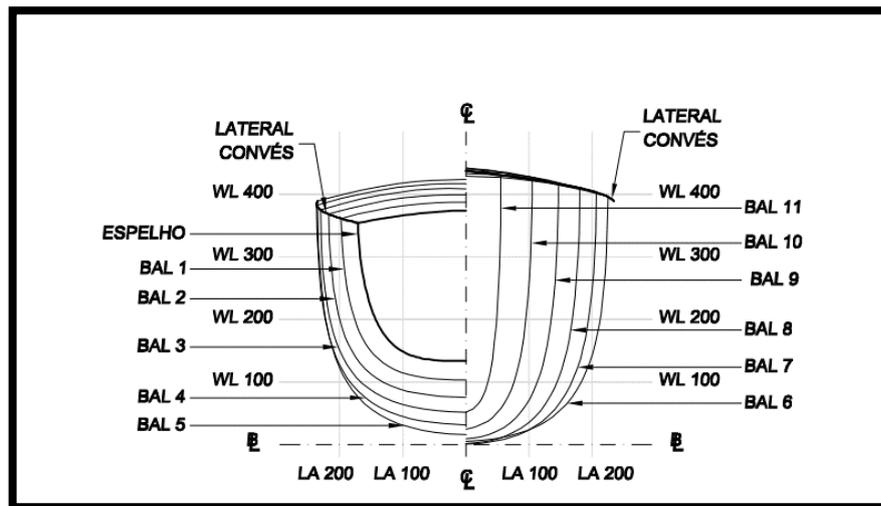
Fonte: O Autor (2016).

Nota-se na Tabela 3 que a escala utilizada é 1:6, com esse fator de escala obtiveram-se as dimensões do modelo. Pode-se observar que essas dimensões principais são favoráveis para a construção do modelo, pois tratam-se de dimensões passíveis de serem construídas e aferidas com os recursos disponíveis.

4.1.2 MODELO CAD DESENVOLVIDO

Para a construção de embarcações, necessita-se conhecer os planos de linhas que descrevem o casco na embarcação. De posse dos planos de balizas devidamente cotado, foi atribuída a essas cotas o fator de escala para a obtenção do modelo no tamanho desejado. A utilização do plano de balizas, conforme originalmente descrito na metodologia proposta, deu-se devido a geração de uma superfície de casco mais coerente a partir da interpolação do plano de balizas do que aquela observada pela interpolação dos planos de alto da embarcação. Na Figura 9, é apresentado o plano de balizas com um fator de escala 1:10, com isso fez-se uma readequação para que os valores ficassem com a escala 1:6, como desejado.

Figura 9 - Plano de Balizas.

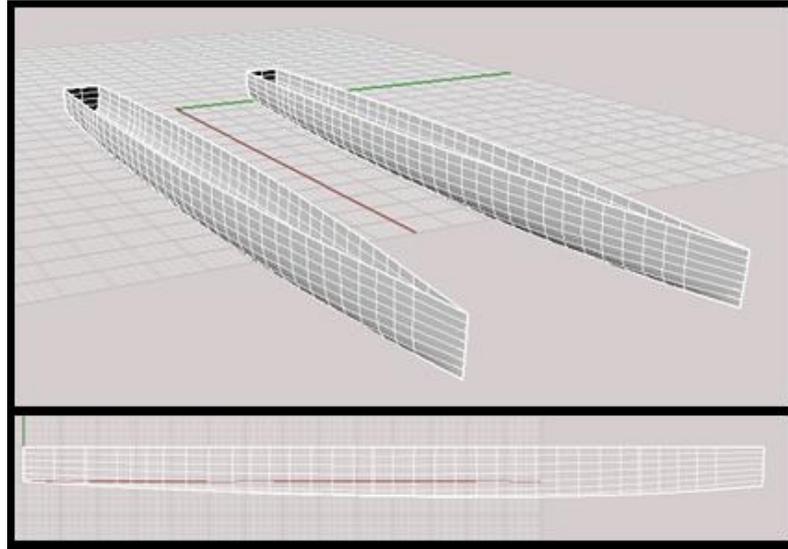


Fonte: Equipe Vento Sul (2009)

De posse dessas novas cotas partiu-se para a modelagem do casco no programa computacional Rhinoceros®. Após a modelagem do plano de balizas do catamarã, foram incluídas as linhas da quilha e do convés. A partir das curvas desenhadas, gerou-se superfícies que interpolavam o plano de balizas e eram delimitadas pelas curvas da quilha e do convés, resultando em meio casco do catamarã.

A superfície do casco gerada foi então refletida pelo plano de simetria bombordo-boreste ortogonal a linha da quilha, gerando um casco completo do catamarã. Por fim, esse procedimento foi repetido e o casco do catamarã foi refletido no plano de simetria existente entre os dois cascos de catamarã. O resultado pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 - Imagem do Catamarã em Escala 1:6 Renderizado.



Fonte: O Autor (2016).

A fim de verificar a coerência do casco modelado, comparou-se as propriedades hidrostáticas do modelo CAD com aquelas fornecidas no memorial descritivo (ANEXO B). Conforme pode ser visto na Tabela 4 as propriedades hidrostáticas calculadas no modelo, estão consideravelmente próximas as descritas na referência bibliográfica, indicando uma boa coerência entre o casco real e o modelo CAD.

Tabela 4 – Propriedades hidrostáticas do modelo CAD

Propriedade	Unidade	Escala Modelo	Escala Real	Memorial Descritivo
Deslocamento	ton	0.001	0.312	0.308
Volume deslocado	m ³	0.001	0.305	0.301
Calado a meia nau	m	0.024	0.146	0.145
Comprimento na linha d'água	m	0.998	5.988	5.976
Boca na linha d'água	m	0.390	2.342	2.238 *
Área molhada	m ²	0.134	4.860	4.834
Coefficiente prismático		0.572	0.573	0.585
Coefficiente de bloco		0.411	0.412	0.415
Coefficiente da secção mestra		0.762	0.764	0.768
Coefficiente de área de linha d'água		0.715	0.716	0.727
LCB a partir da meia nau	m	-0.011	-0.069	-0.069
LCF a partir da meia nau	m	-0.067	-0.406	-0.406
Posição vertical do centro de flutuação	m	0.016	0.095	0.093
Tonelada por centimetro de imersão	ton/m	0.001	0.037	0.018

* Estimado como sendo a boca nominal da embarcação (2.4 m) menos a duas vezes a diferença entre a boca nominal de cada casco (0.47 m) e a boca de cada casco medida na linha d'água (0.418).

4.1.3 CONSTRUÇÃO DO MODELO

A construção do modelo passou por etapas de experimentos, pois notou-se, ao imprimir as seções do modelo em escala, que não seria possível com a geometria obtida, construir o casco da forma proposta na metodologia. Pois o alinhamento das balizas era afetado pela rigidez e arranjo originalmente proposto.

A partir dessa conclusão dois testes foram feitos. O primeiro, utilizou uma espécie de papelão, fita adesiva, cola e poliuretano expansível. A partir das seções impressas, essas foram coladas e alinhadas em recortes quadrados de papelão, para que se tivesse uma homogeneidade nas dimensões, que resultaria em uma geometria bem alinhada no futuro. Com esses recortes (Figura 12) partiu-se para a construção de uma longarina, que comportaria todas essas seções, Figura 11.

Figura 11 – Seções Alinhadas para Recorte.

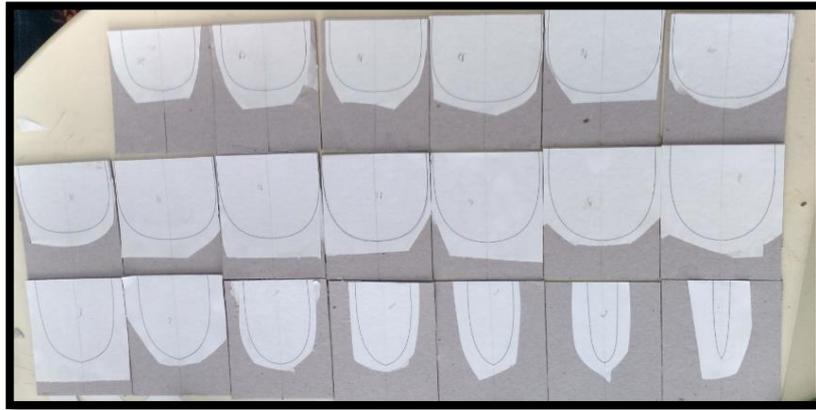
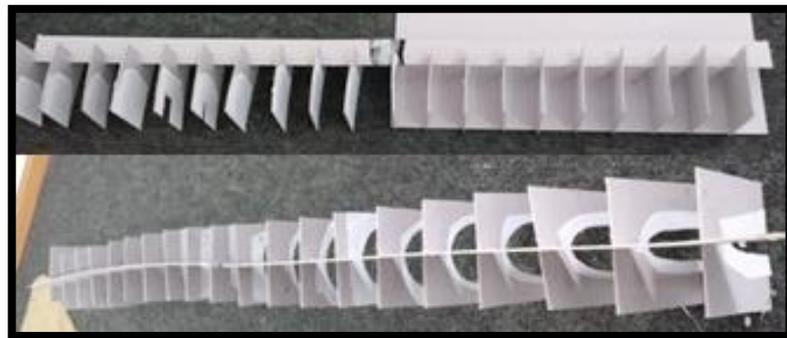


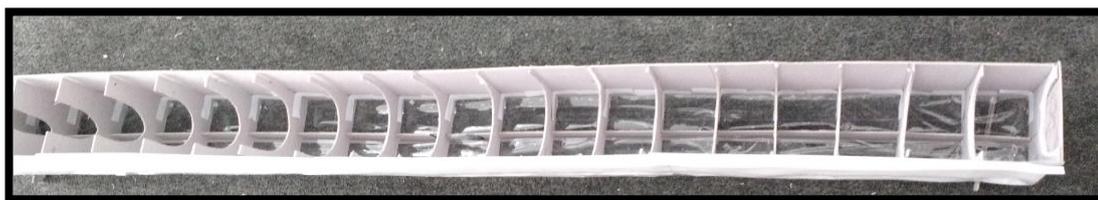
Figura 12 – Longarina com as Balizas dispostas.



Fonte: O Autor (2016).

De posse das seções e da longarina, fez-se o acoplamento das balizas na linha da quilha (longarina mestra), utilizando-se papel e fita adesiva para fechar uma caixa no entorno desse esqueleto, Figura 13. É importante notar que essa caixa foi idealizada para servir de limitante para o poliuretano que seria injetado no interior.

Figura 13 – Caixa para Inserção de Poliuretano Expansível.



Fonte: O Autor (2016)

De posse do esqueleto do casco, inseriu-se o poliuretano expansível no interior, fazendo com que o material ficasse completamente espalhado, preenchendo toda a cavidade da caixa, Figura 14.

Figura 14 – Caixa com Poliuretano se Expandindo no seu Interior.



Fonte: O Autor (2016).

O poliuretano expansível, como o próprio nome já diz, se expande e só é parado pelas barreiras limitantes. Notou-se que esses limites não eram adequados para a aplicação, já que quando o PU expande as forças decorrentes da expansão não uniforme do material distorce o frágil esqueleto idealizado. Notou-se também que o material expansível apresentava uma humidade elevada quando se tratando do tipo de material em que ele seria aplicado, isso facilitou que o papelão, material extremamente flexível não suportasse essas condições de humidade e tensões e se distorcesse, gerando resultados nada agradáveis em questões geométricas, visuais e principalmente experimentais, Figura 15.

Figura 15 – Poliuretano Completamente Expandido Dentro da Caixa e o Resultado.



Fonte: O Autor (2016).

Nota-se que a construção do modelo é muito mais complexa do que se imagina. Os materiais aplicados, devem ser conhecidos e suas propriedades estudadas. A conclusão obtida foi a de que a densidade e porosidade do PU utilizado não serviam para essa aplicação, já que a obtenção das linhas, mesmo após o processo de lixamento, não seriam as ideais, devido ao seu alto grau de desgaste na aplicação desse processo, ficando evidente a necessidade em se utilizar um material mais rígido como limitante de expansão.

Esses erros ocorridos inicialmente se deram devido ao não conhecimento do comportamento dos materiais utilizados para confecção do modelo. Com isso em mente, partiu-se para uma próxima concepção, baseada em um estudo mais detalhado dos materiais que iriam compor o modelo, mitigando os erros cometidos anteriormente.

Nessa segunda tentativa de obtenção do modelo utilizou-se outros materiais: madeira, supercola, materiais de marcenaria e um bloco de poliuretano.

Com as seções extraídas do casco CAD modelado, essas foram alinhadas e desenhadas em uma placa de madeira de 2mm, Figura 16, que após serem recortadas, formaram as balizas da embarcação, Figura 17.

Figura 17- Balizas Desenhadas na Madeira 2mm.



Figura 16 - Balizas Recortadas.



Fonte: O Autor (2016).

A primeira experiência, mostrou que o alinhamento das balizas só se daria com a construção de um suporte rígido. E com isso concebeu-se um picadeiro com espaço para o encaixe da longarina que apoiaria as balizas, Figura 18.

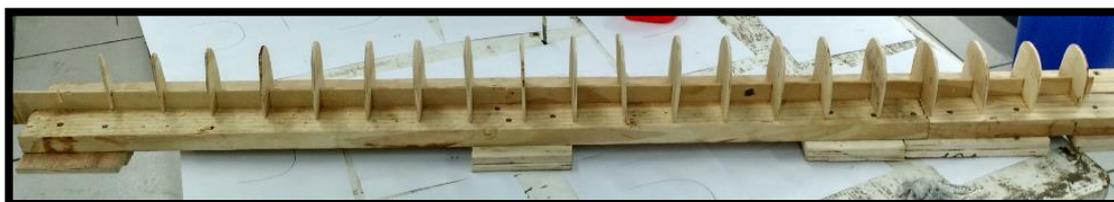
Figura 18 – Picadeiro com Longarina Encaixada.



Fonte: O Autor (2016).

Foram feitos cortes equidistantes de 5cm na longarina para que as 20 balizas pudessem ser encaixadas e posteriormente alinhadas no picadeiro. Foi utilizado um número elevado de balizas para se aumentar a precisão do modelo, já que o mesmo contém apenas um metro e qualquer imperfeição geraria uma grande mudança nas linhas do casco, conforme visto na Figura 19.

Figura 19 – Picadeiro com a Longarina e as Balizas Posicionadas.



Fonte: O Autor (2016).

Com as balizas e a longarina devidamente alinhadas no picadeiro, partiu-se para o corte dos pequenos blocos de PU, os quais foram encaixados e colados entre as balizas para compor o casco. A Figura 20 apresenta os blocos de PU devidamente alinhados junto as balizas na sua forma crua, ou seja, sem terem sido lixados.

Figura 20 – Blocos de PU Encaixados sem Lixar.



Fonte: O Autor (2016).

O modelo fora lixado até que se alcançassem as balizas e as linhas desejadas. A experiência mostrou que devem ser usadas lixas com pelo menos 10 cm e que tenha uma base rígida, evitando a retirada excessiva de material, visto que a base rígida impede a penetração excessiva nos blocos de PU entre 2 cavernas. A Figura 21 representa o modelo lixado.

Figura 21 – Casco Lixado.



Fonte: O Autor (2016).

Após a etapa de lixa alguns ajustes foram feitos, pois notou-se que haviam imperfeições no casco. Para tal, fez-se o uso de massa de reparos de parede de alvenaria, devido sua alta moldagem, a qual foi aplicada em toda a superfície do casco, Figura 22. Por fim, após a secagem da massa, aplicou-se uma tinta escura, para melhorar a visualização das imperfeições, Figura 23.

Figura 22 – Casco com Massa para Reparos Aplicada.



Fonte: O Autor (2016).

Figura 23 - Casco com Tinta Escura Aplicada.



Fonte: O Autor (2016).

Com esse novo modelo, notou-se que o procedimento realizado fora o ideal para essa aplicação, pois a ideia, era que esse protótipo tivesse um baixo custo de fabricação sem comprometer significativamente a qualidade do modelo. Os dados de custo podem ser consultados no APÊNDICE A. Tomando esse modelo como base, partiu-se para a construção do modelo catamarã em escala 1:6 que seria utilizado para os testes.

O estudo preliminar de construção tomou algum tempo, porém para um melhor resultado do modelo final, considerou-se que foi de fundamental importância esse tipo de análise, em se tratando de um casco com ordem de grandeza relativamente próxima ao tamanho real da embarcação.

Utilizando o mesmo fundamento do modelo citado anteriormente, partiu-se para a construção do modelo que seria utilizado para os experimentos, para tal, considerou-se que eles deveriam ser “gêmeos” e para se garantir isso, a construção foi feita de forma conjunta, fazendo com que os dois cascos fossem construídos de forma síncrona.

Cortou-se as balizas tanto de um casco quanto de outro, de forma conjunta, fazendo com que elas ficassem as mais parecidas possíveis. Um segundo picadeiro foi construído, com isso, obtiveram-se dois suportes idênticos para fabricação dos novos cascos, os quais são apresentados na Figura 24.

Figura 24 – Dois Picadeiros.



Fonte: O Autor (2016).

Utilizando-se o mesmo processo anterior, foram cortados blocos de PU e lixados em torno das balizas, para melhor visualização do trabalho realizado, a Figura 25 apresenta um casco lixado e outro em na fase anterior ao lixamento. Notou-se uma melhora significativa em relação ao modelo teste, isso se deve ao domínio da técnica obtida anteriormente.

Figura 25 – Na esquerda: Casco Lixado, Na direita: Casco em Processo de Lixa.



Fonte: O Autor (2016).

Após essa etapa, o modelo foi coberto por massa de preenchimento, pintado com tinta escura. No entanto diferentemente do modelo teste, nessa etapa, poliu-se o modelo para melhor se identificar as imperfeições, tornando-as consideravelmente mais visíveis. O procedimento foi repetido até que os modelos ficassem com o mínimo de imperfeições possíveis, Figura 26.

Figura 26 – Casco Livre de Imperfeições.



Fonte: O Autor (2016).

Após o controle de imperfeições, buscou-se uma tinta que fosse impermeável e que fornecesse um melhor acabamento superficial, para que o mínimo de atrito pudesse ocorrer nos testes. Partindo-se dessas premissas, decidiu-se por utilizar tinta automotiva, a qual foi aplicada homogeneamente aos dois cascos e cujo resultado final pode ser visto na Figura 27.

Figura 27 – Cascos Pintados.



Fonte: O Autor (2016).

Após essa etapa de pintura, utilizou-se cera de carnaúba para polir os cascos e deixá-los prontos para calibração e posteriormente utilização nos testes.

A ideia inicial para esses dois novos cascos, é que eles fossem idênticos. Visualmente, os resultados ficassem dentro de um limite de imperfeição esperado, com linhas coerentes em todo o casco e com todas as dimensões coincidentes. No entanto, quando se pesaram os cascos separadamente, notou-se uma diferença de 4 gramas. Ao se analisar que o peso do conjunto é de 1200 gramas, considerou-se que essa diferença não traria prejuízos na realização dos testes.

4.2. CALIBRAÇÃO DO MODELO

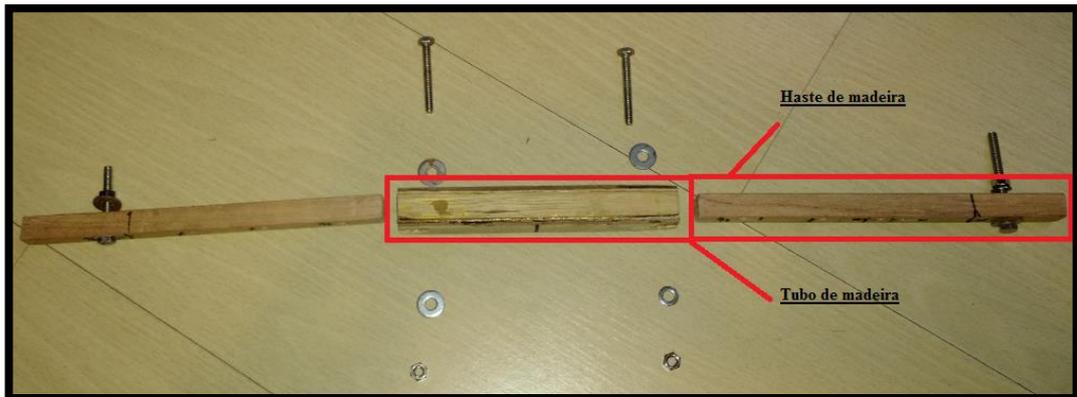
Conforme descrito na fundamentação teórica, para que o modelo apresente o comportamento hidrodinâmico da embarcação real, faz-se necessária a calibração rigorosa das características inerciais do modelo, exigindo-se que se determinasse o calado e a boca da embarcação.

Essa calibração iniciou-se pela construção de um método para união dos cascos, o que resultaria na distância entre um e outro. Após a boca ser calibrada, fez-se um estudo para a identificação da linha do calado, onde ambos os cascos foram nivelados simultaneamente.

4.2.1 CALIBRAÇÃO DA BOCA

Para se calibrar a distância entre cascos foram feitas duas hastes de madeira, onde há um sistema de hastes deslizantes que permitem cada haste lateral se deslocar na horizontal aproximando ou afastando cada um dos cascos da embarcação, conforme pode ser visto na Figura 28.

Figura 28 – Tubo, Hastes de Madeira e seus Componentes de Fixação.

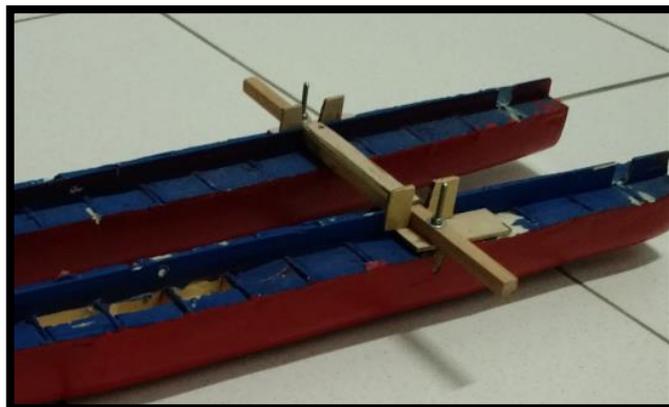


Fonte: O Autor (2016).

Pode-se notar que para uma melhor calibração, essas hastes são fixadas em um tubo com perfil quadrado de madeira, isso se faz necessário para que se tenha um melhor alinhamento entre um casco e outro.

Essas hastes unem um casco no outro. A Figura 29 apresenta essa união, nota-se em cada casco, buracos nas longarinas, de forma com que permita a passagem da haste para esta ser fixada em um apoio feito especialmente para isso no bordo dos cascos. Todo o conjunto se localiza acima da linha d'água, não influenciando na resistência ao avanço da embarcação.

Figura 29 – Haste de Popa Utilizada para União dos Cascos.



Fonte: O Autor (2016).

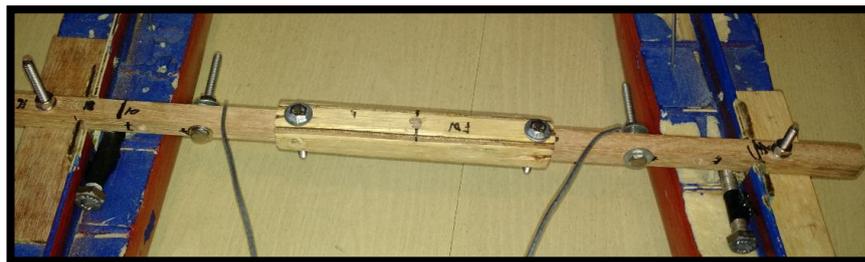
As madeiras adicionadas nos bordos foram instaladas para se ter uma melhor percepção da calibração do modelo e para permitir a fixação da haste de ligação. Sabe-se que os conjuntos longarina/balizas, tanto de um casco como do outro, foram feitas de forma idênticas e além de apresentar simetria entre elas, apresenta similaridade no convés. A haste foi posicionada tangencialmente ao apoio colado nos cascos, com isso, garantiu-se que a embarcação estaria nivelada. Essa certeza se dá pelos elementos apresentarem formas retas, facilitando a observação desse nivelamento. As Figura 30 e 31 apresentam os apoios de fixação e as hastes devidamente fixadas, respectivamente.

Figura 30– Apoio de Fixação Marcado na Figura



Fonte: O Autor (2016).

Figura 31 – Hastes Fixadas aos Apoios

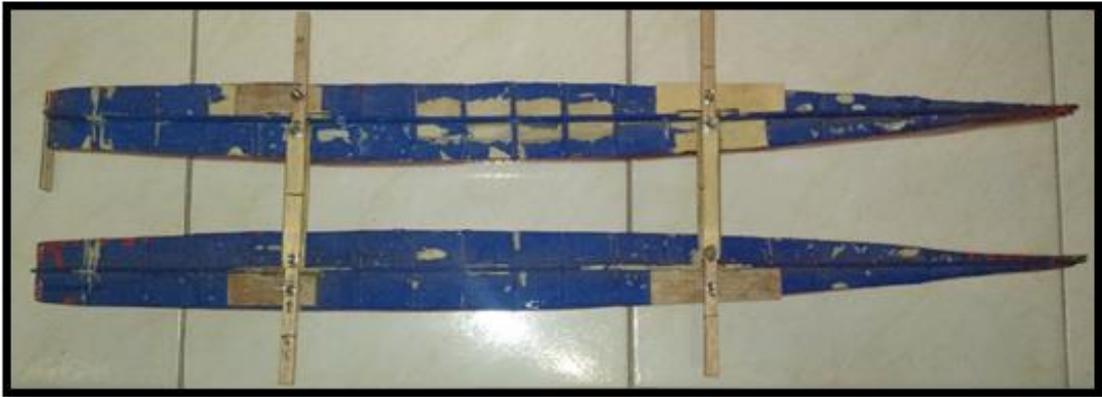


Fonte: O Autor (2016).

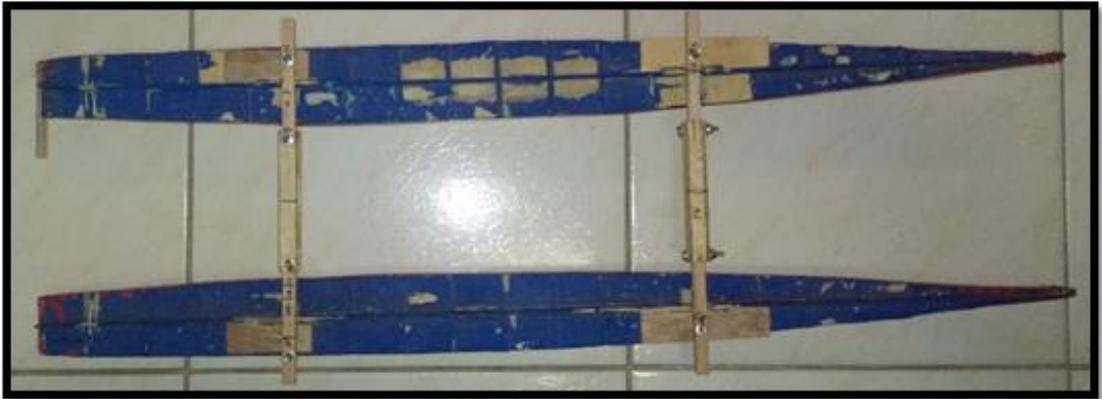
Para cada variação de boca, faz-se necessário desconectar as hastes. Por isso, foram feitos furos para passagem dos elementos de fixação, de forma que quando as hastes se movessem dentro do tubo, novamente poderiam ser fixadas, voltando ao nivelamento inicial, conforme pode ser visto nas três mudanças de boca mostradas na Figura 32.

Figura 32 – Modelo com Diferentes Bocas. A-21cm, B-27cm e C-39cm.

A)



B)



C)



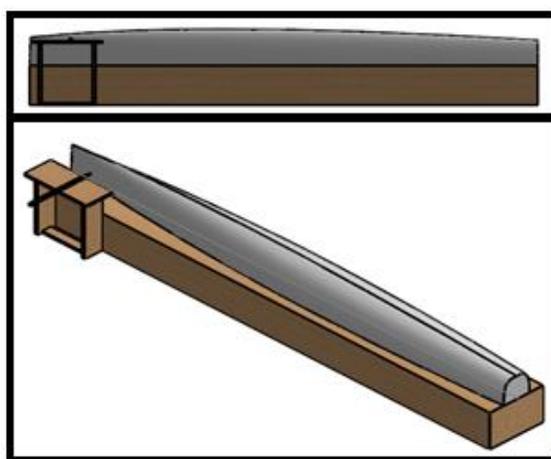
Fonte: O Autor (2016).

4.2.2 CALIBRAÇÃO DO CALADO

O calado da embarcação é a representação vertical do volume de água que o barco irá deslocar, sendo assim, deve ser traçado evitando-se erros de ângulos e de altura, pois uma mínima diferença, pode causar uma variação expressiva no arrasto da embarcação.

Para a determinação da linha de calado que corresponde ao deslocamento de projeto do casco, utilizou-se o programa SolidWorks®. O traçado da linha de calado seguiu o esquema mostrado na Figura 33. É importante observar que a parte superior de todas as balizas construídas em madeira delimitam o convés que serve de plano de referência para a marcação da linha de calado em cada casco.

Figura 33 – Esquema Representativo de como o Calado fora Traçado.



Fonte: O Autor (2016).

De forma a evitar erros nessa calibração, buscou-se utilizar para tal a superfície mais nivelada possível, dentro das possibilidades, para que não houvessem diferenças de proporções nos extremos do barco. Utilizou-se para verificação desse nivelamento, um nível de construção, onde pôde-se observar um bom nivelamento da superfície do laboratório, onde o modelo foi construído.

O catamarã em questão, como já apresentado anteriormente, tem na sua composição uma longarina, que também pode ser usada para nivelar a embarcação, já que possui espessura e largura ideais para sustentar a embarcação em uma base, sem que houvessem deslocamentos do casco.

Notando-se essas características, utilizou-se uma base feita de PU, na qual traçou-se uma linha a qual foi cortada para permitir o encaixe da longarina. Ambos os cascos foram encaixados no mesmo bloco de PU permitindo que fossem medidos simultaneamente.

O posicionamento da caneta para traçar o calado, foi feito a partir do ponto mais alto do casco, de acordo com o arranjo mostrado na Figura 33. Observa-se que foi aplicada uma pequena correção ao valor de calado, que descontou a espessura da ponta do marcador utilizado na marcação da linha do calado.

Uma vez definida a altura da linha de calado, construiu-se uma base para sustentar a caneta, que fosse paralela à superfície do chão do laboratório e que pudesse se deslocar paralelamente ao eixo longitudinal do casco, não podendo se mover para cima ou para baixo, para não haver incoerências no traçado do calado.

Utilizando a metodologia descrita anteriormente, a Figura 34 apresenta a linha de calado traçada de um extremo a outro do casco e, por fim, a Figura 35 mostra o modelo na água perfeitamente ajustado ao calado traçado.

Figura 34 – Linha do Calado.

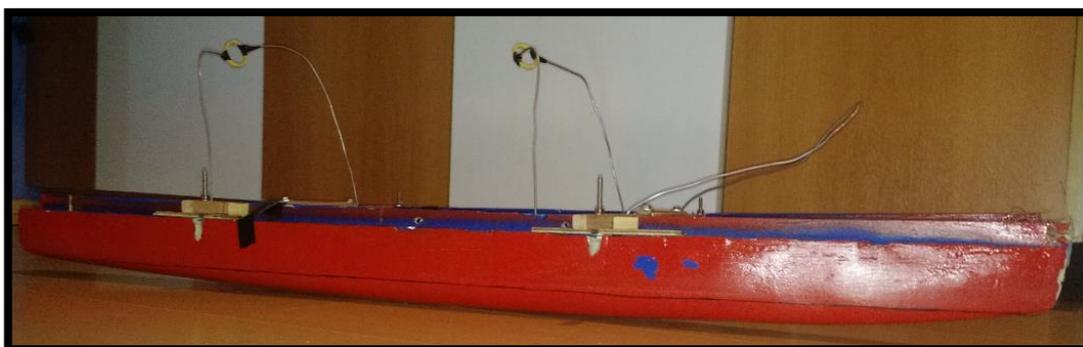


Figura 35 – Modelo com Calado Exatamente na Linha D'água.



Fonte: O Autor (2016).

Essa linha do casco foi fundamental para os ensaios em piscina, pois notou-se, quando o barco foi colocado na água, que havia a presença de trim. Porém como o ajuste de calado exigia um lastro de 200 gramas, os pesos foram posicionados de forma a evitar esse trim e a linha do calado ficar exatamente na linha d'água da embarcação, como foi previsto anteriormente.

4.3. ANÁLISE NUMÉRICA DE RESISTÊNCIA AO AVANÇO DO MODELO

Usualmente a estimativa da resistência ao avanço das embarcações, faz o uso de programas baseados no método CFD, que incorporam viscosidade e modelos de turbulência. Porém para esse estudo, por limitações de tempo e de recurso, fez-se o uso de um programa que se baseia nesse tipo de abordagem, embora utilize escoamento potencial e equações empíricas, conforme descrito na fundamentação teórica.

Conforme descrito na metodologia proposta, o cálculo da resistência ao avanço utilizou o método Slender Body, ideal para a análise de cascos semi-deslocantes e que apresentam o corpo esbelto¹. No entanto, utilizou-se o programa Rhinoceros® para obtenção dos cascos e a variação da distância entre eles, conforme procedimento de modelagem descrito na metodologia

4.3.1 CALIBRAÇÃO DA BOCA UTILIZANDO O RHINOCEROS®

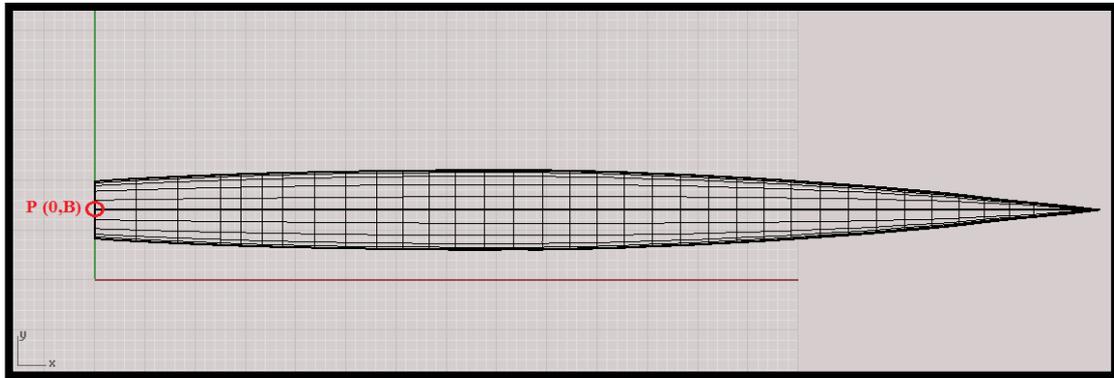
As análises propostas para esse trabalho empregam três variações de distâncias entre cascos, essas variações são modeladas no Rhinoceros® e analisadas usando MaxSurf®.

Para se distanciar um casco do outro, inicialmente posicionou-se um casco no ponto (0,B), onde zero representa o ponto de origem no eixo x e a coordenada B representa a posição do eixo central do casco até o centro proposto do catamarã no eixo y. A partir do posicionamento do primeiro casco, fez o espelhamento do mesmo para se obter a distância entre eles.

¹ Corpo esbelto é um casco que contém o comprimento muito maior que a boca. Para um casco ser esbelto, a razão de L/B deve ser maior que 5. O Casco estudado apresenta L/B maior que 12. (BENTLEY SYSTEMS, 2013).

A Figura 36 apresenta o casco sozinho e esse ponto citado, assim como o eixo de referências, a partir desse foi feito o espelhamento.

Figura 36 – Casco Referência Posicionado para Espelhamento.



Fonte: O Autor (2016).

A proposta do trabalho foi a de analisar três diferentes valores de distância entre semi-cascos: 14, 20 e 32 centímetros, essas distâncias foram calculadas de acordo com o fator de escala λ proposto e representam, respectivamente, na escala real da embarcação, 84, 120 e 192 centímetros. Essas medidas representam a distância entre o centro de cada casco, pois esse é o padrão do MaxSurf para realizar a análise de catamarãs. As Figuras 37, 38 e 39 representam os distanciamentos feitos no Rhinoceros para posteriormente serem exportados para o MaxSurf.

Figura 37 - Modelo com Distância entre Semi Casco de 14 cm

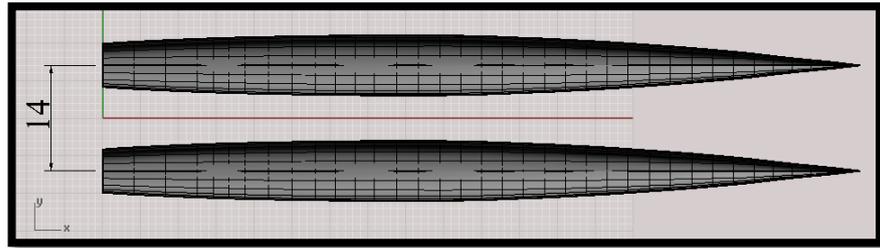


Figura 38 - Modelo com Distância entre Semi Casco de 20 cm.

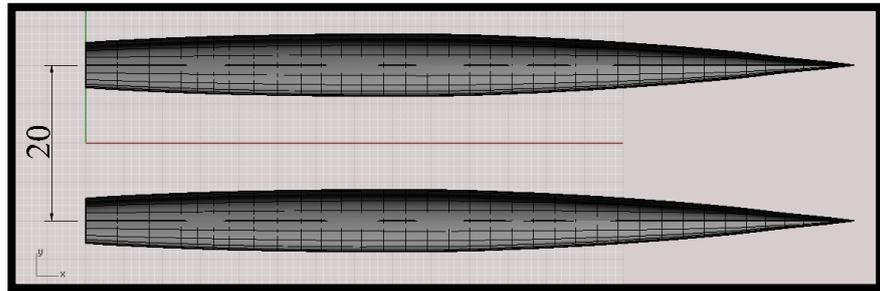
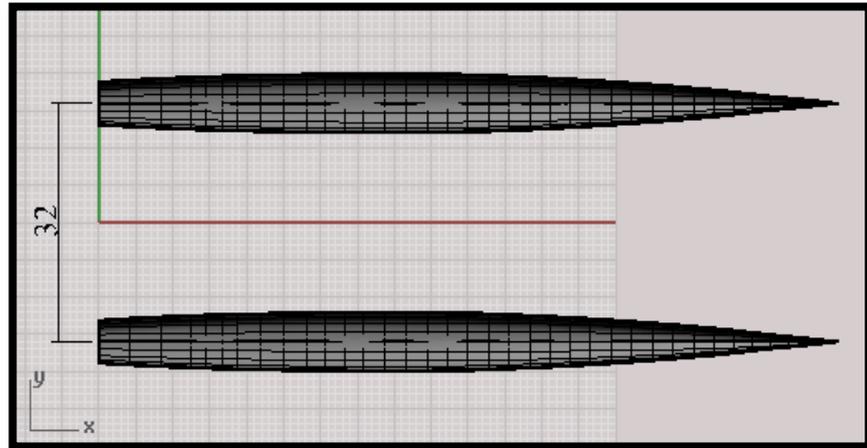


Figura 39 – Modelo com Distância entre Semi Casco de 32 cm.



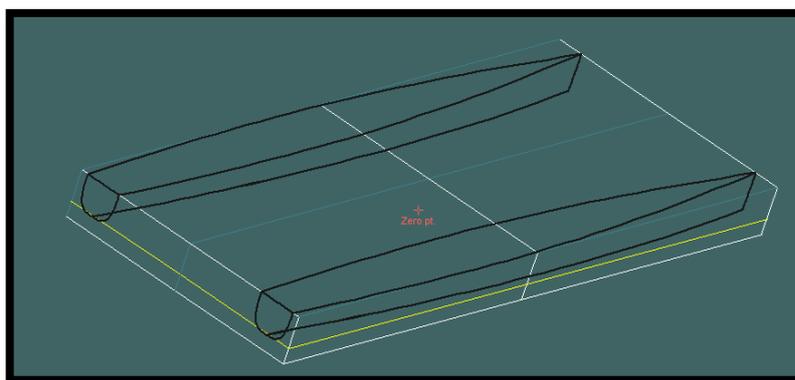
Fonte: O Autor (2016).

4.3.2 CALIBRAÇÃO DO CASCO PARA ANÁLISE NUMÉRICA

O catamarã foi desenvolvido no programa Rhinoceros®, V4.0, porém para a análise de resistência ao avanço, foi utilizado o programa MaxSurf®, nos módulos Modeler e Resistance. O módulo Modeler serviu para que o casco fosse importado do Rhinoceros® com as configurações mostradas no item 4.3.1, pois não é possível importar direto no módulo Resistance. Nesse módulo foram também padronizadas algumas medidas, e a essas, foram atribuídas o fator de escala proposto na seção 4.1.1.

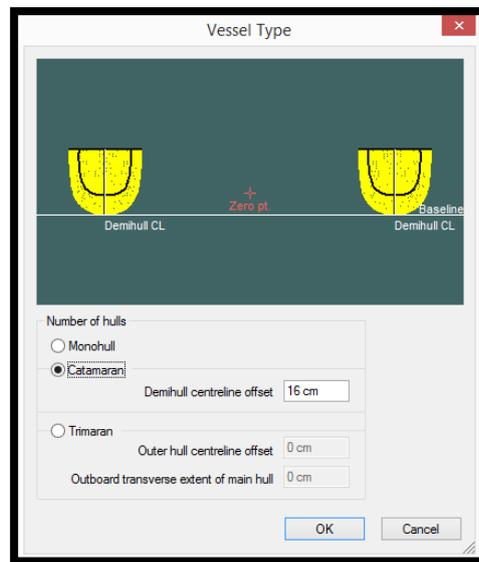
A distância entre cascos deve ser atribuída antes de os cascos serem exportados para o MaxSurf Modeler®, já que não é possível fazer essa alteração no MaxSurf. Porém após esse passo, deve-se identificar no programa a distância entre cascos do catamarã. A Figura 40 apresenta o casco na sua forma bruta, diretamente importada do Rhinoceros® e a Figura 41 apresenta a janela onde deve ser inserida a distância entre semi cascos. No exemplo, a distância entre cascos utilizada foi de 39 cm, essa dimensão é a soma da distância entre os meios cascos com a metade de cada casco. Observa-se que deve-se introduzir a metade da distância entre semi cascos (16 cm), essa dimensão se refere a distância entre o centro de um casco até o meio entre eles devido as considerações do programa. O mesmo procedimento deve ser repetido para as outras distâncias analisadas.

Figura 40 – Casco Importado do Rhinoceros.



Fonte: O Autor (2016).

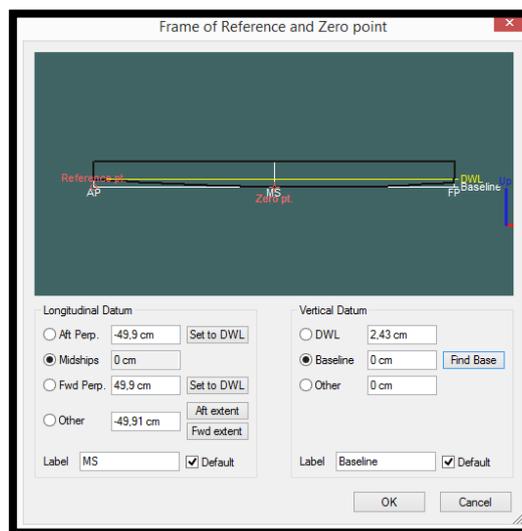
Figura 41 – Janela para Determinação do Tipo de Casco e Determinação da Meia Boca (MaxSurf®).



Fonte: O Autor (2016).

Outra medida que deve ser aferida no módulo Modeler é o calado da embarcação. Embora o calado possa ser modelado no Rhinoceros®, deslocando-se o modelo na vertical, a definição do calado diretamente no MaxSurf® é mais intuitiva, pois com a alteração do calado, uma linha é traçada em torno do casco, facilitando a visualização, conforme pode ser visto na Figura 42

Figura 42 – Janela para Calibração do Calado.



Fonte: O Autor (2016).

Para melhorar as análises, encontra-se no programa uma ferramenta muito útil, que é o cálculo hidrostático da embarcação. Com isso, pode-se, através do calado determinado, obter-se o peso que a embarcação deverá ter para essa medida ser correspondida. Essa análise serve de verificação da modelagem, pois utilizando o fator de escala e tendo em mãos os valores das principais dimensões da embarcação real, pode se fazer a verificação se o caminho percorrido até aqui foi correto ou não. A Tabela 5 representa essa medida de peso destacada em vermelho.

Tabela 5 – Dados Hidrostáticos do Modelo.

	Measurement	Value	Units
1	Displacement	1,399	kg
2	Volume (displaced)	1398,83	cm ³
3	Draft Amidships	2,43	cm
4	Immersed depth	2,43	cm
5	WL Length	99,81	cm
6	Beam max extents on WL	39,02	cm
7	Wetted Area	1344,93	cm ²
8	Max sect. area	24,49	cm ²
9	Waterpl. Area	1002,18	cm ²
10	Prismatic coeff. (Cp)	0,572	
11	Block coeff. (Cb)	0,411	
12	Max Sect. area coeff. (Cm)	0,762	
13	Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,715	
14	LCB length	-1,10	from ze
15	LCF length	-6,74	from ze
16	LCB %	-1,105	from ze
17	LCF %	-6,751	from ze
18	KB	1,57	cm
19	KG fluid	2,45	cm
20	BMt	185,52	cm
21	BML	395,95	cm
22	GMt corrected	184,64	cm
23	GML	395,07	cm
24	KMt	187,09	cm
25	KML	397,52	cm
26	Immersion (TPc)	0,001	tonne/c
27	MTc	0,000	tonne.m
28	RM at 1deg = GMT.Disp.sin(1	4,51	kg.cm

Density (water)

Std. densities

VCG

Fonte: O Autor (2016).

Para se fazer a verificação da aderência do modelo com a embarcação real, utiliza-se o fator de escala para a verificação do peso da embarcação. A Tabela 6 apresenta os valores

encontrados com auxílio do programa computacional e a Tabela 7 apresenta os valores reais² da embarcação, de acordo com a última pesagem e considerando as cargas de projeto, ambos resultados empregam o fator de escala λ proposto.

Tabela 6 – Valores Gerados pelo MaxSurf, após a Entrada do dado Calado e Aplicado o Fator de Escala.

	Modelo	Real *
λ	1:6	
Calado [cm]	2,43	0,41
Massa MaxSurf® [kg]	1,39	300,24

* Valor extrapolado a partir do fator de escala

Tabela 7 – Valores do Catamarã Babitonga Real com o Fator de Escala Aplicado.

	Modelo	Real *
λ	1:6	
Calado [cm]	2,43	14,6
Massa Real [kg]	1,39	300

* Valor extrapolado a partir do fator de escala

Fonte: O Autor (2016).

Analisando as tabelas, nota-se que a diferença foi de apenas 240 gramas de uma análise para a outra, levando em consideração que o fator de escala aqui é elevado ao cubo, a ordem de grandeza dessa diferença não é significativa. Ou seja, o MaxSurf® está representando muito bem as propriedades geométricas do casco modelado em escala reduzida.

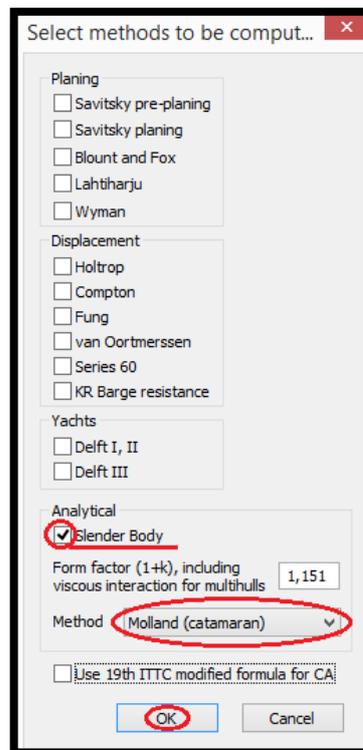
² Valores extrapolados para o real

4.3.3 CONFIGURAÇÃO DA ANÁLISE NUMÉRICA

Entre os diversos métodos disponíveis no MaxSurf Resistance®, utilizou-se o método Slender Body. Conforme já descrito, o método Slender Body é utilizado no cálculo de resistência ao avanço de cascos semi deslocantes e esbeltos, o catamarã em questão apresenta exatamente essas características

Nesta secção serão descritos os parâmetros usados na análise. Esse método prevê apenas a estimativa da resistência causada pelo padrão de ondas da embarcação, através da análise do escoamento potencial. Para a estimativa da resistência total, o MaxSurf® adiciona a componente de resistência viscosa provida pelo método de ITTC 1957 e o fator de forma para catamarã proposto por Molland et al (2011), todos esses citados na seção 2.1. A Figura 43 apresenta a tela do programa em que são definidos os parâmetros usados na análise da resistência ao avanço. (BENTLEY SYSTEMS, 2013)

Figura 43 - Escolha do Método para Cálculo da Resistência ao Avanço.



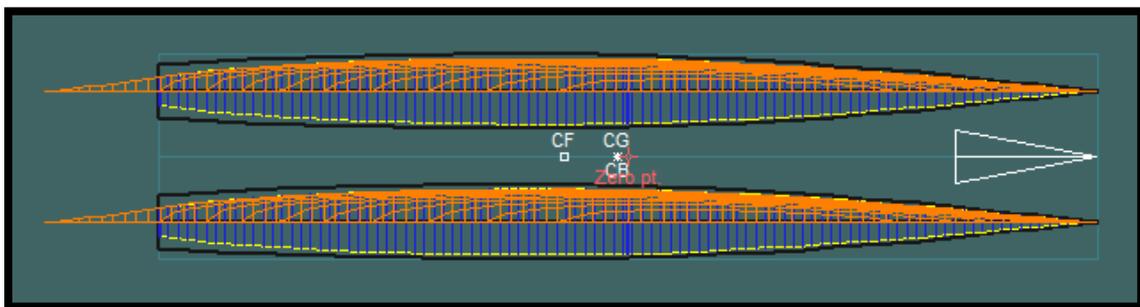
Fonte: O Autor (2016).

A utilização de métodos numéricos envolve alguns fatores fundamentais para a obtenção de bons resultados. Ao se importar o casco para o MaxSurf Resistance®, é gerada automaticamente uma malha, a qual é composta por um conjunto de linhas d'água e seções transversais que formam uma grelha em torno do plano diametral do casco. A malha é criada em um bordo de cada casco e espelhada para o outro bordo a partir da linha de centro, ou seja, os cascos precisam ser simétricos entre si para que o método possa ser utilizado. (BENTLEY SYSTEMS, 2013)

Para obedecer a premissa de corpo esbelto, o casco deve conter linhas que comecem e terminem com linhas d'água que sejam conectadas à linha de centro, ou seja, a proa e a popa devem conter pontos que terminem em zero em uma das coordenadas do plano (BENTLEY SYSTEMS, 2013)

Observa-se que a hipótese acima não seria válida para cascos com popa transon, porém para satisfazer a análise numérica, o programa adiciona pontos até o fechamento dessa malha. Isso não influi nos resultados, pois não há acréscimo na área molhada, apenas gera um “corpo virtual” que corresponde à trajetória teórica do fluido potencial no entorno do casco. A Figura 44 apresenta essa malha com essa adição até o fechamento ao final do “corpo virtual”. (BENTLEY SYSTEMS, 2013)

Figura 44 – Formação da Grade de Malha.



Fonte: O Autor (2016).

Assim como todo método numérico, é importante observar que o refino da malha é um importante parâmetro que define a qualidade da resposta e o tempo de processamento utilizado para a análise, assim, esse parâmetro pode ser alterado para a obtenção de melhores resultados, porém com o aumento do número de elementos, maior será o tempo para efetuar a análise e

obter os resultados. A definição da malha deve ser feita com base nos recursos computacionais disponíveis e em uma análise de convergência.

Com a variação do número de seções, automaticamente é alterado o número de linhas d'água. Para a geometria do catamarã em análise, o MaxSurf® sugere o uso de 81 seções.

Para uma análise mais criteriosa, a embarcação fora analisada em uma faixa de velocidade de 0 a 8,2 nós considerando diferentes números de seções até a convergência da malha. Porém, essa convergência é implícita, já que a ordem de grandeza da resistência ao avanço da embarcação é menor que uma centena e o programa computacional não representa muito bem valores infinitesimais, já que usa apenas uma abordagem CFD.

Fez-se a análise para o casco em tamanho real, diferenciando o número da malha, os resultados obtidos, fazendo-se as mesmas variações anteriores, porém utilizando agora uma faixa de velocidade extrapolada de 0 a 20 nós. Fazendo-se essa análise para uma velocidade fixa de 7,5 nós, os resultados de mudança de malha podem ser vistos na Tabela 8.

Tabela 8 – Análise de Refinamento de Malha.

Número de Nós da Malha	Resistência ao Avanço [N]	Diferença
81	174,86	-
162	175,2	0,34
324	175,04	-0,16
648	175,03	-0,01

Fonte: O Autor (2016).

Nota-se na tabela que o refino da malha influencia na resistência ao avanço estimada, comprovando a importância da análise de convergência de malha. Porém pode-se notar que o valor sugerido pelo programa já oferece uma estimativa de resistência ao avanço suficientemente precisa para a velocidade de projeto e a um custo computacional consideravelmente menor. Por essa razão, as análises realizadas seguiram com o valor de 81 seções.

4.3.4 PROCEDIMENTO SIMPLIFICADO DE ENSAIO DE REBOQUE

O experimento compõe uma parte fundamental para a realização deste trabalho, pois é nele em que os resultados obtidos na teoria serão testados. Por isso, a calibração e a escolha de equipamentos deve ser feita de forma que esses tenham o mínimo de interferência possível na realização dos ensaios.

A universidade não detém de um tanque de provas para realização dos testes, por isso, buscaram-se instrumentos e maneiras para se substituir essa necessidade. Contudo, os equipamentos utilizados em um tanque de provas real são de altíssima precisão, se corretamente calibrados e isso pode ter sido uma fonte de erro para a aplicação da presente proposta.

Para a realização dos testes, buscou-se um ambiente que pudesse comportar os equipamentos usados para a realização dos ensaios seguindo a metodologia proposta. A escala do modelo foi pensada para realização de testes em um tanque com comprimento maior que 10 vezes o tamanho do modelo. Assim buscou-se piscinas capazes de atender a essas características, sendo utilizada uma piscina com 10 metros de comprimento por 5 metros de largura e 2.5 metros de profundidade.

Para a realização dos testes foi montada uma estrutura simplificada que permitiu a realização dos experimentos propostos. Alguns dos itens tiveram que ser montados no local do experimento. A lista a seguir apresenta os itens utilizados e sua função no procedimento de ensaio simplificado proposto.

- Piscina: A piscina utilizada nos testes possui dimensões de 10 metros de comprimento por 5 metros de largura e profundidade de 2.5 metros.
- Poste: O poste foi projetado exclusivamente para os testes. Foi feito de madeira e possui 4 metros de altura, contendo duas polias, uma no topo e uma na base.
- Polias: Buscou-se no mercado polias que tivessem o menor atrito possível, para que não impactassem nos resultados dos testes.
- Massa: Para representar a massa que caía do poste, foram utilizadas pedras e colocadas dentro de sacolas, pesadas e amarradas no fio de nylon.
- Linha de nylon: Essa serviu para manter o modelo em linha reta no momento das corridas, junto a ela agiam duas hastes de arrame, presas ao barco e nessas hastes, duas argolas de plástico (componentes de alinhamento) que

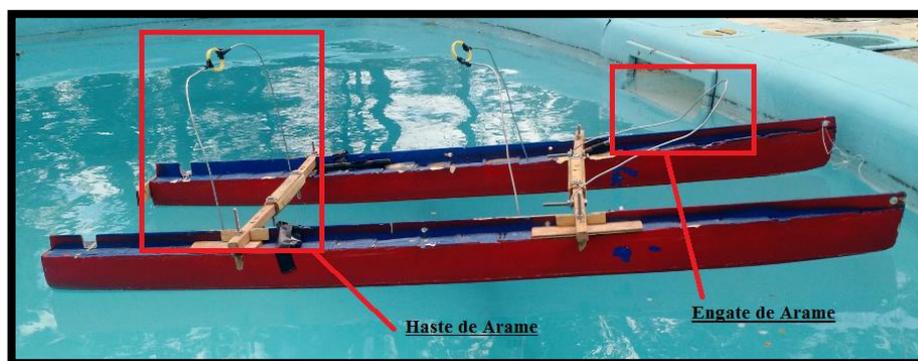
circundavam o fio de nylon e mantinham a trajetória retilínea do modelo durante os testes.

- Cronômetro: Foi utilizado para marcar o tempo da corrida visando determinar a velocidade desenvolvida pelo modelo.
- Câmera de alta resolução: Utilizada para registro dos ensaios e posterior análise.

4.3.5 MONTAGEM DO EXPERIMENTO

Para realização dos testes, foi utilizado o esquema proposto por (ARTMANN 2015), como apresentado na seção 3.1. A montagem do experimento iniciou-se pela medição da altura da linha d'água até a borda para que a haste de arame fosse instalada de forma a não induzir ângulos de trim no modelo. Na ponta da haste foram fixadas as argolas de plástico. Foi projetado um engate de arame na proa da embarcação para se enganchar o fio de nylon preso a sacola que continha a massa que iria cair do poste. A Figura 45 apresenta esse arranjo.

Figura 45 – Modelo com as Hastes e o Engate de Arame



Fonte: O Autor (2016).

Após o modelo estar pronto, com as devidas hastes para as corridas, fez-se a calibração do poste e os seus componentes (Figura 46). O furo do poste coincide com o buraco das argolas presas ao modelo, passou-se um fio de nylon nesse furo e fixou-se o mesmo nas duas bordas da piscina, de forma que ele passasse por dentro das argolas de alinhamento, sendo responsável pela corrida retilínea da embarcação. A Figura 47 apresenta o fio passando pelo meio das duas argolas, em amarelo. Nota-se que o fio não encosta nas argolas, ou seja, esse fio serve apenas para corrigir a direção e não deve interferir na resistência ao avanço.

Figura 46 – Furo no Poste e Fio de Nylon Cruzando a Piscina.

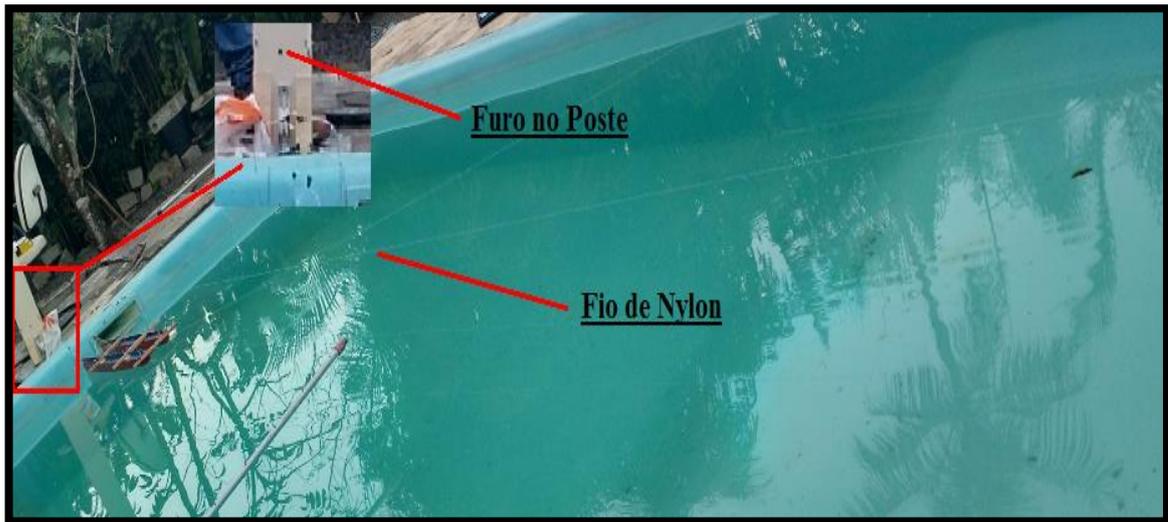


Figura 47 – Fio Passando pelas Argolas de Plástico



Fonte: O Autor (2016)

Note que na Figura 46 o fio de Nylon não é muito nítido, porém a Figura 47 é possível observar que esse fio está ligado de um lado ao outro da piscina de forma nivelada.

Um outro fio de nylon foi utilizado para a fixação do peso e a transmissão dessa carga ao modelo, com isso passou-se o fio pelas polias, uma na base e a outra no topo do poste e fixou-se o peso em uma extremidade enquanto que a outra extremidade foi fixada no catamarã. O comprimento desse fio é de cerca de 2 vezes a altura do poste, já que a distância que o barco percorre durante o ensaio é a mesma que o peso percorre durante a queda.

Para efetuar as tomadas de tempo, posicionou-se um ponto referencial a dois metros do início da corrida e quando o modelo passava por esse ponto, percorria dois metros e, utilizando um cronometro, o tempo era marcado até o modelo atingir a parede da piscina fazendo um barulho que significava o fim da corrida. A Figura 48 apresenta o ponto de partida e chegada das corridas.

Figura 48 – Pontos de Início e Fim de Cronometragem.



Fonte: O Autor (2016).

4.3.6 MÉTODO DE MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO

A partir da montagem dos equipamentos para realização dos testes, partiu-se para a determinação do peso que iria fazer com que o modelo fosse arrastado. Os testes foram baseados na obtenção do tempo em que o catamarã percorria uma certa distância de acordo com uma massa que caía do poste e fazia o mesmo se movimentar.

A determinação do valor das massas utilizadas no experimento foi baseada na resistência ao avanço estimada na análise numérica. Essa força obtida convertida para um valor de massa medido em quilogramas utilizando a Equação 11, determinando-se, para cada resistência ao avanço, uma massa a ser usada no experimento.

$$F = m * g \quad (11)$$

Onde,

F - Resistência ao Avanço [N]

m - Massa [kg]

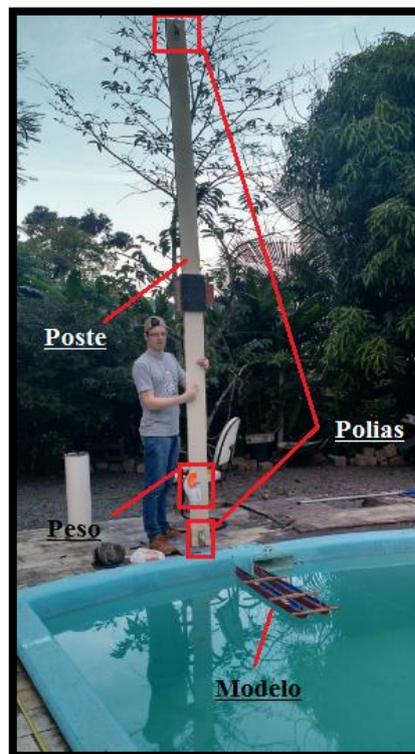
g - Aceleração da Gravidade [m/s²]

4.3.7 CALIBRAÇÃO PARA EXPERIMENTO

Os testes consistem em deixar uma massa cair de um poste, enquanto que a força peso atuante sobre a massa é transferida por meio de polias provocando a movimentação do modelo, transformando energia potencial gravitacional em energia cinética.

Para eliminar uma fonte de erro, como o poste contém 4 metros de altura, considerou-se 2 metros de corrida para que o catamarã entrasse em regime permanente de velocidade e mediu-se o tempo de corrida nos outros 2 metros finais. A Figura 49 apresenta o poste com as polias e o peso em queda livre.

Figura 49 – Representação do Poste com seus Elementos e o Peso em Queda Livre.



Fonte: O Autor (2016).

A partir da determinação das características do experimento, fez-se o teste dos equipamentos, inicialmente deixando-se uma massa qualquer cair do poste, nessa calibração notou-se a presença de força de atrito gerada pelas polias, sendo ela responsável pelo aumento da resistência ao avanço do modelo.

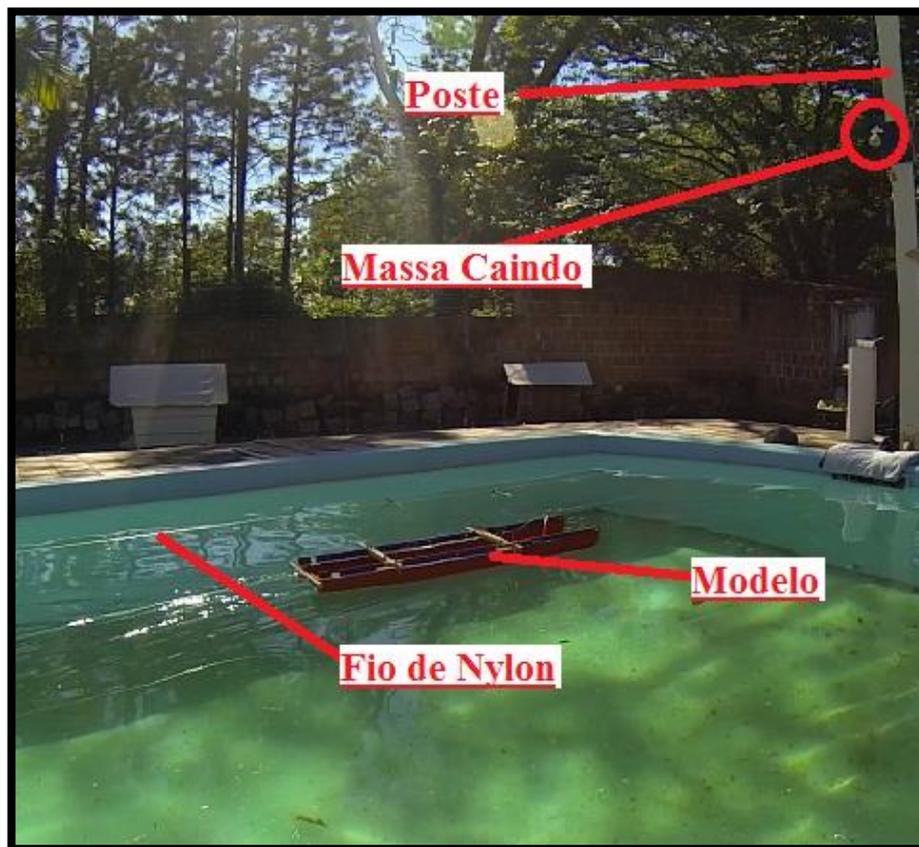
Para se corrigir esse efeito, foram adicionadas pequenas quantidades de massa ao sistema até o modelo começar a se movimentar, após isso, retirou-se uma porção dessa massa,

para que o modelo ficasse estático mesmo contendo a quantidade restante de resíduo no sistema. Essa verificação foi feita a cada 20 corridas no tanque.

Essa massa adicional gerada pela força de atrito foi de 25 gramas, sendo esse valor descontado das massas utilizadas nos experimentos e que representam a resistência ao avanço dos cascos ensaiados.

Após essa última verificação, os testes puderam iniciar, conforme mostrado na Figura 50, a qual apresenta o sistema pronto e em execução.

Figura 50 – Teste Sendo Executado



Fonte: O Autor (2016).

Após a calibração do modelo e da montagem do experimento, seguiu-se para a etapa de realização dos testes. Para se ter uma melhor produtividade, já que o tempo de piscina era limitado, programou-se os testes anteriormente, condições analisadas e quantidade de corridas em cada condição.

5. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos na simulação computacional utilizando o método Slender Body, bem como os resultados obtidos no ensaio simplificado realizado no tanque de provas.

Nessa seção serão apresentados os resultados obtidos no MaxSurf Resistance® de acordo com a respectiva mudança de parâmetros, assim como os resultados obtidos através dos ensaios realizados. A coleta de dados gerada servirá para uma comparação, onde serão analisadas as diferenças de um método para o outro, identificando eventuais diferenças.

5.1 PARÂMETROS ANALISADOS EM AMBOS MÉTODOS E RESULTADOS

As análises que serão apresentadas seguem um padrão de parâmetros testados para os dois métodos, ou seja, resultados obtidos através de variações de parâmetros no programa, foram replicados nos testes feitos na piscina. Para melhor se mensurar os resultados dos testes, foram utilizados equipamentos que influenciassem o menos possível no experimento.

A variação paramétrica se deu única e exclusivamente na boca da embarcação, onde foram feitas três modificações dessa medida para se analisar o impacto dessas na resistência ao avanço da embarcação. Como citado anteriormente, essa variação foi efetivada na análise numérica e replicada nos experimentos realizados na piscina.

A seção 4.3.6 apresenta como foi feita a conversão de resistência ao avanço para a massa equivalente, o MaxSurf Resistance® apresenta um valor de resistência para cada velocidade imposta.

Para os testes na piscina, utilizou-se uma mesma massa para cada valor de boca e repetiu-se a corrida 10 vezes, com isso obteve-se uma média de tempo e por consequência, de velocidade para cada valor de boca analisado.

Um segundo teste realizado foi a variação das massas para um mesmo valor de boca. Foram feitas de 6 a 15 corridas para cada variação de massa e com isso obteve-se uma velocidade média para cada massa. Através dessas medidas gerou-se uma curva de resistência ao avanço para um valor de boca constante.

5.1.1 RESULTADOS OBTIDOS NA ANÁLISE NUMÉRICA

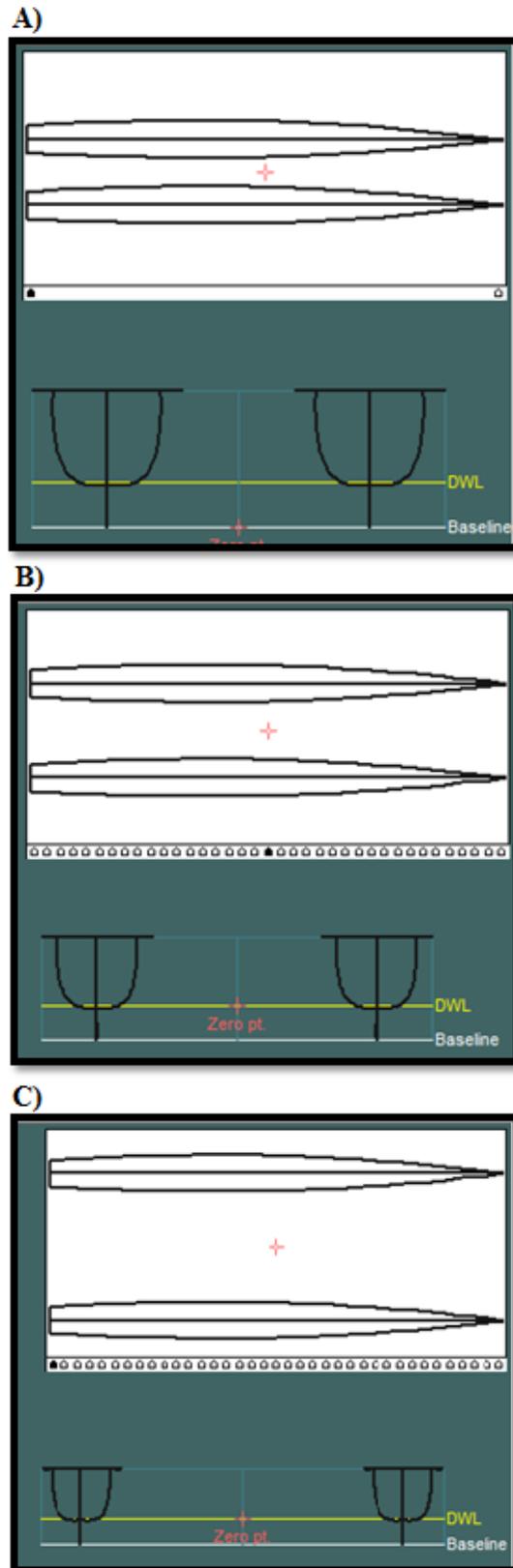
Através da calibração do modelo feito no Rhinoceros® e com o auxílio do MaxSurf Modeler®, passou-se a utilizar o módulo Resistance do programa. Esse por sua vez foi responsável por gerar os resultados de resistência ao avanço utilizando o método Slender Body como citado na seção 4.3.3.

O programa MaxSurf Resistance®, além de gerar as curvas de resistência ao avanço, é capaz de calcular os perfis de ondas geradas pelo casco em regime completamente desenvolvido, os quais podem, eventualmente, serem comparados aos perfis observados nos testes realizados na piscina.

5.1.1.1 VARIAÇÕES PARAMÉTRICAS E DADOS OBTIDOS NO PROGRAMA

Conforme procedimento já descrito, os cascos foram importados com apenas a mudança paramétrica da boca, ou seja, todos os outros parâmetros (calado, trim, banda) foram mantidos os mesmo em todas as configurações analisadas. Os três cascos, com as devidas variações de boca, podem ser vistos na Figura 51.

Figura 51 – A - Boca de 21 cm; B - Boca de 27 cm; C - Boca de 39 cm.



Fonte: O Autor (2016).

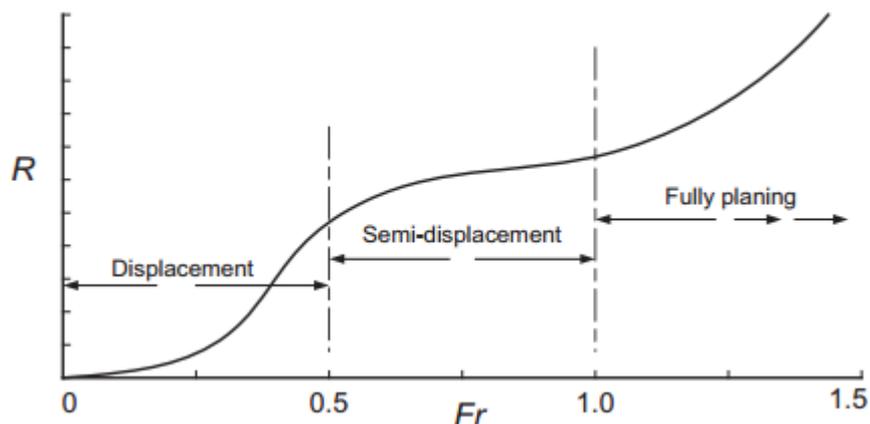
Para cada casco, uma curva de resistência ao avanço e a variação do perfil de ondas foi gerada. A velocidade analisada foi estimada visando os testes em piscina, ou seja, foi escolhido um intervalo que abrangesse a velocidade real da embarcação, mas que também compreendesse pontos de menor velocidade, viáveis de serem reproduzidas nos ensaios. O conjunto de velocidades analisadas é apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 – Velocidades Reais e Velocidades Ensiadas.

Velocidade Real [nós]	Velocidade Modelo [nós]	Nº Fr	Velocidade Real [m/s]	Velocidade Modelo [m/s]
2,0	0,82	0,13	1,0	0,42
3,0	1,23	0,20	1,5	0,63
4,0	1,63	0,27	2,1	0,84
5,0	2,04	0,34	2,6	1,05
6,0	2,45	0,40	3,1	1,26
7,0	2,86	0,47	3,6	1,47
8,0	3,27	0,54	4,1	1,68
8,5	3,47	0,57	4,4	1,78
9,0	3,67	0,60	4,6	1,89
9,5	3,88	0,64	4,9	1,99
11,0	4,49	0,74	5,7	2,31
14,0	5,72	0,94	7,2	2,94

Fonte: O Autor (2016).

Figura 52 – Valores de Froude para Embarcações Deslocantes, Semi-deslocantes e Planantes.



Fonte: Molland (2011).

O catamarã estudado é uma embarcação, que em sua velocidade de cruzeiro apresenta um regime semi-deslocante e antes disso deslocante. Segundo a Figura 52 o número de Froude para esse tipo de embarcação varia de 0 a 1. A Tabela 9 apresenta o número de Froude para

cada velocidade testada e pode-se perceber que esse número está dentro dos limites estabelecidos para esse tipo de embarcação.

Com essa velocidade foram geradas curvas de resistência ao avanço para cada casco e no mesmo teste, pode-se verificar o perfil de ondas geradas. A Tabela 10 e as Figura 53, Figura 54 e Figura 55, apresentam os resultados para cada variação paramétrica obtida na análise computacional. No APÊNDICE C podem ser verificadas as curvas que representam a Tabela 10. As figuras citadas apresentam os perfis de onda no pico de máximo coeficiente de resistência de onda, que se dão em velocidades próximas, mas isso será discutido em seções futuras de análise.

Tabela 10 – Resistência ao Avanço para Cada Variação Paramétrica.

Velocidade [nós]	Resistência ao Avanço Boca = 21 cm	Resistência ao Avanço Boca = 27 cm	Resistência ao Avanço Boca = 39 cm
0,20	0,01	0,01	0,01
0,41	0,03	0,03	0,03
0,61	0,06	0,06	0,06
0,82	0,09	0,09	0,09
1,02	0,13	0,13	0,13
1,23	0,18	0,18	0,18
1,43	0,25	0,24	0,24
1,63	0,31	0,31	0,31
1,84	0,39	0,39	0,38
2,04	0,47	0,47	0,47
2,25	0,61	0,61	0,61
2,45	0,78	0,78	0,76
2,65	0,95	0,93	0,89
2,86	1,10	1,07	1,02
3,06	1,23	1,19	1,15
3,27	1,36	1,31	1,27
3,47	1,48	1,43	1,40
3,67	1,60	1,55	1,54
3,88	1,72	1,68	1,68
4,08	1,85	1,83	1,82
4,29	1,99	1,98	1,98
4,49	2,14	2,13	2,14
4,70	2,30	2,30	2,31
4,90	2,47	2,47	2,49
5,10	2,64	2,65	2,67

Fonte: O Autor (2016).

Figura 53 - Perfil de Onda Modelo B=21 cm.

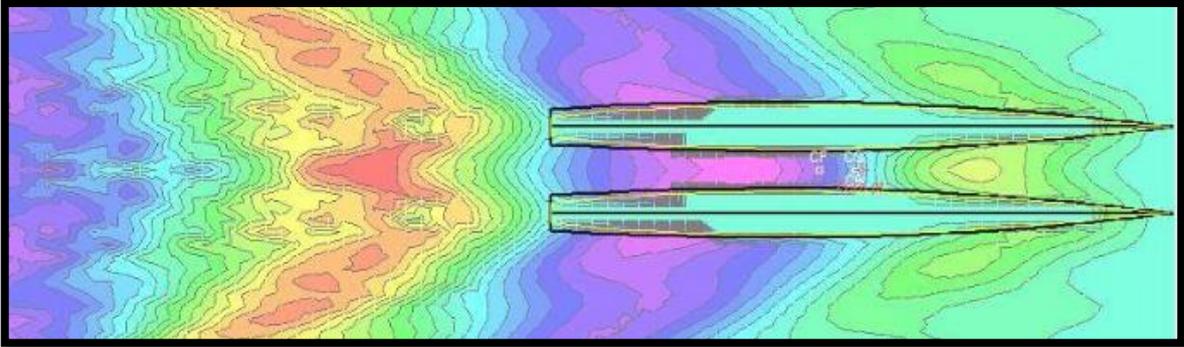


Figura 54 - Perfil de Onda Modelo B=27 cm.

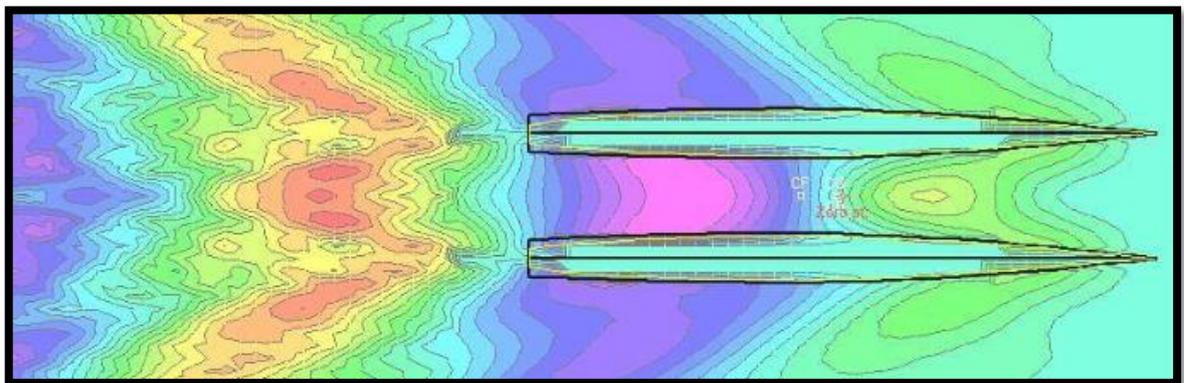
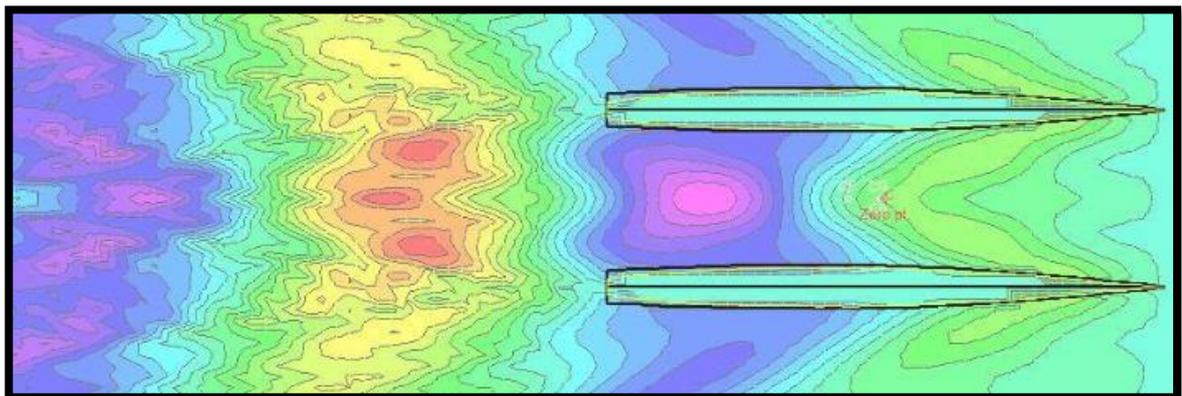


Figura 55 – Perfil de Onda Modelo B=39 cm.



Fonte: O Autor (2016).

8.1.2 RESULTADOS OBTIDOS NOS TESTES REALIZADOS EM PISCINA

O catamarã Babitonga navega com uma velocidade máxima de 11 nós que transpassadas para o modelo utilizando o fator de escala presente na Tabela 1 resultam em 4,5 nós ou 2,31 m/s. Essa foi a referência de velocidade para os testes iniciais. Pode-se pensar com isso, que essa velocidade não é a ideal para serem feitos os testes, porém será exibido em seções futuras que a velocidade dos testes, acima de um certo valor, não influi nos resultados ou gera variações de erro entre uma velocidade e outra muito próximas. Adotou-se para os testes uma distância padrão de 2 metros para fazer as medições (seção 4.3.7).

5.1.1.2 ENSAIOS REALIZADOS VARIAÇÃO DA BOCA

A partir da velocidade dos testes definida, partiu-se para a determinação da massa que deveria ser solta do poste, para que fossem coletados os tempos de corrida em uma distância pré-estabelecida. Buscou-se no MaxSurf Resistance® a resistência ao avanço, essa apresentada em newtons e convertida em gramas, que correspondia a velocidade proposta, essa com o fator de escala já aplicado, para a realização dos testes. A partir dessa massa mais a força adicional causada pela força de atrito resultante das polias (25 g), o modelo foi calibrado. A Tabela 11 apresenta esses dados para cada distância entre cascos.

Tabela 11 – Parâmetros do Primeiro Teste.

	Distância Percorrida [m]	Resistência ao Avanço [N]	Resistência ao Avanço [g]	Força de Atrito [g]
Modelo / Boca 21 cm	2	2,15	219	25
Modelo / Boca 27 cm	2	2,14	218	25
Modelo / Boca 39 cm	2	2,15	219	25

Fonte: O Autor (2016).

Iniciaram-se os testes com o modelo calibrado na menor boca (21 cm) e assim sucessivamente até a boca máxima. A Tabela 12 apresenta as médias de tempo obtidas para

cada variação paramétrica assim como a velocidade alcançada e no APÊNDICE B, podem ser verificados todos os tempos que resultaram essa média.

Tabela 12 – Média de Velocidade e Tempo para cada Variação Paramétrica.

Distância Entre Meios Cascos [cm]	Tempo Médio [s]	Desvio Padrão Médio [s]	Velocidade Média [m/s]
14	1,46	0,05	1.37 ± 0.05
20	1,44	0,02	1.39 ± 0.02
32	1,44	0,03	1.39 ± 0.03

Fonte: O Autor (2016).

Pode-se notar pela Tabela 12 que os desvios padrões de cada bateria de tomada de tempo não chega a 1 décimo de segundo, o que em termos dos testes realizados são excelentes valores. Nessa mesma tabela, pode-se notar que as velocidades ficaram muito próximas umas das outras, porém, longe do esperado de 2,31 m/s, um erro de aproximadamente 40% nos três casos. Analisando essa tabela, determinou-se que esse padrão entre cascos seria o mesmo em todas as velocidades, pois as variações encontram-se dentro do desvio padrão da medida.

Eventualmente, em função da interferência de ondas descritas na fundamentação teórica, essa influência pode ser maior para outras velocidades. No entanto, a realização dessa análise implicaria em uma matriz de experimentos consideravelmente maior, que foge ao escopo deste trabalho.

5.1.1.3 TESTES REALIZADOS COM A VARIAÇÃO DA MASSA E COM A PRESERVAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE CASCOS

Após a coleta de dados para o teste preliminar, partiu-se para a coleta de tempo com o modelo calibrado com uma boca de 39 cm, a maior que fora testada anteriormente. Para esses testes, fez-se o uso da conversão de força em newton para gramas de 13 valores correspondentes a resistência ao avanço apresentada pelo MaxSurf Resistance® e adicionadas a essas massas a massa equivalente à força de atrito (25g), conforme pode ser visto na 13, porém como essa

resistência a mais não faz parte dos resultados, ela não foi levada em consideração na construção dos gráficos que serão apresentados.

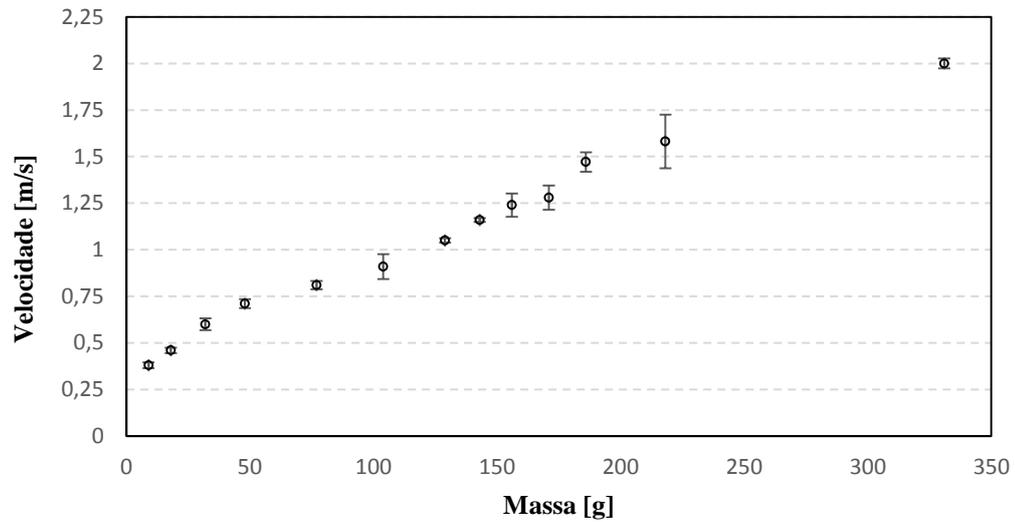
Tabela 13 – Massas Utilizadas nos Testes.

Massa de arrasto [g]	Massa de atrito do sistema [g]	Massa total usada no ensaio [g]
9	25	34
18	25	43
32	25	57
48	25	73
77	25	102
104	25	129
129	25	154
143	25	168
156	25	181
171	25	196
186	25	211
218	25	243
331	25	356

Fonte: O Autor (2016).

Após a calibração iniciou-se os testes, de forma que fossem realizadas de 5 a 15 corridas para cada massa que caia do poste, um total de 105 corridas. Para cada peso, um tempo médio resultante fora encontrado, através desse tempo e da distância pré-estabelecida de 2 metros, a velocidade se torna implícita e a partir dessas, uma curva de velocidade por massa foi gerada, como pode ser vista na Figura 56.

Figura 56 – Velocidade [m/s] x Massa [g].



Fonte: O Autor (2016).

Note que existe um ponto longe da curva principal de testes. Esse ponto foi ensaiado para aferir se a curva seguiria uma tendência linear de crescimento. Essa curva será essencial para a próxima seção, onde serão apresentadas as análises e a comparação entre os resultados numéricos e os ensaios em piscina.

O número de corridas na piscina foi elevado, isso foi necessário para que se aumentasse a precisão dos resultados visando diminuir os erros de leitura.

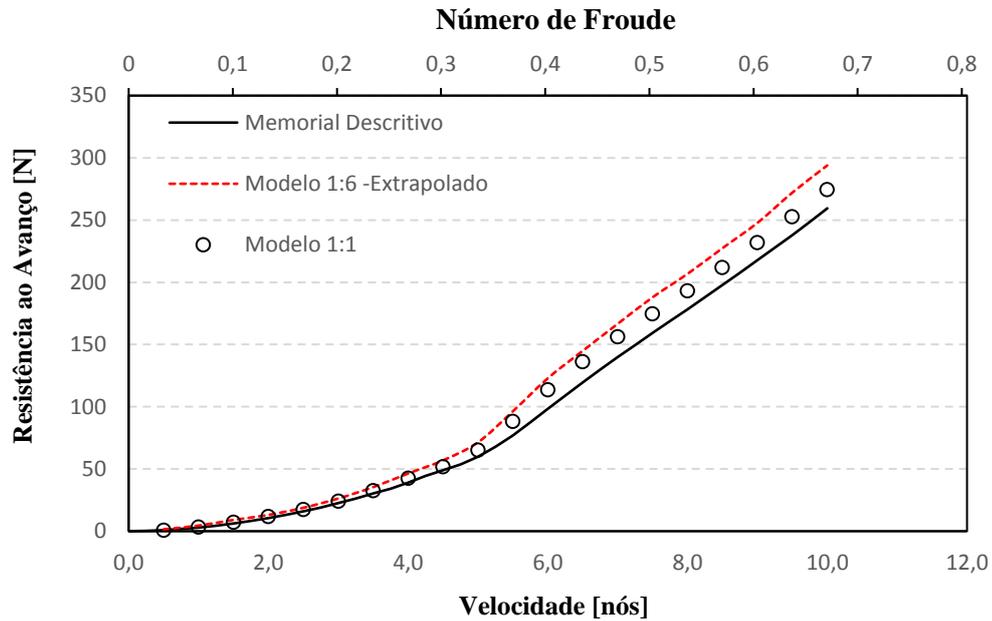
6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Esse capítulo apresenta as principais variações entre os métodos utilizados para obtenção de uma determinada resistência ao avanço, bem como as curvas relacionadas a essa força. As variações obtidas entre os métodos servirão para uma análise mais criteriosa, buscando eventuais fontes das diferenças observadas.

6.1 RESULTADOS DO PROGRAMA MAXSURF®

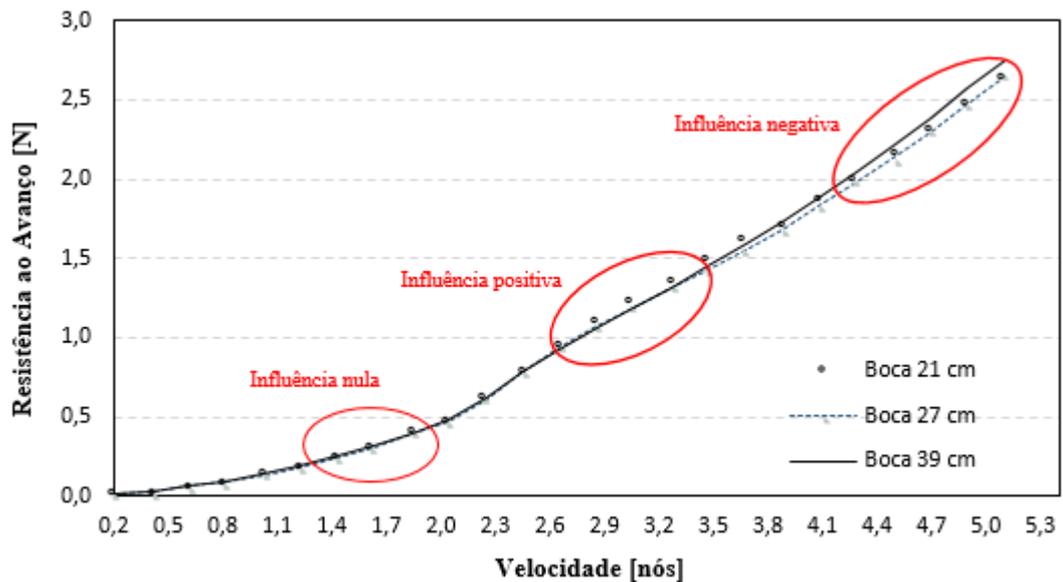
Para iniciar a análise dos resultados numéricos, comparou-se a análise de resistência ao avanço do modelo CAD na escala 1:1 com aquela fornecida no memorial de cálculo disponível no ANEXO B. Conforme pode-se ver na Figura 57, os resultados são rigorosamente os mesmos, indicando que o modelo CAD e o procedimento de análise são coerentes com aqueles disponíveis na literatura. Apenas a título de comparação, a curva pontilhada representa a resistência ao avanço da embarcação em tamanho real, por meio da extrapolação do resultado numérico obtido na simulação do modelo CAD na escala 1:6.

Figura 57 – Comparação da Resistência ao Avanço Numérica na Escala 1:1.



O parâmetro estudado na análise numérica feita com MaxSurf Resistance®, foi a variação da boca da embarcação. A mudança desse parâmetro mostrou que a diferença de uma curva para a outra foi de menos de 0,04 newton, apenas para número de Froude maiores que 0,8 essa variação aumenta para quase 0,1 N. A Figura 58 apresenta as curvas e pode-se observar a proximidade entre elas.

Figura 58 – Curvas de Resistência ao Avanço x Velocidade.

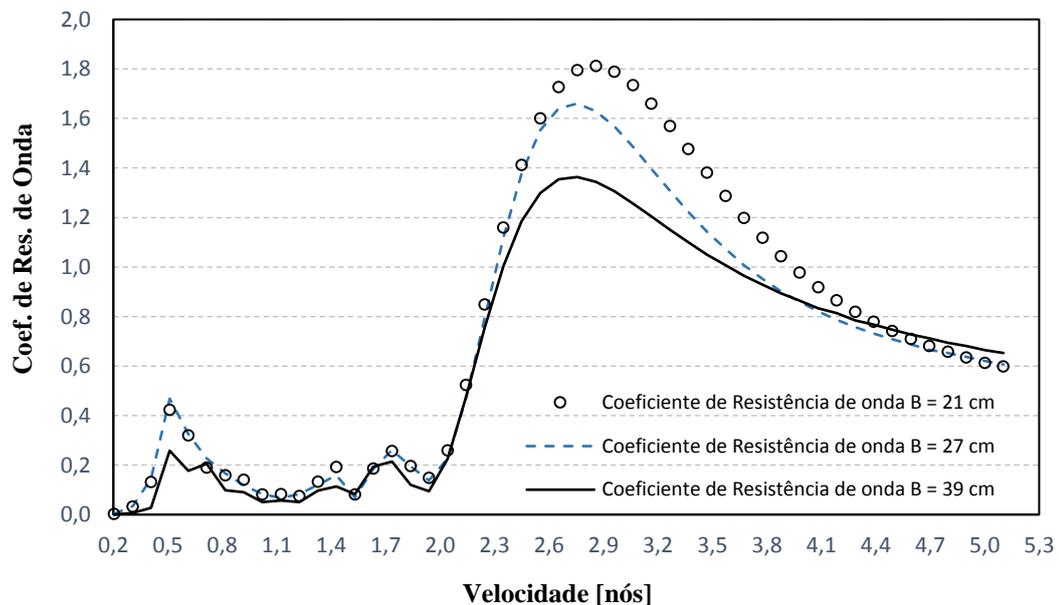


Fonte: O Autor (2016).

Pode-se notar que a primeira diferença entre as curvas ocorre aproximadamente na velocidade de 3,1 nós e a resistência do modelo com boca de 21 cm é maior que a resistência do modelo com boca de 39 cm, porém, após esse pequeno pico, a resistência ao avanço do modelo com boca de 39 cm começa a aumentar em relação as outras duas. A curva do modelo com 27 cm de boca é idêntica a curva do modelo com 21 cm de boca.

Essa variação pode ser explicada pela interferência de onda que um casco gera no outro. Esse fenômeno é explicado pela parcela de resistência de onda. A Figura 59 apresenta as curvas de variação de coeficiente de resistência de onda em função da velocidade do modelo.

Figura 59 – Curvas de Coeficiente de Resistência de Onda pela Velocidade [nós]



Fonte: O Autor (2016).

Pode-se notar que a curva do modelo de 39 cm de boca apresenta um menor coeficiente de resistência de onda no seu pico máximo em relação as outras curvas, o que implica em uma menor resistência de onda em relação a elas. Esse pico máximo corresponde ao ponto de encontro das ondas geradas pelos cascos. O modelo com boca de 39 cm contém a maior distância entre cascos por isso essa interferência é menor, fazendo com que, por consequência, esse coeficiente de resistência de onda seja menor, conforme pode ser visto nas figuras da seção 5.1.1.1. Nota-se também que a faixa de velocidade que isso ocorre é a mesma em que ocorre a

variação da resistência ao avanço da Figura 58 anterior, explicando a variação da força de arrasto.

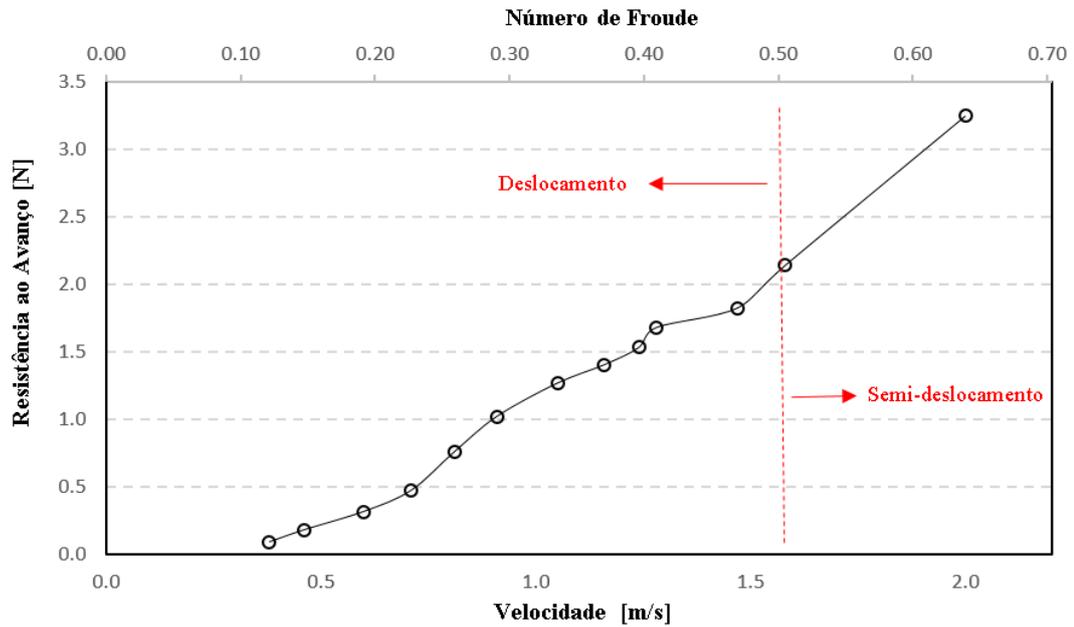
A faixa de velocidade analisada é a mesma que, quando extrapolada para o casco real corresponde as velocidades de operação da embarcação. Porém, se forem feitas análises com uma velocidade maior, o modelo com boca de 39 cm aumenta a resistência ao avanço em relação as outras curvas. A análise completa pode ser verificada no APÊNDICE C, junto com a tabela de resistência ao avanço.

6.2 COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS

Notou-se que a diferença entre um teste e outro não apresentava grande variação (seção 5.1.1.3), com isso, escolheu-se um modelo que melhor representasse o catamarã Babitonga, por isso, fez-se a escolha do modelo com 39 cm de boca, medida que, quando extrapolada, mais se aproxima da geometria real utilizada pela equipe

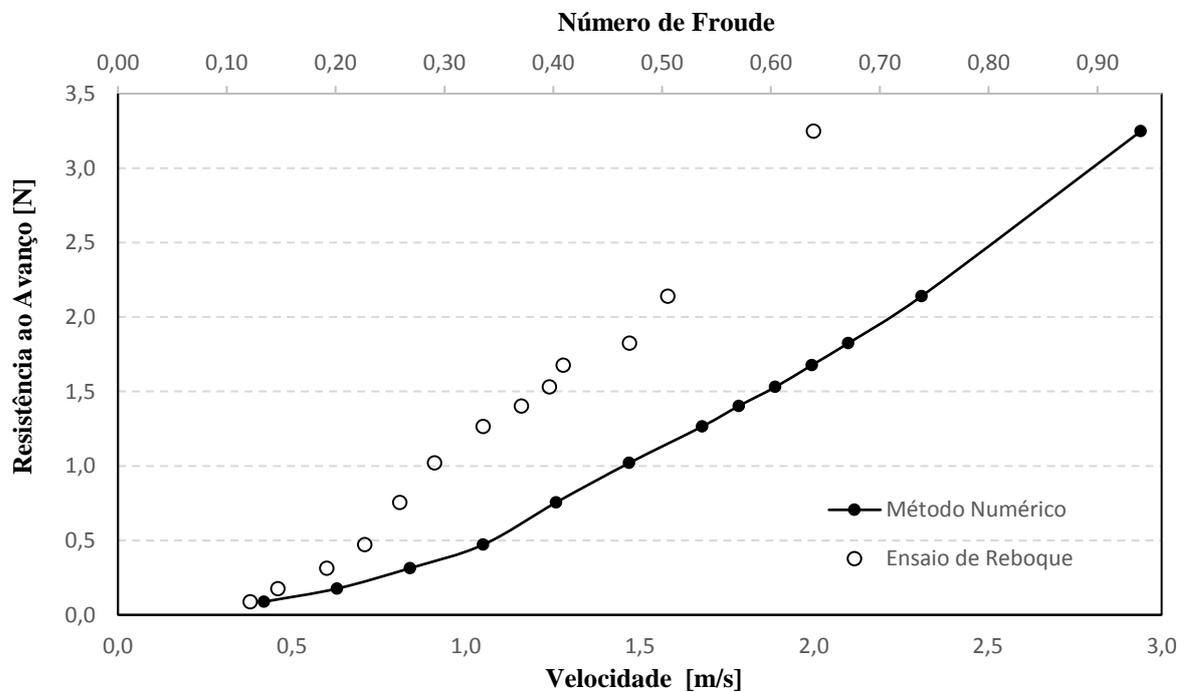
Fizeram-se testes em piscina com esse modelo para poder se encontrar uma curva que pudesse ser comparada com a obtida na análise numérica realizada. Essa curva foi encontrada utilizando-se as mesmas resistências ao avanço encontradas na análise numérica, porém convertidas em massa, incluindo a massa perdida no atrito do sistema. O resultado do ensaio é então convertido na tradicional curva de resistência ao avanço, a qual é mostrada na Figura 60 e pode ser verificado na Figura 52, onde são indicadas as regiões de deslocamento e semi-deslocamento.

Figura 60 – Curva experimental de resistência ao avanço. Escala 1:6



Fonte: O Autor (2016).

Figura 61 – Comparação entre método numérico e ensaio: escala 1:6



Fonte: O Autor (2016).

Analisando o gráfico, nota-se que as curvas seguem um padrão linear, porém com uma diferença entre elas, essa diferença não é tão visível nos primeiros testes, porém com o aumento da resistência, essa diferença aumenta. A Tabela 14 apresenta essa discrepância em porcentagem.

Tabela 14 – Erro Associado de uma Curva para Outra.

Velocidade Programa Computacional [m/s]	Velocidade Teste [m/s]	Erro Associado [%]
0,42	0,38	9,5
0,63	0,46	27,0
0,84	0,60	28,6
1,05	0,71	32,4
1,26	0,81	35,7
1,47	0,91	38,1
1,68	1,05	37,5
1,78	1,16	35,0
1,89	1,27	32,8
1,99	1,27	36,3
2,94	2,00	32,0

Fonte: O Autor (2016).

Essa porcentagem cresce aleatoriamente, porém, sempre na mesma grandeza, o que significa que se há erros sistemáticos ocorrendo nos testes, que se propagam por todas as variações de velocidade analisadas.

Os dados obtidos na seção 5.1.1.2 podem ser explicados por essa tabela de erro, como o erro associado de uma curva a outra se propaga linearmente, qualquer velocidade maior que 0,84 m/s que fosse feito o teste traria resultados com essa ordem de grandeza de diferença.

6.3 COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS RESISTÊNCIA

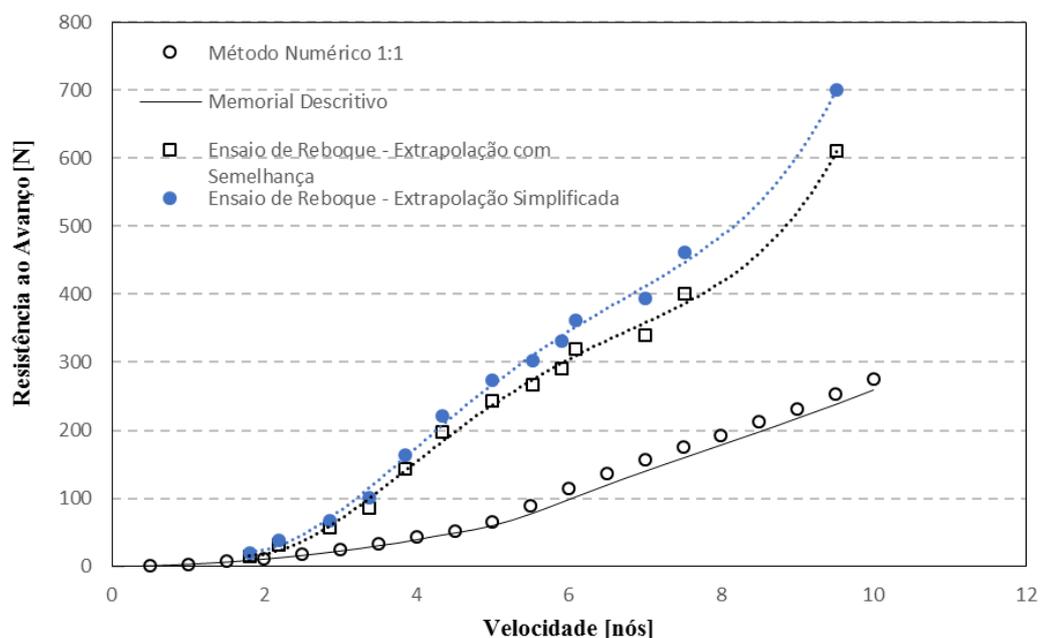
Para análise dos resultados, buscou-se informações sobre o fabricante dos cascos reais, no caso a UFRJ. No memorial apresentado observam-se análises (provavelmente numéricas) do barco em diversos calados, porém o calado do Babitonga não se encontra no memorial fornecido.

Para fins de verificação e comparação, como a embarcação apresenta 14,6 centímetros de calado e na tabela são apresentados valores de 14 cm e 15 cm, interpolou-se para encontrar os dados de resistência referentes ao calado de 14.6 centímetros. O ANEXO B apresenta o memorial descritivo citado, considerando que o casco analisado possui 2,4 metros de boca, assim como o modelo utilizado, quando extrapolado.

Devido as premissas do parágrafo anterior, foi utilizado o modelo de Froude para se determinar a escala do modelo. A Tabela 1 apresenta os parâmetros da análise dimensional, para os casos de relações mecânicas, apresentados nesse trabalho, são utilizados os adimensionais M, L e T, que representam, respectivamente, massa, comprimento e tempo. A partir dessas dimensões são determinadas outras grandezas como, força, densidade e pressão. E também é apresentada na Tabela 1 a proporção de escala utilizada para extrapolação dos resultados e obtenção dessas outras grandezas citadas.

Tabela 1 pode ser verificado que o fator de escala para extrapolação da força é λ^3 , com isso, fez-se a extrapolação dos resultados obtidos no MaxSurf® para o casco com boca de 39 cm e extrapolou-se os resultados com os testes feitos com essa mesma configuração de dimensão. A Figura 62 apresenta as três curvas plotadas cujos resultados são mostrados no APÊNDICE D.

Figura 62 – Curva de Comparação entre os Resultados Reais do Casco Real e Extrapolações Feitas a partir do MaxSurf® e dos Testes.



Fonte: O Autor (2016).

A partir de análise dimensional, é possível obter parâmetros adimensionais como o número de Froude e Reynolds e os coeficientes de resistência da embarcação, como pode ser visto na fundamentação teórica.

Para se extrapolar os resultados obtidos no modelo para a escala real, utilizou-se essas equações de coeficientes, essas compõem cada parcela de resistência ao avanço que circunda o casco. Como não há apêndices e nenhuma outra força agindo no casco, além da friccional e de onda, para a extrapolação da resistência ao avanço, tendo em vista que essa força já era conhecida para o modelo, utilizou-se as equações 12, 13, 14 e 15. (MOLLAND, 2011).

$$R_T = R_W + R_F \quad (12)$$

$$R_F = (1 + \beta K) \frac{\rho A_m V^2}{2} C_F \quad (13)$$

Pela lei de Froude o coeficiente de onda do modelo e do casco real são os mesmos, logo,

$$C_{W_s} = C_{W_m} \quad (14)$$

Logo,

$$R_{W_s} = R_{W_m} * \lambda^3. \quad (15)$$

Como a resistência total do modelo era conhecida, utilizou-se a equação 13 para encontrar a força friccional do modelo e com isso, igualando na equação 12, determinou-se a resistência de ondas. Com essa resistência de ondas determinada, calculou-se a parcela friccional em escala real e igualou-se na resistência total com a soma da resistência de onda encontrada anteriormente e assim se determinou a resistência total do casco real.

Além da regressão numérica, pode-se usar o fator de escala direto para se obter os resultados extrapolados para o casco real, porém essa extrapolação só pode ser feita se há semelhança dinâmica, ou seja, número de Reynolds da escala real igual ao do modelo. No trabalho em questão apenas o número de Froude é igual entre os dois, logo não há semelhança dinâmica completa. Isso se dá pelo fato de que o fator de escala cúbico representa os fenômenos

potenciais do escoamento e não os friccionais. Para se fazer a extrapolação, é usado esse fator cúbico adicionado do cálculo da resistência friccional por meio das equações empíricas. (ITTC, 1957). A equação 16 apresenta como deve ser feita a extrapolação com as duas parcelas.

$$R_{T_s} = \lambda^3 R_{w_m} + (1 + \beta k) \frac{\rho A_{m_s} V_s^2}{2} C_{F_s} \quad (16)$$

Nota-se que existe uma diferença entre as curvas no gráfico, porém essa diferença entre as curvas segue uma mesma tendência de crescimento, isso não pode ser percebido nitidamente em valores menores. No entanto, a partir da velocidade de 5 nós as curvas começam a se separar. A curva com marcadores quadrados apresenta os resultados obtidos pela UFRJ para o casco real, a partir dela nota-se que a curva com marcadores retangulares tem tendência a se afastar em velocidades maiores, isso está associado ao fator de escala que quando há uma pequena diferença associada a curva do modelo, ela se propaga elevada ao cubo, devido a extrapolação realizada. Já a curva com marcadores amarelos, além de possuir esse erro associado a extrapolação do modelo para o real, ocorre que também há a propagação dos erros cometidos nos testes, fazendo com que ela permaneça com a mesma tendência das anteriores, porém com uma menor inclinação.

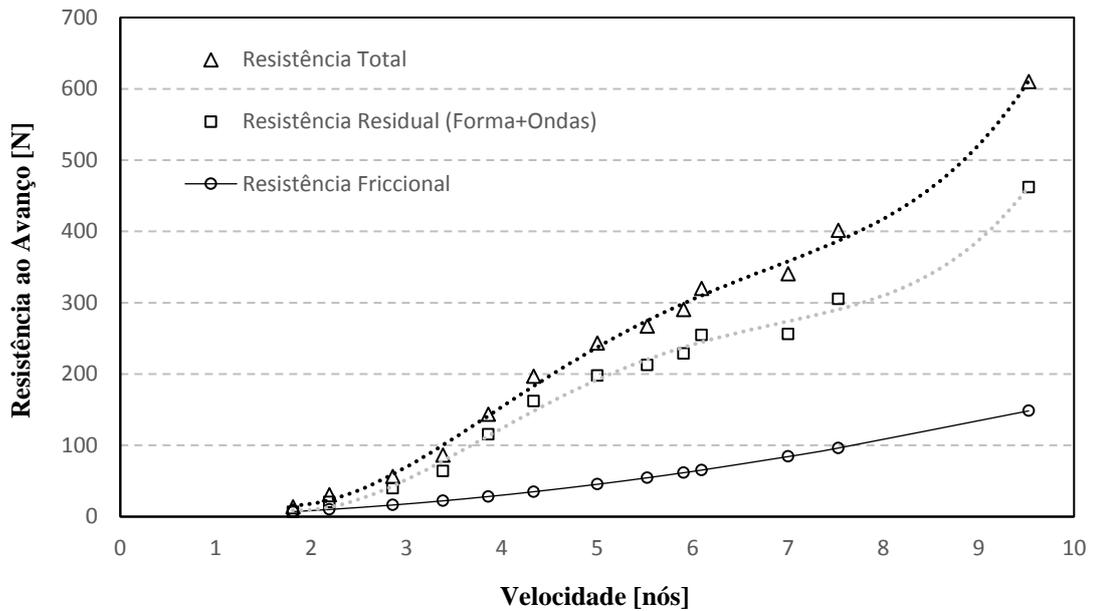
Outra fonte de erro que pode ter acarretado essa diferença pode estar atrelada ao coeficiente de forma do MaxSurf que é um valor empírico. Esse método se baseia em CFD para expressar os resultados das análises numéricas, não apresentando as reais forças atuantes no casco. Por isso esse fator não corresponde ao real, fazendo com que as curvas fiquem distanciadas umas das outras. A ordem de grandeza dos resultados faz com que qualquer leve mudança de parâmetros distancie uma curva da outra.

Utilizou-se o atrito estático nos ensaios, pois após uma análise criteriosa, notou-se que a relação entre esse atrito e o atrito dinâmico era pouco significativo, sendo assim, não interferiam na curva de resistência ao avanço.

Por fim, a partir do resultado experimental, é possível, usando hipóteses empíricas, analisar as diferentes componentes da resistência ao avanço. A partir da resistência total, é possível, utilizando a equação 1, proposta pela ITTC 1957, estimar a resistência friccional atuante durante o ensaio. Ao se descontar a resistência friccional da resistência total, encontra-se a soma da parcela de pressão viscosa (forma) e a parcela devido a formação de ondas. As

diferentes componentes da resistência ao avanço extrapoladas para a escala real, podem ser vistas na Figura 63.

Figura 63 – Componentes da resistência ao avanço obtidas no ensaio de reboque e extrapoladas para a escala 1:1.



Fonte: O Autor (2016).

6.4 FONTES DE ERROS

As fontes de erros relacionadas a experimentos podem estar nos pequenos detalhes que são desconsiderados no momento da realização dos testes. Algumas fontes só são percebidas quando é feita a análise dos dados. Essa seção tenta identificar as principais fontes de erros envolvidas no experimento e busca soluções para minimizá-las em estudos futuros dessa natureza. Para o estudo feitos, identificou-se fontes de erros em três ambientes, ou três equipamentos.

6.4.1 MODELO

O primeiro foi a calibração do catamarã. As dimensões relativamente pequenas, podem ter causado algumas incertezas. A principal delas é no nivelamento proa/proa, popa/popa, notou-se que qualquer calibração fora do esquadro definido inicialmente fazia com que os cascos se desalinhassem. Isso poderia acontecer com facilidade, pois para cada variação de boca, o modelo deveria ser novamente calibrado, o que foi minimizado nos testes de obtenção da curva de resistência com o modelo de boca 39 cm.

Para resolver esse problema, indica-se que seja feito um molde de fibra de vidro com abas retas nos bordos e desse molde, produzir os dois cascos idênticos, adicionadas às abas chapas de madeira para conferir rigidez ao modelo. Em seguida construir uma ligação que possa ser movida com mais facilidade ou uma ligação específica para cada modelo. Essa melhoria na construção do modelo não implicaria em uma alta mudança no custo, já que a fibra de vidro pode ser adquirida junto a universidade ou uma busca em algum estaleiro que tenha refugos da mesma.

Por fim, recomenda-se um maior controle dimensional na fabricação, acabamento e calibração do modelo.

6.4.2 INSTRUMENTOS PARA REALIZAÇÃO DOS TESTES

O principal instrumento para a realização dos testes foi o poste construído de madeira e que levava as polias fixadas nos seus extremos. Notou-se que o equipamento sofria o fenômeno de pêndulo por ter sido projetado com uma madeira de baixa rigidez, isso ocorreu, pois, o preço do material para confeccionar o poste era elevado e fora utilizado madeiras de refugio encontradas na universidade. Isso fazia com que na hora da realização dos testes precisasse de uma pessoa para segurar essa madeira, porém como o tempo de realização dos testes fora elevado, nem sempre o poste permanecia reto, sofria oscilações, de acordo com o vento ou com os movimentos da pessoa que segurava.

Para minimizar essa fonte de erro, sugere-se que para experimentos futuros seja utilizado um ambiente que contenha algum tipo de poste fixo ou algo que possa ser utilizado

para prender a polia a uma certa distância do chão. A construção de um poste de madeira pode tornar o experimento caro, por isso não é indicado.

6.4.3 AMBIENTE DE REALIZAÇÃO DOS TESTES

Os testes foram realizados ao ar livre, com interferência de fenômenos naturais, isso pode ter sido uma das principais fontes de erro que pode ser identificada, já que o modelo apresentava um baixo peso, de apenas 1400 gramas. Notou-se em alguns testes que a força do vento fazia com que a água ficasse muito agitada e o modelo respondia a essa interferência gerada pelas ondas.

As principais recomendações para próximos trabalhos é que seja pesquisado com antecedência uma localização para realização dos testes, buscando perceber qualquer interferência que possa acontecer de agentes externos. O ideal é que o experimento seja feito em um tanque de prova, onde esses agentes podem ser controlados e assim minimizar os erros causados por esse tipo de situação.

7. CONCLUSÕES

Apresentou-se neste trabalho um procedimento para a realização de ensaios de reboque simplificados visando a determinação da resistência ao avanço de embarcações usando modelos em escala reduzida.

Ao longo do texto foram descritos o processo de modelagem do casco, o uso de simulações para a determinação de valores iniciais para montagem e calibração do modelo, a escolha do fator de escala, a construção do modelo e a realização dos experimentos.

Utilizando a metodologia proposta, foi possível estimar a curva de resistência ao avanço de um modelo em escala reduzida do casco da embarcação solar da equipe Babitonga, foram conduzidas análises numéricas e experimentais seguindo o procedimento proposto.

Devido às limitações e simplificações adotadas na metodologia proposta, as conclusões obtidas necessitam de estudos mais aprofundado para serem confirmadas. No entanto, os resultados sugerem algumas conclusões iniciais, as quais serão discutidas a seguir.

Os testes mostraram que a variação da boca possui baixa influência na resistência ao avanço da embarcação. Ou seja, não há, dentro das possibilidades do regulamento da competição, uma dimensão que faça o catamarã ser mais eficiente. No entanto, é importante observar que a resistência ao avanço do modelo com boca máxima é ligeiramente menor em alguns pontos da curva, fazendo com que ele seja mais indicado ao uso.

É interessante observar que a distância entre cascos (boca da embarcação) influencia na interferência construtiva e destrutiva que ocorre entre os padrões de onda gerados por cada um dos cascos separadamente. Assim, além da resistência ao avanço, deve-se analisar o padrão de ondas ao longo da embarcação, buscando outras características importantes, tais como o alinhamento do escoamento na região do propulsor.

A velocidade de cruzeiro é a que mais importa para o catamarã Babitonga, visto que essa será utilizada na maior parte do tempo de navegação. Verificou-se que ao se utilizar uma boca de 39 cm, a velocidade ótima (com maior interferência destrutiva dos padrões de onda)

está na faixa de 7 a 7,5 nós, quando extrapolada para a escala real. Essa é justamente a faixa de velocidade de serviço atualmente utilizada pela equipe Babitonga.

Por fim, constatou-se que muito parâmetros afetam a qualidade das grandezas medidas tanto na simulação numérica, quanto nos experimentos em tanque de provas. Assim, como trabalhos futuros, recomenda-se aprofundar a pesquisa, refinando o procedimento proposto de forma a mitigar os problemas encontrados.

REFERÊNCIAS

ARTMANN JUNIOR, André Luiz. **Estudo sobre a aplicação de um hidrofólio em uma embarcação de apoio offshore: abordagem experimental simplificada.** 2015. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Centro de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.

BABITONGA, Equipe (Org.). **Entrevista à equipe Babitonga.** 2014. Disponível em: <<https://desafiosolar.wordpress.com/equipes-2/equipe-babitonga/>>. Acesso em: 02 out. 2015.

Desafio Solar Brasil (DSB). Comissão Técnica do. **Regras do desafio solar brasil.** 2015. Disponível em: <<https://desafiosolar.files.wordpress.com/2015/07/regras-do-desafio-solar-brasil-2015.pdf>>. Acesso em: 02out2015.

EQUIPE VENTO SUL (Santa Catarina). Barco Solar Ufsc. **Plano de Linhas.** Florianópolis: N/a, 2009. 1 p.

GARCIA, Edgard Enrique Mulford. **Procedimento para determinação experimental de carregamentos externos para o projeto estrutural de uma plataforma Semi Submersível.** 2014. 194 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Naval e Oceânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

MOLLAND, Anthony F. **The maritime engineering: a guide to ship design, construction and operation.** Oxford: Elsevier, 2008.

MOLLAND, Anthony F.; TURNOCK, Stephen R.; HUDSON, Dominic A. **Ship Resistance and Propulsion: PRACTICAL ESTIMATION OF SHIP PROPULSIVE POWER.** New York: Cambridge, 2011.

APÊNDICE A – Tempo gasto para fabricação e custos relacionados a ela.

Tempo gasto na construção do modelo e equipamentos para o experimento.

O modelo foi desenvolvido em programa computacional e o seu processo de construção foi feito em laboratório e no local dos testes, a Tabela A 1 apresenta o tempo gasto para a construção dos modelos testados e do modelo utilizado para realização dos testes, a Tabela A 2 apresenta o tempo gasto para a instrumentação do modelo e sua calibração e a Tabela A 3 apresenta o tempo para a construção de instrumentos para os testes.

Tabela A 1 - Tempo para Construção dos Modelos.

	Construção do casco no Rhinoceros	Corte das Balizas	Corte das Longarinas	Construção do Picadeiro	Preenchimento com PU	Lixa	Emassar	Pintura	Polimento	Total
Casco 1	30 horas	6 horas	10 minutos	0	30 minutos	0	0	0	0	36:30 horas
Casco 2	0	4 horas	15 minutos	2 horas	5 horas	2 horas	30 minutos	30 minutos	15 minutos	14:30 horas
Cascos 3 e 4	0	8 horas	40 minutos	3 horas	8 horas	6 horas	2 horas	4 horas	20 minutos	32 horas

Fonte: O Autor (2016)

Tabela A 2 – Tempo para Instrumentação e Calibração do Modelo.

Construção das Hastes e Tubos de Madeira	Traçar o Calado
30 horas	20 horas

Fonte: O Autor (2016)

Tabela A 3 – Tempo para Construção dos Instrumentos para o Experimento

Poste de Madeira
7 horas

Fonte: O Autor (2016)

Tempo gasto para realização dos testes.

Os testes foram feitos em 6 dias e toda vez que os equipamentos eram montados, a calibração tinha de ser refeita, esse tempo leva em consideração todos os imprevistos que por alguma eventualidade ocorreram no meio da realização dos testes, a Tabela A 4 apresenta os tempos utilizados em cada etapa do processo.

Tabela A 4 – Tempo para Realização dos Testes

Instrumentação	Calibração	Testes
6 horas	10 horas	20 horas

Fonte: O Autor (2016)

Custos relacionados a confecção dos cascos e instrumentação para os testes

O custo relacionado ao desenvolvimento dos cascos, incluindo os testes feitos na construção, é apresentado na Tabela A 5.

Tabela A 5 – Custos Totais para Desenvolvimento dos Experimentos.

	Custo
Madeira	R\$ 0,00
PU Expanssível	R\$ 27,00
Massa para Emassar	R\$ 32,00
Lixa	R\$ 4,00
EPI	R\$ 5,00
Cola Superciana	R\$ 30,00
Tinta	R\$ 35,00
Equipamentos Gerais*	R\$ 50,00
Total	R\$ 183,00

**parafusos, porcas, arruelas, polias, mão francesa*

Fonte: O Autor (2016)

APÊNDICE B – Tempos obtidos em teste para obtenção das velocidades.

Os testes realizados mediram o tempo para o modelo percorrer 2 metros com uma massa caindo do poste, esse esquema foi padrão para todo experimento. Obtiveram-se tempos em duas etapas, uma no primeiro teste outra no segundo teste.

Primeiro Teste

No primeiro teste foram encontradas 3 velocidades médias de acordo com a média dos tempos encontrados nos ensaios com a variação da boca para as três situações, alguns tempos ficaram fora da média, por isso não foram considerados para obtenção dessa média. Foram feitos números aleatórios de corridas para cada configuração do modelo, com bocas de 21, 27 e 39 cm. A Tabela B 1 apresenta esses tempos, a velocidade média obtida com os mesmos e os desvios padrões das tomadas de tempo.

Tabela B 1 – Tempos e Velocidade Médias para cada Boca.

Bocas [cm]	21	27	39
	Tempo [s]		
	1,37	1,45	1,43
	1,38	1,44	1,44
	1,49	1,4	1,42
	1,5	1,45	1,51
	1,47	1,45	1,46
	1,41	1,42	1,49
	1,35	1,44	1,43
	1,49	1,39	
	1,4		
	1,5		
	1,46		
Tempo Médio [s]	1,46	1,44	1,44
Velocidade Média [m/s]	1,37	1,39	1,39
Média do Desvio Padrão [s]	0,05	0,02	0,03

Fonte: O Autor (2016).

Segundo teste

A segunda bateria de testes realizada foi utilizando uma mesma configuração para o modelo, com boca de 39 cm, porém utilizando os princípios básicos do primeiro teste, foram feitas corridas aleatórias para 11 massas (resistência ao avanço) diferentes, a Tabela B 2 apresenta os tempos com as respectivas velocidades médias.

Tabela B 2 – Tempos e Velocidades Médias em Relação a Massa Adicionada ao Sistema.

Massa [g]	9	18	32	48	77	104	129	143	156	171	331
	Tempo [s]										
	5,46	4,37	3,24	2,78	2,48	2,36	1,91	1,75	1,63	1,5	1,02
	5,17	4,4	3,68	2,78	2,48	2,31	1,91	1,71	1,61	1,75	1,01
	5,21	4,22	3,54	2,95	2,43	2,28	1,92	1,71	1,44	1,48	1
	5,38	4,35	3,56	2,98	2,44	2,63	1,9	1,73	1,39	1,71	0,98
	5,28	4,35	3,73	2,74	2,37	2,17	1,97	1,72	1,53	1,56	1,01
	4,99	4,35	3,58	2,81	2,49	2,26	1,9		1,63	1,6	0,99
	5,39	4,69	3,33	2,89	2,65	2,11	1,91				
	4,82	4,68	3,7	2,88	2,48	2,05					
	4,98	4,38	3,33	2,87	2,43	1,97					
	5,34	4,6	3,23	2,64	2,44	2,03					
	5,21	4,33	3,34	2,84		2,14					
	5,33		3,16	2,7		2,24					
	4,92		3,33	2,75							
			3,16								
			3,39								
Tempo Médio [s]	5,21	4,37	3,34	2,81	2,46	2,21	1,91	1,72	1,57	1,58	1,01
Velocidade Média [m/s]	0,38	0,46	0,60	0,71	0,81	0,91	1,05	1,16	1,27	1,27	1,99
Desvio Padrão do Tempo [s]	0,20	0,14	0,19	0,09	0,07	0,17	0,02	0,02	0,09	0,10	0,01

Fonte: O Autor (2016).

APÊNDICE C – Curvas representativas da Tabela 10

As Figuras C1, Figura C 2 e Figura C 3 apresentam as curvas que representam a Tabela 10 da seção 5.1.1.1 VARIACÕES PARAMÉTRICAS E DADOS OBTIDOS NO PROGRAMA).

Figura C 1 - Curva de Resistência ao Avanço x Velocidade à Boca 21 cm.

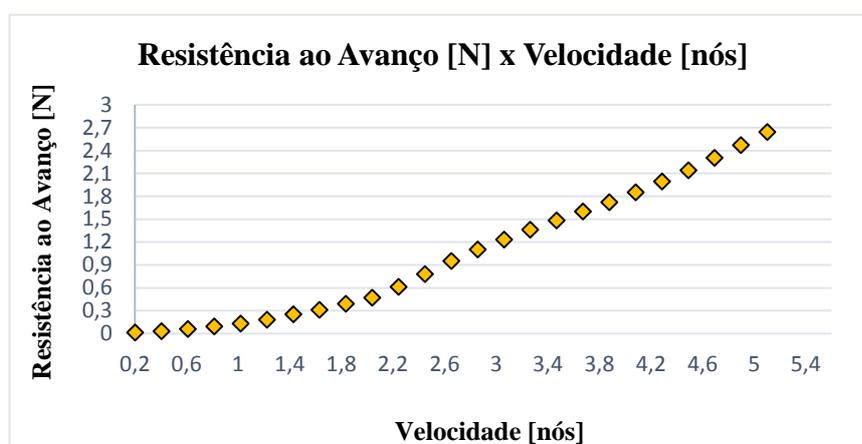


Figura C 2 - Curva de Resistência ao Avanço x Velocidade à Boca 27 cm

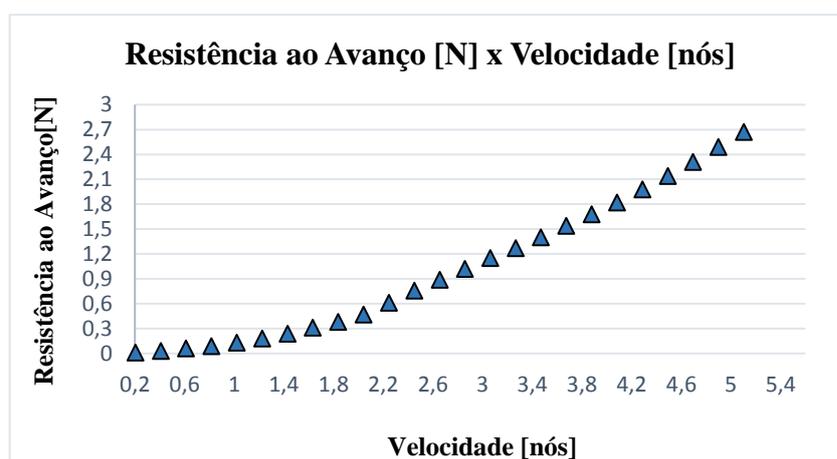
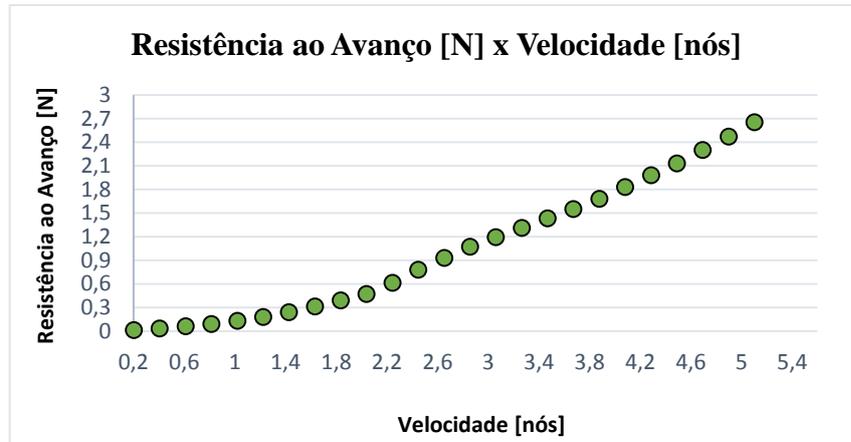


Figura C 3 - Curva de Resistência ao Avanço x Velocidade à Boca 39 cm

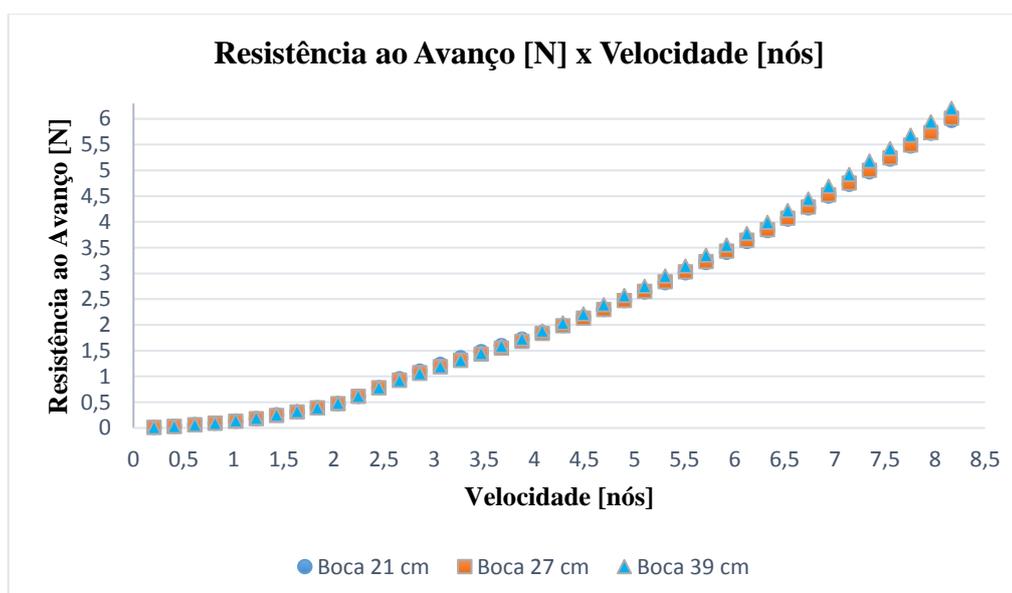


Fonte: O Autor (2016).

APÊNDICE D – Curva de resistência ao avanço contendo as velocidades até 8,165 nós e tabela com valores correspondentes.

A curva de resistência ao avanço apresentada na seção 6.1 RESULTADOS DO PROGRAMA MAXSURF®) apresenta velocidades de até 5,1 nós, pois, se extrapolado, esse valor é de 12,5 nós e o catamarã Babitonga com essas configurações não atinge velocidades acima disso, porém para fins de conhecimento e análise, a Figura D 1 apresenta a análise completa feita, sendo que a velocidade máxima utilizada no programa computacional para o modelo foi de 8,165 nós, o que equivale a 20 nós se extrapolado utilizando o fator de escala λ .

Figura D 1- Curva de Resistência ao Avanço do Modelo Completa.



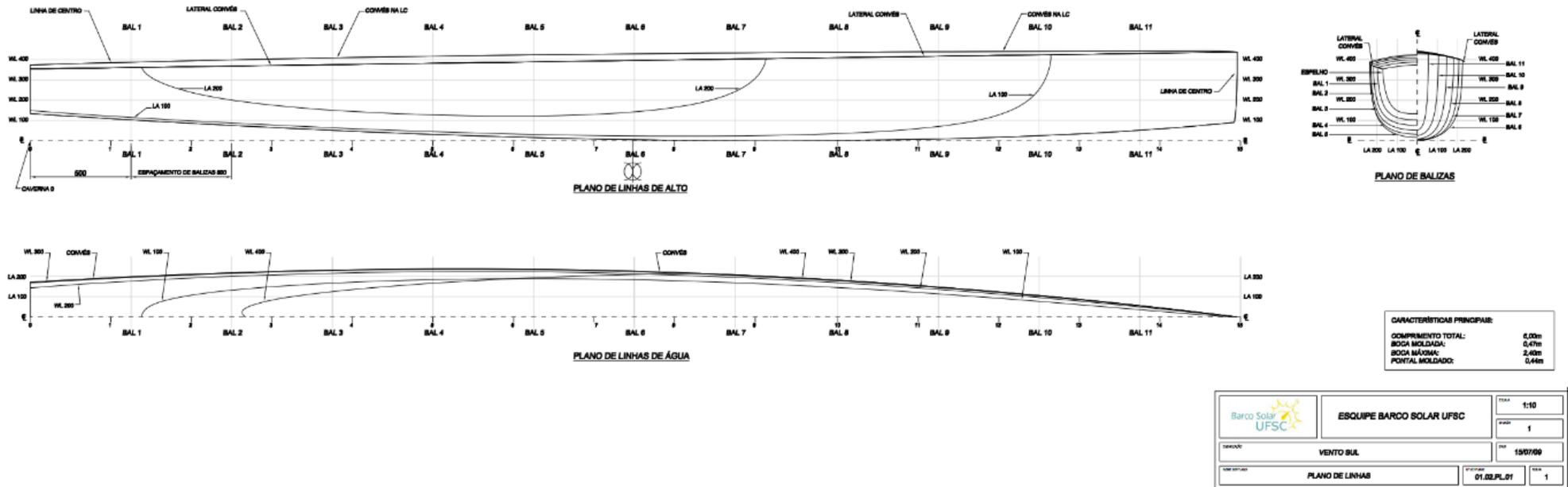
Fonte: O Autor (2016).

Pode-se notar que o gráfico completo apresentado segue o mesmo padrão do da Figura 58 apresentado na seção 6.1 RESULTADOS DO PROGRAMA MAXSURF®), porém nota-se que a partir de 6 nós a resistência ao avanço começa a aumentar levemente, porém se extrapolada essa curva a diferença é maior devido ao fator de escala ser cúbico para esse tipo de extrapolação.

ANEXO A – Memorial descritivo do plano de linhas da equipe vento sul.

O catamarã Babitonga foi construído de acordo com as normas estabelecidas para a competição DSB, elas assim como todas as equipes que competem nessa classe utilizam um conjunto de cascos com as mesmas dimensões. A equipe Vento Sul mapeou o casco e desenhou um plano de linhas e balizas simplificados e foi com ele que o modelo fora desenhado e desenvolvido. A Figura A 1 apresenta esse memorial descritivo simplificado.

Figura A 1 – Plano de Linhas e Balizas Equipe Vento Sul.



Fonte: Equipe Vento Sul (2009)

ANEXO B - Memorial descritivo UFRJ e dados extrapolados do modelo.

O memorial descritivo da UFRJ apresenta as principais configurações do catamarã padrão da competição, é um documento que não está documentado em nenhum banco de dados disponível, por isso, algumas imagens serão apresentadas nesse anexo para melhor apresentar o casco original.

Tabela de Resistência ao avanço (dois cascos)



Veloc. (nós)	Calados					
	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,165
0	0	0	0	0	0	0
0,25	0,2	0,22	0,24	0,26	0,26	0,28
0,5	0,72	0,76	0,82	0,86	0,92	0,94
0,75	1,48	1,6	1,7	1,82	1,92	1,96
1	2,52	2,7	2,88	3,06	3,24	3,32
1,25	3,78	4,04	4,38	4,6	4,86	5
1,5	5,28	5,64	6,08	6,42	6,8	6,96
1,75	7	7,5	8,06	8,54	9,02	9,24
2	8,96	9,6	10,32	10,92	11,56	11,84
2,25	11,14	11,96	12,84	13,56	14,38	14,74
2,5	13,54	14,52	15,56	16,48	17,44	17,88
2,75	16,18	17,34	18,58	19,68	20,82	21,36
3	19,06	20,5	21,96	23,26	24,54	25,2
3,25	22,28	23,84	25,42	26,88	28,36	29,14
3,5	25,52	27,5	29,46	31,18	32,84	33,72
3,75	29,08	31,12	33,2	35,14	37,1	38,12
4	33,38	35,78	38,1	40,16	42,2	43,26
4,25	37,38	40,32	43,14	45,64	48,02	49,26
4,5	41,12	44,34	47,56	50,48	53,32	54,82
4,75	45,68	48,94	52,24	55,3	58,38	60
5	51,52	54,92	58,3	61,4	64,52	66,18
5,25	58,58	62,42	66,1	69,36	72,62	74,32
5,5	66,44	70,94	75,22	78,96	82,62	84,48
5,75	74,54	80,04	85,24	89,7	94,04	96,24
6	82,8	89,38	95,54	100,9	106,18	108,82
6,25	90,92	98,5	105,74	112,16	118,48	121,64
6,5	98,9	107,44	115,74	123,22	130,66	134,42
6,75	106,6	116,26	125,62	134,06	142,56	146,86
7	114,4	124,76	135	144,48	154,02	158,88
7,25	121,86	133,38	144,54	154,84	165,32	170,7
7,5	129,52	141,66	153,62	164,84	176,22	182,04
7,75	137,14	150,1	162,88	174,82	187,1	193,4
8	144,88	158,6	172,1	184,8	197,8	204,48
8,25	152,64	167,14	181,4	194,8	208,56	215,64
8,5	160,46	175,64	190,68	204,8	219,3	226,74
8,75	168,9	184,5	200,08	214,9	230,14	237,96
9	176,96	193,72	210,06	225,38	241,22	249,36
9,25	185,12	202,48	219,76	235,84	252,34	260,8
9,5	193,88	211,68	229,5	246,36	263,7	272,56
9,75	202,76	221,5	239,86	257,22	275,2	284,46
10	211,6	231,14	250,42	268,4	286,92	296,46



Tabela Hidrostática

(referente a um casco)



Calado (m)	0,12	0,125	0,13	0,135	0,14	0,145	0,15	0,155	0,16	0,165	0,17
Deslocamento (Kg)	110,4	118,7	127,3	136,1	145,1	154,2	163,5	172,8	182,3	191,8	201,5
Comprimento de Linha d'água	5,755	5,836	5,916	5,975	5,976	5,976	5,976	5,977	5,977	5,977	5,978
Boca na linha d'água	0,398	0,403	0,407	0,411	0,414	0,418	0,422	0,425	0,428	0,431	0,433
Área Molhada (m ²)	2,035	2,117	2,197	2,278	2,349	2,417	2,484	2,55	2,615	2,68	2,744
Coefficiente Prismático	0,564	0,565	0,566	0,569	0,578	0,585	0,592	0,599	0,605	0,611	0,617
Coefficiente de Bloco	0,392	0,394	0,397	0,401	0,408	0,415	0,422	0,428	0,434	0,44	0,446
Coef. Seção Mestra	0,753	0,756	0,759	0,763	0,765	0,768	0,77	0,773	0,776	0,779	0,781
Coef. De Linha d'água	0,702	0,703	0,704	0,707	0,713	0,717	0,72	0,723	0,725	0,727	0,729
LCB relativo a meia-nau (+vante) m	0,046	0,022	-0,002	-0,025	-0,048	-0,069	-0,088	-0,106	-0,123	-0,138	-0,152
LCF relativo a meia-nau (+vante) m	-0,28	-0,315	-0,346	-0,379	-0,395	-0,406	-0,415	-0,423	-0,429	-0,434	-0,439
KB (m)	0,078	0,081	0,084	0,087	0,09	0,093	0,097	0,1	0,103	0,106	0,109
BMt (m)	0,14	0,137	0,134	0,13	0,127	0,124	0,121	0,118	0,115	0,112	0,109
BML (m)	26,882	26,518	26,037	25,669	24,815	23,895	22,995	22,123	21,29	20,501	19,76
KMt (m)	0,218	0,218	0,218	0,218	0,217	0,217	0,217	0,218	0,218	0,218	0,218
KML (m)	26,96	26,599	26,121	25,757	24,906	23,988	23,092	22,223	21,392	20,607	19,869
TPC (t/cm)	0,016	0,017	0,017	0,018	0,018	0,018	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
MTc (t.m)	0,005	0,005	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,007	0,007
RM @ 1grau = GMT.Desloc.sen(1) kg.m	0,162	0,174	0,186	0,199	0,212	0,225	0,239	0,253	0,267	0,281	0,295



A partir desse memorial descritivo, fez-se a análise presente na seção 6.3 COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS RESISTÊNCIA), onde foram extrapolados os resultados obtidos nos ensaios realizados com o modelo tanto em programa computacional como os resultados encontrados nos experimentos e fora feita a comparação entre a curva do casco real. As Tabela F 1, Tabela F 2 e Tabela F 3 apresentam, respectivamente, a extrapolação dos resultados obtidos no programa computacional utilizando o fator de escala ao cubo, resultados dos ensaios com as respectivas velocidades extrapoladas para o real e a interpolação dos resultados do memorial descritivo. Todas as tabelas apresentam resultados para a mesma configuração de boca e calado, 2,4 metros e 14,6 cm respectivamente.

Tabela F 1- Extrapolação da Velocidade e Resistência ao Avanço dos Resultados Obtidos no MaxSurf®.

Velocidade MaxSurf® [nós]	Resistência ao Avanço [N]
0,5	2,2
1,0	6,5
1,5	13,0
2,0	19,4
2,5	28,1
3,0	38,9
3,5	51,8
4,0	67,0
4,5	82,1
5,0	101,5
5,5	131,8
6,0	164,2
6,5	192,2
7,0	220,3
7,5	248,4
8,0	274,3
8,5	302,4
9,0	330,5
9,5	362,9
10,0	393,1

Fonte: O Autor (2016).

Tabela F 2 - Extrapolação da Velocidade e Resistência ao Avanço dos Resultados Obtidos nos Testes.

Velocidade Testes [nós]	Resistência ao Avanço [N]
1,8	3,2
2,2	6,4
2,9	11,3
3,4	17,0
3,9	27,2
4,3	36,7
5,0	45,6
5,5	50,5
5,9	55,1
6,1	60,4
9,5	116,9

Fonte: O Autor (2016).

Tabela F 3 - Resultados Interpolados do Memorial Descritivo UFRJ.

Velocidade Memorial UFRJ[nós]	Resistência ao Avanço [N]
0,25	0,3
0,50	0,8
0,75	1,8
1,00	3,0
1,25	4,5
1,50	6,3
1,75	8,3
2,00	10,6
2,25	13,2
2,50	16,0
2,75	19,1
3,00	22,6
3,25	26,2
3,50	30,3
3,75	34,2
4,00	39,1
4,25	44,4
4,50	49,0
4,75	53,8
5,00	59,9
5,25	67,7
5,50	77,1
5,75	87,5
6,00	98,2
6,25	109,0
6,50	119,5
6,75	129,8
7,00	139,7
7,25	149,7
7,50	159,2
7,75	168,9
8,00	178,5
8,25	188,1
8,50	197,7
8,75	207,5
9,00	217,7
9,25	227,8
9,50	237,9
9,75	248,5
10,00	259,41

Fonte: O Autor (2016).