

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

GEOVANA GIRARDELO FOLLE

**ANÁLISE PARAMÉTRICA DE RESISTÊNCIA AO AVANÇO DE EMBARCAÇÃO  
CATAMARÃ UTILIZANDO MÉTODO NUMÉRICO**

Joinville, 2016

GEOVANA GIRARDELO FOLLE

**ANÁLISE PARAMÉTRICA DE RESISTÊNCIA AO AVANÇO DE EMBARCAÇÃO  
CATAMARÃ UTILIZANDO MÉTODO NUMÉRICO**

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

Orientador: Thiago Pontin Trancredi, Dr. Eng.

Joinville, 2016

## **AGRADECIMENTOS**

À minha mãe, Edivanes, pelo apoio incondicional a todo e qualquer momento.

Aos homens da minha vida, meu pai Juscelino, pela sabedoria, meus irmãos, Jeovany, pela determinação, Luciano, pela coragem e Marco, pelo bom humor.

Ao meu orientador, Thiago Pontin, pelo tempo dedicado, o incentivo e a confiança, tanto no presente trabalho, quanto no auxílio à Equipe Babitonga.

À Suzane, sempre presente, obrigada pela paciência infinita, pela preocupação, e principalmente pelas boas energias.

Ao Clayton, pela compreensão, por todas as ligações, e todas as não ligações também.

Aos companheiros da Equipe Babitonga, que fizeram esse trabalho valer a pena a cada nova tarefa realizada. Ao Pedro, Andrei e Gustavo pelas longas horas de discussão.

Ao querido colega Evandro, por ter mudado completamente minha vida acadêmica e ser o responsável pela minha participação no Desafio Solar Brasil.

Aos amigos que deram força e ajudaram a encarar os anos de faculdade: Elisa, Evelyne, Guilherme, Lais, Jéssica, Marcelo, Nicole, Rafael Chitolina e Rafael Ziantônio.

## RESUMO

A resistência ao avanço de embarcações catamarã possui componentes que representam efeitos de interferência viscosa e de onda, devido ao posicionamento de seus cascos, fazendo com que estes interajam entre si. Essas parcelas, se negligenciadas, proporcionarão resultados de resistência ao avanço duvidosos, uma vez que seus efeitos se sobrepõem à resistência total dos cascos analisados isoladamente. Com o objetivo de obter a curva de resistência ao avanço da embarcação Babitonga, foi utilizado o método numérico do corpo esbelto, através do programa *Maxsurf*. A análise das componentes de resistência ao avanço para o catamarã e para o casco analisado isoladamente proporcionou a obtenção dos fatores de interferência. Uma variação paramétrica da distância entre cascos demonstrou o comportamento da componente de resistência de interferência de ondas do catamarã, por meio do qual, a boca mais propícia à embarcação pôde ser encontrada. Em um segundo momento, o método também foi utilizado para análise de coeficiente de onda e escoamento entre cascos quando implementados apêndices centrais *BulbCats*. Uma variação paramétrica do diâmetro do apêndice mostrou que o efeito de interferência proporcionado é diretamente relacionado ao seu volume, mas inversamente à resistência ao avanço final da embarcação. Foi também avaliado de forma simplificada o comportamento da embarcação na presença de hidrofólio, onde, por meio de uma variação paramétrica de valores de área projetada, pôde-se estimar a velocidade de *take-off* e a velocidade máxima alcançada pela embarcação.

**Palavras-chave:** Catamarã, resistência ao avanço, *BulbCat*, hidrofólio.

## **ABSTRACT**

The resistance of catamaran vessels is compound by plots that represent viscous and wave interference effect due to the positioning of the hulls, causing them to interact with each other. These plots, if neglected, will provide unreliable results on ship resistance calculations, since its effects must be added to the total resistance of the demihull. In order to obtain the resistance curve of the catamaran Babitonga, the numerical method Slender Body through Maxsurf software was used. An analysis of the resistance components for the catamaran and for the demihull provided estimates of the interference factors. A parametric variation of the distance between hulls was able to demonstrate the behavior of the wave interference resistance factor of the catamaran, whereby the most favorable beam could be established. In a second step, the method was also used to analyze the wave coefficient and the flow between the hulls when implemented BulbCats central appendices. A parametric variation of the diameter of the appendix showed that the interference effect is directly related to its volume but conversely to the resistance of the vessel. It was also assessed in a simplified approach, the behavior of the vessel in the presence of hydrofoil, where, through a parametric variation of projected area, it was possible to estimate the take-off speed and maximum speed of the vessel.

**Keywords:** Catamaran, ship resistance, *BulbCat*, hydrofoil.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Componentes básicos da resistência ao avanço.....	17
Figura 2 – Padrão de onda de Kelvin.....	18
Figura 3 – Componentes do sistema de ondas.....	18
Figura 4 – Distribuição de pressão em um escoamento ideal invíscido.....	20
Figura 5 – Apêndice BulbCat.....	25
Figura 6 – Campo de pressão em torno do perfil.....	27
Figura 7 – Hidrofólio secante e hidrofólio submerso, respectivamente.....	27
Figura 8 – Característica geométricas dos perfis.....	28
Figura 9 – Distribuição de forças no perfil de um hidrofólio.....	29
figura 10 – Embarcação Flying Phantom.....	31
Figura 11 – Comparação de geometria de cascos.....	33
Figura 12 - Layout da embarcação Babitonga.....	36
Figura 13 – Geometria importada para o Maxsurf Modeler.....	37
Figura 14 - Ajustamento de distância entre cascos.....	38
Figura 15 – Ajustamento de calado.....	38
Figura 16 – Malha ajustada na região da popa transom da embarcação Babitonga.....	40
Figura 17 – Malha gerada automaticamente na região da popa transom da embarcação Babitonga.....	40
Figura 18 – Variação do número de seções na formação de malha. (162 seções, acima, 81 seções, ao meio e 40 seções, abaixo).....	41
Figura 19 – Modelagem de apêndice.....	46
Figura 20 – Ajuste de distância entre cascos e diâmetro do apêndice.....	46
Figura 21 – Malha do apêndice gerada automaticamente.....	47
Figura 22 – Malha do apêndice refinada.....	47
Figura 23 – Vista superior da modelagem embarcação juntamente com o apêndice BulbCat.....	47
Figura 24 – Geometria do perfil NACA 25112 sem angulação.....	49
Figura 25 – Curva de resistência ao avanço da embarcação Babitonga com boca de 2,3 metros.....	53
Figura 26 – Componentes do coeficiente de resistência ao avanço do catamarã Babitonga.....	54
Figura 27 – Componentes do coeficiente de resistência ao avanço do casco isolado da embarcação Babitonga.....	55
Figura 28 - Componentes do coeficiente de resistência ao avanço do modelo 5a.....	56
Figura 29 – Componentes do coeficiente de resistência ao avanço do modelo 6c.....	56
Figura 30 – Variação do fator de interferência de onda para a embarcação Babitonga.....	59
Figura 31 – Variação do fator de interferência de onda para as variações paramétricas de boca.....	60
Figura 32 – Variação do coeficiente de onda para as variações paramétricas de boca.....	61
Figura 33 – Coeficientes de resistência de onda para as variações do diâmetro de apêndice.....	62
Figura 34 - Formação de ondas da embarcação a 6,75 nós sem apêndice (acima), com apêndice 4159 (ao centro) e com apêndice 4154 (abaixo).....	64

Figura 35 – Coeficientes de resistência de onda para as variações paramétricas de posição longitudinal de apêndice.....	65
Figura 36 - Formação de ondas da embarcação com apêndice 4159 localizado em 5 metros (acima), em 4 metros (ao centro) e em 3 metros (abaixo), a 6,75 nós.....	67
Figura 37 – Gráfico da influência de variação de área de hidrofólio na velocidade máxima, velocidade de take-off e potência. ....	68
Figura 38 – Gráfico comparativo entre a resistência ao avanço da embarcação na ausência e presença de hidrofólio, e arrasto do hidrofólio. ....	70
Figura 39 - Gráfico de comparação da potência na ausência e presença de hidrofólio.....	71
Figura 40 – Modelagem de hidrofólios na embarcação Babitonga.....	72
Figura 41 - Modelagem de hidrofólios na embarcação Babitonga (vista frontal).....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características principais da embarcação Babitonga. ....	35
Tabela 2 – Modificação na resistência com o refinamento de malha. ....	41
Tabela 3 – Variações paramétricas de valor de boca. ....	43
Tabela 4 - Corpos de revolução utilizados e variações paramétricas de raio $LD$ . ....	45
Tabela 5 - Variações paramétricas de posição longitudinal do apêndice. ....	45
Tabela 6 – Características do perfil NACA 25112.....	49
Tabela 7 – Variações paramétricas de área de hidrofólio. ....	51
Tabela 8 – Características do catamarã Babitonga e dos modelos 5a e 6c testados por Molland et al. (1994). ....	55

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Área projetada de hidrofólio
$B$	Boca de um casco do catamarã em isolamento
$c$	Comprimento de corda
$C_B$	Coeficiente de bloco
$C_F$	Coeficiente de resistência friccional proveniente da correlação ITTC 1957
$c_f$	Coeficiente de resistência friccional
$C_D$	Coeficiente de arrasto
$C_L$	Coeficiente de sustentação
$C_p$	Coeficiente prismático do apêndice
$c_T$	Coeficiente de resistência total
$C_{Tcat}$	Coeficiente de resistência total do catamarã
$c_w$	Coeficiente de resistência de onda
$C_W$	Coeficiente de resistência de onda para um dos cascos do catamarã em isolamento.
$D$	Força de arrasto
$g$	Aceleração da gravidade
$h$	Altura em relação ao referencial
$L_{3/20}$	Coeficiente de sustentação multiplicado por 3/20
$L_A$	Comprimento do apêndice
$L_S$	Comprimento da embarcação
$L$	Força de sustentação
$m$	Posição de máxima seção do apêndice
$P_e$	Potência efetiva
$R$	Força hidrodinâmica
$R_0$	Raio de nariz
$R_1$	Raio de calda
$R_e$	Número de Reynolds
$R_{SL}$	Raio de distância entre cascos
$R_T$	Resistência ao avanço total do navio
$P$	Posição da arqueação máxima, dividida por 20
$p$	Pressão
$Q$	Arqueação normal ou reflexiva
$S$	Distância entre cascos medida a partir do centro de cada casco
$T$	Calado
$V$	Velocidade do fluido
$V_S$	Velocidade do navio
$XX$	Máxima espessura do perfil, dividida por 100
$(1 + k)$	Fator de forma



$(1 + \beta K)$	Fator de forma para catamarã
$(1 + K)$	Fator de forma para um dos cascos do catamarã em isolamento
$\nabla$	Volume deslocado
$\alpha$	Ângulo de ataque
$\sigma$	Fator de aumento da velocidade entre os cascos
$\tau$	Fator de interferência da resistência de onda
$\phi$	Fator de mudança de campo de pressão em torno do casco isolado
$\rho$	Densidade do fluido

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	12
1.1	Objetivos .....	14
1.1.1	Objetivo Geral .....	14
1.1.2	Objetivos específicos.....	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1	RESISTÊNCIA AO AVANÇO .....	16
2.1.1	Decomposição da resistência ao avanço.....	16
2.1.1.1	Resistência de onda.....	17
2.1.1.2	Resistência friccional.....	19
2.1.1.3	Resistência viscosa de pressão.....	19
2.1.1.4	Resistência de pressão .....	20
2.1.1.5	Resistência viscosa total.....	21
2.1.1.6	Somatório de resistências .....	21
2.1.2	A resistência ao avanço para embarcações catamarãs.....	21
2.2	BULBOS.....	24
2.2.1	Abordagem geral.....	24
2.2.2	Apêndice central em embarcações catamarã.....	25
2.3	HIDROFÓLIO .....	26
2.3.1	Princípio de funcionamento do hidrofólio .....	26
2.3.2	Configurações de hidrofólio .....	27
2.3.3	Características geométricas e físicas do hidrofólio .....	28
2.3.4	Perfis NACA .....	30
2.3.5	Hidrofólio em embarcações catamarã.....	30
2.4	O METODO NUMÉRICO .....	31
2.4.1	Teoria de escoamento potencial e a teoria do corpo esbelto .....	31
2.4.1.1	Simplificações.....	31
2.4.1.2	A teoria do corpo esbelto.....	32
3	A EMBARCAÇÃO .....	35
3.1	Características principais.....	35
3.2	Layout.....	36
4	DESENVOLVIMENTO.....	37
4.1	MODELAGEM E ADEQUAÇÃO DE MALHA .....	37
4.2	INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA ENTRE CASCOS.....	41

4.2.1	Definição das variações paramétricas.....	42
4.3	IMPLEMENTAÇÃO DE APÊNDICE BULBCAT .....	43
4.3.1	Definição das variações paramétricas.....	44
4.3.2	Modelagem dos arranjos analisados.....	45
4.4	IMPLEMENTAÇÃO DE HIDROFÓLIO.....	48
4.4.1	Escolha do perfil hidrodinâmico.....	48
4.4.2	Definição das variações paramétricas.....	49
4.4.3	Comportamento da embarcação na presença de hidrofólio .....	51
4.4.4	Modelagem do hidrofólio .....	52
5	RESULTADOS E ANÁLISES .....	53
5.1	RESISTÊNCIA AO AVANÇO E DISTÂNCIA ENTRE CASCOS.....	53
5.1.1	Considerações sobre o fator de interferência viscosa ( $\beta$ ) .....	58
5.1.2	Considerações sobre o fator de interferência de resistência de onda ( $\tau$ ) .....	58
5.1.3	Variação paramétrica do valor de boca máxima.....	59
5.2	APÊNDICE BULBCAT .....	61
5.2.1	Variação paramétrica do diâmetro de apêndice.....	61
5.2.2	Variação paramétrica da posição longitudinal de apêndice .....	65
5.3	HIDROFÓLIO .....	68
5.3.1	Variação Paramétrica da área de hidrofólio .....	68
5.3.2	Curvas de potência e resistência.....	69
6	CONCLUSÕES.....	73

## 1 INTRODUÇÃO

O potencial de produção de energia solar no Brasil tem chamado a atenção de economistas de referência internacional, como mencionado abaixo por Pires (2014):

Em julho de 2014, a Morgan Stanley publicou o relatório Solar Power & Energy Storage/Policy Factors vs. Improving Economics, apontando o potencial para o exploração da energia solar no mundo, destacando seis regiões/países com maior potencialidade [...] O relatório aponta para uma adição da capacidade de geração solar de 47 gigawatts até 2020, ampliando em 33% a capacidade atual. China, Japão, EUA, Europa, Índia e Brasil serão responsáveis por mais de 80% desse crescimento.[...].

Esse potencial está principalmente baseado na irradiação solar presente no país. Os valores correspondem a uma faixa entre 1800 e 1950 kWh/m<sup>2</sup>/ano, sendo inferiores apenas à insolação encontrada nas regiões desérticas das Américas, norte da África, Oriente Médio, China e Austrália. (VICHI, 2009)

Com tal irradiação, e considerando a participação da energia solar na matriz energética nacional de apenas 0,01%, fica evidente a necessidade de pesquisa e desenvolvimento em prol da intensificação do uso dessa energia luminosa. (PIRES, 2014)

Além do emprego da energia solar por meio de coletores solares, que através de um sistema de serpentinas propiciam o aquecimento de água, ela também pode ser utilizada para gerar eletricidade através de painéis fotovoltaicos como conversão em energia elétrica para motores de diversas aplicações. (VICHI, 2009)

No ramo naval, a utilização de placas solares é recente, motivo pelo qual as embarcações movidas exclusivamente à energia solar são muito notórias. Um exemplo é o trimarã PlanetSolar, embarcação de 35 metros, com 512 metros quadrados de placas solares e deslocamento de 89 toneladas. A embarcação já fez a volta ao mundo utilizando apenas energia solar, com a locomoção livre de emissões de dióxido de carbono, e o mais instigante, gratuita. (THE MS TÛRANOR..., 2010)

Possivelmente, um obstáculo em relação à comercialização de embarcações como o PlanetSolar é sua baixa velocidade média, sendo de 5 nós, o que torna as

viagens longas e fatigantes, podendo limitar a utilização de placas fotovoltaicas como única fonte de energia nas embarcações comerciais. Essa problemática evidencia a necessidade de alternativas que proporcionem melhor desempenho. (THE MS TÛRANOR..., 2010)

A fim de estimular a utilização e desenvolvimento de tecnologias solares, bem como divulgar o potencial destas tecnologias aplicadas em embarcações, foi criado em 2009 o Desafio Solar Brasil (DSB), um rali de barcos movidos à energia solar.

A realização da competição foi marcada inicialmente por uma articulação internacional, pois a inspiração provém da participação de um grupo de brasileiros da Universidade Federal do Rio de Janeiro na *Frisian Solar Challenge*. Atualmente chamada de *Dong Energy Solar Challenge*, a competição é realizada a cada dois anos na Holanda e constitui o principal evento mundial para embarcações solares. Durante esse evento, os participantes já percorreram 220 quilômetros de canais em 11 cidades da região da Frísia. No Brasil, o DSB é realizado anualmente na cidade de Búzios, onde durante 5 dias do mês de novembro, acontecem inspeções técnicas, apresentações de projetos e provas de gerenciamento de energia, velocidade e manobra. (DESAFIO SOLAR BRASIL..., 2015)

A participação no Desafio Solar Brasil é possível por meio de duas classes, a classe A, onde cascos padrão de uma embarcação catamarã são fornecidos pela organização para que a equipe monte sua embarcação, enquanto a classe B, permite que a equipe inscrita crie a sua própria geometria. (REGRAS DE COMPETIÇÃO..., 2015)

Com o objetivo de participar do Desafio Solar Brasil 2011, 20 alunos do curso de Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina formaram a Equipe Barco Solar Babbitonga. Desde então, os estudantes participam da classe A da competição. (A EQUIPE..., 2016)

Os primeiros anos de participação, considerando a impossibilidade de modificação geométrica dos cascos, resultaram em um enfoque para o projeto elétrico e mecânico, assim como a minimização de peso dos equipamentos a bordo. Perspectiva essa que proporcionou a conquista do pódio em 2014 e a prata em 2015.

Atualmente, a equipe pretende buscar um novo foco para obter melhores resultados: o projeto naval. As condições financeiras que limitam a construção de um novo casco são o ponto de partida para a criação de alternativas viáveis que resultem no aumento da velocidade da embarcação, proporcionando assim, bons resultados na competição.

Este trabalho visa, então, em um primeiro momento, a obtenção da curva de resistência ao avanço da embarcação Babitonga, que possa representar as componentes de resistência, considerando as particularidades de interferência presentes em embarcações catamarã.

O intuito é que, com a correlação dos resultados obtidos com os trabalhos de Molland, Wellicome e Couser (1994), a adequação do método numérico utilizado possa ser validada, encorajando o estudo de soluções para melhorar a resistência da embarcação, modificar o escoamento, e assim, aumentar a velocidade.

Com a curva de resistência em mãos, o método numérico é utilizado para a investigação de três análises paramétricas, a primeira, proposta por Molland et al. (1994), referente ao estudo de interferência de ondas com a variação de distância entre cascos. A segunda, com influência do conceito de bulbo como apêndice central em embarcação catamarã, realizado por Zotti (2007), e a terceira, uma análise de comportamento da embarcação com a utilização de hidrofólio baseada na curva de resistência ao avanço e ajustes de calado, realizado por Artmann (2015).

## *1.1 Objetivos*

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Estudar a resistência ao avanço e investigar alternativas para a redução desta resistência, além de analisar eventuais modificações no escoamento entre cascos da embarcação Babitonga.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Obtenção da curva de resistência ao avanço da embarcação Babitonga, identificando os fatores de interferência propostos por Insel & Molland (1991);
- Analisar a influência da distância entre cascos na resistência ao avanço da embarcação;
- Estudar a interferência na formação de ondas e modificação da resistência ao avanço com a exploração do conceito *BulbCat*;
- Verificar o comportamento da resistência ao avanço e potência da embarcação com a implementação de hidrofólio;

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A presente seção visa, primeiramente, caracterizar a resistência ao avanço e suas componentes, assim como associá-las às embarcações catamarã. Posteriormente, a seção abrange rapidamente os efeitos da implementação de bulbo de proa e introduz o conceito de apêndices *BulbCat*. Na sequência, é explanado sobre o conceito de hidrofólio envolvendo características geométricas e físicas de perfis. Finalmente, a teoria do corpo esbelto é abordada.

### 2.1 RESISTÊNCIA AO AVANÇO

De acordo com Trindade (2012), a resistência ao avanço pode ser definida como a força necessária para rebocar uma embarcação a uma velocidade constante, em águas tranquilas. Sendo que a potência efetiva, ou potência de reboque, é a potência necessária para vencer essa resistência, por meio da relação abaixo.

$$P_e = V_S R_T \quad (1)$$

Em que:

$P_e$  é a potência efetiva;

$V_S$  é a velocidade do navio;

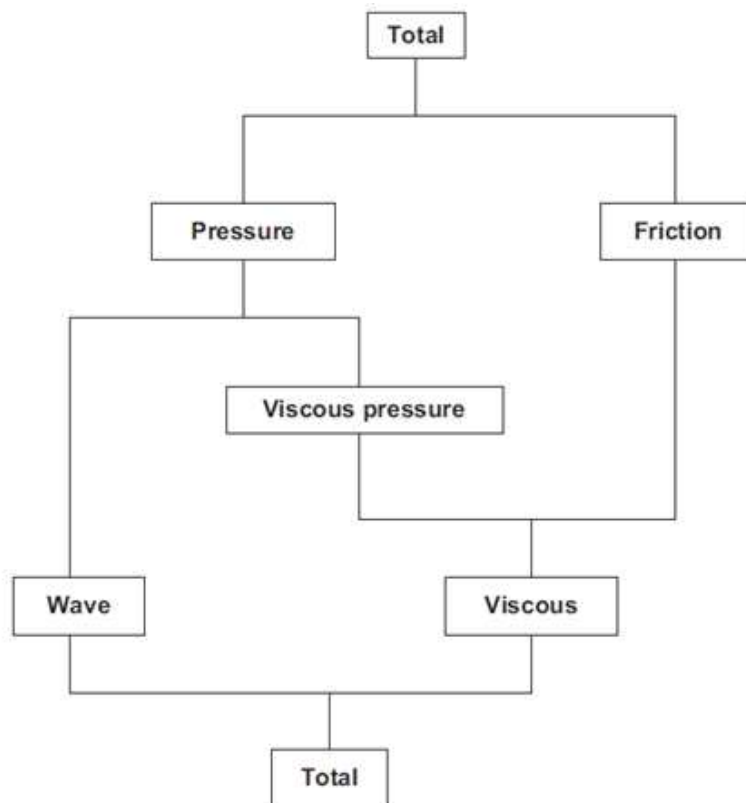
$R_T$  é a resistência ao avanço total do navio.

#### 2.1.1 Decomposição da resistência ao avanço

A resistência ao avanço é usualmente decomposta em parcelas, que interagem entre si e na sua maioria, não podem ser mensuradas individualmente. A decomposição de resistência proposta por Molland, Turnock e Hudson (2011), pode ser vista na figura 1.



Figura 1 – Componentes básicos da resistência ao avanço.



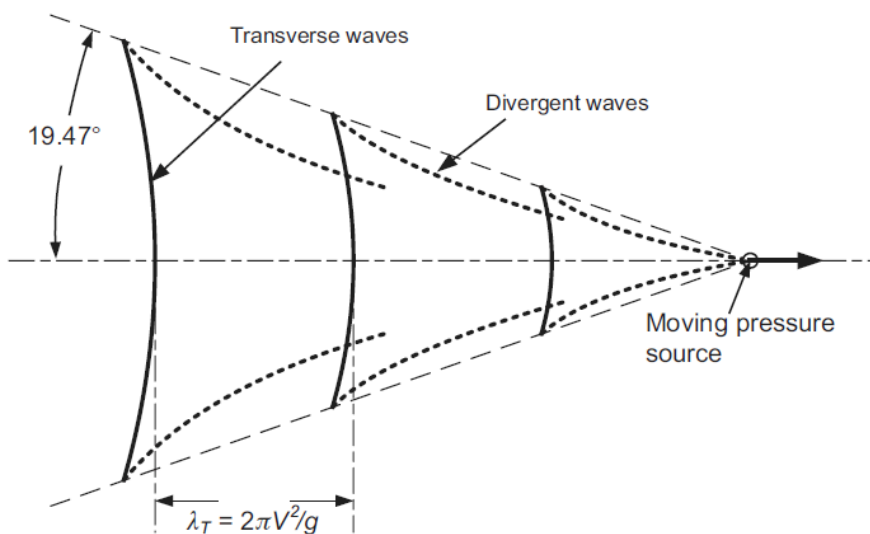
Fonte: Molland et al. (2011).

### 2.1.1.1 Resistência de onda

O avanço de uma embarcação em águas calmas resulta em uma formação de onda, imperceptível a baixas velocidades, mas visível em altas. A energia empregada na geração e destruição de padrões de ondas é responsável por compor a resistência de onda. (MOLLAND ET AL., 2011)

A resolução analítica de Kelvin, para um caso simplificado de ondas criado pelo movimento de um ponto de pressão, demonstra que o padrão de onda formado inclui um sistema de ondas divergente, e outro transversal. Esse padrão de onda possui formato de cunha, com ângulo de  $19,5^\circ$ , como pode ser visto na figura 2. Esse ângulo é independente do formato da embarcação. (BERTRAM, 2000)

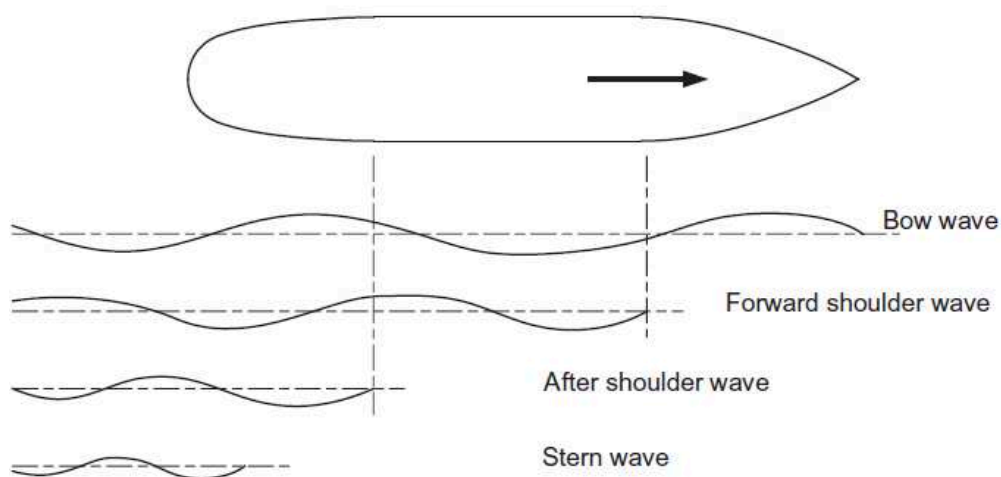
Figura 2 – Padrão de onda de Kelvin.



Fonte: Molland et al., 2011.

Em uma embarcação são produzidos vários padrões de onda, como pontos de pressão, que interferem entre si. A maioria deles é formada em regiões de mudança de geometria próximas à superfície, são exemplos, o bulbo, a proa, a popa e a curvatura de vante e de ré de embarcação, como pode ser visto na figura 3. (BERTRAM, 2000)

Figura 3 – Componentes do sistema de ondas.



Fonte: Molland et al., 2011.

### 2.1.1.2 Resistência friccional

A resistência friccional é o resultado da interação viscosa da água com a superfície do casco. Quando um corpo se move em um fluido em repouso, uma fina camada de fluido se adere à superfície, adquirindo velocidade nula em relação ao corpo. A variação de velocidade do fluido na região próxima à superfície é elevada, e diminui com o aumento da distância. A camada limite pode ser definida, então, como a distância entre a superfície do corpo, até a localização onde a velocidade do fluido seja 1% da velocidade do corpo. (TRINDADE, 2012)

Em um navio, desenvolve-se de proa para popa uma camada limite tridimensional. Esta camada pode ser considerada completamente turbulenta para todos os efeitos práticos, pois se inicia com um escoamento laminar e sofre transição para o regime turbulento, normalmente, junto a proa do navio. A partir daí verificam-se intensas trocas de quantidade de movimento em camadas adjacentes do fluido, ou seja, há um maior transporte de energia, causando forças de cisalhamento no casco. A integral das forças de cisalhamento sobre a área molhada da embarcação resulta na resistência de fricção. (MOLLAND ET AL., 2011; TRINDADE, 2012)

A linha de correção modelo-navio da ITTC (International Towing Tank Conference) de 1957, definida a seguir, é largamente utilizada para mensurar o coeficiente de resistência friccional de uma embarcação. (TRINDADE, 2012)

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

Em que:

$c_F$  é o coeficiente friccional;

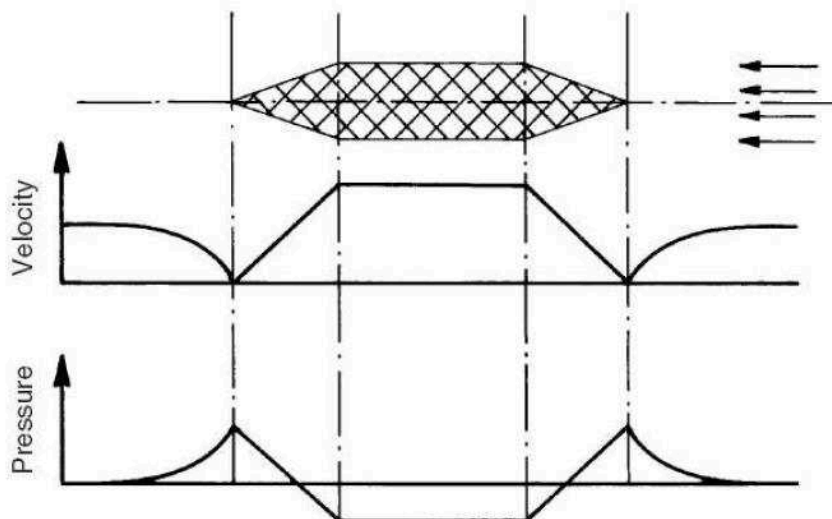
Re é o número de Reynolds.

### 2.1.1.3 Resistência viscosa de pressão

A resistência viscosa de pressão é originada por diferenças de pressão que atuam no casco devido aos efeitos viscosos do escoamento. Para um escoamento

ideal, como pode ser observado na figura 4, a pressão exercida na popa do navio seria igual à exercida na proa, resultando em uma força nula. (TRINDADE 2012)

Figura 4 – Distribuição de pressão em um escoamento ideal invíscido.



Fonte: Trindade, 2012.

Para um escoamento viscoso, tanto a geração de vórtices nas descontinuidades, quanto o aumento de espessura da camada limite devido a separação de escoamento são responsáveis por essas mudanças do campo de pressão ao longo do casco, representando assim, uma adição de resistência ao avanço da embarcação. Por ser dependente do formato do casco, a resistência viscosa de pressão é frequentemente denominada “resistência de forma”. (TRINDADE 2012)

#### 2.1.1.4 Resistência de pressão

Os componentes da pressão que agem em cada elemento da superfície do casco podem ser somados para compor a resistência total de pressão. Essa é composta em partes pelos efeitos viscosos, e em partes pela formação de ondas. (MOLLAND ET AL., 2011)

### 2.1.1.5 Resistência viscosa total

A resistência viscosa total irá incluir a resistência friccional e a parcela da resistência de pressão ocasionada pelas forças viscosas e descontinuidades do casco. (MOLLAND ET AL., 2011)

### 2.1.1.6 Somatório de resistências

Diversos métodos para estimar o resultado da composição de resistência ao avanço já foram estudados. O método de Hughes-Prohaska, equação (3), divide a resistência total entre uma componente associada à resistência de ondas e outra dependente da forma do casco. O método ITTC (1957) é utilizado para o cálculo da parcela friccional. (TRINDADE 2012)

$$c_T = (1 + k)c_f + c_w \quad (3)$$

Em que:

$c_T$  é o coeficiente de resistência total;

$(1 + k)$  é o fator de forma;

$c_f$  é o coeficiente de resistência friccional;

$c_w$  é o coeficiente de resistência de onda.

## 2.1.2 A resistência ao avanço para embarcações catamarãs

A utilização de pequenas embarcações de alta velocidade tem crescido nas últimas décadas, e para isso, vários formatos de casco foram desenvolvidos. Entre eles está o conceito do catamarã, principalmente utilizado pela grande área de convés e boa estabilidade transversal. (INSEL & MOLLAND, 1991)

Estimar a resistência de um catamarã pode ser um problema complexo, sendo que os efeitos de interferência entre os cascos devem ser considerados em adição à resistência total dos cascos em isolamento. (INSEL & MOLLAND, 1991)

Dois tipos de interferência de resistência específicas de catamarãs podem ser identificadas, sendo elas, a interferência viscosa causada pelo escoamento assimétrico em torno de cada casco, que afeta a formação da camada limite e pode

desenvolver vórtices, e a interferência de onda, devido a interação dos sistemas de onda produzidos por cada um dos cascos. (INSEL & MOLLAND, 1991)

O trabalho de Insel & Molland (1991) se baseia em uma investigação experimental da resistência em águas calmas de catamarãs com formas de casco simétricas. Foram estudados quatro modelos de embarcações, e realizadas variações da distância entre cascos de cada modelo.

Os autores propuseram que a resistência total de um catamarã poderia ser expressa pela equação 4.

$$C_{Tcat} = (1 + \phi K)\sigma C_F + \tau C_W \quad (4)$$

Em que:

$C_F$  é o coeficiente friccional proveniente da correlação ITTC 1957;

$C_W$  é o coeficiente de resistência de onda para um dos cascos em isolamento;

$(1 + K)$  é o fator de forma para um dos cascos em isolamento;

$\phi$  considera a mudança do campo de pressão em torno do casco, individualmente;

$\sigma$  responde pela mudança da velocidade entre os cascos e seria calculado pela integração da resistência friccional local sobre a área molhada.

$\tau$  é o fator de interferência da resistência de onda.

Ainda, por questões práticas,  $\phi$  e  $\sigma$  podem ser combinados em um fator de interferência de resistência viscosa representado por  $\beta$ , como mostrado na equação 5.

$$C_{Tcat} = (1 + \beta K)C_F + \tau C_W \quad (5)$$

Sendo que, para um casco em isolamento,  $\beta = 1$  e  $\tau = 1$ .

O fator de interferência de resistência de onda pode ser definido por:

$$\tau = \frac{C_{Wcatamarã}}{C_{Wcasco\ isolado}} = \frac{[C_T - (1 + \beta k)C_F]_{catamarã}}{[C_T - (1 + k)C_F]_{casco\ isolado}} \quad (6)$$

No estudo  $\beta$ ,  $\tau$  e  $C_W$  foram derivados das análises experimentais. (INSEL & MOLLAND, 1991)

Os resultados obtidos por Insel & Molland (1991), indicam que a maior separação entre os cascos tende a resultar em menor resistência de interferência, com cavas e cristas localizadas em números de Froude baixos. A resistência de onda pode ser negligenciada a partir de uma velocidade particular, que é dependente da separação entre cascos.

Os autores ainda concluem que o fator de forma é independente da velocidade e deve ser mantido constante com a variação da mesma.

Em 1994, Molland et al. realizaram uma série extensiva de testes com 10 modelos de catamarã, todos testados a uma faixa de número de Froude de 0,1 a 1. As variações de raio de distância entre cascos, definido pela relação (7), foram realizadas para valores de 0,2;0,3;0,4 e 0,5.

$$R_{SL} = \frac{S}{L_S} \quad (7)$$

Em que:

$S$  é a distância entre cascos medida a partir do centro de cada casco;

$L_S$  é o comprimento da embarcação.

De acordo com Molland et al. (2001), para geometrias de formatos arredondados, sem a presença de chine, os coeficientes de forma de catamarãs e de seus cascos em isolamento podem ser obtidos através das fórmulas (8) e (9).

$$(1 + K) = 2,76 \left( \frac{L_S}{\nabla^{1/3}} \right)^{-0,4} \quad (8)$$

$$(1 + \beta K) = 3,03 \left( \frac{L_S}{\nabla^{1/3}} \right)^{-0,4} \quad (9)$$

Em que:

$(1 + K)$  é o fator de forma para um dos cascos do catamarã em isolamento;

$L_S$  é o comprimento da embarcação;

$\nabla$  é o volume deslocado;

$(1 + \beta K)$  é o fator de forma para catamarã;

## 2.2 BULBOS

### 2.2.1 Abordagem geral

Em 1907, D.W. Taylor foi o primeiro a reconhecer os bulbos como um apêndice de redução de resistência de ondas. Sua conclusão provém do aumento de velocidade obtido na embarcação *Delaware*, utilizando a mesma potência, depois da implantação do bulbo. Mais 70 anos se passaram para que os bulbos se tornassem elementares nos projetos navais. (KRACHT, 1978)

O dimensionamento de um bulbo pode influenciar em muitas propriedades de uma embarcação, especialmente para embarcações que requerem alta velocidade, proporcionando um melhor desempenho. (KRACHT, 1978)

O bulbo de proa pode atuar de duas maneiras benéficas na resistência ao avanço da embarcação, a primeira, atenuando o sistema de ondas formado pela proa, podendo diminuir, assim a resistência de onda, e a segunda, reduzindo a resistência viscosa ao suavizar o escoamento na parte anterior do casco. Prejudicialmente, a geometria do bulbo resultará em uma adição de área molhada à embarcação, que irá aumentar a resistência friccional. (KRACHT, 1978)

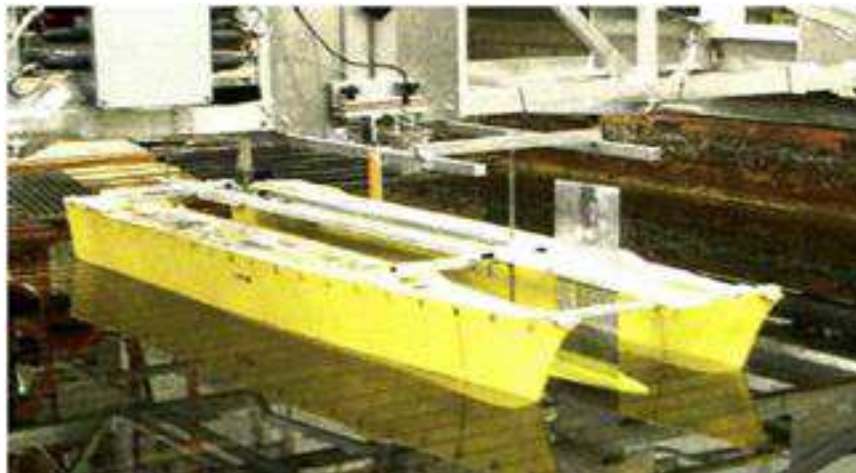
De acordo com a teoria de Wulstschiffe (1935), o comportamento hidrodinâmico do bulbo é avaliado a partir da análise da interferência entre os sistemas de onda do navio e do bulbo. Dependendo da fase das ondas geradas no bulbo e no casco, poderá ocorrer um cancelamento mútuo, reduzindo as ondas geradas com a passagem do navio. A amplitude das ondas geradas no bulbo, por sua vez, define o grau de interferência entre os sistemas de ondas. A posição do bulbo é responsável pela diferença de fase, enquanto seu volume é relacionado com a amplitude. (KRACHT, 1978)



### 2.2.2 Apêndice central em embarcações catamarã

Zotti (2007), realizou diversos estudos para implementação de bulbos em catamarãs. O conceito utilizado em suas publicações chama-se *BulbCat*<sup>\*</sup>, e é definido como um apêndice central, ou seja, localizado entre os dois cascos do catamarã e fixado verticalmente à embarcação, como pode ser visto na figura 5.

Figura 5 – Apêndice *BulbCat*.



Fonte: Zotti (2007).

O apêndice utilizado no experimento foi modelado a partir do trabalho de Gertier (1950), o qual apresenta uma série sistemática que prevê a resistência de corpos de revolução para aplicação em projetos de submarinos de alta velocidade. A série contempla 24 modelos variando 5 parâmetros, sendo eles, o raio de espessura ( $L_A/D$ ), o coeficiente prismático ( $C_p$ ), o raio de nariz ( $R_0$ ), o raio de calda ( $R_1$ ), e a posição de máxima seção ( $m$ ).

Ao avaliar embarcações com mesmo deslocamento, foi concluído por Zotti (2007) que o mesmo volume de apêndice causava maior efeito nas embarcações mais leves, encorajando assim, a utilização de volumes maiores de apêndice para as embarcações de maiores deslocamentos.

Zotti (2007) concluiu também, que a posição longitudinal de maior contribuição seria aquela na qual o bulbo fica alinhado com a extrema de vante do casco.

---

\* Devido à inexistência de uma tradução formalizada, mantém-se o termo em inglês.

## 2.3 HIDROFÓLIO

### 2.3.1 Princípio de funcionamento do hidrofólio

O funcionamento do hidrofólio pode ser comparado às asas dos aviões, pois ambos produzem sustentação devido aos mesmos princípios. No entanto, uma diferença considerável está na densidade da água, aproximadamente mil vezes superior à do ar, a qual permite aos hidrofólios terem uma dimensão muito menor que as asas dos aviões. (AIRES, 2014)

O hidrofólio deve suas capacidades à seu formato hidrodinâmico, que faz com que a velocidade do escoamento na parte superior do perfil seja maior que na parte inferior, para que o fluido atenda ao princípio da continuidade. Bernoulli demonstra que para uma linha de corrente, a soma da energia cinética (proporcional a velocidade da corrente) e a energia potencial (proporcional a profundidade e a pressão) permanece constante (equação 10). Assim, a variação da velocidade ao longo do perfil resulta no fato de que a parte superior do perfil terá menos pressão relativamente à parte inferior, gerando uma força de sustentação, como pode ser visto na figura 6. (AIRES, 2014; ÇENGEL & CIMBALA, 2007)

$$\frac{\rho V^2}{2} + \rho gh + p = \text{constante} \quad (10)$$

Em que:

$V$  é a velocidade do fluido;

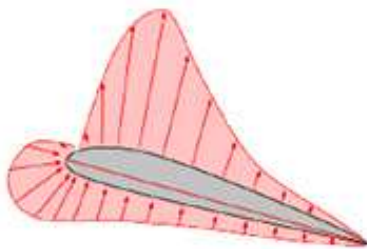
$h$  é a altura em relação ao referencial;

$p$  é a pressão;

$\rho$  é a densidade do fluido;

$g$  é a aceleração da gravidade.

Figura 6 – Campo de pressão em torno do perfil.



Fonte: Aires (2014).

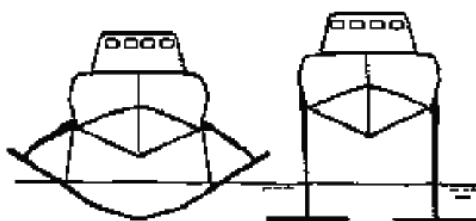
### 2.3.2 Configurações de hidrofólio

Os hidrofólios podem ser divididos em dois grupos, os secantes e os completamente submersos. (AIRES, 2014)

Os hidrofólios secantes possuem angulações ao longo do comprimento e parte da sua estrutura fica emersa, como pode ser visto na figura 7. De acordo com o aumento da velocidade da embarcação, a força de sustentação gerada na área molhada do hidrofólio também aumenta, projetando parte da sua estrutura para fora da água. (AIRES, 2014)

Em uma dada velocidade, o barco será elevado até a força de sustentação se igualar ao peso da embarcação, e o hidrofólio secante ficará estável. Caso a embarcação perca sustentação devido à fatores externos, parte da estrutura do hidrofólio submergirá novamente, e fará a correção. Devido a essa dinâmica de imersão, a estrutura dos hidrofólios secante é considerada auto estabilizante. (HIDROFOIL SOCIETY, 1998; FALTINSEN, 2005)

Figura 7 – Hidrofólio secante e hidrofólio submerso, respectivamente.



Fonte: International Hydrofoil Society (1998).

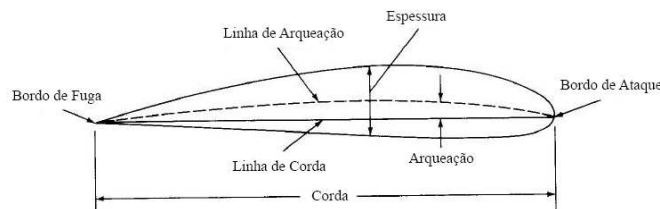
Por outro lado, os hidrofólios completamente submersos possuem a geometria geralmente alinhada e totalmente imersa, como pode ser visto na figura 7.

Ao contrário do modelo anterior, a estrutura não é auto estabilizante e é necessário um sistema que varie a posição do ângulo de ataque do hidrofólio para alterar a força de sustentação, minimizando problemas de instabilidade. (AIRES, 2014)

### 2.3.3 Características geométricas e físicas do hidrofólio

A figura 8 contém as características básicas da geometria de um perfil, sendo a principal, a linha de arqueação, que é formada por pontos médios entre as superfícies inferior e superior. A linha reta, conectando o bordo de ataque ao bordo de fuga, é a linha de corda, e a distância máxima entre a linha de corda e a linha de arqueação é chamada de arqueação. (ANDERSON, 1989)

Figura 8 – Característica geométricas dos perfis.



Fonte: Anderson (1989).

A espessura compreende a distância entre as superfícies inferior e superior do perfil. O formato da linha de arqueação, o valor de máxima arqueação, e de maneira menos influente a distribuição de espessura, são responsáveis pela capacidade de sustentação do hidrofólio. (ANDERSON, 1989)

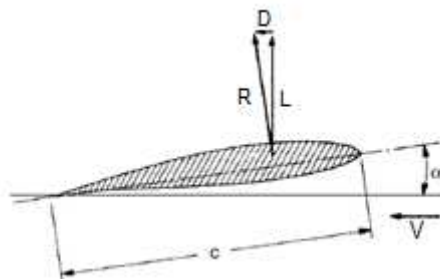
A figura 9 representa o comportamento simplificado do perfil. O ângulo entre a velocidade de incidência do fluido ( $V$ ) e a linha de corda é chamado ângulo de ataque ( $\alpha$ ). Uma força hidrodinâmica ( $R$ ) é criada pela distribuição de pressão e cisalhamento no perfil. Essa força pode ser decomposta em duas componentes, a sustentação ( $L$ ), perpendicular ao fluido, e o arrasto ( $D$ ), paralela ao fluido. (ANDERSON, 1989)

A área projetada\*\* ( $A$ ) é definida como a área projetada pelo hidrofólio na direção da força de sustentação para ângulo de ataque zero, ou seja, para a representação bidimensional da figura 9, a área seria o comprimento de corda ( $c$ ).

\*\* Na presente abordagem, a palavra “área”, quando relacionada a hidrofólio, refere-se à área projetada.

Tridimensionalmente, seria o comprimento de corda ( $c$ ) multiplicado pelo comprimento do hidrofólio. (FALTINSEN, 2005)

Figura 9 – Distribuição de forças no perfil de um hidrofólio.



Fonte: Adaptado de Faltinsen (2015).

Usualmente, os valores das forças de sustentação e de arrasto são definidos partir dos respectivos coeficientes, como:

$$C_L = \frac{L}{\frac{\rho}{2} V^2 A} \quad (11)$$

E

$$C_D = \frac{D}{\frac{\rho}{2} V^2 A} \quad (12)$$

Em que:

$A$  é a área projetada de hidrofólio;

$C_L$  é o coeficiente de sustentação;

$C_D$  é o coeficiente de arrasto;

$V$  é a velocidade do fluido;

$\rho$  é a densidade do fluido;

Ao estudar a implementação de hidrofólio em um navio PSV, Artmann (2015) utilizou a curva de resistência ao avanço da embarcação, juntamente com variações de calado, para que, de forma iterativa, a velocidade de *take-off* fosse encontrada.

O arrasto proporcionado pelo hidrofólio terá um efeito negativo na resistência total da embarcação, podendo ser somado à resistência ao avanço da mesma. No entanto, a sustentação hidrostática da embarcação pode ser somada com a sustentação hidrodinâmica proporcionada pelo hidrofólio, resultando na emersão do casco. (ARTMANN, 2015)

### 2.3.4 Perfis NACA

Nos Estados Unidos, o investimento no desenvolvimento de aeronaves foi intensificado, e com isso, foi criada a *National Advisory Committee for Aeronautic* (NACA), com o objetivo de integrar pesquisas e informações nesta área. Na metade do século a NACA foi extinta, e todas as informações e atividades foram transmitidas para a recém criada *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). (ANDERSON, 1989)

A NACA realizou muitos experimentos com hidrofólios, estimando assim os coeficientes de sustentação e arrasto de uma grande variedade de perfis, formando as famílias NACA. O formato de cada perfil NACA pode ser descrito utilizando um conjunto de números, precedidos pela palavra NACA. Os parâmetros descritos nos números podem ser utilizados para reproduzir, por meio de equações, os perfis, e calcular suas propriedades. (AIRFOIL TOOLS, 2016)

A família NACA de 5 dígitos é definida pela nomenclatura a seguir:

$$NACA L_{3/20}PQXX \quad (13)$$

Em que:

$L_{3/20}$  corresponde ao coeficiente de sustentação multiplicado por 3/20;

$P$  é a posição da arqueação máxima, dividida por 20;

$Q$  é 0 para arqueação normal, e 1 para arqueação reflexiva;

$XX$  é a máxima espessura do perfil, dividida por 100.

### 2.3.5 Hidrofólio em embarcações catamarã

De acordo com Faltinsen (2005), hidrofólios para catamarãs foram desenvolvidos especialmente na Noruega e no Japão, e podem proporcionar velocidades de até 50 nós.

A embarcação *Flying Phantom* faz parte de uma nova geração de catamarãs com hidrofólio. O conceito se baseia na combinação de hidrofólios secantes em formato de “L” próximo a meia nau da embarcação e hidrofólios completamente submersos em formato de “T” invertido, a ré. (FLYING PHANTOM..., 2016)

O *Flying Phantom* possui 5,52 metros de comprimento, 3 metros de boca, pesando 155 quilogramas, e atinge velocidades superiores a 30 nós. O modelo comercial fabricado pela *Sail Innovation®* pode ser visto na figura 10. (FLYING PHANTOM..., 2016)

figura 10 – Embarcação *Flying Phantom*.



Fonte: Flying Phantom... (2016).

## 2.4 O METODO NUMÉRICO

A teoria do corpo esbelto é um método numérico utilizado para solucionar problemas de escoamento com uma determinada condição de contorno. Para sua simplificação, é utilizada a teoria do escoamento potencial. Serão definidas na sequência, as simplificações necessárias para que a teoria do escoamento potencial possa ser utilizada, e como a teoria do corpo esbelto soluciona problemas de formação de ondas em embarcações.

### 2.4.1 Teoria de escoamento potencial e a teoria do corpo esbelto

#### 2.4.1.1 Simplificações

O desenvolvimento de um método teórico para prever o comportamento de navios em ondas é um problema hidrodinâmico, que, para sua solução matemática,

envolve alguma aproximações. Geralmente é assumido que o fluido é ideal, ou seja, invíscido e irrotacional, e homogêneo, para que a teoria do escoamento potencial possa ser utilizada. (FONSECA, 2004)

Embora a densidade da água do mar varie com o clima e localização, as variações são muito pequenas e podem ser desconsideradas, assumindo, então, que a água tem densidade constante. Por fim, a água também pode ser considerada incompressível pois o seu módulo de compressibilidade é muito elevado e as ondas ou ventos não provocam acelerações elevadas ao ponto dos efeitos de compressibilidade serem considerados. (FONSECA, 2004)

Em casos gerais, um escoamento é representado de forma vetorial pelo vetor de velocidade das partículas. Para que esse vetor de velocidade possa ser representado pelo gradiente de uma função escalar (potencial de velocidade), simplificando assim a análise, é necessário que o escoamento não tenha vorticidade, logo, o fluido deve ser irrotacional. Como a vorticidade do fluido é alterada pela ação da viscosidade, o fluido deve ser considerado invíscido. (FONSECA, 2004)

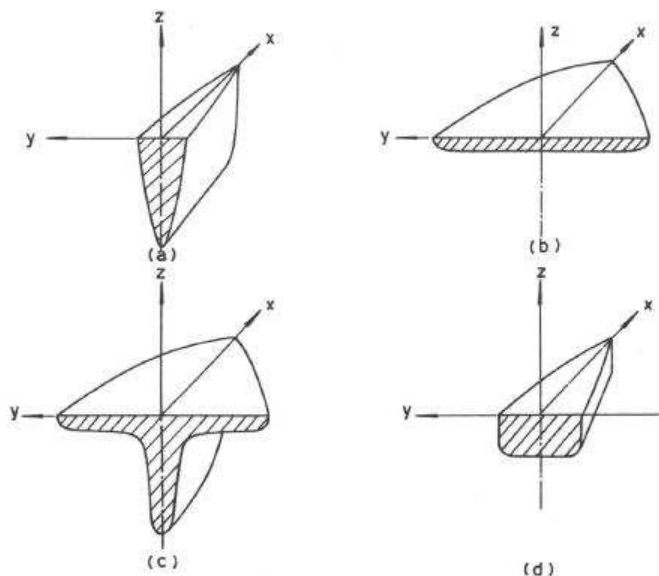
#### *2.4.1.2 A teoria do corpo esbelto*

A teoria de corpos esbeltos tridimensional provinda da aerodinâmica, foi adaptada como a teoria do corpo esbelto, para a hidrodinâmica. Essa pode ser aplicada para prever o comportamento de uma embarcação esbelta em uma superfície livre.

Vossers (1962), faz uma comparação sobre essa restrição de geometria, como é mostrado na figura 11.



Figura 11 – Comparação de geometria de cascos.



Geometria de cascos. Fonte: Vossers, 1962.

Analisando a figura 11, observa-se que embarcações finas tem uma boca pequena, comparada ao comprimento do casco (a), enquanto embarcações planas tem o calado pequeno, comparado ao comprimento do casco (b). A combinação de embarcações finas e planas resulta em embarcação tipo yacht (c). Já os corpos esbeltos têm tanto a boca, quanto o calado pequenos, quando comparados ao comprimento do casco (d).

De acordo com Vossers (1962), a principal ideia da teoria de corpos esbeltos é que, devido ao seu formato, o escoamento na vizinhança do casco pode ser aproximado negligenciando o primeiro termo da equação potencial (14), que corresponde à direção longitudinal de comprimento da embarcação.

$$\phi_{xx} + \phi_{yy} + \phi_{zz} = 0 \quad (14)$$

$$\phi_{yy} + \phi_{zz} = 0 \quad (15)$$

A equação, (14), torna-se então a equação (15), sendo bidimensional, de seção para seção da embarcação. Para se obter as forças atuantes no casco inteiro, basta integrar os resultados obtidos em cada seção.

Tuck (1964), no intuito de resolver o problema de fronteira no casco utilizando singularidades tridimensionais, aplicou a teoria do corpo esbelto deduzindo o potencial de velocidade em dois domínios, um na vizinhança do casco,

bidimensional, e outro no campo afastado do casco, com efeitos tridimensionais. As duas soluções separadas são sobrepostas para que o comportamento possa ser obtido. O escoamento é governado pela simplificação da equação de Laplace, a qual descreve a conservação de massa para escoamentos potenciais. (FONSECA, 2004)

Com o potencial de velocidade pode-se determinar o campo de velocidades do fluido, dentro das condições de fronteira, e finalmente, as pressões podem ser obtidas pela aplicação da equação de Bernoulli. (FONSECA, 2004)

Dentro das hipóteses assumidas, aquela que talvez induza algumas restrições, ou limitações aos projetos navais, é a de escoamento invíscido, principalmente para os efeitos viscosos de avanço. (FONSECA, 2004)

### 3 A EMBARCAÇÃO

O presente capítulo apresenta brevemente a embarcação Babbitonga, incluindo suas características principais e *layout*.

#### 3.1 Características principais

A embarcação Babbitonga foi montada a partir de cascos cedidos pela organização da competição Desafio Solar Brasil. Os dois cascos são idênticos, construídos em fibra de vidro com resina poliéster e gel coat, contendo três anteparas cada.

Para a participação nas competições, a equipe implementou sistemas mecânico, elétrico e de navegação. Os equipamentos necessários são os itens responsáveis pela massa de 312 quilogramas da embarcação, e dentre eles, os mais significativos são os dois cascos, as placas solares, o piloto e as baterias.

Estão dispostas na tabela 1 as características principais da embarcação.

Tabela 1 – Características principais da embarcação Babbitonga.

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Comprimento [m]	6
Boca do casco[m]	0,47
Boca máxima [m]	2,3
Pontal [m]	0,44
Calado [m]	0,148
Área molhada [m <sup>2</sup> ]	4,96
Peso total [kg]	312
Volume deslocado [m <sup>3</sup> ]	0,304
Raio $L/B$	12,7
Raio $B/T$	3,1
Raio $L/\nabla^{1/3}$	8,92
Coefficiente de bloco	0,44

Fonte: O autor (2016).

### 3.2 Layout

Assim como os cascos, os painéis fotovoltaicos também são fornecidos pelo evento, logo, possuem peso e medidas específicas. O conjunto de painéis é formado por quatro placas solares, cada uma medindo 1,6 metros de comprimento e 1 metro de largura. A distribuição das placas sobre o convés da embarcação é de responsabilidade da equipe, e como ocupam bastante área, são fortemente responsáveis pelo *layout* da embarcação.

Por questões práticas, as placas da equipe Babitonga não são posicionadas sobre a caixa de baterias, e por uma questão de distribuição de peso, são apoiadas no casco a boreste, na posição transversal, como pode ser visto na figura 12.

Figura 12 - *Layout* da embarcação Babitonga.



Fonte: Solar Babitonga (2016).

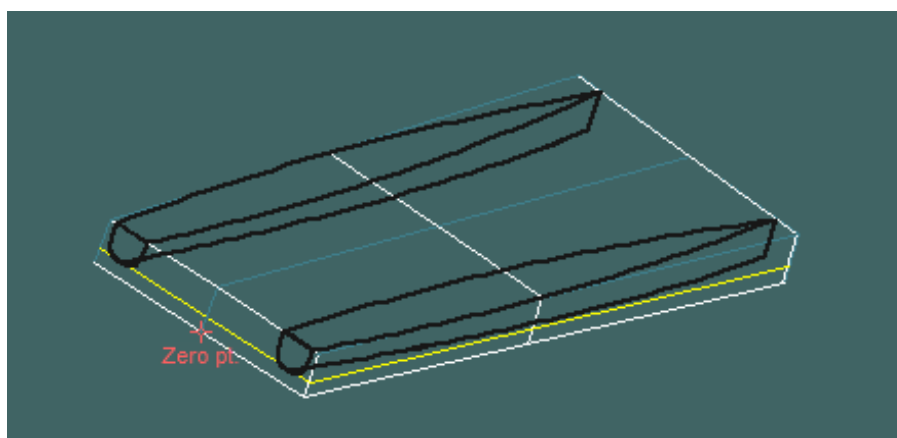
## 4 DESENVOLVIMENTO

Nesse capítulo será abordado, primeiramente, a modelagem e adequação de malha da geometria da embarcação. Serão definidas, posteriormente, as variações paramétricas de distância entre cascos, *BulbCats* e hidrofólio, envolvendo as motivações e limitações de cada estudo realizado.

### 4.1 MODELAGEM E ADEQUAÇÃO DE MALHA

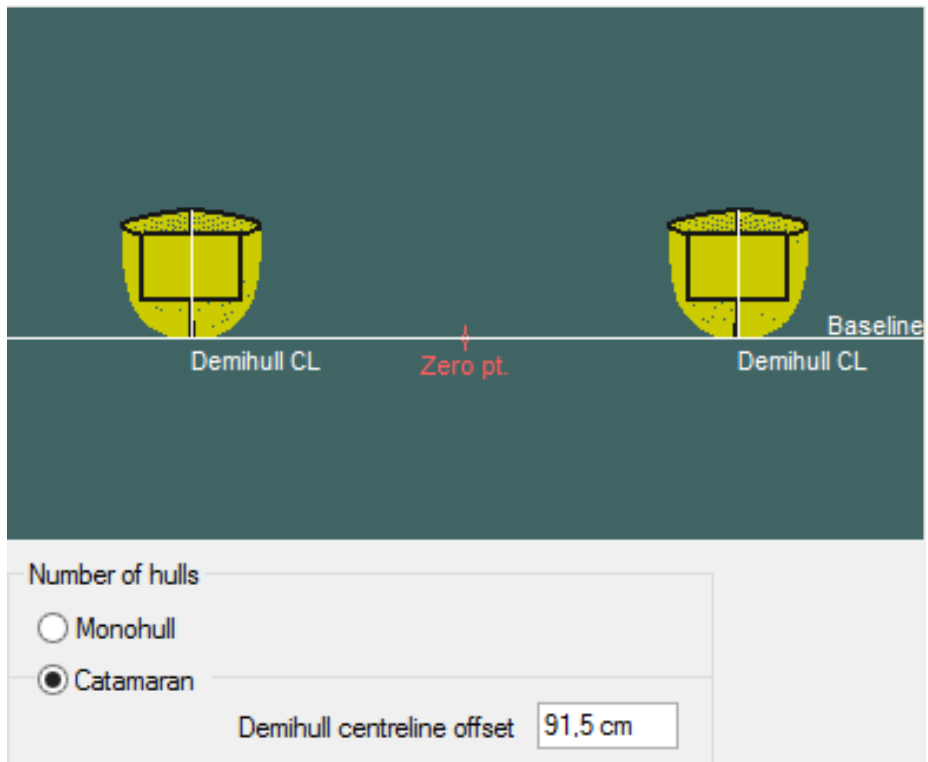
A partir do plano de linhas, a embarcação foi modelada no programa *Rhinoceros*, versão 5.0, utilizando o plano de balizas da embarcação para um casco, o qual foi espelhado. O casco foi então importado para o programa *Maxsurf Modeler*, como pode ser visto na figura 13. Ajustes considerando a distância entre cascos, na figura 14, e calado, na figura 15, foram realizados.

Figura 13 – Geometria importada para o *Maxsurf Modeler*



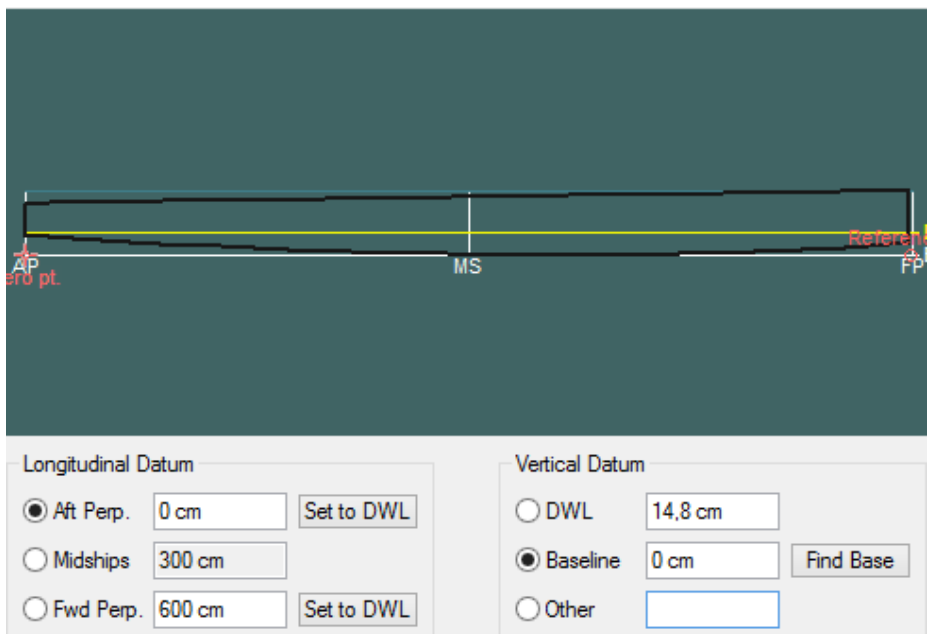
Fonte: O autor (2016).

Figura 14 - Ajustamento de distância entre cascos



Fonte: O autor (2016).

Figura 15 – Ajustamento de calado



Fonte: O autor (2016).

Para que a análise de resistência ao avanço possa ser realizada de maneira rápida e prática, métodos CFD (*Computational fluid dynamics*) são amplamente utilizados.

Eles são responsáveis pela resolução de problemas de escoamento através de soluções de Navier-Stokes (Lei da conservação de momento), junto à equação da continuidade (Conservação de massa), aplicada a modelos característicos. (FERZIGER & PERIC, 2002)

O *Maxsurf Resistance* é um programa que utiliza abordagem CFD para analisar a resistência de embarcações pelo método do corpo esbelto, relacionado à teoria do corpo esbelto citada no item 2.4.1. (BENTLEY SYSTEMS, 2013)

O método do corpo esbelto prevê apenas a resistência formada pelo padrão de ondas da embarcação, através da análise do escoamento potencial. Para estimar a resistência total, o *Maxsurf Resistance* adiciona a componente de resistência viscosa utilizando o método ITTC 1957 e o fator de forma para catamarã proposto por Molland et al. (2011), apresentados no item 2.1.1.2 e no item 2.1.2, respectivamente. (BENTLEY SYSTEMS, 2013)

Ao importar a geometria para o *Maxsurf Resistance*, a malha foi gerada, e o número de contornos utilizado pelo programa foi checado. A malha é composta por uma série de seções e linhas d'água, formando assim uma grelha retangular simétrica em torno do plano diametral do casco. Para um catamarã, isso significa que haverá uma malha formada em torno de cada meio casco isolado, que será simétrica em relação a linha de centro do casco em questão. (BENTLEY SYSTEMS, 2013)

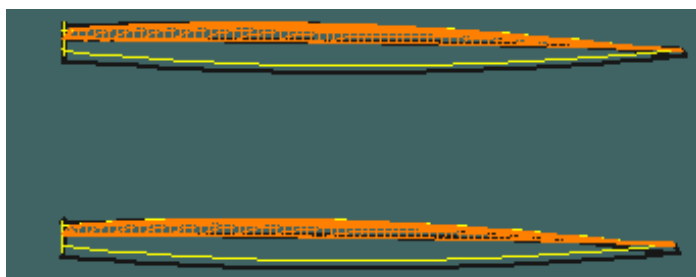
Para satisfazer a teoria do método do corpo esbelto, a malha deve iniciar e terminar com linhas d'água que sejam conectadas à linha de centro, então a proa e a popa devem conter seções de pontos com valor zero. (BENTLEY SYSTEMS, 2013)

Para embarcações com popa transom, uma malha totalmente ajustada à embarcação estaria infringindo o requisito acima citado, então o programa adiciona automaticamente um apêndice virtual a ré da embarcação. O efeito desse apêndice é a conexão de todas as linhas d'águas na linha de centro da embarcação. O apêndice não é incluído no cálculo de área molhada, ele apenas é utilizado para

satisfazer o modelo numérico utilizado no cálculo de resistência de ondas. (BENTLEY SYSTEMS, 2013)

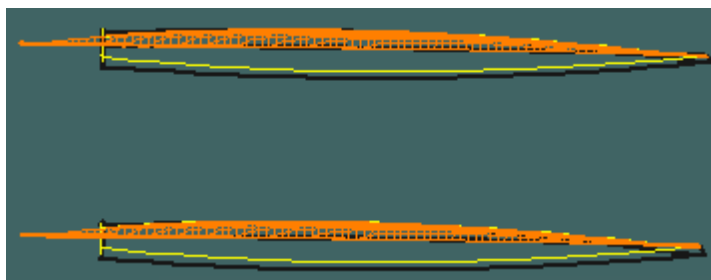
A remoção do apêndice virtual pode ser feita mecanicamente, mas, ela irá afetar os cálculos de resistência e também a geração do padrão de ondas, por isso, o apêndice foi mantido. O detalhamento da popa transom da embarcação Babitonga, com e sem ajuste, pode ser visualizado na figura 16 e figura 17. (BENTLEY SYSTEMS, 2013)

Figura 16 – Malha ajustada na região da popa transom da embarcação Babitonga.



Fonte: O autor (2016).

Figura 17 – Malha gerada automaticamente na região da popa transom da embarcação Babitonga.



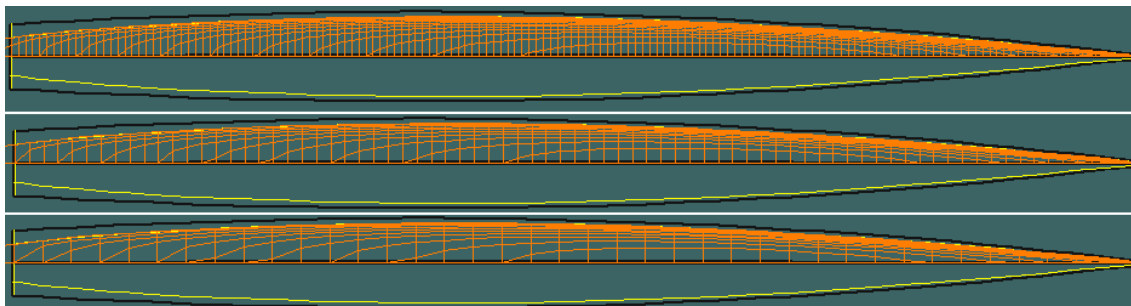
Fonte: O autor (2016).

O refinamento da malha pode ser ajustado por meio da modificação do número de seções em que o casco será dividido, alterando-se assim o número de linhas d'águas. Quanto maior for o número de seções, melhor é a precisão dos resultados esperados, mas maior será o tempo de análise. (BENTLEY SYSTEMS, 2013)

O número de seções padrão do programa é de 81 divisões. Para averiguar a variação dos resultados com o refinamento da malha, a resistência ao avanço da embarcação Babitonga foi simulada, em uma faixa de 0 a 20 nós, e os resultados das modificações de resistência mais significativos podem ser vistos na tabela 2. A formação de malha para 162, 81 e 40 seções pode ser vista na figura 18.



Figura 18 – Variação do número de seções na formação de malha. (162 seções, acima, 81 seções, ao meio e 40 seções, abaixo).



Fonte: O autor (2016).

Tabela 2 – Modificação na resistência com o refinamento de malha.

Número de Seções	Modificação de resistência [N]
27	-0,4
40	-0,3
81	Automático
162	0
243	0

Fonte: O autor (2016).

Avaliando a tabela 2, foi concluído que não há modificação nos valores de resistência com o aumento do número de seções, quando comparado ao número automático sugerido pelo programa. E ainda, o tempo computacional tornava-se maior. A diminuição do número de seções resultou na diminuição de praticamente todos os valores de resistência da faixa de velocidade analisada. Ainda que a modificação fosse pequena, o ganho em tempo na simulação era praticamente imperceptível. A malha automática gerada pelo programa foi, portanto, utilizada.

#### 4.2 INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA ENTRE CASCOS

A curva de resistência ao avanço de uma embarcação vem a ser importante para a realização de projetos navais, sendo necessária para avaliar melhorias de desempenho, estimar gastos energéticos, entre outros. A validação de um método para a sua obtenção de maneira rápida e barata, mesmo que aproximada, foi a grande motivação do presente trabalho.

Juntamente com a resistência ao avanço, a análise de interferência proporcionada pelo *layout* da embarcação é uma das questões mais intrigantes em cascos catamarãs, principalmente no quesito distância entre cascos. Por esse motivo, a análise da influência da distância entre cascos na resistência ao avanço torna-se importante para o projeto eficiente de embarcações do tipo catamarã. (MOLLAND ET AL., 1994)

De acordo com Molland et al. (1994), o padrão de ondas formado pelo catamarã pode provocar uma interferência positiva entre os cascos, resultando assim, em uma melhora no coeficiente de resistência de ondas, quando comparado a um dos cascos analisado isoladamente.

O intuito dessa etapa, além da obtenção da curva de resistência ao avanço, visa avaliar o comportamento da resistência de ondas com o distanciamento entre cascos, a fim de estipular qual configuração seria mais adequada para a embarcação Babitonga, ou seja, qual teria menor influência na resistência ao avanço total. Em suma, os seguintes objetivos puderam ser estabelecidos:

- Obter a curva de resistência ao avanço da embarcação Babitonga e relacioná-la com os estudos de Molland et al. (1994).
- Encontrar a configuração de boca que resulta em menor resistência ao avanço.

#### **4.2.1 Definição das variações paramétricas**

Foram avaliadas distâncias entre cascos próprias para a embarcação Babitonga, conforme os limites abaixo:

- De acordo com as Regras de Competição do Desafio Solar Brasil 2015, a boca máxima do catamarã não deve exceder 2,4 metros.
- De acordo com as necessidades da equipe, a boca máxima da embarcação não deve ser menor que 2 metros, visando viabilizar o posicionamento dos painéis solares.

O segundo requisito leva em conta o posicionamento transversal das placas solares. Com a boca total do catamarã menor que 2 metros, os painéis ficariam mais que 20 centímetros sem apoio, originando uma preocupação estrutural devido ao balanço.

Optou-se por fazer três variações paramétricas, considerando os extremos valores de boca possíveis, 2 metros e 2,4 metros, e um valor intermediário, de 2,2 metros, de acordo com a tabela 3.

Tabela 3 – Variações paramétricas de valor de boca.

<b>Varição Paramétrica</b>	<b>Valor de Boca [m]</b>
1	2
2	2,2
3	2,4

Fonte: O autor (2016).

A variação dos modelos foi feita movendo as superfícies do casco no programa *Maxsurf Modeler*, e adequando o valor de distância entre cascos, como mostrado na figura 14 do item 4.1. Para a obtenção do fator de interferência de ondas, um casco do catamarã foi analisado separadamente.

#### 4.3 IMPLEMENTAÇÃO DE APÊNDICE BULBCAT

Bulbos são, de maneira geral, utilizados para diminuir a resistência de onda de embarcações de grande porte. No caso da embarcação Babitonga, o estudo de implementação do apêndice *BulbCat* é movido por dois objetivos:

- Modificar o escoamento na região do motor.
- Diminuir a resistência ao avanço da embarcação.

O motor está localizado a ré da embarcação, posicionado entre os cascos. A interferência dos sistemas de onda do catamarã forma uma cava no plano diametral, que cruza o motor em aproximadamente 6,75 nós, acarretando na ventilação do hélice. O intuito foi, então, procurar por um apêndice que modificasse o escoamento

nessa região, sem que o eixo do motor precisasse ser alongado, e ao mesmo tempo, reduzisse a resistência ao avanço da embarcação.

#### **4.3.1 Definição das variações paramétricas**

Inspirado nos trabalhos de Zotti (2007), o presente projeto propôs a inserção de *BulbCats* como um apêndice na embarcação Babitonga. A determinação das variações paramétricas envolveu o seguinte limite:

- A posição longitudinal do apêndice não deve exceder o comprimento da embarcação.
- O apêndice não deve se sobrepor ao propulsor.

De acordo com as Regras de Competição do Desafio Solar Brasil 2015, o comprimento das embarcações é limitado em 6 metros. Como essa extensão já é alcançada pelo casco, o posicionamento do apêndice deve compreender esse comprimento.

Os corpos de revolução que foram empregados na embarcação Babitonga provém da série sistemática realizada por Gertier (1950). Os modelos foram escolhidos e escalados, de acordo com a necessidade de cada variação. As características dos modelos utilizados podem ser vistas na tabela 4.

Para o estudo de comportamento da embarcação com o apêndice foram propostas duas variações paramétricas. Como, de acordo com Kracht (1978), a posição do bulbo e seu volume são parâmetros importantes para a formação de onda do mesmo, optou-se por variar primeiramente o volume do apêndice, mantendo o comprimento constante, e modificando-se a relação  $L/D$ , como mostrado na tabela 4.

Tabela 4 - Corpos de revolução utilizados e variações paramétricas de raio  $L/D$ .

<b>Varição Paramétrica</b>	<b>Modelo</b>	<b>m</b>	<b><math>r_0</math></b>	<b><math>r_1</math></b>	<b><math>C_p</math></b>	<b><math>L/D</math></b>
4	4154	0,4	0,5	0,1	0,65	4,0
5	4155	0,4	0,5	0,1	0,65	5,0
6	4156	0,4	0,5	0,1	0,65	6,0
7	4157	0,4	0,5	0,1	0,65	7,0
8	4158	0,4	0,5	0,1	0,65	8,0
9	4159	0,4	0,5	0,1	0,65	10,0

Fonte: Gertier (1950); O autor (2016).

A partir dos resultados encontrados, foi variada a posição longitudinal de um dos apêndices em questão, sendo ele o corpo de revolução 4149. As variações de posição podem ser vistas na tabela 5.

Tabela 5 - Variações paramétricas de posição longitudinal do apêndice.

<b>Varição Paramétrica</b>	<b>Posição longitudinal do apêndice [m]</b>
10	3
11	4
12	5
13	6

Fonte: O autor (2016).

Baseando-se em conclusões obtidas por Kracht (1978), a posição vertical de todos os apêndices testados foi próxima à linha d'água, com o apêndice totalmente submerso, representando a localização com interferência mais significativa.

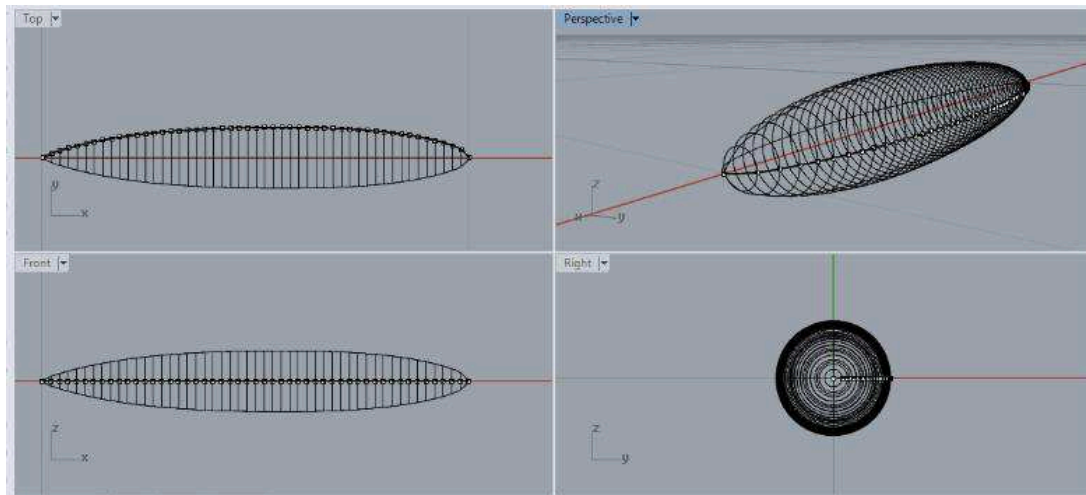
Para as variações de volume de apêndice, todos foram mantidos em 6 metros, a vante da embarcação, e com 1 metro de comprimento. A partir da modelagem de todas as variações, foram obtidas as curvas de coeficiente de onda para cada variação paramétrica proposta. Paralelamente, foi analisado o comportamento de ondas na velocidade de 6,75 nós para cada variação.

#### 4.3.2 Modelagem dos arranjos analisados

A modelagem dos apêndices foi realizada no programa *Rhinoceros*, a partir dos parâmetros propostos na série sistemática de Gertier (1950), como pode ser

visto na figura 19. Os apêndices foram anexados à embarcação com boca de 2,3 metros no *Maxsurf Modeler*.

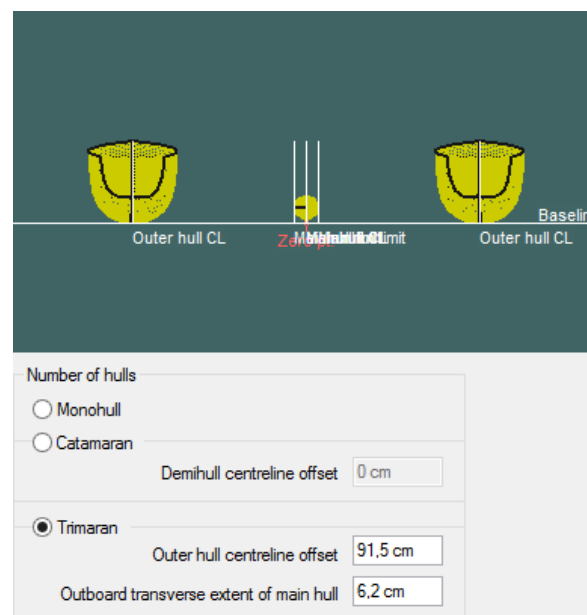
Figura 19 – Modelagem de apêndice.



Fonte: O autor (2016).

Para a implementação dos apêndices, a embarcação foi considerada como um trimarã e os valores de distância entre cascos externos e diâmetro do apêndice foram inseridos no programa, como pode ser visto na figura 20.

Figura 20 – Ajuste de distância entre cascos e diâmetro do apêndice.

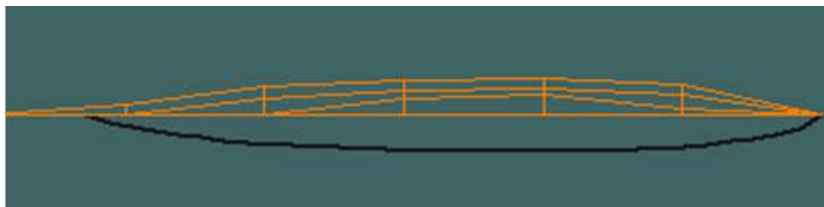


Fonte: O autor (2016).

Ao examinar a formação de malha automática do programa *Maxsurf Resistance*, notou-se que o número de seções convenientes para a análise do casco

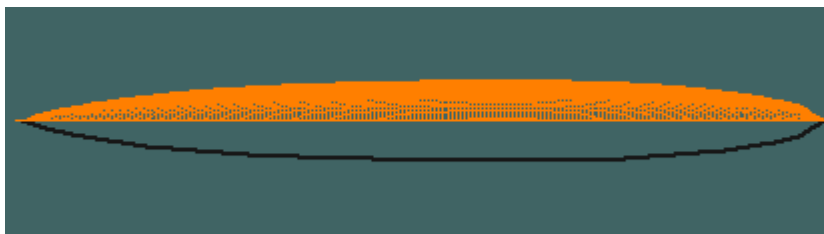
não seria conveniente para o apêndice, pois alguns detalhes da geometria estavam sendo perdidos. Para que os resultados convergissem, em alguns casos de apêndices menores, a malha foi refinada em até 250 seções. A figura 21 mostra a malha gerada automaticamente, e a figura 22, a malha refinada.

Figura 21 – Malha do apêndice gerada automaticamente.



Fonte: O autor (2016).

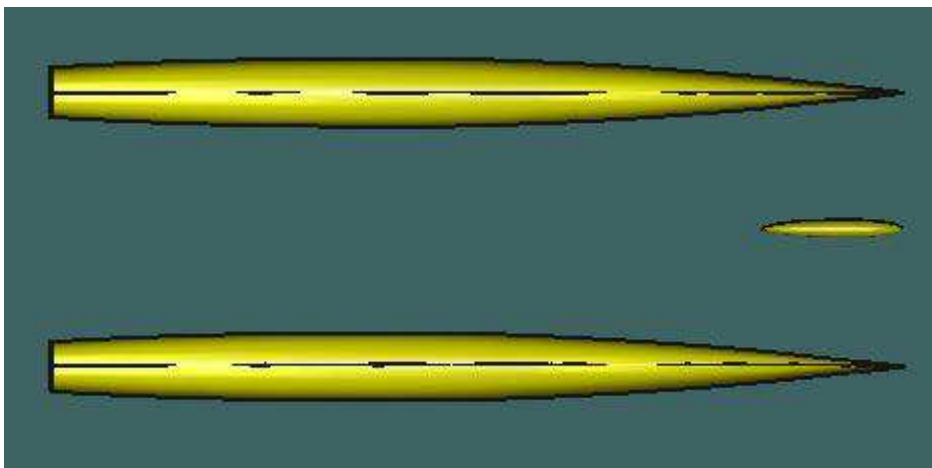
Figura 22 – Malha do apêndice refinada.



Fonte: O autor (2016).

A figura 23 contém a modelagem final da embarcação com o apêndice *BulbCat*.

Figura 23 – Vista superior da modelagem embarcação juntamente com o apêndice *BulbCat*.



Fonte: O autor (2016).

#### 4.4 IMPLEMENTAÇÃO DE HIDROFÓLIO

No Desafio Solar Brasil, três das cinco provas realizadas são de longa distância. Elas são decisivas para o resultado da competição, pois seus pesos são elevados. O objetivo da implementação de hidrofólio na embarcação Babitonga é melhorar seu desempenho nas provas longas, aumentando a velocidade da embarcação. Foram, então, traçados três objetivos para o projeto de hidrofólio, sendo eles:

- Aumentar a velocidade em, no mínimo, 5 nós.
- Obter velocidade de *take-off* próxima a 6,75 nós.
- Alcançar a velocidade requerida sem modificar a motorização da embarcação.

A velocidade de *take-off* vem a ser um requisito de navegação devido à localização do motor. O intuito é retirar consideravelmente a embarcação da água antes que o efeito de ventilação do hélice possa acontecer.

O desenvolvimento do hidrofólio para a embarcação foi realizado em quatro etapas, detalhadas a seguir.

##### 4.4.1 Escolha do perfil hidrodinâmico

A escolha do perfil foi realizada observando os coeficientes de sustentação e arrasto de diferentes geometrias das famílias NACA, sendo que a melhor relação  $C_L/C_D$  foi procurada.

A ferramenta *Airfoil Tools* fornece uma base de dados de perfis, com seus valores de coeficientes, e ainda, com variação de ângulo de ataque. A maior relação encontrada foi a do perfil NACA 25112 com angulação de 7,5 graus. Suas características podem ser visualizadas na tabela 6.



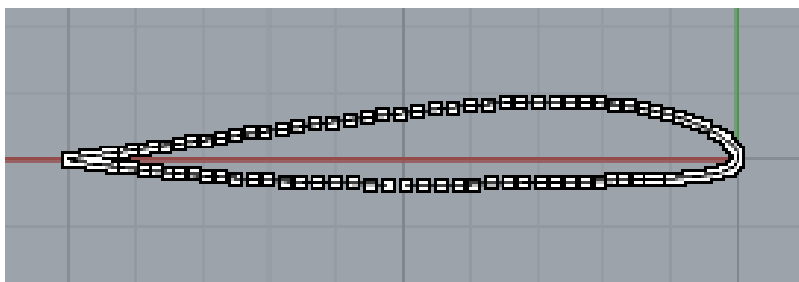
Tabela 6 – Características do perfil NACA 25112

Características do perfil NACA 25112	
<b>Coeficiente de sustentação 0°</b>	0,3
<b>Posição do máximo arqueamento</b>	25% da corda
<b>Tipo de arqueação</b>	Reflexiva
<b>Máxima espessura do perfil</b>	12% da corda
<b>Ângulo de ataque</b>	7,5°
<b>Coeficiente de sustentação 7,5°</b>	1,046
<b>Coeficiente de arrasto 7,5°</b>	0,00954
<b>Relação Cl/Cd</b>	109,63
<b>Número de Reynolds avaliado</b>	1.000.000

Fonte: O autor (2016).

Os pontos que formam a geometria do perfil puderam ser obtidos também a partir da ferramenta *Airfoil Tools* e foram utilizados para modelagem do perfil no programa *Rhinoceros*, como pode ser visto na figura 24.

Figura 24 – Geometria do perfil NACA 25112 sem angulação.



Fonte: O autor (2016).

#### 4.4.2 Definição das variações paramétricas

Um importante parâmetro para o projeto é a área de hidrofólio necessária para que a velocidade requerida seja alcançada. A sua estimativa é delicada pois ela está diretamente relacionada à sustentação, mas inversamente ao arrasto. Considerando o peso da embarcação Babbitonga, no valor de 312 quilogramas, pôde ser definida uma área mínima e uma área máxima para a variação paramétrica.

Com a potência de baterias disponível de 1500 Watts, e considerando a eficiência do sistema elétrico e mecânico de 52,35%<sup>\*\*\*</sup>, a embarcação sem hidrofólio chegaria a 7,9 nós. A partir dessa velocidade, foi estimada pela equação (11), e é mostrado na sequência, a área mínima de hidrofólio para que a embarcação fosse completamente sustentada, considerando que a máxima velocidade para *take-off* seria de 7,9 nós.

$$A = \frac{312[\text{kg}] * 9,81[\text{m/s}^2]}{1,046 * \frac{1025}{2} [\text{kg/m}^3] * (7,9[\text{nós}] * 0,5144)^2} = 0,35[\text{m}^2]$$

Após o *take-off*, a resistência do casco da embarcação passa a ser desconsiderada, e na presente abordagem, apenas o arrasto do hidrofólio é contabilizado.

Para cálculo de área máxima, são levados dois fatores em consideração. O primeiro é que a potência necessária para vencer o arrasto do hidrofólio não deve exceder a potência disponível, que, considerando a eficiência do sistema, equivale a 785,25 Watts. E o segundo, é a estimativa da velocidade máxima alcançada pela embarcação, de 13 nós. Com base na equação (12), a área máxima de hidrofólio pôde ser calculada, como segue.

$$A = \frac{785,25[\text{W}]/(13[\text{nós}] * 0,5144)}{0,00954 * \frac{1025}{2} [\text{kg/m}^3] * (13[\text{nós}] * 0,5144)^2} = 0,53\text{m}^2$$

As limitações para a variação paramétrica de área de hidrofólio vieram a ser, então:

- A área de hidrofólio não deve ser menor que 0,35m<sup>2</sup>.
- A área de hidrofólio não deve ser maior que 0,53m<sup>2</sup>.

A partir dos limites mencionados, as variações paramétricas foram definidas de acordo com a tabela 7. O comportamento da embarcação na presença de hidrofólio foi avaliado para cada variação.

---

<sup>\*\*\*</sup> Valor baseado na experiência da equipe adquirida ao longo dos anos.

Tabela 7 – Variações paramétricas de área de hidrofólio.

Varição Paramétrica	Área [m <sup>2</sup> ]
14	0,35
15	0,38
16	0,41
17	0,44
18	0,47
19	0,50
20	0,53

Fonte: O autor (2016).

#### 4.4.3 Comportamento da embarcação na presença de hidrofólio

A fim de prever o comportamento da embarcação na presença de hidrofólio, a ferramenta *Excel* foi utilizada. Primeiramente foi calculada a capacidade de sustentação do hidrofólio, em quilogramas, para uma faixa de velocidade de 0 a 13 nós.

De acordo com o aumento de velocidade, e conseqüentemente, de sustentação, o calado da embarcação tornava-se menor, diminuindo assim sua resistência, até anulá-la quando a sustentação igualava-se ao peso da embarcação. Para cada nova condição de calado, a curva de resistência do casco foi obtida. A velocidade de *take-off* pôde ser encontrada quando a sustentação do hidrofólio coincidia com o peso da embarcação.

Na seqüência, foi calculado o arrasto gerado pelo hidrofólio, e este foi somado à resistência do casco, para assim obter a resistência final do conjunto \*\*\*\*.

A partir da curva de resistência do conjunto, pôde-se obter a curva de potência pela equação (1), apresentada no item 2.1. Uma comparação das potências resultantes com a potência disponível fornecia a velocidade máxima que a embarcação poderia alcançar com determinada área de hidrofólio. Nos casos em que a potência necessária para atingir a meta de velocidade era menor que a potência disponível, a faixa de velocidade estudada era aumentada.

\*\*\*\* Na presente abordagem, a palavra “conjunto” refere-se à embarcação na presença de hidrofólio.

#### 4.4.4 Modelagem do hidrofólio

Com a área de hidrofólio necessária conhecida, o próximo passo foi elaborar uma primeira configuração de distribuição dos fólios, inspirada na embarcação *Flying Phantom*, ou seja, a área foi dividida em quatro hidrofólios, sendo dois completamente submersos para auxiliar na elevação da embarcação, e dois secantes para auxiliar na estabilidade.

A modelagem da distribuição final da área de hidrofólio foi realizada utilizando o programa *SolidWorks*, cujos resultados serão apresentados no próximo capítulo.

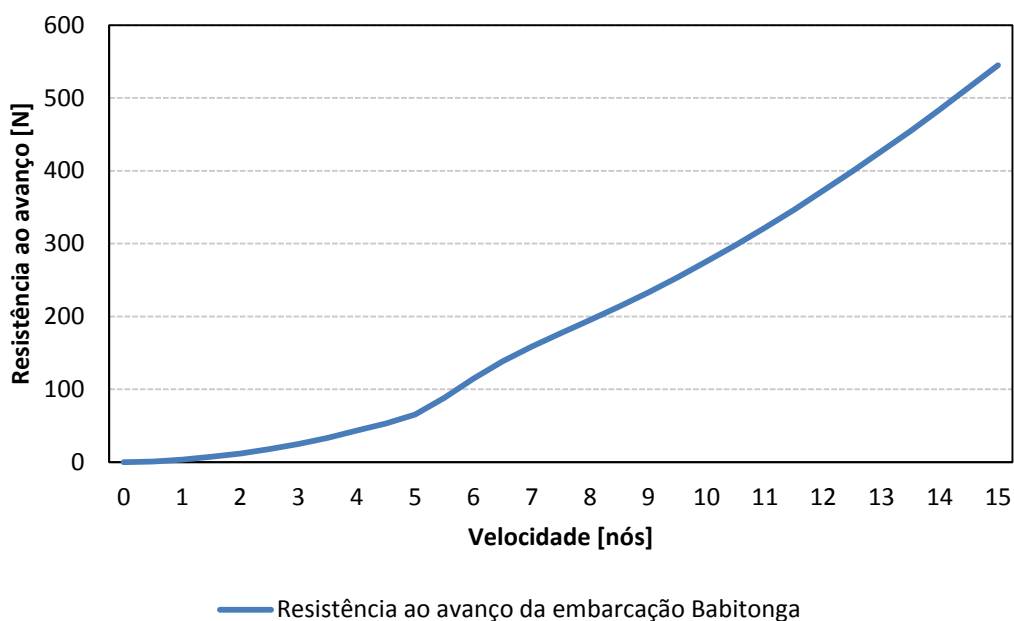
## 5 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são, primeiramente, realizadas considerações sobre a curva de resistência ao avanço da embarcação obtida através do método numérico. Posteriormente, são realizadas análises sobre a influência das variações paramétricas propostas na resistência ao avanço e no escoamento entre cascos.

### 5.1 RESISTÊNCIA AO AVANÇO E DISTÂNCIA ENTRE CASCOS

O primeiro passo da análise envolveu a obtenção da curva de resistência ao avanço da embarcação Babitonga com boca de 2,3 metros, e pode ser vista na figura 25.

Figura 25 – Curva de resistência ao avanço da embarcação Babitonga com boca de 2,3 metros.

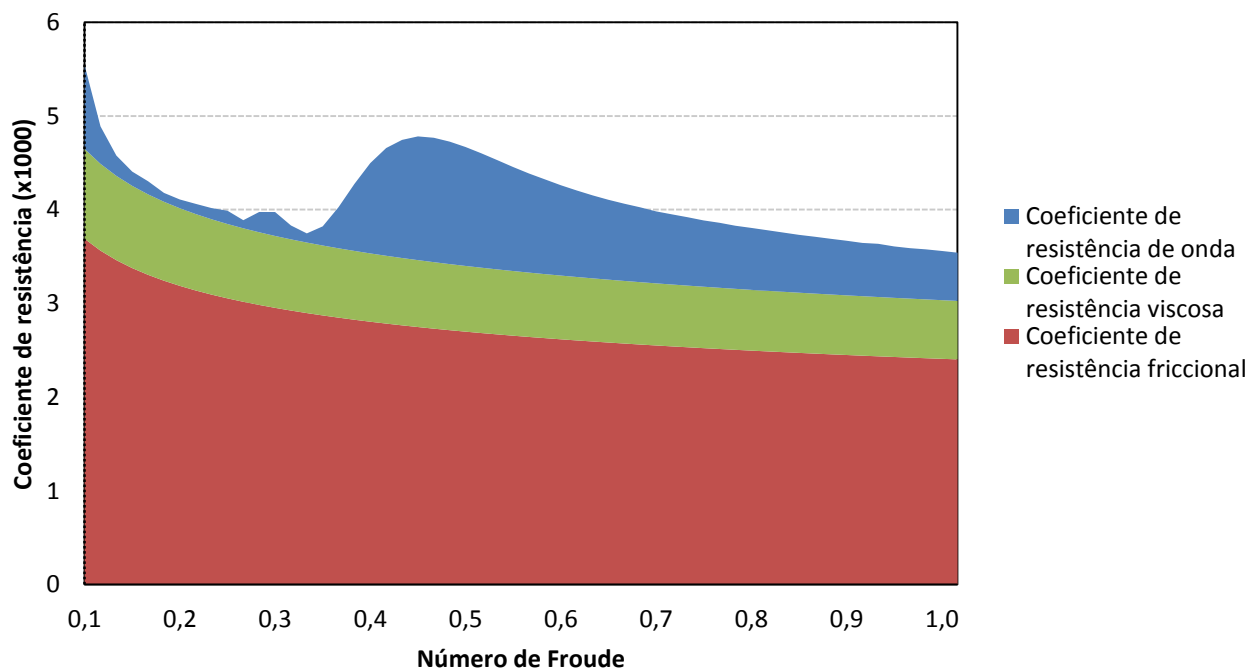


Fonte: O autor (2016).

Pelo gráfico obtido para a resistência, pode-se ter uma primeira noção do seu comportamento. Os valores de velocidade atualmente alcançados ocupam a primeira metade do gráfico, até aproximadamente 8 nós, e 200 Newtons de resistência. Nessa região, pode-se notar uma variação no formato da curva, possivelmente causado pela resistência de onda.

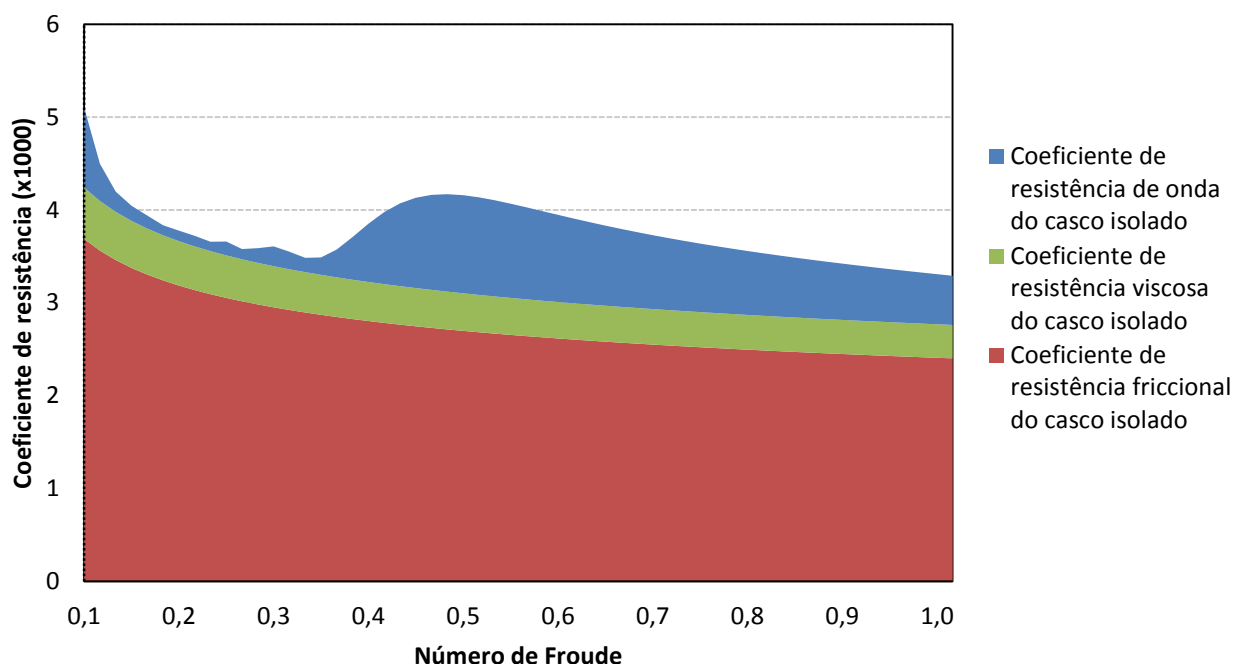
Para que a influência das componentes de resistência se tornasse mais perceptível, o gráfico da figura 26 foi elaborado. Ele demonstra os valores dos coeficientes de resistência friccional e viscosa, em seu valor exato, e o valor de coeficiente de onda, de maneira acumulada. O mesmo gráfico foi elaborado para um dos cascos analisado isoladamente, e pode ser visto na figura 27. Para a composição do coeficiente de resistência total, o método de Hughes-Prohaska, detalhado no item 2.1.1.6 foi utilizado.

Figura 26 – Componentes do coeficiente de resistência ao avanço do catamarã Babitonga



Fonte: O autor (2016).

Figura 27 – Componentes do coeficiente de resistência ao avanço do casco isolado da embarcação Babitonga.



Fonte: O autor (2016).

Os testes realizados por Molland et al. (1994) abrangem um número considerável de modelos e variações de distância entre cascos. Dentre eles, foram selecionados dois modelos com relações semelhantes à embarcação Babitonga, como pode ser visto na tabela 8.

Tabela 8 – Características do catamarã Babitonga e dos modelos 5a e 6c testados por Molland et al. (1994).

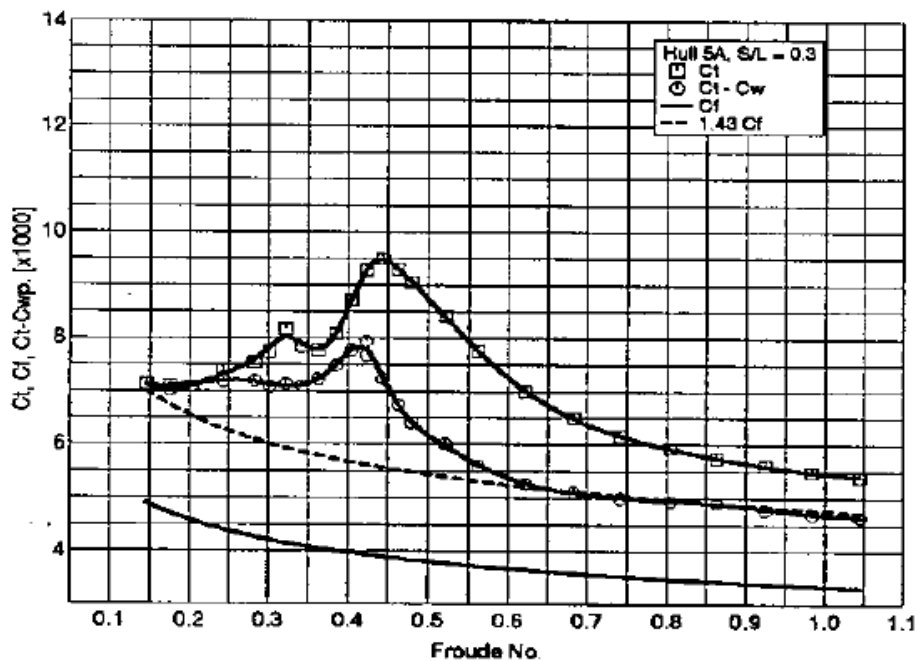
<b>Casco</b>	<b><math>L/B</math></b>	<b><math>B/T</math></b>	<b><math>L/\nabla^{1/3}</math></b>	<b><math>C_B</math></b>	<b><math>S/L</math></b>
Babitonga	12,7	3,1	8,92	0,44	0,3
5a	12,8	1,5	8,51	0,397	0,3
6c	11,7	2,5	9,5	0,397	0,3

Fonte: Adaptado de Molland et al. (1994).

O modelo 5a foi escolhido devido a semelhança na relação  $L/B$ , enquanto o modelo 6c foi escolhido devido a maior semelhança na relação  $B/T$  encontrada. A relação  $L/\nabla^{1/3}$  da embarcação Babitonga estaria entre os valores dos modelos.

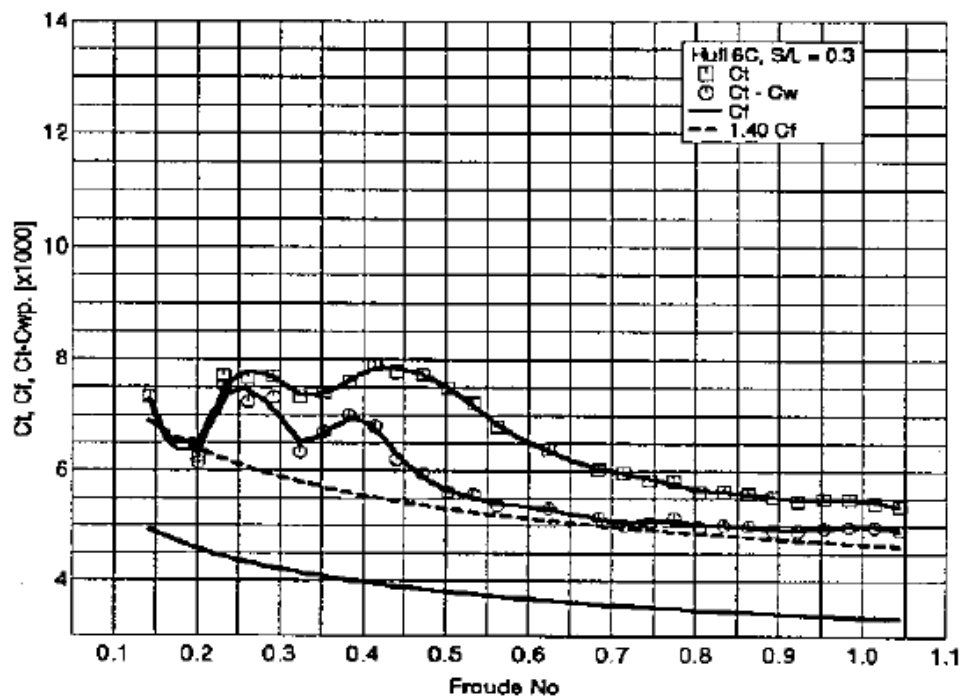
As curvas de resistência, considerando a resistência friccional, viscosa e total para os modelos 5a e 6c, podem ser vistas nas figuras 28 e 29, para números de Froude variando de 0,1 a 1,0.

Figura 28 - Componentes do coeficiente de resistência ao avanço do modelo 5a.



Fonte: Molland et al. (1994).

Figura 29 – Componentes do coeficiente de resistência ao avanço do modelo 6c.



Fonte: Molland et al. (1994).



Ao comparar as figuras 28 e 29, com a figura 26, pode-se notar uma semelhança entre o comportamento das componentes de resistência das três embarcações.

A componente de resistência friccional é calculada, nos três casos, pelo método ITTC 1957, explicitando assim, sua semelhança em valor e comportamento, sendo que a diferença entre elas é possivelmente associada ao comprimento dos modelos, de 1,6 metros.

Na parcela de resistência viscosa pôde-se notar uma similaridade de comportamento, mas não de valor. O provável motivo para essa diferença está nos fatores de forma relativamente altos utilizados nos testes. Em Molland et al. (2011), essa correção é realizada, e é proposta a formulação (8) e (9).

O destaque da comparação dos gráficos está na parcela de onda. Pode ser observada uma semelhança em comportamento, e levando em conta que os modelos foram testados em ensaios experimentais, e a embarcação Babitonga foi simulada através de método numérico utilizando escoamento potencial, os resultados puderam ser considerados satisfatórios. É possível que a diferença existente entre os valores de coeficientes de onda sejam atribuídos ao fato de o método numérico fazer aproximações, sendo uma delas, a consideração de fluido invíscido, e também, à diferença das características dos modelos, baseado na conclusão de Molland et al. (1994), que, quanto mais esbelto for o corpo, ou seja, menores seus calado e boca em relação ao comprimento, menor será sua resistência de onda.

De acordo com Insel & Molland (1991), espera-se que o comportamento dos coeficiente de resistência ao avanço do catamarã e do casco isolado sejam semelhantes, e isso pode ser visualizado nos gráficos das figuras 26 e 27.

Uma comparação entre os fatores de interferência residual dos testes realizados por Molland et al. (1994) e da embarcação Babitonga pode ser vista no apêndice A.

### 5.1.1 Considerações sobre o fator de interferência viscosa ( $\beta$ )

Ao analisar a composição de resistência para o casco isolado, nota-se que o coeficiente de resistência friccional permanece com os mesmos valores que para o catamarã, como já era esperado por conta da utilização do método ITTC 1957.

Já o coeficiente de resistência viscosa, é consideravelmente menor. O aumento dessa resistência no catamarã acontece devido à presença do fator de interferência viscosa, que responde tanto pela mudança do campo de pressão em torno dos cascos, quanto pela mudança da velocidade do escoamento entre eles. A obtenção do fator de interferência  $\beta$  é mostrada a seguir.

Se o fator de forma do monocasco corresponde a:

$$(1 + k) = 1,15$$

E o fator de forma do catamarã a:

$$(1 + \beta k) = 1,26$$

Então,

$$k = 0,15, e \beta = 1,73$$

É importante notar que o valor de  $\beta$ , assim como o fator de forma do monocasco, é invariável com a velocidade. Ele também será invariável com a distância entre cascos do catamarã, sendo que é dependente do fator de forma, e este só depende do comprimento da embarcação e do seu volume deslocado, como mostrado nas equações (8) e (9).

### 5.1.2 Considerações sobre o fator de interferência de resistência de onda ( $\tau$ )

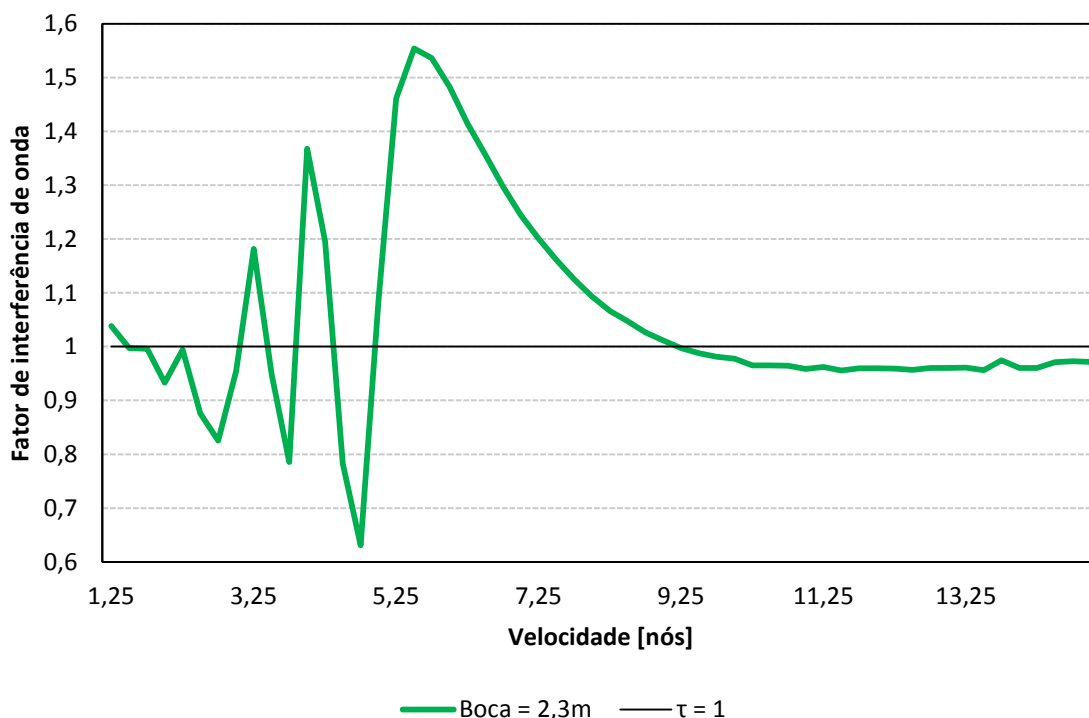
O valor de interferência de resistência de onda pode ser obtido pela equação (6), mostrada no item 2.1.2. Ao comparar os gráficos das figuras 26 e 27, pode-se notar que a diferença entre o coeficiente de onda do monocasco e do catamarã não permanece constante com a variação de velocidade.

O gráfico mostrado na figura 30 contém os valores do fator de interferência de onda para a boca de 2,3 metros. Os valores de  $\tau$  menores que 1 indicam que o

coeficiente de resistência de ondas é menor para o catamarã que para o monocasco, e os valor de  $\tau$  maiores que 1, indicam o oposto.

Com isso, é permitido concluir que a interferência de ondas ocasionada pela montagem do catamarã pode ser favorável ao coeficiente de resistência ao avanço, ou prejudicial, dependendo da velocidade em questão.

Figura 30 – Variação do fator de interferência de onda para a embarcação Babbitonga.

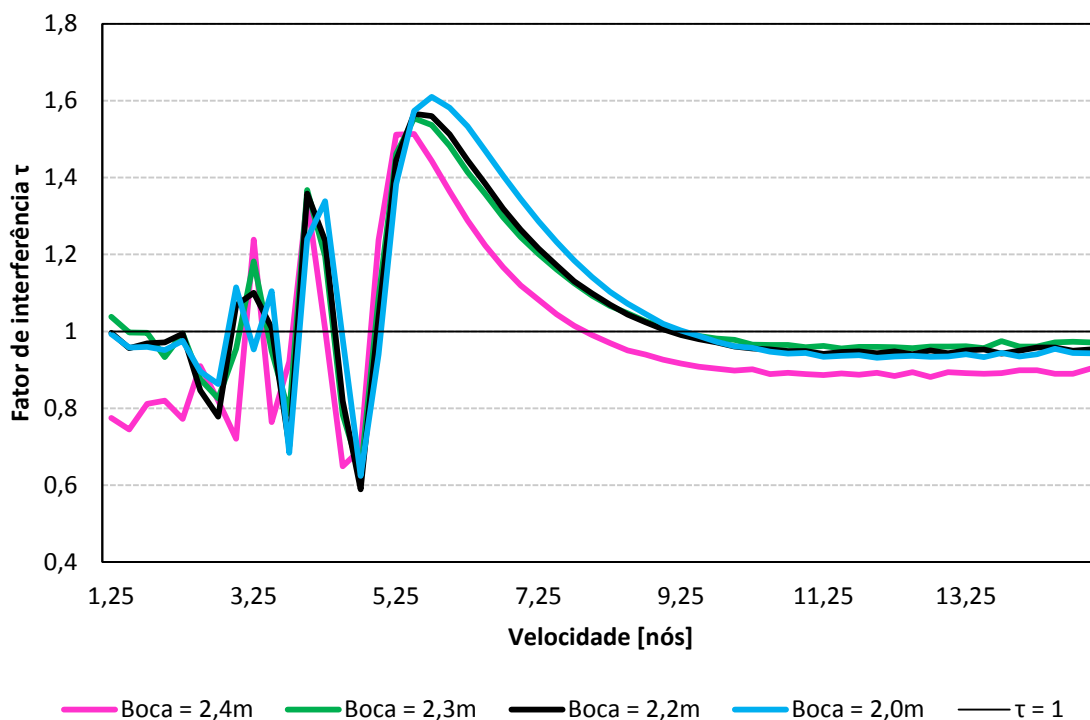


Fonte: O autor (2016).

### 5.1.3 Variação paramétrica do valor de boca máxima

A mudança de  $\tau$  é o que encorajou o estudo da variação de boca do catamarã, sendo que este quantifica os efeitos positivos e negativos da interferência de onda entre os cascos. Seus valores foram obtidos para todas as variações de boca propostas, e podem ser vistos no gráfico figura 31.

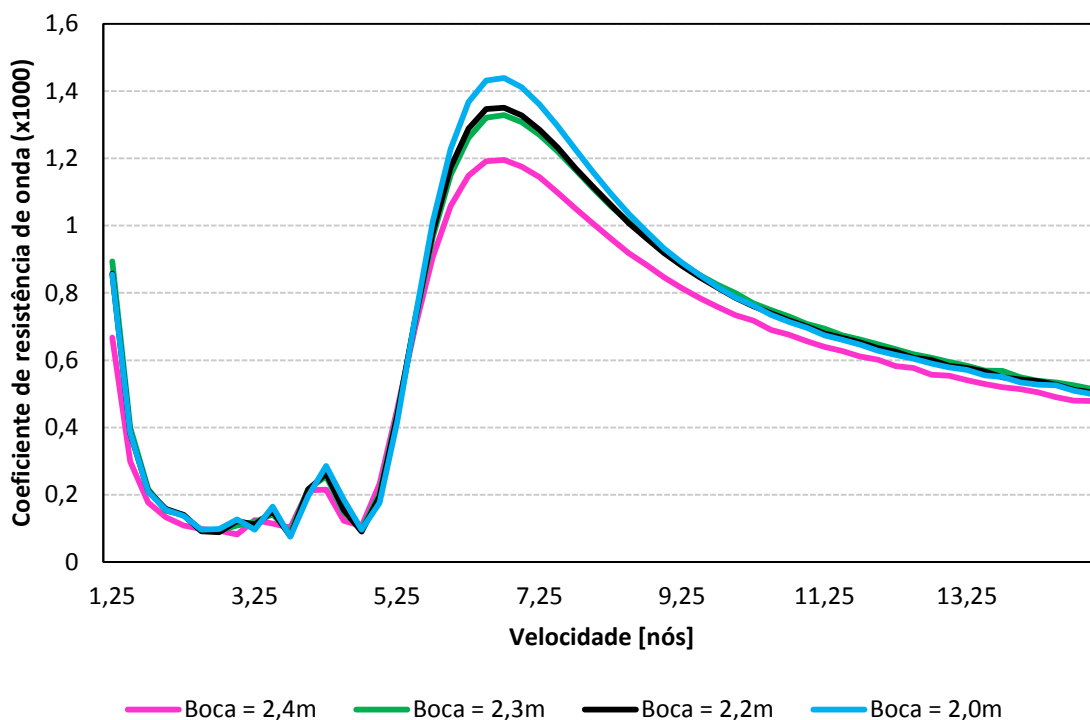
Figura 31 – Variação do fator de interferência de onda para as variações paramétricas de boca.



Fonte: O autor (2016).

Ao analisar a variação de  $\tau$  com a variação de boca, já é perceptível que bocas maiores tendem a representar interferências mais favoráveis. Para melhor visualização, a variação do coeficiente de onda é mostrando no gráfico da figura 32.

Figura 32 – Variação do coeficiente de onda para as variações paramétricas de boca.



Fonte: O autor (2016).

Dentre as variações de boca estudadas, pode ser recomendado, ao observar a variação do coeficiente de resistência de ondas, que a maior boca, ou seja, 2,4m, seja utilizada na embarcação Babbitonga. Essa configuração contém os menores resultados para praticamente todas as velocidades. Isso significa que a sua resistência de onda, logo, sua resistência total será menor.

Como a parcela do coeficiente de onda é responsável por apenas 15% do coeficiente de resistência total da embarcação, os valores de resistência ganhos com a mudança serão relativamente baixos, sendo os mais significativos próximos a 3%, para velocidades de 6,5 a 8 nós.

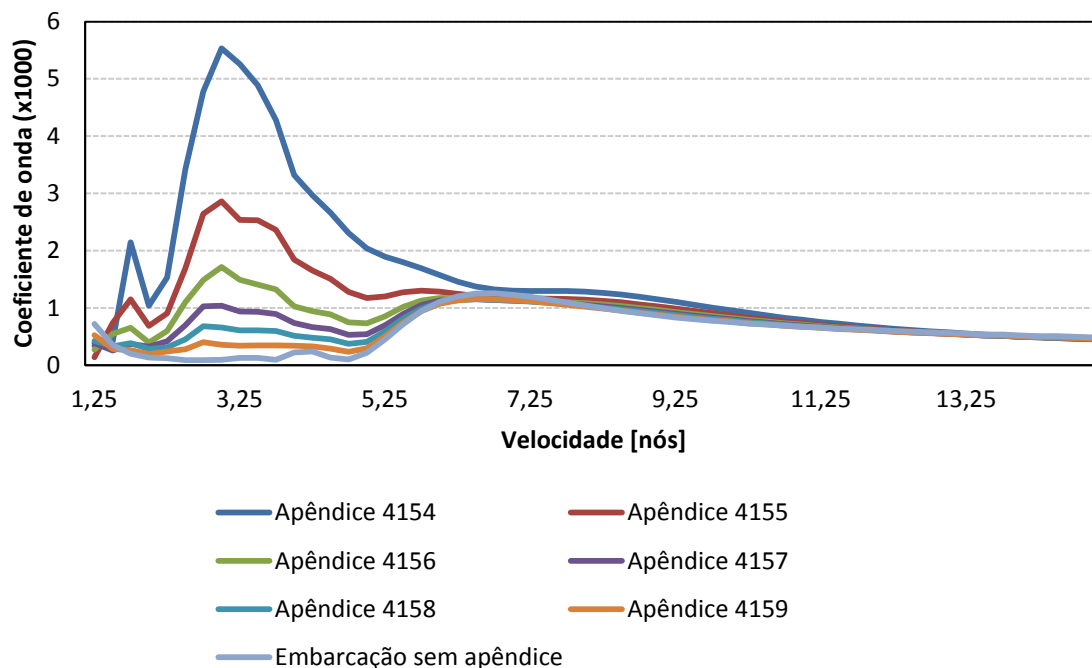
## 5.2 APÊNDICE BULBCAT

### 5.2.1 Variação paramétrica do diâmetro de apêndice

As variações paramétricas de diâmetro são diretamente relacionadas ao volume de apêndice utilizado, e por isso foram realizadas. Para avaliar o

comportamento da embarcação com a presença do apêndice, foram obtidos os valores do coeficiente de onda para a embarcação com os seis corpos de revolução testados, e são graficamente comparados ao coeficiente de onda da embarcação sem apêndice na figura 33.

Figura 33 – Coeficientes de resistência de onda para as variações do diâmetro de apêndice.



Fonte: O autor (2016).

Ao observar o gráfico, pode-se notar que, quanto maior o volume do apêndice utilizado, maiores serão os valores de coeficiente de onda obtidos, sendo que, para volumes baixos, os coeficientes se aproximam dos resultados para a embarcação sem apêndice.

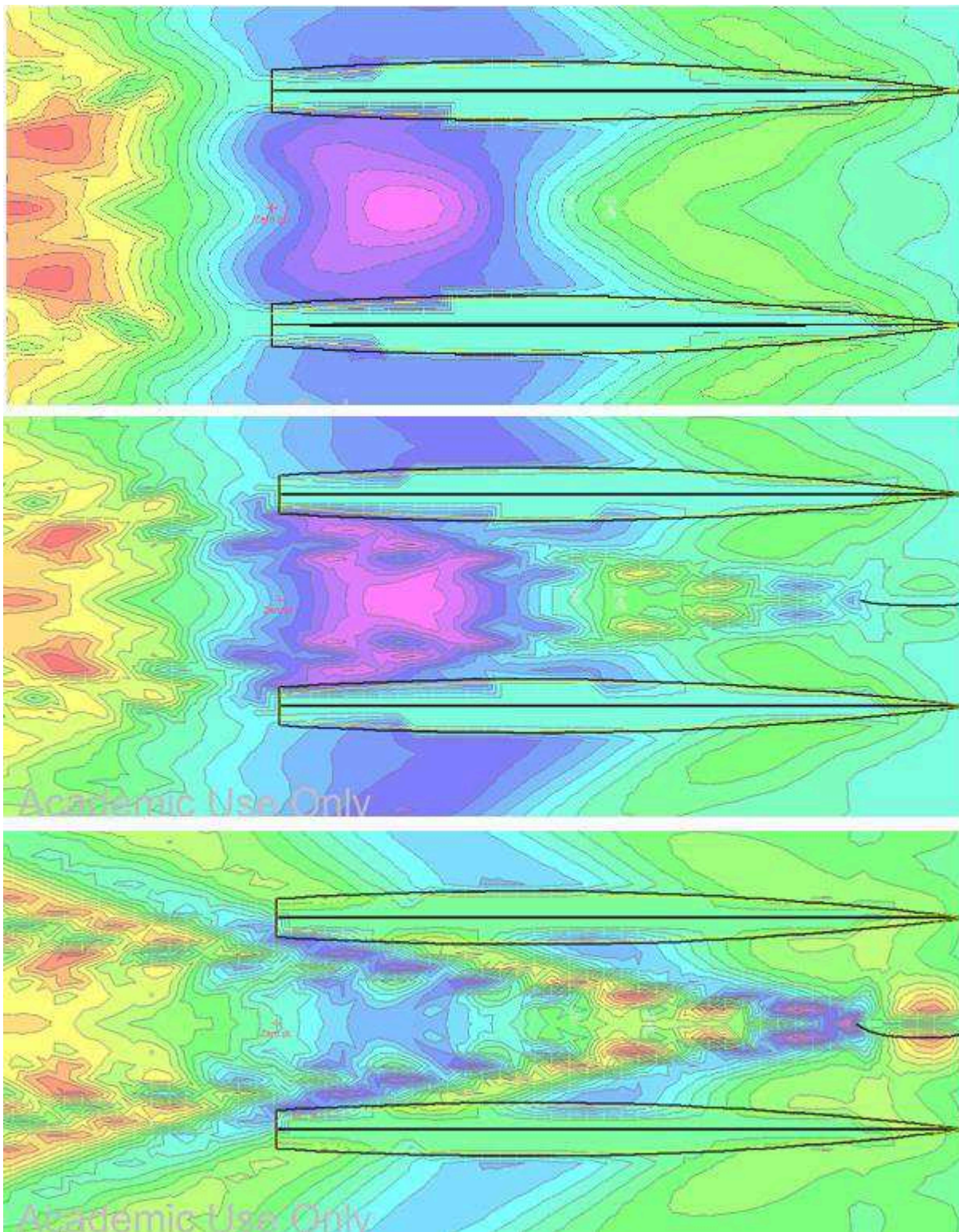
A adição de resistência para os apêndices de volumes pequenos é muito baixa, da ordem de 2 Newtons (1,5%) para o apêndice 4159, na velocidade de 6,75 nós. Embora o coeficiente de onda para esse caso seja suavemente menor que para a embarcação sem apêndice, esse ganho é perdido na composição da resistência total, pois a área molhada na presença do apêndice é maior. Pode-se observar na figura 34, que o apêndice 4159 não influencia positivamente no escoamento entre os cascos.

Já os apêndices maiores influenciam fortemente no escoamento, fazendo com que a região do motor não presencie mais a cava existente anteriormente,

como mostrado na figura 34, para o modelo 4154. A limitação da utilização de apêndices maiores está no aumento da resistência, sendo que os maiores aumentos na resistência total da embarcação ao testar o modelo 4154 foram de 40 Newtons (76%), para a velocidade de 4 nós, e 13 Newtons (11,5%) para 6,75 nós.

A influência do escoamento mais uniforme presente na região do propulsor carece de estudos mais aprofundados que incluem a modelagem do propulsor e foge do escopo deste trabalho.

Figura 34 - Formação de ondas da embarcação a 6,75 nós sem apêndice (acima), com apêndice 4159 (ao centro) e com apêndice 4154 (abaixo).



Fonte: O autor (2016).

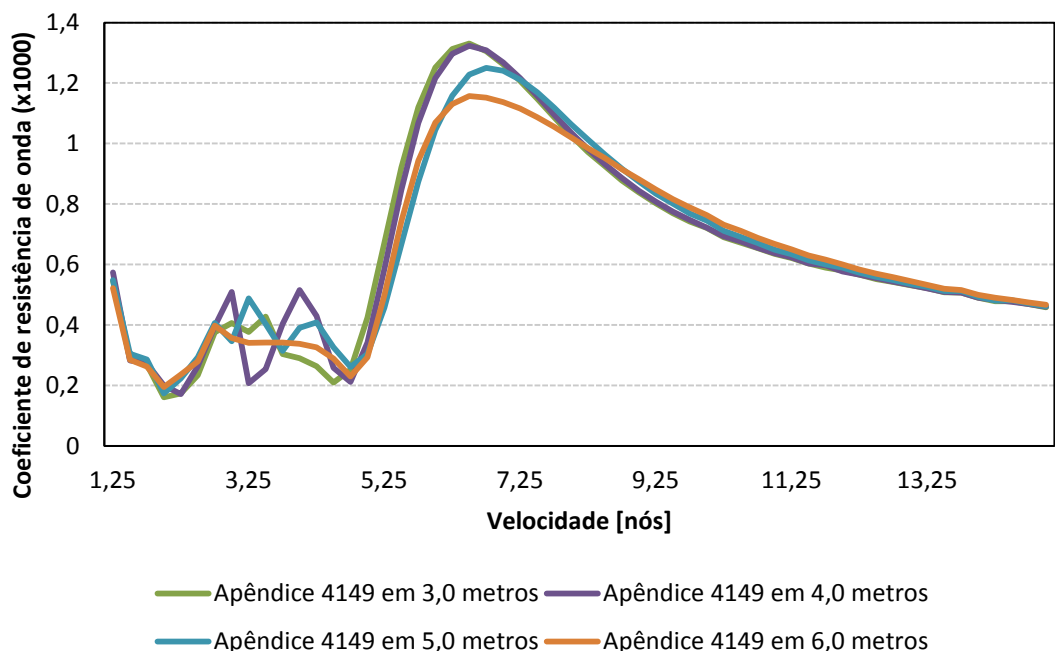


## 5.2.2 Variação paramétrica da posição longitudinal de apêndice

Como os resultados do modelo 4159, de menor volume, representaram os menores valores de coeficiente de onda, este foi utilizado para a variação longitudinal de posição do apêndice, sendo que, esperando a mesma adição de resistência proporcionada pela análise anterior, buscou-se uma melhora no escoamento.

O gráfico da figura 35 representa a variação do coeficiente de onda com a posição longitudinal do apêndice. O apêndice localizado em 6 metros, equivale a extremidade do apêndice paralela à extremidade de vante dos cascos. Para as variações, o apêndice era colocado 1 metro a ré da sua posição anterior, ou seja, em 5, 4 e 3 metros a partir da popa da embarcação. Os resultados evidenciam os menores valores de aumento de coeficiente para a localização de 6 metros, ou seja, a movimentação longitudinal resulta em aumento da resistência ao avanço para as velocidades mais críticas (de 6,75 a 8 nós).

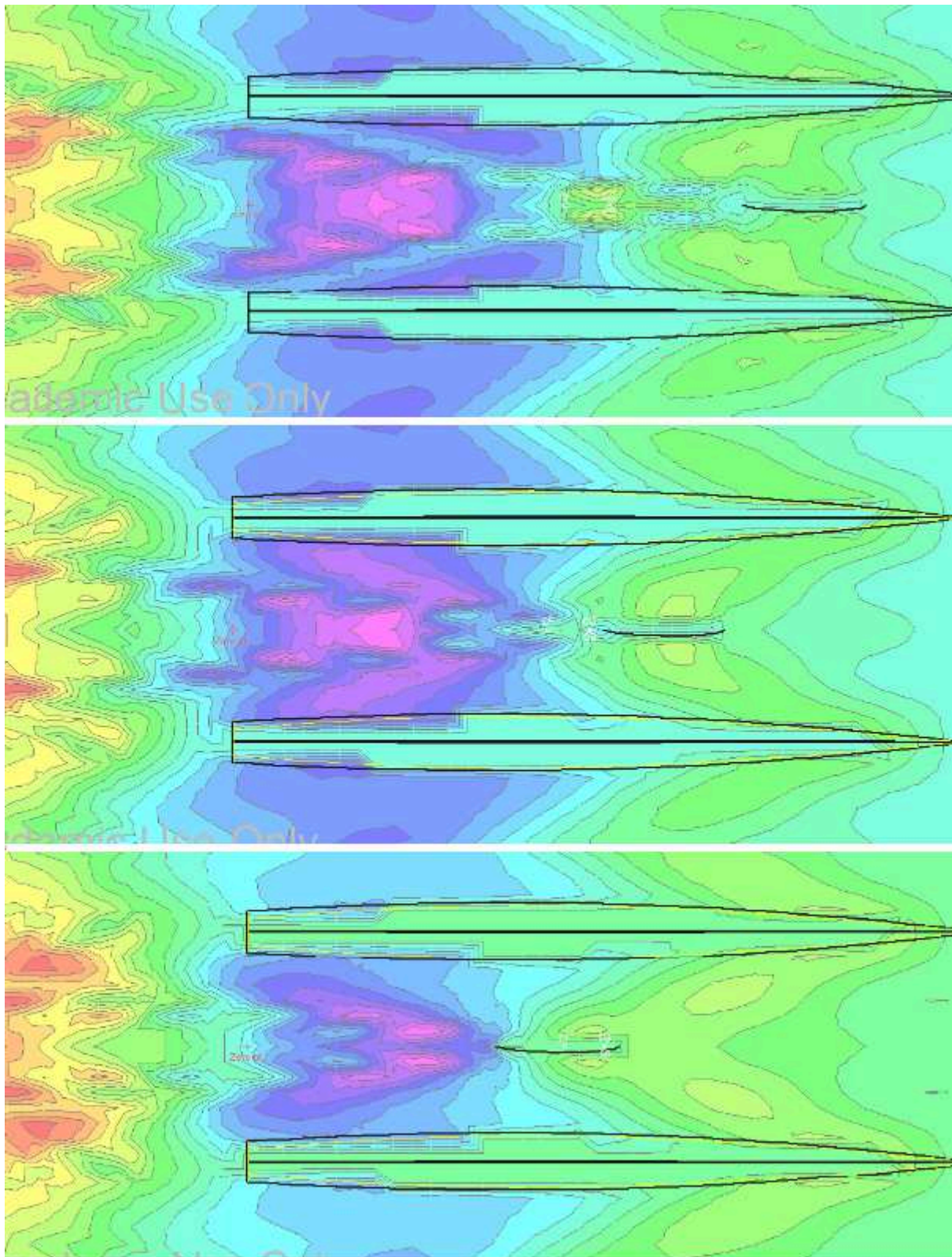
Figura 35 – Coeficientes de resistência de onda para as variações paramétricas de posição longitudinal de apêndice.



Fonte: O autor (2016).

Notou-se que, quanto mais próximo o apêndice se localiza do motor, mais significativa é a interferência no padrão de ondas, como pode ser visto na figura 36. Mas também, maiores são as adições de resistência ao avanço, da ordem de 8 Newtons (5,8%), para a velocidade de 6,75 nós com o apêndice localizado em 3 metros. Novamente destaca-se que para que essa influência seja realmente avaliada, e assim analisada a viabilidade de implementação desse tipo de apêndice, considerando maiores resistências, são necessários estudos mais aprofundados envolvendo a presença do propulsor.

Figura 36 - Formação de ondas da embarcação com apêndice 4159 localizado em 5 metros (acima), em 4 metros (ao centro) e em 3 metros (abaixo), a 6,75 nós.



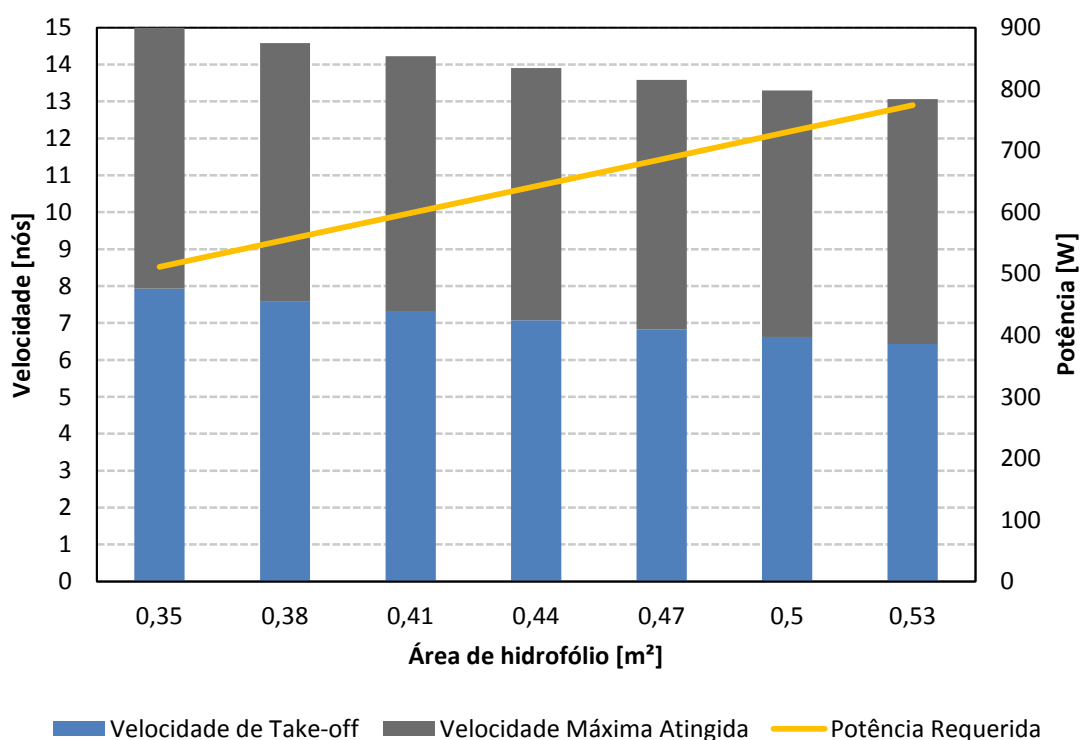
Fonte: O autor (2016).

### 5.3 HIDROFÓLIO

#### 5.3.1 Variação Paramétrica da área de hidrofólio

Como mencionado no item 4.4.2, a área influencia diretamente na sustentação e no arrasto resultante do hidrofólio. O gráfico da figura 37 mostra o efeito que a variação de área causa na velocidade de *take-off*, velocidade máxima, e potência necessária para atingir a velocidade de 13 nós. Os resultados obtidos estão disponíveis na tabela 1 do apêndice B.

Figura 37 – Gráfico da influência de variação de área de hidrofólio na velocidade máxima, velocidade de *take-off* e potência.



Fonte: O autor (2016).

Ao examinar a figura 37, algumas conclusões podem ser alcançadas. Quando a área é aumentada, o arrasto do hidrofólio se intensifica, requerendo mais potência para alcançar a velocidade de 13 nós. Assim sendo, a área de 0,53m<sup>2</sup> representa a área máxima para que a velocidade de 13 nós seja atingida com a potência

disponível. O efeito positivo que o aumento da área causa é a antecipação do *take-off*, acontecendo em 6,43 nós para a área máxima.

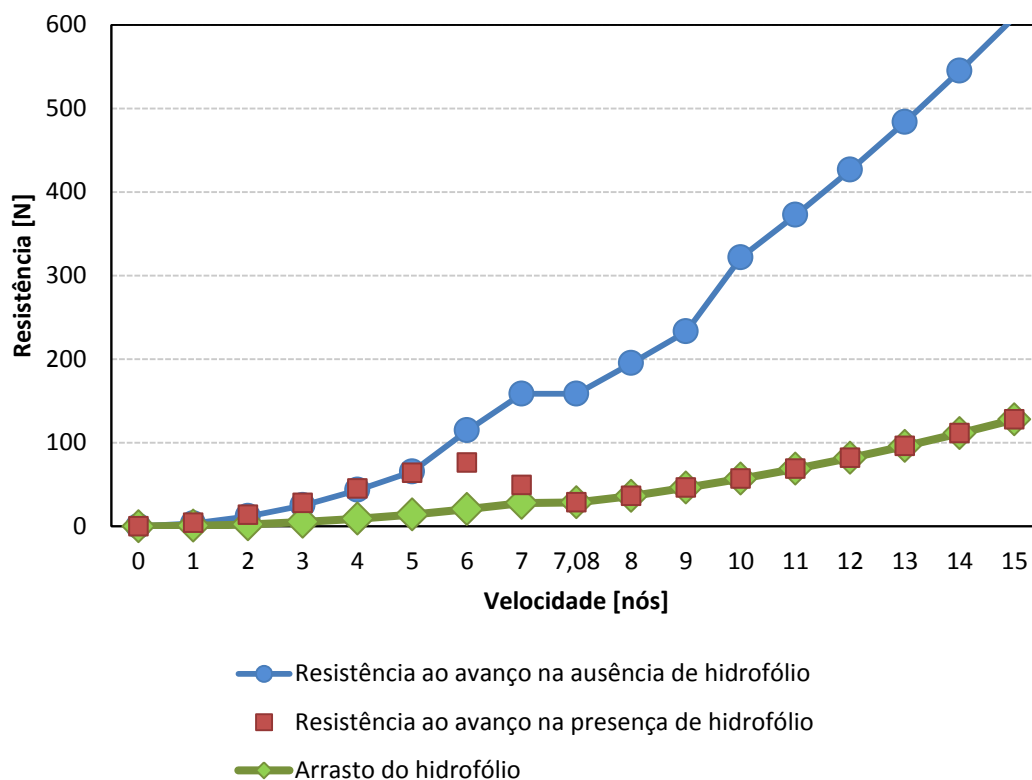
Já a diminuição da área faz com que o arrasto do hidrofólio seja reduzido, requisitando assim, menos potência para a navegação. Isso faz com que a potência disponível seja capaz de levar a embarcação a velocidades mais elevadas do que a estimada. Por exemplo, com uma área de  $0,35\text{m}^2$  de hidrofólio, a embarcação chegaria aos 15 nós. Por outro lado, a velocidade de *take-off* seria de 7,90 nós, evidenciando assim o aumento da velocidade de *take-off* com a diminuição de área.

De acordo com as exigências do projeto de hidrofólio, ou seja, velocidade mínima de *take-off* próxima a 6,75 nós e aumento da velocidade da embarcação em 5 nós, a área de  $0,44\text{m}^2$  foi escolhida. Dessa maneira, o *take-off* acontece em 7,08 nós, e a velocidade máxima atingida pode chegar a 13,9 nós, ou seja, praticamente 1 nó a mais do que o objetivo estabelecido.

### **5.3.2 Curvas de potência e resistência.**

A partir da área escolhida, os cálculos de resistência e potência para a embarcação com hidrofólio puderam ser realizados e estão disponíveis na tabela 2 do apêndice A. Para fins de análise, o gráfico da figura 38 exhibe a curva de resistência ao avanço para a embarcação na presença e ausência de hidrofólio, juntamente com a curva de arrasto do perfil. Já a figura 39 exhibe a curva de potência, também para a embarcação com e sem hidrofólio.

Figura 38 – Gráfico comparativo entre a resistência ao avanço da embarcação na ausência e presença de hidrofólio, e arrasto do hidrofólio.



Fonte: O autor (2016).

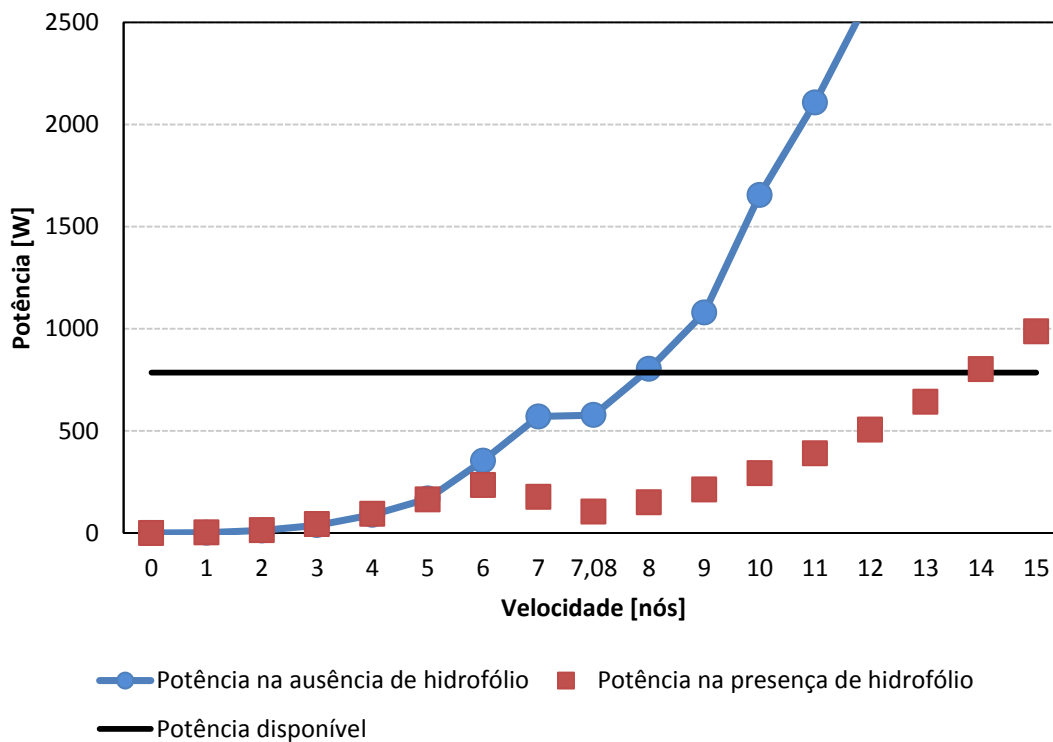
Ao analisar a resistência ao avanço dessa etapa do projeto, duas parcelas foram consideradas, a primeira sendo a resistência do casco, e a segunda, o arrasto do hidrofólio.

Para as velocidades baixas, precisamente até 5 nós, foi possível notar uma semelhança entre as curvas de resistência da embarcação com e sem hidrofólio. Para essas velocidades, a sustentação proporcionada pelo hidrofólio não é significativa para que a parcela do casco seja diminuída consideravelmente. E ainda, o arrasto resultante da presença do hidrofólio é responsável pelo suave acréscimo de resistência do conjunto.

Uma segunda faixa de comportamento pôde ser identificada, de 5 a 7,08 nós. Como a sustentação do hidrofólio varia com o quadrado da velocidade, conforme a embarcação acelera, o casco é emergido, diminuído assim a sua resistência, até que esta se torne nula.

Para as velocidades posteriores ao momento de *take-off*, a resistência do conjunto igualou-se ao arrasto do hidrofólio, até o alcance da velocidade máxima, onde, idealmente, permanece constante.

Figura 39 - Gráfico de comparação da potência na ausência e presença de hidrofólio.



Fonte: O autor (2016).

A análise do gráfico exibido na figura 39 foi importante para que a curva de potência versus velocidade das duas configurações da embarcação pudesse ser comparada. A linha de potência disponível confirmou a adequação do valor de área de hidrofólio utilizada, sendo que a potência obtida para 13 nós, no valor de 642,32 Watts, não excedeu o valor de 785,25 Watts de potência disponível.

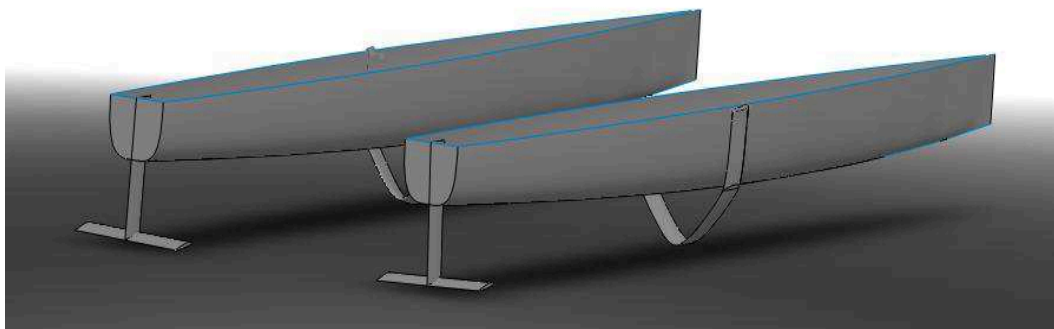
O gráfico para as curvas de potência evidenciou, também, um aumento da velocidade máxima atingida pela embarcação, com a inclusão de hidrofólio, de aproximadamente 6 nós, utilizando a mesma potência disponível. Como a curva de potência do conjunto não cruzou a linha de potência disponível aos 13 nós, sugere que existe, ainda, uma disponibilidade de 142,93 Watts, por isso, a variação de aproximadamente 6 nós é identificada.

Como a proposta do presente trabalho envolveu apenas a resistência do casco da embarcação em área molhada, pode ser considerado que haveria uma

reserva de potência para que a embarcação consiga vencer as parcelas de resistência desconsideradas no desenvolvimento, como resistência de apêndices, resistência aerodinâmica, efeitos de profundidade, entre outros.

Enfim, a partir dos resultados obtidos, a modelagem de hidrofólio na embarcação foi realizada, como mostrado nas figuras 40 e 41.

Figura 40 – Modelagem de hidrofólios na embarcação Babitonga.



Fonte: O autor (2016).

Figura 41 - Modelagem de hidrofólios na embarcação Babitonga (vista frontal).



Fonte: O autor (2016).



## 6 CONCLUSÕES

Com este trabalho foi possível obter a curva de resistência ao avanço da embarcação Babbitonga. Os resultados obtidos foram coerentes com aqueles aferidos pela equipe em provas práticas. Foi mostrado que as curvas de coeficientes da decomposição de resistência possuem um formato semelhante às curvas obtidas em tanques de prova por Molland et al. (1994).

Ao comparar a curva de resistência ao avanço do catamarã com a curva de um casco analisado em isolamento, puderam ser identificados os fatores de interferência viscosa e de onda, sendo que o último evidenciou que a interação dos sistemas de onda produzidos por cada um dos cascos pode ter um efeito positivo ou negativo na resistência ao avanço total do catamarã.

A utilização do método computacional foi empregada em variações paramétricas, para que o comportamento da embarcação pudesse ser avaliado no que diz respeito à distância entre cascos, implementação de apêndice *BulbCat* e hidrofólio.

Algumas conclusões relevantes podem ser destacadas:

- A variação da resistência ao avanço do catamarã apresentou dependência tanto da velocidade, quanto da distância entre cascos, este último, em virtude da variação da parcela de resistência de onda.

- Para velocidades de maior interesse, ou seja, próximas ao limite alcançado pela embarcação (8 nós), e onde os coeficientes de onda são maiores, a boca de 2,4 metros foi a mais indicada.

- Os modelos de apêndice *BulbCat* utilizados não foram capazes de diminuir a resistência ao avanço, mas foi possível notar que os de menores relação  $L/D$  causaram modificações mais expressivas no escoamento entre cascos.

- A variação longitudinal da posição do apêndice não influencia consideravelmente na resistência, mas demonstra uma suave melhora no escoamento, ainda que não aparenta eliminar completamente o problema de ventilação do hélice.

- A utilização de apêndice *BulbCat* foi capaz de modificar o escoamento na região do hélice da embarcação, com o corpo de revolução 4154, mas para isso, incrementos de até 76% na resistência ao avanço foram presenciados.

- A área projetada de hidrofólio pode ser fortemente relacionada com a velocidade de *take-off* da embarcação, velocidade máxima atingida e potência necessária para atingi-la.

- Foi identificada uma potencialidade para utilização de hidrofólio na embarcação Babbitonga, sendo que para uma área projetada de 0,44m<sup>2</sup>, o ganho de velocidade obtido foi de aproximadamente 6 nós.

Pode-se prever que haverá uma atenuação do sistema de ondas formado pela embarcação quando na presença de hidrofólio, provocado pela diminuição do calado, na medida em que a velocidade aumenta. A formação de ondas para 6,75 nós, com o calado ajustado, pode ser vista no apêndice B. Ainda que, devido a fatores desconsiderados no presente trabalho, a embarcação não saia completamente da água, é esperado que a utilização de hidrofólios diminua a resistência ao avanço para velocidades onde a diminuição de calado seja expressiva, e que, possivelmente, melhore o desempenho do hélice.

Alguns comentários podem ser feitos com relação ao acoplamento das variações paramétricas realizadas, principalmente para a implementação de hidrofólios. Caso a boca máxima da embarcação seja modificada para 2,4 metros, haveria uma melhora na resistência ao avanço, que poderia antecipar levemente o *take-off* da embarcação, assim como aumentar a sua velocidade máxima.

Já na presença de apêndice, visto que não foram encontradas melhoras na resistência ao avanço, o *take-off* seria atrasado.

A modificação de boca máxima da embarcação para 2,4 metros não é capaz de eliminar a cava existente na região do motor, mas o ganho de resistência ocasionado poderia fazer com que a utilização de apêndice tivesse uma influência negativa menor no somatório total de resistência ao avanço da embarcação.

Para que conclusões mais claras sejam tomadas, os acoplamentos mencionados devem ser simulados. Deve-se considerar também que os resultados obtidos a partir das variações paramétricas representam análises simplificadas

baseadas na curva de resistência ao avanço obtida computacionalmente, mas podem servir como base para trabalhos futuros.

Para a questão de resistência ao avanço, um teste em tanque de provas seria capaz de validar os resultados obtidos para a embarcação Babitonga, e ao mesmo tempo, os resultados obtidos com as modificações de distância entre cascos. Os efeitos desconsiderados pelas simplificações da teoria do corpo esbelto, como a ausência de viscosidade, poderiam então, ser considerados.

Um estudo de maiores variações de parâmetros de *BulbCats*, como mudança de comprimento, coeficiente prismático, posição de maior seção e raios de nariz e calda pode ser construído a fim de procurar por melhoras tanto na resistência ao avanço da embarcação, quanto no escoamento entre cascos. Também podem ser realizados teste com a implementação de dois *BulbCats* na região da proa, sem que seja excedido o limite de comprimento.

Para que a viabilidade da implementação de hidrofólio possa ser estudada, são sugeridos estudos de adições de resistência desconsideradas no presente trabalho, como influência de ondas, resistência aerodinâmica, resistência de apêndices e fator de profundidade. Ainda, um estudo de variação de carga de baterias e níveis de irradiação seriam necessários.

As questões práticas de instalação e fabricação de apêndices e hidrofólio, considerando materiais e esforços estruturais também devem ser avaliadas para viabilizar a implementação dos mesmos.

## REFERÊNCIAS

AIRES, F. M.; MARQUES, F. C.; MONTENEGRO, I.B.; PENA, J. G.; SOUZA, J. F. **Hidrofólio**. Porto, 2014. 28 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Porto, Distrito do porto, 2014.

**Airfoil Tools**. 2016. Disponível em: <[airfoiltools.com/](http://airfoiltools.com/)>. Acessado em: 5.abr.2016.

ANDERSON, J. D. **Introduction to Flight**. 3. ed. Estados Unidos da América: McGraw-Hill Book Company, 1989.

ARTMANN, A. L. **Estudo sobre a Aplicação de um Hidrofólio em uma Embarcação de Apoio Offshore**: Abordagem experimental simplificada. 2015. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Departamento de Engenharias da Mobilidade, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, Santa Catarina, 2015.

BENTLEY SYSTEMS. **Maxsurf Resistance**: User Manual. Windows Version 20. 2013. Documento eletrônico disponibilizado no ambiente Maxsurf Resistance.

BERTRAM, V. **Practical Ship Hydrodynamics**. Grã Bretanha: Butterworth-Heinemann. 2000.

DESAFIO SOLAR BRASIL: HISTÓRICO. **Desafio Solar**. 2015. Disponível em: <[desafiosolar.org](http://desafiosolar.org)>. Acessado em: 6.out.2015.

FALTINSEN, O. M. **Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles**. New York: Cambridge, 2005.

FERZIGER, J. H. & PERIC, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. 3. ed. Springer, 2002.

FLYING PHANTOM: Specifications. **Phantom – International**. 2016. Disponível em: <<http://www.phantom-international.com/flying-phantom/>>. Acessado em: 21.abr.2016.

FONSECA, N. **Comportamento do navio no mar**. 2004. 98 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia e Arquitetura Naval, Departamento de Engenharia Naval. Instituto Superior Técnico, Lisboa, Distrito de Lisboa, 2004.

GERTLER, M. **Resistance Experiments on a Systematic Series of Streamlined Bodies of Revolution** – For Application to the Design of High-Speed Submarines. Report C-297, David Taylor Model Basin, apr.1950

INSEL, M. & MOLLAND, A. F. **An Investigation into the Resistance Components of High Speed Displacement Catamarans**. In: ROYAL INSTITUTION OF NAVAL

ARCHITECTS MEETING, 1991, London. The Royal Institution of Naval Architects, 1991.

INTERNATIONAL HYDROFOIL SOCIETY. **Hydrofoil Basics** – Configurations. 12.maio.1998. Disponível em: <<http://www.foils.org/basfigs.htm>>. Acessado em: 12.mar.2016.

KRACHT, A. M. Design of Bulbous Bows. **Journal of Ship Production and Design**. Alexandria, p. 197-217.fev.1978.

MOLLAND, A. F.; TURNOCK, S.R.; HUDSON, D. A. **Ship Resistance and Propulsion**. University of Southampton. Cambridge University Press. Cambridge, 2011.

MOLLAND, A. F.; WELLICOME, J. F.; COUSER, P. R. **Resistance Experiments on a Systematic Series of High Speed Displacement Catamaran Forms: Variation of Length-Displacement Ratio and Breadth-Fraught Ratio**. Ship Science Report 71. mar. 1994.

PIRES, A. **Energia Solar**. Estadão E&N. 25.set.2014. Disponível em: <<http://economia.estadao.com.br/noticias/geral,energia-solar-imp-,1565763>>. Acessado em: 03.out.2015.

REGRAS DE COMPETIÇÃO 2015. **Desafio Solar**. 2015. 33 p. Disponível em <[www.desafiosolar.org](http://www.desafiosolar.org)>. Acessado em: 19.out.2015.

A EQUIPE. **Barco Solar Babitonga**. 2016. Disponível em: <[solarbabitonga.com](http://solarbabitonga.com)>. Acessado em: 28.out.2015.

The MS Tûranor\*Planet Solar. **Planet Solar**, Tûranor S.A., 2010. Disponível em: <<http://www.planetsolar.org/>>. Acessado em: 12.out.2015.

TRINDADE, J. **Hidrodinâmica e Propulsão**: Engenharia de Máquinas Marítimas. Escola Superior Náutica Infante D. Henrique, 2012.

VICHI, F. M. **Energia, meio ambiente e economia**: O Brasil no contexto mundial. *Quim. Nova*, v. 32, n. 3, p. 757-767, 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/qn/v32n3/a19v32n3.pdf>> Acessado em: 08.out.2015.

VOSSERS, G. **Some Applications of The Slender Body Theory in Ship Hydrodynamics**. Wageningen: H. Veenman & Zonen N. V. 1962

ÇENGEL, A. Y.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos**: Fundamentos e Aplicações. São Paulo: McGraw-Hill. 2007

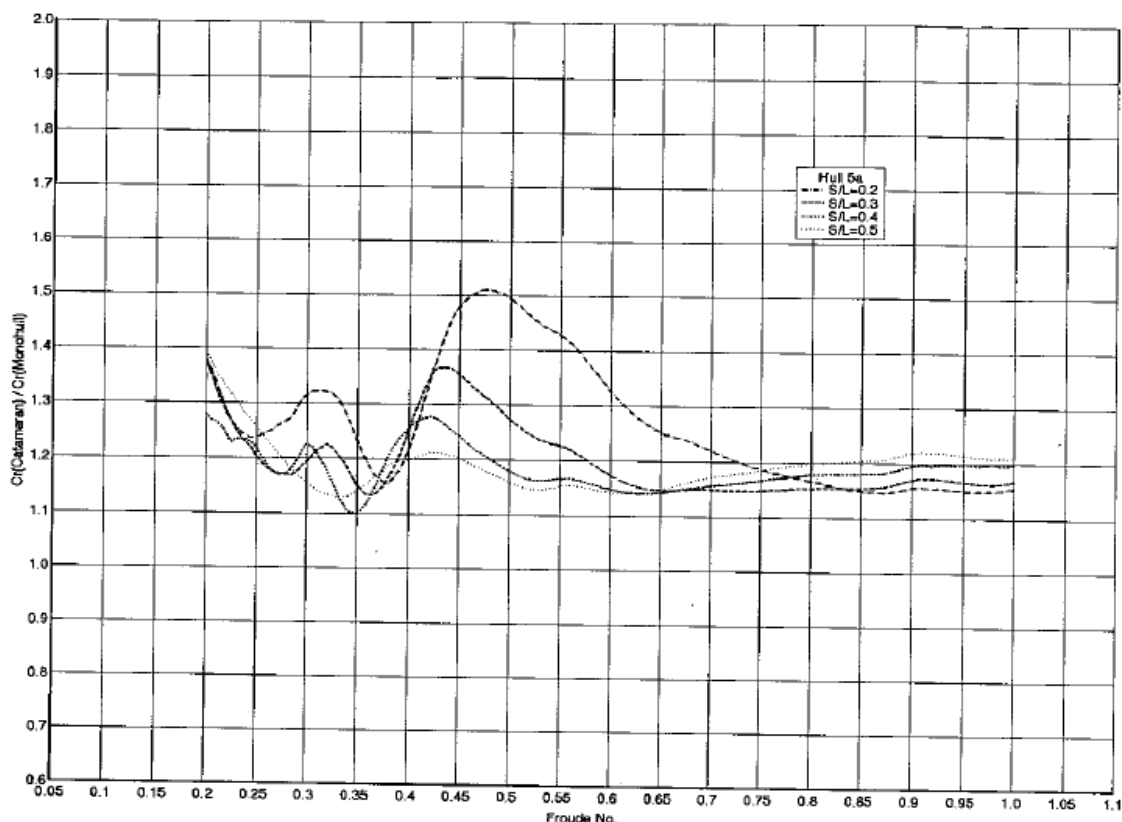
ZOTTI, I. **Medium Speed Catamaran With Large Central Bulbs: Emperimental Investigation on Resistance and Vertical Motions**. In: International Conference on Marine Research and Transportation, 2, 2007, Naples, Itália. 2007.

## APÊNDICE A – RELAÇÃO DE RESISTÊNCIA RESIDUAL

O coeficiente residual é definido por Molland et al. como o coeficiente total do modelo, subtraído de seu coeficiente friccional calculado pela correlação ITTC. Ele representada, então, a parcela de resistência de onda e de resistência viscosa de pressão. São expostos os gráficos que relacionam os fatores de interferência residual, dado pela equação abaixo, para os modelos 5a, na figura 1, 6c na figura 2 e para a embarcação Babitonga, na figura 3, para as relações  $S/L$  de 0,2; 0,3; 0,4 e 0,5. Pode-se notar uma semelhança em comportamento das 3 embarcações, especialmente em números de Froude de 0,35 a 0,6, sendo que as variações existentes na interferência residual da embarcação Babitonga estão em grande parte relacionadas com a forte variação nos valores de coeficiente de onda encontrados.

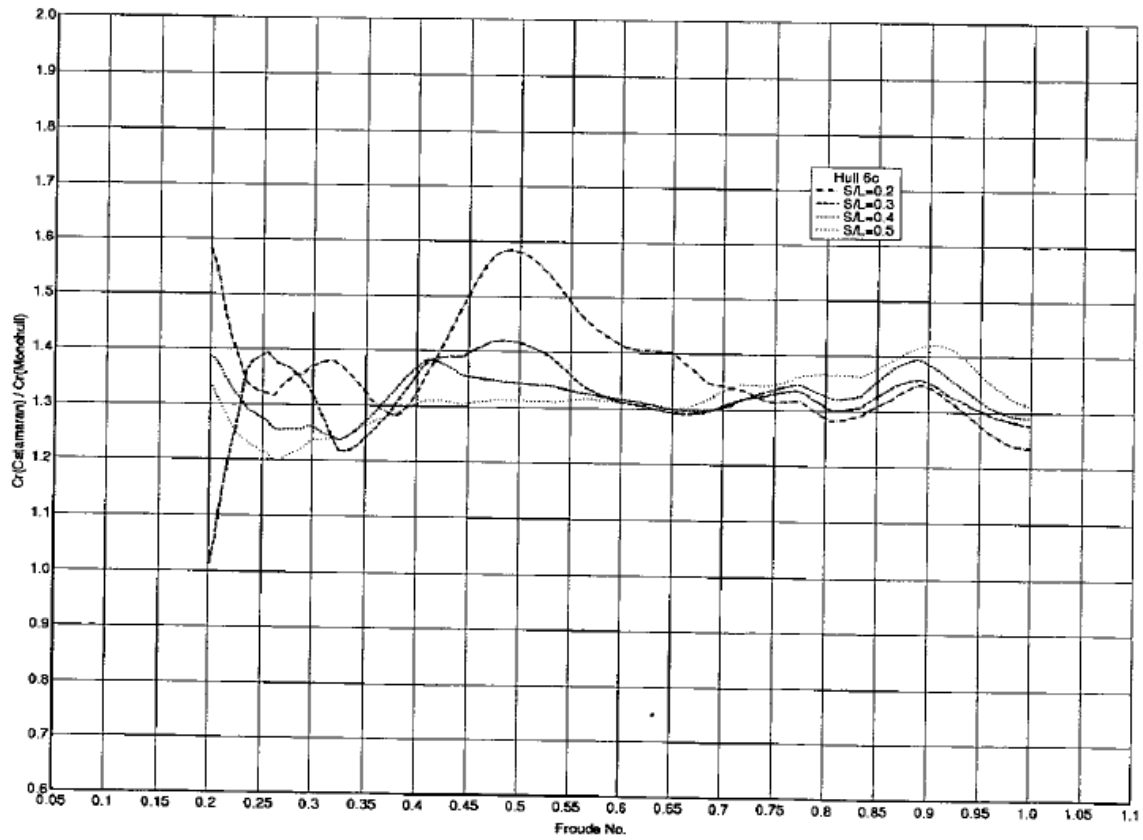
$$\frac{C_{rcat}}{C_{rmon}} = \frac{C_{tcat} - C_{fmon}}{C_{tmon} - C_{fmon}}$$

Figura 1 - Variação do fator de interferência residual para o modelo 5a.



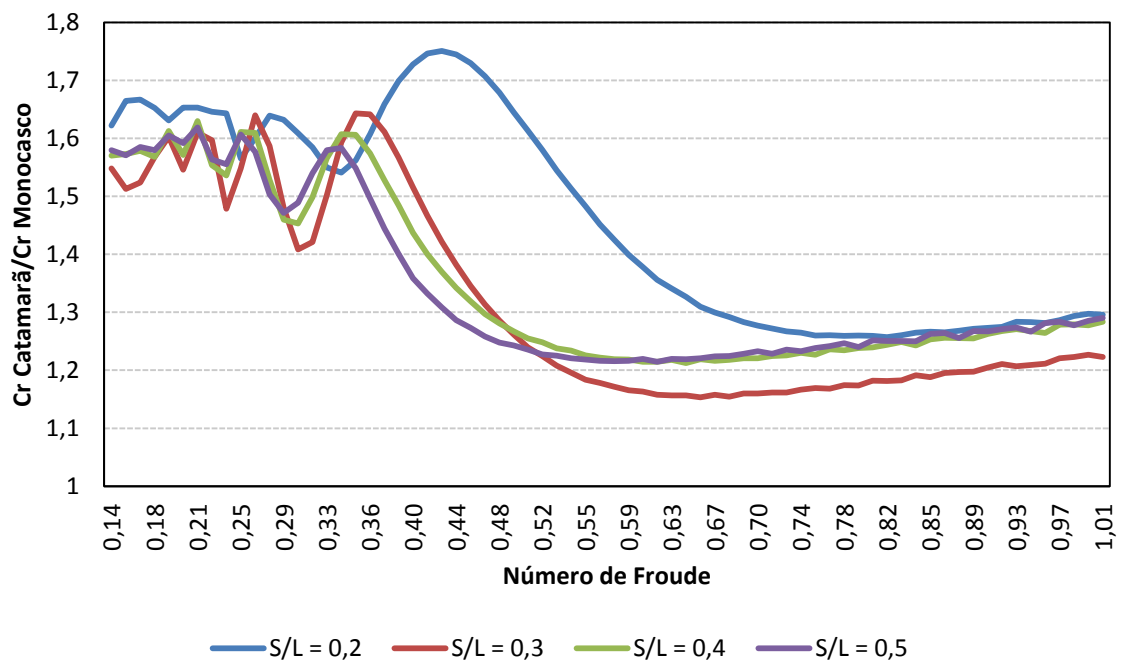
Fonte: Molland et al. (1994).

Figura 2 - Variação do fator de interferência residual para o modelo 6c.



Fonte: Molland et al. (1994).

Figura 3 - Variação do fator de interferência residual para a embarcação Babitonga.



Fonte: O autor (2016).

## APÊNDICE B – CÁLCULOS DE HIDROFÓLIO

Tabela 1 – Velocidade de take-off, velocidade máxima atingida e potência para atingir 13 nós para cada variação de área de hidrofólio

Área	Velocidade <i>take-off</i> [nós]	Velocidade máxima [nós]	Potência na velocidade de 13 nós [W]
0,35	7,90	15	510,94
0,38	7,59	14,58	554,73
0,41	7,32	14,22	598,53
0,44	7,08	13,9	642,32
0,47	6,83	13,58	686,12
0,50	6,62	13,3	729,91
0,53	6,43	13,06	773,7

Fonte: O autor (2016).

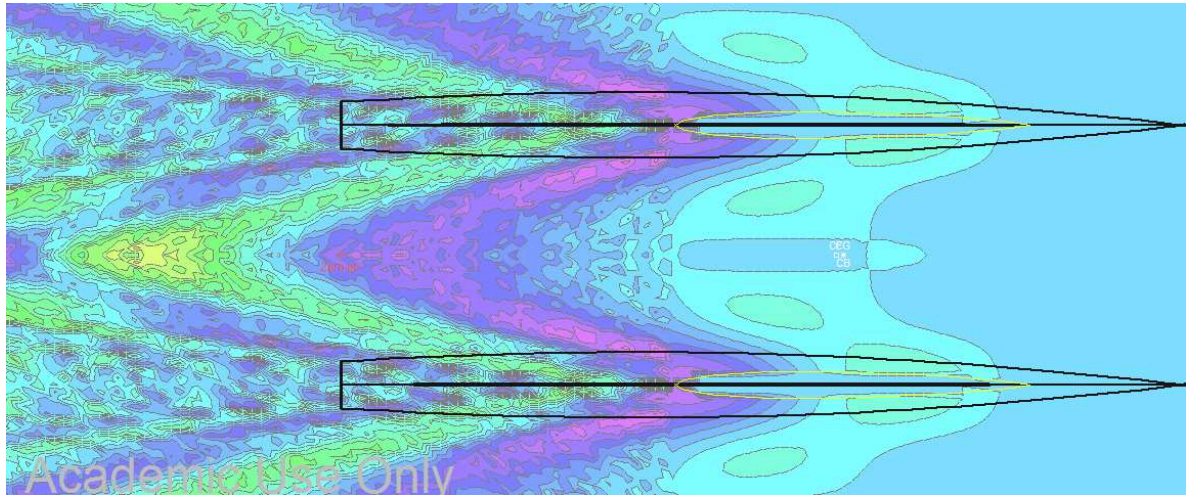


Tabela 2 – Comportamento da embarcação Babitonga na presença de hidrofólio utilizando o perfil NACA 25112

<b>Comportamento da embarcação Babitonga na presença de hidrofólio utilizando o perfil NACA 25112</b>									
<b>Dados:</b>	<b>CL = 1,046</b>	<b>CD = 0,00954</b>	<b>Área = 0,44m<sup>2</sup></b>	<b>Velocidade = 0 a 14 nós</b>	<b>Conversão de nó para m/s = 0,5144</b>				
Velocidade [nós]	Sustentação [kg]	Deslocamento da embarcação [kg]	Calado ajustado [m]	Arrasto do hidrofólio [N]	Resistência do casco [N]	Resistência do conjunto [N]	Resistência sem hidrofólio [N]	Potência com hidrofólio [W]	Potência sem hidrofólio [W]
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,00	6,23	305,77	14,63	0,57	3,34	3,91	3,39	2,01	1,74
2,00	24,93	287,07	14,11	2,27	11,56	13,83	12,06	14,23	12,41
3,00	56,09	255,91	13,22	5,12	22,68	27,80	25,01	42,89	38,60
4,00	99,71	212,29	11,90	9,09	36,07	45,16	43,51	92,93	89,53
5,00	155,79	156,21	10,05	14,21	49,62	63,83	65,36	164,17	168,11
6,00	224,34	87,66	7,35	20,46	55,5	75,96	114,71	234,45	354,04
7,00	305,35	6,65	2,00	27,85	21,33	49,18	158,42	177,09	570,44
7,08	312,37	0,00	0,00	28,49	-	28,49	158,42	103,76	576,96
8,00	398,83	-	-	36,37	-	36,37	195,04	149,69	802,63
9,00	504,77	-	-	46,04	-	46,04	233,01	213,13	1078,74
10,00	623,17	-	-	56,84	-	56,84	321,59	292,36	1654,26
11,00	754,03	-	-	68,77	-	68,77	372,43	389,13	2107,36
12,00	897,36	-	-	81,84	-	81,84	426,5	505,20	2632,70
13,00	1053,15	-	-	96,05	-	96,05	483,73	642,32	3234,80
14,00	1221,41	-	-	111,40	-	111,40	544,98	802,24	3924,73

Fonte: O autor (2016).

Figura 1 - Padrão de ondas na presença de hidrofólio para a velocidade de 6,75 nós.



Fonte: O autor (2016).