



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CAMILA PAULINO FERREIRA DA SILVA

**ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO DE UM CATAMARÃ COM
ABORDAGEM COMPUTACIONAL BASEADA EM CFD**

FORTALEZA

2019

CAMILA PAULINO FERREIRA DA SILVA

ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO DE UM CATAMARÃ COM ABORDAGEM
COMPUTACIONAL BASEADA EM CFD

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S579e Silva, Camila Paulino Ferreira da.
Estimativa da resistência ao avanço de um catamarã com abordagem computacional baseada em CFD /
Camila Paulino Ferreira da Silva. – 2019.
53 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha.
1. Catamarã. 2. Resistência ao avanço. 3. Métodos Numéricos. 4. Hullspeed. 5. ANSYS. I. Título.
CDD 620.1
-

CAMILA PAULINO FERREIRA DA SILVA

ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO DE UM CATAMARÃ COM ABORDAGEM
COMPUTACIONAL BASEADA EM CFD

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica
do Centro de Tecnologia da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do título de Engenheira Mecânica.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Romulo do Nascimento Rodrigues
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À minha mãe por sempre acreditar em mim e nunca me deixar desistir. Às minhas irmãs, Débora e Naudia, pelo amor e suporte em todos os momentos e ao meu pai, pelos ensinamentos e sua fé inspiradora.

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, por me acompanhar nesta longa caminhada, pelo Seu infinito amor e por permitir a conclusão deste trabalho.

À minha mãe, por sempre me apoiar, acreditar e investir em mim.

À minha irmã, Naudia, por me ensinar o que é o verdadeiro amor fraternal, ser minha melhor amiga e estar ao meu lado nas horas mais difíceis, nunca deixando eu perder minha essência.

À minha irmã Débora, por está ao meu lado tanto nas horas alegres como nas horas difíceis, ser minha confidente e melhor amiga.

Minha tia, Socorro, por sempre se preocupar e ajudar em tudo quanto podia.

Ao meu pai, pelos ótimos conselhos.

Ao Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha por me orientar neste trabalho.

Ao engenheiro naval Marcio Ferreira Igreja por compartilhar comigo seu amplo conhecimento em engenharia naval, ajudando a tornar este trabalho possível.

Aos projetistas da Indústria Naval do Ceará, por me ensinarem a usar o software Rhinoceros, em especial ao Clemilson por me ajudar a aperfeiçoar o desenho do catamarã e a Eng. Rafaela por me ensinar a usar o programa Hullspeed.

Aos meus amigos de todas as horas, por serem a família que Deus me permitiu escolher, Fábio, Phellype Rerison, João Vitor, Iago, Radmila e Wanderson que compartilharam não só conhecimento, mas momentos muito divertidos.

Aos amigos que compartilharam seu conhecimento e seu tempo comigo, Arrais, Kevyn, Ivo, João Barreto, Dayse, Daniel, Asafe e Handerson.

Aos meus bichos de estimação, gatos, cachorro, galo, porquinho da índia, que me acompanharam ao longo de toda essa caminhada, suportando os momentos de estresse, por me mostrarem o amor mais puro que existe e me ensinarem a amar.

Ao aluno Thiago Nascimento do curso de ciência da computação da Universidade Estadual do Ceará que elaborou o *template* do qual este trabalho foi adaptado para Universidade Federal do Ceará.

Ao Kevyn por me apresentar a plataforma *ShareLatex*.

À Universidade Federal do Ceará pelos ensinamentos ao longo desses 5 anos.

“Ever tried. Ever failed. No matter. Try Again.
Fail again. Fail better.”

(Samuel Beckett)

RESUMO

Estimar a resistência ao avanço em embarcações tem sido uma tarefa complexa ao longo de décadas. Muito se deve aos fenômenos envolvidos, os quais envolvem o escoamento de fluidos. Estimar a força que se opõe ao movimento de uma embarcação na água é importante para saber qual será a potência necessária para vencê-la. Porém, as técnicas mais confiáveis nos dias de hoje ainda são os métodos experimentais que envolvem custo elevado e demasiado tempo. Para embarcações do tipo multicasco, esta tarefa é ainda mais complexa, pois muitos testes experimentais ainda estão em desenvolvimento. Além disso, para embarcações de cascos gêmeos a resistência por formação de onda será um fator muito importante e deve-se atentar para as interferências no trem de ondas que podem ocorrer de um casco no outro. O uso de métodos computacionais vem crescendo nos últimos anos devido a sua capacidade de mostrar resultados próximos àqueles encontrados na vida real e sendo assim, podem ser utilizados na fase inicial do projeto de uma embarcação para estimar a potência que o navio precisará. No entanto, não é aconselhável seu uso como fator decisivo, pois como será visto, os resultados não são precisos, são métodos que mostram valores próximos aos esperados na prática. Este trabalho visa o cálculo da resistência ao avanço de um catamarã através do uso da fluidodinâmica computacional e comparar dois métodos numéricos, o Hullspeed® e o ANSYS® CFX. Foram encontrados valores aproximados de 9,91 KN e 31 KN para o software Hullspeed para os calados de 0,3m e 0,6m respectivamente, e 23 KN e 37KN para os calados de 0,3m e 0,6m respectivamente no CFX.

Palavras-chave: Catamarã. Resistência ao avanço. Métodos Numéricos. Hullspeed. ANSYS CFX.

ABSTRACT

Measuring ship resistance has been a complex task for decades. Due to the phenomena involved, which involve fluids flow. Predict the force that opposes the movement of a vessel in the water is important to know what will be the power required to overcome it. However, the most reliable techniques currently available are the experimental methods which involving high cost and long time. For multihull type vessels, this task is even more difficult, because many of the experimental tests are still in development. In addition, for twin-hulled vessels the wave making resistance will be a very important factor, also attention must be paid to the the wave train interaction between the hulls. The use of computational methods has been increasing in the last years. Due to its ability to show approximate results to those found in real life, therefore, they can be used in the initial phase of the Project to estimate the power required for the ship. However, it is not advisable to use it as a decisive factor, because as will be seen, the results are not accurate, those are methods that show similar values in the practice. This study aims the calculation of a catamarã resistance through the use of computational fluid dynamics and compare two numerical methods, Hullspeed® and ANSYS® CFX. The results found about 9,91KN and 31KN respectively for Hullspeed and 23KN and 37KN for CFX.

Keywords: Catamaran. Ship Resistance. Numerical methods. Hullspeed. ANSYS CFX

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ondas geradas por embarcações em movimento	16
Figura 2 – Catamarã projetado no Rhinoceros® utilizado neste estudo	19
Figura 3 – Modelo importado para o Maxsurf®	33
Figura 4 – Modelo com marcação do calado de 0,6m	34
Figura 5 – Interface do Hullspeed	34
Figura 6 – Método escolhido para o cálculo da resistência	35
Figura 7 – Dados do Catamarã fornecidos pelo Hullspeed	35
Figura 8 – Casco do catamarã no Hullspeed com calado de 0,3m	36
Figura 9 – Geometria do casco no DesignModeler	37
Figura 10 – Utilização da ferramenta enclosure	37
Figura 11 – Condições de contorno do problema	37
Figura 12 – Geometria com malha hexaédrica	38
Figura 13 – Quantidade de elementos e nós gerados na malha	38
Figura 14 – Condições de contorno definidas no CFX-Pre	39
Figura 15 – Valores de resistência do catamarã - calado 0,6m	41
Figura 16 – Gráfico Resistência x Velocidade	42
Figura 17 – Gráfico Potência x Velocidade	43
Figura 18 – Geração de ondas de superfície livre	43
Figura 19 – Valores de resistência do catamarã - calado 0,3m	44
Figura 20 – Gráfico Resistência x Velocidade	45
Figura 21 – Gráfico Potência x Velocidade	45
Figura 22 – Volume de fração da água no catamarã - Calado 0,6m	47
Figura 23 – Interface dos fluidos através da isosurface no catamarã - Calado 0,6m	47
Figura 24 – Interface dos fluidos no catamarã - Calado 0,3m	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condições de contorno no CFX-Pre	38
Tabela 2 – Condições iniciais no CFX-Pre	40
Tabela 3 – Potência considerando a margem de motor de 85%	46
Tabela 4 – Resistência Total do catamarã no CFX	47
Tabela 5 – Potência considerando a margem de motor de 85%	47

LISTA DE SÍMBOLOS

$1 + 4k$	Fator de forma para monocascos
$1 + \beta k$	Fator de forma para catamarãs
C_w	Coefficiente de resistência de onda
C_T	Coefficiente de resistência total
C_{TCAT}	Coefficiente de resistência total para catamarã
C_F	Coefficiente de resistência de fricção
F_r	Número de Froude
g	Aceleração da gravidade
L	Comprimento
R_n	Número de Reynolds
R_T	Resistência total
S	Área de superfície molhada total
V	Velocidade
$VFAir$	Volume de fração do ar
$VFWater$	Volume de fração do água
Φ	Fator de mudança do campo de pressão em torno do casco isolado
σ	Fator de aumento da velocidade entre os cascos
τ	Fator de interferência da resistência de onda
∇	Volume deslocado
ν	Viscosidade cinemática da água
ρ	Densidade do fluido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.0.1	Objetivos Gerais	17
1.0.1.1	Objetivos Específicos	17
1.0.2	Justificativa	17
2	CATAMARÃ	18
3	ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO	20
3.1	Resistência de ondas	23
3.2	Resistência de fricção	23
4	MÉTODOS PARA O CÁLCULO DE RESISTÊNCIA AO AVANÇO	28
4.1	Prova de tanque	28
4.2	Séries sistemáticas	28
4.3	Métodos numéricos	29
5	METODOLOGIA	33
5.1	Simulação utilizando o software Hullspeed	33
5.2	Simulação utilizando o software CFX	35
5.2.0.1	Inlet	38
5.2.0.2	Opening	39
5.2.0.3	Outlet	39
5.2.0.4	Walls	39
5.2.0.5	Simetria	40
6	RESULTADOS	41
6.0.1	Simulação no Hullspeed com calado de 0,6m	41
6.0.2	Simulação no Hullspeed com calado de 0,3m	43
6.0.3	Simulação no ANSYS® CFX - Calado 0,6m e 0,3m	46
6.0.4	Comparação dos valores encontrados no Hullspeed e no CFX	48
7	CONCLUSÃO	49
8	TRABALHOS FUTUROS	50
	REFERÊNCIAS	51
	APÊNDICES	54
	ANEXOS	54

ANEXO A – OUTROS MÉTODOS TESTADOS NO HULLSPEED - CA-	
LADO 0,3m	54
ANEXO B – OUTROS MÉTODOS TESTADOS NO HULLSPEED - CA-	
LADO 0,6m	55

1 INTRODUÇÃO

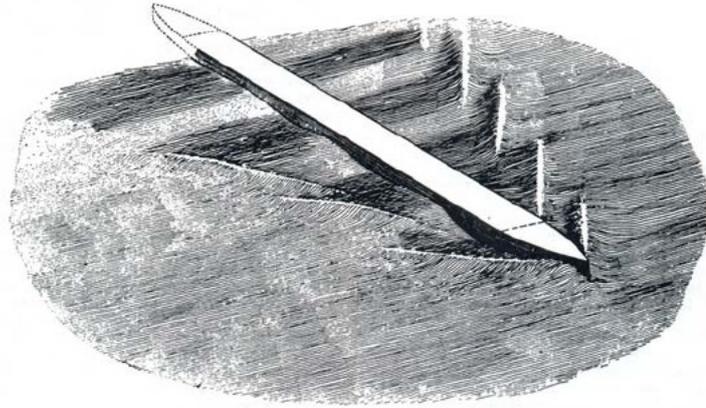
Conhecer a velocidade ideal de um barco para que este possa atingir a máxima performance é útil para que se possa escolher o propulsor desejado. Deve-se escolher um propulsor que gere empuxo suficiente para que a embarcação possa vencer a resistência ao avanço. A resistência ao avanço consiste na força que se opõe ao avanço de um navio e é o resultado do atrito da água com o casco e da formação do sistema de ondas que o deslocamento provoca. Ela depende da forma, tamanho e velocidade da embarcação e é o fator que determina a potência necessária para se atingir uma determinada velocidade (PORTO EDITORA, 2003).

Determinar a resistência ao avanço em uma embarcação é uma tarefa complexa por necessitar da utilização de conhecimentos em hidrodinâmica tais como a força inercial e a força viscosa que estão presentes no estudo dos fluidos. Segundo Simos (2007, p. 7), “A razão para tais dificuldades reside na própria natureza do fenômeno, com sua forte dependência de efeitos de viscosidade do fluido e da interação destes com efeitos ondulatórios na superfície-livre.” De acordo com Martínez (2016, p. 17), a problemática de estimar resistência em um catamarã está no fato de que esta depende da separação entre os cascos enquanto que em um barco monocasco a maior influência está em sua geometria. De modo que a resistência é maior para distâncias menores entre cascos, devido às interferências das ondas geradas em um casco pela presença do outro casco (MARTÍNEZ, 2016, p. 17). Devido a essa dificuldade, são utilizados métodos empíricos para estimar a potência de um barco. A determinação da resistência do mar ao aumento de velocidade da embarcação inicialmente foi feita através de testes em tanques com modelos em escala reduzida por William Froude (1810-1879) e ainda são usados nos dias atuais, porém com algumas modificações que permitiram uma maior acurácia nos resultados. Segundo Garcia (2007, p. 25), por meio de seus experimentos em tanques, Froude observou que toda embarcação em movimento, independente de tamanho e forma, gera ondas características (figura 1) e que a força necessária para que a embarcação se desloque na água pode ser decomposta em duas componentes: força de atrito, devido à viscosidade da água ao passar pelo casco, e força residual que leva em conta a forma geométrica, imperfeições do casco e as ondas geradas devido ao movimento do casco ao se deslocar na água.

Os testes com modelo em tanque têm um custo elevado e requerem considerável tempo de análise para ficar pronto e trazer resultados aceitáveis, porém esse custo é irrisório diante de outros gastos no projeto de grandes embarcações.

De acordo com Gerr (1989, p. 9), para pequenas embarcações, tais gastos não se

Figura 1 – Ondas geradas por embarcações em movimento



Fonte: Lewis (1988)

justificam, sendo mais viável usar fórmulas empíricas para estimar a velocidade, levando em conta fatores fundamentais como o tipo e a forma do casco, o deslocamento (peso do barco) e a potência. Desta forma, faz-se necessário o estudo da resistência ao avanço calculada através de programas computacionais voltados para a análise da fluidodinâmica como o CFD ou um software voltado para elaborar projetos e análises de barcos como o Maxsurf®.

O Maxsurf® é um software voltado especificamente para a indústria naval que possibilita várias análises incluindo a de resistência ao avanço, através do cálculo da relação entre a potência e a velocidade do mesmo por meio do programa HULLSPEED, utilizando, para isso, métodos estatísticos. O ideal é que para cada modelo de barco, uma metodologia de análise estatística seja utilizada, devido às especificidades de cada formato de casco. O método mais utilizado para monocascos é o de Holtrop & Mennen por possuir uma abrangência maior devido aos vários testes feitos em tanque com centenas de navios de formas e aplicações diferentes e ter os resultados desses testes comparados com dados de testes em mar com navios em tamanho real.

O objeto deste estudo, um catamarã, é um barco do tipo casco duplo, porém, boa parte dos métodos de estimativa de velocidade usados nestes programas só possuem dados ou parâmetros para embarcações do tipo monocasco. Para que se possa obter um resultado próximo do real ou daqueles que seriam obtidos por meio de testes em tanques, é necessário que se

faça outras análises como o uso do CFD juntamente com um método analítico para efeito de comparação.

1.0.1 Objetivos Gerais

- Estimar a resistência ao avanço de um catamarã com abordagem computacional baseada em CFD.

1.0.1.1 Objetivos Específicos

- Comparar os resultados obtidos nos softwares Hullspeed e CFX.

1.0.2 Justificativa

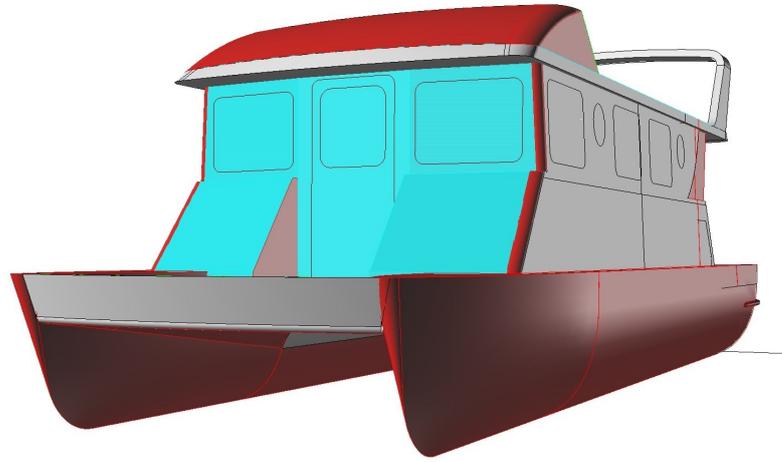
- A complexidade do fenômeno da resistência ao avanço torna difícil uma análise analítica.
- Métodos experimentais são caros.
- Utilização do CFD permite resultados aproximados

2 CATAMARÃ

O Catamarã é um barco que se diferencia da maioria das outras embarcações por possuir dois cascos unidos por uma estrutura de vigas, o que confere maior estabilidade devido a essa peculiaridade. Por ser feito com materiais leves como o alumínio, dificilmente irá afundar, ainda que um de seus cascos seja danificado, ele terá estanqueidade por possuir cascos independentes e por ser leve continuará flutuando na água. O catamarã apresenta ainda bom desempenho quando se trata de velocidade. Conforme explica Mancelos *et al.* (2015, p. 10), sua geometria com cascos gêmeos, possui maior área vélica e seu centro de gravidade é mais baixo, acrescentando a isso o fato de não apresentarem quilha pesada como os barcos monocascos, reduzindo o atrito com a água e assim não sofrerem com arrasto tornando-se mais velozes. De acordo com Goubault e Allison (2003, p. 44-8), por possuir uma geometria com casco duplo e delgado, o catamarã possui baixo arrasto e baixa resistência ao movimento. De acordo com Peng (2001, p. 1), entre as diversas vantagens dos navios multicasco pode-se citar sua estabilidade transversal que contribui para uma melhor navegabilidade. Contudo, devido à presença de um casco extra, esse tipo de navio pode apresentar configurações de geometria mais complexas além de sua característica típica de navio que opera a altas velocidades. (PENG, 2001, p. 2). Geralmente catamarãs utilizam dois motores facilitando a manobrabilidade e ainda dá segurança, pois caso um dos motores venha a falhar ainda haverá outro motor. Segundo Mancelos *et al.* (2015, p. 22), o catamarã pode apresentar três tipos de cascos diferentes, casco do tipo planeio, semi-deslocamento e deslocamento. O catamarã utilizado neste estudo (figura 2) possui casco do tipo deslocamento. Esse tipo de casco possui grande estabilidade. Porém, devido ao seu formato não é recomendável sua navegação em determinadas condições.

Na maioria das vezes o Catamarã é utilizado como barco de recreio ou para transporte de passageiros, onde a velocidade é importante. É possível observar uma tendência mundial pelo uso de embarcações do tipo catamarã para essas atividades em especial, tornando importante o estudo da resistência ao avanço nesses barcos, buscando encontrar métodos confiáveis e economicamente viáveis. Segundo Molland *et al.* (1997, p. 1) devido a geometria do catamarã, haverá uma mudança no campo de pressão ao redor dos seus dois cascos, o que ocasionará uma mudança na camada limite do mesmo. O fator de forma do catamarã leva em consideração este efeito, assim como o de aumento da resistência de atrito quando ocorre o aumento da velocidade entre os cascos. Kim e Yang (2011, p. 254) afirmam que devido a geometria do catamarã pode-se observar que as ondas que são formadas na região entre os cascos são diferentes das

Figura 2 – Catamarã projetado no Rhinoceros® utilizado neste estudo



Fonte: Elaborado pela autora

ondas formadas do lado externo do casco. Essa diferença entre lado interno e externo dos cascos provoca um aumento na resistência de formação de ondas, a qual será explanada mais adiante neste trabalho. Segundo embarcações (2016, p. 8), o catamarã apresenta uma vantagem em relação às embarcações que possuem apenas um casco no quesito motorização, devido a sua geometria com dois cascos que possibilita a utilização de dois motores e ainda ajuda na hora de fazer manobras por causa da distância entre a hélices dos motores.

3 ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO

A resistência ao avanço não é uma ciência exata e muitos dos métodos aqui mostrados irão apresentar resultados aproximados àqueles dos testes em tanques. A resistência é a força que se opõe ao movimento de avanço do barco na água. O Navio precisa encontrar um impulso, ou seja, uma força capaz de superar a resistência que ele encontra quando se move pela água. O cálculo da resistência ao avanço é a primeira etapa a ser feita no projeto de uma embarcação. Bertram (2011) afirma que o deslocamento de uma embarcação na água terá duas forças de resposta, uma na direção normal e outra na direção tangencial. Segundo Kim e Yang (2011, p. 254), a resistência em uma embarcação multicasco não possui as mesmas características da resistência em navios monocasco, isso ocorre devido a presença do casco adicional que adiciona estabilidade ao barco, porém provoca interferência no outro casco, essa interferência gera uma distribuição de pressão diferente para cada um dos cascos. Conforme Turbo (2011, p. 5), a Resistência do navio é influenciada por alguns fatores como sua forma, velocidade e seu deslocamento. Através do cálculo da resistência ao avanço, encontra-se a força que será necessária para vencer a resistência da água. Essa força é a potência que é requerida para que o barco alcance a velocidade desejada. De acordo com Simos (2007, p. 7), determinar a resistência é uma tarefa complexa porque este fenômeno depende de fatores e efeitos hidrodinâmicos como a viscosidade do fluido, o atrito da água com o casco, a formação de ondas e efeitos ondulatórios na superfície livre do barco. A resistência total em uma embarcação é:

$$R_T = C_T \frac{\rho V^2}{2} S. \quad (3.1)$$

Onde: S é a área de superfície molhada total de todos os cascos (m^2);

C_T é o coeficiente de resistência total;

ρ é densidade da água (kg/m^3);

V é a velocidade da embarcação (m/s).

Para simplificar a análise de resistência ao avanço, foi necessária dividi-la em componentes. Foram acrescentados alguns coeficientes para relacionar esses componentes entre si. Molland *et al.* (1997, p. 2) afirma que é uma prática comum dividir a resistência em componentes conforme os diferentes processos físicos sofridos. O cálculo da resistência ao avanço para catamarãs difere do cálculo para embarcações que possuem apenas um casco por que deve-se levar em conta a interferência que um casco causa ao outro. A equação a seguir

mostra o coeficiente de resistência total para monocascos:

$$C_T = (1 + k)C_F + C_W. \quad (3.2)$$

Onde:

C_T é o Coeficiente de resistência total;

$(1+k)$ representa o Fator de forma para monocascos;

C_F é o Coeficiente friccional;

C_W é o Coeficiente de resistência de onda;

Insel e Molland (1992, p. 3) propõem uma equação onde são acrescidos coeficientes que representam a interferência que um casco provoca no outro.

$$C_{TCAT} = (1 + \Phi k)\sigma C_F + \tau C_W \quad (3.3)$$

Onde:

C_{TCAT} é o coeficiente de resistência total para catamarãs.

C_F é o Coeficiente friccional da correlação ITTC 1957;

C_W é o Coeficiente de resistência de onda para um casco isolado;

Φ considera a mudança de pressão em torno do casco;

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

τ é o Fator de interferência de onda.

Para fins de simplificação, foi adicionado o fator (β) representando o fator de interferência viscosa, substituindo os outros dois fatores Φ e σ . A equação ficará assim:

$$C_{TCAT} = (1 + \beta k)C_F + C_W \quad (3.4)$$

Segundo Molland *et al.* (2011), para cascos sem chine, ou seja, sem quina os fatores de forma podem ser aproximados pelas seguintes equações:

$$(1 + k) = 2,76\left(\frac{L}{\nabla^{1/3}}\right)^{0,4}. \quad (3.5)$$

$$(1 + \beta k) = 3,03\left(\frac{L}{\nabla^{1/3}}\right)^{0,4}. \quad (3.6)$$

Onde:

$(1+\beta k)$ representa o fator de forma de interferência viscosa;

$\nabla^{1/3}$ é a raiz cúbica do volume deslocado.

Nas equações mostradas acima, a primeira representa o fator de forma para monocasco e a segunda representa o fator de forma para multicascos. O software Maxsurf®^(R), que será utilizado neste trabalho, já inclui no método slenderbody, um dos métodos para encontrar a resistência do catamarã, o fator de forma para multicascos.

Segundo Simos (2007, p. 105), o número de Reynolds é responsável pelo atrito do fluido no casco, assim ele controla a resistência de fricção, já o número de Froude é responsável pelas ondas geradas a partir do movimento do navio pelo mar, desse modo ele governa a resistência de ondas. A ITTC costuma dividir em duas componentes: resistência viscosa ou de fricção, dependente do número de Reynolds e resistência de ondas, dependente do número de Froude. Formation Design Systems (1984-2005) afirma que a resistência total é a soma desses dois efeitos, o viscoso e a formação de ondas.

Para um navio, o número de Reynolds é calculado da seguinte forma:

$$R_n = \frac{LV}{\nu} \quad (3.7)$$

Onde:

R_n é o número de Reynolds;

L é o comprimento em m;

V é a velocidade em m/s;

ν é a viscosidade cinemática da água em m^2/s .

Simos (2007, p. 9) afirma: “Fisicamente, o parâmetro R_n relaciona a magnitude das forças inerciais (de aceleração do fluido) e viscosas de um escoamento.” Para Simos (2007, p. 11), normalmente o escoamento sobre o casco do navio é turbulento, apresentando um alto valor no número de Reynolds.

O número de Froude pode ser calculado da seguinte forma:

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (3.8)$$

Onde:

V é a velocidade de avanço da embarcação em m/s;

L é o comprimento da embarcação na linha d'água em m;

g é a aceleração da gravidade em m/s^2 .

3.1 Resistência de ondas

Quando uma embarcação se movimenta em uma superfície livre produz ondas, essas ondas são geradas com a energia gasta a partir do deslocamento do barco, essa perda de energia se traduz na forma de resistência ao avanço do navio no mar. De acordo com Simos (2007, p. 14), a resistência de ondas está ligada ao número de Froude porque o comprimento das ondas varia com a velocidade do navio. Números de Froude na faixa de 0,40 apresentam elevada resistência de ondas, de modo que mesmo com um motor de potência maior, há pouca variação da velocidade (SIMOS, 2007). No cálculo da resistência para embarcações que possuem apenas um casco, a resistência é dividida em resistência de fricção, resistência residual e resistência por formação de ondas. Segundo Narasimhan (2010), ao se locomover no mar, uma embarcação experimenta duas forças, uma devido à água e a outra devido ao ar. Essas forças não serão iguais, podendo apresentar direção e magnitude diferentes. Peng (2001, p. 10) explica que a resistência friccional ocorre quando, ao se mover por um fluido que está em repouso, o barco experimenta uma força na direção tangencial em função da formação de camada limite na superfície do navio devido a aderência de uma fina camada de fluido no casco. A resistência do ar é influenciada pela forma do barco acima da linha d'água, pela área exposta ao ar e pela velocidade do barco na água (USNA,). De acordo com Spinoza et al, ela acontece devido a oposição do vento ao movimento da parte não submersa da embarcação através do ar. No estudo da resistência ao avanço, a interação do barco com o ar (arrasto) não é significativa quando comparada a outros componentes presentes na resistência quando a embarcação opera em condições normais, por isso não é levado em consideração no projeto de embarcações. O vento só passa a ser significativo quando a embarcação opera em condições climáticas extremas. (RIDLEY; PATTERSON, 2014, p. 325). Para o caso analisado neste trabalho, a resistência do ar é de pouca relevância. Para embarcações multicasco, o componente mais importante a ser analisado é a resistência por formação de ondas.

3.2 Resistência de fricção

A chamada resistência de fricção está intimamente relacionada com o estudo da camada limite uma vez que se refere ao escoamento em torno do casco. Durante esse escoamento, o fluido que está em contato com a superfície adquire a mesma velocidade que a superfície devido a interação das moléculas do fluido com as moléculas do sólido atendendo a condição de não-deslizamento. (RESPONDEAÍ, 2018). Dessa forma, pode-se dizer que para a camada

mais próxima à superfície do casco, a resistência friccional é maior, devido as forças viscosas terem uma maior influência nas proximidades da parede do casco. Em determinado momento desse escoamento, haverá a transição do escoamento laminar para o turbulento. Segundo USNA, os valores típicos de Reynolds para escoamento externo em casco de navio são menores que 5×10^5 para escoamento laminar e maiores que 1×10^6 para escoamento turbulento. Qualquer valor que se encontre entre esse intervalo estará na região de transição do escoamento laminar para o turbulento. De acordo com Florido (2012, p. 7), a resistência friccional é produzida em parte pelo atrito entre o casco e água, visto que a uma fina camada da água permanece junto ao casco. Porém, onde isso ocorrerá depende do fluido que está sendo analisado, da velocidade do escoamento e da forma geométrica do casco. De acordo com Barboza (2016, p. 05), o escoamento laminar tem início na proa e vai ficando turbulento à medida que caminha para a popa, formando uma camada limite que vai da proa em direção a popa. Em embarcações de alta velocidade, a resistência por atrito é um pouco inferior a 40% da resistência total, podendo aumentar com o passar do tempo devido ao aumento da rugosidade na superfície do casco (FLORIDO, 2012, p. 7). O coeficiente de atrito assume que o casco é como se fosse uma placa plana se movendo pela água. USNA explica que sua equação é baseada em muitos testes com navios e placas planas e è reconhecida internacionalmente pela International Towing Tank Conference (ITTC), como mostra a equação 3.9:

$$C_f = \frac{0.075}{(\log_{10} Rn)^{-2}}. \quad (3.9)$$

O número de Reynolds é em função do comprimento da embarcação, porque a embarcação multicasco pode ter cascos com diferentes comprimentos mesmo que eles sejam submetidos as mesmas velocidades o número de Reynolds pode não ser o mesmo. (PENG, 2001, p. 38). Como foi dito anteriormente, a resistência total pode ser dividida em componentes, porém, dependendo da forma geométrica do casco, nem todos esses componentes serão utilizados.

A seguir, serão abordados os tipos de resistência que serão utilizados neste estudo. A Resistência residual é composta pela resistência por formação de ondas e pela resistência dos apêndices. Segundo Turbo (2011, p.10) existe a resistência de escoamento turbulento causada pela separação do escoamento na extremidade da ré do navio, que gera esse escoamento turbulento ocasionando perda de energia. A Resistência de formação de ondas se origina com o movimento da embarcação na água. Segundo Narasimhan (2010), essa movimentação da água produzirá um sistema de ondas que surgem com as variações do campo de pressão ao redor do

barco. Essas ondas se formam à proa e à popa quando a embarcação executa um movimento de avanço pela água. Sendo que a proa e a popa são as regiões que mais sofrem mudanças de pressão (SIMOS, 2007). Segundo Simos (2007, p.14), modificações bruscas no casco, principalmente na região de popa, fazem com que a camada limite se despreze do casco gerando vórtices à jusante do barco. A formação desses vórtices resulta em um gasto de energia, sentido pela embarcação na forma de resistência. Segundo Spinoza et al, a resistência de ondas depende do comprimento, forma e velocidade da embarcação. De acordo com Florido (2012), o barco gera um campo de pressões devido as perturbações causadas pelo seu movimento através da água. Sendo os extremos da proa e da popa áreas de alta pressão e na parte central do barco, área de baixa pressão. A energia transferida do barco para o campo de pressão resultará em uma força que se opõe ao movimento do navio na água. Como foi dito anteriormente, o componente mais influente na análise da resistência ao avanço em catamarãs é a resistência por formação de ondas devido a interferência do sistema de ondas gerados por cada casco. Segundo Turbo (2011, p. 10), quando o navio se movimenta na água, ele cria ondas resultando em perda de energia. De acordo com USNA, e como já foi mencionado anteriormente, é necessário energia para gerar ondas e à medida que a embarcação aumenta sua velocidade, a altura das ondas produzidas também aumenta e dessa forma é necessário uma maior quantidade de energia para gerar essas ondas, o que resulta em perda na forma de resistência por formação de ondas. USNA afirma que um navio pode formar vários sistemas de ondas, tanto de proa como de popa, esses sistemas interagem entre si, em alguns casos se cancelando, o que por sua vez contribui para a diminuição da resistência de ondas e em outros casos esses sistemas se somam o que provoca o aumento na resistência de ondas. Esses encontros em que as ondas colidem entre si e se sobrepõem são chamados de interferência construtiva, quando se adicionam, e interferência destrutiva, quando se reduzem. As ondas produzidas em águas rasas tendem a ser maiores do que as ondas produzidas em águas profundas, o que requer maior energias para produzi-las. Isso ocorre porque o movimento da água ao redor do fundo do casco acelera, causando um aumento da resistência friccional em águas rasas USNA. Peng (2001, p. 10) relata que a hipótese de Froude considera que a resistência por formação de ondas é independente da resistência friccional, pois a resistência de ondas tem sua origem a partir do movimento para frente da embarcação na água transferindo energia na forma de ondas. De acordo com Martínez (2016, p. 17), a análise da resistência em catamarãs depende da separação entre seus cascos, uma vez que quanto mais próximos estiverem, maior será a resistência. Contudo, Martinez também afirma que em certo

ponto, o aumento da distância entre os cascos não causará diferença na diminuição da resistência, isso porque para aumentar a distância entre os cascos é necessário que se reforce a estrutura que une ambos, aumentando o peso da embarcação.

A interação entre os monocascos inclui mudanças na camada limite devido a modificação do campo de pressão ao redor dessas embarcações, e a influência na resistência de fricção devido ao aumento da velocidade entre os navios de casco único (MARTÍNEZ, 2016, p. 17). O impacto das ondas é maior em navios de alta velocidade do que em navios lentos (TURBO, 2011). Em altas velocidades o comprimento e a altura da onda muda aumentando a resistência. Enquanto que em baixas velocidades, a resistência de ondas é proporcional ao quadrado da velocidade (FLORIDO, 2012).

Segundo Ribeiro (2009, p. 2), é difícil quantificar a resistência por formação de ondas e com o aumento da velocidade esta tarefa se torna ainda mais complexa, por isso o uso de ensaios experimentais é tão utilizado, visto que apresenta resultados confiáveis. Ribeiro (2009, p. 2) afirma que métodos experimentais são importantes para validar métodos numéricos no problema da resistência ao avanço. Schoeping (2014, p. 19) declara que a resistência de apêndices que é composta por componentes como propulsores que causam resistências adicionais à embarcação também podem entrar no cálculo da resistência total. De acordo com Narasimhan (2010), a resistência de apêndices são aquelas originadas do leme, hélice, suportes de eixo, quilha de porão, mandíbula, estabilizadores, etc. Neste trabalho, a resistência de apêndice será considerada para os motores de popa.

Como mencionado anteriormente neste trabalho, em baixas velocidades, a resistência de ondas é proporcional ao quadrado da velocidade, porém ela aumenta rapidamente em altas velocidades. Turbo (2011, p.10) afirma que isso significa que existe uma barreira de velocidade e portanto um aumento da potência de propulsão não significa que a velocidade irá aumentar, pois essa energia seria transformada em energia das ondas. Como já foi dito anteriormente, calcular a resistência de ondas através de métodos teóricos é muito complexo, Simos (2007, p. 20) explica que a dificuldade surge após uma certa velocidade, para valores de Froude acima 0.25, quando a razão entre a altura e comprimento de onda gerada ficam elevadas ocasionando a "quebra" da onda.

Segundo Armstrong (2003, p. 45-1), com o desenvolvimento do mercado internacional, a preocupação em obter a máxima velocidade tornou-se importante, pois maiores velocidades representavam menos tempo em entrega de produtos e também uma adequação ao

novo estilo de vida que surgia. Aumentar a potência dos motores pode trazer um aumento da velocidade, porém diminuir a resistência ao avanço resulta em um aumento de velocidade mais eficiente.

4 MÉTODOS PARA O CÁLCULO DE RESISTÊNCIA AO AVANÇO

4.1 Prova de tanque

O método mais preciso utilizado até hoje são os métodos experimentais em tanques de prova. Este método consiste em fazer um barco, em escala reduzida, correr através de um tanque de água, que se encontra em repouso, sendo carregado por um carro de reboque dinamométrico. O modelo em escala reduzida possui as mesmas formas geométricas da embarcação real e é conduzido a diferentes velocidades (SIMOS, 2007, p. 22).

4.2 Séries sistemáticas

De acordo com Simos (2007, p. 29), é preciso fazer um levantamento inicial das necessidades do barco para obter informações básicas quanto ao peso, potência necessária. Para isso, utilizam-se métodos menos dispendiosos como por exemplo as séries sistemáticas. Simos (2007, p. 29) afirma que as séries sistemáticas baseiam-se na utilização de um determinado casco como modelo-base para uma série de ensaios experimentais variando-se sistematicamente parâmetros geométricos como L/B , B/T , cb , dentre outros. A partir dos resultados desses experimentos são feitas regressões matemáticas a fim de apontar como esses parâmetros influenciam na resistência da embarcação. A utilização das séries sistemáticas tem decaído para muitos tipos de embarcações por estarem ultrapassadas, porém ainda é válido para embarcações como o catamarã por ainda estarem em desenvolvimento. Todavia é importante ressaltar que o uso das séries sistemáticas deve ser utilizado no início do projeto com a finalidade de se obter estimativas preliminares. Segundo Roig (2015, p. 61), as equações que regem o fenômeno da resistência ao avanço são difíceis de serem abordadas analiticamente, porém com o advento dos softwares que trabalham com cálculos fluidodinâmicos tornou-se possível obter, de forma aproximada, resultados para a resistência ao avanço de embarcações, bem como o seu comportamento em alto mar. Roig (2015, P. 68) afirma que o método escolhido para o cálculo da resistência ao avanço deve levar em conta a forma do casco, posto que este tem grande influência na resistência. Roig (2015) também explica que é necessário escolher um método que englobe o tipo de embarcação e sua aplicação. Entre os métodos analíticos para o cálculo de resistência ao avanço, podemos distinguir: as séries sistemáticas, já mencionadas, e os métodos numéricos. A adequação de uma série sistemática será máxima quando o navio estudado prevê formas semelhantes às estudadas na série e as relações adimensionais das dimensões do navio estão dentro de intervalos

cobertos pela série. Quanto mais diferença houver, menor será a confiabilidade dos resultados. É importante ressaltar que a confiabilidade da série está na semelhança que o barco estudado apresenta com aqueles que foram analisados na série utilizada. Quanto mais inserido dentro do intervalo coberto pela série, mais confiável será o resultado do estudado. Segundo Schoeping (2014, p. 19), os métodos de regressão fazem uso de uma ampla base de dados com diversos tipos de embarcações e proporcionam relações para o cálculo da resistência ao avanço. Enquanto que as séries históricas utilizam uma embarcação de geometria semelhante para fornecer dados para o cálculo de sua resistência.

4.3 Métodos numéricos

Os métodos numéricos, conhecidos como Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), resolvem as equações numéricas de Navier-Stokes (BARBOZA, 2016, p. 2). De acordo com Lervolino (2015, p. 28), o CFD consegue equacionar um problema real por meio de sua discretização em elementos finitos e dessa forma obter um resultado por meio computacional. Segundo Silva (2019, p. 3) afirma que os problemas tratados no ANSYS® CFX geralmente possuem uma abordagem que envolve fazer ajustes na geometria do modelo analisado, produzir uma malha de qualidade e definir e colocar as condições de contorno. Lervolino (2015, p. 30) explica que existem algumas etapas que o CFD utiliza para abordar um problema. São elas: Geometria, Discretização, Condições de contorno, Solução e Visualização. A geometria é a parte inicial do problema, ela descreve o formato do objeto que será analisado. A primeira é a fase da análise computacional e a de pré-processamento, onde a geometria do objeto de estudo será preparada, onde será criado o volume de controle e serão definidas as condições de contorno (LERVOLINO, 2015). Segundo Roig (2015, p. 106), a utilização de programas computacionais torna a análise dos movimentos dos fluidos mais simples, uma vez que ele facilita na resolução das equações que governam a dinâmica dos fluidos. A aplicação do CFD na área de hidrodinâmica se dá principalmente na resolução de problema envolvendo resistência e propulsão. Inicialmente, a precisão dos resultados, mesmo com cálculos simplificados por desprezar os efeitos da viscosidade e formação de ondas na superfície livre atraiu muita atenção. (ROIG, 2015). Como Roig (2015) explica em seu trabalho, é possível simplificar as equações que representam o comportamento dos fluidos, utilizando as seguintes considerações:

- As condições de contorno não variam com o tempo (Regime estacionário).
- Admitir o fluido como incompressível, não viscoso.

- Simplificação das forças que atuam sobre o fluido (Hidrostática, potencial).
- Utilização de valores médios (Reynolds médio).

Hartloper (2010, p. 5) afirma que as equações que regem a dinâmica dos fluidos computacionais são as equações de conservação de momento e de massa e que elas atuam considerando estado estacionário e que o fluido é incompressível. Dessa forma a equação fica:

$$\frac{\delta_u}{\delta_x} + \frac{\delta_v}{\delta_y} + \frac{\delta_w}{\delta_z} = 0 \quad (4.1)$$

Onde as componentes u, v e w representam as velocidades em m/s dos fluidos nas direções x, y e z respectivamente. Hartloper (2010, p. 5) mostra que a equação da conservação de momento na direção x pode ser escrita da seguinte forma:

$$\rho \left(\frac{\delta_u}{\delta_x} + v \frac{\delta_v}{\delta_y} \right) = -\frac{\delta p}{\delta u} + \mu \left(\frac{\delta^2 u}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 v}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 w}{\delta z^2} \right) + \rho g_x \quad (4.2)$$

Onde:

ρ é a densidade do fluido em kg/m³

μ é a viscosidade do fluido em kg/(s-m)

g_x é a aceleração da gravidade na direção x dada em m/s²

$\frac{\delta p}{\delta u}$ é o gradiente de pressão na direção x dado em Pa/m.

Para as direções y e z a equação é semelhante a forma mostrada acima.

O fluido que escoar ao longo do casco de uma embarcação em geral se caracteriza por ser turbulento. De acordo com Roig (2015, 114), a turbulência em um fluido apresenta algumas características, tais como irregularidade, número de Reynolds elevado, ser tridimensional, dissipação e ser contínuo. Roig (2015, 115) afirma que enquanto as séries históricas e regressões numéricas se limitam a fornecer apenas os valores da resistência no navio e alguns elementos que fazem parte dela, os softwares que utilizam CFD fornecem uma grande quantidade de informações que facilitam as interpretações dos resultados como gráficos de ondas e campos de pressão ao redor do barco.

O ANSYS® CFX utiliza simulações de dinâmica dos fluidos para prever o comportamento hidrodinâmico de embarcações, embora não tenha sido desenvolvido com esta finalidade, é possível utilizá-lo para este fim e obter resultados satisfatórios. Segundo o Ahmed (2011), o modelo matemático usado no CFX para descrever um fluido em superfície livre, é o fluido homogêneo multifásico Euleriano – Euleriano (homogenous multiphase Eulerian–Eulerian fluid

approach). Nesse modelo os dois fluidos em questão estão expostos as mesmas condições de velocidade, temperatura, pressão demais campos atuantes na simulação, sendo separados por uma interface solucionável. Ahmed (2011) explica que o código usual utilizado no CFX para o modelo de turbulência k- ϵ é:

$$\rho u_j \frac{\delta k_i}{\delta x_j} = \frac{\delta}{\delta x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\delta k}{\delta x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M. \quad (4.3)$$

$$\rho u_j \frac{\delta \epsilon_i}{\delta x_j} = \frac{\delta}{\delta x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\delta \epsilon}{\delta x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_K + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4.4)$$

Ahmed (2011, p. 231) explica que os termos G_k , G_b e Y_M são, respectivamente, termos de geração de energia cinética turbulenta devido ao gradiente médio de velocidade, geração de energia turbulenta devido a flutuabilidade e a parte da dilatação flutuante na turbulência compressível para a taxa de dissipação global.

O Hullspeed é um programa do software Maxsurf desenvolvido para estimar a resistência em navios. O hullspeed possui um banco de dados das formas dos cascos de várias tipos de embarcações e para cada um desses dados, ele usa um algoritmo para estimar os valores da resistência Formation Design Systems (1984-2005, p. 3), existem algoritmos para cascos de planeio, deslocamento, semi-deslocamento e assim por diante. Segundo o manual do Formation Design Systems (1984-2005, p. 27), quando a geometria do casco for bem configurada no maxsurf, programa pelo qual o desenho deve passar antes de ir para o Hullspeed, ao ser importada para o hullspeed com as configurações adequadas, o próprio hullspeed gera uma malha simétrica para o casco, tendo como base sua linha de centro. O método Slender Body calcula a resistência de onda de um casco que seja simétrico a bombordo e a boreste (FORMATION DESIGN SYSTEMS, 1984-2005). Este método pode ser aplicado tanto em embarcações de monocasco quanto multicasco. De acordo com o manual do Hullspeed, este método deve ser empregado em navios que possuam casco delgado e simétricos em relação a sua linha de centro. Como mencionado anteriormente, o método de slender body calcula somente a resistência de ondas, para obter a resistência total, o Hullspeed calcula os demais coeficientes necessários, como o coeficiente de fricção e o fator de forma adequado ao casco analisado. (FORMATION DESIGN SYSTEMS, 1984-2005).

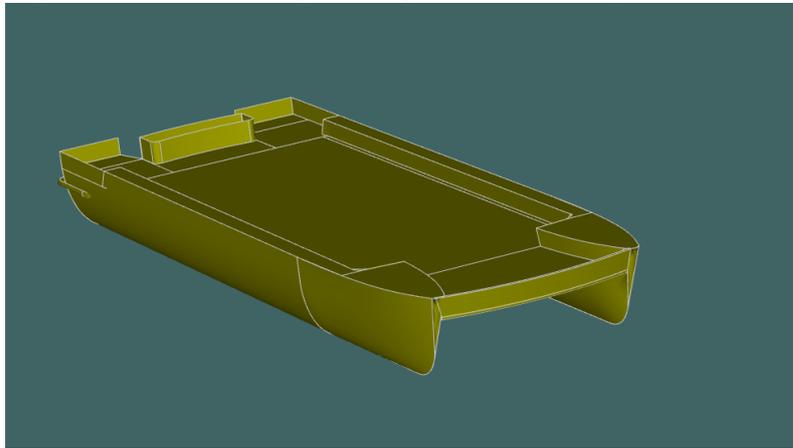
(Molland, 2008) explica que uma desvantagem das estimativas feitas usando CFD é que este baseia suas análises apenas nas equações numéricas que governam a mecânica dos fluidos, porém algumas destas equações não podem ser calculadas de modo preciso. O ANSYS® CFX, utiliza simulações de dinâmica dos fluidos para prever o comportamento hidrodinâmico de embarcações, embora não tenha sido desenvolvido com esta finalidade, é possível utilizá-lo para este fim e obter resultados satisfatórios.

5 METODOLOGIA

5.1 Simulação utilizando o software Hullspeed

Na primeira simulação foi utilizado o programa Hullspeed. O casco foi modelado utilizando o programa computacional Rhinoceros®. O modelo foi importado para o software Maxsurf® com a extensão IGES, antes de importá-lo para o Hullspeed (Figura 3). Ao inserir a geometria no Maxsurf®, é necessário especificar o eixo de coordenadas e as unidades de trabalho. No MaxSurf® foi verificado se o casco possuía algum falha na geometria que pudesse provocar erros na análise de resistência.

Figura 3 – Modelo importado para o Maxsurf®

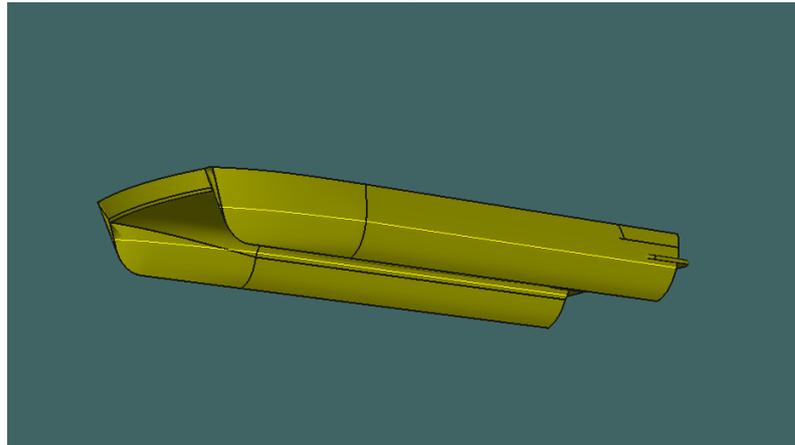


Fonte: A autora

Foram feitas duas simulações no Hullspeed variando os calados da embarcação, na primeira foi utilizado um calado de 0,6m como pior caso e na segunda foi utilizado um calado de 0,3m para uma situação de carga leve. Ainda no Maxsurf® foi inserido o calado da embarcação. Ao fazer isso, o programa mostra de forma intuitiva a marcação do calado no casco (Figura 4). Após inserir o calado, o desenho foi salvo no formato MSD, formato aceito pelo programa Hullspeed. Em seguida, o Maxsurf® foi fechado para que o trabalho pudesse ser continuado no hullspeed. A partir dos dados inseridos no programa, é possível encontrar valores de resistência para um determinado casco dentro de um intervalo definido de velocidades, o programa fornece ainda gráficos comparativos entre os diversos métodos disponíveis no software. Ao abrir o Hullspeed, na barra de ferramentas file é selecionada a opção Open Design para importar a geometria salva anteriormente. A interface do hullspeed é mostrada na figura 5.

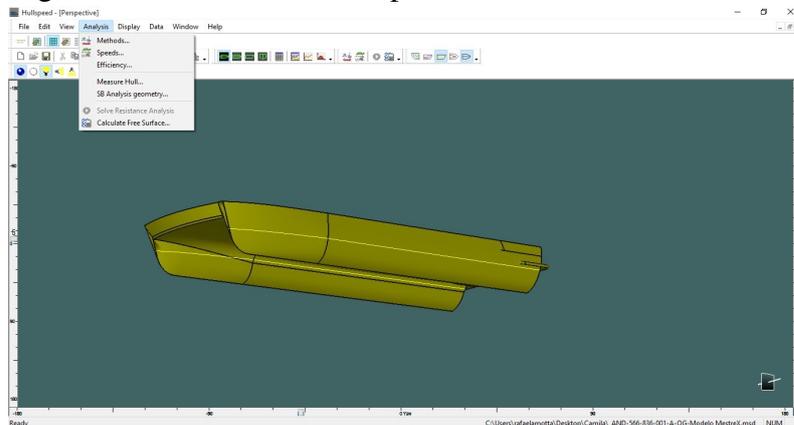
Após importar a geometria, é selecionado o método com que se deseja calcular a resistência ao avanço da embarcação. Como mencionado anteriormente, para determinados

Figura 4 – Modelo com marcação do calado de 0,6m



Fonte: A autora

Figura 5 – Interface do Hullspeed

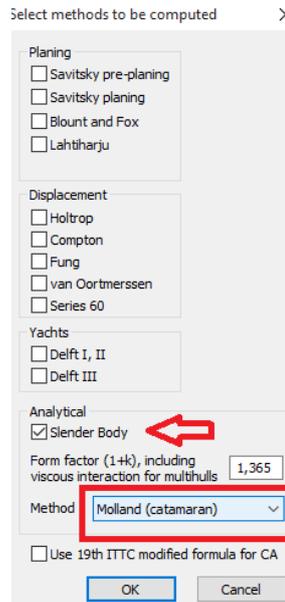


Fonte: A autora

casos alguns métodos não são recomendados, pois são baseadas em testes empíricos os quais não cobriam certos tipos de navios. O método utilizado foi o Slender Body para catamarã (figura 6), pois neste caso o fator de forma muda como foi mostrado na equação 3.6.

Após seleção do método, deve-se inserir o intervalo de velocidade para o qual a simulação será resolvida. Dentro desta série estará a curva de potência ideal para o barco. A variação das velocidades escolhidas foi entre 5 e 20 nós. Logo após inseridos os dados, o programa mostra dados da embarcação como pode ser visto na figura 7. Os dados mostrados na figura 7 são, respectivamente, o comprimento na linha d'água, boca que é a largura máxima do barco, calado que é a profundidade do navio na água, o volume deslocado que é a massa de água deslocada quando o barco está na água e a área da superfície molhada, importante parâmetro utilizado no cálculo da resistência. Após resolver a análise da resistência, o Hullspeed mostra os resultados para o intervalo de velocidades predefinido automaticamente. Para calcular o padrão de superfície livre, o hullspeed utiliza o mesmo método de estimativa de resistência do Slender

Figura 6 – Método escolhido para o cálculo da resistência



Fonte: A autora

Figura 7 – Dados do Catamarã fornecidos pelo Hullspeed

Item	Value	Units
LWL	11,375	m
Beam	3,92	m
Draft	0,601	m
Displaced volume	7,453	m ³
Wetted area	35,534	m ²

Fonte: A autora

Body. Porém, ignora os efeitos da viscosidade e da quebra de ondas Formation Design Systems (1984-2005, p. 31).

Terminada a primeira simulação do casco com calado de 0,6m, foi feita segunda simulação, desta vez utilizando um calado com 0,3m. Os procedimentos para a simulação são os mesmos mencionados anteriormente. A variação das velocidades escolhidas foi entre 5 e 20 nós. A figura mostra o casco com o novo calado de 0,3m.

5.2 Simulação utilizando o software CFX

Uma simulação utilizando a ferramenta computacional CFX do software ANSYS® versão 19.1 também foi realizada. Para que o casco pudesse ser importado para a ferramenta computacional Ansys CFX, foi necessário fazer algumas modificações no casco (figura 9), pois o CFX só aceita sólidos geometricamente fechados, do contrário não será possível gerar malhas adequadas. Porém, as modificações não afetaram o desenho original.

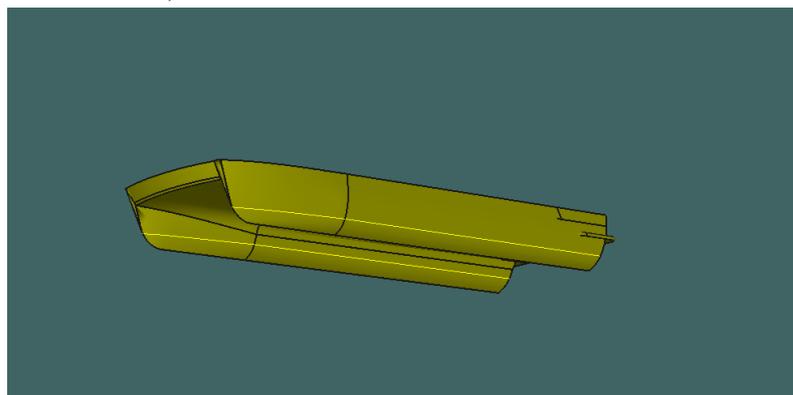
O casco foi importado com a extensão 3DM, o ANSYS® aceita uma ampla variedade

de arquivos em formato CAD. A geometria foi importada para o ANSYS® DesignModeler para preparação do desenho. No DesignModeler era preciso criar uma região de escoamento de fluido, foi utilizada o recurso enclosure (Figura 10), que envolve o corpo do modelo, essa ferramenta permite que um material como um fluido ou gás possa ser adicionado quando for usado na aplicação do ANSYS® CFX (SHARCNET,). Ao criar o enclosure, automaticamente ele divide a geometria pela metade do tamanho para simplificar a simulação posteriormente. A condição de simetria é aplicada na extremidade onde se encontra metade do casco e a simulação será rodada para metade do volume de controle e após isso, os resultados serão extrapolados para todo o volume de controle.

Para o volume de controle, recomenda-se que o casco seja posicionado a uma distância de $1L$ da condição de entrada, a $2L$ de distância da condição de saída, distante $2L$ das extremidades na direção horizontal e $1L$ das extremidades na direção vertical, onde L é o comprimento do catamarã. Em seguida, os nomes das superfícies de contorno foram criados (Figura 11). Após isso, deu-se início a geração de malha. O módulo ANSYS® Meshing foi utilizado para geração da malha. A malha escolhida para esse trabalho foi a malha com volumes hexaédricos (Figura 12), pois possuem menos elementos, contribuindo para um menor tempo de solução e também por serem as mais indicadas para problemas de fluidodinâmica computacional. O ANSYS® Meshing também fornece o número de elementos e nós da malha, os dados são mostrados na Figura 13.

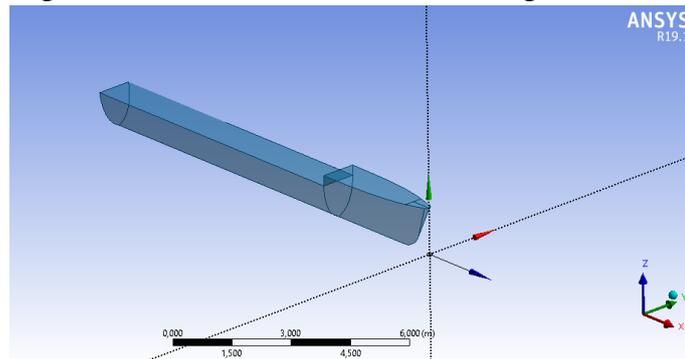
Após a geração da malha no ANSYS® Meshing, dá-se início a fase de processamento, no CFX-Pre. Nessa fase serão definidas "as especificações físicas do problema, condições de contorno, valores iniciais e parâmetros de solução"(SILVA, 2019, p. 6). Utilizou-se o método multifásico, tendo ar e água como as fases presentes. O método da fração de volume é usado

Figura 8 – Casco do catamarã no Hullspeed com calado de 0,3m



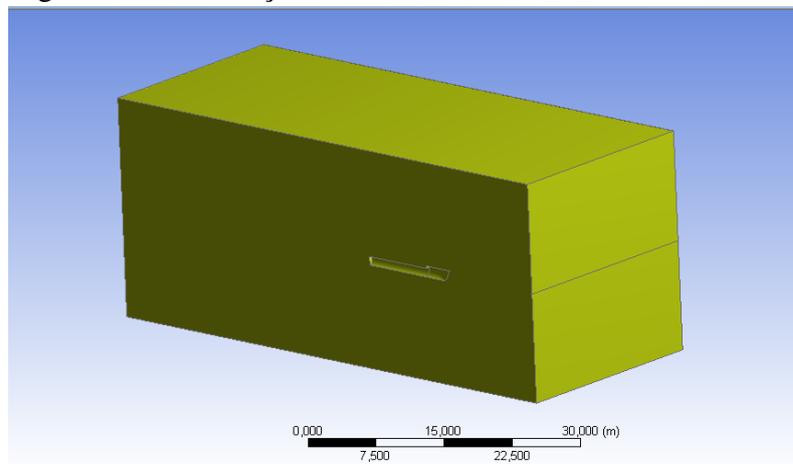
Fonte: A autora

Figura 9 – Geometria do casco no DesignModeler



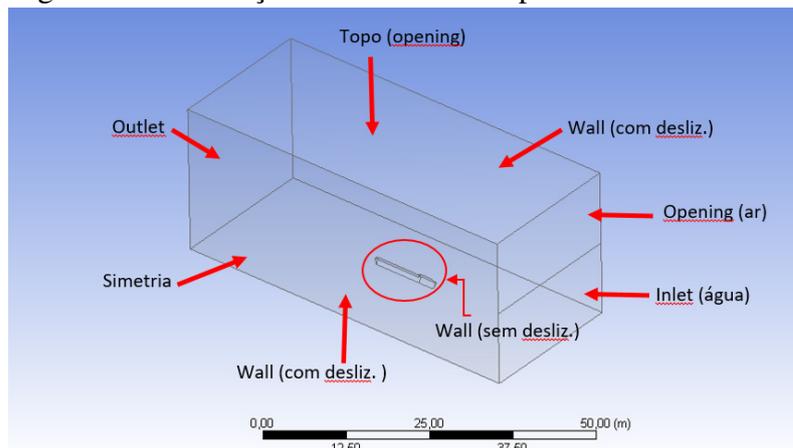
Fonte: A autora

Figura 10 – Utilização da ferramenta enclosure



Fonte: A autora

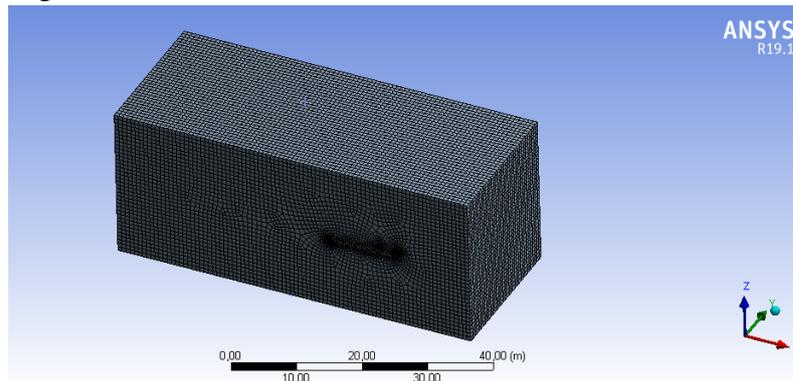
Figura 11 – Condições de contorno do problema



Fonte: A autora

para representar a superfície livre, pois nele os dois fluidos presentes, são tratados como um único fluido multifásico (CANDELLA, 2014, p. 9). Na opção *Default Domain* foram criados dois fluidos, ar e água. Os efeitos da gravidade foram considerados, definindo g com valor de $9,81 \text{ m/s}^2$. O modelo de turbulência adotado foi o modelo $k-\epsilon$. Vilela (2014, p. 18) afirma que o modelo $K-\epsilon$ é eficaz para simulações de superfície livre por sua eficácia com problemas que

Figura 12 – Geometria com malha hexaédrica



Fonte: A autora

Figura 13 – Quantidade de elementos e nós gerados na malha

Statistics	
Nodes	133254
Elements	139015

Fonte: ANSYS® Meshing

envolvam o campo de pressões ao redor do casco. Foram definidas as condições de contorno, como mostrado na Tabela 4 e na figura 14.

Tabela 1 – Condições de contorno no CFX-Pre

Posição	Tipo de contorno	Condição de contorno
Entrada	Inlet	$v = 5,14 \text{ m/s}$,
Saída	Opening	$P_{manometric} = 0$
Lateral, fundo	Free slip wall	
Simetria	Symmetry	
Entrada (ar)	Opening	Opening Pres. and Dirn
Topo	Opening	Entrainment, turbulence = zero gradient

Fonte: a autora.

5.2.0.1 Inlet

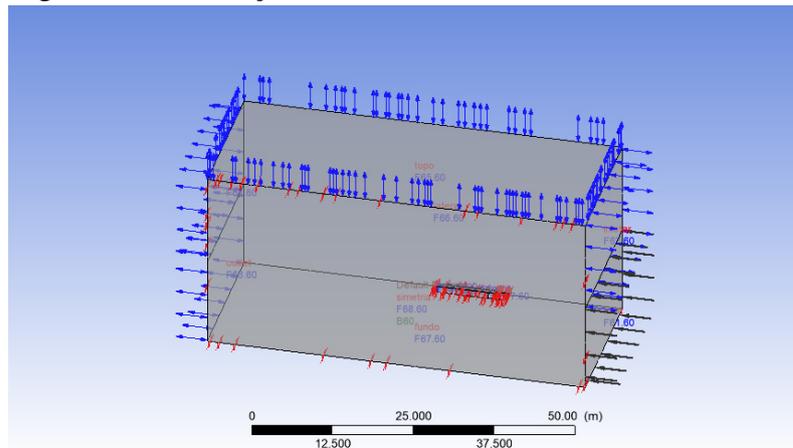
Para auxiliar na simulação, foram criadas algumas expressões matemáticas usadas nas condições de contorno. As equações para o volume de fração do ar e da água são mostradas abaixo:

$$VFAir = \text{step}((h-z)/1[\text{m}])$$

$$VFWater = 1 - VFAir$$

Vilela (2014, p. 19) explica que h “representa o nível da água em relação a origem do

Figura 14 – Condições de contorno definidas no CFX-Pre



Fonte: A autora

sistema de coordenadas.” Na condição de entrada a água foi considerada com uma densidade de 997 kg/m^3 , valor da densidade da água em temperatura ambiente, entrando com uma velocidade de $5,14 \text{ m/s}$ que é aproximadamente 10 nós, valor estimado para velocidade de cruzeiro do catamarã.

5.2.0.2 *Opening*

A região acima da água foi considerada inteiramente com ar, com densidade de $1,185 \text{ kg/m}^3$. A região de topo também foi considerada como tendo 100% de ar com turbulência zero gradient.

$$\text{Pressão relativa} = \rho * g * (h-z) * VFWater$$

5.2.0.3 *Outlet*

Uma condição do tipo *Opening* foi adotada para a região de saída, com pressão hidrostática, a fim de impedir que o fluido entre novamente no domínio.

5.2.0.4 *Walls*

Para as regiões lateral e de fundo, a condição de parede com deslizamento foi imposta, permitindo que o fluido possa escoar livremente, sem atrito para simular uma condição semelhante ao barco se deslocando. As considerações feitas para o casco na simulação é que o mesmo é uma parede com condição de não-deslizamento, dessa forma não haverá velocidade em sua superfície. Segundo Candella (2014, p. 12), ao colocar essa condição para o casco, é

possível a formação da camada limite, necessária para a componente viscosa da resistência.

5.2.0.5 Simetria

A condição de simetria foi adotada para a área seccionada onde se encontra o casco. Ao definir o contorno como simétrico ajuda para que o solver não interprete aquela região como uma fronteira.

Sharcnet (2016) explica que na aba *global initialization* são colocados todos os valores da solução que não foram definidos, estes valores são especificados no início da simulação. Sharcnet (2016) afirma que para simulações em regime permanente, essas configurações iniciais podem ser chamadas de palpites iniciais e que quanto mais precisos forem esses parâmetros, melhor será para a convergência da solução. Assim, foram configuradas as condições iniciais para o domínio. As condições são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 – Condições iniciais no CFX-Pre

Condição inicial	Valor
Velocidade(comp. cartesianos)	$u = 5,14 \text{ m/s}, v = 0, w = 0$
Pressão estática	$p = 0 \text{ [Pa]}$
Volume fraction água	1
Volume fraction ar	0

Fonte: a autora.

Na aba *Solver Control* foi especificado o modelo *Homogeneous coupled volume of fluid* que é o recomendado para escoamentos em superfície livre. Para ajudar na convergência foi utilizado processamento paralelo, pois este diminui o tempo de simulação.

6 RESULTADOS

6.0.1 Simulação no Hullspeed com calado de 0,6m

A figura 15 mostra os resultados do programa para uma simulação do casco com calado de 0,6m e uma variação de velocidades de 5 a 20 nós. Para cada velocidade, há um valor de resistência e potência correspondente. O Hullspeed também fornece gráficos da resistência

Figura 15 – Valores de resistência do catamarã - calado 0,6m

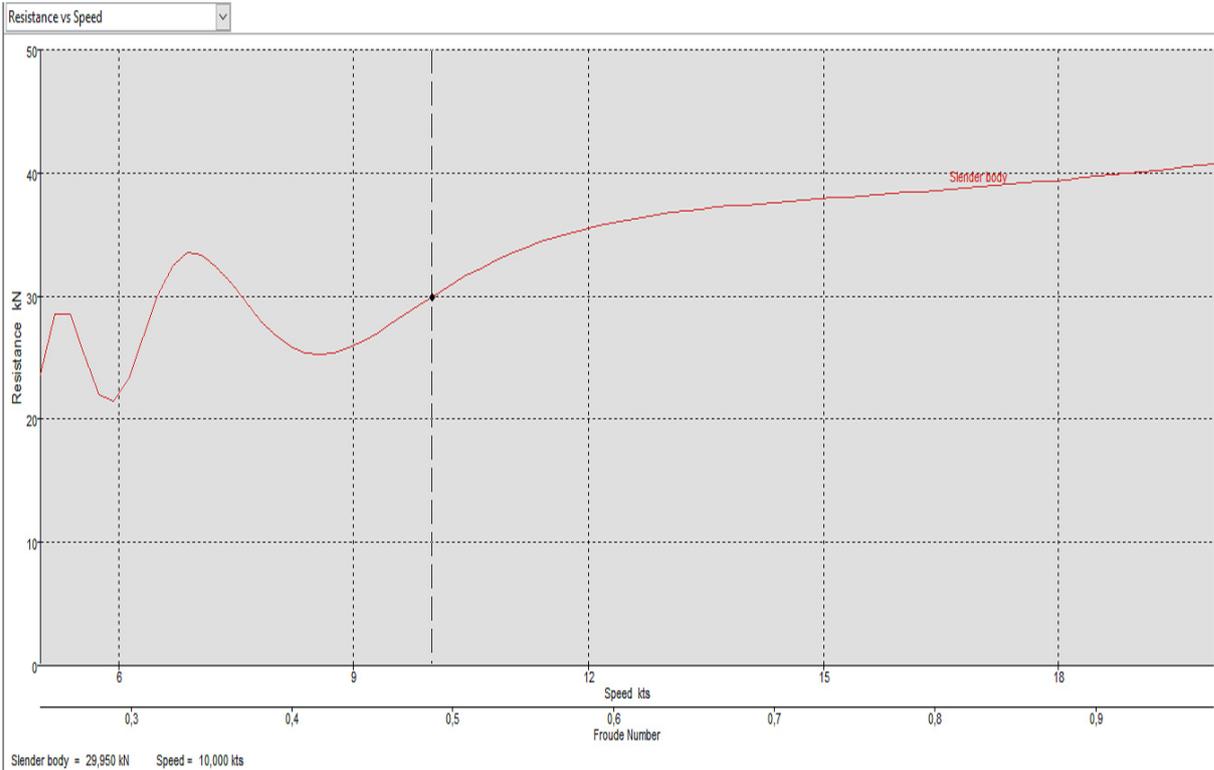
Speed (kts)	Froude No. LWL	Slender body Resist. (kN)	Slender body Power (hp)
5	0,244	23,64	81,53
5,75	0,28	22,03	87,38
6,125	0,298	23,36	98,72
6,5	0,317	30,07	134,84
7,25	0,353	32,4	162,04
7,625	0,371	29,47	155,02
8	0,39	26,81	147,96
8,375	0,408	25,41	146,81
9,125	0,444	26,35	165,85
9,5	0,463	27,83	182,43
10,25	0,499	30,98	219,1
10,625	0,518	32,3	236,74
11	0,536	33,46	253,9
11,75	0,572	35,1	284,5
12,125	0,591	35,73	298,86
12,5	0,609	36,2	312,19
13,25	0,645	36,9	337,31
13,625	0,664	37,2	349,69
14	0,682	37,4	361,24
14,75	0,718	37,8	384,65
15,125	0,737	37,98	396,3
15,5	0,755	38,12	407,65
16,25	0,792	38,49	431,45
16,625	0,81	38,66	443,44
17	0,828	38,86	455,79
18,125	0,883	39,48	493,67
18,5	0,901	39,73	507,02
19,25	0,938	40,23	534,31
20	0,974	40,76	562,44

Fonte: Hullspeed

em função da velocidade e da potência em função da velocidade como mostrado nas figuras 16 e 17.

É possível observar pela figura 16 que entre os valores de 8,5 e 9 nós a resistência é de aproximadamente 26KN, nessa faixa teríamos uma velocidade econômica. Após essa região, observa-se que com o aumento da velocidade, ocorre o crescimento dos valores da resistência ao avanço, isso se deve ao fato de que em altas velocidades a resistência de ondas tende a aumentar.

Figura 16 – Gráfico Resistência x Velocidade



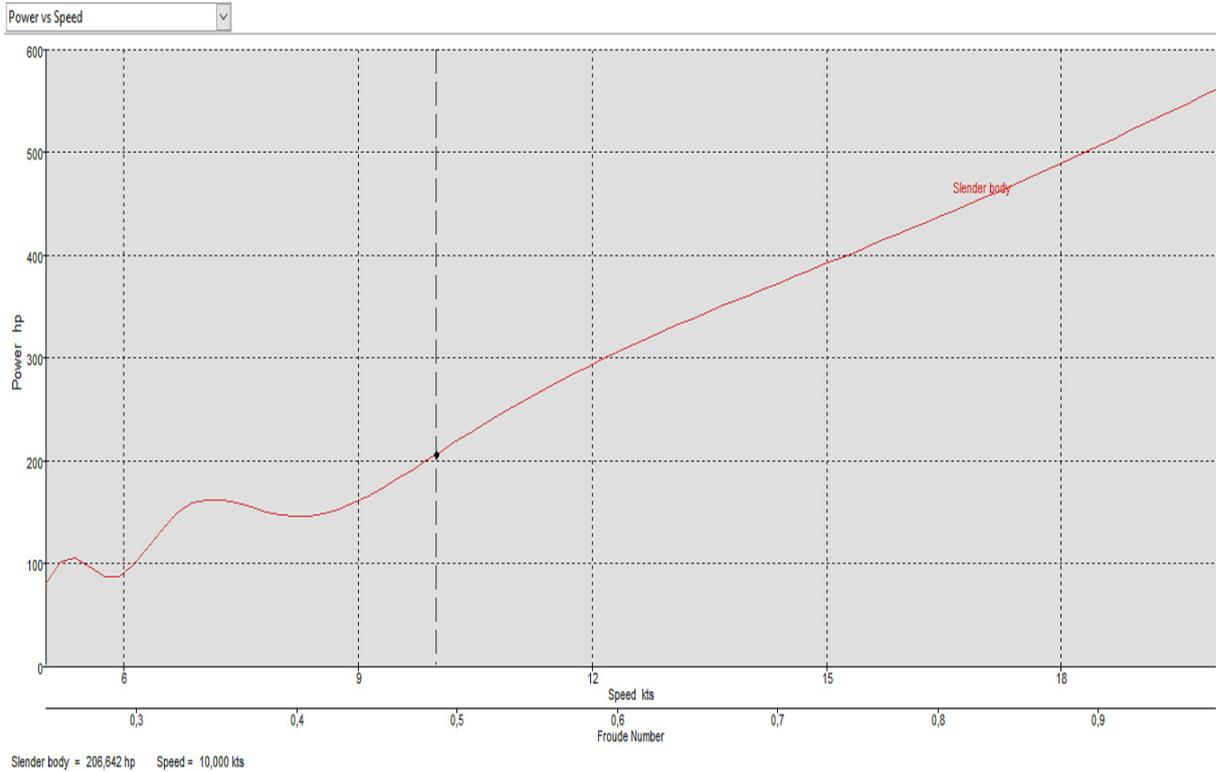
Fonte: Hullspeed

Na velocidade de 10 nós é uma região de elevação da resistência, o ideal é que a velocidade de cruzeiro fique entre 8 e 9 nós.

O gráfico 17 mostra que para uma velocidade de 10 nós, a potência necessária é de 219hp, enquanto para a velocidade de 9 nós, o valor da potência é aproximadamente de 166hp.

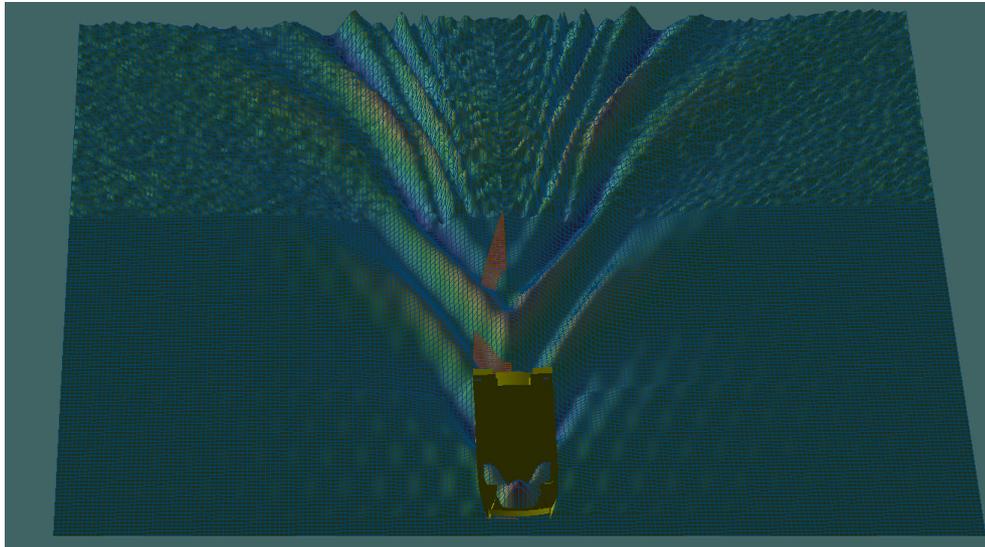
O Hullspeed também fornece uma análise de superfície livre, a figura 18 mostra a geração de ondas de superfície livre. É possível visualizar a ocorrência de interferência no sistema de trem do ondas dos cascos do catamarã. Segundo Schachter *et al.* (2012, p. 4), o ideal, para um catamarã, é que os trens de ondas formados por seus cascos jamais se toquem, pois ao entrarem em contato um causa a interferência do outro, no entanto como isso não é possível, pois a separação em demasia dos cascos ocasionaria outros problemas maiores como a estabilidade, torna-se desejável apenas que o ponto de encontro dos trens de ondas se dê o mais próximo possível do fim dos cascos, pois dessa forma o trem de ondas gerado por um casco não encontraria o casco gêmeo. Assim, o recomendável é que o casco do catamarã não fosse simétrico dos dois lados, mas que o lado interno do casco fosse reto, ou seja, não possuísse uma curvatura como o lado externo possui, dessa forma, diminuiria a interferência de ondas que um casco causa no outro.

Figura 17 – Gráfico Potência x Velocidade



Fonte: Hullspeed

Figura 18 – Geração de ondas de superfície livre



Fonte: Hullspeed

6.0.2 Simulação no Hullspeed com calado de 0,3m

A figura 19 mostra os resultados do programa para uma simulação do casco com calado menor de 0,3m e uma variação de velocidades de 5 a 20 nós. Para cada velocidade, há um valor de resistência e uma potência correspondente.

Os gráficos fornecidos para os valores de resistência em função da velocidade e

Figura 19 – Valores de resistência do catamarã - calado 0,3m

Speed (kts)	Froude No. LWL	Froude No. Vol.	Slender body Resist. (kN)	Slender body Power (hp)
5	0,246	0,709	8,46	29,17
5,375	0,264	0,762	9,21	34,14
6,125	0,301	0,868	8,25	34,86
6,5	0,319	0,921	9,73	43,62
7,25	0,356	1,028	9,94	49,73
7,625	0,374	1,081	9,42	49,54
8	0,393	1,134	8,91	49,18
8,375	0,411	1,187	8,68	50,17
9,125	0,448	1,294	9,05	56,97
9,5	0,466	1,347	9,37	61,42
10,25	0,503	1,453	9,91	70,11
10,625	0,522	1,506	10,1	74,07
11	0,54	1,559	10,27	77,94
11,375	0,559	1,612	10,42	81,79
12,125	0,595	1,719	10,69	89,4
12,5	0,614	1,772	10,82	93,35
13,25	0,651	1,878	11,09	101,35
14	0,687	1,985	11,34	109,53
14,375	0,706	2,038	11,45	113,56
15,125	0,743	2,144	11,67	121,72
15,5	0,761	2,197	11,78	125,98
16,25	0,798	2,303	12	134,49
16,625	0,816	2,357	12,09	138,69
17	0,835	2,41	12,22	143,29
18,125	0,89	2,569	12,53	156,67
18,5	0,908	2,622	12,65	161,4
19,25	0,945	2,729	12,89	171,2
20	0,982	2,835	13,11	180,86

Fonte: Hullspeed

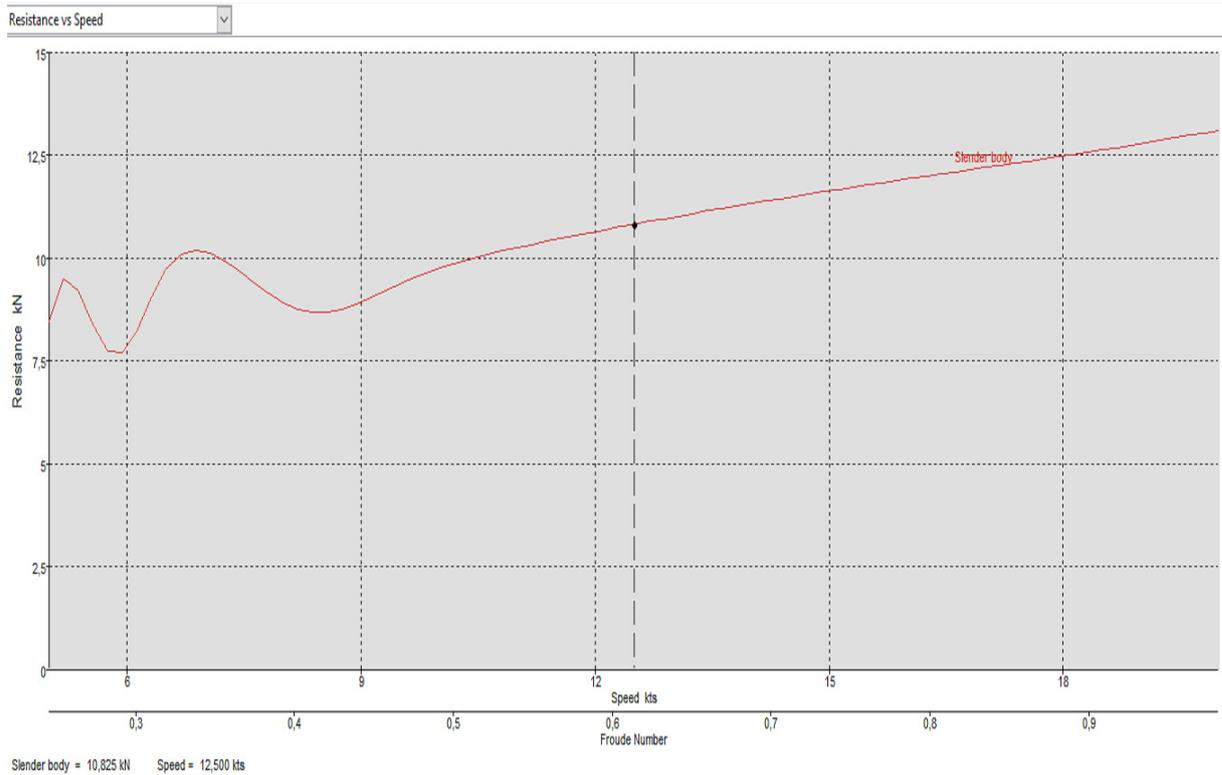
da potência em função da velocidade para o valor de calado mencionado anteriormente são mostrados nas figuras 20 e 21.

O gráfico 20 mostra que para as velocidades entre 8,5 e 9 nós a resistência é menor e que após isso começa a ocorrer um aumento nos valores de resistência, indicando que a velocidade mais econômica para o catamarã operar está entre os valores de 8,5 e 9 nós.

Quando se diminui o valor do calado, a área molhada também diminui, o que representa menos resistência viscosa, pois haverá menor atrito do fluido com o casco. Isso representará uma queda na potência necessária para vencer a força que se opõe ao movimento do catamarã. Como mostra o gráfico 21 e a figura 19, a potência correspondente para a velocidade de 9 nós é de aproximadamente 57 hp.

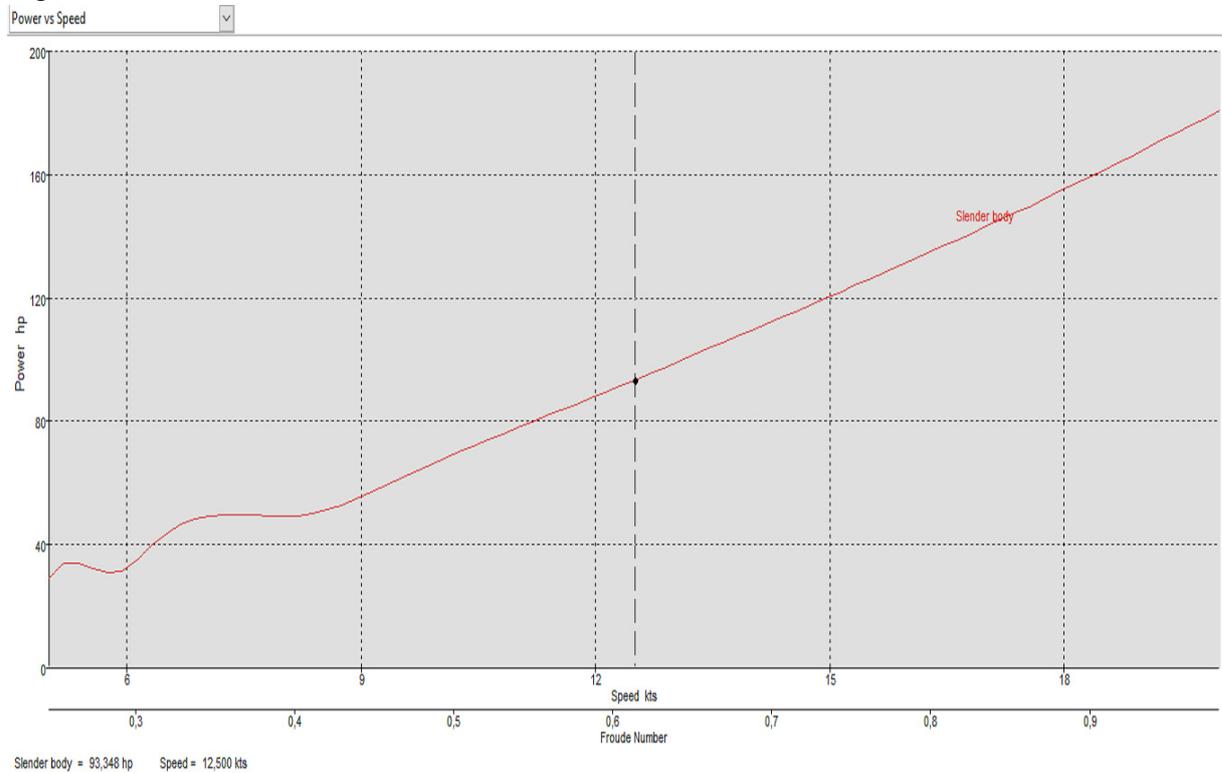
Esses valores do Hullspeed foram calculados considerando uma eficiência de 100%. Em seu trabalho, Schoeping (2014, p. 28) considera o acréscimo da margem de motor entre 85 -

Figura 20 – Gráfico Resistência x Velocidade



Fonte: Hullspeed

Figura 21 – Gráfico Potência x Velocidade



Fonte: Hullspeed

90%. A tabela Tabela 3 mostra os valores da potência considerando a margem de 85%.

Outros métodos para cascos de deslocamento presentes no software Hullspeed foram

Tabela 3 – Potência considerando a margem de motor de 85%

Calado (m)	Velocidade (Nós)	Potência (hp)
0,3	10	59,5
0,6	10	186

Fonte: a autora.

calculados para os dois valores de calado do catamarã, os resultados podem ser visualizados no anexo. O manual do Hullspeed recomenda que para embarcações com cascos duplo seja utilizado o método do slenderbody. Para um melhor entendimento ou visualização do motivo para tal recomendação, é possível ver que todos os outros métodos utilizados para navios de deslocamento foram testados e a maioria não exibiu nenhum resultado, o que indica que não são indicados para o tipo de embarcação que está sendo analisada neste trabalho. Destes métodos, apenas o método de Fung conseguiu um valor para todas as faixas de velocidades analisadas. Isso pode ter ocorrido provavelmente porque em seus testes, Fung pode ter analisado catamarãs similares ao analisado neste trabalho. É válido lembrar que o programa Hullspeed utiliza um banco de dados estatísticos de testes que foram realizados com várias embarcações. Quando uma geometria é inserida no software, ele lê os pontos da geometria e busca em seu banco de dados o casco mais similar àquele inserido.

6.0.3 Simulação no ANSYS® CFX - Calado 0,6m e 0,3m

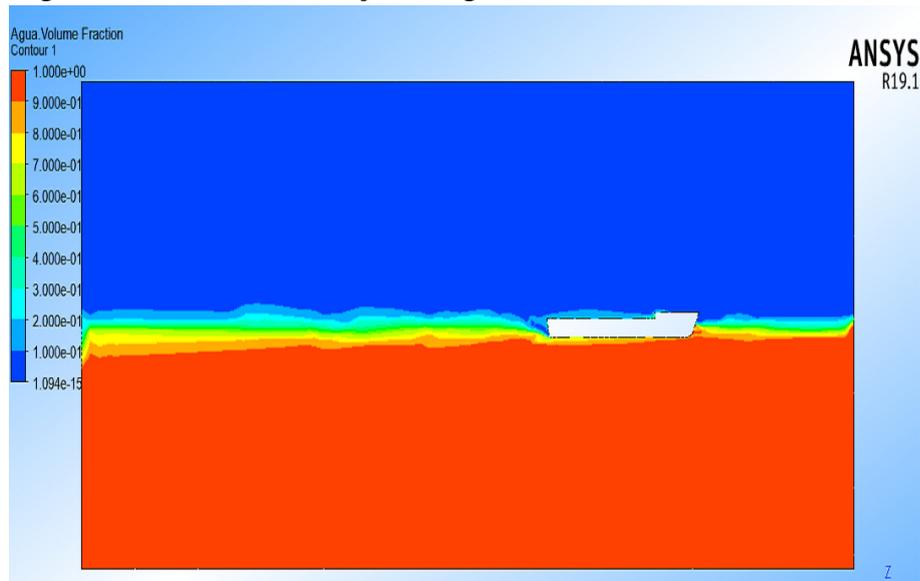
Após alcançar a convergência, deu-se início a fase de pós processamento. Na fase de pós processamento, o CFX-Post, é possível visualizar a interface definida pela fração de volume da água e do ar, onde a parte azul representa o ar e a parte laranja representa a água (Figura (22)).

Foram feitas duas simulações considerando a condição de calado máximo, ou seja, um calado de 0,6m e calado leve com uma altura de 0,3m. A figura mostra, por meio de uma isosurface como seria o comportamento da onda para essa condição.

A simulação de superfície livre do CFX fornece os valores de resistência por formação de ondas e resistência de pressão viscosa junto com a resistência de fricção. O somatório destas resistências é a resistência total. Abaixo é possível visualizar os valores de resistência total para cada calado e velocidade calculados.

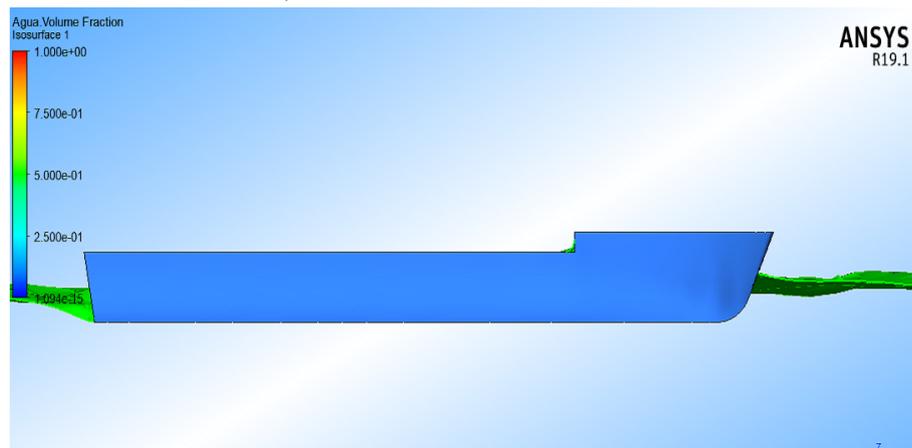
Considerando a margem de motor de 85%, tem-se os novos valores de potência mostrados na tabela Tabela 5.

Figura 22 – Volume de fração da água no catamarã - Calado 0,6m



Fonte: A autora

Figura 23 – Interface dos fluidos através da isosurface no catamarã - Calado 0,6m



Fonte: A autora

Tabela 4 – Resistência Total do catamarã no CFX

Calado (m)	Velocidade (Nós)	Resistência (KN)	Potência (hp)
0,3	10	23,5	162
0,6	10	37,9	261,5

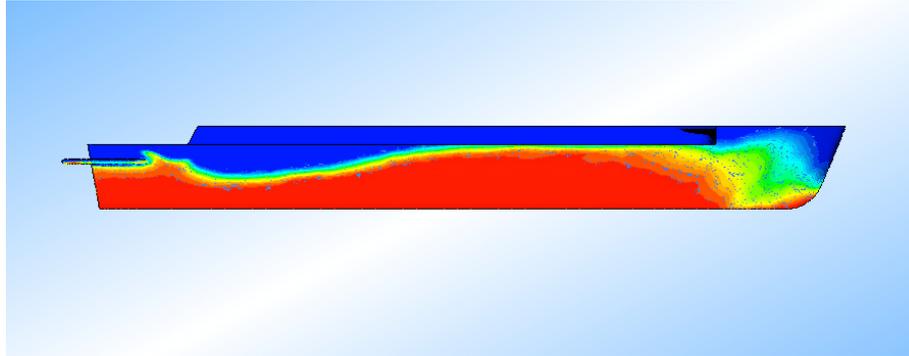
Fonte: a autora.

Tabela 5 – Potência considerando a margem de motor de 85%

Calado (m)	Velocidade (Nós)	Potência (hp)
0,3	10	138
0,6	10	222

Fonte: a autora.

Figura 24 – Interface dos fluidos no catamarã - Calado 0,3m



Fonte: A autora

6.0.4 Comparação dos valores encontrados no Hullspeed e no CFX

A tabela abaixo mostra os valores da resistência para a variação de calados do catamarã:

Resistência total em KN obtida no Hullspeed e CFX			
Calado(m)	Velocidade(Nós)	Hullspeed	CFX
0,3	10	9,9	23,5
0,6	10	30,9	37,9

Não foi possível visualizar as ondas bem delineadas na superfície devido ao refinamento da malha que não estava suficientemente alta para isso. Isso ocorre devido às limitações do computador utilizado para a simulação, de tempo e também do usuário que não domina o software, as recomendações são que para um correto cálculo de resistência por formação de ondas é necessário um refino maior da malha e maior esforço computacional que resultaria em maior tempo para simulações.

7 CONCLUSÃO

A estimativa do valor da resistência de uma embarcação multicasco pode ser feita por meio de métodos numéricos, no entanto, não é possível afirmar com precisão se o valor da resistência encontrado no CFX é correto, deve-se levar em conta que imperfeições na malha e na geometria podem afetar a precisão da simulação, devido os percentuais de resistência entre os dois métodos divergirem consideravelmente, essa hipótese pode ser viável. Contudo, valores altos de resistência eram esperados para este catamarã, pois devido ao espaço entre seus dois casco não ser o ideal e o Hullspeed mostrar que haveria interferência de ondas de um casco no outro. Esses fatores podem ser atribuídos à baixa experiência da autora com o software ANSYS® meshing e o CFX. Quanto a confiabilidade do programa Hullspeed, de acordo com o manual do mesmo, seus resultados são confiáveis, tendo alta acurácia desde que seja inserida uma boa geometria para ser trabalhada no programa. A geometria do catamarã utilizado neste estudo foi desenvolvida no software Rhinoceros® com o objetivo de facilitar sua utilização no Maxsurf®, isso porque este software possui outros módulos amplamente utilizados pela empresa que cedeu o desenho em CAD do catamarã.

8 TRABALHOS FUTUROS

É esperado no futuro um teste experimental com o catamarã real e a partir dos resultados obtidos fazer uma comparação com os resultados dos dois programas e a partir daí saber qual dos dois apresenta resultados mais próximos a situação real e portanto, seria o mais indicado para uma estimativa inicial. Também espera-se que uma nova simulação seja feita no ANSYS após um estudo mais detalhado desse software afim de refinar o resultado atual e conseguir resultados mais próximos da realidade.

REFERÊNCIAS

- AHMED, Y. Numerical simulation for the free surface flow around a complex ship hull form at different froude numbers. **Alexandre Engineering Journal**, Elsevier, v. 50, n. 3, p. 229–235, 2011.
- BARBOZA, L. **DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO DE NAVIOS DE ALTO COEFICIENTE DE BLOCO A PARTIR DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA**. 2016. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10017721.pdf>>.
- BERTRAM, V. **Practical Ship Hydrodynamics**. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2011. v. 2011.
- CANDELLA, M. **ANÁLISE NUMÉRICA DO EFEITO DE ÁGUAS RASAS NA RESISTÊNCIA AO AVANÇO**. 2014. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10010714.pdf>>.
- EMBARCAÇÕES, T. das. **Tecnologia das embarcações 1**. 2016. Disponível em: <http://www.sudam.gov.br/conteudo/menus/referencias/biblioteca/arquivos/Ada-2005/tecnologia_das_embarcacoes_1.pdf>.
- FLORIDO, J. D. **Diseño de los Sistemas Auxiliares de la Propulsión y Generación de Energía de un Petrolero Aframax de 100.000 TPM Aprox**. 2012. Disponível em: <<https://rodin.uca.es/xmlui/bitstream/handle/10498/14918/b35833890.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 10 dez. 2018.
- FORMATION DESIGN SYSTEMS. **Hullspeed User Manual**. [S.l.], 1984–2005. 75 p.
- GARCIA, H. A. **Hidrodinâmica: ênfase a embarcações fluviais. Notas de aula**. [S. l.]: FACULDADE DE TECNOLOGIA DE JAÚ – FATEC/JAHU, 2007.
- GERR, D. **Propeller Handbook: the complete reference for choosing, installing and understanding boat propellers**. [S. l.]: International Marine Publishing Company, 1989.
- GOUBAULT, P.; ALLISON, J. **Ship Design and Construction**. [S. l.]: Society of Naval Architects Marine Engineers, 2003.
- HARTLOPER, C. **CFX Simulation of a Free Surface Water Channel Flow over a Step**. 2010. Disponível em: <<http://people.ucalgary.ca/~wongjg/documents/Free%20Surface%20Flow%20Over%20a%20Step%20Profile%20Report.pdf>>.
- INSEL, M.; MOLLAND, A. An investigation into resistance components of high-speed displacement catamarans. The Royal Institution of Naval Architects, 1992.
- KIM, H.; YANG, C. Hydrodynamic optimization of multihull ships. American Society of Naval Engineers, 2011.
- LERVOLINO, L. A. **Estudo de Resistencia ao avanço de uma embarcação de planeio de 26 pés: Abordagem computacional baseada em CFD**. 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/157132/TCC_Lucas_Arrigoni_Final_Versao_repositorio.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- MANCELOS, M. C.; BORGES, J. P.; MENDES, J.; BESSA, J. N.; GONÇALVES, N. **A Engenharia Mecânica no Catamarã**. 2015. Disponível em: <https://paginas.fe.up.pt/~projfeup/submit_14_15/uploads/relat_1M02_3.pdf>. Acesso em: 10 set. 2018.

- MARTÍNEZ, M. M. **Estimación y análisis paramétrico de la resistencia al avance de embarcaciones catamaranes con pantoque redondeado mediante métodos numéricos.** 2016. Disponível em: <<http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/5760/tfe-mar-est.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 10 dez. 2018.
- MOLLAND, A.; TURNOCK, S.; D.A., H. **Ship Resistance and Propulsion.** 2011. Disponível em: <[http://dl.kashti.ir/ENBOOKS/NEW/Ship%20resistance%20and%20propulsion%20-%20F.Molland%20\(2011\).pdf](http://dl.kashti.ir/ENBOOKS/NEW/Ship%20resistance%20and%20propulsion%20-%20F.Molland%20(2011).pdf)>.
- MOLLAND, A. F.; COUSER, P. R.; ARMSTRONG, N. A.; UTAMA, I. K. A. P. Real-time prediction of hand trajectory by ensembles of cortical neurons in primates. *Fast'97*, 1997.
- NARASIMHAN, L. **ITTC School Reynold Number Theory – Calculation of Total Resistance to Ship Motion.** 2010. Disponível em: <<https://www.brighthubengineering.com/naval-architecture/57505-how-to-calculate-total-resistance-to-the-motion-of-a-ship/>>. Acesso em: 17 nov. 2018.
- PENG, H. **Numerical Computacional of Multi-Hull Ship Resistance and Motion.** 2001. Disponível em: <<https://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk3/ftp05/NQ63482.pdf>>.
- PORTO EDITORA. **Resistência ao avanço.** 2003. Disponível em: <<https://www.infopedia.pt/apoio/artigos/\protect\T1\textdollarresistencia-ao-avanco>>. Acesso em: 13 set. 2018.
- RESPONDEAÍ. **Conceito de camada limite.** 2018. Disponível em: <<https://www.respondeai.com.br/workspace/topico/122/1391/teoria/1309>>. Acesso em: 29 set. 2018.
- RIBEIRO, H. J. C. **Resistência de ondas de Embarcações Semiplanadoras.** 2009. 113 f. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.
- RIDLEY, J.; PATTERSON, C. **Reeds Vol 13: Ship Stability, Powering and Resistance.** [S. l.]: BLOOMSBURY PUBLISHING PLC, 2014.
- ROIG, J. A. **Estimación y comparación de la resistencia al avance de embarcaciones rápidas com formas de pantoque redondeado mediante diferentes métodos numéricos.** 2015. Disponível em: <<http://repositorio.upct.es/handle/10317/4959>>.
- SCHACHTER, R.; SEABRA, P.; NETTO, T. Projeto conceitual de uma embarcação leve para apoio à manutenção e inspeção submarina. 24º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore Rio de Janeiro, 2012.
- SCHOEPING, D. **PROJETO PRELIMINAR DE SISTEMA PROPULSIVO DE UMA EMBARCAÇÃO DE APOIO OFFSHORE DO TIPO PLATFORM SUPPLY VESSEL.** 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/127429/TCC_Djonatan_Guilherme.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- SHARCNET, S. **Enclosure.** Disponível em: <https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/wb_dm/dm_enclosure.html>.
- SHARCNET, S. **Chapter 15: Initialization.** 2016. Disponível em: <https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/cfx_pre/i1312496.html>.
- SILVA, C. **Introdução ao Ansys CFX.** 2019. Disponível em: <http://www.uricer.edu.br/cursos/arq_trabalhos_usuario/3782.pdf>.

SIMOS, A. **ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA NAVAL Módulo 3: Hidrodinâmica**. [S. l.]: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.

TURBO, M. D. . **Basic Principles of Ship Propulsion**. 2011. Disponível em: <<https://spain.mandieselturbo.com/docs/librariesprovider10/sistemas-propulsivos-marinos/basic-principles-of-ship-propulsion.pdf?sfvrsn=2>>. Acesso em: 10 out. 2018.

USNA, U. S. N. A. **Resistance and Powering of Ship**. Disponível em: <https://www.usna.edu/NAOE/_files/documents/Courses/EN400/02.07\%20Chapter\%207.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2019.

VILELA, P. “**Estudos de minimização dos movimentos de Heave e Pitch bem como os efeitos causados na resistência ao avanço a partir da implementação de hidrofólios em Crew Boats projetados para as condições do pré-sal.**”. 2014. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10011918.pdf>>.

ANEXO A – OUTROS MÉTODOS TESTADOS NO HULLSPEED - CALADO 0,3M

Speed (kts)	Froude No. LWL	Froude No. Vol.	Holtrop Resist. (kN)	Holtrop Power (hp)	Van Oortmerssen Resist. (kN)	Van Oortmerssen Power (hp)	Series60 Resist. (kN)	Series60 Power (hp)	Compton Resist. (kN)	Compton Power (hp)	Fung Resist. (kN)	Fung Power (hp)	Slender body Resist. (kN)	Slender body Power (hp)
5	0,246	0,709	0,49	1,7	1,25	4,33	--	--	0,08	0,28	49,8	171,78	8,46	29,17
5,75	0,282	0,815	0,68	2,69	--	--	--	--	0,09	0,34	40,25	159,66	7,74	30,72
6,125	0,301	0,888	0,78	3,29	--	--	--	--	0,08	0,36	46,24	195,39	8,25	34,86
6,5	0,319	0,921	0,91	4,08	5,75	25,79	--	--	0,12	0,54	50,8	227,78	9,73	43,62
7,25	0,356	1,028	1,3	6,51	--	--	--	--	0,15	0,74	42,57	212,9	9,94	49,73
7,625	0,374	1,081	1,46	7,66	--	--	--	--	--	--	35,31	185,75	9,42	49,54
8	0,393	1,134	1,57	8,66	--	--	--	--	--	--	29,54	163,04	8,91	49,18
8,75	0,43	1,24	1,85	11,14	--	--	--	--	--	--	23,38	141,12	8,77	52,93
9,125	0,448	1,294	1,99	12,55	--	--	--	--	0,23	1,45	22,3	140,39	9,05	56,97
9,5	0,466	1,347	2,15	14,07	--	--	--	--	0,05	0,31	22,13	145,05	9,37	61,42
10,25	0,503	1,453	2,46	17,42	5,78	40,91	--	--	--	--	23,76	167,98	9,91	70,11
10,625	0,522	1,506	2,63	19,27	13,81	101,23	--	--	--	--	25,3	185,43	10,1	74,07
11	0,54	1,559	2,8	21,22	19,17	145,49	--	--	--	--	27,2	206,41	10,27	77,94
11,75	0,577	1,666	3,24	26,27	22,48	182,2	--	--	--	--	31,76	257,44	10,56	85,56
12,125	0,595	1,719	3,46	28,97	21,07	176,28	--	--	--	--	34,26	286,54	10,69	89,4
12,5	0,614	1,772	3,67	31,64	18,14	156,4	--	--	--	--	36,8	317,31	10,82	93,35
13,25	0,651	1,878	4,03	36,85	9,06	82,79	--	--	--	--	41,74	381,57	11,09	101,35
13,625	0,669	1,931	4,2	39,43	3,5	32,88	--	--	--	--	44,04	413,99	11,21	105,36
14	0,687	1,985	4,35	42,02	--	--	--	--	--	--	46,17	445,96	11,34	109,53
14,75	0,724	2,091	4,65	47,33	--	--	--	--	--	--	49,84	507,18	11,58	117,79
15,125	0,743	2,144	4,8	50,09	--	--	--	--	--	--	51,36	535,93	11,67	121,72
15,5	0,761	2,197	4,95	52,96	--	--	--	--	--	--	52,67	563,26	11,78	125,96
16,25	0,798	2,303	5,27	59,03	--	--	--	--	--	--	54,72	613,44	12	134,49
16,625	0,816	2,357	5,43	62,27	--	--	--	--	--	--	55,48	636,33	12,09	138,69
17	0,835	2,41	5,6	65,64	--	--	--	--	--	--	56,09	657,84	12,22	143,29
18,125	0,89	2,589	6,13	76,67	--	--	--	--	--	--	57,19	715,07	12,53	156,67
18,5	0,908	2,622	6,32	80,66	--	--	--	--	--	--	57,36	732,1	12,65	161,4
19,25	0,945	2,729	6,71	89,14	--	--	--	--	--	--	57,51	763,78	12,89	171,2
19,625	0,964	2,782	6,92	93,63	--	--	--	--	--	--	57,51	778,66	12,99	175,93
20	0,982	2,835	7,12	98,29	--	--	--	--	--	--	57,48	793,03	13,11	180,86

ANEXO B – OUTROS MÉTODOS TESTADOS NO HULLSPEED - CALADO 0,6M

Speed (kts)	Froude No. LWL	Froude No. Vol.	Holtrop Resist (kN)	Holtrop Power (hp)	Van Oortmerssen Resist (kN)	Van Oortmerssen Power (hp)	Series60 Resist (kN)	Series60 Power (hp)	Compton Resist (kN)	Compton Power (hp)	Fung Resist (kN)	Fung Power (hp)	Slender body Resist (kN)	Slender body Power (hp)
5	0.244	0.588	-	-	2.86	9.96	0.89	3.07	0.48	1.84	18.87	65.1	23.84	81.53
5.375	0.282	0.632	-	-	3.58	13.28	0	0	0.57	2.12	18.01	66.79	26.56	105.9
6.125	0.288	0.72	-	-	3.45	14.57	-	-	0.8	3.38	16.54	69.88	23.36	98.72
6.5	0.317	0.764	-	-	3.98	40.26	-	-	1.01	4.54	20.13	90.29	30.07	134.84
7.25	0.353	0.852	-	-	7.14	35.7	-	-	1.49	7.45	27.5	137.57	32.4	162.04
7.625	0.371	0.896	-	-	2.39	12.55	-	-	1.39	7.29	28.19	148.3	29.47	155.02
8	0.39	0.94	-	-	-	-	-	-	1.24	6.85	27.57	152.14	26.81	147.96
8.75	0.428	1.028	-	-	2.11	12.75	-	-	2.28	13.82	25.94	156.57	25.4	153.31
9.125	0.444	1.073	-	-	6.67	42.02	-	-	3.19	20.05	25.72	181.91	28.35	185.85
9.5	0.463	1.117	-	-	11.99	78.58	-	-	3.89	24.16	26.08	170.9	27.83	182.43
10.25	0.499	1.205	-	-	21.85	154.51	-	-	4.27	30.19	28.66	202.64	30.98	219.1
10.625	0.518	1.249	-	-	25.59	187.59	-	-	4.6	33.71	30.9	226.48	32.3	236.74
11	0.536	1.293	-	-	28.37	215.28	-	-	4.94	37.51	33.74	256.05	33.46	253.9
11.75	0.572	1.381	-	-	31.25	253.29	-	-	5.63	45.63	40.96	332.05	35.1	284.5
12.125	0.591	1.425	-	-	31.58	264.2	-	-	5.97	49.97	45.12	377.46	35.73	298.86
12.5	0.609	1.469	-	-	31.37	270.5	-	-	-	49.47	426.57	-	36.2	312.19
13.25	0.645	1.557	-	-	29.76	272.01	-	-	-	58.06	530.76	-	36.9	337.31
13.625	0.664	1.601	-	-	28.57	268.54	-	-	-	62.03	583.07	-	37.2	349.69
14	0.682	1.646	-	-	27.23	263.02	-	-	-	65.62	633.78	-	37.4	361.24
14.75	0.718	1.734	-	-	24.34	247.69	-	-	-	71.39	726.47	-	37.8	384.65
15.125	0.737	1.778	-	-	22.87	238.65	-	-	-	73.52	767.1	-	37.98	396.3
15.5	0.755	1.822	-	-	21.42	229.08	-	-	-	75.14	803.49	-	38.12	407.65
15.875	0.773	1.866	-	-	20.02	219.22	-	-	-	76.3	835.6	-	38.33	419.77
16.25	0.792	1.91	-	-	18.67	209.25	-	-	-	77.03	863.57	-	38.49	431.45
16.625	0.81	1.954	-	-	17.38	199.31	-	-	-	77.4	887.67	-	38.66	443.44
17	0.828	1.998	-	-	16.16	189.53	-	-	-	77.44	908.27	-	38.86	455.79
17.75	0.885	2.086	-	-	13.94	170.76	-	-	-	76.81	940.81	-	39.29	481.13
18.125	0.883	2.13	-	-	12.95	161.89	-	-	-	76.23	953.19	-	39.48	493.67
18.5	0.901	2.174	-	-	12.02	153.42	-	-	-	75.53	963.93	-	39.73	507.02
19.25	0.938	2.263	-	-	10.37	137.77	-	-	-	73.88	981.3	-	40.23	534.31
19.625	0.956	2.307	-	-	9.65	130.62	-	-	-	73.02	988.57	-	40.48	548
20	0.974	2.351	-	-	8.98	123.92	-	-	-	72.13	995.23	-	40.76	562.44