

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

FÁBIO SMIDERLE

**INFLUÊNCIA DA POPA TRANSOM NA RESISTÊNCIA AO AVANÇO DE UMA
EMBARCAÇÃO DO TIPO PSV**

Joinville

2016

FÁBIO SMIDERLE

**INFLUÊNCIA DA POPA TRANSOM NA RESISTÊNCIA AO AVANÇO DE UMA
EMBARCAÇÃO DO TIPO PSV**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval no curso de Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Joinville.

Orientador: Dr. Thiago PontinTancredi

Joinville

2016

Fábio Smiderle

**INFLUÊNCIA DA POPA TRANSOM NA RESISTÊNCIA AO AVANÇO DE UMA
EMBARCAÇÃO DO TIPO PSV**

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

Prof. Thiago Pontin Tancredi, PhD.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Thiago Pontin Tancredi, PhD.
Orientador

Prof. André Luís Condino Fugarra, PhD.

Prof. Lucas Weihmann, Dr. Eng.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Amauri Smiderle e Marisa Aparecida Fabro Smiderle, meus maiores exemplos de amor, respeito e companheirismo, fornecendo todo o apoio necessário para que esta etapa fosse concluída.

À toda minha família, em especial minha sobrinha Larissa Smiderle Junqueira de Carvalho e minha irmã Fernanda Fabro Smiderle, a quem busco orgulhar com minhas conquistas.

À minha namorada, Francielle, por estar sempre ao meu lado, me nutrindo com amor e felicidade, sendo minha maior incentivadora na execução deste trabalho.

Aos meus colegas e amigos, em especial ao grupo denominado Rapeize, minha segunda família que me ensinou o verdadeiro significado da palavra amizade.

Ao meu orientador e coordenador do curso, Thiago Pontin Tancredi, pelo seu tempo, conhecimento, dedicação e incentivo durante a execução deste trabalho, e pelo seu esforço em transformar o curso de Engenharia Naval em uma referência no país.

Ao colega Lucas Arrigoni Iervolino, por ter compartilhado seu tempo e conhecimento no início do trabalho.

À equipe da CD-Adapco, por disponibilizar a licença do software STAR-CMM+ para a universidade. À equipe da FRIENDSHIP SYSTEMS, por fornecer a licença PROdo software CAESES.

Resumo

Com avanços tecnológicos marcantes nas últimas décadas, engenheiros buscam projetar embarcações cada vez mais eficientes visando obter um diferencial no atual paradigma competitivo de mercados globais. No projeto de embarcações mercantes, uma das etapas de maior importância é o cálculo da resistência ao avanço do casco, fortemente associada ao custo operacional das embarcações. A resistência é influenciada por diversas características do navio, como a forma do casco, presença do bulbo e o tipo de popa. Tradicionalmente essa estimativa é feita com o auxílio de modelos empíricos simplificados que se baseiam apenas nas dimensões principais e coeficientes de forma da embarcação. Os desenvolvimentos recentes da capacidade de processamento dos computadores e das técnicas de representação da superfície do casco motivam a utilização de métodos numéricos para a estimativa da resistência ao avanço de embarcações. Estas técnicas permitem obter uma estimativa mais precisa que possibilitará uma melhor definição da motorização da embarcação e seu consumo de combustível. Este trabalho se insere nesse contexto, e tem como objetivo apresentar, através de simulações numéricas, análises de diferentes tipos de popas, definindo quais são os parâmetros principais que definem sua geometria e suas respectivas influências na resistência ao avanço de embarcações mercantes. A metodologia utilizada é a construção de um modelo de casco base no programa CAESES e -através de variações paramétricas- a obtenção de novos cascos. Para definir as simulações necessárias é feita a implementação de uma matriz de experimentos (DOE). Outra ferramenta presente é o módulo de resistência do Maxsurf, utilizado para realizar as simulações de arrasto usando o método de escoamento potencial "SlenderBody". Para aprimorar mais o entendimento do fenômeno, alguns modelos são simulados no programa STAR-CCM+ utilizando o método de dinâmica dos fluidos computacional que inclui os efeitos de viscosidade do fluido. Uma análise do resultado obtido é feita e propõem-se coeficientes da influência da geometria da popa na resistência ao avanço. Por fim, apresenta-se um comparativo entre os resultados obtidos por meio da interpolação dos resultados oriundos das simulações com o método empírico proposto por Holtrop e Mennen.

Palavras-Chave: Popa. Resistência ao avanço. Projeto. Transom. Hidrodinâmica.

Abstract

With remarkable technological advances in recent decades, engineers are seeking to design more efficiently in order to obtain a difference in the current competitive global market. In the design of merchant vessels, one of the most important step is the calculation of the resistance of the hull, strongly associated with the operating costs of vessels. The resistance is influenced by various vessel characteristics as the shape of the hull, presence of the bulb and the stern type. Traditionally this estimative is made with simplified empirical models based only in the main dimensions and form coefficients. The recent development of computers capacity and the hull surface representation techniques motivates the use of numerical methods to estimate the ship's resistance. These techniques allow to obtain a more accurate estimative that will permit a better definition of the engine of the vessel and its fuel consumption. This work is within that context, and aims to present, through numerical simulations, analysis of different geometries of sterns, defining the main parameters that define the stern geometry and its influences on the ship's resistance. The methodology used is the construction of a basic model in CAESES program and parametric variations to obtain new hulls. The resistance analysis is done with Maxsurf program using the potential flow code SlenderBody. With the analysis of the results obtained with the numerical simulations, we proposed an empirical model to estimate the influence of stern's geometry in the ship's resistance. Finally, we present a comparison between the results obtained using the empirical model proposed with the traditional method proposed by Holtrop (1984).

Keywords: Stern. Ship Resistance.Project. Transom.Hydrodynamics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de Popa	16
Figura 2 - Popa Transom e Popa Cruiser	17
Figura 3 - Definição das formas U e V	18
Figura 4 - Parâmetros estudados	19
Figura 5 - Região de vórtices gerados devido ao descolamento do fluido do escoamento..	20
Figura 6 - Divisão da resistência ao avanço.....	22
Figura 7 - Métodos para calcular a resistência ao avanço de uma embarcação.....	23
Figura 8 - Escoamento em torno da popa transom imergida	26
Figura 9 - Efeito da Transom na Resistência Residual	29
Figura 10 - Notação principal e convenção dos eixos.....	30
Figura 11 - Correções hidrostáticas na transom.....	32
Figura 12 - Apêndice virtual	33
Figura 13 - Representação geral de uma abordagem em CFD.....	34
Figura 14 - Etapas de uma análise CFD.....	35
Figura 15 - Processo para definição dos parâmetros e seu grau de influência.....	38
Figura 16 - Projeto da curva de centro	42
Figura 17 - Parâmetros locais da curva de linha d'água	42
Figura 18 - Esboço da curva SAC.....	43
Figura 19 - <i>Flare</i>	44
Figura 20 - Variações geométricas da popa transom	45
Figura 21 - Vista lateral da linha d'água no plano X-Z.....	46
Figura 22 - Estudo de convergência dos resultados	47
Figura 23 - Superfície do convés no STAR-CCM+.....	48
Figura 24 - Transição da dimensão dos elementos na vista vertical da malha gerada.....	50
Figura 25 - Modelo físico relacionado ao tempo	51
Figura 26 - Condições de Contorno do problema	52
Figura 27 - Variação da resistência total em função de T_T/T	60
Figura 28 - Variação da resistência total em função de B_T/B	61

Figura 29 - Variação da resistência total em função de $C1$	62
Figura 30 - C_{FT} em função de T_T/T para o Estudo 4	63
Figura 31 - C_{FT} em função de B_T/B para o Estudo 3.....	64
Figura 32 - C_{FT} em função de $C1$ para o Estudo 5	64
Figura 33 - η_T em função de T_T/T	65
Figura 34 - Valores que acompanham o termo $(T_T/T)^2$, T_T/T e a constante	66
Figura 35 - Incremento do deslocamento em função do aumento no calado da transom	67
Figura 36 - η_B em função de B_T/B	68
Figura 37 - Incremento do deslocamento em função do aumento da boca na transom	69
Figura 38 - Modelo Base, Modelo 1 e Modelo 2	71
Figura 39 - Verificação do modelo 1	71
Figura 40 - Verificação do modelo 2	72
Figura 41 - Curvas de RT de pressão e fricção	74
Figura 42 - Comparação entre CFD, <i>Slender Body</i> e Holtrop para o modelo base	74
Figura 43 - Comparação entre CFD, <i>Slender Body</i> e Holtrop para o modelo 1	75
Figura 44 - Comparação entre CFD, <i>Slender Body</i> e Holtrop para o modelo 2	76
Figura 45 - Variação da resistência devido à mudanças na popa transom.....	76
Figura 46 - Variação detectada pelo método <i>Slender Body</i>	77
Figura 47 - Variação detectada pelo método de Holtrop	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Intervalos recomendados para o método de Holtrop e Mennen	24
Tabela 2 - Coeficientes da Popa.....	25
Tabela 3 - Novos coeficientes da Popa	25
Tabela 4 - Dimensões principais do modelo após adaptações	41
Tabela 5 - Dimensões de cada região.....	50
Tabela 6 - Design of Experiments.....	55
Tabela 7 - Parâmetros principais analisados no estudo 1.....	55
Tabela 8 - Parâmetros principais analisados no estudo 2.....	56
Tabela 9 - Parâmetros principais analisados no estudo 3.....	57
Tabela 10 - Parâmetros principais analisados no estudo 4.....	58
Tabela 11 - Parâmetros principais analisados no estudo 5.....	59
Tabela 12 - Cascos utilizados para verificar o modelo proposto	70
Tabela 13 - Resistência do Modelo Base	73
Tabela 14 - Resistência do Modelo 1	73
Tabela 15 - Resistência do Modelo 2.....	73

LISTA DE SÍMBOLOS

- φ - Ângulo que define a forma do casco 10% avante da última perpendicular
- C_p - Coeficiente Prismático
- L - Comprimento da Embarcação
- B - Boca da Embarcação
- T - Calado da Embarcação
- R_T - Resistência Total
- R_F - Resistência de Fricção
- R_{APP} - Resistência Devido a Adição de Apêndices
- R_W - Resistência de Ondas
- R_B - Resistência do Bulbo
- R_{TR} - Resistência da Imersão da Transom
- $(1+k_1)$ - Fator de Forma
- CF - Coeficiente de Fricção
- R_n - Número de Reynolds
- C_{STERN} - Coeficiente da forma da Popa
- Δ - Deslocamento
- ρ - Massa específica da água
- V - Velocidade
- A_T - Área da Transom
- C_b - Coeficiente de Bloco
- C_m - Coeficiente da Seção Mestra
- T_T - Calado na Transom
- C_1 - Forma na Transom
- B_T - Boca na Transom
- C_{WP} - Waterplane Coefficient
- C_{FT} - Coeficiente proposto para adimensionalização da resistência total
- η_T - Coeficiente proposto para prever aumento da resistência em função de T_T
- η_B - Coeficiente proposto para prever aumento da resistência em função de B_T
- η_{C1} - Coeficiente proposto para prever aumento da resistência em função de C_1

GLOSSÁRIO

ABS - American Bureau of Shipping

DOE - Design of Experiments

CFD - Mecânica dos Fluidos Computacional

PNA - Principles of Naval Architecture

ITTC - International Towing Tank Conference

lcb - Centro de Flutuação Longitudinal

PSV - Plataform Supply Vessel

LPP - Comprimento entre Perpendiculares

CPC - Contact Potential Curve

SAC - Sectional Area Curve

IGES - Initial Graphics Exchange Specification

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	OBJETIVOS.....	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1	RESISTÊNCIA AO AVANÇO.....	19
2.2	FORMAS DE ESTIMAR A RESISTÊNCIA AO AVANÇO	22
2.2.1	Métodos Tradicionais e Séries Sistemáticas	23
2.2.2	Métodos Empíricos Baseados em Regressão.....	24
2.3	MÉTODOS NUMÉRICOS	29
2.3.1	Teoria do corpo fino - Slender body	29
2.4	FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL	33
2.4.1	Introdução	33
2.4.2	Modelos Físicos e Equações Governantes	36
3	METODOLOGIA.....	38
4	DESENVOLVIMENTO.....	40
4.1	DOE.....	40
4.2	MODELO INICIAL	40
4.3	CÁLCULOS DE RESISTÊNCIA AO AVANÇO	45
4.3.1	Maxsurf Modeler Advanced	46
4.3.2	Maxsurf Resistance	46
4.4	ESTUDO DE MALHA	47
4.5	CFD	48
4.5.1	Geometria.....	48
4.5.2	Malha.....	49
4.5.3	Modelos físicos adotados	51

4.5.4	Condições de contorno.....	52
4.5.5	Simplificações adotadas.....	53
5	RESULTADOS.....	54
6	ANÁLISES.....	60
6.1	Proposta de coeficientes para a popa.....	62
6.2	Proposta de modelo empírico para estimar a resistência de uma embarcação após variações geométricas na popa transom.....	65
6.3	Verificação do modelo proposto.....	70
6.4	Resultados do CFD.....	72
7	CONCLUSÃO.....	79
8	REFERÊNCIAS.....	81

1 INTRODUÇÃO

O comércio marítimo se intensifica a cada dia, resultando em um aumento contínuo na quantidade de navios. Com o mercado cada vez mais competitivo, engenheiros procuram projetar navios mais eficientes, buscando redução no consumo de combustível e emissão de poluentes (TANCREDI, 2008).

Um dos aspectos de maior influência no consumo de uma embarcação é sua resistência ao avanço. A resistência é influenciada por diversas características do navio, como a forma do casco, presença do bulbo e o tipo de popa (MOLLAND, 2011). Com a otimização desses aspectos, uma redução significativa de combustível pode ser obtida.

Outro ponto que deve ser destacado é a existência de poucos estudos que abrangem a influência da popa na resistência ao avanço, motivando o desenvolvimento de um trabalho com esse foco, onde se visa obter uma melhor compreensão da correlação destes parâmetros. Sabe-se que pequenas melhorias beneficiaram a indústria naval, devido à economia de combustível nas operações de embarcações de grande porte.

Apenas como exemplo de como avanços nesta área podem ser impactantes no âmbito global, pode-se citar o caso do navio Emma Maersk, considerado um dos maiores navios da atualidade. Segundo a sociedade classificadora *American Bureau of Shipping* (ABS, 2015), esta embarcação opera com uma motorização de aproximadamente 80000 kW, que consome aproximadamente 380 toneladas de combustível por dia. Um estudo mais detalhado da influência da popa pode trazer resultados significativos no aumento da eficiência, e com isso, redução no consumo de combustível, gerando lucros e minimizando problemas ambientais.

Para realizar este estudo, primeiramente serão realizadas modelagens de cascos similares com popas diferentes. Após isso, se utilizará um programa comercial para um

primeiro cálculo da resistência de cada modelo e, posteriormente, a utilização do método de dinâmica dos fluidos computacional. Os resultados obtidos por simulação computacional serão, então, comparados aos resultados obtidos com o método baseado em regressão empírica proposto por Holtrop e Mennen (1982).

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal do presente trabalho é determinar a influência da geometria da popa na resistência ao avanço de uma embarcação. Para realizar esse objetivo propõe-se:

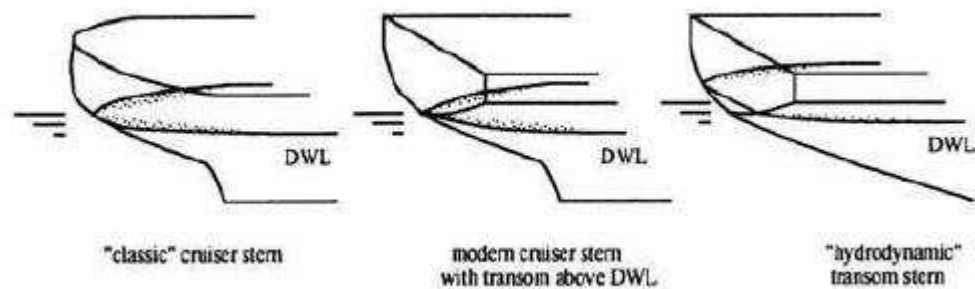
- ✓ Analisar diferentes tipos de popa e identificar quais são os parâmetros principais que descrevem a geometria da popa;
- ✓ Elaborar uma matriz de experimentos a serem realizados;
- ✓ Construir modelos computacionais para cada um dos estudos;
- ✓ Realizar simulação de arrasto para cada um dos modelos computacionais estudados, utilizando o código de escoamento potencial do programa Maxsurf;
- ✓ Executar análises de fluidodinâmica computacional na verificação dos resultados;
- ✓ Analisar os resultados dos diferentes modelos analisados, propondo coeficientes de influência da geometria da popa na resistência ao avanço da embarcação.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O navio é uma estrutura com geometria complexa e suas formas variam muito dependendo da utilização da embarcação. Uma destas variações pode ser encontrada na extremidade traseira do casco, também conhecida como popa. Quase sempre, tem a forma exterior adequada para facilitar a passagem dos filetes líquidos que vão preencher o vazio produzido pelo navio em seu movimento, a fim de tornar mais eficiente a ação do leme e do hélice. (FONSECA, 2005).

Segundo Eyres (2012), existem basicamente dois tipos de popa. A popa *cruiser*, utilizada por muitos anos em navios transatlânticos, e que tem como características a sua alta eficiência hidrodinâmica, apresentando curvas mais suaves no seu desenho (Figura 1). O segundo tipo é a popa transom, que pode estar acima da linha d'água ou imersa. Apesar de ter menos eficiência hidrodinâmica, apresenta maior área no convés e tem uma construção mais simples, sendo o tipo mais utilizado atualmente.

Figura 1 - Tipos de Popa



Fonte: (LAMB,2004).

Um dos critérios que auxilia na decisão da área e a forma da popa no projeto de uma embarcação é a resistência ao avanço, a qual pode ser estimada por diferentes técnicas que serão abordadas mais detalhadamente na sequência. A Figura 2 exemplifica os dois tipos de popa em embarcações reais, sendo o lado esquerdo a popa transom e o lado direito a popa *cruiser*.

Figura 2 - Popa Transom e Popa *Cruiser*



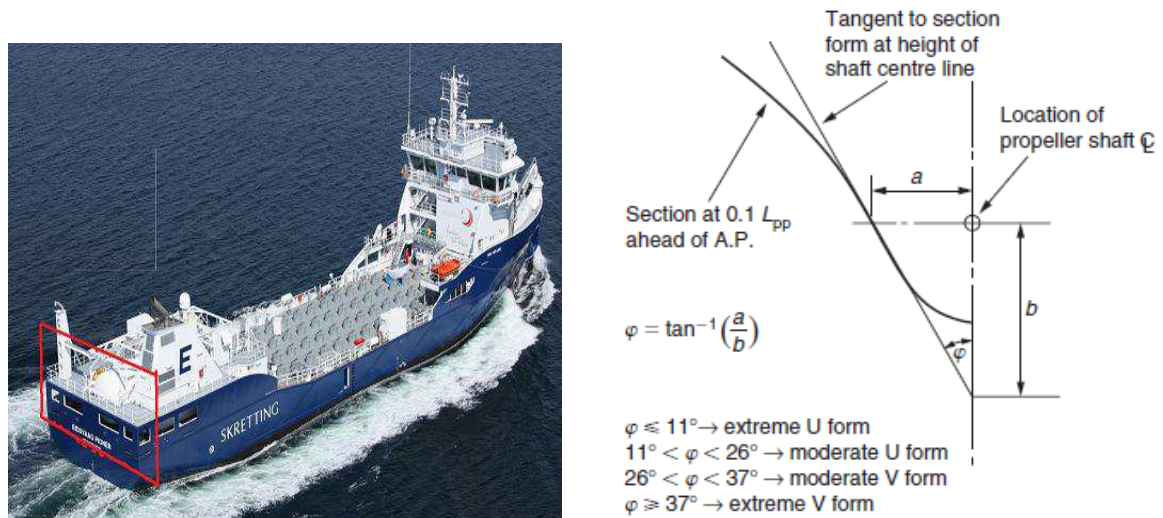
Fonte: Fini Patrick Holsting¹; Robert M. Martel²

De acordo com Molland (2011), a forma da popa pode ser definida na seção que está 10% avante da última perpendicular, representada pelo quadrado vermelho na

Figura 3, através da angulação ϕ . Este ângulo depende da distância "a", definida como a distância entre o eixo do propulsor e a tangente à seção nesta altura, e de "b", definido pela distância vertical entre o eixo do propulsor e o ponto que encontra a tangente da seção.

Logo, quanto mais o formato se aproximar de U, mais a tangente se verticalizará, aumentando drasticamente o valor de "b" e diminuindo o ângulo ϕ . Quanto mais o casco tiver o formato V, maior será a inclinação da tangente, menor será a distância "b" e, consecutivamente, maior será o ângulo ϕ .

Figura 3 - Definição das formas U e V



Fonte: (MOLLAND, 2011).

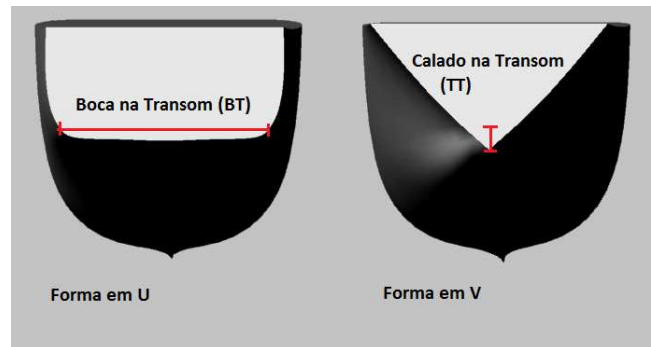
Três parâmetros são usados para descrever a geometria da popa nesse estudo, sendo a boca na transom (B_T), o calado na transom (T_T) e a área na transom (A_T). A forma da popa é estabelecida considerando que fixados boca e o calado, a variação da área da transom resulta em diferentes formatos de popa.

$A_T = 0,8 * B_T * T_T \rightarrow$ implica em formas aproximadas de U

$A_T = 0,4 * B_T * T_T \rightarrow$ implica em formas aproximadas de V.

Valores intermediários entre os dois limites implicam em formas de popa que vão desde o U até o V.

Figura 4 - Parâmetros estudados



Fonte: Elaborado pelo autor.

É importante notar que a medida da boca na popa é realizada na linha d'água da embarcação. Já a altura do calado na popa é medida a partir da base do casco até a linha d'água. Portanto, a área da transom é caracterizada apenas pela parte submersa da popa.

2.1 RESISTÊNCIA AO AVANÇO

Um navio deve ser construído para se mover da forma mais eficiente com o mínimo possível de ajuda externa. Para isso, deve-se projetar o casco e o propulsor da forma que gere a menor resistência sem deixar de atender aos requisitos de projeto.

A resistência do navio é definida como a força requerida para rebocar a embarcação em uma dada velocidade (VAN MANEN; VAN OSSANEN, 1988). De acordo com o mesmo autor, a resistência é dividida em:

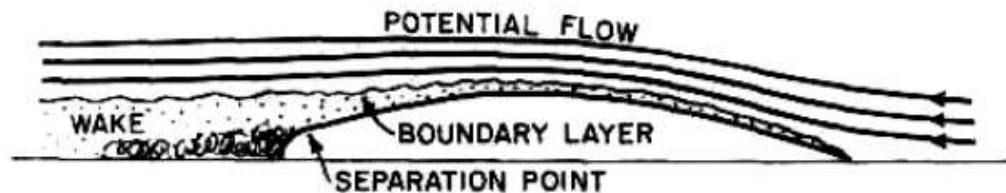
a) Resistência de Fricção -Em razão da condição de não escorregamento de fluidos viscosos sobre superfícies sólidas, as partículas do fluido próximas ao casco tendem a adquirir a sua velocidade. A medida que a distância aumenta, o gradiente de velocidade diminui e o fluido tem sua velocidade reduzida até praticamente estagnar. A zona intermediária entre o fluido estagnado e o escoamento uniforme forma a camada limite. As mudanças de velocidade nesta área provocam trocas de quantidade de movimento, resultado em perdas de energia por atrito. Essas forças agem tangencialmente ao casco e geram a resistência de fricção (TRINDADE, 2012).

b) Resistência de Ondas -A resistência de ondas é a soma das forças geradas pela pressão do fluido na direção normal de todo o casco. Em corpos a grandes

profundidades, não existe formação de ondas e a soma das forças resultaria em zero. Se o corpo está navegando próximo à superfície, esta variação de pressão causa ondas que alteram a distribuição de pressão sobre o casco. Em algumas partes do casco as mudanças na pressão vão aumentar esta força, em outras diminuí-la, mas o efeito global deve ser uma resistência de tal magnitude igual a energia necessária para manter o sistema de ondas gerado (VAN MANEN; VAN OSSANEN, 1988).

c) Resistência de Pressão Viscosa-Em um escoamento ideal, a pressão exercida à ré de um corpo é igual à exercida avante, gerando uma força resultante nula. Acontece que na prática, efeitos viscosos reduzirão a pressão exercida à ré, criando um gradiente de pressão no corpo. Esse gradiente resultará na resistência de pressão viscosa (TRINDADE, 2012). Outro efeito que contribui para essa resistência ocorre quando a curvatura perto da popa se torna abrupta. Se as geometrias da parte final da embarcação se aproximam muito da forma U ou se existirem outras descontinuidades no casco, partículas de água perderão sua capacidade de acompanhar o escoamento e acabarão se descolando. Assim, os espaços entre o casco e o escoamento serão preenchidos por vórtices após o ponto de separação, apresentados na Figura 5.

Figura 5 - Região de vórtices gerados devido ao descolamento do fluido do escoamento



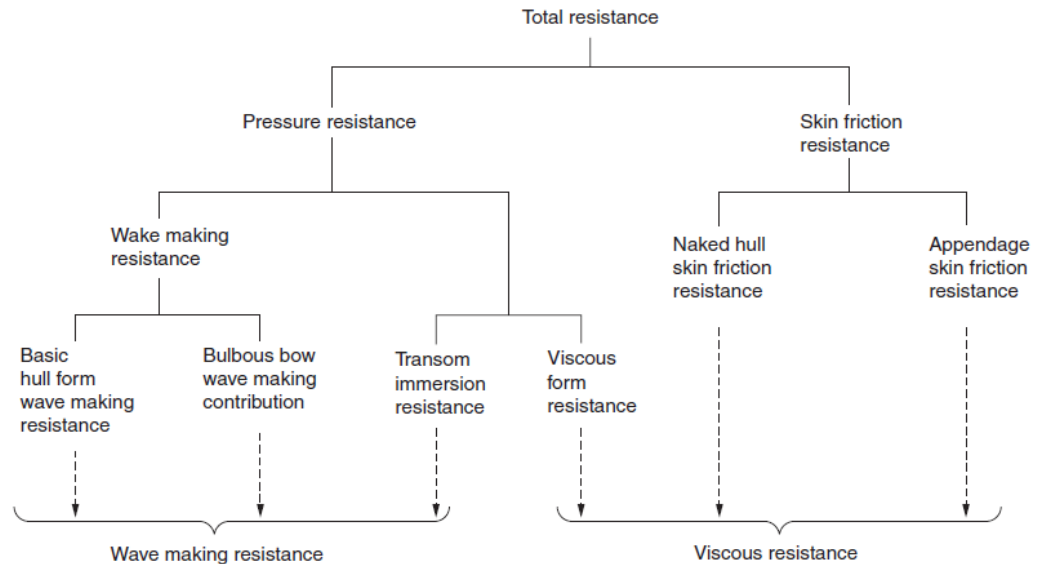
Fonte: (PRINCIPLES OF NAVAL ARCHITECTURE, 1988).

A resistência gerada por esse efeito é chamada de resistência de separação, sendo outra componente da resistência de pressão viscosa (VAN MANEN; VAN OSSANEN, 1988). A componente de pressão viscosa e a de ondas normalmente são apresentadas juntas com o nome de resistência residual.

d) Resistência do ar - Essa resistência é a resultante da interação entre o ar e a parte do casco acima da linha d'água, bem como a superestrutura da embarcação. Ela é dependente da velocidade da embarcação, da área e da forma da estrutura exposta ao vento.

Já Molland (2011) apresenta a resistência total dividida em resistência de pressão e resistência de atrito, conforme pode ser visto na Figura 6. Ambas apresentações são equivalentes e em síntese, apresentam a primeira componente, dependente do número de Froude (resistência de ondas ou residual), e a segunda, dependente do número de Reynolds (viscosa, fricção ou atrito).

Figura 6 - Divisão da resistência ao avanço



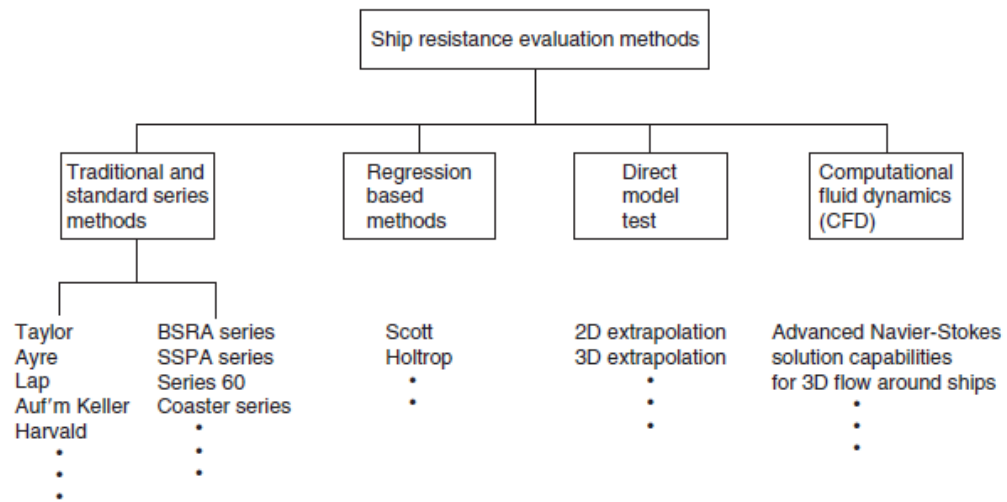
Fonte: (MOLLAND,2011).

Será necessário identificar quais parcelas da resistência total tem suas componentes variando como função da popa e qual será o grau de influência dessa variação.

2.2 FORMAS DE ESTIMAR A RESISTÊNCIA AO AVANÇO

Existem várias formas de estimar as componentes da resistência ao avanço. Na Figura 7, proposta por Molland (2011), são enumerados alguns dos métodos tradicionais, como o método de Taylor e método de Ayre, métodos empíricos, como Holtrop (1984), experimentos realizados em modelos físicos (extrapolação 2D e 3D), e fluidodinâmica computacional (CFD). Existem também métodos que calculam parte das parcelas através de equações analíticas e parte com equações derivadas de métodos regressivos.

Figura 7 - Métodos para calcular a resistência ao avanço de uma embarcação



Fonte: (MOLLAND, 2011).

Métodos mais avançados como CFD e extrapolação do modelo em escala reduzida, quando conduzidos da maneira apropriada, apresentam resultados mais precisos, porém, envolvem o uso de tecnologias mais avançadas e/ou maior custo. (MOLLAND, 2011).

Logo, o método a ser utilizado depende não só da precisão de análise desejada, mas também dos recursos financeiros, de tempo, e informações disponíveis ao projetista.

2.2.1 Métodos Tradicionais e Séries Sistemáticas

Tanto os métodos tradicionais quanto os métodos empíricos, que serão apresentados nos próximos tópicos, derivam de parâmetros tradicionais da arquitetura naval, como o coeficiente de bloco, o coeficiente prismático, entre outros (MOLLAND, 2011). Apesar dessa forma de cálculo ser relativamente antiga, alguns resultados essenciais para o projeto podem ser retirados desses métodos quando o projetista não tiver dados melhores disponíveis (WATSON, 2002).

2.2.2 Métodos Empíricos Baseados em Regressão

Como citado anteriormente, esses métodos são baseados em parâmetros tradicionais da arquitetura naval, os quais podem ser facilmente obtidos ainda na fase preliminar de projeto.

a) Holtrop e Mennen

Dentre os métodos baseados em regressão, tem-se como um dos principais modelos o de Holtrop e Mennen, apresentado no ano de 1982. Este será detalhado a seguir, pois é um método amplamente aceito e será utilizado como critério comparativo e de validação de estudos posteriores, já que é inviável a criação de modelos reais para validar com exatidão os resultados encontrados. Este método normalmente é utilizado para prever a resistência de petroleiros, cargueiros, barcos de pesca, rebocadores e fragatas. Para utilizá-lo com maior precisão, algumas restrições devem ser cumpridas. De acordo com Holtrop e Mennen, a embarcação deve estar no intervalo de valores apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Intervalos recomendados para o método de Holtrop e Mennen

0,55 < CP < 0,85

3,90 < L/B < 15,00

2,10 < B/T < 4,00

Fonte: Holtrop (1984).

Conforme Molland (2011), a última versão contou com a análise regressiva de 334 testes de modelos. Os resultados são analisados com base na Eq.1 de resistência ao avanço.

$$RT = RF(1 + k1) + RAPP + RW + RB + RTR + RA \quad (1)$$

$$CF = \frac{0,075}{(\log_{10} Rn - 2.0)^2} \quad (2)$$

A resistência de fricção R_F é calculada através da Eq. 2 proposta pelo *InternationalTowingTankConference* (ITTC, 1957), e o fator de forma do casco $(1+k_1)$ é baseado na Eq. 3, obtida de maneira regressiva. Esta equação é dependente da boca, pontal, comprimento na linha d'água, deslocamento e coeficiente prismático. Ela também tem como incógnita c_{13} , que é dependente da forma da popa.

$$1 + k_1 = c_{13} \left\{ 0,93 + c_{12} \left(\frac{B}{LR} \right)^{0,92} (0,95 - Cp)^{-0,52} (1 - Cp + 0,0225lcb)^{0,69} \right\} \quad (3)$$

$$C_{13} = 1 + 0,003C_{STERN} \quad (4)$$

Dentro desse modelo, esta é a primeira parcela dependente da forma da popa na análise da resistência. O valor que o coeficiente C_{STERN} vai assumir depende diretamente da forma da popa. Em uma primeira aproximação, Holtrop e Mennen propõem valores para os coeficientes da popa, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Coeficientes da Popa

Forma do corpo a ré	C_{STERN}
Seções em V	-10
Seções normais	0
Seções em U com popa <i>Hogner</i>	+10

Fonte: Holtrop e Mennen (1982).

Tabela 3 - Novos coeficientes da Popa

Forma do corpo a ré	C_{STERN}
<i>Pram with gôndola</i>	-25
Seções em V	-10
Seções normais	0
Seções em U com popa <i>Hogner</i>	10

Fonte: Holtrop (1984).

Com isso, é possível perceber que seções em forma em V vão apresentar um valor de -10 na equação, resultando em menores resistências de fricção. Já seções com forma em U com popa *Hogner* apresentarão valores maiores de c_{13} , aumentando o componente do fator de forma da resistência.

Após uma re-análise publicada no ano de 1984, Holtrop apresentou a Tabela 3 com os valores atualizados de cada coeficiente, agora contando com a forma *Pramwith gondola*, a qual resulta nos menores valores de resistência de fricção devido ao valor de seu coeficiente. Assim sendo, o fator de forma $(1+k_1)$ passa a ser regido pela Eq. 5.

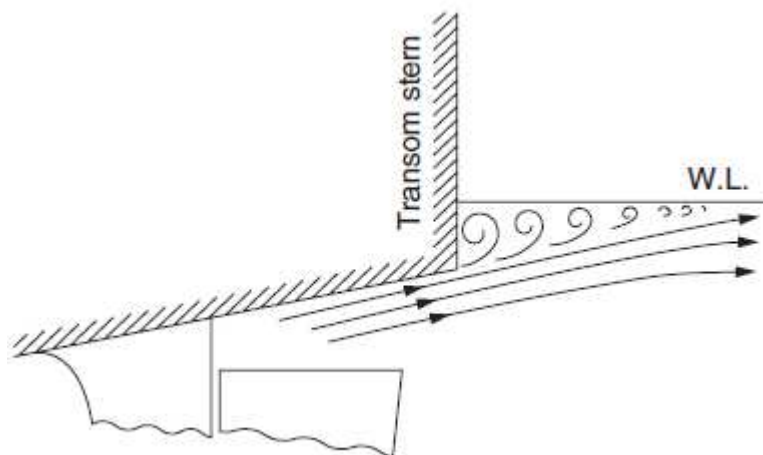
$$(1 + k_1) = 0,93 + 0,49(1 + 0,011C_{STERN}) * \left(\frac{B}{L}\right)^{1,07} * \left(\frac{T}{L}\right)^{0,46} * \left(\frac{LWL}{LR}\right)^{0,12} * \left(\frac{LWL^3}{\nabla}\right)^{0,36} * (1 - CP)^{-0,60} \quad (5)$$

Apesar de serem fatores dependentes da forma da popa, a variação destes coeficientes acaba alterando pouco o fator de forma e, consecutivamente, o valor da resistência.

Os próximos fatores influenciados pela popa são as componentes R_{TRE} e R_W . A primeira é apresentada como resistência adicional de pressão devido à imersão da transom.

Se uma parte da popa está imersa, existirá separação do fluido quando este passa pela parte final do casco. Isto irá gerar vórtices e perda de pressão nesta região, como pode ser visto na Figura 8, contribuindo para um aumento da resistência de pressão viscosa.

Figura 8 - Escoamento em torno da popa transom imersa



Fonte: (MOLLAND, 2011).

Esta separação é evidente na popa transom, porém apresenta pouco efeito na popa *cruiser*. Vale ressaltar que este fator é fortemente regido pela área imersa da popa, a qual pode ser estimada pelo método de Holtrop usando a Eq. 6,

$$RTR = 0,5\rho V^2 ATc6 \quad (6)$$

Já a componente de ondas R_W provou ser complicada de ser avaliada e representada por uma única equação regressiva. Na última versão do método, Holtrop apresentou uma abordagem separada em três faixas baseadas no número de Froude:

- Faixa 1: $Fn > 0,55$

Nesta faixa, a R_W é definida pela Eq. 7. É importante notar, dentre os diversos coeficientes apresentados, que o termo $c5$ é o único termo dependente dos parâmetros da transom, mais especificamente, a área imersa.

$$Rw (Fn > 0,55) = c17 * c2 * c5 * \nabla * \rho * g * e^{(m3*Fn+m4 \cos(\lambda Fn^{-2}))} \quad (7)$$

$$c5 = 1 - 0,8 * AT / (BTCM) \quad (8)$$

Vale destacar que o termo BTC_M é área da seção mestra da embarcação. Com isso, fica nítido pela Eq. 8 que, conforme o valor de A_T cresce, a relação A_T/A_M aumenta e o coeficiente $c5$ vai tendo seu valor reduzido. Quando $c5$ diminui, o valor de R_{W-B} reduz também, fazendo com que A_T , neste caso, seja inversamente proporcional ao valor de R_{W-B} .

- Faixa 2: $Fn < 0,40$

O comportamento nessa faixa é o mesmo que na primeira, visto que as equações são semelhantes, tendo como diferença apenas alguns coeficientes. O coeficiente $c5$ continua regido pela mesma equação. Portanto, as conclusões tiradas anteriormente valem para esta faixa também.

$$Rw (Fn < 0,4) = c1 * c2 * c5 * \nabla * \rho * g * e^{(m1*Fn+m4 \cos(\lambda * Fn^{-2}))} \quad (9)$$

- Faixa 3: $0,40 < Fn < 0,55$

Nesta faixa, a resistência de ondas é definida por uma interpolação entre os valores de R_w para $Fn = 0,40$ e $Fn = 0,55$.

$$R_w = R_w(Fn < 0,4) + (10 * Fn - 4)(R_w(Fn > 0,55) - (R_w(Fn < 0,4)))/1,5 \quad (10)$$

Através das equações apresentadas acima, pode-se concluir que maiores áreas na popa transom apresentarão menores valores de resistência quando a componente de onda for predominante na embarcação. Em baixas velocidades, o aumento da área da transom será prejudicial à resistência, conforme discutido na análise das equações referentes à parcela viscosa da resistência.

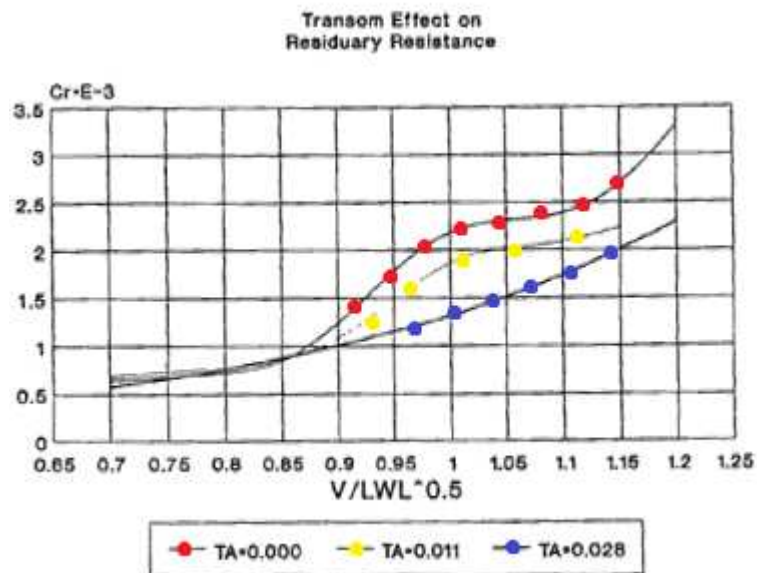
Holtrop ainda cita em seu trabalho a dificuldade em encontrar material para realizar estudos sobre a transom, principalmente os efeitos ligados a zona de pressão gerada pela embarcação:

"Nenhuma tentativa foi feita para derivar novas formulações para a resistência de pressão na transom. O material disponível para desenvolver essa formulação é escasso", Holtrop (1984).

b) Fung

Um dos primeiros autores a identificar com um maior grau de aprofundamento a influência dos parâmetros da popa na resistência foi Fung (1992). Em seu trabalho, ele cita que ao comparar as curvas da resistência residual de navios com popa *cruiser* e navios com popa transom, picos mais destacados são encontrados nas embarcações com popa *cruiser* para altos números de Froude. Ainda de acordo com o autor, o efeito da transom nos picos é claramente mostrado na Figura 9, os quais tendem a diminuir com o aumento da relação de área na transom (A_T/A_M), descrita como T_A em seus estudos.

Figura 9 - Efeito da Transom na Resistência Residual



Fonte: Fung (1992).

Fung concluiu que outros elementos além da geometria também exercem influências significativas na resistência, porém, apesar destes parâmetros terem sido detectados em testes de modelo, não existem formas matemáticas para representá-los em métodos regressivos devido a escassez de dados na época.

2.3 MÉTODOS NUMÉRICOS

Métodos numéricos aplicados à hidrodinâmica são empregados de maneira eficiente em problemas de resistência ao avanço. Basicamente, se tem a velocidade e a pressão no fluido como propriedades a determinar e dois tipos de equações fundamentais para solucionar o problema: a equação da continuidade e as equações de Navier-Stokes (PICANÇO, 1999).

2.3.1 Teoria do corpo fino - Slender body

Ainda segundo Picanço (1999), no caso do cálculo de resistência de ondas, algumas simplificações feitas nas equações permitem que o problema seja tratado como um

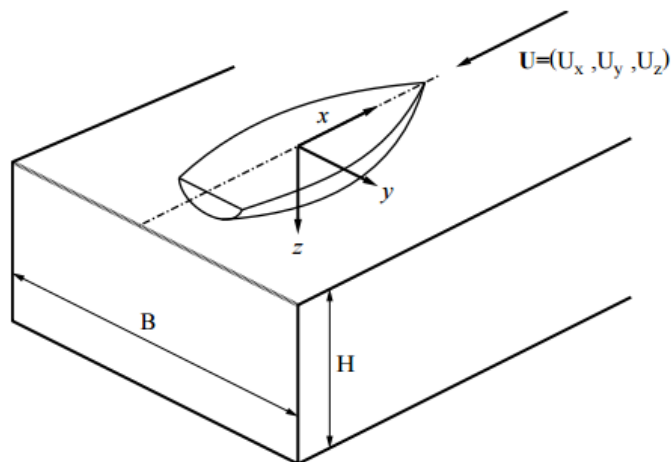
escoamento potencial, passando a ser regido pela equação de Laplace e a equação de Bernoulli. As hipóteses simplificadoras mais importantes adotadas são a ausência de viscosidade, a incompressibilidade e irrotacionalidade do fluido. Desta forma, é possível definir uma função escalar onde as componentes da velocidade do fluido sejam dadas pelo gradiente desta função - função potencial de velocidade.

Uma vez conhecidas as componentes da velocidade, a pressão é obtida com a aplicação da equação de Bernoulli.

Já no estudo da resistência de onda do navio, o escoamento potencial utilizando linearização das condições de superfície livre foi inicialmente adotado na teoria do navio fino de Michell, 1898. Com a origem do método dos painéis no trabalho de Hess e Smith, 1967, o cálculo potencial evoluiu para a solução na qual as condições de superfície livre são satisfeitas integralmente, ou seja, na própria superfície livre ondulada, e sem linearização. É evidente também que a hipótese de escoamento potencial não representa um fluido real, uma vez que a viscosidade é negligenciada.

A teoria de *Slender Body* de Michell aplicado com o método dos painéis consiste de um casco em um canal finito de água com profundidade H e largura B , apresentados na Figura 10.

Figura 10 - Notação principal e convenção dos eixos



Fonte: (COUSER; WELLICOME; MOLLAND, 1998).

De acordo com (Couser; Wellicome; Molland, 1998), o casco é discretizado em uma grande quantidade de painéis quadriláteros. Em seguida, pontos de origens são colocados no centro dos painéis no plano $y = 0$ para formar uma matriz ao longo da linha central do casco. As forças, então, são calculadas de maneira isolada e dependem apenas da inclinação local do painel. Na formulação original apresentada pelos autores, a força em um painel do casco é proporcional a inclinação da linha d'água, apresentada na

$$\sigma = \frac{U_x}{2\pi} * \frac{dy}{dx} * \text{área projetada no painel} \quad (11)$$

$$\sigma = \frac{U_x}{2\pi} * \frac{dy}{dx} * \text{área projetada no painel} \quad (11)$$

Onde dy/dx é a inclinação da linha d'água e U_x é a velocidade da corrente, tendo valores negativos devido ao sistema referencial adotado. A Eq. 11 é rearranjada na Eq. 12.

$$\sigma = -\frac{1}{2\pi} \mathbf{n}^\wedge \cdot \mathbf{U} \times \text{área do painel} \quad (12)$$

Onde \mathbf{n}^\wedge é o vetor normal ao painel e $\mathbf{U} = (U_x, U_y, U_z)$ a velocidade da corrente. Ainda de acordo com os autores, a vantagem da Eq. 12 é que a força é definida mesmo quando a inclinação da linha d'água (dy/dx) tende ao infinito e a área projetada tende à zero, como na transom.

A formulação teórica da resistência de onda no painel é apresentada detalhadamente por Insel (1992) e é representada pela Eq. 13.

$$R_{WP} = \frac{\rho g B}{4} \left\{ \zeta_0^2 \left[1 - \frac{2k_0 H}{\sinh(2k_0 H)} \right] + \sum_{m=1}^{\infty} \zeta_m^2 \left[1 - \frac{\cos^2 \theta_m}{2} \left(1 + \frac{2k_m H}{\sinh(2k_m H)} \right) \right] \right\} \quad (13)$$

Embora este método funcione adequadamente para cascos simples, alguns problemas foram encontrados quando este foi aplicado à embarcações com popa transom operando em altas velocidades, fazendo com que algumas adaptações fossem necessárias.

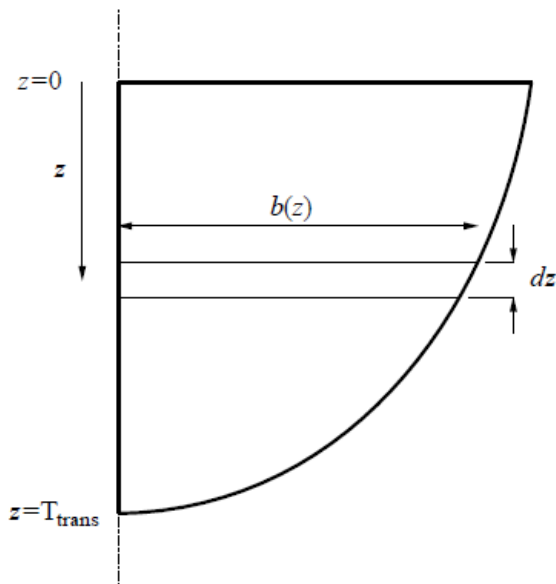
Após diversas análises comparando modelos experimentais com resultados numéricos, propôs-se algumas correções ao método. A primeira correção é o cálculo da

resistência na transom através da integração da pressão estática ao longo da superfície da popa, apresentado na Eq. 14. Nesta equação T_{trans} é o calado da transom e $b(z)$ define a meia boca da transom na profundidade z , como apresentado na Figura 11.

$$R_{trans} = \rho * g * \int_0^{T_{trans}} z * b(z) dz \quad (14)$$

De acordo com os autores, apesar do formato da curva do coeficiente de ondas (C_w) apresentar uma boa aproximação dos modelos experimentais, o cálculo acabava fornecendo valores cerca de 30 a 40% maiores em regiões entre $Fn = 0,5$ e $Fn = 0,1$.

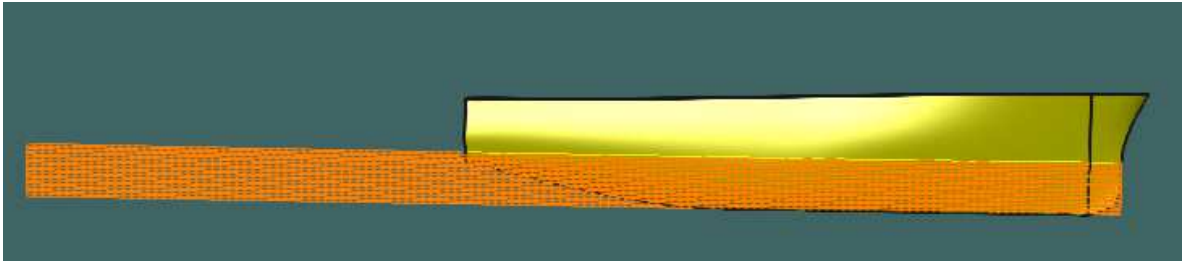
Figura 11 - Correções hidrostáticas na transom



Fonte: (COUSER; WELLICOME; MOLLAND, 1998).

Para aprimorar o modelo, os autores sugeriram a implementação de um apêndice virtual na transom, que pode ser visto na cor laranjada na Figura 12. Esse apêndice cria um ponto extra na corrente separada pela transom para cada linha d'água, unindo o fluido e apresentando resultados mais coerentes em embarcações com popa transom.

Figura 12 - Apêndice virtual



Fonte: Elaborado pelo autor.

O *Slender Body* foi bastante descrito pois será amplamente utilizado neste trabalho como método base para o cálculo de resistência ao avanço. Para calcular a resistência total, o módulo de resistência calcula o escoamento potencial e adiciona a resistência viscosa utilizando a Eq. 2 discutida anteriormente. Como esse método apresenta diversas correções para cascos com popa transom, espera-se que os resultados sejam mais precisos do que métodos puramente regressivos.

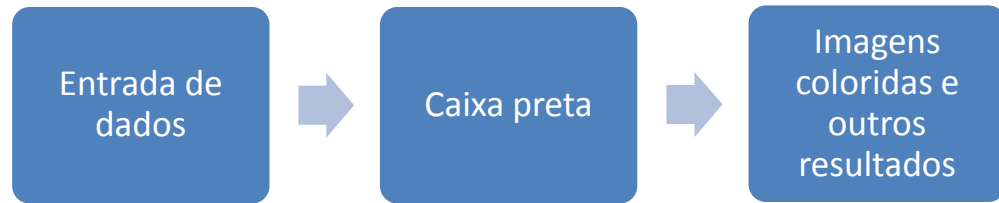
2.4 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Fluidodinâmica computacional (CFD) refere-se à análise de sistemas que envolvem fluxo de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados, como reações químicas, através de simulações computacionais (VERSTEEG, MALALASEKERA, 2007).

2.4.1 Introdução

Por ser um método com capacidade de solucionar diversos tipos de problema, seu uso vem sendo cada vez mais difundido em meios acadêmicos e industriais. Diversos programas com interfaces amigáveis ao usuário foram desenvolvidos nos últimos anos, facilitando a sua aplicação. O problema disso é que, se aplicado da maneira incorreta, pode gerar resultados inconsistentes com a realidade. A Figura 13 apresenta uma visão geral da aplicação do método e introduz o termo "caixa preta".

Figura 13 - Representação geral de uma abordagem em CFD



Fonte: Elaborado pelo autor.

Desta maneira, é necessário que o usuário saiba o que está dentro da "caixa preta". Como nem sempre é possível, se faz necessário um trabalho de verificação e validação. É preciso entender como o problema é abordado, quais métodos são utilizados para a sua resolução e se os resultados obtidos são coerentes ou não com a realidade.

De acordo com Bhaskaran e Collins (2002), a utilização de códigos de CFD se divide em 3 grandes etapas, como pode ser vista na Figura 14, sendo elas o:

- Pré-processamento
- Solver
- Pós-processamento

A primeira é o pré-processador, onde se faz a entrada dos dados do problema. Nesta etapa, define-se a geometria do problema que será analisado, conhecido como o domínio da simulação. Após isso, se faz a construção da malha, onde o domínio é dividido em pequenos elementos. Então, seleciona-se o fenômeno físico que precisa ser modelado e define-se as propriedades do fluido. As equações matemáticas que descrevem o fenômeno são normalmente regidas por um conjunto de equações diferenciais parciais. Essas equações são discretizadas para produzir uma solução numérica do problema. Por último, as condições iniciais e condições de contorno para o problema em específico são usadas para resolver essas equações. Além disso, alguns controles de parâmetros de controle são

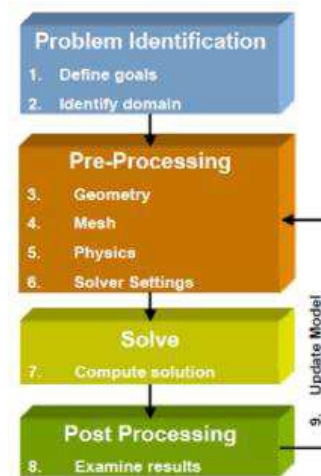
utilizados para controlar a convergência, estabilidade e precisão do método. (ASHGRIZ, MOSTAGHIMI, 2002).

Ainda de acordo com os autores, a precisão da solução é governada pelo número de células. Normalmente, quanto maior for o número de células, melhor será a solução, porém, maior o custo computacional. Tanto a precisão da análise quanto o custo computacional são dependentes da boa construção da malha, as quais são otimizadas quando menores elementos são criados em áreas onde ocorrem grandes variações e maiores elementos para regiões com variações pequenas ou praticamente nulas.

A segunda é o *solver*¹, onde ocorre a aproximação das incógnitas do problema para equações simples. Depois vem a discretização por substituição das aproximações nas equações governantes e subsequentes manipulações matemáticas, transformando-as em equações algébricas. O último passo é a solução dessas equações algébricas.

A principal diferença entre diferentes *solvers* está associada a maneira como as equações são aproximadas e qual é o processo de discretização utilizado. Os métodos existentes são a solução por método dos elementos finitos, método das diferenças finitas, métodos espectrais, método dos elementos de contorno e método do volume finito (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Figura 14 - Etapas de uma análise CFD



Fonte: (AZIZ, NASRET, 2014)

¹*Solver*: Nome dado a etapa que processa as informações inseridas no pré-processamento e fornece os resultados ao pós-processamento.

A última etapa é o pós-processamento, onde se faz a análise dos resultados obtidos pelo *solver*. Eles podem ser apresentados de várias formas, sendo as principais em forma de gráficos apresentado os resultados em função de iterações (ou tempo) e imagens em 2D ou 3D com contornos coloridos para visualização de propriedade através do gradiente de cores.

2.4.2 Modelos Físicos e Equações Governantes

Em um problema de análise de resistência ao avanço, um dos principais modelos físicos que deve ser entendido é o modelo de turbulência adotado. Existem diversos modelos específicos que são utilizados para resolver esse tipo de problema, sendo o utilizado neste trabalho o "*Realizable Two-Layer K-Epsilon Model*".

O K-Epsilon é um modelo de turbulência onde as equações de transporte são resolvidas para a energia cinética turbulenta k e a taxa de dissipação ε . Várias formas de K-Epsilon foram desenvolvidas nas últimas décadas, sendo essas mais utilizadas em aplicações industriais (Star-CCM+ Help). Podem ser aplicadas utilizando uma abordagem de *Low-Reynolds Number* ou *Two-Layer Approach*.

O modelo escolhido é o que combina o *Realizable K-Epsilon* com o *Two-Layer Approach*. Assim, as equações de transporte do *Realizable K-Epsilon*, para casos Eulerianos de mais de uma fase, são:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_V \alpha_i \rho_i k_i dV + \int_A \alpha_i \rho_i k_i (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_g) \cdot d\mathbf{a} = \int_A \alpha_i \left(\mu_i + \frac{\mu_i'}{\sigma_k} \right) \nabla k_i \cdot d\mathbf{a} + \\ \int_V \alpha_i [f_i^c G_i^k + G_i^b - \rho_i ((\varepsilon_i - \varepsilon_0) + Y_i^M) + S_i^k + S_i^{kr}] dV + \\ \sum_{i \neq j} (m_{ij} k_j^{(ij)} - m_{ji} k_i) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{d}{dt} \int_V \alpha_i \rho_i \epsilon_i dV + \int_A \alpha_i \rho_i \epsilon_i (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_g) \cdot d\mathbf{a} = \int_A \alpha_i \left(\mu_i + \frac{\mu_i^t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon_i \cdot d\mathbf{a} + \\
& \int_V \alpha_i \left[f_i^\epsilon C_{\epsilon_1} S \epsilon + \frac{\epsilon_i}{k_i} (C_{\epsilon_1} C_{\epsilon_3} G_i^b) - \frac{\epsilon_i}{k_i + \sqrt{\nu \epsilon_i}} C_{\epsilon_2} \rho_i (\epsilon_i - \epsilon_0) + S_i^\epsilon + S_i^{\epsilon r} \right] dV + \sum_{j \neq i} (m_{ij} \epsilon_j^{(ij)} - m_{ji} \epsilon_i)
\end{aligned} \quad (16)$$

Onde:

- o subscrito i denota as diferentes fases.
- α_i é a fração de volume para cada fase i . Para escoamentos de uma única fase, como esse trabalho, α_i é automaticamente definido como 1.
- S_i^{kr} e S_i^{er} são termos relacionados a indução turbulenta de partículas, logo, seus termos serão igual a 0 para o tipo de simulação que será realizado.
- f_i é o fator de correção de curva para cada fase.

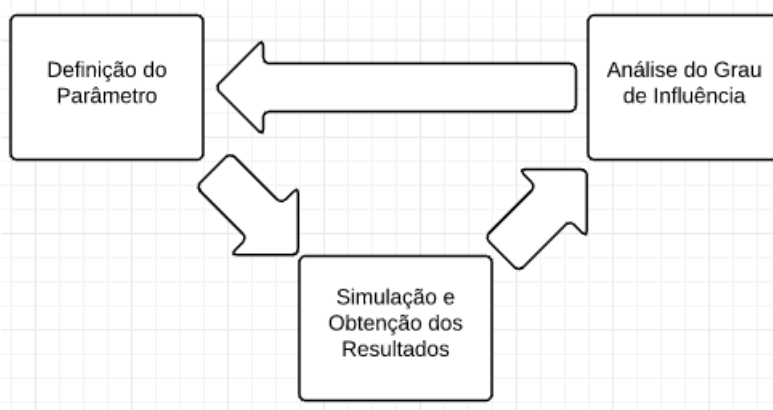
Já o *Two-Layer Approach* permite que o modelo *K-Epsilon* seja aplicado na sub camada viscosa. Nesta abordagem, a computação é dividida em duas fases. Na camada próxima ao objeto definido por *wall* (condição de não-eskorregamento), a taxa de dissipação turbulenta ϵ e a viscosidade turbulenta μ são especificadas como funções da distância do *wall*. Os valores de ϵ especificados nesta camada são combinados de forma suave com os valores computados para soluções de transporte longe do *wall*. A equação para turbulência cinética é resolvida em todo o escoamento (STAR-CCM+ Help).

3 METODOLOGIA

Considerando que a popa de uma embarcação exerce uma importante parcela na resistência ao avanço, estudos detalhados dos parâmetros envolvidos podem trazer melhorias significativas em uma área que apresenta poucas publicações na literatura aberta sobre o tema.

Para estudar estes aspectos, se faz necessária a escolha de métodos que possam auxiliar a organização e interação entre diversas variáveis e resultados obtidos, gerando resultados mais claros e objetivos. A Figura 15 apresenta uma síntese de como o problema será abordado. A primeira etapa é a definição dos parâmetros que serão estudados. Após isso, realiza-se a simulação e a coleta de resultados. Por último, realiza-se uma análise do grau de influência. O processo se repete para cada parâmetro estudado.

Figura 15 - Processo para definição dos parâmetros e seu grau de influência



Fonte: Elaborado pelo autor.

A definição dos parâmetros e a análise dos resultados serão feitas através de busca na literatura que resultará na criação de um conjunto de casos estudados. Nesta etapa deve-

se também definir quantas simulações serão necessárias, indicando assim quantos modelos precisarão ser gerados.

A construção dos cascos será feita através da modelagem de uma embarcação base do tipo PSV (Platform Supply Vessel) no programa CAESES, construída através de curvas paramétricas. A escolha deste tipo de embarcação serve apenas para limitar o escopo de análise e visa complementar outros trabalhos existentes (UEDA; HASHIBA; TANCREDI, 2012), (TANCREDI et al, 2014), (BOA VENTURA, 2016).

As curvas paramétricas que descrevem a superfície do casco da embarcação são funções dos parâmetros de entrada da embarcação, sendo possível variar estes valores para obter modelos com dimensões diferentes que continuam respeitando a forma da embarcação.

Para uma primeira estimativa, será feita uma da resistência através do método baseado em regressão apresentado por Holtrop e Mennen (HOLTROP, 1984).

Após isso, a simulação de arrasto para cada matriz será feita utilizando o código de escoamento potencial *SlenderBody*, do programa Maxsurf. Para a obtenção de resultados mais precisos e melhor entendimento dos efeitos locais, alguns modelos serão simulados no software STAR-CMM+, utilizando o método de fluidodinâmica computacional.

Outra forma de verificação dos resultados que foge ao escopo deste trabalho é a construção de um modelo físico em escala reduzida para a realização de ensaios experimentais. Testes de modelos são indispensáveis em análises de resistência ao avanço. Se conduzidos da maneira correta, apresentam resultados bastante compatíveis com o da embarcação real, porém, essa forma de análise é inviabilizada pela necessidade de uma estrutura complexa e por envolver custos elevados.

4 DESENVOLVIMENTO

Esta etapa engloba todo o processo de construção dos modelos computacionais, a criação da matriz de experimentos, a simulação dos cascos no Maxsurf utilizando o método *Slender Body*, e a estruturação do problema em CFD.

4.1 DOE

O *design of experiments* foi criado baseado em um trabalho de (RAMOS; BRONNEBERG; TANCREDI, 2004), oonde se escolhe manualmente quais parâmetros estão variando e quais são mantidos constantes. Como são poucas variáveis, a criação manual dos estudos é viável. Em casos onde diversas variações simultâneas precisam ser realizadas, recomenda-se a utilização de ferramentas computacionais que auxiliem a geração desses estudos.

4.2 MODELO INICIAL

A construção do modelo inicial foi baseado em um PSV para operação na região do pré-sal. Trata-se de um PSV oleiro dotado de sistema de posicionamento dinâmico e propulsão Diesel-elétrico. Estas embarcações tem como funcionalidade desejável elevar a velocidade de serviço, fomentando o estudo da resistência ao avanço deste tipo de embarcação.

A ferramenta utilizada para a construção foi o programa CAESES. Como citado anteriormente, ele permite a geração de novos cascos através da variação dos parâmetros de

entrada que descrevem as curvas paramétricas do casco. As dimensões principais do modelo são apresentadas na Tabela 4.

Com o objetivo de estimar a resistência de uma forma mais precisa, realiza-se um acréscimo de 10,00 metros no comprimento entre perpendiculares e 0,62 metros no calado em relação ao modelo original. Esta modificação no comprimento aconteceu em virtude do método utilizado, o qual apresenta resultados melhores quando o corpo é mais fino (maior relação de L/B) (COUSER; WELLICOME; MOLLAND, 1998).

Tabela 4 - Dimensões principais do modelo após adaptações

Nome	Valor
Boca	14,00
Calado	5,50
Pontal	12,60
LPP	77,65
Cb	0,47
Cm	0,82

Fonte: Elaborado pelo autor.

A modelagem deste casco consiste de diversas etapas, sendo as principais a:

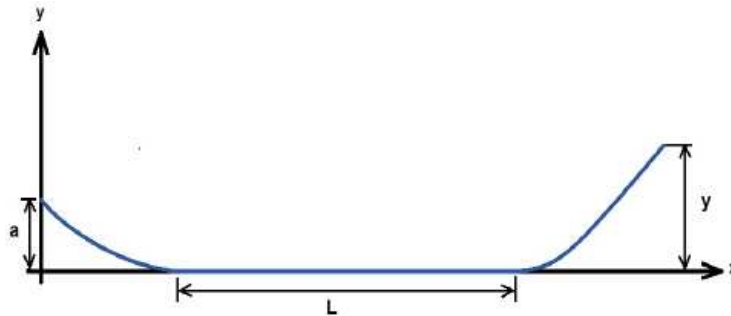
- Criação dos parâmetros principais:

Aqui se define quais serão as variáveis que poderão ser alteradas com o objetivo de gerar transformações no modelo. Os principais parâmetros criados estão apresentados na Figura D1, presente no apêndice D. É importante notar que o parâmetro criado e definido como "zTransom" é a variável que permite alterar o calado da transom (T_T) nos modelos.

- Construção da curva de centro:

Utiliza-se como base para a construção uma curva de centro típica de uma embarcação PSV. Um esboço é apresentado na Figura 16.

Figura 16 - Projeto da curva de centro



Fonte: (UEDA, 2012)

A criação via CAESES desta curva foi dividida em duas partes, o *Stem* e a Quilha. No projeto, a quilha é a curva que parte da popa transom e termina no corpo paralelo médio da embarcação. Já a *Stem* inicia no final da quilha e segue até o bico de proa da embarcação. A união destas curvas fornece a curva denominada CPC, apresentada na Figura D2 presente no apêndice D.

- Constituição da linha d'água;

A construção da curva da linha d'água é de extrema importância ao projeto, visto que é nela onde se define o valor da boca da transom (B_T). Para criá-la, alguns parâmetros locais são necessários, apresentados na Figura 17.

Figura 17 - Parâmetros locais da curva de linha d'água

Nome Atribuído	Significado	Valor
BeamAtTransom	Boca na popa transom	$0,85 \cdot \text{BeamAtTrasom}$
BeamMax	Boca Máxima	$0,93 \cdot \text{Beam}$
EntranceAngle		19
TanAtTransom	Tangente Transom	5

Fonte: (UEDA, 2012).

Um exemplo da curva finalizada por ser encontrado no apêndice D, na Figura D3.

- Construção da curva do convés:

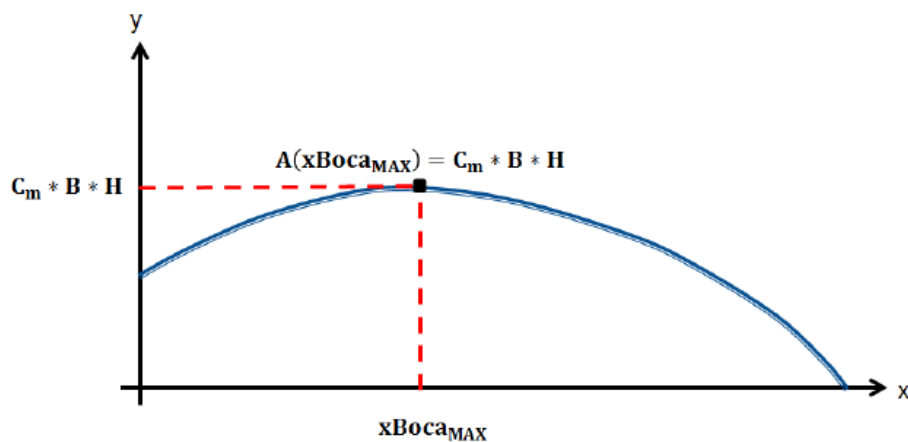
A curva do convés foi dividida em duas partes, sendo uma no plano lateral e outra no plano de topo. A composição das curvas resultará no convés com a inclinação e o formato desejados.

- Criação da curva de área seccional (SAC):

A curva de área seccional é uma curva que apresenta a área da seção transversal da embarcação em cada baliza. Seu eixo horizontal apresenta a posição longitudinal do navio, enquanto o eixo vertical define a área da seção.

Os dados necessários para a criação desta curva são o deslocamento da embarcação e LCB. O ponto máximo é definido pela multiplicação de $C_m * B * H$, apresentado na Figura 18. Deve-se atentar também para o fato de que esta curva não começa no ponto zero devido a presença da popa transom.

Figura 18 - Esboço da curva SAC



Fonte: (UEDA, 2012).

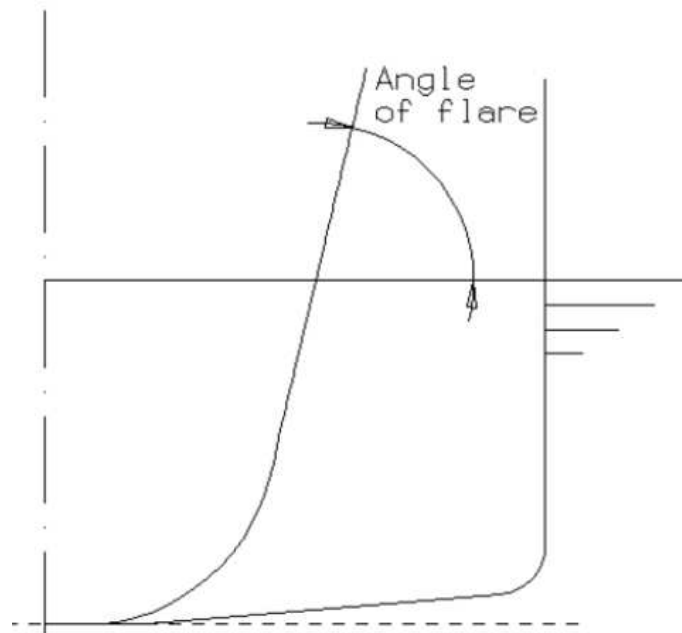
Outro aspecto importante nesta curva é o fato de que é aqui que se define o coeficiente C_1 . Definir U e V a partir do ângulo ϕ apresentado na seção 2 é inviável para este trabalho, visto que os parâmetros que são utilizados na construção desta curva não o incluem como variável. Assim, é necessário criar o coeficiente C_1 que permita alterar o formato da transom sem mudar seus parâmetros geométricos (B_T e T_T).

Nesta abordagem, a popa é modelada como um retângulo de base B_T e altura T_T e, então, multiplicada pelo C_1 . O valor adotado como padrão para o coeficiente será de 0,80. Desta forma, a área da transom (A_T) será 80% da área do retângulo, uma forma U. Este coeficiente é essencial para estudos da influência da forma na resistência ao avanço.

- Levantar a curva do ângulo de entrada e do *flare*:

De acordo com Bassler et al (2007), *flare* é o ângulo entre o casco do navio em uma seção transversal e a linha d'água. Este ângulo muda com a posição vertical analisada e usualmente é menor do que 90° .

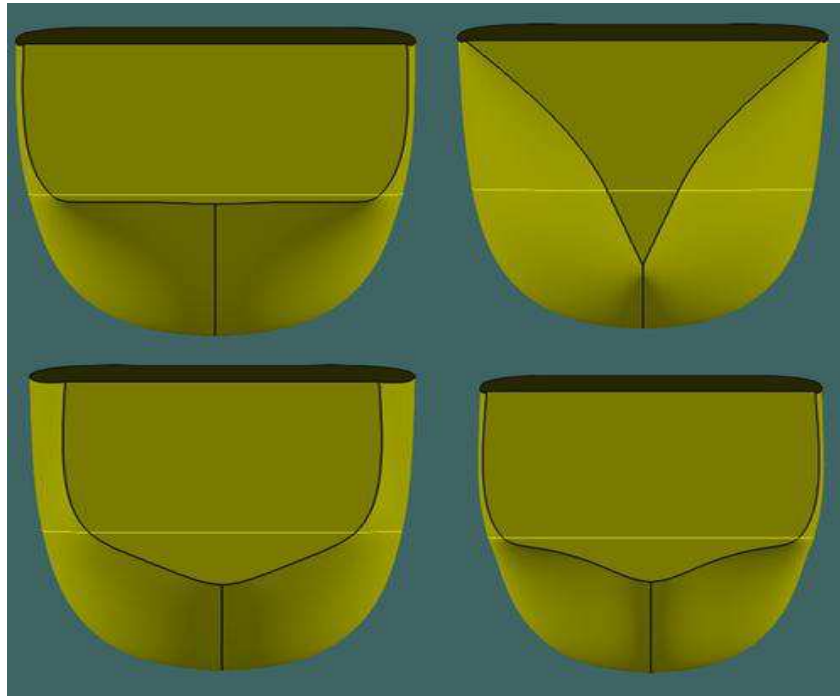
Figura 19 - *Flare*



Fonte: (BASSLER et al, 2007).

Após a construção da curva do *flare* e do ângulo de entrada, resta apenas unir todas as curvas através da criação de superfícies. A Figura 20 apresenta a popa transom de alguns modelos gerados a partir do modelo base, envolvendo variações de todos os parâmetros apresentados.

Figura 20 - Variações geométricas da popa transom



Fonte: Elaborada pelo autor.

Após a elaboração do casco no programa CAESES, a geometria é exportada como IGES. O modelo é aberto no programa Rhinoceros para correções e exportado novamente, porém desta vez com o formato IGS específico para o Maxsurf.

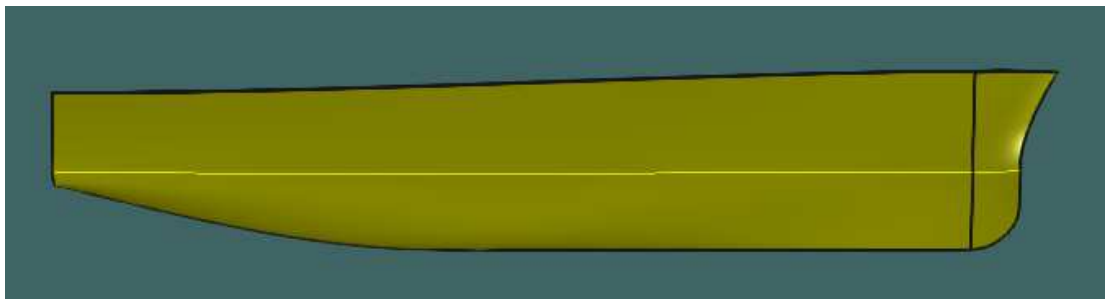
4.3 CÁLCULOS DE RESISTÊNCIA AO AVANÇO

Os cálculos de resistência ao avanço são realizados através do programa Maxsurf Resistance, utilizando o método *Slender Body*.

4.3.1 Maxsurf Modeler Advanced

Para fazer esta análise, primeiramente é necessária a importação da geometria para o Maxsurf Modeler Advanced para ajustar o calado que será utilizado na simulação. O arquivo é importado no formato IGS, gerando a representação do casco através de superfícies do tipo NURBs.

Figura 21 - Vista lateral da linha d'água no plano X-Z



Fonte: Elaborado pelo autor.

O casco vem inicialmente travado, impedindo a movimentação da superfície no sistema referencial do programa. Após destravar todas as superfícies, é possível mover o modelo livremente ou numericamente. Para ajustar o calado, representado pela linha amarela no modelo exibido na Figura 21, altera-se numericamente o valor da posição vertical da embarcação.

4.3.2 Maxsurf Resistance

No módulo de resistência, é possível especificar os dados que serão utilizados nos algoritmos de duas formas: digitando-os manualmente ou medindo-os de forma automática através do próprio programa. Para medi-los automaticamente, deve-se selecionar todas as superfícies e clicar na opção *Measure all*. Uma combinação destas duas formas também é possível para os métodos baseados em regressão. Em todos os casos, é sempre recomendado checar as medidas geradas de forma automática para ter certeza de que seus valores estão coerentes (Maxsurf Resistance Help).

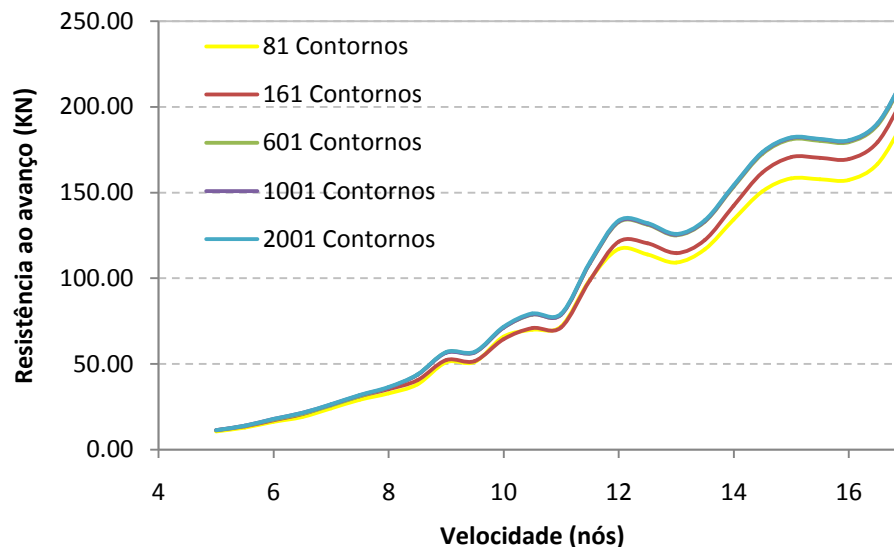
Para o método de *Slender Body*, o programa cria automaticamente uma malha de superfície que será utilizada para calcular a resistência. Assim, com exceção da área molhada, não é possível inserir manualmente os dados de entrada.

Para ter certeza que o programa está interpretando corretamente o casco, recomenda-se checar a malha, principalmente na região da popa transom. O número de contornos utilizados podem ser aumentadas para obter valores mais precisos, porém, o custo computacional aumentará de maneira exponencial.

4.4 ESTUDO DE MALHA

No casco base, o número padrão de contornos utilizado pelo Maxsurf Resistance é de 81. Com o intuito de obter os melhores resultados sem aumentar exageradamente o custo computacional, realiza-se um estudo de convergência de malha para checar qual é a melhor malha para o modelo. Foram realizadas análises com 81, 161, 601, 1001 e 2001 contornos, apresentados na Figura 22.

Figura 22 - Estudo de convergência dos resultados



Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível observar que as curvas amarela e vermelha, de 81 e 161 contornos respectivamente, apresentam uma diferença no resultado em relação às demais. Fica

evidente também, através da superposição das curvas, que a partir de 601 contornos não existem mais variações significativas nos resultados, gerando apenas aumento no tempo de simulação. Logo, este será o número de contornos utilizados nas simulações subsequentes.

4.5 CFD

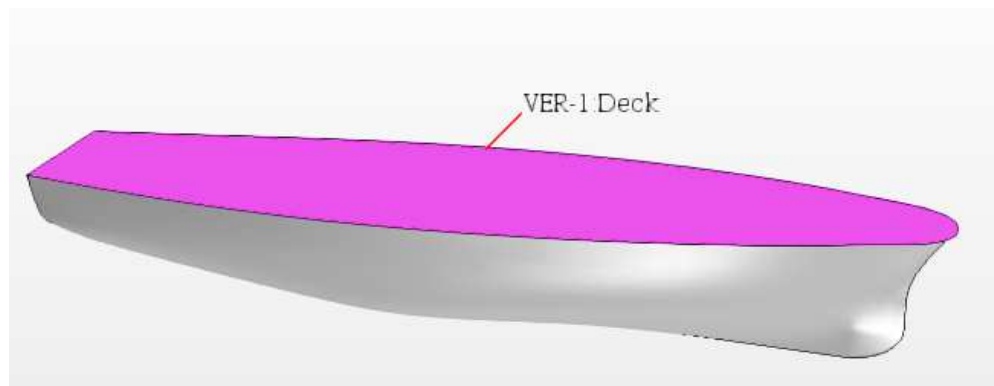
O software comercial utilizado para o método CFD é o Star-CCM+. A série dos passos para a construção das simulações e a forma como os resultados são abordados estão descritos nesta seção.

4.5.1 Geometria

A obtenção do modelo e a construção do ambiente de simulação são os elementos básicos constituintes da geometria. Como explicado anteriormente, o casco é modelado no CAESES e, então, importado para o Star-CCM+. A origem do sistema de coordenadas é na perpendicular da popa e na superfície da água. Devido à condição de simetria, apenas metade da geometria é modelada.

Após importar o casco, é necessário dividi-lo em superfícies. Nesta simulação, adota-se como superfície o convés, boreste, bombordo e a popa da embarcação. Porém, fica a critério do usuário decidir a divisão que considerar a mais adequada. A Figura 23 apresenta a superfície do convés.

Figura 23 - Superfície do convés no STAR-CCM+



Fonte: Elaborado pelo autor.

O próximo passo é a criação do ambiente de simulação, conhecido como volume de controle. Seu domínio se estende de:

- -200 m até 200 m na direção do escoamento;
- 0 m até 180 m na direção lateral da embarcação;
- -120 m até 90 metros na direção vertical.

O domínio na direção do escoamento é cerca de cinco comprimentos característicos da embarcação. É necessário distinguir o corpo da embarcação do volume de controle criado que terá o escoamento multifásico (ar e água), para posteriormente aplicar as condições de contorno corretas e criar malhas distintas em cada região. Essa etapa é feita através de uma operação chamada "Subtração de Boolean".

4.5.2 Malha

A construção da malha é uma etapa vital na simulação, visto que será ela quem determinará a precisão dos resultados obtidos e o custo computacional associado à simulação. Análises de resistência geralmente são realizadas utilizando *trimmed volume mesh* com *prism layers*, sendo utilizadas em conjunto com o *surface remesher*.

O tamanho dos elementos que compõem a malha pode ser definido a partir de porcentagens de um valor adotado como configuração global ou com tamanhos específicos para cada região. A vantagem de construir a malha com valores ligados a um valor base é que, caso sintasse necessidade de alterar o tamanho da malha, basta alterar o valor de base e todos os elementos terão seus respectivos valores modificados proporcionalmente de maneira automática. A Tabela 5 apresenta as dimensões da malha aplicadas às regiões da simulação. A Figura B2 do Apêndice B apresenta uma imagem da malha gerada no casco, onde é possível perceber a malha mais refinada na região próxima a superfície da água.

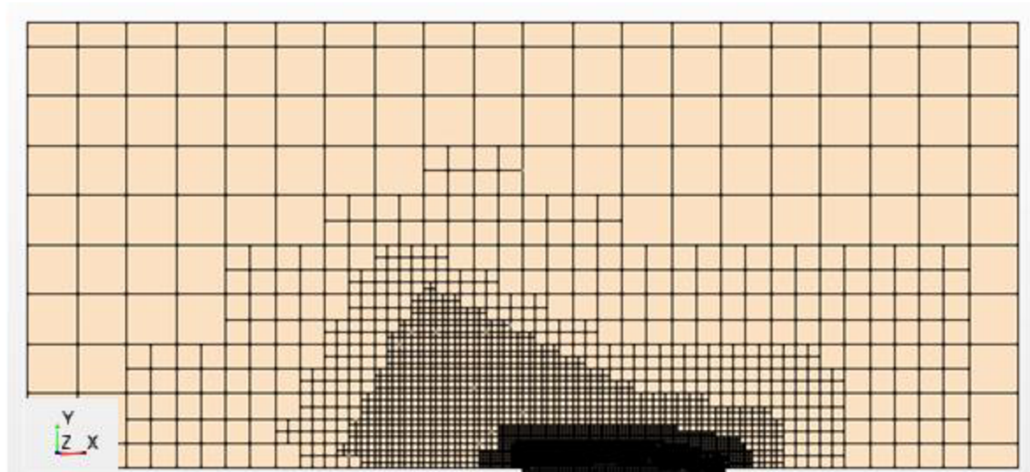
Tabela 5 - Dimensões de cada região

Região		% da base	Dimensão (m)
Global	Base	100	2,50
	Convés	50	1,25
Casco	Costado	25	0,63
	Popa	12,5	0,31
Volume de Controle	Superfície da Água	12,5	0,31
	Fronteiras do Tanque	1600	40,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para não criar variações de tamanho abruptas nos elementos, volumes de controle são criados com o objetivo de minimizar a transição de suas dimensão. Assim, regiões de alto interesse, que tem o tamanho de seus elementos chegando a até 12,5% do valor de base, mudam de forma suave até atingirem as regiões de baixo interesse, as quais tem o tamanho de seus elementos chegando a 1600%. Esse fenômeno pode ser observado de maneira mais detalhada através da Figura 24.

Figura 24 - Transição da dimensão dos elementos na vista vertical da malha gerada



Fonte: Elaborado pelo autor.

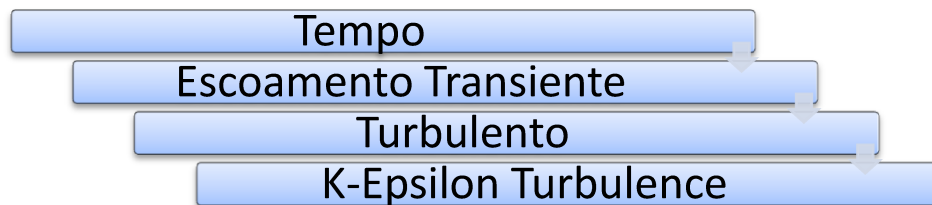
É importante observar o refinamento incorporado com uma certa angulação atrás do modelo, o qual destina-se a capturar com maior riqueza de detalhes o padrão de ondas

(Kelvin) formado atrás do casco. A Figura B3 do Apêndice B apresenta um exemplo do padrão de onda gerado em uma das simulações.

4.5.3 Modelos físicos adotados

Programas que utilizam códigos de CFD disponibilizam diversos fenômenos físicos representados por modelos matemáticos. Esses modelos podem ser divididos em grupos de espaço físico, tempo e material (ambiente).

Figura 25 - Modelo físico relacionado ao tempo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação aos modelos temporais, apresentados na Figura 25, como as propriedades do fluido em um determinado ponto do escoamento variam com o tempo, este é definido como transiente. Outra característica do escoamento é a mistura macroscópica das camadas de fluido adjacentes, tornando-o um escoamento turbulento. O modelo matemático utilizado para resolvê-lo é o *K-Epsilon Turbulence*, discutido anteriormente.

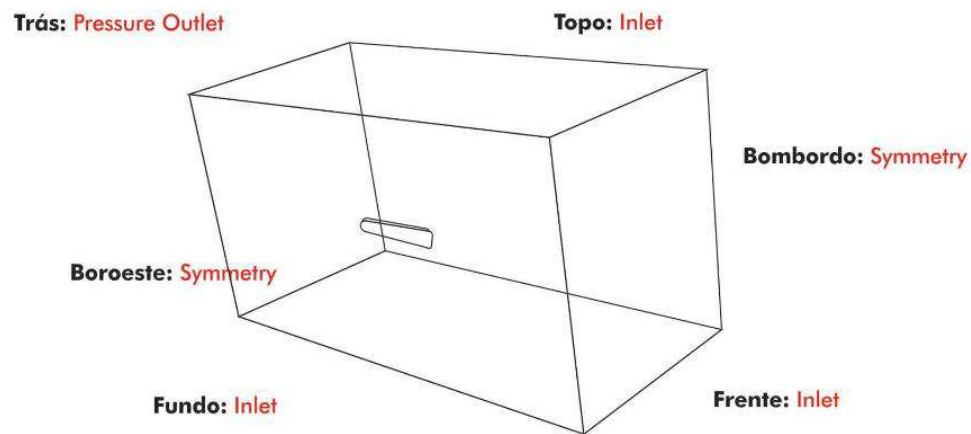
Já quando se trata do grupo definido como material (ambiente), define-se quais modelos são utilizados para caracterizar o tipo de interação entre os fluidos selecionados no volume de controle. A análise é feita com interação Euleriana de múltiplas fases, um modelo simples que resolve um conjunto de equações de transporte para o momento, massa e transporte de energia de uma mistura.

O fluido é representado pelo modelo VOF *Volume of Fluid*, um modelo usado para simulações de superfícies imiscíveis, como o desenvolvimento de ondas ao redor do casco. Nele, é possível selecionar qual tipo de onda se deseja através do VOF *Waves* (flat, primeira ordem, quinta ordem, superposição ou irregular). Para esta análise se utiliza o tipo *flat*. A Figura B1 no Apêndice B apresenta todos os modelos físicos selecionados.

4.5.4 Condições de contorno

Para definir um problema que resulte em uma única solução é necessário especificar informações sobre as variáveis dependentes do escoamento nas fronteiras do problema. Essas variáveis recebem o nome de condição de contorno, sendo essenciais para a solução dos modelos matemáticos adotados. As condições de contorno aplicadas às suas regiões podem ser observadas na Figura 26.

Figura 26 - Condições de Contorno do problema



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nos locais onde se especifica os parâmetros iniciais do escoamento através da função VOF *Wavese* dá o nome de *Inlet*. Esta condição de contorno deve ser aplicada no Fundo, Frente e Topo do volume de controle e é responsável por caracterizar a entrada de fluido no sistema. Desta forma, tanto no Topo quanto na parte inferior, as fronteiras terão escoamentos paralelos com a embarcação. Se fossem adotadas condições de não-deslizamento nestas fronteiras, interferências poderiam ser sentidas na simulação. É muito importante ressaltar que neste tipo de simulação o corpo é considerado fixo e o fluido que tem velocidade.

Nos lados do volume de controle definem-se planos de simetria, assim, apenas metade da simulação é necessária, visto que o modelo é simétrico. Na parte de trás do

domínio estudado é designada a condição de *Pressure Outlet*, sendo função da pressão hidrostática da VOF *Wave* definida.

Todas as superfícies do casco são definidas como *Wall*, usualmente conhecida como condição de não-escorregamento, onde a velocidade do escoamento normal à superfície é zero e a tangencial é igual à velocidade da superfície.

4.5.5 Simplificações adotadas

Como é possível notar, análises de resistência ao avanço são complexas e envolvem elevados custos computacionais, mesmo utilizando malhas simples. Assim, algumas simplificações nas análises são necessárias para viabilizar estas simulações em um espaço de tempo mais curto e/ou considerando baixos recursos computacionais.

A principal simplificação adotada e que mais interfere nos resultados é a utilização de um corpo estático no volume de controle ao invés de considerar o modelo com movimento de corpo rígido. É notável que esta hipótese não condiz com a física do problema, já que um navio tem como uma das principais características ser uma estrutura auto equilibrável. O efeito dessa simplificação na resistência é que o calado não varia e o *trim* é desconsiderado.

5 RESULTADOS

Quando um casco sofre modificação em alguma de suas dimensões, diversos parâmetros que são dependentes destas variáveis acabam tendo seus valores alterados. Neste caso em específico, modificações na popa transom (T_T , B_T , A_T), resultarão na alteração de diversas propriedades da embarcação, como área molhada, C_P , C_{WP} , deslocamento, entre outros.

Os estudos apresentados a seguir mostrarão como a resistência se comporta com a variação dos parâmetros que descrevem a popa transom. Primariamente, são utilizadas análises com deslocamentos constantes obtidos através da correção do calado do modelo. Posteriormente, análises com calado constante e o deslocamento variando são apresentadas. Os estudos realizados estão sintetizados no DOE apresentado na Tabela 6. Já os valores de resistência são obtidos através do método *Slender Body*, discutido anteriormente na fundamentação teórica.

O comprimento não será apresentado nos estudos, pois se manteve constante em 77.65 m. O coeficiente de forma C_1 será abordado apenas no estudo 5.

Tabela 6–Conjunto de Estudos

Estudo	Parâmetro	Valor	Condição	Estudo	Parâmetro	Valor	Condição
1	Δ (m ³)	2608	Fixado	4	Δ (m ³)	2608 - 2938	Variável
	B _T (m)	10,58	Fixado		B _T (m)	10,58	Fixado
	T _T (m)	50% - 90% T	Variável		T _T (m)	50% - 90% T	Variável
	Forma	U	Fixado		Forma	U	Fixado
2	Δ (m ³)	2865	Fixado	5	Δ (m ³)	2517 - 2734	Variável
	B _T (m)	20% - 90% B	Variável		B _T (m)	90% B	Fixado
	T _T (m)	2,27	Fixado		T _T (m)	70% T	Fixado
	Forma	U	Fixado		Forma	V-U	Variável
3	Δ (m ³)	2644 - 2865	Variável		Δ (m ³)		
	B _T (m)	20% - 90% B	Variável		B _T (m)		
	T _T (m)	2,25	Fixado		T _T (m)		
	Forma	U	Fixado		Forma		

Fonte: Elaborado pelo autor.

- Estudo 1: Deslocamento constante (Δ) e calado na transom (T_T) variando.

O primeiro estudo contou com a análise do modelo com 9 valores diferentes de calado na transom (T_T), mantendo o deslocamento constante através da correção do calado. As dimensões principais que sofreram alterações, assim como o valor dos parâmetros locais estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros principais analisados no estudo 1

BOCA (m)	CALADO (m)	Δ (m ³)	ÁREA M. (m ²)	AT (m ²)	BT (m ²)	TT (m ²)
13.02	5.51	2608	1191	3.61	10.58	0.43
13.01	5.49	2611	1191	4.44	10.54	0.53
12.99	5.44	2612	1189	6.25	10.44	0.76
12.97	5.39	2612	1188	8.05	10.33	0.98
12.95	5.34	2612	1187	9.87	10.23	1.22
12.94	5.28	2611	1187	11.69	10.14	1.46
12.92	5.23	2609	1186	13.51	10.06	1.71
12.90	5.18	2607	1186	15.34	9.99	1.95
12.88	5.13	2604	1185	17.16	9.93	2.18

Fonte: Elaborado pelo autor.

A variação do calado na transom foi de $T_T = 0,5T$ a $0,9T$, espaçados em intervalos de $0,05T$. Como o calado varia na análise com deslocamento constante, é possível notar que os incrementos no calado da transom (T_T) acabam não sendo exatamente 5%. De maneira similar, a boca na transom foi mantida constante como 76% do valor da boca na meia nau, porém, como o calado varia, os valores de B_T não permaneceram constantes ao longo das simulações deste estudo.

- Estudo 2: Deslocamento aproximadamente (Δ) constante e boca na transom (BT) variando.

O segundo estudo contou com 14 variações na boca da transom. O intervalo analisado é $B_T = 0,2B$ a $0,9B$ com variações de $0,05B$ entre cada modelo. De maneira similar ao estudo 1, buscou-se manter o deslocamento constante através da correção do calado na meia nau. Outro parâmetro que deveria ser constante é o calado na transom. Porém, como ele é dependente de T , seus valores acabaram apresentando variações também. A Tabela 8 mostra os parâmetros deste estudo.

Tabela 8 - Parâmetros principais analisados no estudo 2

BOCA (m)	CALADO (m)	Δ (m³)	ÁREA M. (m²)	AT (m²)	BT (m²)	TT (m²)
13.02	5.50	2865	1242	18.63	10.59	2.27
13.02	5.52	2867	1240	17.99	10.15	2.29
13.03	5.54	2865	1237	17.13	9.60	2.31
13.03	5.56	2862	1234	16.24	9.04	2.33
13.04	5.58	2859	1231	15.32	8.48	2.34
13.05	5.63	2872	1233	14.56	7.96	2.36
13.05	5.63	2858	1230	13.50	7.37	2.36
13.06	5.66	2860	1230	12.58	6.82	2.37
13.08	5.69	2862	1231	11.62	6.27	2.39
13.09	5.72	2862	1232	10.63	5.71	2.42
13.10	5.75	2862	1233	9.61	5.16	2.45
13.11	5.78	2861	1234	8.55	4.60	2.48
13.13	5.81	2859	1235	7.46	4.04	2.51
13.14	5.85	2863	1238	6.37	3.49	2.55

Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível perceber que conforme acontece uma redução no valor da boca na transom, o calado vai sendo modificado para aproximar o deslocamento do valor padrão. Como efeito, a boca da embarcação acaba aumentando no decorrer do processo e as variações de B_T tornam-se espaçadas diferentemente do proposto.

- Estudo 3: Deslocamento (Δ) variando e calado na transom (T_T) variando.

Foram analisados os mesmos 9 modelos do estudo 1 com a mesma variação de T_T de 0,5T a 0,9T, espaçados em intervalos de 0,05T. A Tabela 9 mostra como alguns parâmetros são diferentes dos obtidos no primeiro estudo, servindo como uma forma de comparação com a Tabela 7.

Este estudo, diferentemente dos estudos 1 e 2, teve seu calado mantido constante durante toda a análise. O efeito disso é uma variação no deslocamento da embarcação devido ao acréscimo do calado na transom.

Tabela 9 - Parâmetros principais analisados no estudo 3

BOCA (m)	CALADO (m)	Δ (m³)	ÁREA M. (m²)	AT (m²)	BT (m²)	TT (m²)
13.02	5.51	2627	1194	4.65	10.58	0.55
13.02	5.51	2669	1202	6.98	10.58	0.83
13.02	5.51	2710	1209	9.31	10.58	1.10
13.02	5.51	2750	1217	11.64	10.58	1.39
13.02	5.50	2789	1225	13.97	10.58	1.68
13.02	5.50	2827	1234	16.30	10.59	1.98
13.02	5.50	2865	1242	18.63	10.59	2.27
13.02	5.50	2902	1251	20.96	10.59	2.55
13.02	5.50	2938	1259	23.28	10.60	2.82

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dentre os valores que merecem atenção, podem ser destacados os valores referentes à boca e boca na transom. No primeiro estudo, a boca da embarcação acabou variando devido ao decréscimo no calado para corrigir o deslocamento, já nessa simulação, ela manteve-se constante em todos os modelos, assim como a boca na transom. O efeito disso,

que será discutido posteriormente em detalhes nas conclusões, é incluir mudanças na resistência que não estão relacionadas diretamente a variações geométricas da transom.

Outro ponto importante é notar que nesse caso as variações no calado da transom são praticamente constantes, variando em aproximadamente 0,28 metros entre cada modelo.

- Estudo 4: Deslocamento (Δ) variando e boca na transom (B_T) variando.

De forma análoga ao estudo 3, manteve-se o calado do modelo constante e como resultado obteve-se um declínio no deslocamento dos modelos devido ao decréscimo da boca na transom.

Tabela 10 - Parâmetros principais analisados no estudo 4

BOCA (m)	CALADO (m)	Δ (m³)	ÁREA M. (m²)	AT (m²)	BT (m²)	TT (m²)
13.02	5.50	2865	1242	18.63	10.59	2.27
13.01	5.50	2851	1236	17.79	10.11	2.27
13.01	5.50	2833	1230	16.74	9.52	2.27
13.01	5.50	2815	1223	15.70	8.92	2.27
13.01	5.50	2797	1217	14.65	8.33	2.26
13.01	5.50	2779	1212	13.60	7.73	2.24
13.01	5.50	2760	1207	12.56	7.14	2.23
13.01	5.50	2741	1203	11.51	6.55	2.21
13.01	5.50	2722	1198	10.46	5.95	2.20
13.01	5.50	2703	1194	9.41	5.36	2.20
13.01	5.50	2684	1191	8.37	4.76	2.20
13.01	5.50	2665	1187	7.32	4.17	2.20
13.02	5.50	2645	1183	6.27	3.57	2.20
13.02	5.50	2625	1180	5.23	2.98	2.20

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os parâmetros discutidos podem ser observados na Tabela 10 e servem para realizar comparações com o estudo 2.

- Estudo 5: Deslocamento (Δ) variando e Forma variando, Boca na Transom (B_T) e Calado na Transom (T_T) aproximadamente constantes.

O estudo 5 adiciona a influência da forma da popa transom na resistência ao avanço. Para variar a forma, fixa-se o B_T e o T_T e se altera o coeficiente C_1 na construção do modelo. Essa mudança cria diferentes formas (consecutivamente, diferentes áreas) para um mesmo B_T e T_T . Os cascos gerados no o estudo 5 estão presentes na Figura D4.

Tabela 11 - Parâmetros principais analisados no estudo 5

BOCA (m)	CALADO (m)	Δ (m³)	ÁREA M. (m²)	AT (m²)	BT (m²)	TT (m²)
13.04	5.50	2517	1194	4.44	11.17	1.65
13.04	5.50	2554	1204	5.57	11.18	1.65
13.04	5.50	2628	1210	9.24	11.19	1.65
13.04	5.50	2664	1213	11.09	11.20	1.65
13.04	5.50	2699	1218	12.94	11.20	1.65
13.04	5.50	2734	1224	14.79	11.21	1.68

Fonte: Elaborado pelo autor.

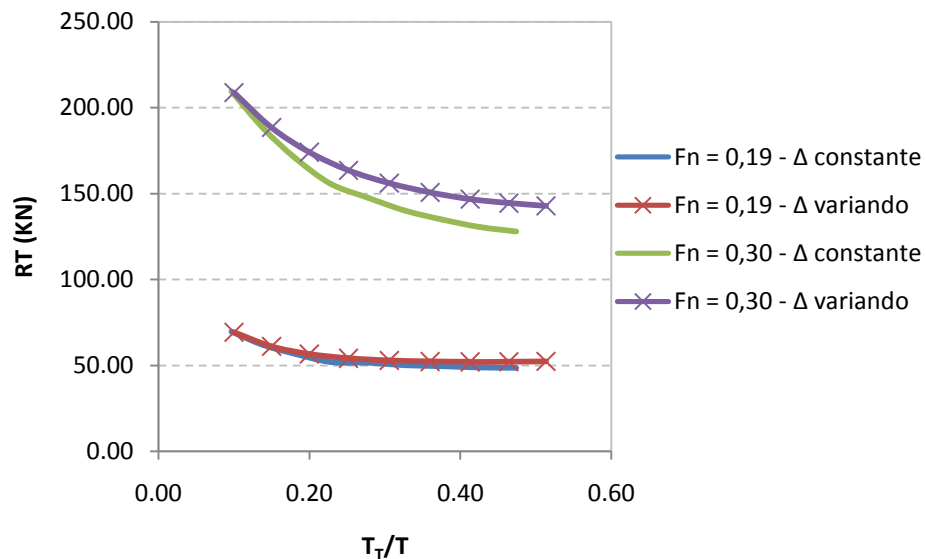
Nesse estudo, o valor de B_T é fixado em 11,20 m e o de T_T é fixado em 1,65 m. As diferentes formas e áreas na transom são obtidas variando o valor do C_1 de 0,20 até 0,80, espaçados em 0,10.

6 ANÁLISES

Após a realização das simulações de resistência ao avanço dos estudos apresentados anteriormente, é possível analisar detalhadamente os efeitos das variações dimensionais e de forma na popa transom.

Dentre as possíveis maneiras de apresentar esses resultados, a mais simples é a variação da resistência ao avanço em função da variação da boca ou do calado na transom. Como pode ser visto na Figura 27, ao aumentar a relação T_T/T , tem-se um decréscimo na resistência ao avanço.

Figura 27 - Variação da resistência total em função de T_T/T

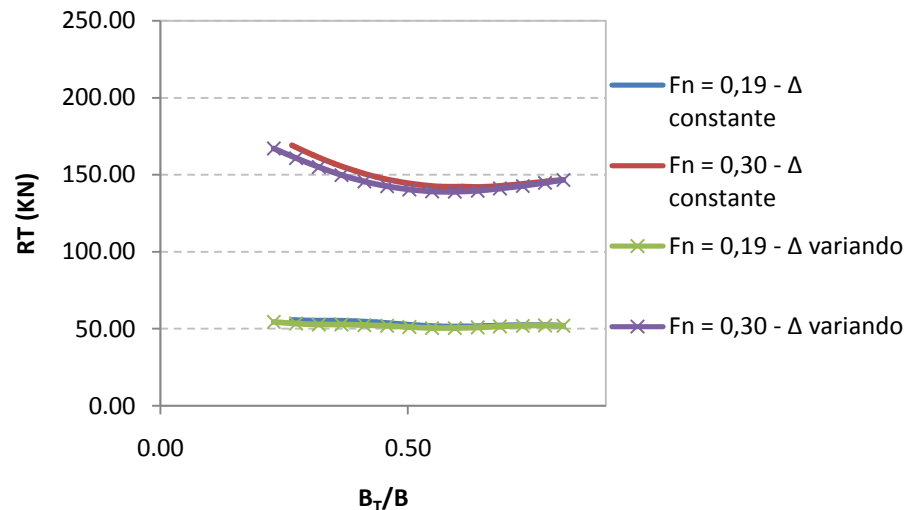


Fonte: Elaborado pelo autor.

Já quando se trata da relação B_T/B , como pode ser visto na Figura 28, os valores de resistência para F_n igual a 0,30 decrescem e, após um determinado ponto, seu

comportamento se altera, passando a apresentar aumento na resistência. Também é possível notar que a influência do calado na transom é maior do que a boca na transom, visto que suas curvas apresentam inclinações maiores.

Figura 28 - Variação da resistência total em função de B_T/B

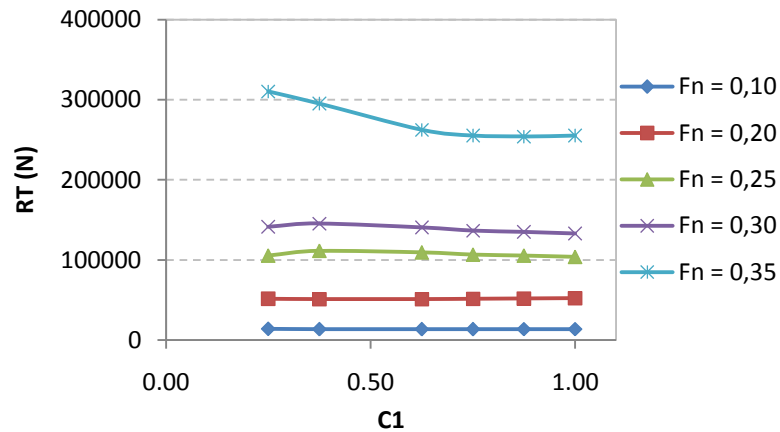


Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível perceber também em ambos estudos que esta influência é maior para maiores números de Froude e praticamente imperceptível para F_n menores do que 0,20. Portanto, esta interferência é fortemente dependente da velocidade da embarcação.

A terceira análise realizada é a influência da forma na resistência. Apesar de não ser um comportamento único, como pode ser visto na Figura 1 Figura 29, a resistência usualmente diminui com o aumento do valor de C_1 em altas velocidades. Já em baixos números de Froude, se torna um efeito praticamente inexistente.

Figura 29 - Variação da resistência total em função de C1



Fonte: Elaborado pelo autor.

Um ponto importante que deve ser destacado é a diferença entre analisar os modelos com deslocamento constante e deslocamento variável. A Figura 27 e a Figura 28 apresentam a diferença entre estas análises, onde as curvas com marcadores apresentam as resistências dos estudos onde o deslocamento variou e as sem marcadores são os estudos onde o deslocamento foi mantido constante.

É notável que o comportamento das curvas é bem semelhante, porém, estas análises contêm variações na resistência que são provenientes de aspectos não relacionados à variações na transom, conforme discutido anteriormente.

6.1 Proposta de coeficientes para a popa

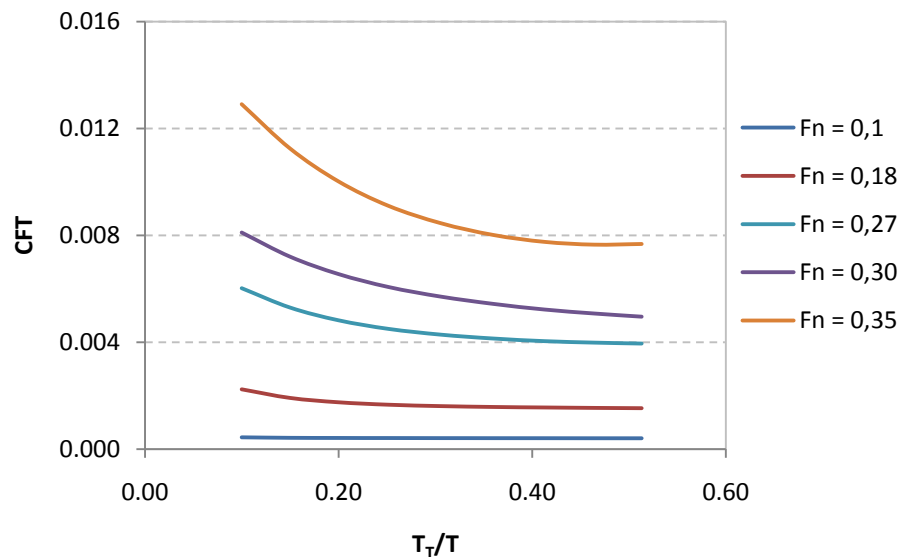
Como uma forma de minimizar o efeito da variação da resistência em função da variação do deslocamento, sugere-se a implementação de uma correção representada por C_{FT} apresentada na Eq. 17. Este aprimoramento consiste na divisão da resistência pela gravidade, massa específica da água e o deslocamento do casco.

$$C_{FT} = \frac{RT}{g\rho\Delta} = \frac{\left[Kg \cdot \frac{m}{s^2} \right]}{\left[\frac{m}{s^2} \cdot \frac{kg}{m^3} \cdot m^3 \right]} \quad (17)$$

Desta forma, obtém-se um coeficiente adimensional capaz de apresentar os resultados com menores interferências no comportamento proveniente da diferença nos deslocamentos. Já nos casos onde o calado varia para manter o deslocamento constante, é relativamente difícil obter uma forma prática de minimizar estes efeitos.

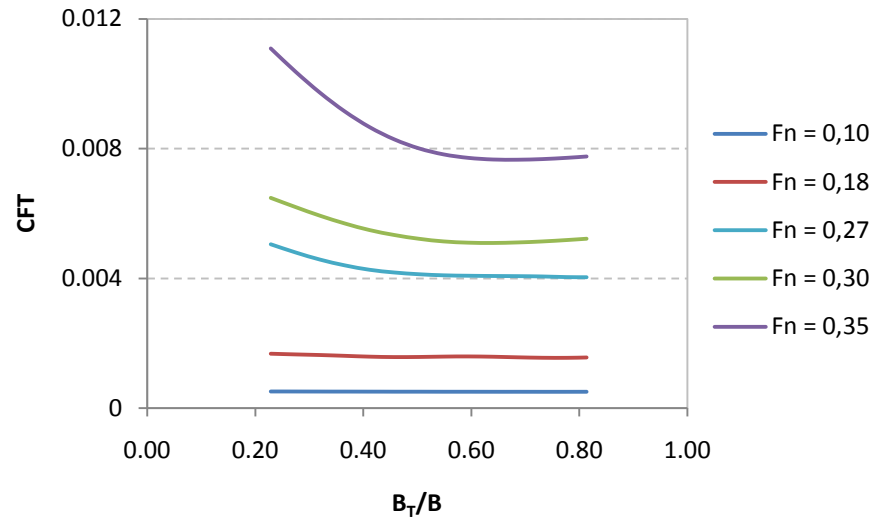
A Figura 30 apresenta o C_{FT} em função do número de Froude para algumas relações de T_T/T . Assim, fica nítido que a resistência diminui quando se aumenta o calado na transom. Também é possível notar que a inclinação das curvas é fortemente dependente da velocidade, como apontado anteriormente.

Figura 30 - C_{FT} em função de T_T/T para o Estudo 4



Fonte: Elaborado pelo autor.

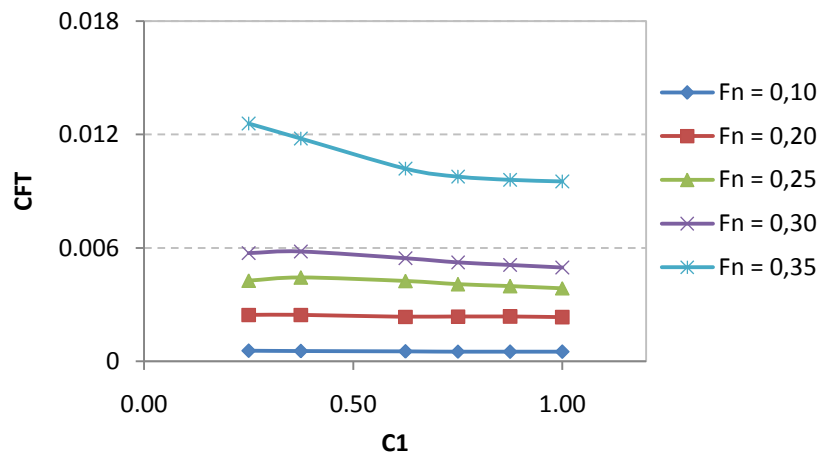
É importante lembrar que o aumento deste parâmetro é limitado pelo espaço para o propulsor, porém, em termos da resistência ao avanço, aumentar o calado na transom é benéfico para a embarcação. De maneira similar, a mesma análise do C_{FT} é realizada para a variação da boca na transom, como pode ser visto na Figura 31.

Figura 31 - C_{FT} em função de B_T/B para o Estudo 3

Fonte: Elaborado pelo autor.

Já quando se trata da relação B_T/B , o valor de C_{FT} diminui de 0,20 B_T/B até 0,60 B_T/B . Após isso, o valor aumenta levemente. Isso leva a conclusão de que existe uma relação ideal de B_T/B .

Em relação a forma, a adimensionalização da resistência aumentou o grau de influência da forma, visto que as inclinações das retas se encontram mais acentuadas na Figura 32.

Figura 32 - C_{FT} em função de C_1 para o Estudo 5

Fonte: Elaborado pelo autor.

Esse fato mostra como este processo foi importante, onde o grau da influência estava sendo mascarado pela diferença de deslocamento entre os modelos analisados.

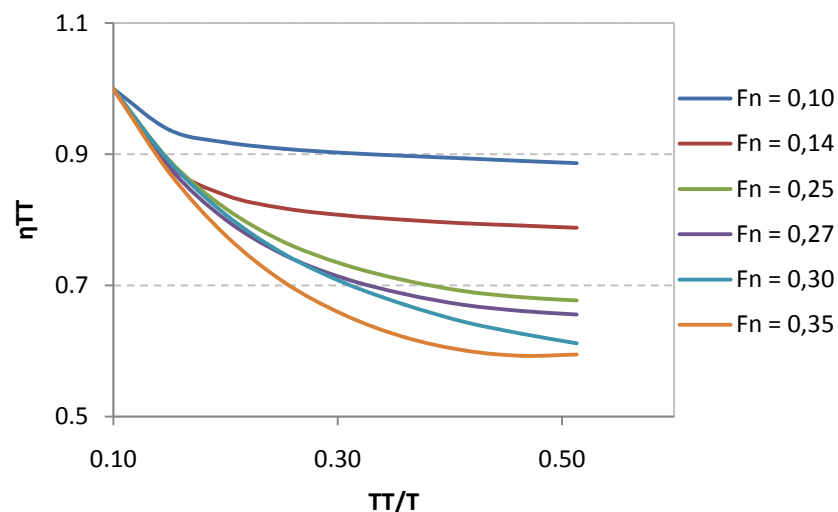
6.2 Proposta de modelo empírico para estimar a resistência de uma embarcação após variações geométricas na popa transom

Como a criação de um casco através de curvas paramétricas é um processo complexo e demorado, se propõe a criação de uma equação que permita estimar de maneira rápida e simples qual seria a resistência de um PSV após modificações em sua popa transom. Este modelo matemático deve ter como dados de entradas informações de fácil obtenção do projetista.

Através da divisão do C_{FT} dos modelos simulados pelo C_{FT} do primeiro casco (modelo base de cada estudo), é possível criar um conjunto de equações que fornecem novos coeficientes adimensionais, representados por η . Existirá um para variações de calado na transom, boca na transom e forma.

O primeiro caso é apresentado na Figura 33. Esse coeficiente possibilita calcular a redução da resistência em função do aumento da relação T_T/T . É possível observar que para cada velocidade existe uma curva específica para o ηT , aproximadas em equações de segundo grau.

Figura 33 - ηT em função de T_T/T



Fonte: Elaborado pelo autor.

$$\eta T = 0,967 (T_T/T)^2 - 0,802 T_T/T + 1,052 \quad (18)$$

$$\eta T = 2,537 (T_T/T)^2 - 2,267 T_T/T + 1,184 \quad (19)$$

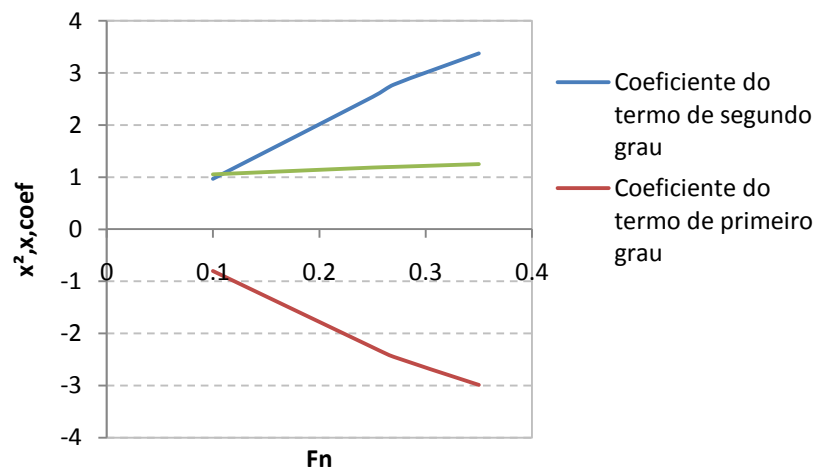
$$\eta T = 2,774 (T_T/T)^2 - 2,452 T_T/T + 1,197 \quad (20)$$

$$\eta T = 3,373 (T_T/T)^2 - 2,991 T_T/T + 1,251 \quad (21)$$

A partir disso, um novo gráfico é criado com os coeficientes de cada equação. Este processo, apresentado na Figura 34, permite a criação de uma equação que unifica o coeficiente ηT em função da velocidade, onde inserindo o número de Froude nas equações obtidas a partir destas retas, fica possível a obtenção do ηT na velocidade desejada.

É importante observar que algumas curvas apresentam graus de inclinações diferentes, dificultando a criação de linhas de tendências precisas. Assim, as curvas de $\eta T = 0,30$ e $\eta T = 0,14$ foram retiradas com o objetivo de simplificar o equacionamento.

Figura 34 - Valores que acompanham o termo $(T_T/T)^2$, T_T/T e a constante



Fonte: Elaborado pelo autor.

$$y = 9,796 Fn + 0,037 \quad (22)$$

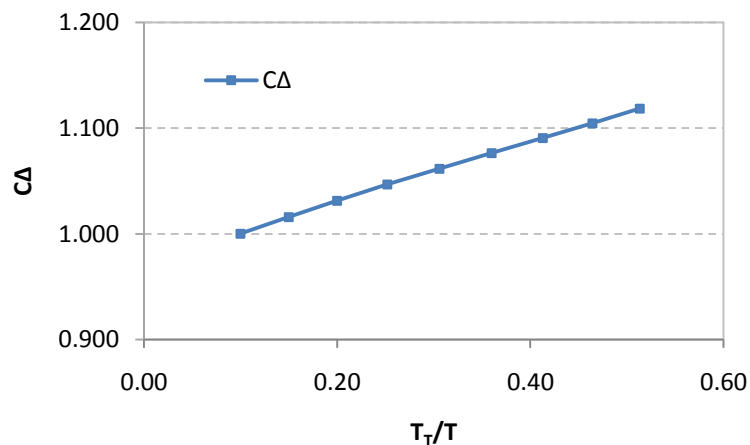
$$y = -8,9626 Fn + 0,036 \quad (23)$$

$$y = 0,807 Fn + 0,975 \quad (24)$$

Multiplicar a resistência base pelo coeficiente η_T ainda não fornece o valor de resistência esperado. Isso deve-se ao fato de que todo o processo foi criado através da adimensionalização da resistência com a criação do C_{FT} . Logo, outro aspecto que precisa ser corrigido é a diferença entre deslocamento do novo modelo e do modelo base.

A maneira encontrada para resolver esse problema foi a criação da Eq. 25, a qual permite estimar o deslocamento do novo modelo analisado. Esta equação foi criada a partir do incremento em porcentagem do deslocamento das embarcações em função do aumento do calado na transom, apresentado na Figura 35.

Figura 35 - Incremento do deslocamento em função do aumento no calado da transom



Fonte: Elaborado pelo autor.

$$C_A = 0.283(T_T/T) + 0.973 \quad (25)$$

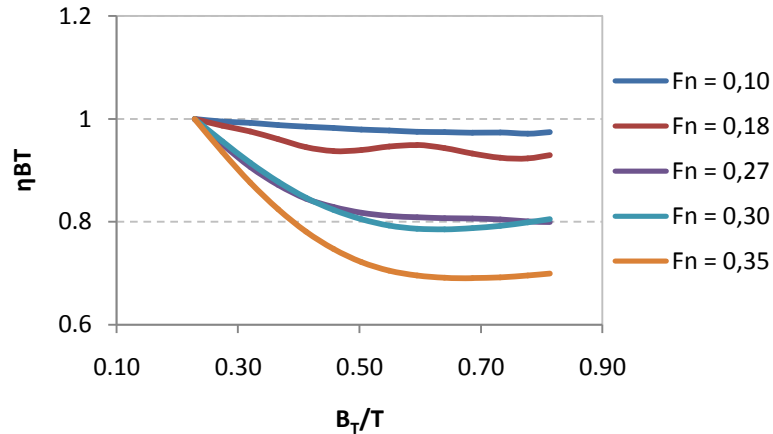
Assim, é criado o modelo matemático que contempla todos os aspectos analisados. Sintetizando, os dados de entrada são a nova relação do calado na transom pelo calado da embarcação (T_T/T), os diferentes números de Froude que se deseja estimar a nova resistência, o deslocamento e a resistência da embarcação base.

$$\eta_T = [(T_T/T)^2(9,796 F_n + 0,037) + T_T/T(-8,926 F_n + 0,036) + (0,807 F_n + 0,975)] * [(0,283 T_T/T + 0,973)] \quad (26)$$

Através do mesmo processo apresentado, é possível criar uma equação análoga para estimar a nova resistência através da variação da boca na transom. O η_B é obtido

através da divisão do C_{FT} da embarcação base pelos modelos do Estudo 4 e os resultados são apresentados na Figura 36.

Figura 36 - η_B em função de B_T/B



Fonte: Elaborado pelo autor.

O comportamento do η_B é mais complexo do que o η_T . Apesar das curvas não apresentarem tendência a um comportamento de segundo grau, aproximá-las assim mantém simplicidade nos cálculos e não gera grandes erros, visto que apenas o R^2 da curva para Froude = 0,18 ficou abaixo de 0,900, com o valor de 0,882. As equações abaixo apresentam o η_B para determinados números de Froude.

$$\eta_B = 0,093 (B_T/B)^2 - 0,143 B_T/B + 1,027 \quad (27)$$

$$\eta_B = 0,242 (B_T/B)^2 - 0,362 B_T/B + 1,064 \quad (28)$$

$$\eta_B = 0,991 (B_T/B)^2 - 1,323 B_T/B + 1,235 \quad (29)$$

$$\eta_B = 1,212 (B_T/B)^2 - 1,581 B_T/B + 1,296 \quad (30)$$

$$\eta_B = 1,580 (B_T/B)^2 - 2,218 B_T/B + 0,995 \quad (31)$$

Novamente, inserindo esses coeficientes em um novo gráfico, é possível encontrar as Eq. 30-32, que tem como objetivo unificar o η_B inserindo apenas o F_n desejado nas equações.

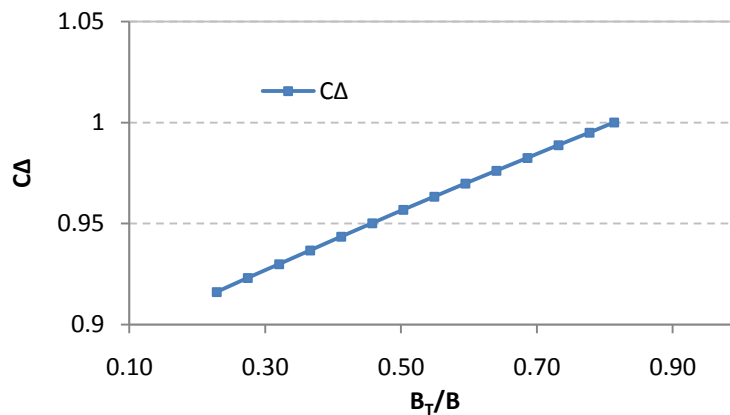
$$y = 0,394 F_n - 0,359 \quad (32)$$

$$y = -0,518 F_n + 0,449 \quad (33)$$

$$y = 0,097 F_n + 0,912 \quad (34)$$

Gera-se também uma equação para estimar o deslocamento devido as variações em B_T , apresentado na Figura 37.

Figura 37 - Incremento do deslocamento em função do aumento da boca na transom



Fonte: Elaborado pelo autor.

$$C\Delta = 0,143(B_T/B) + 0,884 \quad (35)$$

Desta forma, se obtém a forma final da Eq. 36, utilizada para estimar a variação da resistência devido à mudanças na boca da transom.

$$\eta_B = [(B_T/B)^2(0.394 F_n - 0.359) + B_T/B(-0.518 F_n + 0.449) + (0.097 F_n + 0.912)] * [(0.143 B_T/B + 0.884)] \quad (36)$$

O equacionamento para a variação da resistência em função da forma da popa transom foi criado da mesma maneira que ambos modelos anteriores, assim, apresenta-se apenas o resultado final obtido. Os gráficos e as equações obtidos no processo estão apresentados no apêndice A. O modelo matemático final para estimar a variação da forma é apresentado na Eq. 37. A nova resistência será a multiplicação da resistência da embarcação base pelos coeficientes η_T , η_B e η_{C1} .

$$\eta_{C1} = [C1(1,69 F_n - 0,272) + (-1,512 F_n + 1,227)] * [(0,115 C1 + 0,971)] \quad (37)$$

$$R_2 = R_{BASE} * \eta_T * \eta_B * \eta_{C1} \quad (38)$$

6.3 Verificação do modelo proposto

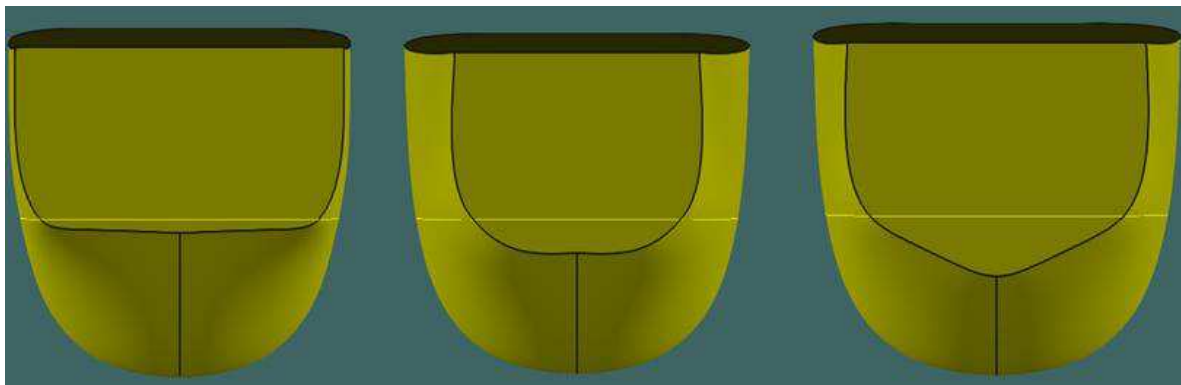
Com a obtenção de equações para estimar a resistência após modificações, se propõe a criação de alguns modelos para verificar a precisão do método proposto. A primeira etapa é a construção de um modelo para ser utilizado como base. Após isso, novos cascos são criados através de variações geométricas na popa transom. A Tabela 12 apresenta os parâmetros do casco base e dos modelos que se deseja estimar a resistência ao avanço pelo método proposto. O modelo base, o modelo 1 e o modelo 2 podem ser vistos na Figura 38.

Tabela 12 - Cascos utilizados para verificar o modelo proposto

	Modelo base	Modelo 1	Modelo 2
L (m)	77.65	77.65	77.65
B (m)	13.01	13.01	13.01
T (m)	5.51	5.51	5.50
Δ (m³)	2608	2664	2784
A_T (m²)	3.61	6.80	13.73
B_T (m)	10.58	7.73	8.92
T_T (m)	0.43	1.11	1.99
1+k	1.16	1.16	1.17
B_T/B	0.81	0.59	0.69
T_T/T	0.08	0.20	0.36
C1	1.00	1.00	0.75

Fonte: Elaborado pelo autor.

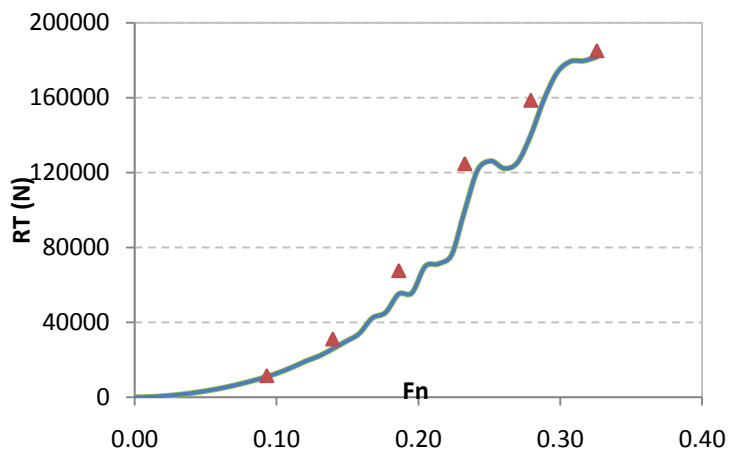
Figura 38 - Modelo Base, Modelo 1 e Modelo 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

As verificações do modelo 1 e 2 podem ser observadas na Figura 39 e na Figura 40, onde a curva contínua apresenta a resistência após as modificações geométricas prevista pelo método do *Slender Body* e a curva com marcadores apresenta os pontos estimados através do modelo proposto.

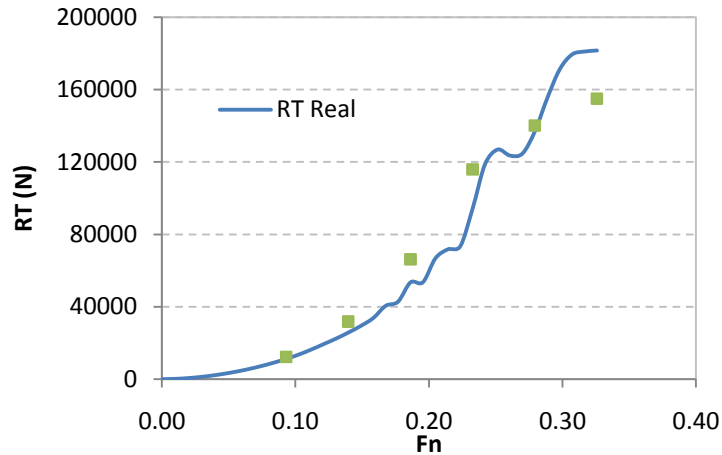
Figura 39 - Verificação do modelo 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

A equação utilizada para estimar o deslocamento apresentou 2,27% de diferença do valor obtido pelo programa no modelo 1 e 1,77% para o segundo, mostrando ser bastante precisa.

Figura 40 - Verificação do modelo 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como estas estimativas são regidas por equações de segundo grau, elas não tem a capacidade de representar perfeitamente o picos e vales advindos da resistência de onda e, para números de Froude maiores do que 0,30, a diferença começa a ficar cada vez mais acentuada. Mesmo assim, os resultados obtidos são bastante satisfatórios, visto que apresentam pouca diferença do valor calculado pelo Maxsurf.

É importante destacar que o método criado apresenta uma aplicação restrita por ter sido construído apenas para um tipo de embarcação e por não incluir variações globais no modelo. Se aperfeiçoado, pode se tornar uma forma simples e direta de obtenção de diferentes graus de influência da popa transom na resistência ao avanço.

6.4 Resultados do CFD

Os resultados apresentados são referentes aos cascos da Figura 38, utilizados para verificar o modelo de previsão de resistência proposto anteriormente. As simulações são feitas utilizando o programa STAR-CCM+. As velocidades utilizadas para construir a curva de resistência são 5 nós, 10 nós, 15 nós e 19,5 nós. Os resultados obtidos para cada modelo são apresentados na Tabela 13, Tabela 14 e Tabela 15, divididos em parcela de pressão, de fricção e resistência total.

Tabela 13 - Resistência do Modelo Base

Velocidade (nós)	Parcela Pressão (kN)	Parcela Fricção (kN)	Resistência Total (kN)
5,0	5,4	8,0	13,4
10,0	19,1	28,0	47,1
15,0	94,3	60,2	154,5
19,5	232,1	98,6	330,7

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 14 - Resistência do Modelo 1

Velocidade (nós)	Parcela Pressão (kN)	Parcela Fricção (kN)	Resistência Total (kN)
5,0	6,4	8,1	14,5
10,0	20,6	28,0	48,2
15,0	81,8	59,4	141,2
19,5	213,3	97,1	310,4

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 15 - Resistência do Modelo 2

Velocidade (nós)	Parcela Pressão (kN)	Parcela Fricção (kN)	Resistência Total (kN)
5,0	9,2	8,4	17,6
10,0	24,6	28,4	53,0
15,0	92,2	60,4	152,6
19,5	220,2	86,6	306,8

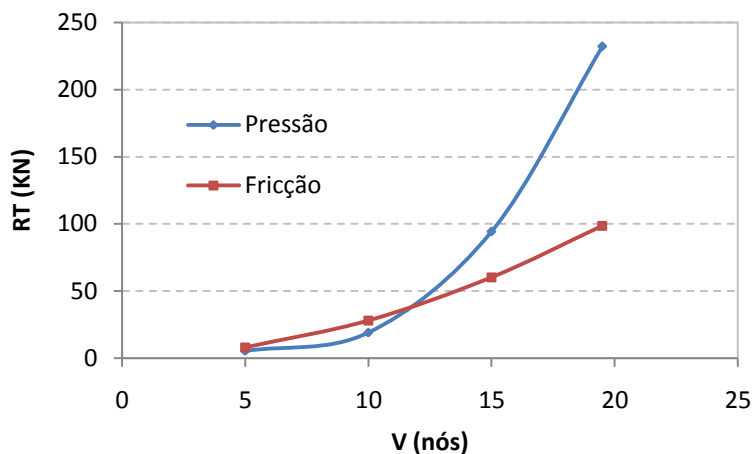
Fonte: Elaborado pelo autor.

É importante ressaltar que as simulações foram feitas em planos de simetria, logo, todos os resultados apresentados estão multiplicados por dois. Também é importante notar que em algumas simulações a quantidade de iterações não foi suficiente para obter um valor constante ao final da simulação. A forma encontrada para solucionar esse problema foi realizar uma média entre o pico e o vale da última oscilação. Esta técnica está apresentada na Figura C1 no Apêndice C.

Uma análise muito importante que pode ser feita através dos resultados é a inclinação das curvas das componentes de pressão e fricção. É possível notar, através da Figura 41, que a componente de fricção apresenta um comportamento quase linear, enquanto que a parcela de pressão cresce de maneira exponencial, se tornando predominante a partir de aproximadamente 12 nós.

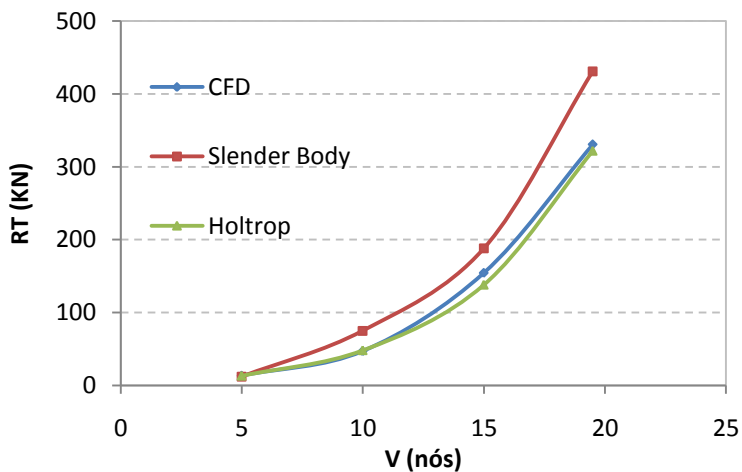
Também é possível comparar os três métodos utilizados para prever a resistência ao avanço apresentados até aqui, *SlenderBody*, Holtrop e CFD, presentes na Figura 42.

Figura 41 - Curvas de RT de pressão e fricção



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 42 - Comparação entre CFD, *SlenderBody* e Holtrop para o modelo base

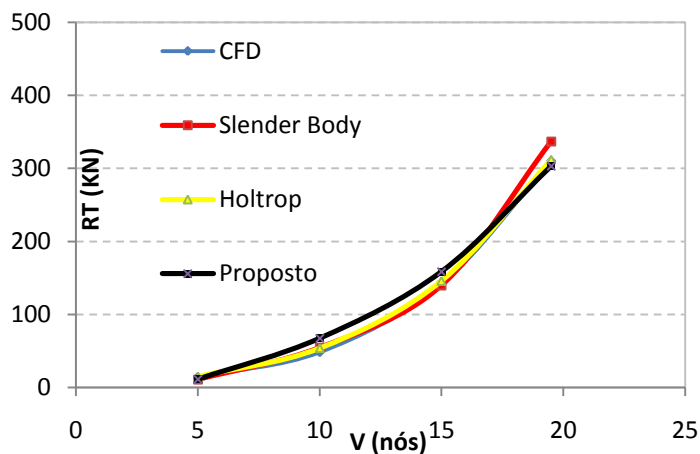


Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível observar que o método de fluidodinâmica computacional apresentou uma curva de resistência muito próxima ao método de Holtrop, com curvas praticamente sobrepostas. Já em relação ao *SlenderBody*, o CFD apresentou valores um pouco menores do que esse modelo. A diferença é de cerca de 30% na velocidade de 19,5 nós.

Na comparação do modelo 1, presente na Figura 43, os modelos apresentaram praticamente os mesmos resultados. A maior diferença foi de 8% entre o CFD e o *SlenderBody*, na velocidade de 19,5 nós.

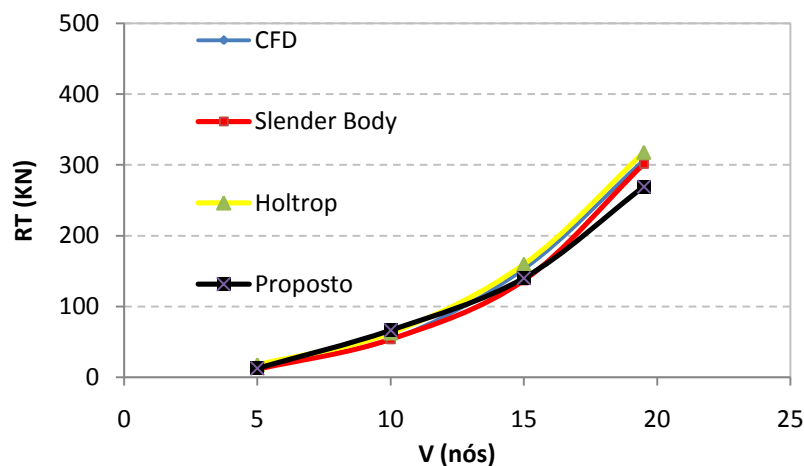
Figura 43 - Comparação entre CFD, *SlenderBody*, Holtrop e o método proposto para o modelo 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na comparação do modelo 2, apresentada na Figura 44, os modelos apresentaram novamente comportamentos bem semelhantes, com a maior diferença de 5% entre Holtrop e o *Slender Body*. A diferença das análises anteriores é que nesta comparação o *Slender Body* apresentou resultados menores do que os outros métodos, diferindo do comportamento apresentado na Figura 42.

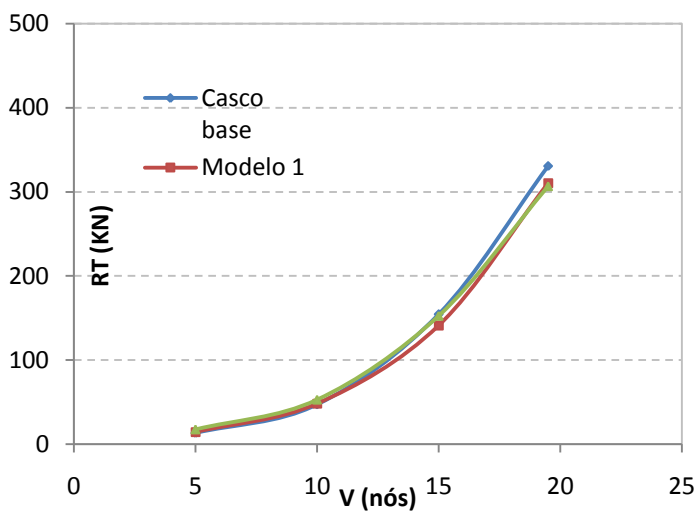
Figura 44 - Comparação entre CFD, *SlenderBody*, Holtrop e o método proposto para o modelo 2



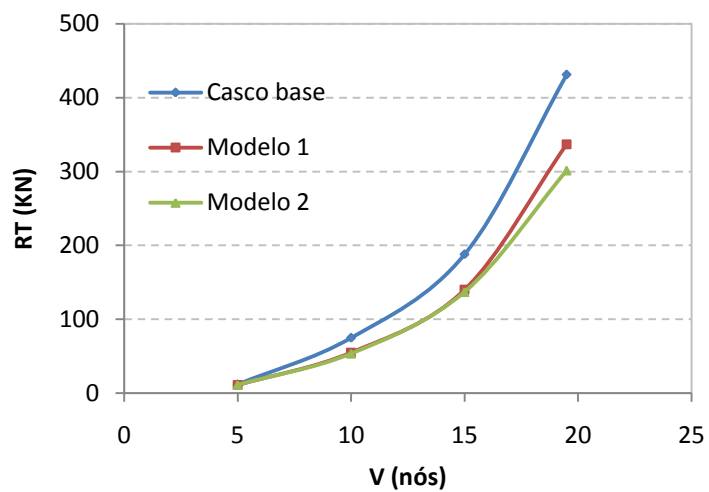
Fonte: Elaborado pelo autor.

Outra análise que pode ser realizada com os resultados obtidos, apresentada na Figura 45, é a variação detectada pelo CFD na resistência total devido à mudança nos parâmetros da popa transom. A Figura 46 apresenta a variação detectada pelo *Slender Body* e a Figura 47, por Holtrop.

Figura 45 - Variação da resistência devido à mudanças na popa transom pelo CFD

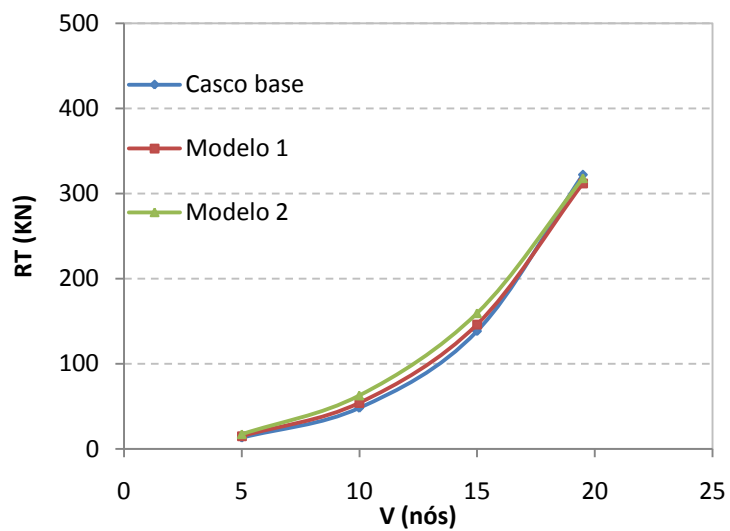


Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 46 - Variação detectada pelo método *Slender Body*

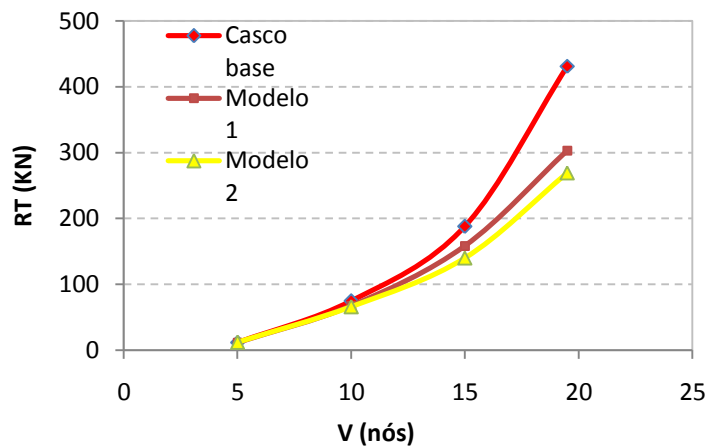
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 47 - Variação detectada pelo método de Holtrop



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 48 - Variação detectada pelo método proposto



Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível notar que as variações detectadas no *Slender Body* são maiores do que nos outros métodos. O CFD detecta melhor as diferenças em altas velocidades, pontos que são praticamente iguais nas curvas apresentadas por Holtrop.

7 CONCLUSÃO

A dificuldade em realizar ensaios experimentais e os custos associados motivam o desenvolvimento de formas alternativas para estimar a resistência ao avanço de embarcações. Diversos modelos foram criados nos últimos anos, dando flexibilidade a escolha conforme a necessidade do projetista.

Entre os métodos estudados, o modelo empírico de Holtrop se mostrou muito útil quando poucas informações são conhecidas. Por ser amplamente utilizado devido à sua precisão, foi empregado com o objetivo de checar se os resultados obtidos através do *SlenderBody* e CFD estariam próximos à seus valores.

O método *SlenderBody*, que tem como principal hipótese a consideração de fluido invíscido, mostrou resultados bastante precisos. Uma das limitações é a incapacidade de simular embarcações com a popa tipo *cruiser*. Realizou-se uma tentativa de simular um casco com a menor área de transom possível, porém, o resultado divergiu, apresentando valores cerca de duas vezes o valor obtido pelo método de Holtrop.

Outra importante característica que diferencia o *Slender Body* de modelos empíricos é sua capacidade de detectar picos e vales na resistência, auxiliando a escolha de velocidades de operações adequadas. Entretanto, quando se busca otimizar parâmetros com o objetivo de melhorar a resistência, esse método começa a perder precisão e surge a necessidade de utilizar modelos mais avançados.

O último método estudado foi o CFD, que se conduzido da maneira correta, apresenta os resultados mais precisos entre todos os métodos estudados. Para atingir esta precisão, se faz necessário estudos mais aprofundados sobre as incertezas presentes no método. É importante lembrar que a principal hipótese simplificadora adotada foi tornar o navio um corpo fixo e inserir a velocidade no fluido. Para estudos mais avançados,

recomenda-se criar um DFBI (*Dynamic Fluid Body Interaction*), tornando a embarcação um corpo que se equilibra na água.

Os objetivos estipulados no trabalho foram cumpridos, visto que os parâmetros da popa foram identificados, estudos foram realizados detectando os graus de influência de cada variável e os métodos utilizados apresentaram resultados bastante satisfatórios, com no máximo 30% de diferença entre eles.

Outro ponto importante que deve ser levantado é que o ideal seria a execução de todo o trabalho em CFD. Porém, a falta de capacidade de processamento adequada para realizar as simulações inviabiliza esta idéia.

Em relação ao modelo proposto, este se mostrou bastante coerente para predição de mudanças da forma e da geometria da popa na resistência ao avanço. Se aprimorado para mais tipos de navio e incluindo variações globais nas análises, pode se tornar uma maneira prática de estimar variações na resistência em função de mudanças da popa transom.

As principais influências detectadas nos estudos mostram que, de maneira geral, aumentar os parâmetros da transom (B_T e T_T) tendem a diminuir a resistência de ondas e aumentar a resistência de fricção. Como a resistência de ondas cresce exponencialmente, enquanto a de fricção cresce linearmente, a transom passa a ser benéfica a partir de uma determinada velocidade, sendo mais utilizada em embarcações que operam em altas velocidades.

Uma explicação para esse comportamento é que em baixas velocidades os cantos da transom causam separação no fluido, aumentando o arrasto da embarcação. Porém, em altas velocidades, o escoamento tem capacidade de seguir de maneira contínua nessa região de mudança do casco, fazendo com que a superfície livre atrás da transom atue como um corpo fictício, conhecido como *virtual lengthening*. Este corpo aumenta o comprimento do casco, reduzindo o número de Froude efetivo e atuando de maneira benéfica na resistência de ondas.

8 REFERÊNCIAS

ASHGRIZ, Nasser; MOSTAGHIMI, Javad. **An introduction to computational fluid dynamics**. Fluid flow handbook. McGraw-Hill Professional, 2002.

AZIZ, Asst Prof Dr Laith Jawad; NASRET, Maryam Taha. **Investigat Hydraulic Performance of Groins by Computational Fluid Dynamic Model**, 2014.

BASSLER, Christopher et al. **Dynamic stability of flared and tumblehome hull forms in waves**. In: Proceedings of 9th International Ship Stability Workshop, Hamburg, Germany. 2007.

BHASKARAN, Rajesh; COLLINS, Lance. **Introduction to CFD basics**. Cornell University-Sibley School of Mechanical and Aerospace Engineering, 2002.

COUSER, P. R.; WELLICOME, J. F.; MOLLAND, A. F. **An improved method for the theoretical prediction of the wave resistance of transom-stern hulls using a slender body approach**. International Shipbuilding Progress, v. 45, n. 444, p. 331-349, 1998.

EYRES, David J.; BRUCE, George J. **Ship construction**. Butterworth-Heinemann, 2012.

FONSECA, M. M. **Arte Naval**. 7. ed, Rio de Janeiro: Serviço de Documentação da Marinha, 2005.

FUNG, Siu C. **Resistance and powering prediction for transom stern hull forms during early stage ship design**.1992.

HESS, John L.; SMITH, A_M O. **Calculation of potential flow about arbitrary bodies**. Progress in Aerospace Sciences, v. 8, p. 1-138, 1967.

HOLTROP, J.; MENNEN, G. G. **An approximate power prediction method**.1982.

HOLTROP, Jan. **A statistical re-analysis of resistance and propulsion data**.International Shipbuilding Progress, v. 31, n. 363, p. 272-276, 1984.

INSEL, Mustafa; MOLLAND, A. F. **An investigation into the resistance components of high speed displacement catamarans**. 1992.

LAMB, Thomas et al. (Ed.). **Ship design and construction**. Jersey City, NJ: Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2004.

MaxSurf® **User Guide**. Bentley, 2016.

MICHELL, John Henry. XI. **The wave-resistance of a ship**. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, v. 45, n. 272, p. 106-123, 1898.

MOLLAND, Anthony F. (Ed.). **The maritime engineering reference book: a guide to ship design, construction and operation**. Elsevier, 2011.

RAMOS, A. A.; BRONNEBERG L.; TANCREDI, T. P. **Practical procedure to determine the influence of the sail in the drag resistance of submarines**. PRADS, 2004.

STAR-CCM+® **User Guide**. CD-ADAPCO, 2016.

TANCREDI, Thiago Pontin et al. **Projeto de platform supply boats baseado em otimização multiobjetivo**. Em: Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore, 25. SOBENA, 2014.

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

UEDA, R. J.; HASHIBA, R. I.; TANCREDI, T. P.; ANDRADE, B. L. R. **Análise paramétrica da resistência ao avanço de cascos de embarcações de apoio: comparação entre métodos semi-empíricos e métodos numéricos**. Em: 24º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore, 2012, Rio de Janeiro. SOBENA 2012 - 24º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore, 2012.

UEDA, R. J.; TANCREDI, T. P.; ANDRADE, B. L. R. **Application of optimization techniques and synthesis models in hierarchical design of PSV vessels**. Em: 12th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, 2013, Changwon. Proceedings of the PRADS2013. Hanrimwon Co. Ltd., Seoul: The Society of Naval Architects of Korea, 2013. v. 2. p. 687-693.

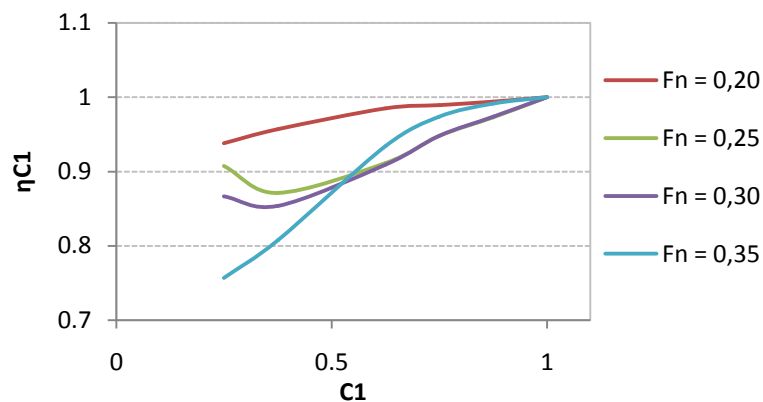
VAN MANEN, J. D.; VAN OSSANEN, P. **Principles of Naval Architecture, Second Revision, Volume II: Resistance, Propulsion, and Vibration**. Society of Naval Architects and Marine Engineers, Jersey City, New Jersey USA, 1988.

VERSTEEG, Henk Kaarle; MALALASEKERA, Weeratunge. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. Pearson Education, 2007.

WATSON, David GM. **Practical ship design**. Gulf Professional Publishing, 2002.

APÊNDICE A - Figuras e equações complementares utilizadas para criar $\eta C1$

Figura A1 - $\eta C1$ em função de $C1$



Equação A1 - $\eta C1$ para $F_n = 0,20$

$$\eta C1 = 0,081 C1 + 0,924$$

Equação A2 - $\eta C1$ para $F_n = 0,25$

$$\eta C1 = 0,147 C1 + 0,839$$

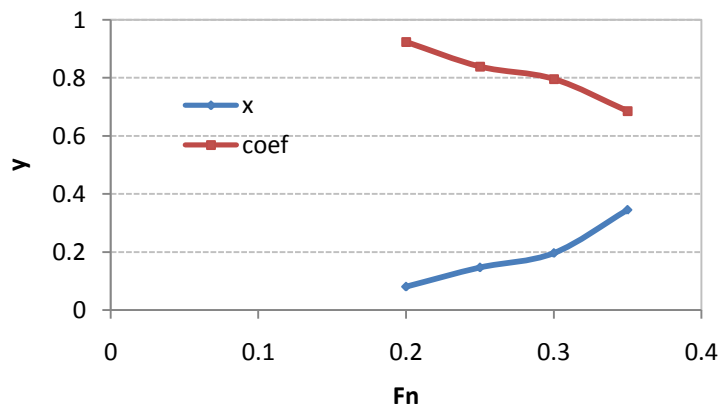
Equação A3 - $\eta C1$ para $F_n = 0,30$

$$\eta C1 = 0,197 C1 + 0,797$$

Equação A4 - $\eta C1$ para $F_n = 0,35$

$$\eta C1 = 0,346 C1 + 0,686$$

Figura A2 - Valores que acompanham o termo C1 e a constante



Equação A5 - Coeficiente do termo de primeiro grau

$$y = 1,69 Fn - 0,272$$

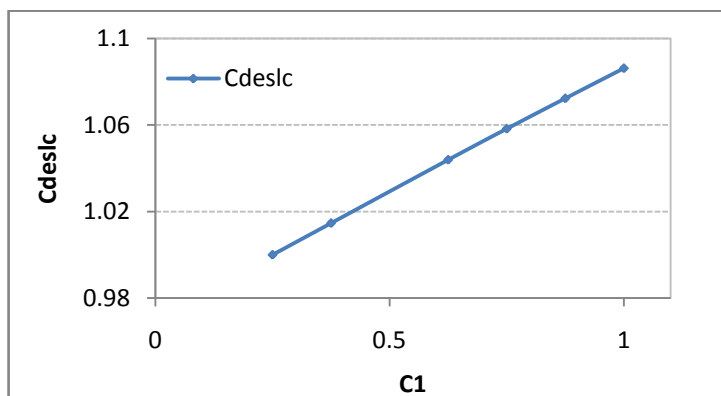
Equação A6 - Coeficiente da constante

$$y = -1,512 Fn + 1,227$$

Equação A7 - Coeficiente proposto para estimar o novo deslocamento

$$C\Delta = 0,115(C1) + 0,971$$

Figura A3 - Incremento do deslocamento em função do aumento de C1



APÊNDICE B - Figuras complementares do ambiente de simulação do STAR-CCM+

Figura B1 - Modelos físicos selecionados

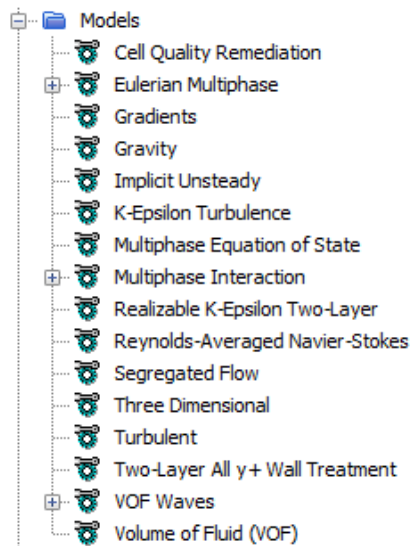
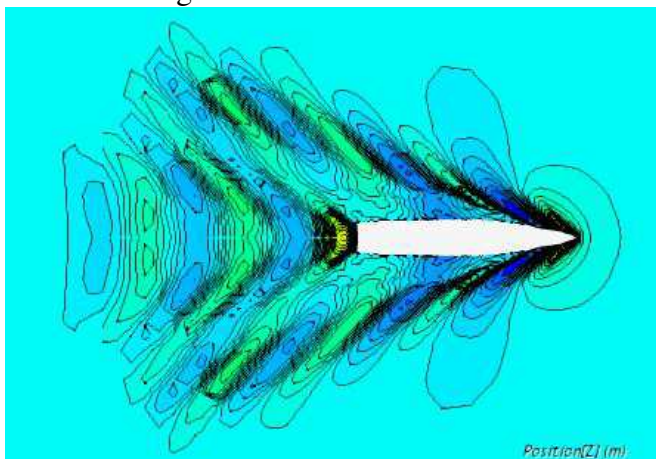


Figura B2 - Malha gerada no casco



Figura B3 - Padrão de ondas



APÊNDICE C - Resultados Complementares

Figura C1 - Técnica utilizada para aproximar resultados oscilantes

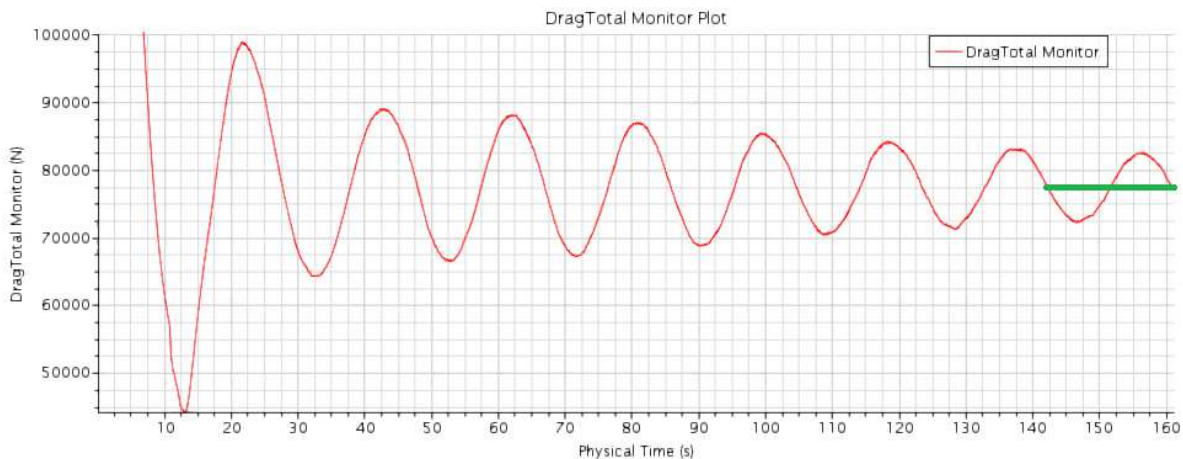


Figura C2 - Resultado da resistência total obtida para o casco base na velocidade de 10 nós

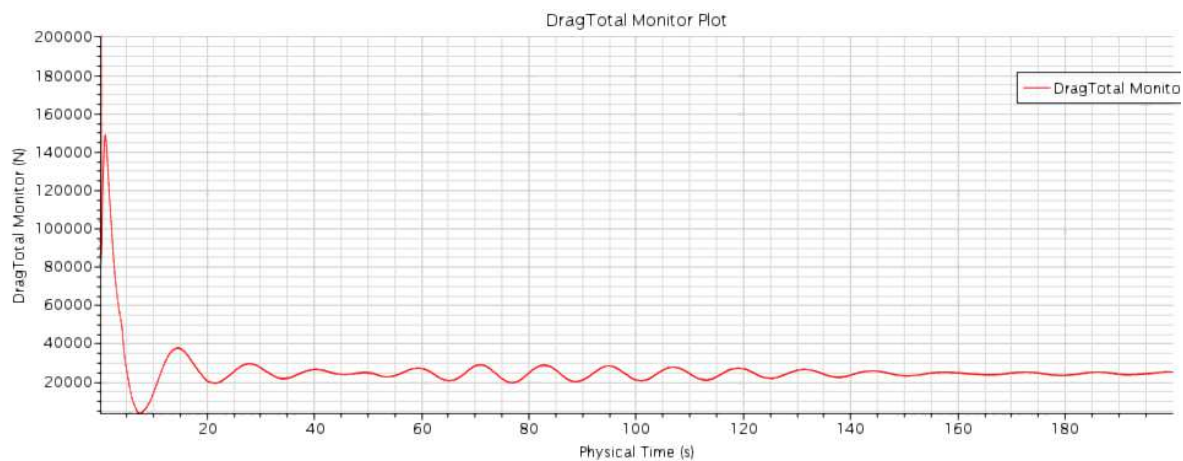


Figura C 3 - Resultados parcelas de resistência obtidas para o casco base em 10 nós

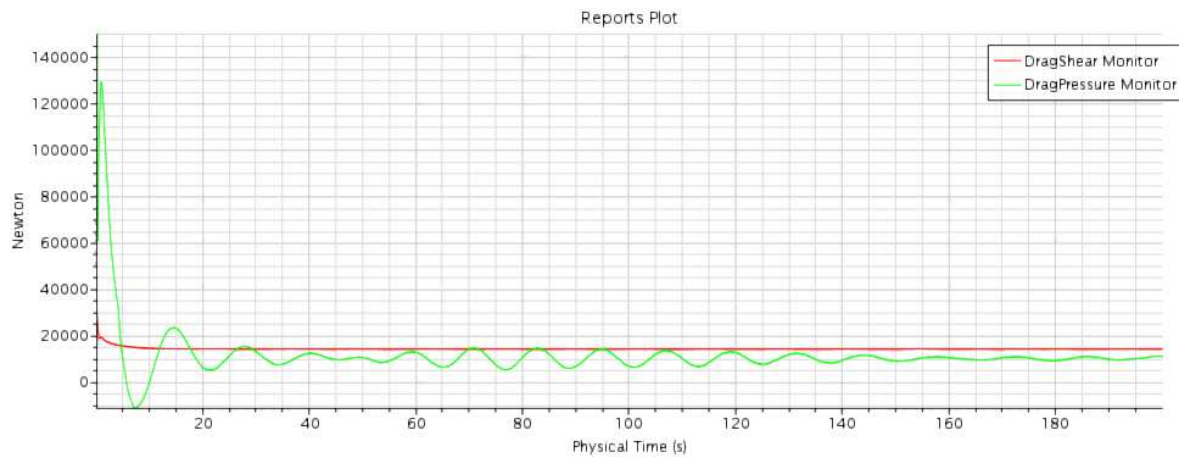
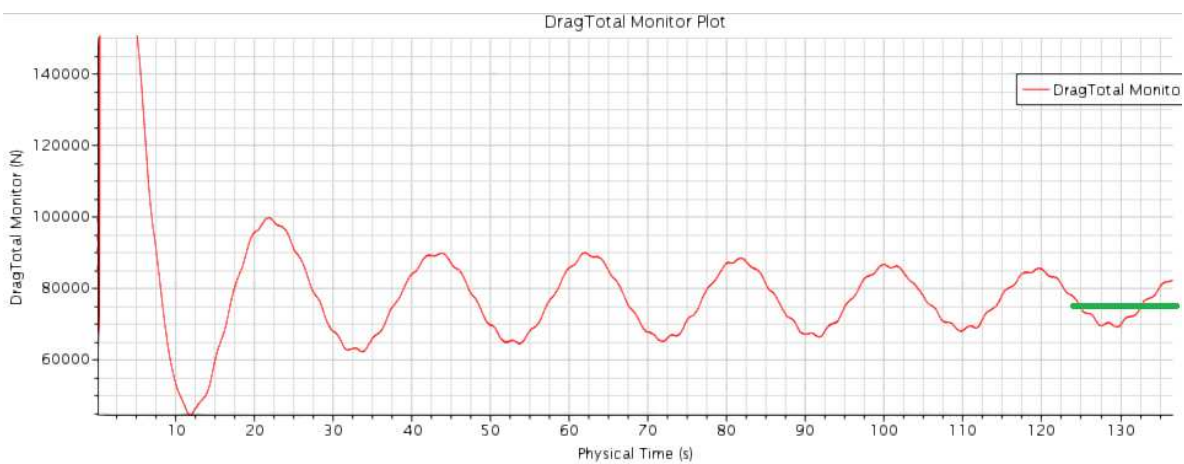
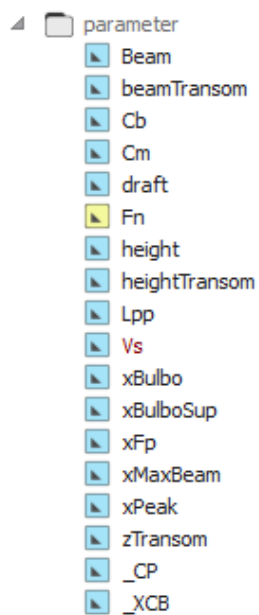


Figura C 4 - Resultado da resistência total no modelo 2 em 15 nós



Apêndice D - Figuras complementares da construção do casco.

Figura D1 - Parâmetros principais criados



Fonte: UEDA (2012).

Figura D2 - União da curva da quilha e *stem*, resultando na curva CPC



Fonte: UEDA (2012).

Figura D3 - Vista superior da curva da linha d'água



Fonte: UEDA (2012).

Figura D4 - Cascos gerados para o ESTUDO 5

