

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE ENGENHARIA DA MOBILIDADE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA NAVAL**

GUILHERME MARIN

**ESTUDO PARAMÉTRICO DE RESISTÊNCIA AO AVANÇO DE UMA
EMBARCAÇÃO DE PLANEIO: ANÁLISE MÉTODO DE SAVITSKY**

**Joinville
2015.**

Guilherme Marin

**ESTUDO PARAMÉTRICO DE RESISTÊNCIA AO AVANÇO DE UMA
EMBARCAÇÃO DE PLANEIO: ANÁLISE MÉTODO DE SAVITSKY**

Trabalho apresentado como requisito parcial para obtenção de aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso, no Curso de Engenharia Naval, na Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: PhD. Thiago Pontin Tancredi.

**Joinville
2015.**

Marin, Guilherme

ESTUDO PARAMÉTRICO DE RESISTÊNCIA AO AVANÇO DE UMA
EMBARCAÇÃO DE PLANEIO: ANÁLISE MÉTODO DE SAVITSKY /
Guilherme Marin ; orientador, Thiago Pontin Tancredi -
Joinville, SC, 2015.

79 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville.
Graduação em Engenharia Naval.

Inclui referências

1. Engenharia Naval. 2. Embarcações de Planeio. 3.
Método de Savitsky. 4. Resistência ao Avanço. 5. Análise
Paramétrica. I. Pontin Tancredi, Thiago . II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Naval.
III. Título.

Guilherme Marin

**ESTUDO PARAMÉTRICO DE RESISTÊNCIA AO AVANÇO DE UMA
EMBARCAÇÃO DE PLANEIO: ANÁLISE MÉTODO DE SAVITSKY**

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Naval e aprovado em sua forma final pela comissão examinadora e pelo curso de graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof. Thiago Pontin Tancredi, Phd. Eng.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Thiago Pontin Tancredi, Phd. Eng.
Orientador

Prof. Lucas Weihmann, Dr. Eng.

Prof. Luiz Eduardo Bueno Minioli.

À minha família e aos amigos por confiarem em mim.

AGRADECIMENTOS

À minha família por todo apoio e suporte, desde o início, nessa nova etapa na minha vida que foi a graduação.

À Universidade Federal de Santa Catarina que me proporcionou um ambiente de aprendizado, novas experiências e conhecimento.

Aos amigos que fiz ao longo desses anos e compartilhei inesquecíveis experiências e que me apoiaram não só nos estudos, mas também na vida pessoal.

A todos os Professores que me capacitaram para desenvolver um trabalho de conclusão de curso e para vida profissional.

Ao meu orientador, Thiago, que sempre me motivou, alertou sobre as responsabilidades e o mais importante, compartilhou seu tempo e conhecimento para que eu realizasse conclusão desse trabalho.

“Se algo não é obviamente impossível, então deve haver uma maneira de fazer.” (Nicholas Winton.)

RESUMO

William Froude iniciou as pesquisas da predição da resistência ao avanço em 1870. Suas publicações motivaram o estudo da resistência, e a partir de 1900 diversos artigos foram publicados. Dessa forma, estudos de métodos para estimativa da resistência ao avanço de cascos deslocantes e planantes tiveram início. Embarcações planantes são associadas a um elevado número de Froude, ou seja, embarcações que desempenham altas velocidades em relação ao seu comprimento. A navegação em altas velocidades, de maneira geral, está associada a um alto consumo de combustível, conseqüentemente, uma possível redução na resistência possibilita navegar com velocidades mais elevadas com uma mesma motorização ou permite, para a mesma velocidade, uma redução nos custos operacionais ou então, uma maior autonomia. O presente trabalho inicia com uma revisão bibliográfica sobre a resistência ao avanço, para determinar os principais parâmetros que influenciam na resistência de uma embarcação planante, para, na seqüência, quantificar a influência desses parâmetros através da implementação do Método de Savitsky em uma planilha do Excel. A análise da influência dos parâmetros ocorre por meio de uma variação paramétrica sistemática, utilizando uma embarcação de 26 pés como base. Essa análise possibilita a futuros projetistas, ainda na fase de projeto de uma embarcação planante, modificar as linhas do casco garantindo o desempenho desejado e o não desenvolvimento de *porpoising*. Os resultados obtidos assim como as possíveis variações dos parâmetros que mais influenciam na resistência do avanço serão amplamente discutidos no decorrer do trabalho.

Palavras Chave: Embarcações Planantes, Resistência ao Avanço, Método de Savitsky, Análise Paramétrica.

ABSTRACT

William Froude Began research of resistance prediction in 1870. His publications motivated the research of resistance and after 1900 several articles were published. Thus studies of methods to estimate the resistance of displacements and planing hulls began. Planing vessels are associated with a high Froude number, i.e., high-speed vessels. The navigation at high speeds, generally, is associated with high fuel consumption; hence a possible reduction in resistance enables sailing with higher speeds or with a same motorization allows a reduction in power causing a reduction in operating costs or greater autonomy. This work begins with a thorough literature review on the resistance, to determine the main parameters that influence the strength of a vessel to planning, followed by a quantification of the influence of these parameters through the implementation of Savitsky method in an Excel spreadsheet. Parameter influence analysis is performed by a predetermined systematic parametric variation of parameters using a boat of 26 feet as a base. This analysis allows changes still in the design phase of planning boats to the hull line optimization and compliance with the requirements and design constraints, such as the safety and structural integrity of the vessel ensuring no development of *porpoising*. The results as well as their possible variations of the parameters that most influence on the running resistance are widely discussed in the course of work.

Keywords: Savitsky, Planning Hulls, Parametric Variation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Faixa típicas de número de Froudes: cascos de planeio e deslocantes	19
Figura 2 - Padrões de Onda e Esteira	20
Figura 3 - Principais Linhas de um Casco Planante	21
Figura 4 - Schaefer 830 Fly	22
Figura 5 - Casco em formato "V"	22
Figura 6 - Principais dimensões da embarcação	23
Figura 7 - Sistema Propulsivo	24
Figura 8 - Estabilizadores	24
Figura 9 - Principais dimensões dos componentes do sistema propulsivo.....	25
Figura 10 - Formação de Onda em uma Placa Plana sem ângulo de <i>Deadrise</i>	27
Figura 11 - Típica Distribuição de Pressão em uma Placa Plana	28
Figura 12 - Deslocamento do fluido ao longo de uma Placa, vista inferior.	29
Figura 13 - Coeficiente de sustentação para <i>deadrise</i> 0°	31
Figura 14 - Coeficiente de Sustentação para baixos valores de C_v	32
Figura 15 - Fluido Invíscido	33
Figura 16 - Fluido Viscoso	33
Figura 17 - Placa com Formato em "V"	35
Figura 18 - Regiões Placas com Ângulo de <i>Deadrise</i>	35
Figura 19 - Representação Ângulo de <i>Trim</i>	36
Figura 20 - Variação razão arrasto-sustentação pelo coeficiente de velocidade	40
Figura 21 - <i>Porpoising</i> limites para barcos planantes	42
Figura 22 - Dados de Entrada.....	47
Figura 23 - Dados de Entrada.....	48
Figura 24 - Influência da Velocidade	49
Figura 25 - Influência da Boca	50
Figura 26- Influência do Deslocamento	51
Figura 27 - Influência Centro Longitudinal de Gravidade	52
Figura 28 - Influência Ângulo de <i>Deadrise</i>	52
Figura 29 - Potência efetiva em função da velocidade. (Santos, 2014)	54
Figura 30 - Potência efetiva em função da velocidade.....	55
Figura 31 – Casco utilizado como base	56
Figura 32 - Variação da razão arrasto-sustentação: ângulo de <i>deadrise</i> de 17,26°	59
Figura 33 - Variação da razão arrasto-sustentação: boca de 8.61 pés.	60
Figura 34 - Potência Efetiva para Diferentes Deslocamentos	61
Figura 35 - Potência x <i>Deadrise</i> para diferentes LCG	62
Figura 36 - Potência x Velocidade para Diferentes LCG.....	63
Figura 37 - Limites de <i>Porpoising</i>	64
Figura 38 - Representação Simplificada Sistema Propulsivo.	14

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficientes adimensionais usados no Modelo de Savitsky.....	26
Tabela 2 - Dados de Entrada Casco.....	43
Tabela 3 - Dados Entrada Casaria	44
Tabela 4 - Dados de Entrada Estabilizadores	44
Tabela 5 - Dados de Entrada Leme	45
Tabela 6 - Dados de Entrada Eixo.....	45
Tabela 7 - Dados de Entrada Pé de Galinha	46
Tabela 8 - Faixa de Aplicação	48
Tabela 9 - Dados utilizados por Santos (2014)	54
Tabela 10 - Comparação dos Resultados	55
Tabela 11 - Dados Embarcação Base	57
Tabela 13 - Condições de Carga.....	60

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIACÕES E COEFICIENTES

As	Área total da região de <i>spray</i>
Ass	Área fronta superestrutura ($B_{ss} \times H_{ss}$)
A_{leme}	Área plana do leme
A_{mancal}	Área plana do pé de galinha
B	Boca medida entre as quinas principais
B_{ss}	Boca superestrutura
B_{max}	Boca moldada máxima da embarcação
c_{f_{est}}	Corda dos estabilizadores
C_f	Coefficiente de arrasto de fricção
CG	Centro de Gravidade
C_{leme}	Corda do leme: média aritmética entre C ₁ e C ₂
C_{mancal}	Corda do pé de galinha: média aritmética de C ₁ e C ₂
C_{L0}	Coefficiente de sustentação (ângulo de <i>deadrise</i> zero)
C_{Lβ}	Coefficiente de sustentação (ângulo de <i>deadrise</i> β)
C_{Ld}	Coefficiente de sustentação dinâmico
C_p	Distância entre o centro de pressão medido na quilha, avante da popa transom
C_v	Coefficiente de Velocidade
d	Profundidade do bordo de fuga abaixo do nível da água no teste de planeio
D	Arrasto Total
D/Δ	Razão Arrasto/Sustentação
D_p	Arrasto devido as forças de pressão
D_f	Arrasto devido ao atrito
f	Distância entre a linha de operação do propulsor até o VCG
h	Imersão da popa transom
H_{ss}	Altura superestrutura
LCG	Centro longitudinal de gravidade em relação à quina da quilha na popa
LOA	Comprimento total da embarcação
L_c	Comprimento molhado até a quina principal
l_{eixo}	Comprimento do eixo e do cubo;
L_k	Comprimento molhado até a quilha
L_{WL}	Comprimento linha d'água estática
L₀₍	Distância até meia nau
P_E	Potência Efetiva
P_D	Potência entregue
p_d	Pressão dinâmica média
P_i	Potência instalada
QPC	Coefficiente quasi-propulsive
P_T	Potência propulsiva
R_A	Resistência de correlação navio-modelo
R_{APP}	Resistência de apêndice
R_B	Resistência adicional de pressão devido ao bulbo próximo a superfície da água

Re	Número de Reynolds
R_T	Resistência total
R_{TR}	Resistência adicional de pressão devido à imersão da popa transom
R_W	Resistência de onda
R_F	Resistência friccional
T	Empuxo
t_{leme}	Espessura máxima do leme
t_{mancal}	Espessura do pé de galinha
V	Velocidade
V_A	Velocidade de avanço
VCG	Centro vertical de gravidade em relação a quilha
V₁	Velocidade no fundo da superfície
x_{c(eixo)}, y_{c(eixo)}	Centroide de área: coordenada do centro de área do eixo e cubo, medidos a partir da quina da quilha e da popa transom (+ avante, + para cima)
x_{c(leme)}, y_{c(leme)}	Centroide da área: é o centro de área do leme, medido da quina da quilha com a popa transom (+ avante, + para cima)
x_{c(manca)}, y_{c(manca)}	Centroide de área: coordenada do centro de área do pé, medidos a partir da quina da quilha e da popa transom (+ avante, + para cima)
Z	Pontal moldado da embarcação (excluindo a superestrutura)
(1+k)	Fator de forma
β	Ângulo de <i>deadrise</i>
β_T	Ângulo de <i>deadrise</i> na popa transom
β_{0c}	Ângulo de <i>deadrise</i> a meia nau
Δ	Deslocamento
Δ_d	Carregamento dinâmico
η_T	Eficiência transmissão
η_D	Coefficiente quasi-propulsive
θ	Ângulo entre a quilha e a quina principal
ε	Ângulo entre a quilha e a linha de operação do propulsor
τ	Ângulo de <i>trim</i> : ângulo entre a linha d'água e a quilha
σ_{est}	Razão de aspecto: razão entre o comprimento dos estabilizadores e a boca do navio
δ_{est}	Ângulo de deflexão
Φ_{eixo}	Diâmetro do eixo
λ	Razão comprimento-boca molhada
λ₁	Razão comprimento-boca molhada baseada na região de águas não perturbadas
ρ	Densidade da água
γ	Relação (L _k – L _c)/b
φ	Ângulo entre a quilha e a linha limite da região de <i>spray</i> e a região seca

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	15
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1 Histórico.....	16
2.2 Métodos para Estimativa da Resistência ao Avanço.....	17
2.4 Resistência: Conceito Geral.....	19
2.5 Caracterização de Embarcações Planantes.....	21
2.5.1 Casaria.....	21
2.5.2 Casco.....	22
2.5.3 Sistema Propulsivo.....	24
2.6 Método de Savitsky.....	26
2.6.1 Método de Savitsky: Placas Planas.....	27
2.6.2 Método de Savitsky: Placas Planantes com ângulo de <i>Deadrise</i>	34
DESENVOLVIMENTO.....	43
3.1 Dados de Entrada.....	43
3.1.1 Casco.....	43
3.1.2 Casaria.....	44
3.1.3 Sistema Propulsivo.....	44
3.2 Influência dos Dados de Entrada.....	46
3.3 Validação.....	53
ANÁLISE PARAMÉTRICA.....	56
4.1 Boca e Ângulo de <i>Deadrise</i>	58
4.2 Calado.....	60
4.3 LCG e Ângulo de <i>Deadrise</i>	61
4.4 Análise de <i>Porpoising</i>	63
CONCLUSÃO.....	65
REFERÊNCIAS.....	66

INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, o projeto de uma embarcação de alta velocidade é realizado de maneira iterativa e sequencial, buscando atender aos requisitos e restrições do projeto. Em geral, neste tipo de embarcação, busca-se um equilíbrio entre requisitos conflitantes para projetos navais, tais como conforto, tecnologia e desempenho. Visto que atributos como conforto, segurança e integridade estrutural são inversamente proporcionais à velocidade e à aceleração desenvolvidas pela embarcação (Humberto, 2012). É importante observar que o conforto e a integridade estrutural da embarcação também dependem da não ocorrência de cavitação e *porpoising*.

A relação velocidade e potência de uma embarcação são indispensáveis desde a fase de projeto até a operação, pois estão diretamente associadas ao custo da embarcação. O custo inicial da motorização instalada é seguido pelo custo de manutenção e de operação, principalmente combustível, o qual está diretamente relacionada com a potência (BLOUNT, 1976). Portanto, a redução na potência tem impacto direto no consumo de combustível, o que pode diminuir significativamente os custos operacionais da embarcação ou aumentar sua autonomia. Por outro lado, mantida a mesma motorização, a lancha pode atingir velocidades mais elevadas, um dos principais requisitos desejados neste tipo de embarcação.

A redução da potência instalada está diretamente associada à redução da resistência ao avanço do casco da embarcação. Os primeiros estudos sobre resistência ao avanço foram desenvolvidos por Froude em 1870 a partir de ensaios com modelos em escala reduzida.

Radojic divide a determinação da resistência em três maneiras: ensaios com modelos em escala reduzida, equações empíricas (Holtrop, van Oortmerssen, Savitsky, etc.) e o uso de séries sistemáticas. Atualmente, com o desenvolvimento dos recursos computacionais, o uso de métodos de simulação (CFD) na determinação da resistência ao avanço, tem se intensificado.

O presente trabalho estuda a aplicação do método de Savitsky em embarcações planantes. Inicia-se com uma revisão bibliográfica sobre resistência ao avanço, com um apanhado histórico desde os primeiros estudos realizados por Froude até a aplicação das formulações mais recentes do método de Savitsky. Para uma melhor compreensão do método de Savitsky é realizada uma extensa fundamentação teórica acerca deste modelo empírico. A aplicação do método é efetuada por meio de uma planilha Excel, com a qual é realizada uma análise paramétrica para avaliação da influência dos parâmetros de projeto na resistência ao avanço da embarcação. Desta maneira, definem-se os seguintes objetivos:

- Definição dos principais parâmetros de projeto de um casco planante;
- Verificação e validação do método empregado na planilha do Excel;
- Quantificar e qualificar as influências dos parâmetros na resistência ao avanço;
- Analisar a influência dos parâmetros no *porpoising*.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma das etapas do projeto de uma embarcação é a determinação da potência a ser instalada visando, alcançar os requisitos de desempenho e a autonomia do projeto. Os desafios dessa fase do projeto iniciam-se com a determinação da resistência ao avanço do casco, considerando-se diferentes velocidades de operação.

A determinação dessa resistência para diferentes velocidades de avanço pode envolver a utilização de técnicas experimentais, métodos numéricos, analíticos e empíricos. Em geral, essas análises envolvem considerações teóricas acerca do comportamento hidrodinâmico da embarcação, originado da interação casco-fluido.

Neste capítulo serão apresentados os fundamentos teóricos acerca da resistência ao avanço de embarcações, discutindo os principais artigos sobre o assunto; finalizando com a caracterização das principais características de uma embarcação de recreio.

2.1 Histórico

Os primeiros estudos acerca da predição da resistência ao avanço e à potência de embarcações datam de 1870, desenvolvidos por W. Froude. Até então pouco se sabia sobre a resistência ao avanço; e o conhecimento existente sobre a potência requerida era limitado.

Com a utilização de ensaios com modelos em escala reduzida, Froude percebeu que as ondas geradas para cascos com formas geométricas semelhantes, apresentaram padrões similares para determinadas velocidades. Com base nisso, ele propôs que a resistência total na embarcação fosse dividida em duas parcelas, uma predominante devido às ondas geradas pelo deslocamento do casco e outra devido à interação viscosa da superfície do casco com o fluido.

Seguindo em seus estudos, nos anos de 1872 e 1874, Froude publicou dois artigos sobre estimativas da resistência causadas pelo atrito para placas planas com diferentes níveis de rugosidade superficial. Em 1874, em outra publicação, ele validou suas hipóteses analisando os resultados do navio HMS Greyhound sendo rebocado por outra embarcação. Já em 1877, ele apresenta detalhada explicação sobre resistência de ondas, consolidado sua metodologia.

As publicações de Froude despertaram interesse no estudo da resistência ao avanço, e, a partir de 1900, diversos artigos foram publicados. Entre as publicações que discutiam os estudos de Froude, citam-se Stanton, 1912, e Kent, 1924, que incluíam os efeitos na mudança de casco e condições de mares.

Além dos estudos que envolveram métodos de estimativa da resistência ao avanço para cascos deslocantes, estudos paralelos sobre superfícies planantes tiveram início com Baker, 1912, publicando os primeiros resultados experimentais sobre a resistência ao avanço de superfícies que desenvolviam forças de sustentação vertical. Seguindo de Baker, vieram nomes de renome que contribuíram para o estudo de cascos planantes: Sottorf e Shoemaker no ano de 1934, Sambaas em 1938, Sedov em 1947 e Locke em 1949. Essas publicações contribuíram

para a formação de uma grande base de dados de teste que descreviam características hidrodinâmicas para placas planas operando com *trim* e área molhada fixa, *deadrise* e velocidades constantes.

Embora os resultados existentes construíssem uma base de dados sobre o arrasto de placas planas com sustentação hidrodinâmica, carecia-se de modelos empíricos que pudessem descrever os resultados, relacionando as diversas variáveis do problema: sustentação hidrodinâmica, arrasto, momento de *pitching* e área molhada. Foi então que em 1947, patrocinado pela Marinha Norte Americana, o Instituto de Tecnologia Stevens, no Laboratório Davidson, publicou 16 relatórios técnicos referentes a superfícies planantes, que consideram: sustentação, arrasto, área molhada, distribuição de pressão, forças de impacto, forma de esteira, formação de *spray*, estabilidade dinâmica e superfícies planantes paralelas, todos listados no apêndice de (Savitsky, 1964).

Daniel Savitsky iniciou sua pesquisa, na área militar, estudando hidroaviões e barcos planantes, patrocinado pela Marinha Norte Americana, no laboratório Davidson do Instituto de Tecnologia de Stevens. Em 1949, junto com Korvin-Kroukovsky publicou um estudo completo sobre arrasto, sustentação e área molhada no planeio, que sintetiza esses 16 relatórios. Em 1954, dando continuidade aos estudos agora junto com Neidinger, desenvolveu formulações empíricas para variáveis paramétricas de planeio, muito além daqueles já desenvolvidos. Para então com os resultados dos estudos obtidos em com Neidinger, publicar em 1964 um trabalho que combina as características hidrodinâmicas de uma superfície prismática plana com um procedimento computacional para estimar a potência de uma embarcação. É interessante observar que já neste trabalho Savitsky preocupa-se com o não desenvolvimento de *porpoising*, durante o regime de operação de cascos planantes, assunto que será melhor detalhado ao longo deste texto.

Blount reconhece que para publicar o artigo que permite a previsão da potência de uma pequena embarcação – em que possibilita o projetista selecionar, com melhora na eficiência, as dimensões do casco, a motorização, sistema de transmissão e as hélices – foram necessárias a publicação de artigos sobre o design de pequenas embarcações com Hadler, Hubble e Du Cane e as publicações referentes à resistência ao avanço que envolve o estudo hidrodinâmico casco-fluído por Savitsky, Roper e Benen. Sem dúvida os trabalhos de Savitsky compõem os fundamentos teóricos de maior importância para o desenvolvimento deste trabalho. Porém, existem diferentes métodos para a estimativa da resistência ao avanço e serão abordados a seguir.

2.2 Métodos para Estimativa da Resistência ao Avanço

Radojic, em seu artigo de 1985, afirma que, além dos testes com modelos, a resistência pode ser determinada principalmente de outras duas maneiras: pelas equações derivadas empiricamente e pelo uso de séries sistemáticas. Radojic não incluiu em seu artigo testes em

escala real, pois ainda hoje não se realizam testes em escalas reais visando determinar características de embarcações em projeto.

Em ensaios com modelos pode-se obter a resistência ao avanço pelo método que é conhecido hoje como Método da Extrapolação. Em que um fator de escala é assegurado entre o navio e o modelo a fim de garantir três formas de semelhança, sendo elas: geométrica, cinemática e dinâmica. A semelhança geométrica é garantida por um fator de escala para as dimensões do navio, a semelhança cinemática por um fator de escala de tempo e a semelhança dinâmica, desprezando as forças viscosas, é assegurada pela igualdade do número de Froude entre o modelo e o navio.

É importante observar que a utilização de modelos requer a existência de tanques de provas para realização dos ensaios, e os testes, em sua grande maioria, são realizados sem a presença do propulsor (casco nú). As principais abordagens nessa área são de Froude e Hughes e o método mais recomendado, atualmente, é o do ITTC 1978. Ainda há o Método Geosim, que é muito importante para pesquisas, mas devido ao seu custo elevado não é utilizado em testes comerciais de rotina.

As séries sistemáticas entram, hoje, junto as análises de regressão nos chamados Métodos Estatísticos, em que são utilizados modelos com uma variação sistemática de algum parâmetro para a obtenção da curva da resistência para os diferentes modelos. A análise de regressão é derivada da série sistemática e por meio de um tratamento estatístico é possível realizar uma combinação não linear dos parâmetros e obter equações empíricas destinadas a estimatimar a resistência ao avanço de embarcações. Entre os exemplos de séries sistemáticas, citam-se: Série 60, BSRA, Série 62 e Série 63. Diversos artigos já foram publicados sobre análise de regressão, entre os principais para embarcação deslocantes ficam os trabalhos de Holtrop que será detalhado na próxima seção da revisão bibliográfica, e o de Radojic para barcos planantes. A principal dificuldade encontrada para realização de uma nova série é o alto custo envolvido na preparação dos diferentes modelos e o amplo tempo necessário na utilização do tanque de provas.

Com o desenvolvimento da tecnologia surgiu a possibilidade, não somente do cálculo da resistência por meio de métodos numéricos, mas também da visualização do comportamento do fluido e das linhas de corrente ao longo da embarcação. O principal método para análise computacional hoje é o *Computational Fluid Dynamics* (CFD) que é capaz de calcular a resistência ao avanço de embarcações considerando diferentes tipos de escoamentos. Dentre suas principais vantagens estão os aspectos de tempo, a qualidade e o custo. Pois a fácil possibilidade de realizar alterações, somada a observação de linhas de corrente ao longo do casco resultam em uma economia de custo e de tempo.

Contudo, todas essas formas de calcular a resistência são possíveis devido aos métodos empíricos, em que a partir da observação do comportamento de placas, dos modelos de muitos testes, grandes nomes como Holtrop, Compton, Fung e van Oortmerssen, para barcos deslocantes, e Savitsky, Blount, Lahtiharju e Wyman, para barcos planantes, possibilitaram a determinação da resistência ao avanço, gerando equações por meio desses ensaios.

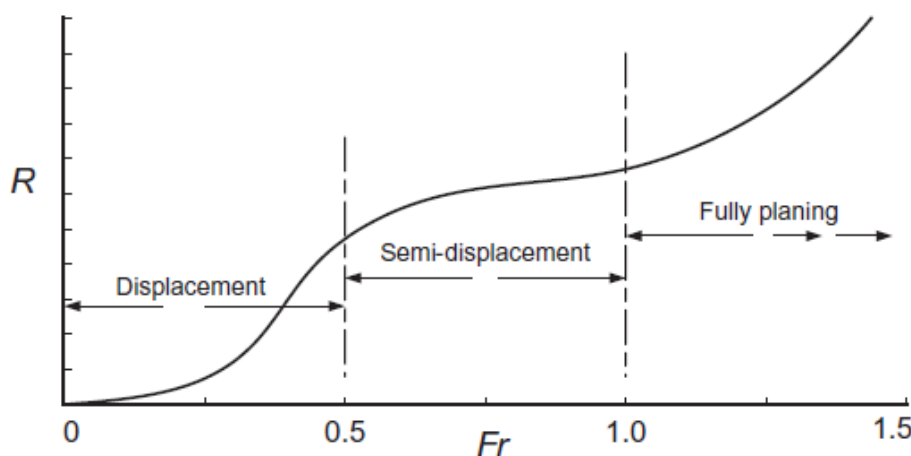
No anexo 1 é discutida a relação entre a resistência ao avanço, objeto maior do presente trabalho, e a potência instalada na embarcação.

2.3 Resistência: Conceito Geral

Em 1964, Savitsky, afirma que o conhecimento dos elementos hidrodinâmicos de uma simples superfície plana é necessário antes de se iniciar o projeto de barcos de planeio com diferentes geometrias, ou seja, antes de iniciar o método de cálculo da resistência será realizada uma revisão sobre os principais conceitos por trás da resistência ao avanço com a distinção para embarcações deslocantes e planantes.

É possível separar os diversos tipos de embarcações em três simples categorias, em função do comportamento hidrodinâmico para determinadas velocidades. A faixa aproximada de velocidade de cada uma dessas categorias é mostrada na Figura 1, sendo dividida em embarcações deslocantes, semi-deslocantes e planantes. Considerando o comportamento hidrodinâmico é possível afirmar que as deslocantes são sustentadas inteiramente por forças de flutuação, as semi-deslocantes são sustentadas por uma mistura de forças de flutuação e forças de sustentação dinâmicas, enquanto as planantes são totalmente sustentadas por forças de sustentação dinâmicas (MOLLAND, 2011).

Figura 1 - Faixa típicas de número de Froudes: cascos de planeio e deslocantes

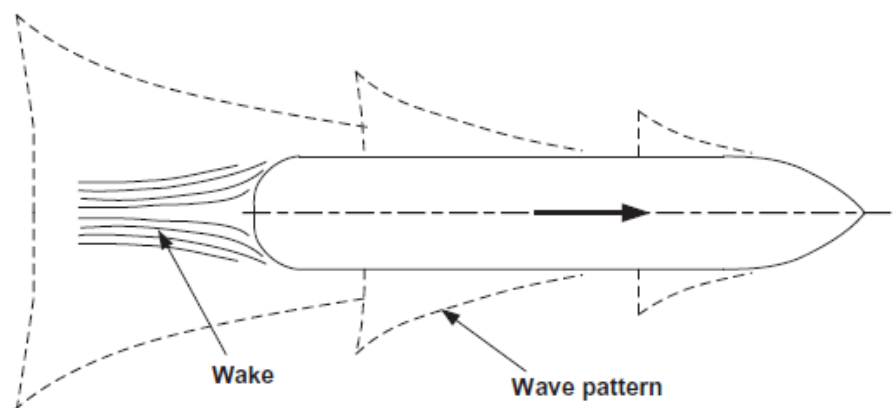


Fonte: MOLLAND, 2011.

Iniciando a compreensão dos elementos hidrodinâmicos pode-se observar na

Figura 2 que em uma embarcação em movimento, há a formação de dois padrões de fluido, um padrão de ondas se deslocando adjacentes ao casco e a formação de uma região turbulenta atrás do espelho de popa da embarcação, denominada região de esteira.

Figura 2 - Padrões de Onda e Esteira



Fonte: MOLLAND, 2011.

Molland (2011) estabelece que, devido à viscosidade do fluido, esses padrões de fluido absorvem energia do casco o que resulta em uma força que se opõem ao avanço da embarcação. Essa força é transmitida para o casco de duas maneiras: na forma de distribuição de pressão e na forma de forças cisalhantes, as quais dão, basicamente, origem às parcelas da resistência de forma e de fricção, respectivamente. A outra parcela, de ondas, não depende da viscosidade do fluido e vem da energia potencial que a onda adquire devido ao movimento da embarcação, com esse movimento a água se “empilha”, ou seja, acumula energia potencial. Essa energia potencial acumulada é transformada em energia cinética e essa variação da energia potencial dá origem à onda, que ocasiona uma resistência para a embarcação para se deslocar.

Além das principais parcelas, existem ainda outras parcelas de menor ordem. Holtrop (1984) propõe que a resistência total do navio (R_T) pode ser decomposta da seguinte maneira:

$$R_T = R_F (1 + k_1) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A$$

Onde:

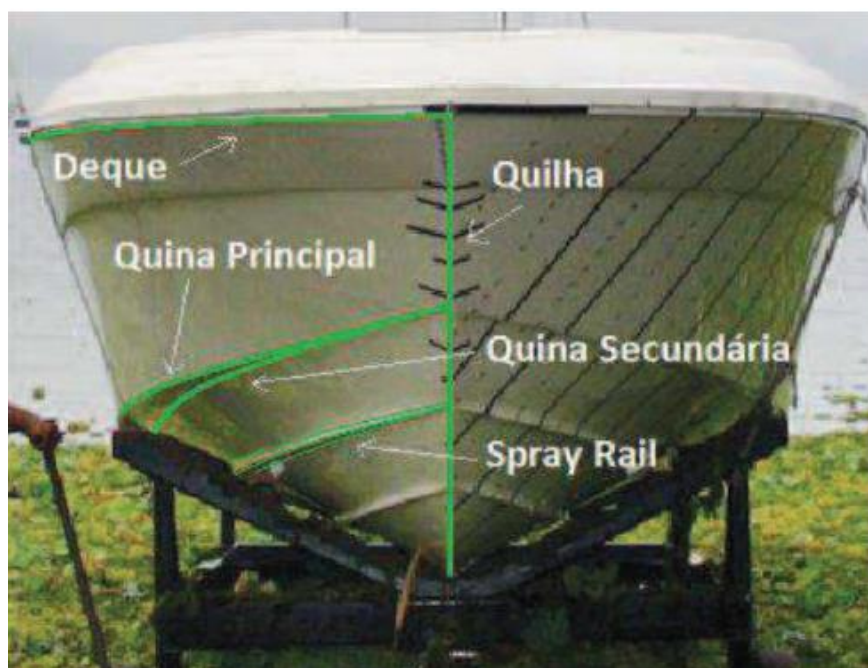
R_F	Resistência Friccional de acordo com ITTC-1957;
$(1 + k_1)$	Fator de forma do casco: relação da resistência viscosa do casco com a Resistência Friccional;
R_{APP}	Resistência de Apêndice;
R_W	Resistência de Onda;
R_B	Resistência adicional de pressão devido ao bulbo próximo a superfície da água;
R_{TR}	Resistência adicional de pressão devido à imersão da popa transom;
R_A	Resistência da correlação Navio-Modelo.

Observa-se que a determinação de cada uma dessas parcelas é obtida por equações propostas Holtrop (1984), porém, não serão abordadas, no presente trabalho, por se tratar de um desenvolvimento apenas para navios deslocantes.

2.4 Caracterização de Embarcações Planantes

Definidos os fenômenos hidrodinâmicos existentes na resistência, métodos para a estimativa e uma breve introdução sobre potência, nesta seção são definidas as principais características de uma embarcação planante. Na Figura 3 é possível observar as principais linhas do casco que definem uma embarcação de alta velocidade, sendo as medidas principais tomadas a partir da linha da quilha e quina principal.

Figura 3 - Principais Linhas de um Casco Planante



Fonte: SANTOS, 2014.

Para o desenvolvimento do trabalho a embarcação será dividida em três segmentos sendo eles: superestrutura (casaria), casco e sistema propulsivo - composto por propulsores, transmissão (eixo, pé de galinha), sistema de governo (leme) e estabilizadores.

2.4.1 Casaria

A casaria é a superestrutura para embarcações de recreio, ou seja, a construção sobre o convés principal. Tem influência na resistência do ar, por ser a parte emersa da embarcação. Normalmente a casaria é composta pela cozinha, sala comum e cabine para o piloto (*cockpit*). A casaria ainda pode conter um *flybridge*, onde é possível acomodação de passageiros e uma segunda central de comando da embarcação, ocasionando um aumento considerável na área emersa e um cuidado a mais em relação à estabilidade. No Anexo 2 é retratado o interior da casaria, e a Figura 4 apresenta uma embarcação com *flybridge*.

Figura 4 - Schaefer 830 Fly



Fonte: retirado de <http://www.schaeferyachts.com.br/lanchas/schaefer-830-fly.html>

As principais dimensões com relação à superestrutura usadas na estimativa da resistência ao avanço são:

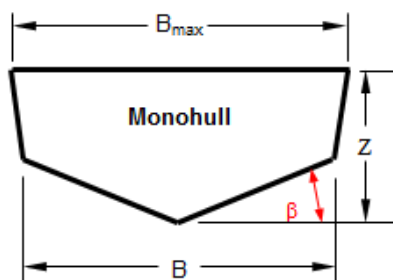
- LOA – comprimento total da embarcação;
- B_{max} – boca moldada máxima da embarcação;
- Z – pontal moldado da embarcação (excluindo a superestrutura);
- H_{ss} – altura da superestrutura;
- B_{ss} – boca da superestrutura;
- A_{ss} – área frontal da superestrutura ($B_{ss} \times H_{ss}$).

2.4.2 Casco

O casco de uma embarcação planante tem o chamado formato em “V”. A razão desse formato será mais aprofundada no desenvolvimento do trabalho. Nessa secção serão apresentados os principais parâmetros geométricos associados a esse formato.

A Figura 5 apresenta o principal ângulo que determina o formato da embarcação, destacado em vermelho, o ângulo β é chamado “ângulo de *deadrise*”. Esse ângulo varia ao longo da embarcação, sendo valores menores na popa sofrendo incrementos até a proa. O valor desse ângulo também caracteriza os locais para os quais a lancha foi desenvolvida para navegar. Valores menores (em torno de 17°) destinam-se à águas abrigadas e ângulos maiores (a partir de 19°) caracterizam embarcações destinadas à águas abertas.

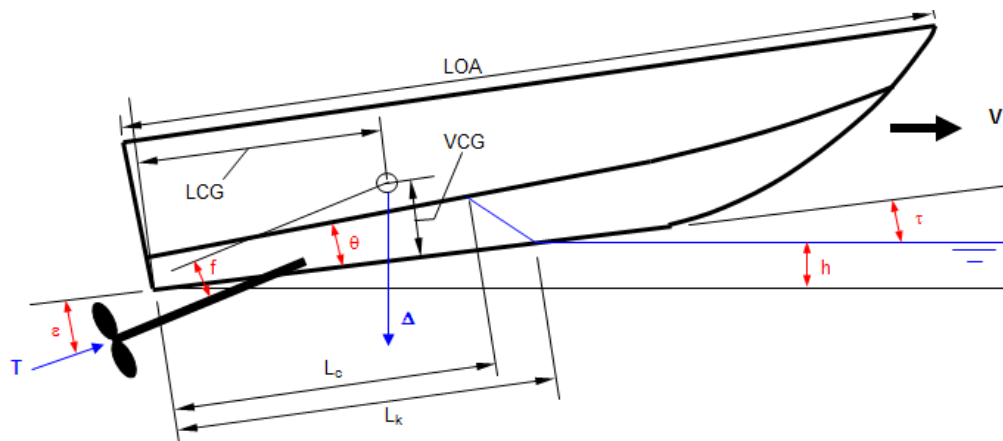
Figura 5 - Casco em formato "V"



Fonte: SAVITSKY, 1964.

A Figura 6 apresenta a vista lateral da embarcação e apresenta outro ângulo de extrema importância para uma embarcação de planeio, que é o ângulo de *trim* (τ). O ângulo de *trim* determina o ângulo em que a embarcação está inclinada, em relação à água. A variação desse ângulo influencia na navegação e estabilidade. Eventualmente esse ângulo pode ser alterado para diferentes condições de mar, visando a obtenção de um melhor desempenho. Por isso, algumas embarcações contam com um sistema auxiliar de navegação, conhecido como estabilizadores (*flaps*) que serão descritos na seção seguinte.

Figura 6 - Principais dimensões da embarcação



Fonte: SAVITSKY, 1964.

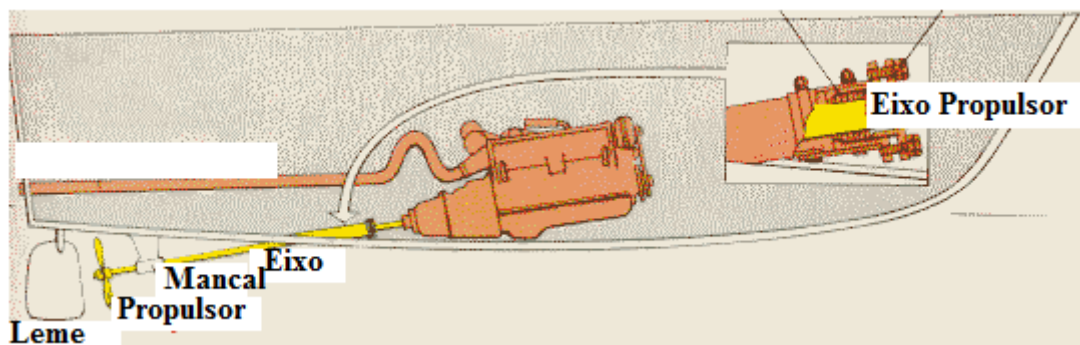
A Figura 6 apresenta também as principais dimensões e outros ângulos existentes em embarcações planantes. As definições de cada um dos ângulos e das distâncias são apresentadas a seguir:

- L_{WL} – comprimento linha d'água estática;
- B – boca medida entre as quinas principais;
- VCG – centro vertical de gravidade: distância vertical entre o centro de gravidade (CG) e a quilha;
- LCG – centro longitudinal de gravidade: distância longitudinal entre CG e a quilha na popa;
- Δ – deslocamento;
- β_T – ângulo de *deadrise* na popa transom;
- β_{0c} - ângulo de *deadrise* à meia nau;
- L_{0c} - distância até meia nau;
- L_k – comprimento molhado até a quilha;
- L_c – comprimento molhado até a quina principal
- θ – ângulo entre a quilha e a quina principal;
- ε – ângulo entre a quilha e a linha de operação do propulsor;
- f – distância entre a linha de operação do propulsor até o VCG;
- τ – ângulo de *trim*: ângulo entre a linha d'água e a quilha;
- h – imersão da popa transom.

2.4.3 Sistema Propulsivo

O sistema propulsivo de uma embarcação de recreio inclui: propulsores, estabilizadores, leme, transmissão (eixo e pé de galinha) e motorização. A Figura 7, embora não tenha geometria típica de um casco planante, apresenta a maioria dos componentes faltando apenas os estabilizadores que estão representados na Figura 8, destacados em vermelho.

Figura 7 - Sistema Propulsivo



Fonte: retirado de <http://www.pescaki.com/index.php?topic/67069-carbrasmr-bonito-26/>

Os estabilizadores, também conhecidos como *flaps*, são acessórios instalados na popa da embarcação, cuja principal função é a variação no ângulo de *trim*. Observa-se que, com os *flaps* acionados há um aumento na resistência ao avanço, que deve ser considerado. Porém, como ao ser acionado possibilita a variação no ângulo de *trim* pode-se obter uma melhor navegabilidade e uma menor resistência ao avanço, ao impedir a ocorrência da instabilidade longitudinal (*porpoising*), cujo fenômeno será discutido futuramente.

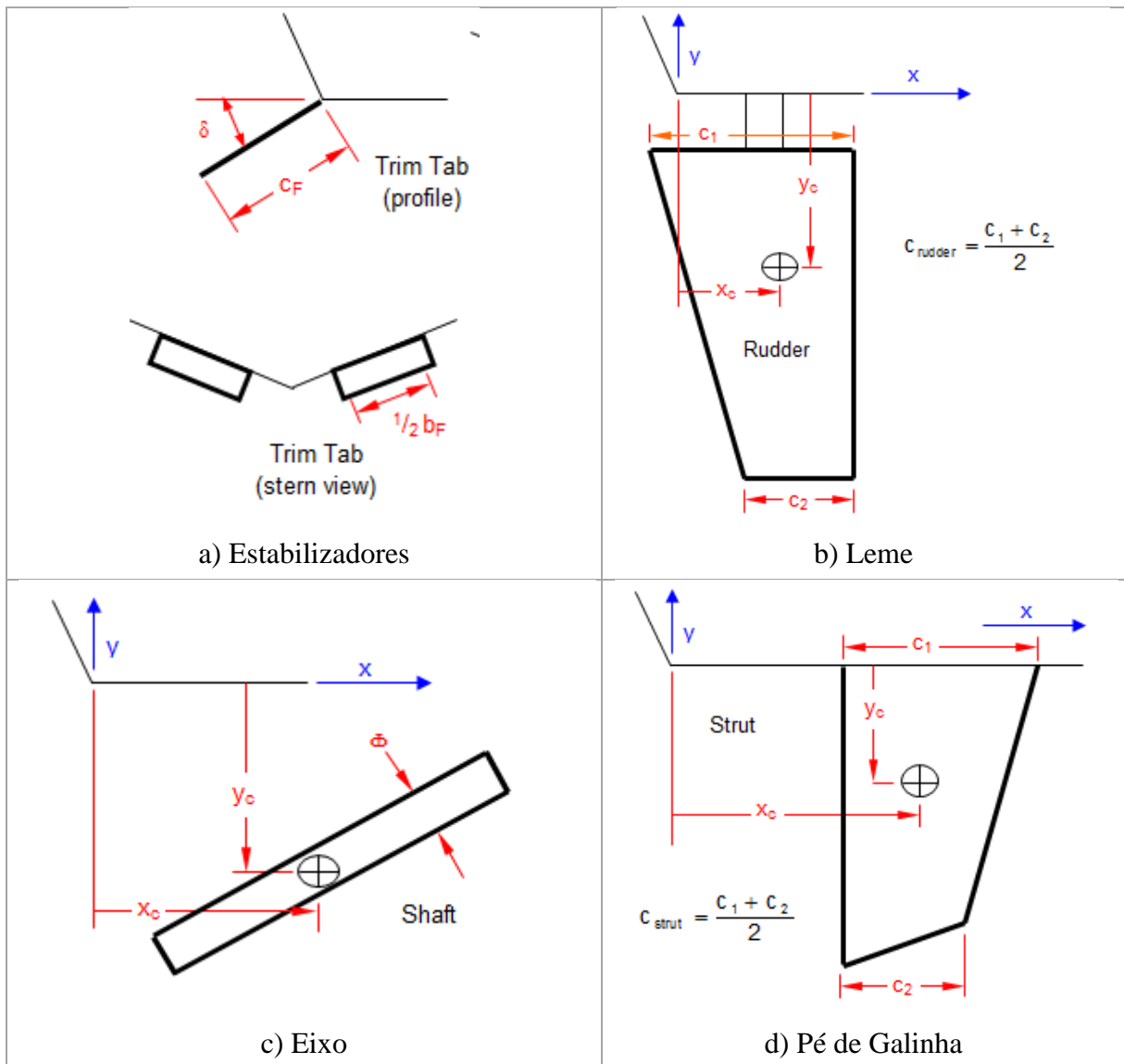
Figura 8 - Estabilizadores



Fonte: retirado de http://www.acquasea.com.br/anuncio_detalhe.php?id=17

A Figura 9 apresenta as principais dimensões necessárias para adição dos estabilizadores, do leme e do eixo na estimativa da resistência ao avanço da embarcação. Em uma embarcação de recreio pode também existir o pé de galinha (estrutura que suporta o eixo e veda a entrada de água para o interior do casco), cujas principais dimensões são mostradas na Figura 9d.

Figura 9 - Principais dimensões dos componentes do sistema propulsivo



Fonte: Própria.

Onde:

c_{est} – corda dos estabilizadores;

σ_{est} – razão de aspecto: razão entre o comprimento dos estabilizadores e a boca do navio;

δ_{est} – ângulo de deflexão.

C_{leme} – corda do leme: média aritmética entre C_1 e C_2 ;

t_{leme} – espessura máxima do leme;

A_{leme} – área plana do leme;

$x_{c(leme)}$ – posição longitudinal do centro de área do leme, medido na quilha junto à popa transom (+ avante);

$y_{c(leme)}$ – posição vertical do centro de área do leme, medido na quilha junto a popa transom (+ para cima);

Φ_{shaft} – diâmetro do eixo [m];

l – comprimento do eixo e do cubo [m];

$x_{c(\text{eixo})}$ – posição longitudinal do centro de área do eixo e cubo, medido na quina na popa transom [m] (+ avante);

$y_{c(\text{eixo})}$ – posição vertical do centro de área do eixo e cubo, medido na quina na popa transom [m] (+ para cima);

C_{strut} – corda do pé de galinha: média aritmética de C_1 e C_2 [m];

t – espessura do pé de galinha [m];

A_{strut} – área plana do pé de galinha [m²];

$x_{c(\text{pé})}$ – posição longitudinal do centro de área do pé de galinha, medido na quina na popa transom [m] (+ avante);

$y_{c(\text{pé})}$ – posição vertical do centro de área do pé de galinha, medido na quina na popa transom [m] (+ para cima).

2.5 Método de Savitsky

Caracterizados os principais componentes de uma embarcação de planeio e dando sequência à revisão bibliográfica, nesta secção são discutidas as equações de Savitsky (1964) para área molhada, sustentação, arrasto, centro de pressão e estabilidade em função do ângulo de *deadrise*, *trim* e velocidade de avanço. Inicialmente será feito o estudo em uma placa plana, e em uma segunda etapa, a aplicação para barcos de planeio.

Inicialmente, na Tabela 1 são apresentados os coeficientes de planeio utilizados no modelo de Savitsky. É imprescindível destacar que esses coeficientes são baseados na lei de Froude de similaridade e que cada símbolo utilizado está definido na secção de nomenclatura.

Tabela 1 – Coeficientes adimensionais usados no Modelo de Savitsky

Símbolo	Descrição	Equação
C_f	Coeficiente de arrasto de fricção	$C_f = \frac{D_f \times \cos \beta}{\frac{\rho}{2} \times V_1^2 \times \lambda \times b^2}$
C_{L0}	Coeficiente de Sustentação, ângulo de <i>deadrise</i> zero	$C_{L0} = \frac{\nabla}{\frac{\rho}{2} \times V^2 \times b^2}$
$C_{L\beta}$	Coeficiente de Sustentação, <i>deadrise</i> β	$C_{L\beta} = \frac{\nabla}{\frac{\rho}{2} \times V^2 \times b^2}$
C_p	Distância entre o centro de pressão medido ao longo da quilha avante da popa transom	$C_p = \frac{l_p}{\lambda \times b}$
C_v	Coeficiente de Velocidade – Adaptação do número de Froude para embarcações planantes	$C_v = \frac{V}{(g \times b)^{1/2}}$
Re	Número de Reynolds – Adaptação do número de Reynolds para embarcações planantes	$Re = \frac{V\lambda B}{\nu}$

É importante ressaltar que, conforme visto na Tabela 1, a boca é a principal dimensão que adimensionaliza os coeficientes de planeio, diferentemente de barcos deslocantes, onde usualmente utiliza-se o comprimento. O motivo para essa consideração se dá em razão que, para barcos planantes o comprimento molhado varia, conforme o *trim*, o carregamento e a velocidade do barco, enquanto que a boca permanece aproximadamente constante. Além disso, afirma Savitsky, é possível variar o comprimento de um barco planante sem alterar as características hidrodinâmicas para altas velocidades.

2.5.1 Método de Savitsky: Placas Planas

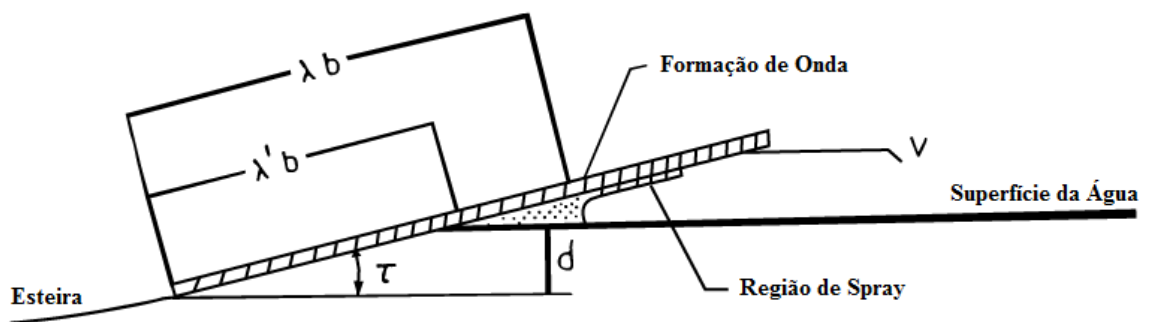
Como mencionado, anteriormente, será inicialmente abordado o comportamento hidrodinâmico para uma placa plana sem ângulo de *deadrise*. Nessa etapa, serão descritas as análises em placas planas para: área molhada, sustentação e arrasto.

2.5.1.1 Área Molhada Placas Planas

No caso de uma placa plana para definir a área molhada é necessário, inicialmente, o entendimento da formação de ondas que se origina com o movimento. Devido ao movimento da placa com ângulo de *trim*, a água se ergue na frente da placa e conseqüentemente, o comprimento l (λb) da área molhada torna-se maior do que aquele definido como água não perturbada l_1 ($\lambda' b$), representado na Figura 10. A formação dessa região, entre a área molhada e a não perturbada, foi estudada por Wagner, 1932, denominada como região de *spray* (*spray-root*), que pode ser observado na Figura 11, juntamente com a distribuição de pressão resultante da combinação desses fatores.

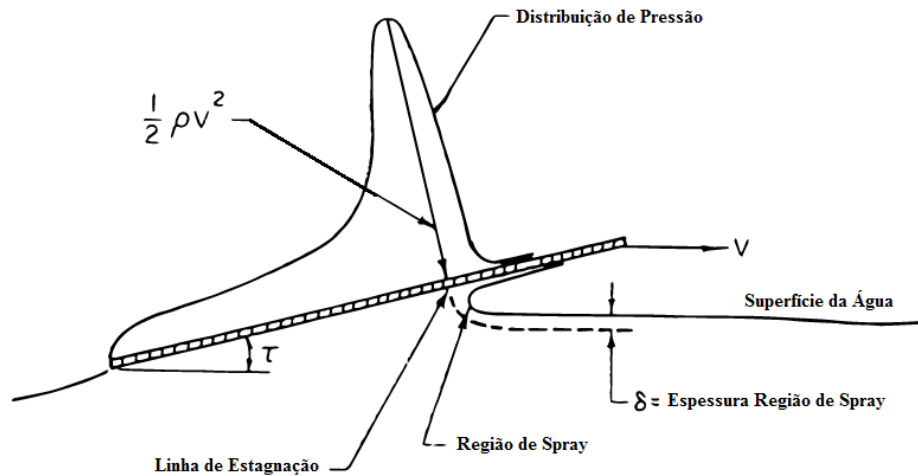
O termo área molhada utilizado nesse trabalho é referente à porção molhada quando a água exerce pressão e exclui a região avante da formação do *spray-root*, ou seja, há uma parcela de resistência desconsiderada que é devido a essa região de *spray*. Ainda em relação à Figura 11, pode se observar a formação da linha pressão de estagnação a uma pequena distância da região de *spray-root*. Com pequenos valores de ângulo de *trim* a linha de estagnação praticamente coincide com a região de *spray-root*. Conforme o ângulo de *trim* aumenta a linha de estagnação distancia-se cada vez mais da região de *spray-root*. Dessa forma, o presente trabalho irá desconsiderar a região denominada como região de *spray*.

Figura 10 - Formação de Onda em uma Placa Plana sem ângulo de *Deadrise*.



Fonte: SAVITSKY, 1964.

Figura 11 - Típica Distribuição de Pressão em uma Placa Plana



Fonte: SAVITSKY, 1964.

Para o intervalo de parâmetros de testes considerados, a formação de ondas para uma superfície plana é apenas função do comprimento da área molhada da água não perturbada. A letra λ representa a razão comprimento-boca molhada (l/b) e λ_1 representa a razão comprimento-boca para águas não perturbadas obtido da relação $\lambda_1 = \frac{d}{b} \times \text{sen}(\tau)$, em que d é a profundidade do bordo de fuga, abaixo do nível da água durante um teste de planeio. Savitsky obteve as seguintes equações empíricas:

$$\lambda = 1,60 \times \lambda_1 - 0,30 \times \lambda_1^2 \quad (0 \leq \lambda_1 \leq 1)$$

e,

$$\lambda = \lambda_1 + 0,30 \quad (1 \leq \lambda_1 \leq 4) \quad (1)$$

Como, usualmente, no caso de planeio λ_1 é maior do que um, pode-se desconsiderar a primeira equação, o que reduz para a determinação de λ para a equação simplificada (1).

Determinada a equação empírica para determinação da região de formação de ondas para uma placa plana, é importante definir as restrições para as possíveis variações paramétricas na aplicação dos resultados. As restrições em (1) foram discutidas por Savitsky em 1954 e são aplicáveis para ângulos de *trim*, variando de 2 a 24°, $\lambda \leq 4$ e $0,60 \leq C_v \leq 25,00$.

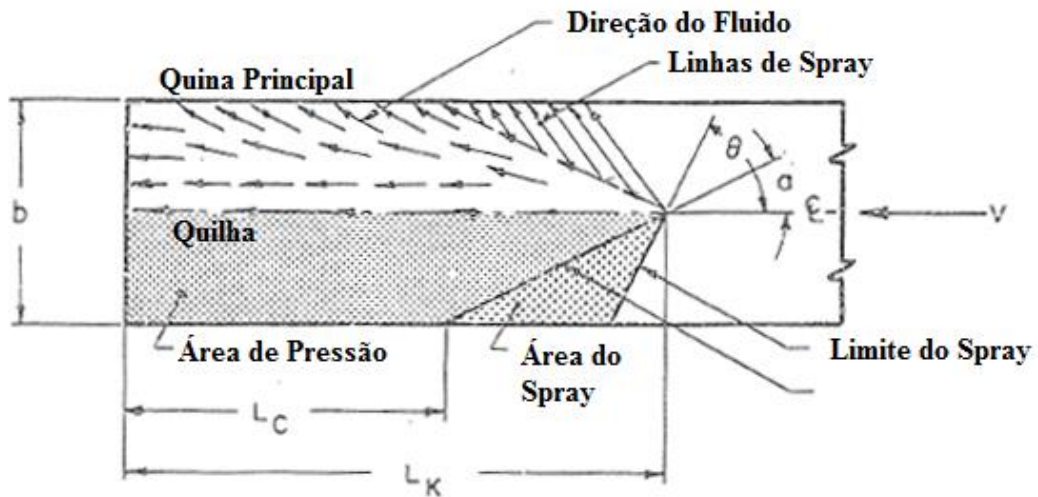
2.5.1.2 Sustentação em Placas Planas Planantes

A sustentação em uma placa planante, com ângulo de *trim* e calado constante, é associada a dois distintos efeitos. O primeiro é a reação dinâmica do fluido contra a superfície em movimento e o segundo é denominado contribuição da flutuação para sustentação que está associado com as pressões estáticas para um correspondente calado e ângulo de *trim*. A formulação empírica da equação de sustentação fora baseada na combinação dos efeitos dinâmicos e estáticos.

É possível separar esses efeitos em três fases: fase 1, 2 e 3. Na fase 1, para baixos coeficientes de velocidade, há o predomínio da parcela de flutuação. Conforme a velocidade aumenta os efeitos dinâmicos de sustentação começam a se desenvolver. A fase 2 inicia-se com os efeitos dinâmicos, diminuindo o carregamento que uma superfície plana consegue suportar e com o contínuo aumento da velocidade a capacidade de carga aumenta. Com valores altos para o coeficiente de velocidade ocorre a fase 3 em que os efeitos dinâmicos de sustentação predominam e os efeitos de pressão estática podem ser desprezados, o que se pode caracterizar como regime de planeio.

A distribuição do fluido sobre a área de pressão de uma superfície de planeio é uma combinação de fluidos deslocando-se nas direções transversais e longitudinais, fenômeno que pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 - Deslocamento do fluido ao longo de uma Placa, vista inferior.



Fonte: SAVITSKY, 1964.

É conhecido da teoria aerodinâmica que para sustentação de superfícies de alta relação de aspecto (baixo λ) há um predomínio da distribuição de fluido na direção longitudinal e a sustentação é proporcional a τ . Para superfícies com área pequena e comprimento infinito ($\lambda = \infty$) o deslocamento do fluido se dá na direção transversal e é proporcional a τ^2 . Então, para uma placa com uma relação de aspecto normal o coeficiente de sustentação pode ser expresso pela seguinte equação:

$$C_L = A\tau + B\tau^2 \quad (2)$$

Para a faixa de valores de λ aplicáveis para superfície de planeio, o segundo termo sofre uma pequena correção em relação ao segundo e à equação (2) pode ser aproximada, utilizando um valor de τ elevado na potência 1,1. Com isso:

$$\frac{C_L}{\tau^{1,1}} = f(\lambda, C_v) \quad (3)$$

Sottorf's, 1949, realizou uma análise para altas velocidades, a partir de uma base de planeio. Lembrando que para altas velocidades as pressões estáticas são descartadas, ele demonstrou que para um dado ângulo de *trim*, o componente dinâmico do coeficiente de sustentação varia na proporção $\lambda^{1/2}$. Então pode-se considerar que o componente dinâmico da sustentação é na forma:

$$C_{L_d} = c \times \lambda^{1/2} \times \tau^{1,1} \quad (4)$$

Onde c é uma constante a ser determinada.

O componente hidrostático de sustentação para uma placa plana com boca, b , relação comprimento-boca de área molhada, λ , e ângulo de *trim*, τ , pode ser escrita da seguinte forma:

$$C_{L_b} = \frac{D\lambda^n}{C_v^2} \tau^{1,1} \quad (5)$$

Onde D e n são constantes a serem determinadas.

Combinando as equações (4) e (5), obtemos uma equação empírica para o coeficiente de sustentação para uma superfície plana:

$$C_L = \tau^{1,1} \left(c\lambda^{1/2} + \frac{D\lambda^n}{C_v^2} \right) \quad (6)$$

Como todas as equações empíricas existem diversas maneiras para ser formulada. A equação (6) tem a vantagem de prontamente fornecer os valores dos dois diferentes efeitos que ocorrem na sustentação, e também é, facilmente aplicável no projeto do casco de uma embarcação de planeio.

As constantes c , D e n são calculadas aplicando na fórmula acima a base de dados existente sobre embarcações planantes. O método que foi calculado está descrito no artigo anterior, publicado por Savitsky em 1954. O resultado dessa análise forneceu a seguinte equação para uma superfície com *deadrise* igual a zero:

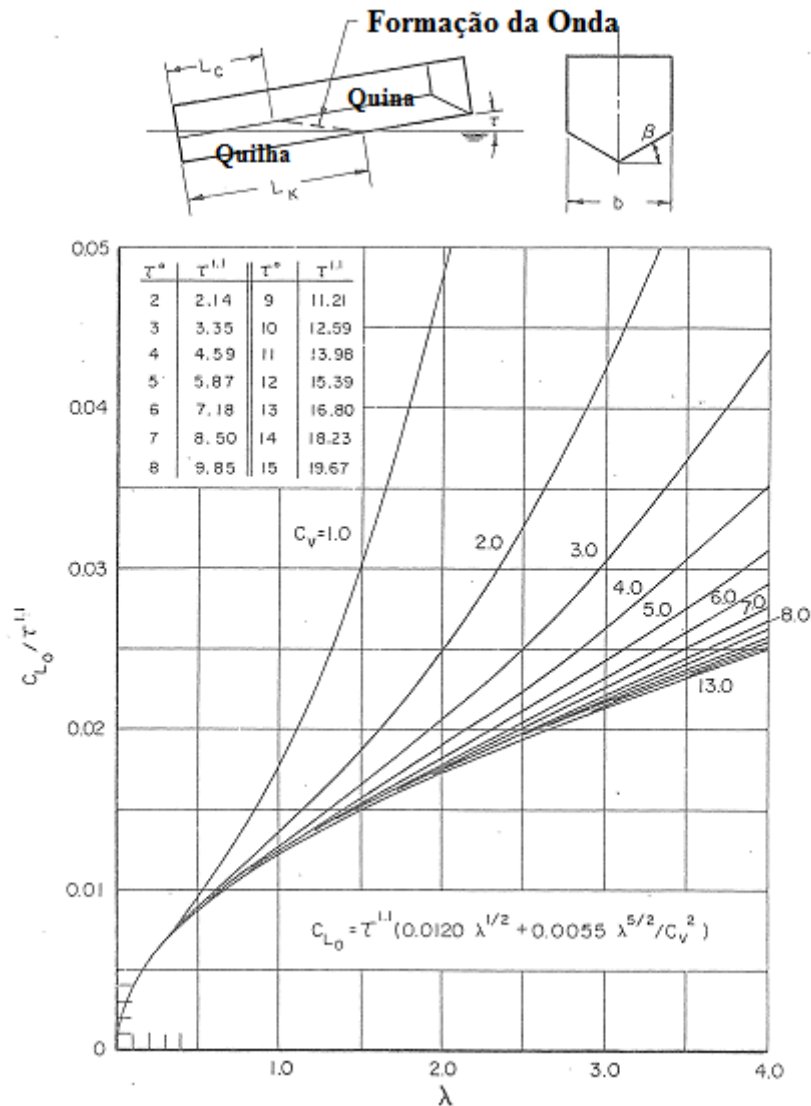
$$C_L = \tau^{1,1} \left[0,0120\lambda^{1/2} + \frac{0,055\lambda^{5/2}}{C_v^2} \right] \quad (7)$$

Onde τ é em graus.

Está equação empírica é aplicável para $0,60 \leq C_v \leq 13,00$, $2^\circ \leq \tau \leq 15^\circ$ e $\lambda \leq 4$.

A confirmação dos efeitos que ocorrem na sustentação de placas planas planantes pode ser observada pelas Figuras 18 e 19. Para atingir uma grande faixa de valores de C_v o gráfico da Figura 13 é plotado na forma $C_{L0}/\tau^{1,1}$ por λ . Assim fica claro para se observar que a contribuição da flutuação para sustentação é significativa para valores de C_v até aproximadamente 10. Para C_v maiores que 10, a sustentação dinâmica é predominante e o coeficiente de sustentação é independente da velocidade. Onde na verdade para C_v maior que 10 o coeficiente para placa plana de sustentação pode ser simplificado para $C_L = \tau^{1,1} \left[0,0120\lambda^{1/2} \right]$.

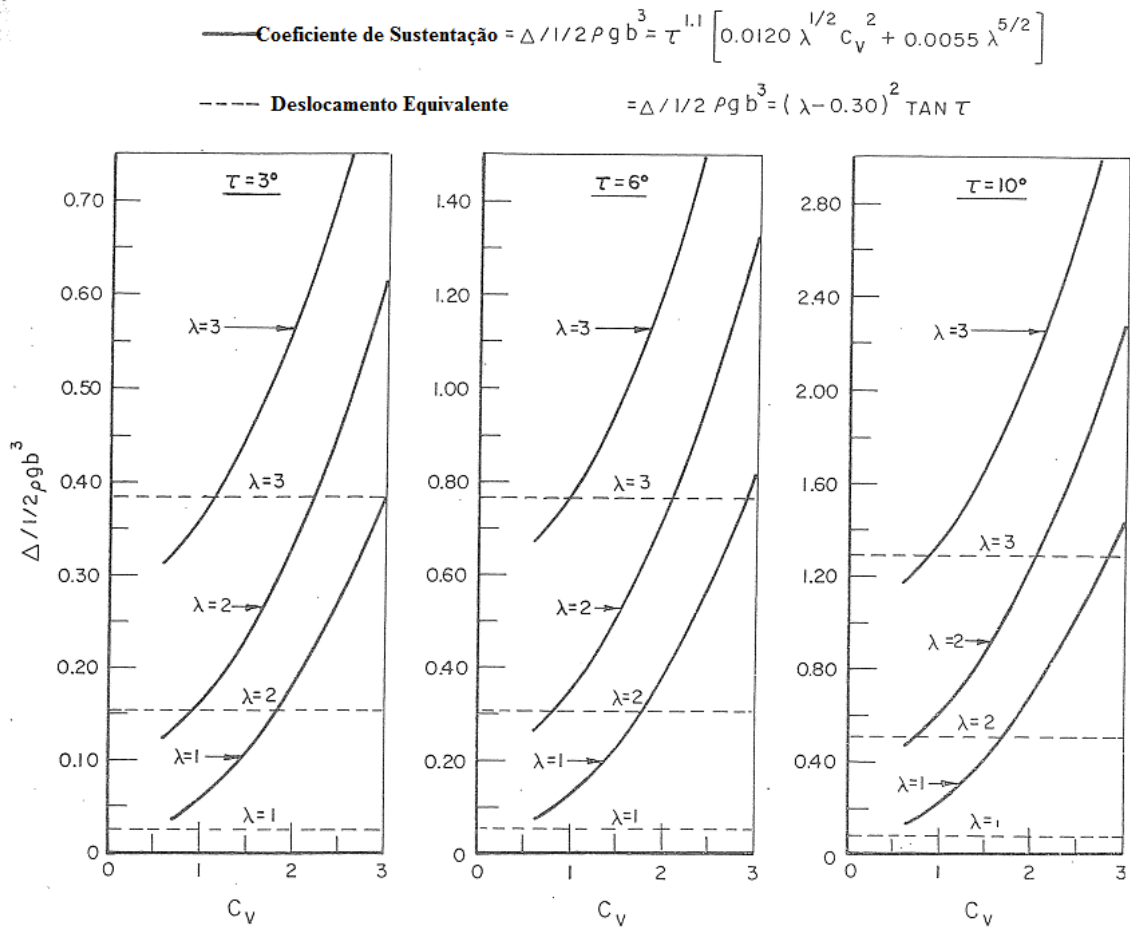
Figura 13 - Coeficiente de sustentação para *deadrise* 0°



Fonte: SAVITSKY, 1964.

A Figura 14 ilustra a sustentação para coeficientes de velocidade baixos ($C_v \leq 1,0$), a figura compara a sustentação total com a sustentação originada apenas pela sustentação estática para um dado calado e *trim* da superfície planante. O Gráfico é plotado por um coeficiente que representa a sustentação total ($\Delta/\frac{1}{2}\rho g b^2$) em função do coeficiente de velocidade (C_v). As linhas tracejadas representam a sustentação estática, enquanto as linhas cheias representam a sustentação total, que inclui os efeitos estáticos e dinâmicos. O Gráfico tem limite inferior, devido à restrição para a equação (7) de $C_v \geq 0,6$, mas é possível se observar que caso não houvesse essa restrição ocorreria apenas a sustentação, devido a flutuação.

Figura 14 - Coeficiente de Sustentação para baixos valores de C_v



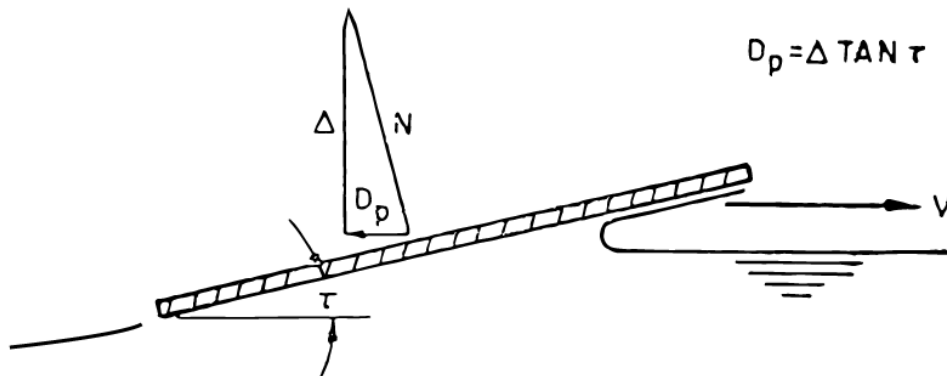
Fonte: SAVITSKY, 1964.

2.5.1.3 Arrasto em Placas Planas Planantes

O arrasto hidrodinâmico em placas planantes é composto pelo arrasto de pressão desenvolvido pela pressão, atuando normal ao fundo, e o arrasto viscoso agindo tangencialmente ao fundo, tanto na área molhada, quanto na região de *spray*. Existe ainda um arrasto devido a área lateral molhada que deveria ser adicionado ao arrasto viscoso total, mas para seguinte análise não será considerado esse efeito.

Para determinar a contribuição de cada parcela do arrasto será considerado, inicialmente, um fluido invíscido, ou seja, a força tangencial é zero. Com isso para um dado ângulo de *trim*, τ , um carregamento, Δ , e uma força, N , normal ao fundo da superfície a resistência devido as forças de pressão (D_p) que é representada na Figura 15, pode ser expressa pela seguinte equação: $D_p = \Delta \tan(\tau)$.

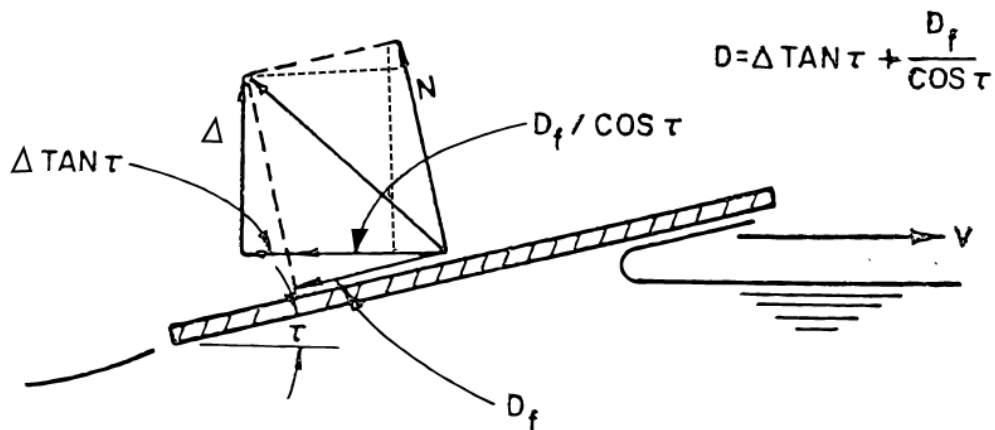
Figura 15 - Fluido Invíscido



Fonte: SAVITSKY, 1964.

Considerando o arrasto agora devido a viscosidade (D_f) agindo tangencialmente ao fundo do casco, o arrasto total (D) é mostrado na Figura 16 e representado pela seguinte equação: $D = \Delta \tan(\tau) + \frac{D_f}{\cos(\tau)}$.

Figura 16 - Fluido Viscoso



Fonte: SAVITSKY, 1964.

O componente da fricção (D_f) é regido pela seguinte equação:

$$D_f = \frac{C_f \rho V^2 (\lambda b^2)}{2 \cos(\beta)} \quad (10)$$

Onde:

C_f – coeficiente de Schenherr de fricção para regime turbulento;

V_1 – velocidade no fundo da superfície.

A velocidade no fundo da superfície (V_1) é menor que a velocidade de avanço (V), devido ao fato de a pressão no fundo ser maior que a exercida na superfície livre.

Existem diversos estudos para determinação da velocidade no fundo da superfície, Sottorf e Parkinson, 1938, e Locke, 1939, desenvolveram expressões analíticas que definem a velocidade no fundo para altos valores de coeficientes de velocidade, em que a contribuição da sustentação, devido à flutuação, pode ser desconsiderada. Savitsky e Ross, 1952, desenvolveram uma expressão para velocidade no fundo aplicável para uma faixa de valores entre um e treze para o coeficiente de velocidade. Como será abordado primeiramente o caso para placas sem ângulo de *deadrise*, a contribuição dinâmica para a sustentação é dada pelo primeiro termo de acordo com a equação (7), já vista anteriormente. Assim:

$$C_{L_d} = 0,0120\lambda^{1/2}\tau^{1,1} \quad (11)$$

O carregamento dinâmico (Δ_d) no fundo é:

$$\Delta_d = \frac{1}{2}\rho V^2 b^2 (0,0120\lambda^{1/2}\tau^{1,1}) \quad (21)$$

Dessa forma, a pressão dinâmica (p_d) média é:

$$p_d = \frac{\Delta}{\lambda b \cos(\tau)} = \frac{0,0120\lambda^{1/2}V^2\tau^{1,1}}{2\lambda^{1/2}\cos(\tau)} \quad (22)$$

Aplicando-se a equação de Bernoulli entre as condições de corrente livre com as condições no fundo da superfície, obtém-se:

$$V_1 = V \left(1 - \frac{2p_d}{\rho V^2}\right)^{1/2} \quad (23)$$

Substituindo então (22) em (23) chega-se:

$$V_1 = V \left(1 - \frac{0,0120\lambda^{1/2}V^2\tau^{1,1}}{2\lambda^{1/2}\cos(\tau)}\right)^{1/2} \quad (24)$$

Portanto, o arrasto hidrodinâmico para uma superfície plana é dada por:

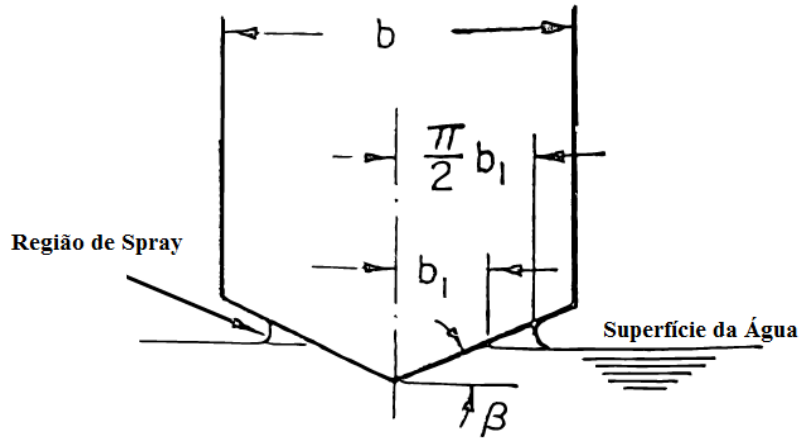
$$D = \Delta \tan(\tau) + \frac{C_f \rho V_1^2 (\lambda b^2)}{2 \cos(\beta) \cos(\tau)} \quad (25)$$

2.5.2 Método de Savitsky: Placas Planantes com ângulo de *Deadrise*

Dando continuidade a análise da formulação proposta por Savitsky será abordado agora o caso de placas planas com formato em “V”, representado na Figura 17. As principais diferenças

de uma placa com ângulo de *deadrise* diferente de zero serão abordados nessa seção e esse é o ângulo presente em embarcações planantes.

Figura 17 - Placa com Formato em "V"

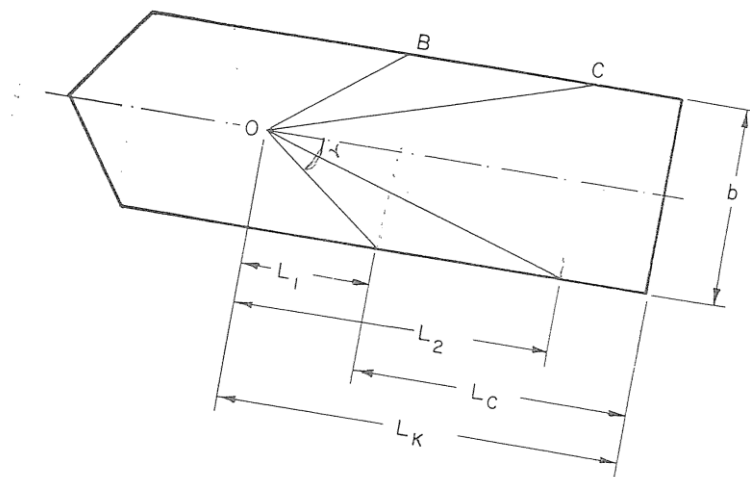


Fonte: SAVITSKY, 1964.

2.5.2.1 Área Molhada

Para placas com ângulo de *deadrise*, a separação entre as regiões de área molhada se dão por uma linha que inicia na quilha e vai até a quina principal. Formando assim três regiões: área molhada, área de *spray* e área não molhada. As três regiões podem ser observadas na Figura 18.

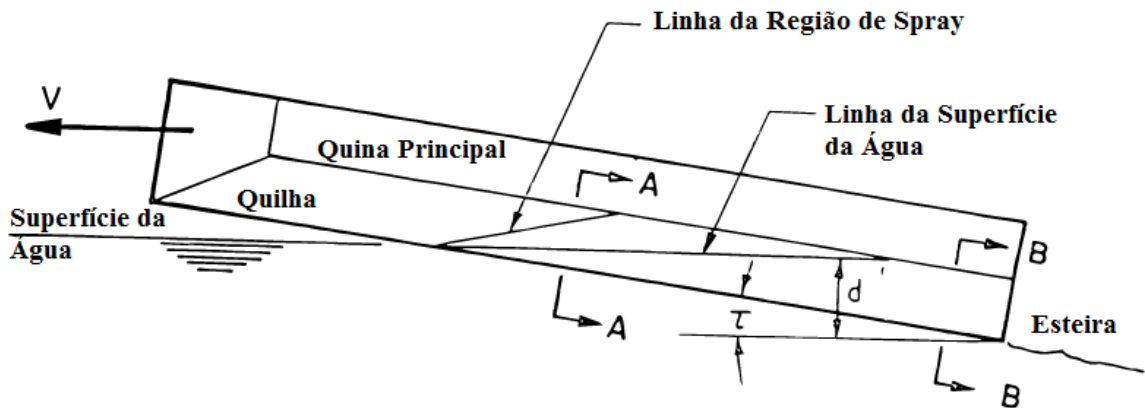
Figura 18 - Regiões Placas com Ângulo de *Deadrise*



Fonte: SAVITSKY, 1964.

A área seca se dá avante da linha $O-B$, enquanto a região de *spray* fica entre as linhas $O-B$ e $O-C$ e a área molhada inicia na linha $O-C$ e vai até a popa transom. A influência na área dessas regiões é devido ao ângulo de *trim* (τ), o ângulo que indica quantos graus a placa está inclinada em relação à linha d'água. A representação do ângulo de *trim* pode ser observado na Figura 19.

Figura 19 - Representação Ângulo de *Trim*



Fonte: SAVITSKY, 1964.

Para ângulos de até aproximadamente 15 graus não é perceptível a formação da região de *spray*. Para ângulos maiores Chambliss e Bloyd, 1953, indicaram o início desse acúmulo de água na região da quilha. Sabe-se que a forma da região de *spray* é ligeiramente convexa, mas por ter uma leve curvatura acaba sendo desprezada.

Definidas as regiões, fica definida a razão comprimento-boca molhada, λ , que define a região de pressão como:

$$\lambda = \frac{L_K + L_C}{2b} = \frac{\left[\frac{d}{\text{sen}(\tau)} - \frac{b \tan(\beta)}{2\pi \tan(\tau)} \right]}{b} \quad (26)$$

Onde:

L_k – distância da quilha até o ponto O - $L_k = d / \text{sen}(\tau)$;

d – distância do fundo da placa até a linha d'água;

L_c – distância da popa até ponto da quilha que inicia a área molhada –

$$L_k - L_c = \frac{b \tan(\beta)}{\pi \tan(\tau)}.$$

A partir de experimentos foi possível chegar a uma série de restrições para aplicação da equação (26), sendo aplicável para quaisquer combinações de ângulo de *deadrise* e de *trim* para valores de coeficiente de velocidade maiores que dois, o que caracteriza um completo desenvolvimento da região de *spray*. Para placas com ângulos de *deadrise* iguais ou menores que 10 graus a equação continua a ser aplicável, caso o coeficiente de velocidade seja igual a um. Para superfícies com ângulo de *deadrise* igual a 20 graus, com coeficiente de velocidade igual a um e ângulo de *trim* menor ou igual a 4 graus, os experimentos demonstram uma quebra parcial na região de *spray*. Para superfícies com ângulo de *deadrise* com 30 graus mostram efeitos similares, exceto que para valores de coeficiente de velocidade igual a um a quebra da região de *spray* se dá para valores de ângulo de *trim* inferior ou igual a 6 graus. Pode-se afirmar que a quebra da região de *spray*, para um determinado ângulo de *deadrise*, irá ocorrer quando o ângulo de *trim* é reduzido para um valor teórico em que a diferença entre L_k e L_c seja

aproximadamente igual a 1,66 vezes a boca. A relação $(L_k - L_c)/b$ pode ser considerada como uma medida do ângulo (γ) entre a região de *spray* e a quilha, e a linha que separa esse ângulo denomina-se como linha de estagnação. Com isso, pode ser generalizado que a formação da região de *spray*, para um coeficiente de velocidade igual a um, começa a quebrar quando os valores do ângulo γ é menor que 17 graus para determinados ângulos de *trim* e de *deadrise*. O ângulo γ fica definido a seguir, e pode ser visto na Figura 18.

$$\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{\pi \tan(\tau)}{2 \tan(\beta)}\right)$$

2.5.2.2 Sustentação em Placas com ângulo de *Deadrise*

Dando sequência à análise para placas planas com ângulo de *deadrise* para um dado *trim* e relação de comprimento-boca molhado, o efeito do aumento do ângulo de *deadrise* tem como efeito a redução na sustentação no regime de planeio. Essa redução na sustentação se deve primeiramente na redução na pressão de estagnação no limite da área molhada. E recordando da seção de área molhada que o ângulo γ , definido como o ângulo entre a linha de estagnação e a quilha, é dado pela seguinte equação:

$$\gamma = \tan^{-1}(\pi \tan(\tau)/2 \tan(\beta))$$

Quando β é igual a zero, que representa placas planas, ocorre um total desenvolvimento da pressão de estagnação ($1/2 \rho V^2$). Conforme o ângulo de *deadrise* aumenta, o ângulo γ diminui, o que impede o total desenvolvimento da pressão de estagnação, com isso a sustentação se reduz.

Para formular uma equação empírica para superfícies com ângulo de *deadrise*, o coeficiente de sustentação para uma superfície com formato em “V” foi comparado com aquele de uma placa plana para valores idênticos de ângulo de *trim* (τ), razão comprimento-boca molhada (λ) e coeficiente de velocidade (C_v). Foi encontrado que o coeficiente de sustentação para superfícies com ângulo de *deadrise* pode se representado pela seguinte equação:

$$C_{L\beta} = C_{L_0} - 0,0065\beta C_{L_0}^{0,60} \quad (29)$$

Onde:

$C_{L\beta}$ – coeficiente de sustentação para superfícies com ângulo de *deadrise*;

β – ângulo de *deadrise*;

C_{L_0} – coeficiente de sustentação para placa plana operando para mesmos valores de τ , λ e C_v .

2.5.2.3 Arrasto em Superfícies com ângulo de *Deadrise*

Superfícies com ângulo de *deadrise* sofrem os mesmos dois efeitos que sofrem as placas planas. Dessa forma o arrasto total é composto pelo arrasto de pressão e pelo arrasto viscoso. Portanto, o arrasto hidrodinâmico para superfícies planantes, é dado pela mesma equação vista em placas planas, com a diferença que agora tem-se um ângulo de *deadrise*, representado pelo cosseno β .

$$D = \Delta \tan(\tau) + \frac{C_f \rho V_1^2 (\lambda b^2)}{2 \cos(\beta) \cos(\tau)} \quad (30)$$

Onde:

Δ – deslocamento;

τ – ângulo de *trim*;

ρ – densidade;

V_1 – velocidade no fundo superfície;

λ – razão comprimento-boca molhada;

b – boca;

β – ângulo de *deadrise*;

C_f – coeficiente de Fricção Turbulento de Schoenherr (Anexo).

A determinação da velocidade no fundo da superfície se dá de maneira similar à obtida para placas planas, apenas utiliza-se o coeficiente de sustentação para superfícies com ângulo de *deadrise* equação (30).

É importante retomar a parcela referente ao arrasto friccional na secção de placas planas (30). Pois, foi utilizada a área molhada no fundo da superfície como λb^2 . É recomendado que para valores de ângulo de *trim* menor que 4 graus, a área seja utilizado λb^2 , já para valores maiores de ângulo de *trim* sejam utilizados resultados obtidos por Savitsky, 1954 e Sottorf, 1949.

$$Df = \frac{C_f \rho V^2 (\lambda b^2)}{2 \cos(\beta)} \quad (31)$$

2.5.2.4 Razão Arrasto-Sustentação para Superfícies Planantes

O principal objetivo de computar a razão arrasto-sustentação (D/Δ) de superfícies planantes é para facilitar uma análise com a variação dessa relação em função da velocidade, área molhada e ângulo de *trim*. Dessa forma, Savitsky, por meio de um modelo com 9 polegadas de boca, 20 graus de ângulo de *deadrise*, plotou um gráfico (Figura 20) para diferentes valores de ângulo de *trim*. Sendo no eixo das abscissas uma variação do coeficiente de velocidade, baseado na razão comprimento-boca molhada ($C_v/\lambda^{1/2}$), que pode ser interpretado como o número de Froude. O coeficiente foi utilizado, dessa forma, por ser igual a 0,296 vezes a razão velocidade-

comprimento. É importante ressaltar que a Figura 20 representa somente dados referentes ao modelo de 9 polegadas, logo não pode ser diretamente aplicado para navios em tamanho real. O objetivo é a análise de variações típicas que ocorrem com a razão arrasto-sustentação para superfícies planantes.

Ainda em relação à Figura 20 é possível observar que, geralmente, as curvas do gráfico D/Δ se assemelham para diferentes valores de *trim* na mesma faixa de valores para λ e C_v . Também é notório que para valores de $C_v/\lambda^{1/2}$ aproximadamente igual a um há um rápido incremento na razão D/Δ para todos os valores de *trim*. Para valores de τ maiores que dois e $C_v/\lambda^{1/2}$ maior que um a razão D/Δ é praticamente constante para quaisquer valores de velocidade e razão comprimento-boca molhado. Para o caso em que τ igual a dois, a curva D/Δ aparenta se aproximar de um valor constante para valores de $C_v/\lambda^{1/2}$ maiores que dois.

As diferentes variações de D/Δ podem ser associadas a diferentes variações do fluido na superfície. Para valores de C_v maiores que dois há uma evidente separação do fluido das quinas e da popa transom. Para valores de C_v menores que um, há um determinado ângulo de *trim*, o grau de separação da popa transom é em função da razão comprimento-boca molhada, quanto menor a razão, maior a separação. Com o aumento do grau de separação na popa transom, a força de arrasto aumenta e com isso a razão D/Δ aumenta, até que haja a total separação das quinas e transom.

Savitsky define o início do regime de planeio como podendo ser a separação do fluido da popa transom e das quinas, o que pode ser entendido pela Figura 20, como o início do regime de planeio, sendo $C_v/\lambda^{1/2}$ igual a um para τ maior ou igual a quatro e para $C_v/\lambda^{1/2}$ igual a dois para τ igual a dois. O que se traduz em que o planeio ocorre quando a razão arrasto-sustentação para dado ângulo de *trim* é essencialmente constante. Existem outras definições para planeio, como a proposta por Locke, 1948, que define o início do planeio como sendo para dado λ e τ , a carga transportada pela superfície varia com o quadrado da velocidade. Isso implica que o componente da sustentação para a flutuação é desprezível.

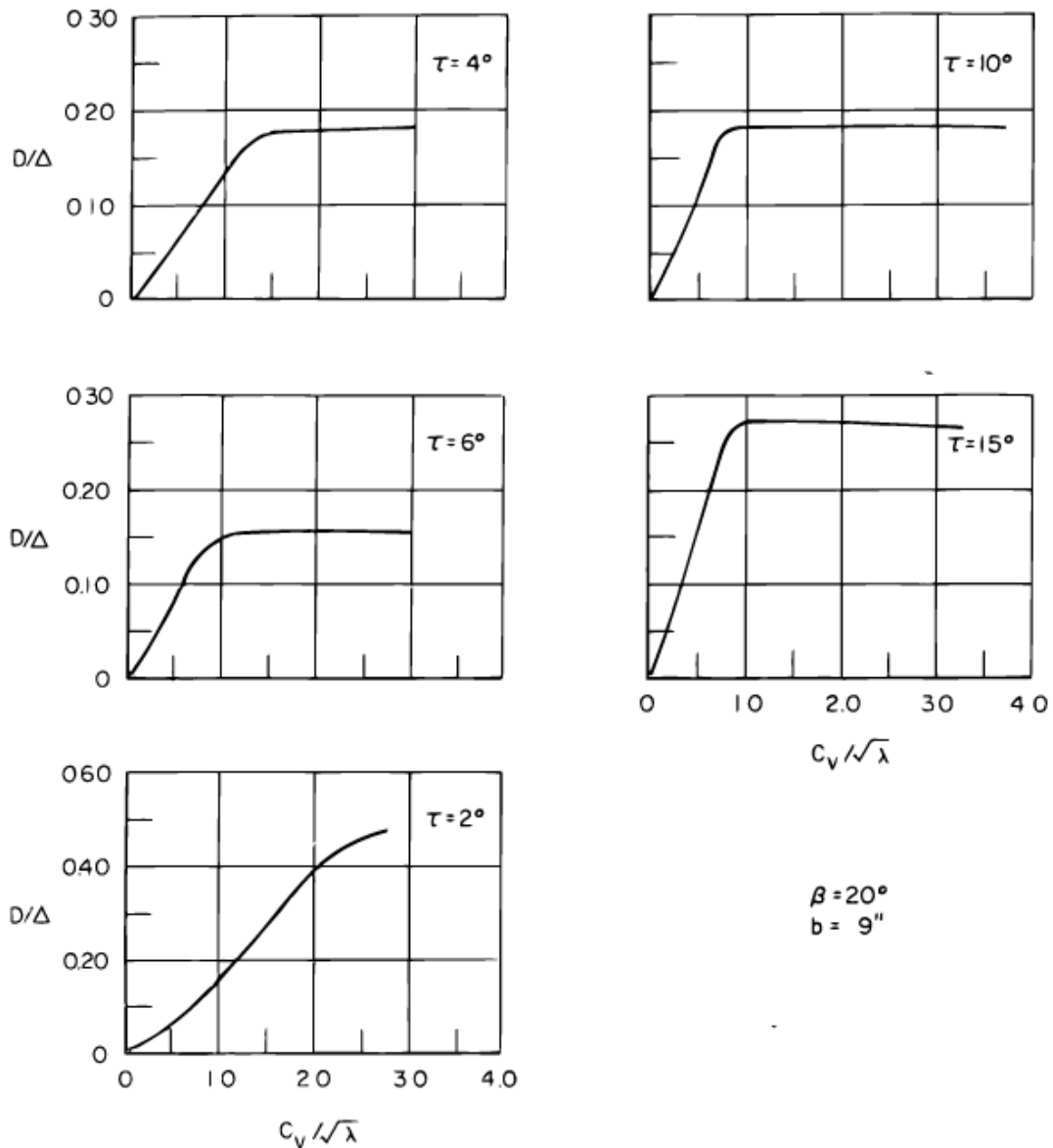
Para plotar os gráficos da Figura 20, Savitsky, partiu da equação do arrasto total (30):

$$\frac{D}{\Delta} = \tan(\tau) + \frac{C_f \rho V_1^2 (\lambda b^2)}{2 \Delta \cos(\beta) \cos(\tau)} \quad (32)$$

Multiplicando e dividindo-se o segundo termo à direita por V^2 e substituindo C_L por $2\Delta/\rho V^2 b^2$ resulta em:

$$\frac{D}{\Delta} = \tan(\tau) + \frac{\left(\frac{V_1}{V}\right)^2 C_f \lambda}{C_L \cos(\beta) \cos(\tau)} \quad (33)$$

Figura 20 - Variação razão arrasto-sustentação pelo coeficiente de velocidade



Fonte: SAVITSKY, 1964.

Utilizando o devido C_L para os casos de placa planas e placas com ângulo de *deadrise*. A razão $(V_1/V)^2$ é dada na figura apresentada no Anexo. O coeficiente de fricção é em função do número de Reynolds que aumenta conforme aumenta o tamanho do barco. Como mostrado por Schoenherr, o coeficiente turbulento de fricção decresce com o aumento do número de Reynolds, dessa forma a razão D/Δ sofrerá uma pequena redução, conforme o aumento do tamanho do barco para uma dada combinação de λ , τ , β e C_v .

2.5.2.5 Porpoising

Porpoising é um fenômeno particular para cascos planantes de altas velocidades que ocorre ao navegar em águas calmas. É uma combinação de oscilações na embarcação em movimentos de *pitch* e *heave*, de amplitude constante ou crescente que pode levar a danos estruturais devido ao choque da embarcação contra a água. Essa instabilidade longitudinal já resultou em diversos acidentes e é um dos grandes problemas para embarcações planantes.

Os problemas ocorridos com *porpoising* têm registros em 1930, com designers de hidroaviões. Perring e Glauert, na Inglaterra, em 1933, desenvolveram uma teoria sobre a instabilidade por *porpoising*. A aplicação prática da teoria para hidroaviões não foi bem sucedida, pois a teoria precisava de um conhecimento prático hidrodinâmico que só poderia ser obtido experimentalmente. Em 1942, Sottorf, na Alemanha conduziu um estudo em modelos em que previu que os limites de *porpoising* poderiam ser facilmente previstos, em termos, através de coeficientes básicos de planeio, C_v , C_L e ângulo de *trim*. Nos Estados Unidos, Davidson, Locke, Benson e Parkinson, em meados dos anos 40, conduziram estudo sistemático experimental sobre limites de *porpoising* para hidroaviões e confirmaram que os limites poderiam ser determinados a partir de coeficientes básicos de planeio.

Então em 1952, Day e Haag, utilizando os estudos gerados até então como base, geraram uma série sistemática de testes com ângulo de *deadrise* constante para superfícies prismáticas a fim de determinar os limites de *porpoising* para cascos planantes. O objetivo desse estudo era fornecer, a partir da série limites para *porpoising*, a partir de características do barco como: ângulo de *trim*, velocidade, peso e ângulo de *deadrise*. Esses resultados são apresentados na Figura 21, na forma gráfica e podem ser facilmente utilizados para realização de projetos.

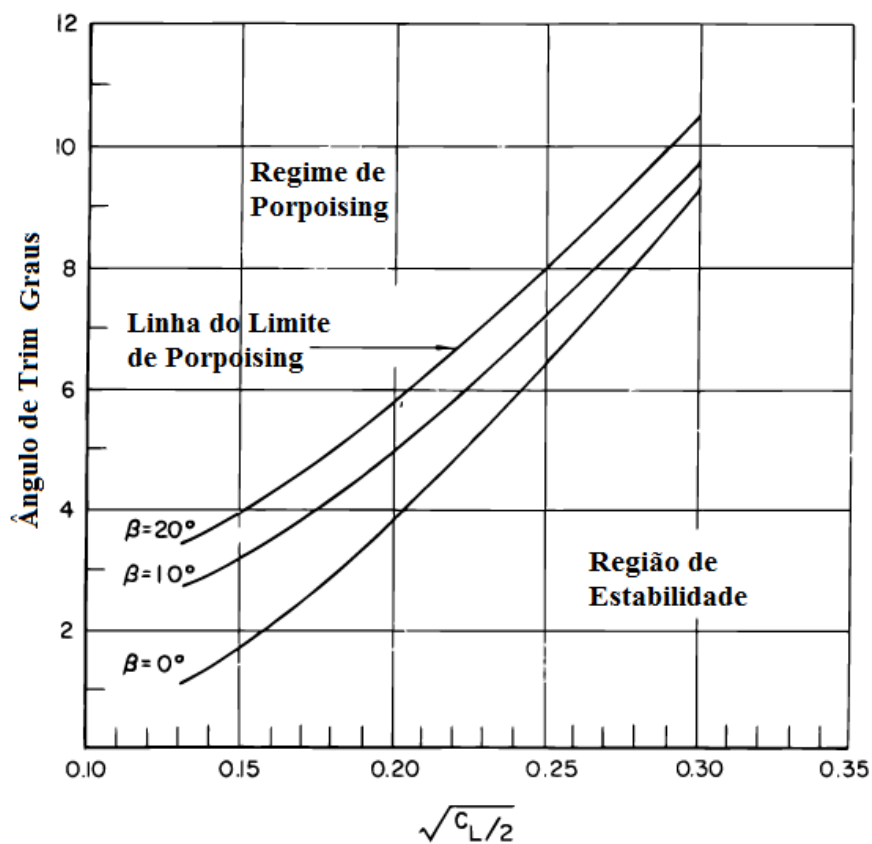
Basicamente, os resultados do estudo sobre *porpoising* mostram que para dado ângulo de *deadrise* há uma relação específica entre o ângulo de *trim*, τ e o coeficiente de sustentação, C_L , que definem o início da instabilidade por *porpoising*. Essa relações são mostradas na Figura 21 para ângulos de *deadrise* de 0° , 10° e 20° . As combinações de τ e C_L que estão abaixo dos limites da curva indicam condições estáveis para operação, enquanto aqueles, acima da linha indicam a existência da instabilidade por *porpoising*.

É constatado que conforme o coeficiente de sustentação diminui, o que insinua um casco levemente carregado ou uma alta velocidade de planeio, o ângulo de *trim* para o limite de estabilidade também diminui. Ainda é possível com o aumento do ângulo de *deadrise* aumentar o ângulo de *trim* adiando, o início da instabilidade. Caso em uma situação o barco esteja sofrendo de instabilidade por *porpoising* para dada velocidade e carregamento, a primeira medida a se tomar é reduzir o ângulo de *trim* para evitar danos à embarcação. A redução no ângulo de *trim* pode ser obtida de diversas maneiras. Uma delas é movendo o centro longitudinal de gravidade avante da embarcação. Caso isso não seja possível, a adição de um flap na popa pode reduzir o *trim* com uma pequena adição de resistência na embarcação.

É possível agora realizar a comparação entre o ângulo de *trim* para evitar a instabilidade devido ao *porpoising* com o ângulo de *trim* que resulta na menor resistência. De acordo com a

Figura 20 (seção razão arrasto-sustentação) que para ângulos de aproximadamente 4° a 5° resultaria na menor razão arrasto-sustentação. Os limites de *porpoising* mostrados na Figura 21 requerem um ângulo de *trim* entre 1° a 2° para operação estável. Portanto, devido aos limites de operação sacrifica-se um pouco a resistência e opera-se a ângulos de *trim* que garantem a integridade da embarcação. Ainda é possível aumentar o ângulo de *deadrise* da embarcação, já que o ângulo de *trim* para satisfazer os limites de *porpoising* aumentam conforme o aumento do ângulo de *deadrise*. Ou seja, aumentando o ângulo de *deadrise* permitir-se-á que uma superfície planante opere com ângulos de *trim* mais próximos àqueles que possibilitem a menor razão de arrasto-sustentação.

Figura 21 - *Porpoising* limites para barcos planantes



Fonte: SAVITSKY, 1964.

DESENVOLVIMENTO

Determinados os efeitos hidrodinâmicos decorrentes da resistência ao avanço para embarcações planantes e definidas as influências dos parâmetros presentes nesses tipos de embarcação com a resistência, será realizado a estimativa da resistência ao avanço por meio de uma planilha do software Excel, fornecida em um fórum online sobre barcos. Para validação da tabela serão realizadas a verificação e a validação das fórmulas utilizadas, juntamente com um fluxograma que simplificará o entendimento da planilha.

A planilha reproduz os trabalhos de Savitsky com modificações em algumas formulações de autores como Hadler (1966), Lawrence (1985), Lewandowski (1996), Blount e Bartee (1997). As modificações se dão devido a estudos mais recentes ou em áreas que não foram contempladas por Savitsky.

As formulações da planilha estão divididas em 9 tabelas, que são: tabela principal, estabilizadores, apêndices, resistência do ar, resistência total, estabilidade em roll, navegabilidade, cálculos e resultados, que serão apresentadas no decorrer do trabalho.

A planilha é composta por diferentes partes da embarcação, sendo elas: casco, superestrutura e sistema propulsivo, que inclui a quantidade de propulsores, estabilizadores, leme, transmissão e pé de galinha. Para as diferentes partes é necessário o preenchimento dos dados de entrada para realização do cálculo da resistência ao avanço. Como já foi visto anteriormente, as principais dimensões e ângulos de uma embarcação de recreio nessa seção serão determinados bem como os dados de entradas necessários para a estimativa da resistência.

3.1 Dados de Entrada

3.1.1 Casco

A Tabela 2 apresenta as dimensões e unidades necessárias, o conhecimento para inclusão do casco na estimativa da resistência ao avanço. A localização e os ângulos dos dados de entrada podem ser observados na Figura 6.

Tabela 2 - Dados de Entrada Casco

Dados	Unidades
Comprimento linha d'água estática (l_{wl})	Pés (ft)
Boca (b)	Pés (ft)
Centro vertical de gravidade (v_{cg})	Pés (ft)
Centro longitudinal de gravidade (l_{cg})	Pés (ft)
Deslocamento (δ)	Libra-força (lbf)
Ângulo de <i>deadrise</i> na popa (β_i)	Graus
Ângulo de <i>deadrise</i> a meia nau (β_{00})	Graus
Ângulo entre a quilha e a linha de operação do propulsor (ϵ)	Graus
Distância entre a linha de operação do propulsor até o v_{cg} (f)	Graus

Fonte: Própria.

3.1.2 Casaria

A casaria na planilha é considerada por meio de uma aproximação da área emersa, incluindo a superestrutura e borda livre para consideração da resistência do ar, na estimativa da resistência é necessário o conhecimento das seguintes dimensões e suas unidades apresentadas na tabela abaixo, com uma ressalva que para o pontal moldado da embarcação é desconsiderado a superestrutura. Caso não se tenha conhecimento das dimensões da casaria é possível desconsiderá-la ao adicionar zero na célula referente ao comprimento total da embarcação.

Tabela 3 - Dados Entrada Casaria

Dados	Unidades
Comprimento Total Da Embarcação (Loa)	Pés
Boca Moldada Máxima Da Embarcação (Bmax)	Pés
Pontal Moldado Da Embarcação (Z)	Pés
Altura Da Casaria (Hss)	Pés
Boca Da Casaria (Bss)	Pés

Fonte: Própria.

3.1.3 Sistema Propulsivo

O sistema propulsivo inclui o número de propulsores, estabilizadores, leme, transmissão e pé de galinha. A primeira informação necessária é o conhecimento do número de propulsores que compõe a embarcação, os demais componentes serão destacados nas seções a seguir.

3.1.3.1 Estabilizadores

Com relação aos estabilizadores, a Tabela 4 apresenta os dados de entrada e unidades necessários ao conhecimento para inclusão na estimativa da resistência, conforme visto na fundamentação teórica. Novamente, caso não haja a presença de estabilizadores é possível desconsiderá-los ao inserir o valor zero na célula referente à corda dos estabilizadores.

Tabela 4 - Dados de Entrada Estabilizadores

Dados	Unidades
Corda Do Estabilizador (Cf)	Pés
Razão De Aspecto Estabilizador (Σ_{est})	Sem Unidade
Ângulo De Deflexão (Δ)	Graus

Fonte: Própria.

3.1.3.2 Leme

A

Tabela 5 apresenta os dados de entradas necessários ao conhecimento para inclusão do leme na estimativa da resistência ao avanço, assim como suas unidades para o preenchimento da tabela, conforme visto na fundamentação teórica **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Novamente caso seja desconhecido as dimensões do leme é possível desconsiderá-lo ao adicionar o valor zero para a sua corda.

Tabela 5 - Dados de Entrada Leme

Dados	Unidades
Corda do leme (c_{leme})	Pés
Espessura máxima leme (t_{leme})	Pés
Área plana do leme (a_{leme})	Pés ²
Centroide da área ($x_{c(leme)}$, $y_{c(leme)}$)	Pés

Fonte: Própria.

3.1.3.3 Transmissão

Por se tratar da estimativa da resistência ao avanço é necessário o conhecimento apenas da área em contato com a água, o que torna necessário apenas o conhecimento da área do eixo em contato com a água. A

Tabela 6 apresenta os dados de entrada e unidades necessários para inclusão do eixo na estimativa da resistência ao avanço, conforme visto na fundamentação teórica. Caso seja desconhecido as dimensões ou não exista a transmissão por eixo é possível desconsiderá-lo ao inserir o valor zero no seu diâmetro.

Tabela 6 - Dados de Entrada Eixo

Dados	Unidades
Diâmetro do eixo (ϕ_{eixo})	Pés
Comprimento do eixo (l_{eixo})	Pés
Centroide de área do eixo ($x_{c(eixo)}$, $y_{c(eixo)}$)	Pés

Fonte: Própria.

3.1.3.4 Pé de Galinha

A Tabela 7 apresenta os dados de entrada referentes ao pé de galinha que é necessário para o conhecimento da inclusão do mesmo na estimativa da resistência ao avanço. Novamente, não

são todas as embarcações que contam com esse mancal para suporte do eixo e caso não exista ou não se tenha conhecimento é possível desconsiderá-lo ao inserir o valor zero em sua corda.

Tabela 7 - Dados de Entrada Pé de Galinha

Dados	Unidades
Corda do pé de galinha (c_{mancal})	Pés
Espessura do pé de galinha (t_{mancal})	Pés
Área plana do pé de galinha (a_{mancal})	Pés ²
Centróide de área ($x_{c(\text{mancal})}$, $y_{c(\text{mancal})}$)	Pés

Fonte: Própria.

3.2 Influência dos Dados de Entrada

Definidos os termos, posições, unidades de cada componente que constitui a planilha agora será dado enfoque à influência dos dados de entrada para a realização da estimativa. A Figura 22 apresenta a interface da planilha, em que as células em amarelo são as que precisam ser preenchidas para a realização dos cálculos. Os valores a serem preenchidos referentes ao casco são: comprimento da linha d'água (L_{WL}), boca (B), centro vertical de gravidade (VCG), deslocamento (Δ), ângulo de *deadrise* na popa transom (β_T), ângulo de *deadrise* a meia nau (β_{oc}), ângulo na linha do propulsor (ϵ), distância na linha do propulsor até o centro vertical de gravidade (f), centro longitudinal de gravidade (LCG) e velocidade (V). A Figura 22, apresenta os dados de entrada em hierarquia, representando a influência dos mesmos na embarcação. Aqueles que não apresentam os demais níveis de hierarquização são os selecionados para variação paramétrica e serão apresentados separados na sequência do desenvolvimento, além desses a velocidade também será separada em virtude da sua grande influência para estimativa da resistência.

O primeiro dado de entrada é o comprimento na linha d'água, que para embarcações planantes tem pouca influência, se comparado às embarcações deslocantes. Ainda assim, é determinante para o início do regime de planeio, pois é feita a consideração de que o regime só inicia quando a razão de comprimento na linha d'água pela boca seja menor do que a razão comprimento-boca molhada, fato esse baseado em Savitsky, 1976.

O segundo dado de entrada, não parametrizado, é o centro vertical de gravidade. A influência do VCG é exclusivamente na estabilidade da embarcação. Inicialmente, no cálculo dos momentos para garantir a estabilidade em *pitch* da embarcação pelas distâncias dos demais componentes da embarcação até o VCG da mesma, e esse equacionamento na planilha é baseado nos estudos de Hadler, 1966 e na estabilidade de *roll*, na distância em relação ao KB, nessa parte o equacionamento é através de Lewandowski, 1996.

Figura 22 - Dados de Entrada

3 INPUT				V			LCG		
4				[kn]	[ft]	[metres]			
5	Hull	L_{WL}	19,812 metres	65,00 feet	7	29,000	8,839		
6		B	4,267 metres	14,00 feet	8	29,000	8,839		
7		VCG	0,610 metres	2,00 feet	10	29,000	8,839		
8		Δ	27.216 kg	60.000 lbf	15	29,000	8,839		
9		β_T	10,00 °	10,00 °	20	29,000	8,839		
10		$\beta_{\gamma\alpha}$	10,00 °	10,00 °	25	29,000	8,839		
11		$L_{\gamma\alpha}$	9,906 metres	32,500 feet	30	29,000	8,839		
12		θ	0,00 °	0,00 °	35	29,000	8,839		
13		ε	4,00 °	4,00 °	40	29,000	8,839		
14		f	0,152 metres	0,50 feet	45	29,000	8,839		
15					50	29,000	8,839		
16		V_{min}	7,5 kn	12,7 feet/s	55	29,000	8,839		
17		V_{max}	163,5 kn	275,9 feet/s	60	29,000	8,839		

Fonte: Própria.

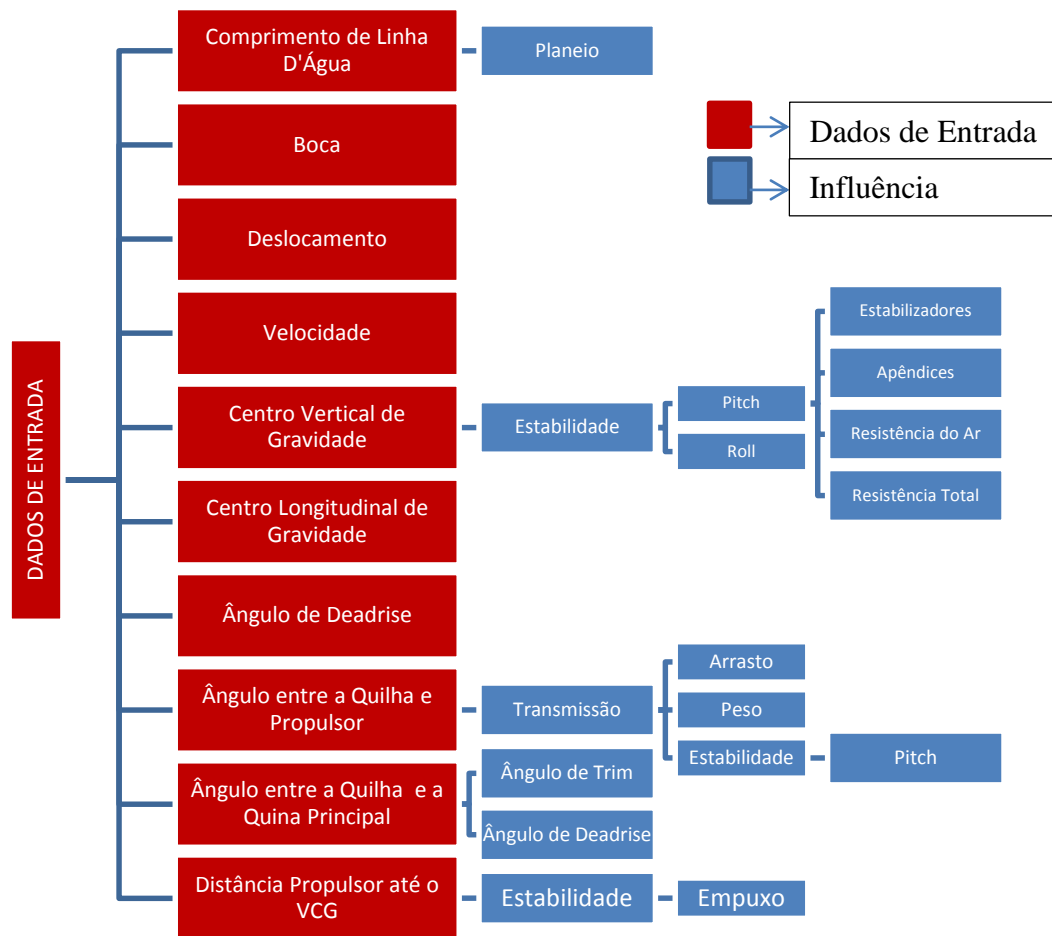
O ângulo entre a quilha e a linha de operação do propulsor, destacado na Figura 6, como o ângulo ε , é o terceiro dado de entrada necessário o preenchimento. Sua influência está diretamente ligada ao arrasto e ao peso gerado, devido à transmissão da embarcação (eixo) e também à influência do momento, que altera a estabilidade da embarcação.

O segundo ângulo que é necessário para o conhecimento é o ângulo entre a quilha e a quina principal, destacado na Figura 6, como o ângulo θ . O ângulo θ influencia no ângulo de *deadrise* e no ângulo de *trim* da embarcação. A influência no ângulo de *trim* ocorre conforme aumenta o ângulo θ , há um incremento no ângulo de *trim*. A influência no ângulo de *deadrise* é por uma formulação proposta por Lawrence, 1985, em que conforme aumenta o ângulo θ também há um incremento no ângulo de *deadrise*.

Outro dado da embarcação que é necessário o conhecimento para realização da estimativa da resistência ao avanço é a distância entra a linha de operação do propulsor até o VCG. A Figura 6 representa essa distância pela letra f. Essa distância influencia na estabilidade da embarcação, devido ao momento ocasionado pelo empuxo gerado pela hélice, fazendo com que a embarcação tenda a afundar a popa.

O primeiro dado de entrada a ser analisado separadamente será a velocidade. Na planilha é possível inserir uma faixa de velocidade que representa a operação do barco. A Tabela 8 destaca as influências da velocidade no desempenho da embarcação. A primeira influência associada à velocidade está na navegabilidade da embarcação, com formulações desenvolvidas por Savitsky e Brown, 1976, é calculada a influência da aceleração na popa (sendo 10% do LOA avante da popa) e no centro de gravidade. A interferência da velocidade na aceleração é por meio de um coeficiente $(V/L^{1/2})$ elevado na segunda potência, portanto, tem grande influência na aceleração.

Figura 23 - Dados de Entrada



Fonte: Própria.

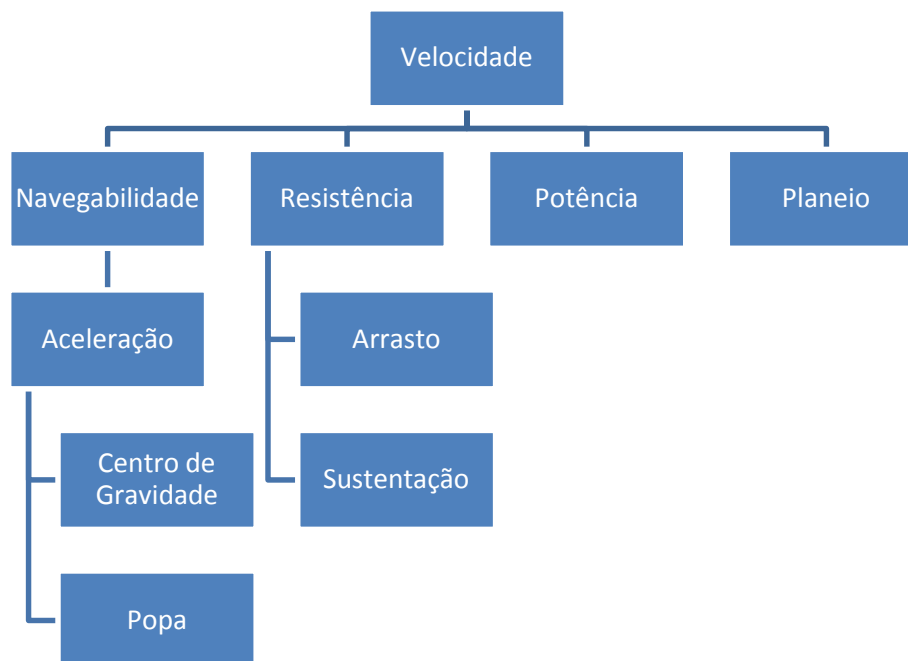
Importante destacar que é imprescindível respeitar as restrições existentes, apresentadas na Tabela 8, já que as equações são empíricas e baseadas em dados limitados.

Tabela 8 - Faixa de Aplicação

Parâmetro	Faixa
$\Delta LT / (0,01L)^3$	100-250
L/b	3-5
<i>Trim</i> (graus)	3-7
<i>Deadrise</i> (graus)	10-30
$H1/3/b$	0,2-0,7
$V/(L)^{1/2}$	2-6

Fonte: Própria.

Figura 24 - Influência da Velocidade

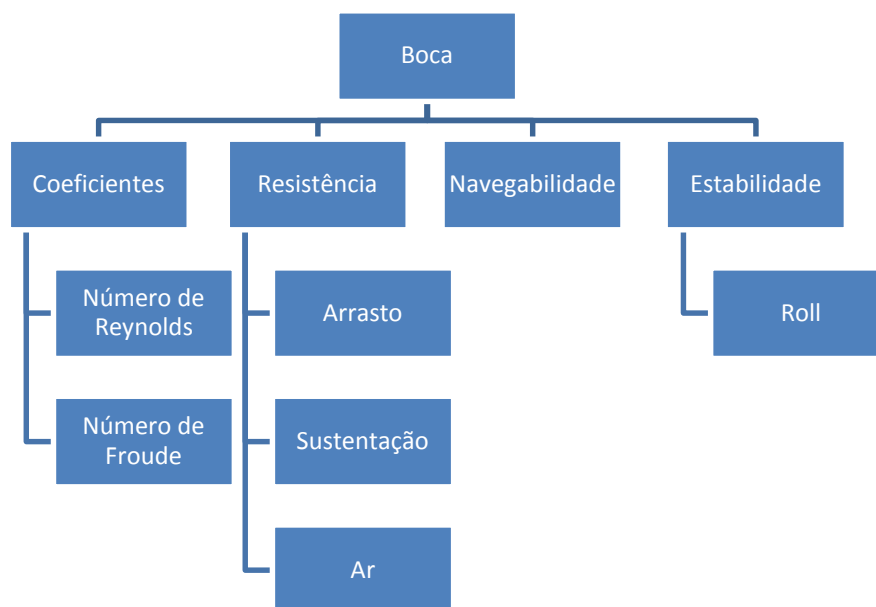


Fonte: Própria.

A segunda influência da velocidade é na Potência Efetiva, que como visto na revisão bibliográfica é o produto entre a velocidade e a resistência. Entretanto, a velocidade também tem influência direta na resistência, conforme aumenta a velocidade há um aumento contínuo na resistência até o desenvolvimento do regime de planeio, imediatamente, após entrar no regime há uma pequena redução na resistência que retorna a crescer após esse intervalo. O aumento da resistência de sustentação ocorre pelo desenvolvimento da velocidade da embarcação elevada ao quadrado, já a resistência friccional é em função da velocidade no fundo da embarcação, que como discutido na revisão bibliográfica, é menor que a velocidade desenvolvida pela embarcação, em razão de a pressão no fundo da embarcação ser maior do que a exercida na superfície livre.

Será apresentado, agora, a influência dos parâmetros que serão variados sistematicamente a fim de se realizar a análise e obter-se as possíveis conclusões do estudo. O primeiro parâmetro a ser analisado é a principal dimensão da embarcação, a boca, e é apresentado no fluxograma abaixo.

Figura 25 - Influência da Boca



Fonte: Própria.

É importante destacar, novamente, que a boca é a principal dimensão a ser considerada por ser a dimensão invariável independente da velocidade, do ângulo de *trim* e do regime de planeio ou não da embarcação. Por isso ela é dimensão adimensionalizada e todos os cálculos são realizados em função dela, portanto, desde os coeficientes calculados até a navegabilidade ela exercerá algum tipo de influência.

Os números de Reynolds (Re) e Froude são adaptados para embarcações planantes por meio da substituição do comprimento pela boca, sendo o número de Froude, denominado como Coeficiente de Velocidade (C_V) e descritos na seção 2.6. O enfoque é dado para os principais números adimensionais, mas ocorre a adaptação para os demais coeficientes (Coeficiente de Bloco $C_B = \nabla/B^3$).

$$C_V = \frac{V}{\sqrt{gB}} ; \quad Re = \frac{V\lambda B}{\nu}$$

Onde,

V – velocidade da embarcação;

g – aceleração da gravidade;

B – boca da embarcação;

λ – razão comprimento-boca molhada;

ν – viscosidade cinemática;

A influência da boca na resistência ao arrasto se dá pelos Coeficientes de Sustentação (C_L) e Coeficiente de Arrasto (C_D), já apresentados na revisão bibliográfica e observados que com o aumento da boca há uma pequena redução na resistência. Com relação à resistência do ar, a boca da embarcação influencia diretamente na área morta da embarcação (área fora da água), pois quanto maior a boca maior será a área morta e, conseqüentemente, maior a resistência aerodinâmica.

Ainda existe a influência da boca na estabilidade em *roll* da embarcação, assunto abordado por Lewandowski, 1996. E uma consequente navegabilidade melhor, por reduzir a aceleração no centro de gravidade e na popa da embarcação, conforme o aumento da boca, o que é possível se constatar pelas equações de Savitsky, 1976, descritas a seguir:

$$a_{CG} = 0,0104 \left(\frac{H_{1/3}}{B} + 0,084 \right) \left(\frac{\tau}{4} \right) \left(\frac{5}{3} - \frac{\beta}{30} \right) \left(\frac{V}{L^{1/2}} \right)^2 \left(\frac{L_{WL}}{BC_V} \right)$$

$$a_{popa} = a_{sp} \frac{\left(1 + 3,8 \left(\frac{L_{WL}}{B} - 2,25 \right) \right)}{\frac{V_K^2}{L^{1/2}}}$$

Onde:

acg – aceleração no centro de gravidade;

H_{1/3} – altura significativa, altura média do terço das ondas mais altas;

B – boca;

τ – ângulo de *trim* da embarcação;

β – ângulo de *deadrise* da embarcação;

V – velocidade da embarcação;

L – comprimento entre perpendiculares da embarcação;

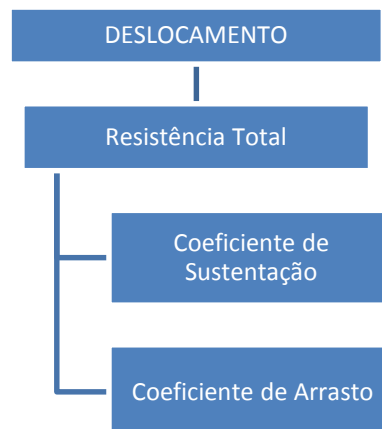
L_{WL} – comprimento na linha d'água da embarcação;

C_v - coeficiente de bloco.

O segundo parâmetro a ser variado será o deslocamento da embarcação, e as suas influências são destacadas no fluxograma,

Figura 26. Sendo imprescindível para o cálculo dos coeficientes, observar que o deslocamento está diretamente associado a resistência, onde quanto maior o deslocamento da embarcação maior será a resistência desenvolvida e, conseqüentemente, maior a potência necessária para desenvolver o regime de planeio.

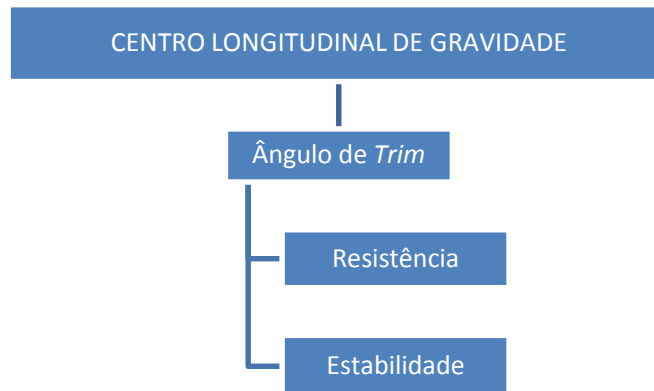
Figura 26- Influência do Deslocamento



Fonte: Própria.

O Centro Longitudinal de Gravidade (LCG) é o terceiro parâmetro a ser variado para futura análise e sua posição influencia, principalmente, no ângulo de *trim* e logo na estabilidade e na resistência da embarcação. A planilha permite variar a posição do LCG para diferentes velocidades o que permite balancear a embarcação. O fluxograma abaixo mostra essa influência.

Figura 27 - Influência Centro Longitudinal de Gravidade



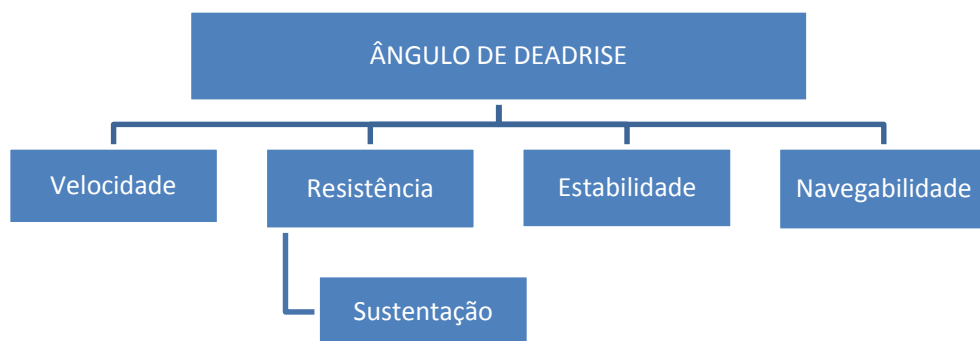
Fonte: Própria.

O ângulo de *trim* é uma consequência do posicionamento do centro longitudinal de a gravidade estar desalinhada com o centro longitudinal de flutuação, ou seja, caso seja desejado que a embarcação possua um ângulo de *trim* uma das maneiras de acontecer é alterando a posição dos equipamentos internos, de tal forma que a embarcação fique com um deslocamento diferente a ré da embarcação do que o avante.

A estabilidade da embarcação é dependente do LCG para o não desenvolvimento da instabilidade longitudinal (*porpoising*) e uma das maneiras de evitar a instabilidade é desloca o LCG avante da embarcação, outra seria adicionando os estabilizadores (*flaps*) na popa.

O último parâmetro que irá ser variado parametricamente para a realização da análise será o ângulo de *deadrise* da embarcação que, como já visto anteriormente, é o ângulo entre a quilha e a quina principal da embarcação. Será visto que sua influência está associada à velocidade, resistência, estabilidade e navegabilidade da embarção. Essas diferentes influências são caracterizadas no fluxograma abaixo.

Figura 28 - Influência Ângulo de *Deadrise*



Fonte: Própria.

A influência na velocidade se dá no fundo do casco da embarcação, que como já fora discutido é diferente da velocidade desenvolvida pela mesma. A influência do ângulo de *deadrise* é conforme maior o ângulo, maior será a diferença entre as velocidades, ou seja, menor será a velocidade no fundo do casco.

A influência na resistência se dá em virtude de quanto maior o ângulo de *deadrise* menor será a sustentação, pois com o aumento do ângulo há o impedimento para o desenvolvimento total da pressão de estagnação reduzindo assim a sustentação.

Com relação à estabilidade e navegabilidade o ângulo de *deadrise* determina os locais de navegação da embarcação, em que para um valor mínimo de 17 graus caracteriza uma embarcação para navegação em águas abrigadas, já caso a embarcação seja projetada para navegar em águas abertas, há a necessidade de um aumento considerável no ângulo de *deadrise* para que se obtenha um maior conforto para navegar.

3.3 Validação

Nessa seção será realizada a validação da planilha do Excel um trabalho desenvolvido por Pedro Kokron Cardoso dos Santos vinculado com a Universidade de São Paulo (USP) no ano de 2014. O trabalho é sobre a variação no desempenho de embarcações em alta velocidade em função da variação do LCG/Calado ao longo de uma viagem, e a análise é realizada em uma embarcação de planeio de 26 pés.

O trabalho estima a resistência pelo Método de Savitsky, publicado em 2011, que inclui a parcela da região de *spray* desconsiderada em suas publicações antigas e também nesse trabalho. A potência calculada é a efetiva que é o produto da resistência pela velocidade.

A validação será realizada graficamente comparando as curvas de potência para uma mesma faixa de velocidades. O resultado será satisfatório caso as curvas se assemelhem e possuam valores de potência próximos para mesma velocidade. Possíveis variações são esperadas e serão analisadas para garantir que a planilha reproduza resultados coerentes.

A Tabela 8 contém os dados de entrada utilizados no trabalho desenvolvido por Santos, 2014, necessários para estimativa da resistência utilizando a planilha. São geradas quatro curvas de potência em razão do trabalho realizar análise para quatro condições de carregamento de tripulação e combustível, em que o peso de cada pessoa é estimado em 75 quilogramas, e considerando 5 pessoas como tripulação. O tanque de combustível tem 300 litros, e considerando o equivalente a 300 quilogramas. Outro dado necessário é a quantidade de propulsores que, para essa embarcação é de apenas um. O ângulo de *deadrise* à meia nau não é disponibilizado no trabalho e foi estimado pelo próprio casco, utilizando o *software Solidworks* para obtenção do valor. O mesmo ocorre para o ângulo da linha do propulsor e para distância da linha do propulsor até o VCG, que não são fornecidos no trabalho e também são estimados.

Como a tabela também possibilita a inserção de dados sobre a superestrutura, estabilizadores e transmissão (eixo, leme e pé de galinha) esses componentes são desprezados ao inserir zero em suas respectivas células.

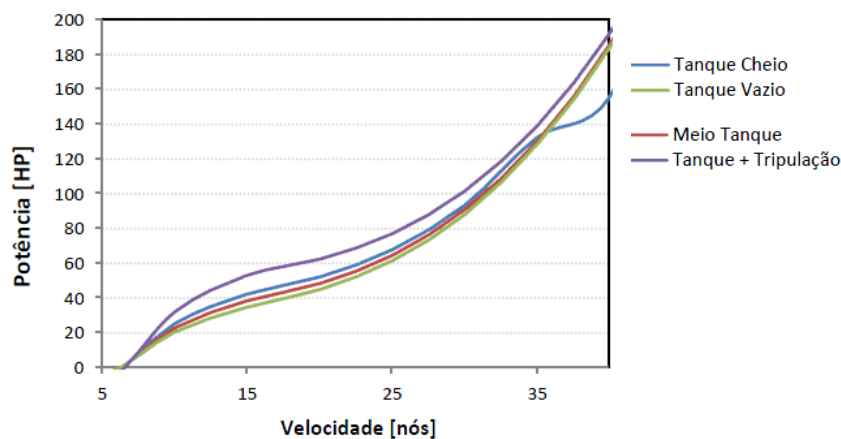
Tabela 9 - Dados utilizados por Santos (2014)

Parâmetro	Valor
Comprimento	7,9 m
Boca	2,3 m
Centro Vertical de Gravidade	0,3 m
Deslocamento: Tanque Cheio + Tripulação	2675 kg
Deslocamento: Tanque Meio Cheio + Tripulação	2525 kg
Deslocamento: Tanque Vazio + Tripulação	2375 kg
Deslocamento: Tanque Cheio	2300 kg
Ângulo de <i>Deadrise</i> Popa	19,9°
Ângulo de <i>Deadrise</i> Meia Nau	24,76°
Ângulo da Linha do Propulsor	4°
Distância Linha Propulsor até VCG	0,152 m
Centro Longitudinal de Gravidade	2,4 m
Faixa de Velocidade	7 – 35 nós
Número de Propulsores	1

Fonte: Própria.

O gráfico, Figura 29, apresenta o a potência obtida por Santos (2014) em uma faixa de velocidade de 0 a 35 nós. Como mencionado, existem quatro curvas para os quatro tipos de carregamento: tanque cheio com tripulação (curva roxa), tanque meio cheio com tripulação (curva vermelha), tanque vazio com tripulação (curva verde) e tanque cheio sem tripulação (curva azul). Como esperado, as curvas que requerem maior potência são aquelas com o maior deslocamento. A potência varia de 0 a 200 *horsepower* (HP) e tomando como referência as velocidades de 15, 25 e 35 nós são obtidos valores de 50, 80 e 140 HP de potência respectivamente, para condição com tanque cheio e tripulação de 5 pessoas.

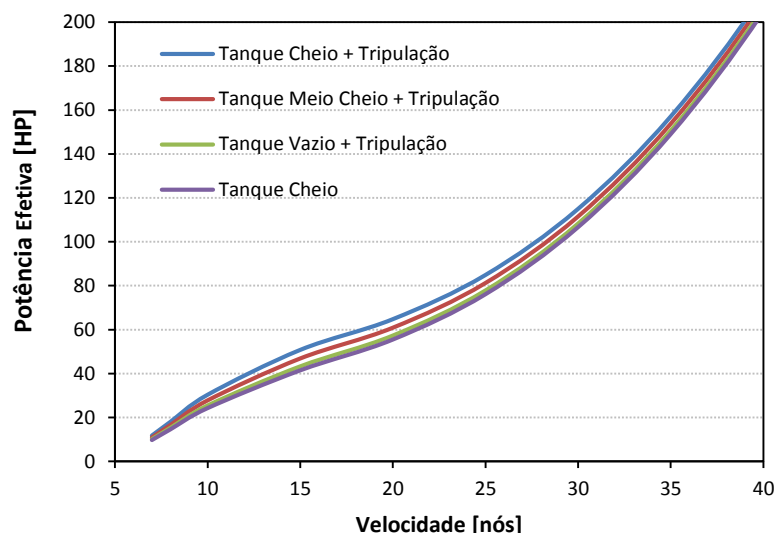
Figura 29 - Potência efetiva em função da velocidade. (Santos, 2014)



Fonte: SANTOS, 2014.

Inserindo os dados de entrada na planilha e selecionando a mesma faixa de velocidade para estimativa da potência (produto da velocidade pela resistência), obtém-se o gráfico representado na Figura 37, que para facilitar a comparação é plotado na mesma faixa de operação, tanto para potência quanto velocidade e são geradas as mesmas quatro curvas, alterando o deslocamento.

Figura 30 - Potência efetiva em função da velocidade



Fonte: Própria.

A Tabela 10 apresenta uma comparação entre os valores das potências para o mesmo valor de velocidade, sendo o deslocamento máximo da embarcação (tanque cheio e tripulação). O que fica evidente que há uma diferença significativa, conforme o aumento da velocidade. Apesar de o erro ser elevado para a velocidade de 35 nós pode-se considerar satisfatórios para velocidades normais de operação da embarcação que ficaria em torno de 25 nós.

Tabela 10 - Comparação dos Resultados

Velocidade [nós]	Potência (Santos, 2014) [HP]	Potência Planilha [HP]	Erro
15	50	50,77	1,52%
25	80	84,87	5,73%
35	140	157	10,82%

Fonte: Própria.

Essas principais diferenças ocorrem principalmente pela estimativa do ângulo de *deadrise* a meia nau, já que ele influencia no ângulo entre a quina e a quilha principal, que influencia diretamente no ângulo de *trim* e no próprio ângulo de *deadrise* para efetuar os cálculos da resistência.

Confirmada a funcionalidade da planilha por meio da revisão bibliográfica, fórmulas e validação pela comparação com Santos (2014), a seção a seguir será da análise de um casco nú de uma embarcação de 26 pés.

ANÁLISE PARAMÉTRICA

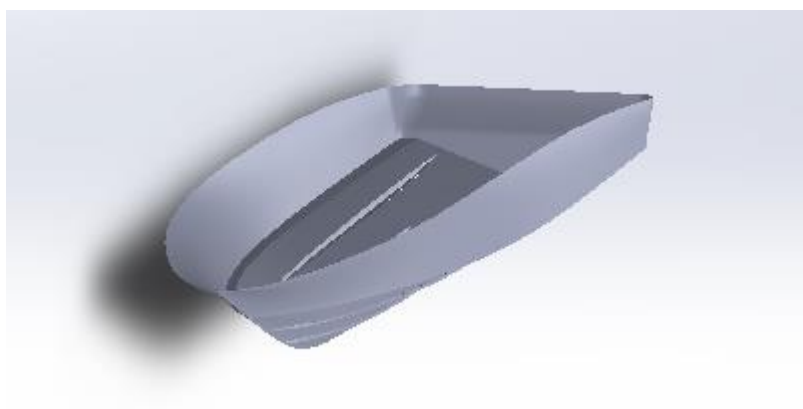
A análise consiste em uma variação paramétrica dos dados de entrada pré-selecionados que mais influenciam na resistência ao avanço de uma embarcação de planeio. Serão inicialmente estabelecidos os dados de entrada para então de maneira sistemática realizar uma análise paramétrica.

A variação paramétrica consiste em, a partir de uma embarcação base, variar um ou mais parâmetros (mantendo constante os demais), com o intuito de determinar a influência desses parâmetros na resistência ao avanço do casco. A análise consiste em variar o parâmetro em uma porcentagem de seu valor, ou em um incremento pré-determinado ou em valores já determinados anteriormente, como por exemplo, o deslocamento da embarcação.

Os parâmetros selecionados para variação são: boca, calado (em função do deslocamento), VCG, LCG e ângulo de *deadrise*. A escolha desses parâmetros para variação tem como objetivo comprovar que são os que mais influenciam na resistência ao avanço para então na sequência, caracterizar se a sua variação influenciam positiva ou negativamente na resistência, e se possível chegar a valores que determinem uma embarcação ótima, ou seja, com a menor resistência ao avanço e que atenda aos critérios de *porpoising*.

O estudo será desenvolvido a partir de um casco nú modelado no software Solidworks, Figura 31, fornecido por Santos, 2014. Os dados da embarcação base são apresentados na Tabela 11. O comprimento, boca e os ângulos de *deadrise*, foram obtidos utilizando o software Solidworks como instrumento de medição. O VCG, LCG, ângulo do propulsor e distância do propulsor até o VCG foram estimados para valores típicos de uma embarcação de planeio. O deslocamento foi estabelecido como tanque meio cheio (150 kg) com tripulação (5 pessoas de 70 kg). Além disso, foram estabelecidos 30 nós como a velocidade de serviço da embarcação base, que servirá para comparação.

Figura 31 – Casco utilizado como base



Fonte: Própria.

Tabela 11 - Dados Embarcação Base

Parâmetro	Valor
Comprimento	26 pés / 7,925 m
Boca	8,2 pés / 2,499 m
Ângulo de <i>deadrise</i> popa	17,26°
Ângulo de <i>deadrise</i> meia nau	24,76°
Deslocamento	5.567 lbf / 2.525 kg
VCG	3,30 pés / 1,006 m
LCG	7,87 pés / 2,399 m
Quantidade de Propulsores	1
Ângulo do Propulsor	4°
Distância do Propulsor até o VCG	0,5 pés / 0,152 m
Velocidade de Serviço	30 nós / 15,43 m/s

Fonte: Própria.

Determinada a embarcação base, a qual será realizada a análise paramétrica, serão desenvolvidas, na sequência, as variações de seus parâmetros. A sequência dos parâmetros a ser variada será: boca, calado e LCG. O ângulo de *deadrise* por ser uma característica de cada embarcação será tratado em conjunto com os parâmetros que serão variados.

A Tabela 12 apresenta os parâmetros e as suas respectivas variações. A variação na boca foi definida entre 5 e 10% do seu comprimento para mais e para menos. O calado será variado por três condições de carga: tanque cheio com tripulação, tanque vazio com tripulação e tanque cheio sem tripulação, sendo as variações 1, 2 e 3, respectivamente. O LCG foi determinado em variar entre 20 e 40 centímetros para mais e para menos, alterando assim suas posições para 2, 2,2, 2,6 e 2,8 metros.

O ângulo de *deadrise* irá oscilar de um mínimo e máximo característico para embarcações planantes para navegar em águas abrigadas, com incremento de um grau. Buscando manter uma harmonia na embarcação, o ângulo de *deadrise* à meia nau sofre uma variação proporcional a porcentagem variada em relação ao ângulo de *deadrise* na popa da embarcação, ou seja, ao reduzir para 17° o ângulo de *deadrise* na popa, há uma redução de 86%, portanto, uma redução de 86% ocorre no ângulo de *deadrise* a meia nau.

Na sequência, será apresentada a análise da variação paramétrica para os parâmetros determinados com início pela boca da embarcação, seguido pelo calado e LCG. Realizada a análise, será verificado o atendimento aos critérios de *porpoising* para a embarcação base.

Tabela 12 - Variações Paramétricas

Parâmetro	Varição 1	Varição 2	Varição 3	Varição 4
Boca	8,61 pés (2,6 m)	9,02 pés (2,7 m)	7,79 pés (2,4 m)	7,38 pés (2,2 m)
Deslocamento	5897 lbf (2.675 kg)	5236 lbf (2.375 kg)	5070 lbf (2.300 kg)	-
Ângulo de <i>Deadrise</i> Popa	17°	18°	19°	20°
Ângulo de <i>Deadrise</i> Meia nau	24°	25°	26°	27°
LCG	6,56 pés (2,0 m)	7,22 pés (2,2 m)	8,53 pés (2,6 m)	9,19 pés (2,8m)

Fonte: Própria.

4.1 Boca e Ângulo de *Deadrise*

Iniciando a análise com o primeiro parâmetro a ser variado, a boca da embarcação, foi decidido variar o parâmetro entre 5 e 10% acima e abaixo do seu valor real. Portanto, as análises irão ocorrer para os seguintes tamanhos de bocas: 7,38, 7,79, 8,61 e 9,09 pés. O ângulo de *deadrise*, assim como ângulo de *trim* serão apresentados em companhia com a boca da embarcação.

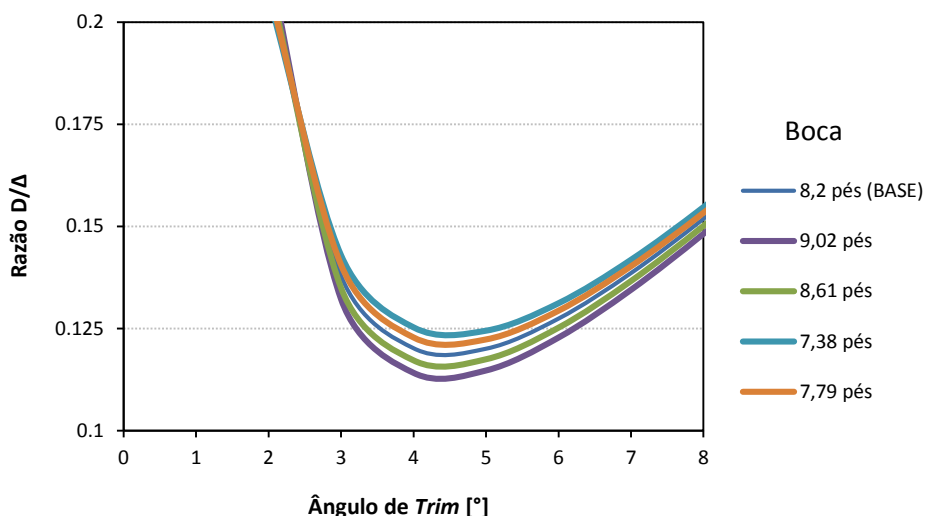
Para análise da boca será plotado o gráfico da razão arrasto-sustentação proposto por Savitsky, 1964. A Figura 39 apresenta a razão arrasto-sustentação para diferentes valores de ângulo de *trim*. Ainda serão plotadas diferentes curvas, que representam a variação no ângulo de *deadrise*, para assim poder avaliar sua influência. A equação que rege o gráfico é também a proposta por Savitsky, já abordada no presente trabalho e é destacada a seguir.

$$\frac{D}{\Delta} = \tan(\tau) + \frac{\left(\frac{V_1}{V}\right)^2 C_f \lambda}{C_L \cos(\beta) \cos(\tau)}$$

A razão boca-comprimento molhado foi calculada pela equação disponibilizada por Savitsky, 1964, apresentadas na seção 2.7.2. O mesmo se dá com a razão das velocidades, onde V é a velocidade avanço da embarcação e V_1 é a velocidade do casco em contato com a água. O coeficiente de sustentação (C_L) é o determinado para placas planantes com ângulo de *deadrise*. o coeficiente de fricção (C_f) se dá em função do número de Reynolds, que ocasiona uma redução no coeficiente, conforme aumenta o número de Reynolds.

A equação acima foi utilizada para plotar a razão arrasto-sustentação (D/Δ) para os quatro valores de boca, mencionados anteriormente em função do ângulo de *trim* e comparados com a embarcação base. Sendo o ângulo de *deadrise* da embarcação base (17,26°).

Figura 32 - Variação da razão arrasto-sustentação: ângulo de *deadrise* de 17,26°.



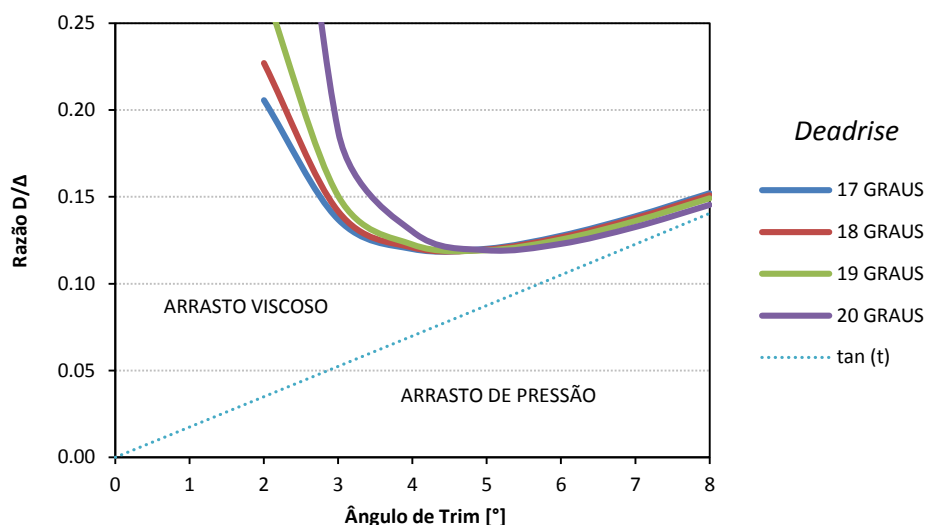
Fonte: Própria.

Por meio da análise gráfica, verifica-se que com o aumento no tamanho da boca da embarcação há uma redução na razão arrasto-sustentação. O que pode não parecer habitual, ocorre devido a um fenômeno similar que ocorre na aerodinâmica de asas de aviões, uma formação de uma região de vórtices próximas ao casco que reduz o arrasto viscoso. Esse fenômeno tende a reduzir o arrasto, conforme o aumento da boca. Portanto, uma embarcação com um incremento de 10% na boca proporciona redução na razão arrasto-sustentação de aproximadamente 5% para o ângulo de *trim* ótimo que será discutido a seguir.

Como mencionado na Figura 32, existe para todos os tamanhos de boca um valor ótimo do ângulo de *trim*, que é algo em torno de 4°, para esse ângulo de *trim* há a menor razão arrasto-sustentação. Com uma pequena redução no ângulo de *trim* há um ligeiro aumento na razão arrasto-sustentação. Já com um pequeno aumento no ângulo há um aumento não tão expressivo quanto à redução. Ou seja, no ponto de vista da razão arrasto-sustentação é vantajoso, se não possível navegar no *trim* ótimo, realizar o aumento no ângulo de *trim* da embarcação.

Outra análise realizada é a verificação da influência do ângulo de *deadrise* para uma boca constante. Na Figura 33 é variado o ângulo de *deadrise* para os valores já estabelecidos, sendo a boca da embarcação base (8,6 pés). Novamente é possível verificar que há um ângulo ótimo de *trim* em que a razão arrasto-sustentação é mínima. Para o ângulo de *deadrise* de 17 graus a menor resistência que pode ser esperada é aproximadamente 11% da sustentação para um ângulo de *trim* ótimo de 4 graus. O que diverge em 1% em relação ao trabalho apresentado por Savitsky, 1964, e em 30 minutos em relação ao ângulo de *trim*.

Figura 33 - Variação da razão arrasto-sustentação: boca de 8.61 pés.



Fonte: Própria.

Pela Figura 39, pode-se constatar que para valores de ângulo de *trim* de até 5 graus o aumento no ângulo de *deadrise* ocasiona um aumento na resistência, porém, para valores acima de 5 graus ocorre uma inversão, que não é esperada, e uma análise futura precisa averiguar o motivo. Todavia, o que é conveniente com o trabalho apresentado por Savitsky é que o ângulo de *trim* ótimo tem um pequeno aumento conforme aumenta o ângulo de *deadrise*. Ainda na Figura 33, é traçada uma reta que representa a tangente do ângulo de *trim*. O objetivo dessa reta é para separar os efeitos do arrasto viscoso do arrasto devido à pressão. É perceptível que para baixos valores de ângulo de *trim* há um predomínio do arrasto devido a fricção (viscoso) assim conforme, o ângulo de *trim* aumenta o arrasto devido à pressão começa a se sobressair. O que é esperado já que, conforme, o ângulo de *trim* aumenta, a área de planeio reduz, o que consequentemente reduz a área de contato do casco com a água, causando um maior arrasto devido a pressão.

4.2 Calado

Uma das maneiras de variar o calado é pelo deslocamento, portanto, foram consideradas quatro condições de carregamento, sendo elas: tanque cheio com tripulação, tanque meio cheio com tripulação (embarcação base), tanque vazio com tripulação e tanque cheio sem tripulação. Suas respectivas condições de cargas são apresentadas na tabela a seguir.

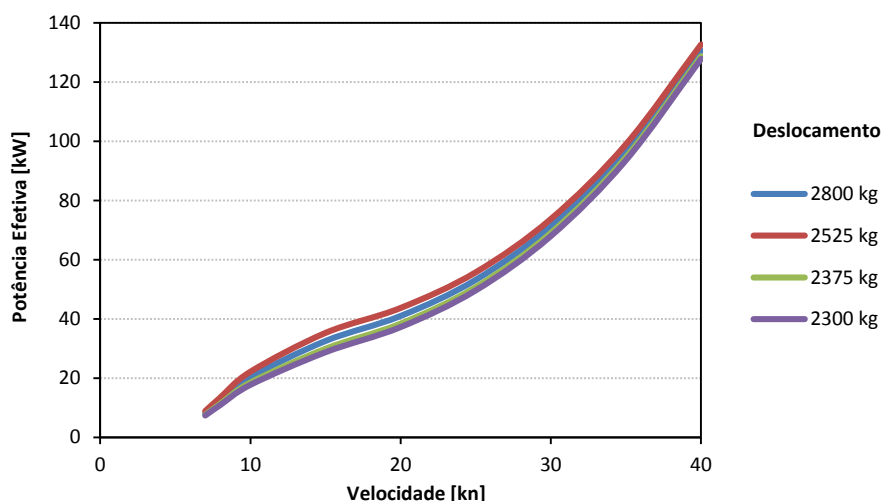
Tabela 13 - Condições de Carga

Condições	Peso (lbf)	Peso (kg)
Tanque cheio com tripulação	5.897	2.800
Tanque meio cheio com tripulação (base)	5.567	2.525
Tanque vazio com tripulação	5.236	2.375
Tanque cheio sem tripulação	5.076	2.300

Fonte: Própria.

Por meio dessas variações no deslocamento foi possível gerar o gráfico apresentado na Figura 34, da Potência Efetiva em função da velocidade. A velocidade está limitada às restrições de aplicações do método de Savitsky, por isso tem restrição inferior a 7 nós e superior a 40 nós.

Figura 34 - Potência Efetiva para Diferentes Deslocamentos



Fonte: Própria.

A maior potência se dá para a maior condição de carregamento com 5 pessoas na tripulação e tanque cheio, aumentando, gradativamente, conforme aumenta a velocidade. Seguido respectivamente pela embarcação base (curva azul), tanque vazio com tripulação (curva verde) e tanque cheio sem tripulação (curva roxa). Portanto, com o aumento do calado há um aumento na resistência. Para velocidade de 30 nós a embarcação base necessita de uma potência de 71,33 quilowatts (kW), a menor condição de carregamento (tanque cheio sem tripulação) uma potência de 67,97 kW e a maior condição de carregamento (tanque cheio e 5 tripulantes) uma potência de 73,71 kW.

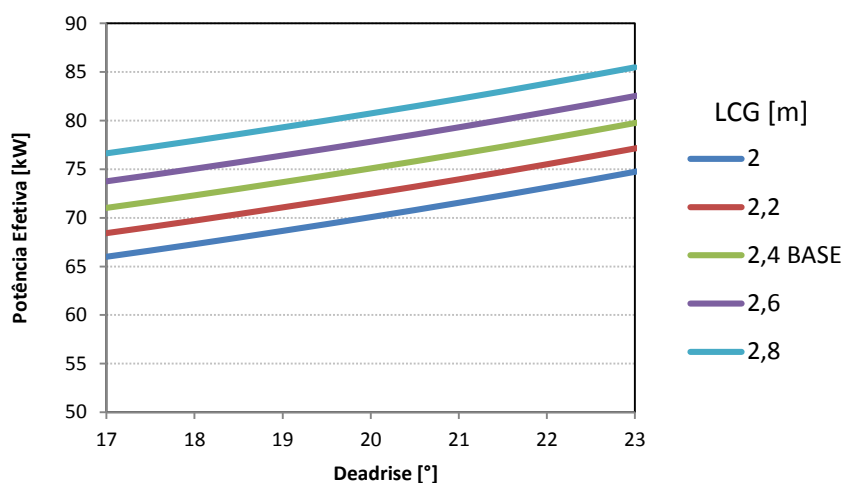
4.3 LCG e Ângulo de *Deadrise*

Na sequência da análise, foi realizada a variação no ângulo de *deadrise* para diferentes posições do centro longitudinal de gravidade (LCG), para obter resultados sobre a influência na Potência Efetiva da embarcação. A velocidade estabelecida foi a de serviço (30 nós).

Retomando a análise, foi realizada variando a posição do centro longitudinal da embarcação base em 20 e 40 centímetros acima e abaixo do seu valor, resultando nas seguintes posições do LCG: 2,0, 2,2, 2,6 e 2,8 metros. A variação no ângulo de *deadrise* foi realizada com incremento de 1 grau para cada variação sendo o limite inferior um valor mínimo para embarcações planantes (17°) e o limite superior em 20°. A Figura 42 apresenta os resultados para os diferentes LCG em que a embarcação base é representada pela curva verde. As maiores potências desenvolvidas ficaram para os maiores ângulos de *deadrise* combinados com as maiores posições do LCG.

É importante destacar que para o aumento ou a redução do ângulo de *deadrise* é necessário a consideração do local que a embarcação irá navegar, pois o ângulo está diretamente associado a navegabilidade. Pois para os ângulos menores de *deadrise* é comum para embarcações que irão navegar em águas abrigadas e o seu gradativo aumento se dá para navegações em mares abertos. Ou seja, não é possível buscar sempre o menor ângulo de *deadrise* para se obter uma menor potência, por exemplo o de 17°, sem considerar o local que a embarcação irá navegar e o conseqüente conforto para a tripulação.

Figura 35 - Potência x *Deadrise* para diferentes LCG



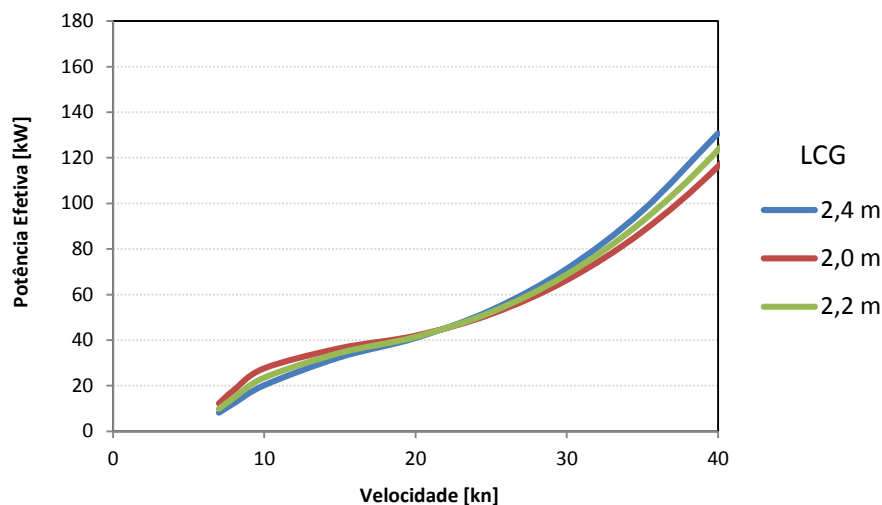
Fonte: Própria.

A variação do LCG, como pode ser vista, tem grande influência na potência. A posição é determinada conforme o arranjo interno da embarcação, ou seja, para uma embarcação de 26 pés até o posicionamento da tripulação a bordo pode influenciar e reduzir o consumo de combustível necessário para navegar.

Outra análise realizada foi a variação do LCG, junto com a velocidade para verificar a Potência Efetiva da embarcação em diferentes velocidades. Nessa análise, foram consideradas apenas as posições menores de LCG devido restrições do método. A velocidade foi variada também de acordo com as restrições no método limitada entre 7 nós e 40 nós. A Figura 36 apresenta os resultados.

Como mencionada, a posição do LCG tem influência sob a potência, e o objetivo da Figura 36 é demonstrar que há possibilidade de navegar variando a posição do LCG, bem como é possível uma redução no consumo. Para velocidades de até 20 nós é visível que uma posição mais avante do centro longitudinal de gravidade (curva azul), corresponde a menores potências e a partir de 20 nós uma posição de 2,0 metros (curva vermelha) é mais eficiente que as demais. Uma das maneiras de conseguir essa variação é com o posicionamento da tripulação dentro da embarcação.

Figura 36 - Potência x Velocidade para Diferentes LCG.



Fonte: Própria.

A última etapa será verificar a ocorrência de *porpoising*, começando com a embarcação base e para algumas variações paramétricas realizadas nela. Lembrando que é imprescindível a não ocorrência dessa instabilidade, principalmente por ela poder danificar a embarcação estruturalmente.

4.4 Análise de *Porpoising*

Já foi abordado que *porpoising* é uma instabilidade longitudinal característica de embarcações planantes ao navegar em águas calmas. Os limites para não ocorrência da instabilidade podem ser facilmente analisados pelos coeficientes básicos de planeio (ângulo de *trim* e coeficiente de sustentação). Pelos estudos gerados por Day e Haag (1952), é possível garantir ainda na fase de projeto a não ocorrência dessa indesejada oscilação.

Os limites para não ocorrência de *porpoising* serão determinados para embarcação base, e a análise resultante indicará as diferentes variações possíveis. A primeira determinação é o coeficiente de sustentação, que é calculado pela seguinte equação:

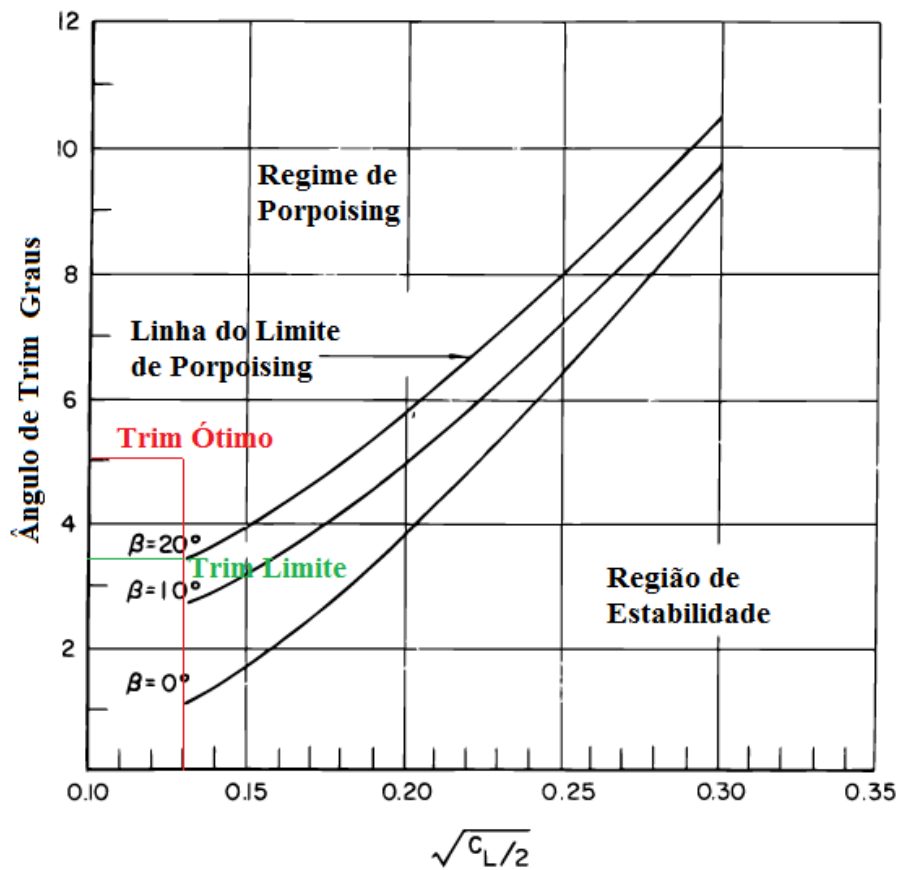
$$C_{L\beta} = \frac{\Delta}{\frac{1}{2}\rho V^2 B^2}$$

Para a embarcação base, em que a boca é de 8,2 pés e a velocidade de serviço é de 30 nós, chega-se a um coeficiente de sustentação igual a 0,033286. O gráfico apresentado por Day e Haag é a apresentado a seguir (Figura 37), e para verificação do ângulo de *trim* para não ocorrência das oscilações é necessário dividir o coeficiente por 2, e extrair a raiz quadrada. Chegando-se assim em um valor de 0,129.

A Figura 37 destaca o valor obtido para o coeficiente de sustentação e verifica que o ângulo de *trim* máximo para não ocorrência de *porpoising* é entre 3 e 4 graus, para um ângulo de

deadrise de 20°. Ainda no gráfico é possível reparar que a medida que o coeficiente de sustentação reduz, indicando um carregamento leve ou uma embarcação de alta velocidade, o limite do ângulo de *trim*, para estabilidade longitudinal, também reduz. Então ao aumentar o ângulo de *deadrise* aumenta a possibilidade de ângulos de *trim* para que não ocorra a instabilidade. Caso uma embarcação, a uma dada velocidade e carregamento, esteja sofrendo o fenômeno de *porpoising* a regra é reduzir o ângulo de *trim* como medida de segurança. A redução do ângulo de *trim* pode ser obtida de diversas maneiras, como já fora mencionado, uma delas é pela variação da posição longitudinal de gravidade avante da embarcação. Se não for possível essa variação outra forma é pela da instalação e acionamento dos estabilizadores ao custo da pequena adição de resistência.

Figura 37 - Limites de Porpoising



Fonte: Própria.

Realizando a análise para a embarcação base com um ângulo de *deadrise* igual a 20°, obteve-se um valor de ângulo de *trim* ótimo igual a 5°, que corresponde a menor razão arrasto-sustentação. Porém, os limites propostos na Figura 37, estipulam que o limite para não ocorrência da instabilidade para essa configuração da embarcação seja de aproximadamente 3 graus e 30 minutos. Portanto, devido às restrições estabelecidas pelo limite de *porpoising* a embarcação necessita navegar a um ângulo de *trim* desfavorável, em que a resistência é maior, para garantir o conforto e a segurança da tripulação, além da integridade estrutural da embarcação.

CONCLUSÃO

Métodos semi-empíricos como os propostos por Savitsky e Holtrop são ferramentas poderosas nas fases iniciais do projeto, pois obtém-se uma estimativa da resistência ao avanço (e conseqüente potência) por meio de poucos parâmetros do casco e do sistema propulsivo. Porém, é importante ressaltar que é apenas uma estimativa inicial, com uma margem de erro associado à diversos fatores como, por exemplo, a interação casco-hélice não considerada.

Por meio da revisão bibliográfica foi possível determinar os parâmetros que mais influenciam na estimativa da resistência ao avanço de um casco planante. Utilizando uma planilha do Excel que implementa o Método de Savitsky, foi possível quantificar a influência de cada parâmetro na resistência.

Utilizando uma embarcação de 26 pés para análise, foi possível validar a planilha comparando os resultados obtidos neste trabalho com aqueles publicados por (Santos, 2014). Pela variação paramétrica dos principais parâmetros (boca, ângulo de *deadrise*, calado e LCG) da embarcação foi possível verificar a influência de cada parâmetro na resistência ao avanço do casco analisado.

Verificou-se que diferente do que ocorre para cascos deslocantes um aumento de 10% na boca de uma embarcação planante eventualmente reduz em aproximadamente 5% a resistência ao avanço devido à formação de vórtices nas bordas de contato do casco com água.

Variando o calado da embarcação (deslocamento em diferentes condições de carga), foi possível confirmar que quanto maior o calado maior será a resistência ao avanço e conseqüentemente maior a potência necessária para a embarcação navegar.

A posição do centro longitudinal de gravidade tem influência principalmente no ângulo de *trim* da embarcação, o que acaba por ser um fator determinante para navegabilidade. Foi constatado que o aumento da posição do LCG ocasiona um aumento na Potência Efetiva da embarcação. Também, constatou-se que se for possível variar a posição do LCG para diferentes velocidades é possível reduzir o consumo de combustível. No caso em questão, verificou-se que para uma velocidade de até 20 nós é mais vantajoso uma posição avante do LCG enquanto que para velocidades acima de 20 nós uma posição a ré da embarcação possibilita uma maior autonomia.

O ângulo de *deadrise* é sem dúvida um dos principais parâmetros do barco considerado na fase de projeto, pois está diretamente associado a resistência ao avanço e suas variações influenciam não somente na resistência, mas também na integridade estrutural da embarcação. Foi observado que com o aumento do ângulo de *deadrise* há um aumento na resistência, mas também é importante destacar que o aumento do ângulo também pode ocasionar uma possível redução na resistência, já que permite que a embarcação navegue em ângulos de *trim* maiores, sem que ocorra a instabilidade longitudinal denominada *porpoising*.

Para continuação do trabalho fica a sugestão de validar a planilha por meio de uma embarcação real e provas de mar ou a utilização de modelos em escala reduzida e testes em tanques de prova. Além de uma comparação com outros estudos existentes na literatura.

REFERÊNCIAS

Blount, D. L. e Hubble, E. N.. **Sizing Segmental Section Commercially Available Propellers for Small Craft**. *Propellers '81 Symposium, SNAME*. Virginia Beach, USA, pp.111-138, 1981.

Hadler, J. B. e Hubble, E. Nadine.. **Prediction of the Power Performance of the Series 62 Planing Hull Forms**. *SNAME Transactions*. 1971, Vol. 79.

Hadler, J. B.. **The Prediction of Power Performance on Planing Craft**. *Trans. SNAME*. 1966, Vol. 74.

Radojcic, D. 1985. **An Approximate Method for Calculation of Resistance and Trim of the Planing Hulls**. *SNAME Power Boat Symposium*. Florida, Feb., 1985.

Savitsky, D. **Hydrodynamic Design of Planing Hulls**. *Marine Technology*, 1964.

Savitsky, D. e Brown, P. W. **Procedures for Hydrodynamic Evaluation of Planing Hulls in Smooth and Rough Water**. *Marine Technology*, 13, 1976.

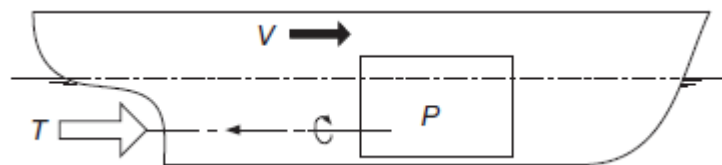
Savitsky, D.; Delorme, M. F. e Datla, R. **Inclusion of Whisker Spray Drag in Performance Prediction Method for High-Speed Planing Hulls**. *Marine Technology*, 44, 2007.

SANTOS, Pedro Kokron Cardoso do; TANCREDI, Thiago Pontin. Variação no desempenho de embarcações em alta velocidade em função da variação do LCG/Calado ao longo de uma viagem: lancha de 26 pés. In: CONGRESSO NACIONAL DE TRANSPORTE AQUAVIÁRIO, CONSTRUÇÃO NAVAL E OFFSHORE, 25., 2014, Rio de Janeiro. **Variação no desempenho de embarcações em alta velocidade em função da variação do LCG/Calado ao longo de uma viagem: lancha de 26 pés**. São Paulo: Usp, 2014. p. 1 - 9.

ANEXO 1

Nessa seção será abordado um breve resumo sobre potência. De acordo com Molland, 2011, o sistema propulsivo de uma embarcação pode ser reduzido basicamente na conversão da energia do combustível em empuxo (T) para vencer a resistência ao avanço (R_T) a uma determinada velocidade (V). A **Figura 38** representa um esquema ilustrativo do sistema propulsivo simplificado.

Figura 38 - Representação Simplificada Sistema Propulsivo.



Fonte: MOLLAND, 2011.

A Potência Efetiva (P_E) de uma embarcação pode ser calculada pela da seguinte equação:

$$P_E = R_T * V$$

Onde, R_T é a Resistência Total e V a velocidade da embarcação.

O que se vislumbra em um projeto de uma embarcação de recreio é a obtenção de altas velocidades com o menor consumo possível de combustível, para isso acontecer é necessário uma redução na resistência total da embarcação e/ou uma maximização do empuxo gerado por ela, ou seja, uma melhora na eficiência do sistema propulsivo. O aumento na eficiência do sistema propulsivo é benéfico tanto para custos operacionais, com um menor consumo de combustível, quanto para o meio ambiente, já que as embarcações emitem diversos tipos de gases poluentes. Além das análises paramétricas, que serão realizadas nesse trabalho, há outras medidas para redução na Potência Efetiva de uma embarcação que podem ser alcançadas, seja pela otimização em procedimentos operacionais - navegar com velocidade reduzida, traçar a melhor rota na navegação, *trim* ótimo, pintura da embarcação, limpeza da hélice e estabilidade de banda, entre outros - ou a utilização de sistemas de propulsão auxiliares como a utilização do vento, ondas e energia solar.

Segundo Molland a potência do navio pode ser estimada por:

1. experimentos em modelos ou extrapolação;
2. uso de Séries Sistemáticas (Série de Resistência do Casco ou Série do Propulsor);
3. teoricamente;
4. uma mistura de (1), (2) e (3).

Definições:

P_E - Potência Efetiva – Potência necessária para navegar a velocidade desejada –

$$P_E = V \times R_T$$

P_T – Potência Propulsiva – Empuxo Propulsor x Velocidade de Avanço –

$$P_T = T \times V_A$$

V_A – Velocidade de Avanço – Velocidade que o fluido chega na hélice;

P_D – Potência Entregue – Potência necessária a ser entregue para unidade propulsora (no espelho de popa);

$$QPC - \textit{Quasi-propulsive Coefficient} - \eta_D = \frac{\textit{Potência Efetiva}}{\textit{Potência Entregue}} = \frac{P_E}{P_D}$$

A potência total instalada vai exceder a potência entregue devido as perdas existentes no sistema de transmissão (eixo e engrenagens) e por uma margem de projeto que considera a rugosidade, incrustação e mal tempo.

$$\eta_T - \textit{Eficiência Transmissão} - \eta_T = \frac{\textit{potência entregue}}{\textit{potência requerida no motor}}$$

P_i – Potência Instalada –

$$P_i = \frac{P_E}{\eta_D} \times \frac{1}{\eta_T} + \textit{margens (rugosidade, incrustação e mal tempo)}$$

Com isso o problema da potência instalada é dividido em três partes:

1. estimativa da Potência Efetiva;
2. estimativa da QPC (η_D);
3. estimativa das Margens;

A estimativa da Potência Efetiva envolve a estimativa da resistência total do navio, que será detalhada na sequência da revisão bibliográfica e estimada pelo método de Savitsky. O QPC depende principalmente do propulsor, mas também há uma parcela da interação do propulsor com o casco. As margens para condição do tempo e da água irão depender do local de atuação da embarcação, mas será em torno de 15 a 30% da potência instalada.

ANEXO 2 - Interior Casaria Azimut 78 pés



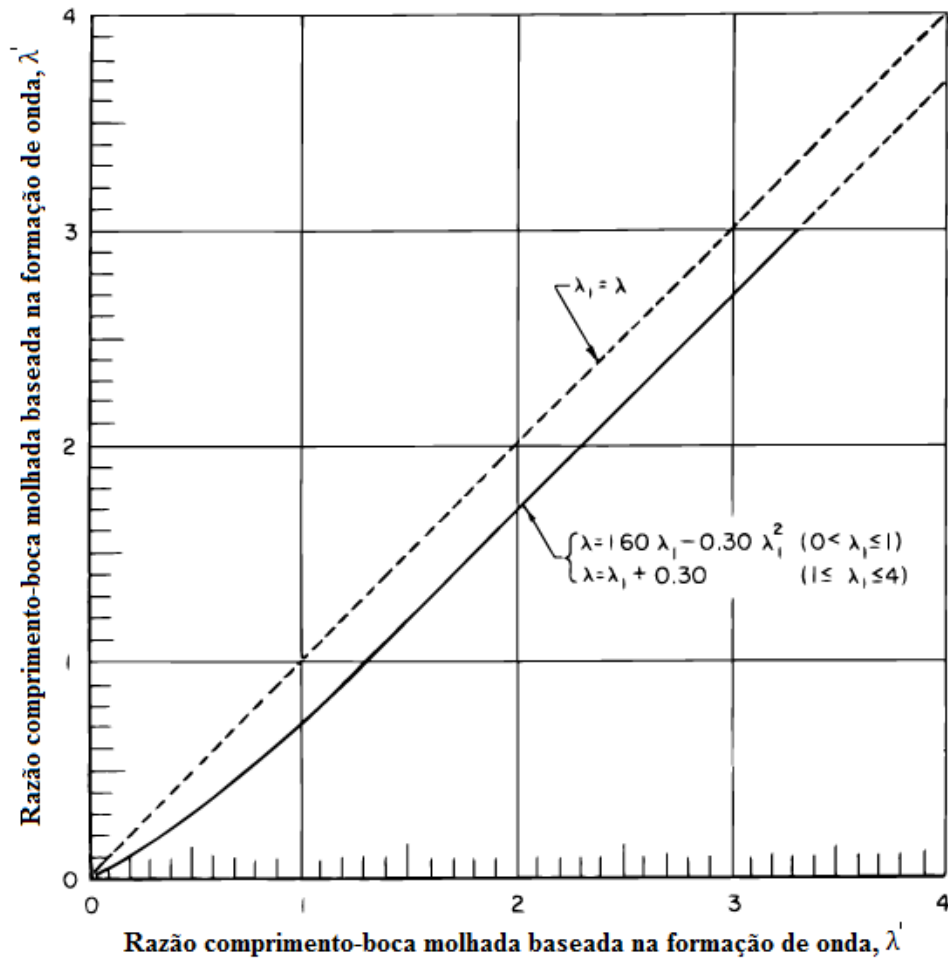
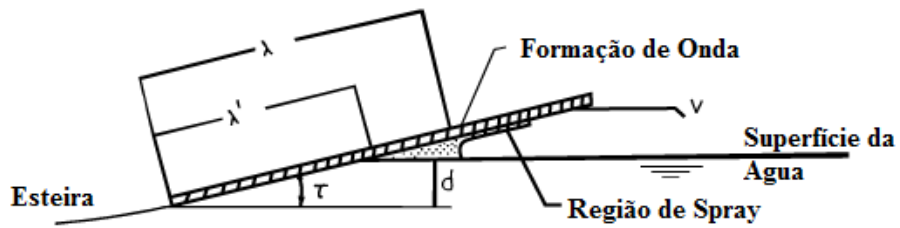
Fonte: retirado de azimutyachts.ua/office/975/i/file/Flybridge78-eng.pdf.

ANEXO 3

O presente anexo contém as demais informações acerca do trabalho de Savitsky. Gráfico λ por λ_1 , plotado através da base dados disponível de trabalhos publicados por Savitsky. Por conveniência e facilitar o uso da equação o gráfico referente ao coeficiente de sustentação é plotado para seguinte equação:

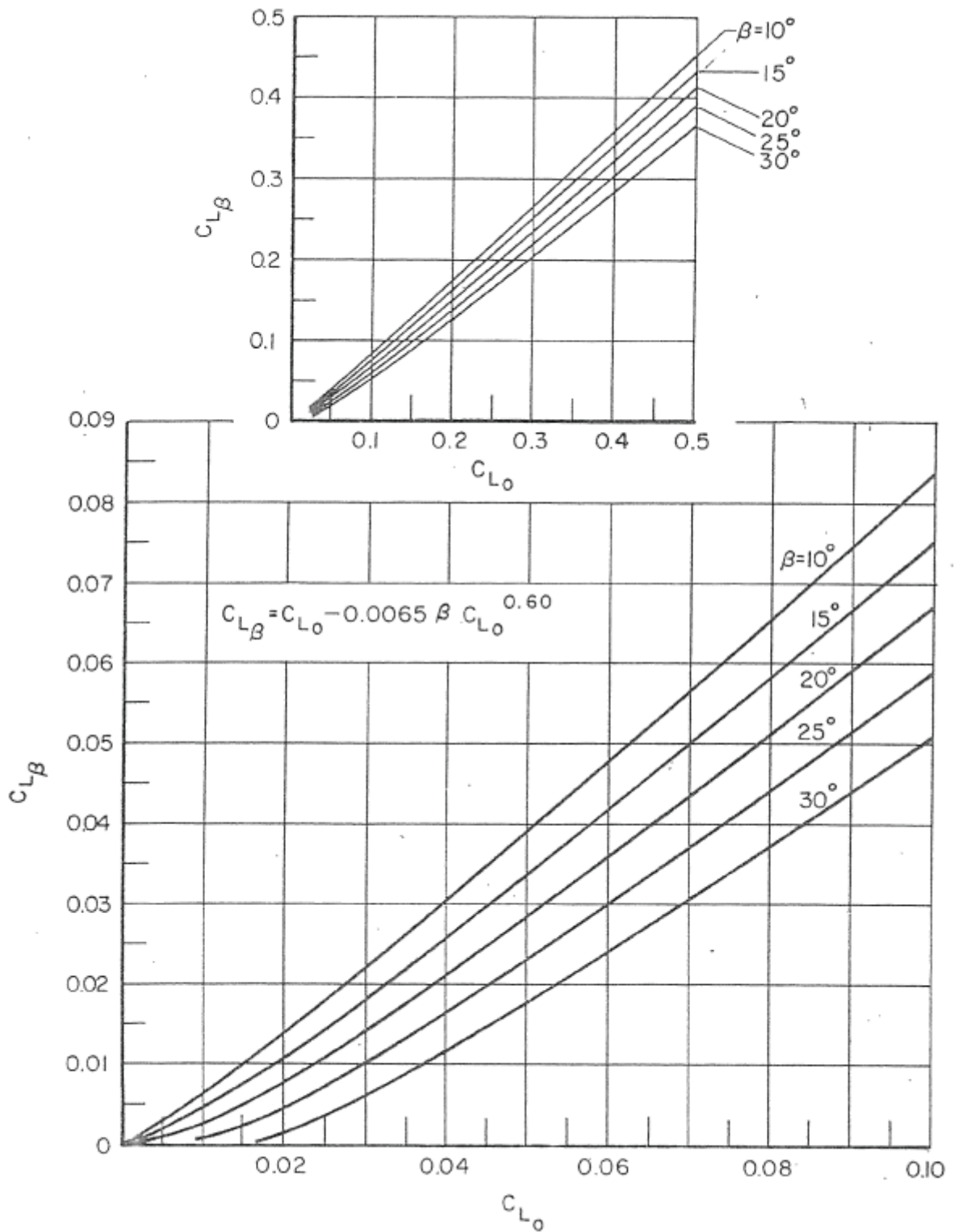
$$C_{L\beta} = C_{L_0} - 0,0065\beta C_{L_0}^{0,60} \quad (29)$$

Gráfico - λ por λ_1



Fonte: SAVITSKY, 1964.

Coefficiente de Sustentação para Superfícies com Ângulo de *Deadrise*



Fonte: SAVITSKY, 1964.

Gráfico (V_1/V) em função da razão comprimento-boca molhada (λ) para ângulo de *deadrise* de 0° , 10° , 20° e 30° e diferentes ângulos de *trim* (2° , 4° , 6° , 8° , 10° , 12° e 14°).

Razão V_1/V para diferentes ângulo de *deadrise*

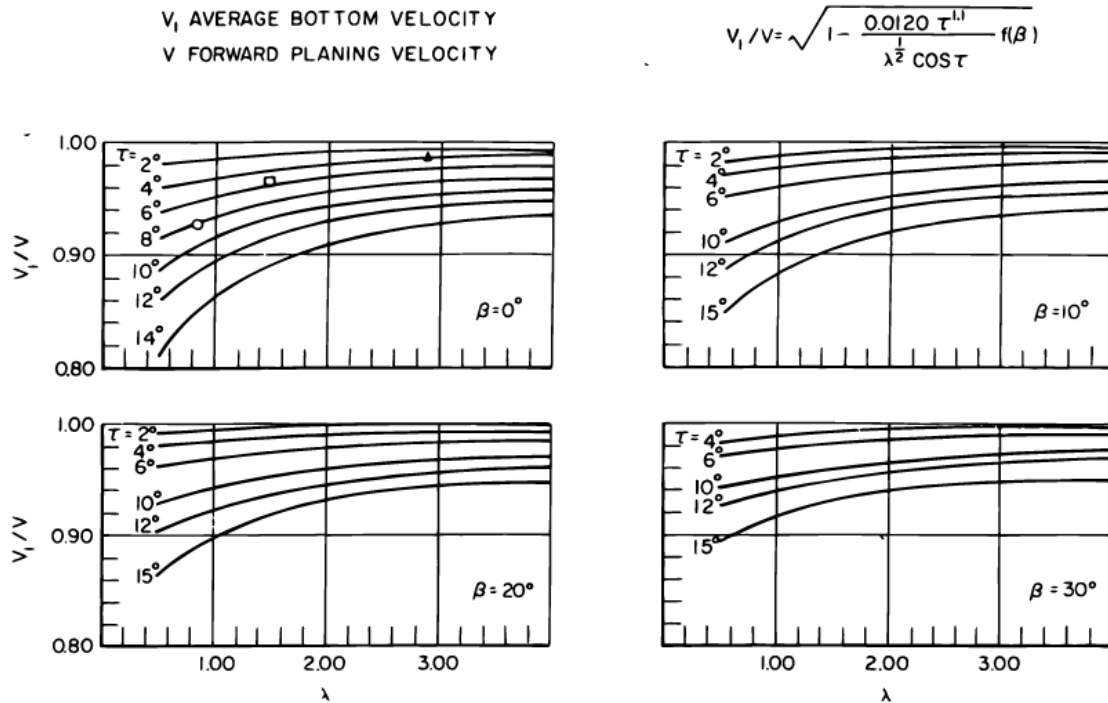


Fig. 14

Fonte: SAVITSKY, 1964.

Centro de Pressão Superfícies Planantes

Savitsky, 1954, demonstrou que é possível determinar o centro de pressão de uma superfícies planantes separando os centros de sustentação dinâmico e de flutuação. O centro de pressão dinâmico é tomado como sendo 75% do comprimento molhado avante da popa transom. Já o centro de pressão de flutuação assume-se estar a 33% do comprimento molhado avante da popa transom. Adicionandom o momento, considerando a popa transom como referência para cada uma das componentes do carregamento total do centro de pressão (dinâmico e flutuação) e dividindo pelo carregamento total obtem-se uma expressão para a distância do centro de pressão avante da popa transom. Utilizando as equações para os componentes das forças de sustentação dinâmica e de flutuação, equação (7), o centro de pressão (C_p) é dado como a distância avante da popa transom pela seguinte equação:

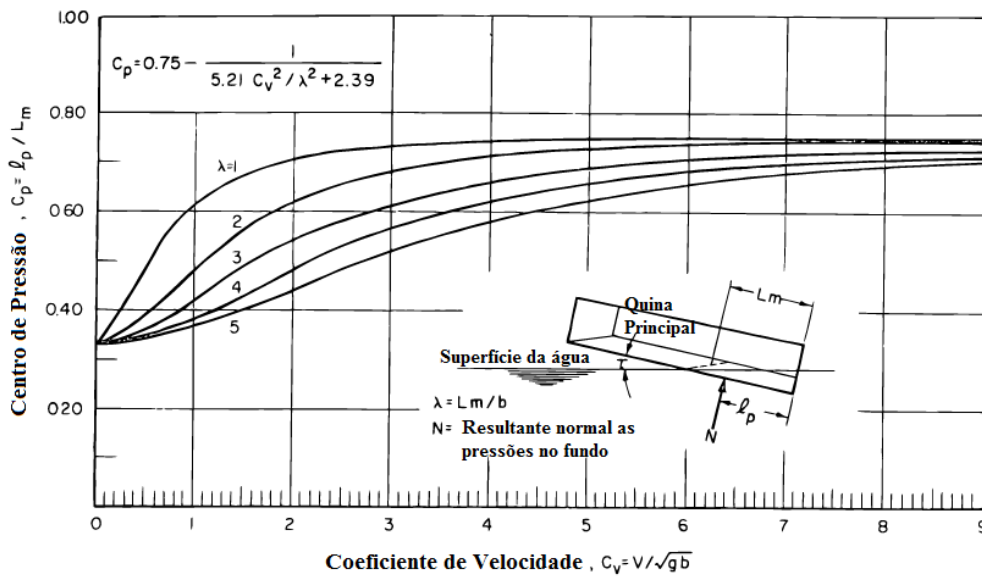
$$C_p = \frac{l_p}{\lambda b} = 0,75 - \frac{1}{5,21 \frac{C_v^2}{\lambda^2} + 2,39} \quad (34)$$

Onde, C_p , é a razão da distância longitudinal da popa transom até o centro de pressão dividido pelo comprimento-molhado característico. As distâncias utilizadas para formulação

são aproximações bastante aceitáveis para desenvolvimento empírico. Ainda em sua publicação de 1954, Savitsky, exhibe um gráfico comparando dados de teste real com a equação (34). Constantando-se que obtem-se resultados satisfatórios utilizando a equação. É evidente que C_p independe do ângulo de *trim* e *deadrise*.

Abaixo um gráfico da equação (34) e ao saber o comprimento molhado característico e o coeficiente de velocidade, o valor de C_p é facilmente determinado utilizando o gráfico.

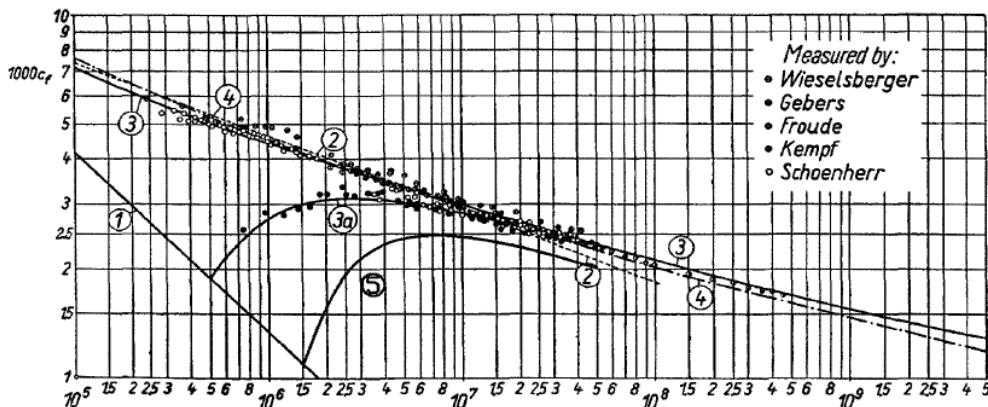
Centro de Pressão de Superfícies Planantes



Fonte: SAVITSKY, 1964.

Coeficiente de Fricção Turbulento de Schoenherr, 1932:

Coeficiente de Fricção de Schenherr.



Curve(1): Laminar Flow : $C_f = \frac{1.328}{\sqrt{RN}}$

Curve(5): Transitional Flow : $C_f = \frac{0.074}{\sqrt[3]{RN}} - \frac{4800}{RN}$

$RN = \frac{U_\infty l}{\nu}$

Fonte: SAVITSKY, 1964.