

GIULIANA BONATELLI DARIO

**ANÁLISE HIDRODINÂMICA DE
EMBARCAÇÕES FLUVIAIS**

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Naval.

São Paulo

1999

GIULIANA BONATELLI DARIO

**ANÁLISE HIDRODINÂMICA DE
EMBARCAÇÕES FLUVIAIS**

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Mestre em
Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia Naval e Oceânica

Orientador:
Prof. Dr. Toshi-ichi Tachibana

1999

"Somente a vontade do homem mede a
distância entre o possível e o impossível."

Mário Quintana

Aos meus pais, *José Antonio* e *Maria Helena*, pelo afeto, confiança, sabedoria, incentivo e paciência, que foram fundamentais para eu vencer mais esta etapa de minha vida.

Obrigada.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Toshi-ichi Tachibana, meu orientador, pelo convite feito ainda na graduação para trabalhar ao seu lado no IPT e juntos iniciarmos um trabalho de pesquisa, do qual uma etapa se finda agora. Esta conquista é fruto do carinho, da atenção e da paciência com que ele me orientou.

Ao IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo) e mais especificamente à DITT (Divisão de Tecnologia e Transportes) pelo apoio aos primeiros passos e contatos com a pesquisa e em especial ao Eng^o Carlos Daher Padovezi, pelos incentivos, sugestões e comentários constantes desde o início deste trabalho.

Aos colegas da Pós-Graduação - André, Alex, Alexandre, Carla, Celso, César, Claudiomar, Dewar, Euclides, Eduardo, Gregório, Jairo, Jean Carlos, Luís, Miguel, Miesher, Paulo, Ricardo, Robson, Rogério, Vladimir, Walter e ao estagiário Henrique, e demais que conquistei em função deste trabalho, por tornarem este período em que estivemos juntos, além de profícuo, bastante agradável e pelo ensinamento de convívio que sempre foram de grande valia.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da EPUSP - Sandra, Idamaris, Neuza, Fátima, Clarice, Lânia, Adevanir, César, Adenílson e Elias pelos serviços prestados durante todo esse tempo, bem como pela paciência e apoio que tiveram com a minha pessoa.

Ao Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pela confiança em mim depositada em desenvolver um trabalho de mestrado.

À **CAPES** - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e ao **CNPq** - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico por oferecerem condições para que eu pudesse me dedicar exclusivamente a este trabalho.

Ao corpo docente e funcionários da FATEC-JH base da minha inspiração acadêmica.

Aos Professores Drs. Mardel Bongiovanni de Conti e Sérgio Rocha Santos pelas importantes sugestões e incentivos valiosos.

Aos meus irmãos, Graziela e Giampaolo, sobrinhos Gabriel e Guilherme, e demais familiares que sempre estiveram presentes em todos os momentos de minha vida.

Ao Sérgio H. Werner pelo constante estímulo e apoio durante a realização deste trabalho.

A todos que por ventura tenha esquecido de mencionar que direta ou indiretamente me auxiliaram ou inspiraram o desenvolvimento da pesquisa e que permitiram chegar a esta dissertação e outros trabalhos.

RESUMO

Este trabalho apresenta alguns procedimentos e métodos para auxiliar o projeto de embarcações fluviais: empurradores, chatas e autopropelidos. Fazendo uma comparação com fórmulas usadas pelos diversos autores - Latorre, Bari e IPT, obteve-se fórmulas e conceitos relevantes para uma imediata aplicação às hidrovias brasileiras.

O fenômeno de águas rasas foi considerado através da aplicação de diferentes formulações propostas por diversos autores, que se mostraram insatisfatórias devido à não consideração dos efeitos não lineares inerentes ao fenômeno aqui abordado. Propõe-se uma correção das formulações através de um termo semelhante a “teoria não-linear de consideração do efeito de águas rasas”.

Para validação das diferentes formulações, foram utilizados os resultados experimentais com modelo reduzido e protótipo do Comboio de Pesquisas do Rio Araguaia.

ABSTRACT

This paper presents a few procedures and methods used to support the project of inland vessels: tugs, barges and self-propelled ship. Through the comparison of formulas used by the several authors - Latorre, Bari and IPT, new relevant formulas and concepts were obtained that can apply immediatly to the "Brazilian inland navigation".

The shallow water phenomenon was considered through a study of different formulations proposed by different authors, these formulations were not satisfactory to solve the problem due to the fact that they did not take into account non-linear effects inherent to the phenomena described in this paper. It is proposed a correction of these formulations through a similar term to the "non-linear theory of shallow waters effects".

In order to validate the different formulations, the experimental results from a reduced model and prototype of the "Araguaia River's Research Convoy" were used.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	i
AGRADECIMENTOS.....	ii
RESUMO.....	iv
“ABSTRACT”.....	v
SUMÁRIO.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	xi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xviii
Capítulo 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Apresentação do Problema	4
1.2 Objetivo do Trabalho.....	5
Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica	7
Capítulo 3 - As Embarcações Fluviais.....	10
3.1 Automotores	10
3.2 Chatas	12
3.3 Empurradores.....	14
3.4 Comboio	15
Capítulo 4 - Características Principais das Embarcações	18
4.1 Comprimento	19
4.2 Boca	23
4.3 Calado	26
4.4 Pontal	29
4.5 Deslocamento	30
4.6 Coeficientes de Forma	32
Capítulo 5 - Propulsão	34
5.1 Problemas de Propulsores de Embarcações Fluviais.....	39
5.2 Condições de Projeto	41
5.3 Diâmetros e Números de Hélices	42
5.4 Coeficientes Propulsivos	42

Capítulo 6 - Estabilidade	44
Capítulo 7 - Resistência à Propulsão	47
7.1 Componentes da Resistência	47
7.2 Resistência à Propulsão	48
7.3 Efeito de Águas Rasas	58
7.4 Formulações para Águas Rasas	62
Capítulo 8 - Aplicação a um Caso - Comboio Araguaia Tocantins	65
8.1 Características do Comboio Araguaia	65
8.2 Resultados	66
8.2.1 Dimensões Principais	67
8.2.2 Resistência	68
8.2.3 Efeito de Águas Rasas	70
Capítulo 9 - Conclusões	83
Capítulo 10 - Proposta de Continuação de Trabalho	85
Capítulo 11 - Bibliografia	88
ANEXOS 1	A.1
ANEXOS 2	A.2
ANEXOS 3	A.6
ANEXOS 4	A.12
ANEXOS 5	A.23
ANEXOS 6	A.33

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 -	Mapa do Brasil com as Hidrovias	3
Figura 3.1.1 -	Perfil de um Automotor[23]	12
Figura 3.2.1 -	Plano de Uma Chata Tanque do Rio Araguaia [23]	14
Figura 3.2.2 -	Plano de Uma Chata Graneleira do Rio Araguaia [23]	14
Figura 3.2.3 -	Plano de Uma Chata Roll On - Roll Off do Rio Araguaia [23]	14
Figura 3.3.1 -	Perfil Longitudinal do Empurrador [22]	15
Figura 3.4.1 -	Comboio Tipo Tietê [22]	17
Figura 3.4.2 -	Comboio Tipo Paraná [22]	17
Figura 4.1.1 -	Comprimento (L) x BHP/Eixo [26]	20
Figura 4.1.2 -	Calado X Comprimento [5]	21
Figura 4.1.3 -	Comprimento X Deslocamento e Comprimento/Boca [5]	22
Figura 4.2.1 -	Dimensões Preliminares do Empurrador [5]	23
Figura 4.2.2 -	Relação Estimada para Boca Calculada X Boca Real [5]	25
Figura 4.2.3 -	Boca X Comprimento [20]	26
Figura 4.3.1 -	Calado X Comprimento [20]	27
Figura 4.3.2 -	Calado X Comprimento [19]	29
Figura 4.5.1 -	Dimensões dos Diferentes Tipos de Chatas [5]	31
Figura 4.6.2 -	C_B X Deslocamento [19]	33

Figura 5.1 - Diagrama de Burril para Previsão de Quantidade de Cavitação em Pás de Hélice [38].....	40
Figura 7.2.1 - Empurrador Quinado [21]	51
Figura 7.2.2 - Empurrador de formas Curvas Tri-Hélice [21]	51
Figura 7.2.3 - Empurrador com Semi-Túnel [21]	51
Figura 7.2.4 - Roorda – Formas de Chata [43]	55
Figura 7.3.1 - Variação Típica do Efeito de Água Rasas [47]	60
Figura 7.4.1 - Gráfico de Schlichting's [39]	63
Figura 8.2.1 - Gráfico de Comparação das Formulações de Resistência para Uma Chata.....	68
Figura 8.2.2 - Gráfico de Comparação das Formulações de Resistência para Duas Chata em Paralelo.....	69
Figura 8.2.3 - Comparação de Potência com as Formulações Adotadas para Uma Chata.....	69
Figura 8.2.4 - Comparação de Potência com as Formulações Adotadas para Duas Chatas em Paralelo	70
Figura 8.2.5 - Comparação da Resistência com as Formulações Adotadas para Uma Chata.....	71
Figura 8.2.6 - Comparação da Resistência com as Formulações Adotadas para Duas Chatas em Paralelo.....	72
Figura 8.2.7 - Resultados da Comparação de Q para as Três Formulações com os Resultados de escala para comboio de Uma Chata	73

Figura 8.2.8 - Diagrama de Blocos sobre a Metodologia de Cálculo Efetuada.....	74
Figura 8.2.9 - Resultados da Comparação de Q para as Três Formulações com os Resultados de escala para comboio de Duas Chatas em Paralelo	75
Figura 8.2.10 - Resultados de Q com Correção dos Coeficientes \underline{w} e \underline{t} para Uma Chata.....	77
Figura 8.2.11 - Resultados de Q com Correção dos Coeficientes \underline{w} e \underline{t} para Duas Chatas em Paralelo	78
Figura 8.2.12 - Gráfico de Comparação de Resistência de TADA para Uma Chata	79
Figura 8.2.13 - Gráfico de Comparação de Resistência de TADA para Duas Chatas em Paralelo	80
Figura 8.2.14 - Gráfico de Comparação de Torque para Uma Chata	81
Figura 8.2.15 - Gráfico de Comparação de Torque para Duas Chatas em Paralelo .	82
Figura 10.1 - Diagrama de Blocos [51].....	86
Figura A.1.1 - Curvas de KT e KQ do Hélice Kaplan.....	A.4

LISTA DE TABELAS

Tabela 8.1.1 - Características da Embarcação da AHITAR.....	66
Tabela 8.2.1 - Resultados das Formulações Apresentadas para Chata.....	67
Tabela 8.2.2 - Resultados das Formulações Apresentadas para Empurradores	67
Tabela 8.2.3 - Resultados das Formulações Apresentadas para Automotores	67
Tabela A.1.1 - Ensaio de Resistência ao Avanço no Tanque de Provas do IPT com Modelo em Escala 1:13 do Comboio Araguaia – Extrapolação para Escala Real $h = \infty$, para as condições : Uma Chata e Duas Chatas em Paralelo	A.1
Tabela A.1.2 - Ensaio de Resistência ao Auto-Propulsão Tanque de Provas do IPT com Modelo em Escala 1:13 do Comboio Araguaia – Extrapolação para Escala Real $H = 2,0$ m, para as condições : Uma Chata e Duas Chatas em Paralelo	A.2
Tabela A.1.3 - Ensaio em Escala Real Medidas no Eixo (n e Q) e de Velocidades – Oitava Viagem – Hélices B-Troost $h = 9,0$ m.....	A.2
Tabela A.1.4 - Hélice da Série Kaplan (em dutos).....	A.3
Tabela A.2.1 - Cálculo da área da secção mestra para as duas condições estudadas	A.5
Tabela A.2.2 - Resultados da resistência para a equação de Lackenby	A.5
Tabela A.2.3 - Valores de resistência para lackenby para as duas condições: Uma Chata e Duas Chatas em Paralelo.....	A.6

Tabela A.2.4 - Tabela do cálculo de $\frac{\Delta C_f}{C_f}$ da equação de Sudô.....	A.6
Tabela A.2.5 - Desenvolvimento da formulação de Sudô.....	A.6
Tabela A.2.6 - Resultados de resistência usando Sudô	A.7
Tabela A.2.7 - Resultados dos cálculos do gráfico de Schlichting's	A.8
Tabela A.2.8 - Dados obtidos do gráfico de Shlichting's.....	A.8
Tabela A.2.9 - Resultados de resistência para o método de Shlichting's para Uma Chata.....	A.8
Tabela A.2.10 - Resultados de resistência para o método de Shlichting's para Duas Chatas em Paralelo	A.9
Tabela A.2.11 - Resultados de resistência para as formulações usadas nas duas condições, Uma Chata e Duas Chatas em Paralelo	A.9
Tabela A.3.1 - Dados do ensaio de resistência de auto-propulsão no tanque de provas do IPT, com modelo em escala 1:13 do Comboio Araguaia-Tocantins para escala real H = 2,00 m, já mostrado anteriormente.....	A.11
Tabela A.3.2 - Cálculo de T para Uma Chata e para as três formulações.....	A.11
Tabela A.3.3 - Cálculo de T para Duas Chatas em Paralelo e para as três formulações	A.11
Tabela A.3.4 - Cálculo de $\frac{KT_o}{J^2}$ para as três equações na condição Uma Chata.....	A.12

Tabela A.3.5 - Cálculo de $\frac{KT_o}{J^2}$ para as três equações na condição Duas Chatas em Paralelo.....	A.12
Tabela A.3.6 - Dados de saída do Programa Matlab para o cálculo de J.....	A.14
Tabela A.3.7 - Resultados ótimos de J para as três equações para Uma Chata ..	A.14
Tabela A.3.8 - Resultados ótimos de J para as três equações para Duas Chatas em Paralelo.....	A.15
Tabela A.3.9 - Resultado de n (rotação) para as três equações e para Uma Chata.....	A.15
Tabela A.3.10 -Resultado de n (rotação) para as três equações e para Duas Chatas em Paralelo.....	A.16
Tabela A.3.11 - Cálculo de J_o para as três equações e para Uma Chata.....	A.17
Tabela A.3.12 - Cálculo de J_o para as três equações e para Duas Chatas em Paralelo.....	A.17
Tabela A.3.13 - Cálculo de KQ_o para as três equações para Uma Chata.....	A.17
Tabela A.3.14 - Cálculo de KQ_o para as três equações para Duas Chatas em Paralelo.....	A.18
Tabela A.3.15 - Cálculo Q_o para as três equações para Uma Chata	A.18
Tabela A.3.16 - Cálculo Q_o para as três equações para Duas Chatas em Paralelo.....	A.19
Tabela A.3.17 - Cálculo Q para as três equações para Uma Chata.....	A.19
Tabela A.3.18 - Cálculo Q para as três equações para Duas Chatas em Paralelo.....	A.20

Tabela A.3.19 - Valores de Q experimental fornecidos pelo IPT	A.20
Tabela A.3.20 - Comparação dos valores de Q normatizados, Q experimental e para as três equações, para a condição Uma Chata.....	A.20
Tabela A.3.21 - Comparação dos valores de Q normatizados, Q experimental e para as três equações, para a condição Duas Chatas em Paralelo.....	A.21
Tabela A.4.1 - Correção dos Coeficientes \underline{w} e \underline{t} de Lackenby para Uma Chata	A.22
Tabela A.4.2 - Correção dos Coeficientes \underline{w} e \underline{t} de Lackenby para Duas Chatas em Paralelo.....	A.22
Tabela A.4.3 - Correção dos Coeficientes \underline{w} e \underline{t} de Schlichting's para Uma Chata	A.22
Tabela A.4.4 - Correção dos Coeficientes \underline{w} e \underline{t} de Schlichting's para Duas Chatas em Paralelo.....	A.23
Tabela A.4.5 - Valores de t e w Lackenby para Uma Chata	A.23
Tabela A.4.6 - Valores de t e w Lackenby para Duas Chatas em Paralelo	A.23
Tabela A.4.7 - Valores de Schlichting's para Uma Chata	A.23
Tabela A.4.8 - Valores de t e w para Schlichting's para Duas Chatas em Paralelo.....	A.24
Tabela A.4.9 - Novos coeficientes para as equações de Lackenby e Sudô.....	A.24
Tabela A.4.10 - Resultados de T para Lackenby e Sudô para Uma Chata	A.24
Tabela A.4.11 - Resultados de T para Lackenby e Sudô para Duas Chatas em Paralelo.....	A.24

Tabela A.4.12 - Novos coeficientes para as equações de Schlichting's	A.25
Tabela A.4.13 - Resultados de T para Schilichting's para Uma Chata.....	A.25
Tabela A.4.14 - Resultados de T para Schilichting's para Duas Chatas em Paralelo.....	A.25
Tabela A.4.15 - Resultado de J^*n , adotando o diâmetro do propulsor, sendo um B-Troost, igual a 1,15 m	A.26
Tabela A.4.16 - Resultados de $\frac{KT_o}{J^2}$ para as três equações para Uma Chata	A.26
Tabela A.4.17 - Resultados de $\frac{KT_o}{J^2}$ para as três equações para Duas Chatas em Paralelo.....	A.26
Tabela A.4.18 - Resultados do programa Matlab para as inúmeras equações de KT	A.27
Tabela A.4.19 - Resultados de J para as três equações para Uma Chata	A.27
Tabela A.4.20 - Resultados de J para as três equações para Duas Chatas em Paralelo.....	A.28
Tabela A.4.21 - Resultados de n (rotação) para as três equações para Uma Chata	A.28
Tabela A.4.22 - Resultados de n (rotação) para as três equações para Duas Chatas em Paralelo.....	A.28
Tabela A.4.23 - Resultados de J_o para as três equações para Uma Chata.....	A.29
Tabela A.4.24 - Resultados de J_o para as três equações para Duas Chatas em Paralelo.....	A.29

Tabela A.4.25 – Resultados de KQ_o para as três equações para Uma Chata.....	A.29
Tabela A.4.26 - Resultados de KQ_o para as três equações para Duas Chatas em Paralelo.....	A.30
Tabela A.4.27 – Resultados de Q_o para as três equações para Uma Chata.....	A.30
Tabela A.4.28 - Resultados de Q_o para as três equações para Duas Chatas em Paralelo.....	A.30
Tabela A.4.29 – Resultados de Q normativo para as três equações para Uma Chata	A.30
Tabela A.4.30 - Resultados de Q normativo para as três equações para Duas Chatas em Paralelo.....	A.31
Tabela A.4.31 - Comparação dos dados experimentais e dos resultados das três equações para Uma Chata.....	A.31
Tabela A.4.32 - Comparação dos dados experimentais e dos resultados das três equações para Duas Chatas em Paralelo	A.31
Tabela A.5.1 - Dados dos coeficiente fornecidos pelo IPT.....	A.32
Tabela A.5.2 – Valores de resistência para Uma Chata.....	A.32
Tabela A.5.3 – Valores de resistência para Duas Chatas em Paralelo.....	A.32
Tabela A.5.4 – Valores de J^*n	A.32
Tabela A.5.5 – Valores de T para Uma Chata	A.33
Tabela A.5.6 - Valor de T para Duas Chatas em Paralelo	A.33

Tabela A.5.7 - Valores de $\frac{KT_0}{J^2}$ para as duas condições, Uma Chata e Duas Chatas em Paralelo.....	A.33
Tabela A.5.8 – Resultados do programa Matlab para as raízes de J para Uma Chata	A.34
Tabela A.5.9 - Resultados do programa Matlab para as raízes de J para Duas Chatas em Paralelo.....	A.34
Tabela A.5.10 - Cálculo de n (rotação para as duas condições: Uma Chata e Duas Chatas em Paralelo.....	A.35
Tabela A.5.11 - Cálculo de J_0 para as duas condições; Uma Chata e Duas Chatas em Paralelo.....	A.35
Tabela A.5.12 - Cálculo de KQ para as duas condições; Uma Chata e Duas Chatas em Paralelo.....	A.35
Tabela A.5.13 - Valores de Q_0 para as duas condições; Uma Chata e Duas Chatas em Paralelo.....	A.36
Tabela A.5.14 - Resultados para comparação do valor de Q normatizado para a equação de TADA para Uma Chata.....	A.36
Tabela A.5.15 - Resultados para comparação do valor de Q normatizado para a equação de TADA para Duas Chatas em Paralelo.....	A.36

LISTA DE SÍMBOLOS

- ρ - Densidade específica da água;
- Δ - Deslocamento;
- χ - Fator de potência;
- σ - Índice de cavitação;
- ∇ - Volume de deslocamento;
- λ - Razão da escala do modelo da embarcação;
- λ_1 - Comprimento da onda;
- δ_C - Coeficiente de empuxo;
- η_o - Eficiência do propulsor em água aberta;
- η_p - Eficiência propulsiva;
- η_{iR} - Eficiência relativa rotativa;
- $\frac{A_E}{A_o}$ - Razão área expandida do hélice pela área do disco do hélice;
- A_M - Área da secção mestra;
- B** - Boca moldada da embarcação;
- B_C - Boca do comboio;
- BHP** - Potência no eixo;
- BM** - Raio metacêntrico;

- C_B - Coeficiente de bloco;
- C_f - Coeficiente de resistência ao atrito;
- C_R - Coeficiente de resistência residual;
- C_T - Coeficiente de resistência total;
- C_V - Coeficiente volumétrico;
- C_{WP} - Coeficiente de linha d'água;
- C_{WS} - Coeficiente de superfície molhada;
- D - Diâmetro do hélice,
- DHP** - Potência entregue ao hélice;
- DWT** - Deslocamento leve;
- EHP** - Potência efetiva;
- e_{rr} - Eficiência relativa rotativa;
- f - Borda livre mínima;
- F** - Fator de multiplicação de Howe = 0,07289;
- F_N - Número de Froude;
- F_h - Número de Froude de profundidade;
- g - Aceleração da gravidade;
- GM** - Altura metacêntrica;
- H** - Calado médio da embarcação;
- h - Profundidade do canal de navegação;

- J** - Coeficiente de avanço do hélice;
- J₀** - Coeficiente de avanço do hélice em água aberta;
- KB** - Posição vertical do centro de carena;
- KG** - Posição vertical do centro de gravidade;
- KQ** - Coeficiente de torque do hélice;
- KQ₀** - Coeficiente de torque do hélice em água aberta;
- KM** - Posição vertical do metacentro ;
- KT** - Coeficiente de empuxo do hélice;
- KT₀** - Coeficiente de empuxo do hélice em água aberta;
- L** - Comprimento total da embarcação;
- L_C** - Comprimento do comboio;
- L_E** - Comprimento do corpo de entrada;
- L_{PP}** ou **LB_p** - Comprimento entre perpendiculares;
- L_S** - Comprimento do corpo de saída;
- L_{wl}** - Comprimento na linha d'água;
- n** - Número de rotações do hélice;
- n₀** - Número de rotações do hélice em água aberta;
- N_C** - Número de chatas em linha;
- N_R** - Número de chatas em colunas;
- P** - Pontal da embarcação;
- p** - Passo do hélice;

- $\frac{P}{D}$ - Razão passo geométrico do hélice por diâmetro;
- qpa - Coeficiente de potência específica;
- Q - Torque desenvolvido pelo hélice;
- Q_o - Torque desenvolvido pelo hélice em água aberta;
- R - Resistência ao avanço;
- R_F - Resistência de atrito;
- R_n - Número de Reynolds;
- R_r - Resistência residual;
- R_T - Resistência total;
- S - Valor obtido pela equação de Sudô;
- S_M - Superfície molhada;
- t - Coeficiente de redução da força propulsora;
- T - Empuxo fornecido pelo hélice;
- V - Velocidade da embarcação;
- V_A - Velocidade de avanço;
- V_o - Velocidade em água aberta;
- V_w - Velocidade da onda;
- V_∞ - Velocidade a profundidade infinita;
- w - Coeficiente de esteira efetiva;
- W - Largura da via;

Z - Número de pás de um hélice.

Índices usados :

∞ - quando considera-se profundidade infinita;

h - quando considera-se profundidade finita **h**.

Siglas mencionadas

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo;

ITTC - International Towing Tank Conference;

JSNAJ - Journal of Society Naval Architects of Japan;

AHITAR - Administração da Hidrovia Tocantins Araguaia;

PRADS - Practical Design and Shipbuilding Symposium;

NSMB - Neederland Ship Model Basin.

Capítulo 1 – Introdução

“Da largura que a terra do Brasil tem para o Sertão não trato, por que até agora não houve quem a andasse por negligência dos portugueses que, sendo grandes conquistadores de terras, não aproveitam delas, mas contentam-se de as andar arranhando ao longo do mar como caranguejos”. Foram essas as palavras de desabafo do Frei Vicente de Salvador, tido como o primeiro historiador nacional, no seu relato lendário, *A História do Brasil, 1500 a 1627*.

Depois de quatro séculos do relato do Frei, o Brasil é hoje uma terra tão larga quanto comprida, pois desde as bandeiras paulistas, foi pelos rios que no Brasil finalmente descobriu-se um vastíssimo território de montanhas, pântanos, prados e selvas e foi por essas águas que os desbravadores conseguiram desvendar o interior, por canoa ou chalana e se abasteceram de tudo, de pau-brasil, cana-de-açúcar a ouro. Graças a essas vias fluviais que banham o interior, o país foi servido com as primeiras superestradas, dando início a uma série de hidrovias, figura 1.1, entre elas Madeira, Araguaia-Tocantins, São Francisco, Paraguai-Paraná, Tietê-Paraná e do Sul, que cruzam o Brasil, da Amazônia aos pampas, do

litoral ao Pantanal e outras ainda em desenvolvimento que são Nordeste e Leste. Trata-se de meia dúzia de “Mississipis”, cuja revitalização oferece eficiência, economia e lazer, além da garantia de um meio de transporte com baixíssimo impacto sobre o meio ambiente.

Segundo Cunha e Silva [10] na comunidade científica internacional, observa-se um consenso de que a modalidade de transporte que menos agride o meio ambiente é aquela sobre as águas, pelo motivo elementar de que sua infra-estrutura na grande maioria dos casos, está praticamente disponível para operação; como exemplo, a devastação acarretada pela implantação da infra-estrutura necessária ao transporte rodoviário/ferroviário é da ordem de 5 hectares/km, enquanto que o transporte hidroviário, em suas condições naturais, esse índice é praticamente nulo.

O Brasil é um país privilegiado em termos de disponibilidade de recursos para a navegação hidroviária/costeira.

Dos 8,5 milhões de km² da área territorial brasileira, mais de três quartos, ou seja, 6,5 milhões de km², estão situados na área de influência direta do sistema hidroviário.

Por sua vez, a densidade de malha hidroviária, tomando-se por base as vias navegáveis atualmente disponíveis é da ordem de 4,0 m/km², enquanto que nos Estados Unidos, que guarda fortes semelhanças em termos territoriais e de disponibilidade de malha hidroviária, este índice é da ordem de 7,1 m/km², caso sejam adotadas medidas efetivas no sentido de incorporar ao sistema hidroviário os estirões não utilizados, através das indispensáveis obras de canalização esse número pode ascender a cerca de 5,8 m/km².

As hidrovias brasileiras dividem o país em diversas fontes geradoras de riquezas nacionais e desenvolvimentos que nos próximos anos deverão empenhar o mesmo papel que a Rodovia presidente Dutra, que liga a cidade de São Paulo ao Rio de Janeiro, prestou para o desenvolvimento de todo o eixo com instalação não só das cidades, mas de todas as indústrias que são o grande sonho de todos os que labutam para o desenvolvimento dos nossos rios.



Figura 1.1 – Mapa do Brasil com as Hidrovias.

1.1 - Apresentação do Problema

A crescente necessidade de busca do barateamento do custo do transporte de cargas como grãos, minérios, combustíveis, etc., tem motivado um crescimento do número de embarcações nas várias hidrovias brasileiras.

A imensa maioria das informações técnicas e estudos para subsidiar projetos é apropriada para embarcações marítimas, havendo pouco material bibliográfico relativo a projetos de embarcações fluviais. Uma das razões deste descompasso é que o projeto de embarcações fluviais além de depender de fatores como missão, autonomia e capacidade de carga, como ocorre com o projeto de embarcações marítimas, também depende das especificidades da via onde cada embarcação irá operar. Ou seja, elaborar um projeto otimizado de uma embarcação para navegar em uma determinada via fluvial acaba sendo um problema local ou regional.

As características físicas da via fluvial são determinantes para o projeto das embarcações que nela irão operar. Assim, aspectos do efeito de águas rasas como restrições de calados e de larguras, raios de curvaturas mínimas do canal navegável, presença de correntezas, aproximações de eclusas, cruzamentos de embarcações em espaços relativamente restritos, levam a preocupações específicas que interferirão no projeto dos sistemas, de uma forma completamente diferenciada das embarcações marítimas convencionais.

1.2 - Objetivo do Trabalho

O presente trabalho de pesquisa tem a finalidade de propor alguns procedimentos e métodos para auxiliar o projeto de embarcações fluviais que operarão em vias brasileiras, tomando como base os métodos de auxílio a projetos de embarcações convencionais, onde já se encontram automatizadas algumas considerações a serem abordadas.

A seguir será apresentada brevemente os assuntos de cada capítulo.

O capítulo 2 apresenta o estudo da arte da área abrangida pela pesquisa.

O capítulo 3 “As Embarcações Fluviais” apresenta a concepção das embarcações fluviais, utilizadas nas nossas bacias .

O capítulo 4 intitulado de “Características Principais de Embarcações”, compara as diversas formulações de Bari, Latorre e IPT para analisar as dimensões principais que são os primeiros passos da espiral de projeto, para que sejam úteis nas próximas etapas de desenvolvimento do projeto.

Seguindo a espiral de projeto, Propulsão é assunto do capítulo 5, abordado aqui para motores e empurradores, seguindo a concepção das embarcações aqui estudadas.

No capítulo 6, a estabilidade com atenção aos empurradores é tratada, visto que as chatas e os motores devido às suas formas, tendem a não apresentar problemas de estabilidade mesmo quando consideradas com cargas.

Resistência é o tema abordado nos capítulos 7 e 8, e nestes apresentam-se formulações que tratam dos efeitos de águas rasas para o cálculo da potência necessária. Assim são elaboradas uma metodologia de cálculo para a consideração do efeito de águas rasas e posterior comparação com os resultados experimentais em modelo reduzido e protótipo e uma proposta de formulação.

O capítulo 9 “Conclusão”, apresenta uma nova proposta de formulação para o cálculo do efeito de águas rasas, que considera os efeitos não lineares existentes nos escoamentos aqui considerados.

O capítulo 10, “Proposta de Continuação de Trabalho” apresenta considerações a serem estudadas e pesquisadas futuramente.

Bibliografia, no capítulo 11, detalha os trabalhos consultados para esse estudo.

Nos apêndices são explicitados os dados usados para os cálculos do efeito de águas rasas, e outros resultados para auxiliarem na compreensão do desenvolvimento do presente trabalho.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

O crescente aumento na demanda de transportes através da hidrovia, tem resultado em trabalhos de pesquisas e desenvolvimentos de soluções de problemas específicos em função das considerações de contorno da navegação que são diferentes uma das outras.

Para o fenômeno de consideração do efeito de profundidade na navegação fluvial adotou-se como sendo *águas rasas* uma navegação com restrição somente de profundidade, enquanto que *águas restritas* a navegação com restrição de profundidade e lateral.

Tuck (1966) in Tachibana (1977) em suas teorias linearizadas, inovou o estudo do fenômeno desenvolvido empírico/experimentalmente por pesquisadores desde 1898; entretanto, devido as suas equações não demonstrarem o efeito da profundidade de maneira explícita, os seus resultados ainda não foram satisfatórios para a consideração do efeito.

Tachibana (1977), em sua pesquisa “Investigação do efeito de águas rasas” ITTC [49] e JSNAJ [50], utilizou a teoria de pequenas perturbações sobre corpos

esbeltos e determinou a equação diferencial não linear. Para solução da equação, empregou o teorema de Green e o método direto de integração. Tendo, desta forma, uma equação que pudesse levar em consideração não só o efeito do número de Froude de profundidade mas também a relação profundidade/calado.

Tachibana (1996) apresenta estudos sobre “Propeller Protection System for River Ship”, e cita que deverão ser de grande valia nos projetos de propulsores fluviais para os rios brasileiros onde encontramos obstáculos que danificam as pás dos hélices.

Latorre [26], num estudo sobre as embarcações européias e americanas apresenta formulações e considerações muito importantes para o projeto de embarcações fluviais.

Bari [5] apresenta formulações e cálculos que foram obtidos através de um estudo das várias embarcações dos rios de Bangladesh.

IPT [19, 20 e 21] faz um estudo comparativo das embarcações encontradas nas hidrovias brasileiras, mostrando as tendências, considerações e resultados para as nossas hidrovias.

Padovezi [33 e 38] apresenta um estudo sobre propulsores, onde de acordo com as características da via e o tipo de embarcações, sugere parâmetros importantes que foram necessários nesse estudo.

Dario & Tachibana [12 e 13] apresentam comparações das formulações para determinação das dimensões principais e as considerações sobre a resistência com o efeito de águas rasas.

Dentre os diversos problemas que temos no desenvolvimento do projeto para navegação fluvial, são abordados neste trabalho os aspectos para definição das características principais da embarcação, e o ponto principal desta etapa de pesquisa que resultou neste trabalho, é a consideração do efeito de águas rasas na resistência a propulsão.

Capítulo 3 – As Embarcações Fluviais

Para uma melhor compreensão deste trabalho, é apresentada descrições das embarcações que compõem o sistema de transporte fluvial de cargas.

3.1 - Automotores

São embarcações que possuem propulsão própria e capacidade de transporte de carga geral, que devem ser transportadas nos porões e no convés, devem também, preferencialmente serem acomodadas em paletes ou algum tipo de contentor que facilitem o seu manuseio e diminuam os tempos de carga e descarga da embarcação. A figura 3.1.1 ilustra o plano de um automotor projetado para uma operação no rio Araguaia.

Possuem linhas hidrodinâmicas mais adequadas, para desenvolver maior velocidade, fixando-se, para comparação com os comboios, a potência (e o conseqüente consumo de combustível) e a quantidade de carga transportada.

Apresentam peculiaridades que as distinguem das embarcações marítimas convencionais, trabalham em geral com restrição de profundidade; em locais onde a presença de ondas é constante, embora com menos intensidade, como lagos extensos e baías, apresentando, nestes casos, melhor comportamento que os comboios fluviais. São características da região sul do país (Lagoa dos Patos) e são freqüentes na navegação da calha principal do rio Amazonas; onde o transporte fluvial é quase exclusivo e onde é empregado o transporte misto de cargas e passageiros; são, ainda, bastante comuns nos rios europeus e norte-americanos, e têm se mantido como uma alternativa ao sistema chatas - empurrador.

O automotor pode ser projetado de tal modo que possa empurrar uma ou mais chatas carregadas ou vazias, presas a ele, por um sistema de amarras; neste caso, deve ser dada atenção a dois aspectos importantes :

- às dimensões e forma do casco do automotor, para que haja uma integração adequada entre o conjunto automotor-chata(s);
- ao estudo de potência instalada nos motores, para que torne possível o transporte de chatas sem comprometer a eficiência propulsiva do automotor quando navegando sozinho.

Os automotores também podem ser utilizados em determinados trechos de navegação de cabotagem, atuando como veículos de integração com o transporte fluvial.

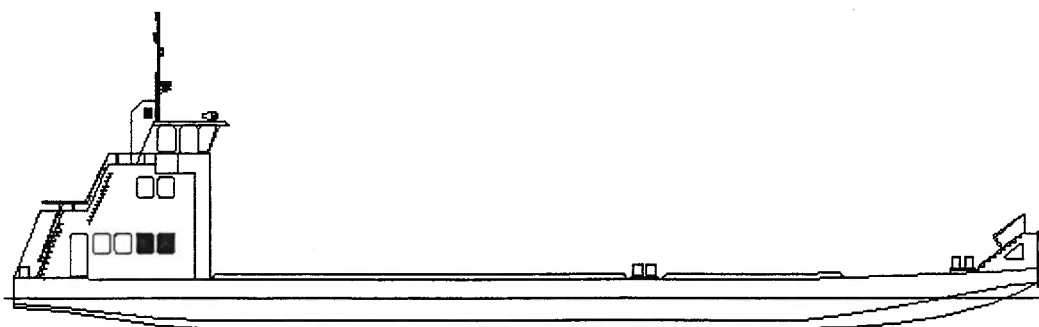


Figura 3.1.1 – Perfil de um Automotor [23].

3.2 - Chatas

Chatas são embarcações de pequeno calado, sem propulsão própria e com capacidade de transporte de cargas pesadas. Como não têm sistema de propulsão para se locomoverem, são normalmente empurradas por embarcações denominadas empurradores. São a forma mais simples de embarcações; a simplicidade das suas linhas decorre do fato de navegarem sempre em velocidades relativamente baixas, com pequenos números de Froude $\left(\frac{V}{\sqrt{g * L}} \right)$, nas quais a formação de ondas é menos pronunciada. Por outro lado, a perspectiva de compor comboios, altera o conceito de formas finas, com baixos coeficientes prismático e volumétrico, ou seja, navegando isolada, a chata pode ter um bom desempenho hidrodinâmico, mas quando integrada com outra ou outras, pode apresentar rendimento menor.

As dimensões e as formas das chatas devem ser padronizadas buscando garantir uma boa integração hidrodinâmica do conjunto, para que a potência utilizada pelo empurrador em sua locomoção, seja a menor possível.

Algumas restrições geométricas importantes, para a definição das dimensões das chatas são resultantes das características da via navegável, principalmente as profundidades, larguras e raios de curvaturas dos canais de navegação, os vãos e alturas das pontes que cruzam os rios e as dimensões das eclusas de transposição de barragens.

Há também diferenças no arranjo das chatas de acordo com a carga que transportam. Por exemplo, nas chatas petroleiras e graneleiras, considera-se necessária a utilização de cascos duplos: por razões ambientais nas chatas petroleiras, já que diminuem sensivelmente os riscos de derramamento de combustíveis em caso de acidente, e para facilitarem as operações de carga e descarga devido à forma regular resultante de seus porões, nas chatas graneleiras, figuras 3.2.1 e 3.2.2 respectivamente.

A chata roll-on roll-off ou ro-ro como é mais conhecida, pode transportar carretas e veículos de quaisquer dimensões; contudo, havendo condições econômicas e operacionais, o ideal é que houvesse uma padronização de carretas, a fim de otimizar a ocupação dos espaços dos espaços do convés da chata, figura 3.2.3.

Uma chata para transporte de gado possui vários currais e estrutura para que o gado possa ser engordado durante o trajeto, uma chata de cana também tem suas peculiaridades, bem como a de areia.



Figura 3.2.1 - Plano de uma Chata Tanque do Rio Araguaia [23].

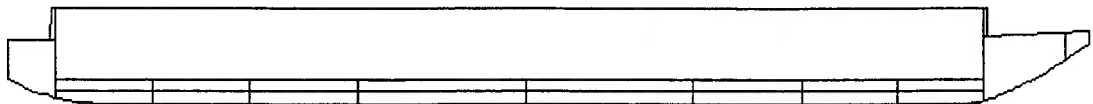


Figura 3.2.2 - Plano de uma Chata Graneleira do Rio Araguaia [23].

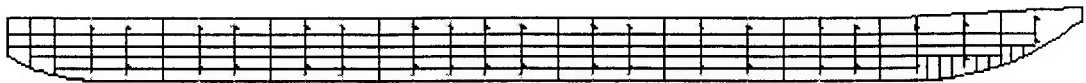


Figura 3.2.3 - Plano de uma Chata Roll-On Roll-Off do Rio Araguaia [23].

3.3 - Empurradores

Embora o papel do empurrador fluvial se assemelhe ao de rebocadores marítimos, ou seja, não passa de um “cavalo mecânico”, as formas de um e de outro são bastantes diferentes pelo fato de existirem restrições severas de calado nos empurradores fluviais. Como opera a ré das chatas na maior parte do tempo há a necessidade de se considerar o conjunto do comboio resultando em formas bastantes

características em função da hidrovia. Suas dimensões podem ou não depender da hidrovia; em rios como o Amazonas, certamente existirão poucas restrições de dimensões máximas, o que permite uma ampla liberdade neste aspecto. Em outros rios como o Tietê-Paraná, onde existem restrições de profundidade e/ou navegação através das eclusas, as dimensões ficam limitadas pelo comprimento útil da eclusa e pelo porte das chatas.

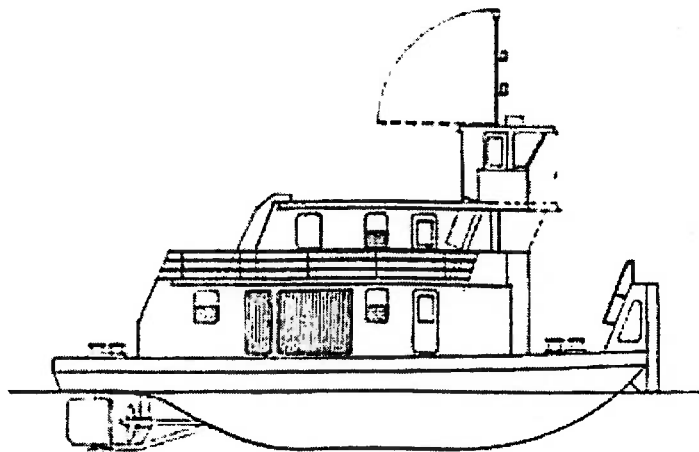


Figura 3.3.1 - Perfil Longitudinal do Empurrador [22].

3.4 - Comboio

Os comboios são a integração das chatas com um empurrador. Possuem como vantagem a flexibilidade e a diminuição dos tempos em portos. O número de chatas variam conforme o rio a ser navegado, podendo variar de 2 no Tietê, 4 no Araguaia, 6 em trechos do rio Paraná e Bangladesh, a até 30 no Mississipi.

Na maior parte dos casos, as chatas são utilizadas em conjunto, através da formação de um comboio composto por um empurrador e de uma determinada quantidade de chatas, estas compatíveis com as restrições geométricas da via e com a potência disponível do empurrador.

Para a formação de um determinado comboio são colocadas chatas lado a lado (paralelo) e ou em série (linha), o que resulta em uma embarcação com características completamente diferentes daquela formada por uma chata isolada. Para um comboio, é importante haver formas que facilitem a integração entre chatas, levando-se em conta o número mais adequado e a disposição ótima de chatas para uma determinada via navegável.

Assim, se as chatas vão ser utilizadas em linha ou em paralelo, é imprescindível que tenham formas que permitam unir-se entre si, sem deixar grandes descontinuidades geométricas, as quais fatalmente levarão a acréscimos de resistência. Como exemplo de melhoria da integração de comboios, em muitos casos há a utilização de chatas de formas retangulares entre outras chatas em linhas, para que diminuam as descontinuidades. Também para isto, se o comboio é constituído por duas chatas em linhas, geralmente elas são ligadas entre si pelas respectivas popas.

Um cuidado especial deve ser dado às amarrações entre empurradores e chatas e entre chatas, pois consomem tempo e exigem cuidado permanente. A definição do sistema de amarração a ser adotado indica a quantidade, as posições e o dimensionamento dos cabeços nos conveses das chatas e do empurrador.

Nas figuras 3.4.1 e 3.4.2 respectivamente apresenta-se o comboio Tipo Tietê, e o comboio Tipo Paraná.

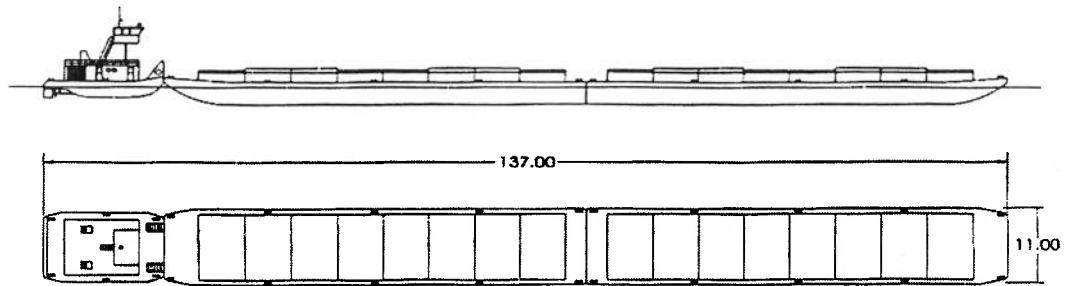


Figura 3.4.1 – Comboio Tipo Tietê [23].

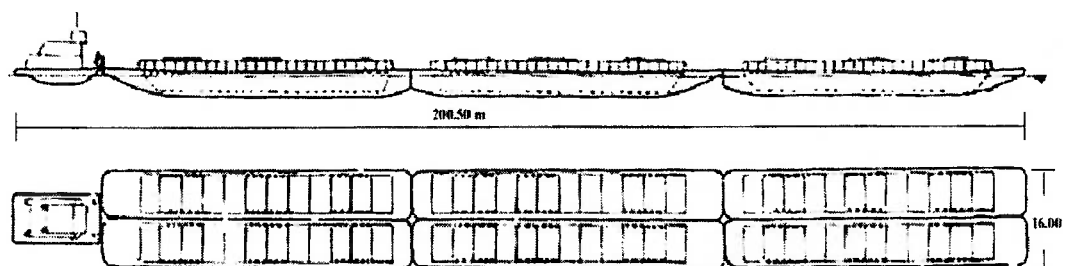


Figura 3.4.2 – Comboio Tipo Paraná [23].

Capítulo 4 - Características Principais de Embarcações

Os primeiros passos da espiral de projeto são as determinações das dimensões principais mais importantes para a concepção da embarcação; quando se decidem as formas e todos os parâmetros que influem na resistência hidrodinâmica do casco, bem como se levam em consideração as restrições físicas da via e os requisitos do armador.

As dimensões principais aqui consideradas e analisadas são :

- Comprimento (L);
- Boca (B);
- Calado (H);
- Pontal (P);
- Deslocamento(Δ);
- Coeficientes de Forma .

É uma tendência natural de cada hidrovia estabelecer embarcações padrões ou embarcações tipo. Esta padronização tem a vantagem de facilitar tanto os aspectos de construção quanto de operação, manutenção e reparo, tendo, desta forma, um sistema hidroviário mais eficiente, indicando tendências à padronização dos diversos trabalhos necessários para operação de uma hidrovia.

Apesar do item padronização ser importante, foram analisadas as várias formas de embarcações e, comparando as formulações usadas pelos diversos autores estudados (Latorre, Bari, IPT e outros), obteve-se algumas fórmulas relevantes, aplicáveis às hidrovias brasileiras e que poderão auxiliar na automação de projetos, obtendo com isso, sistemas mais eficientes e competitivos com outros meios de transportes.

4.1- Comprimento (L):

4.1.1 – Empurradores

Para a determinação do comprimento de empurradores são utilizadas as formulações apresentadas por Latorre [26], onde apresenta-se em função da potência do empurrador visto que o mesmo é conhecido como “cavalo mecânico” e pode ser observado também na figura 4.1.1.

$$L = 62,0 + 7,5 * \chi - 0,235 * \chi^{1,8} \quad (\text{ft}) \quad (4.1.1)$$

$$\chi = \left(\frac{\text{BHP}}{\frac{\text{número de eixos}}{100,0}} \right) \quad (4.1.2)$$

Para as variáveis L e χ , são apresentadas as seguintes condições:

$$50 < L \text{ (ft)} < 200 \text{ e } 3,0 \leq \chi \leq 32,4.$$

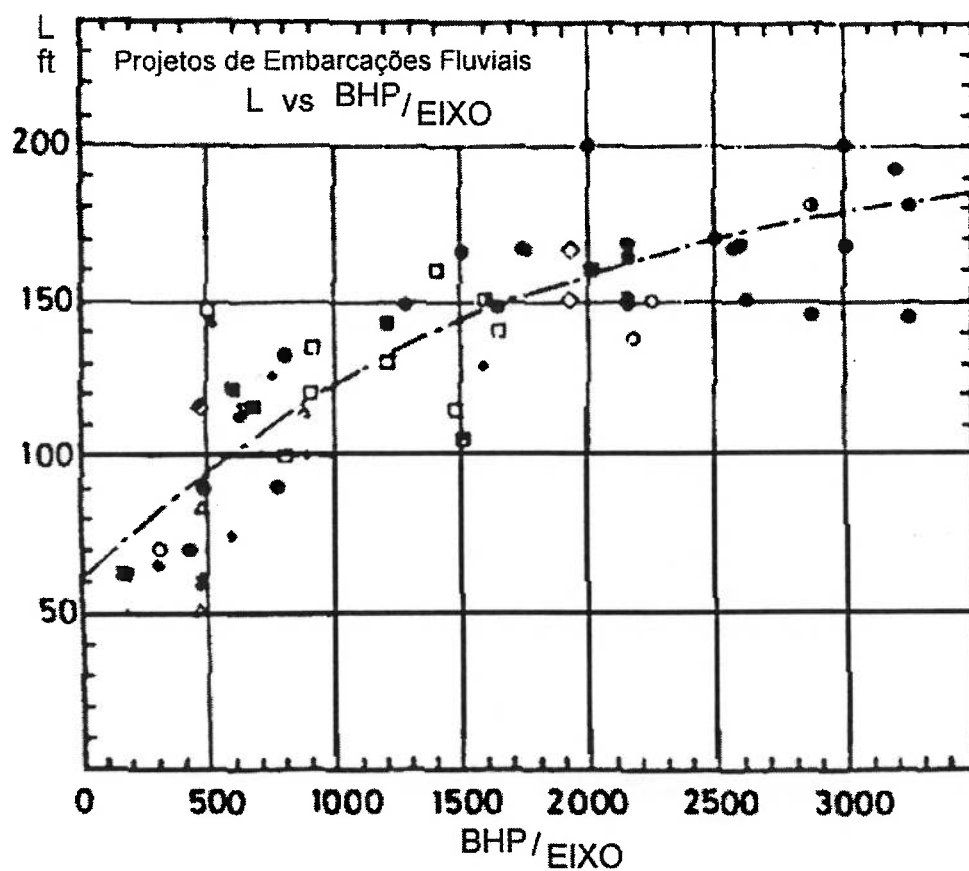


Figura 4.1.1 – Comprimento (L) x BHP/Eixo [26].

A partir da análise da referência [5], que mostra uma relação do comprimento com o calado, nota-se que Bari, ao estimar o comprimento obteve esse parâmetro na faixa de $10 < L \text{ (m)} < 40$ conforme é apresentado na figura 4.1.2.

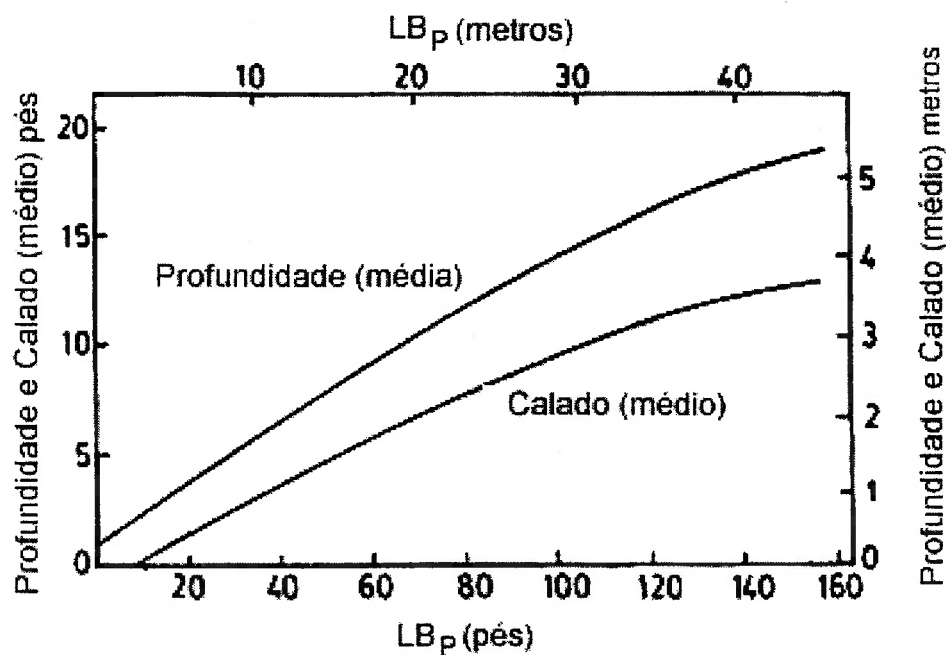


Figura 4.1.2 – Calado x Comprimento [5].

4.1.2 - Chatas

Na determinação do comprimento das chatas são analisadas as formulações de Bari [5], a seguir :

i) Bari :

$$L_{pp} = 4,356 * \Delta^{1/3} (ft) \quad (4.1.3)$$

Esses dados foram obtidos da análise da figura 4.1.3, das chatas de Bangladesh.

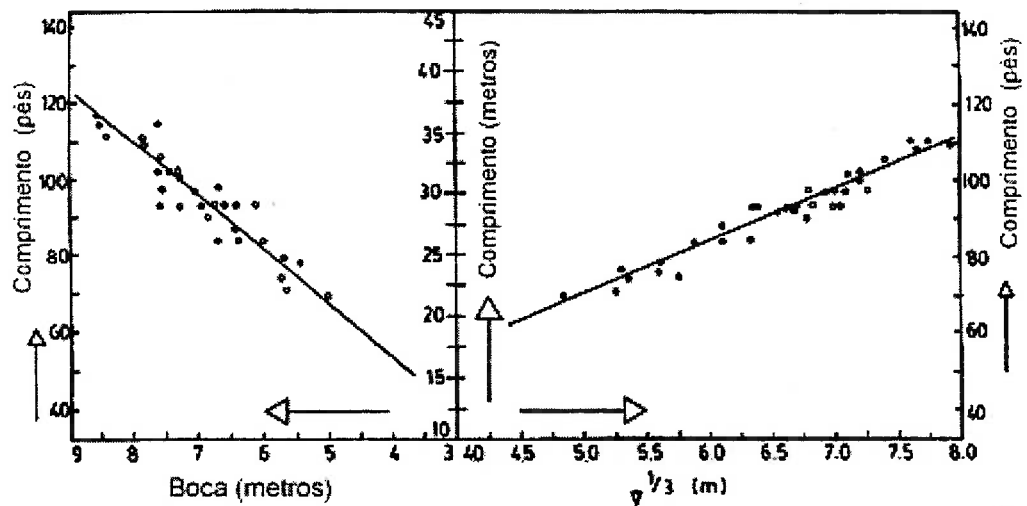


Figura 4.1.3 – Comprimento x Boca x Deslocamento [5].

4.1.3 - Automotores

Na análise dos automotores foram levadas em conta as formulações de Bari [5].

i) Bari :

$$L_{PP} = \frac{\left(4,9878 * \Delta^{1/3} + 20,80\right)}{C_B^{1/3}} \quad (\text{ft}) \quad (4.1.4)$$

A formulação foi aqui apresentada devido ao fato das dimensões principais dos automotores considerados por Bari se aproximarem muito com as dimensões dos automotores do Brasil. As dimensões das embarcações de Bangladesh são mostradas no anexo 1.

4.2- Boca (B):

4.2.1 - Empurradores

De acordo com a referência [5] Bari apresenta todas as dimensões preliminares usadas para empurradores em função do comprimento. Assim, pode-se chegar a uma boca compreendido entre $2 < B \text{ (m)} < 10$ (figura 4.2.1). No entanto, na prática a sua escolha é mais em função das dimensões das chatas e o volume necessário para acomodar o motor para a propulsão do comboio.

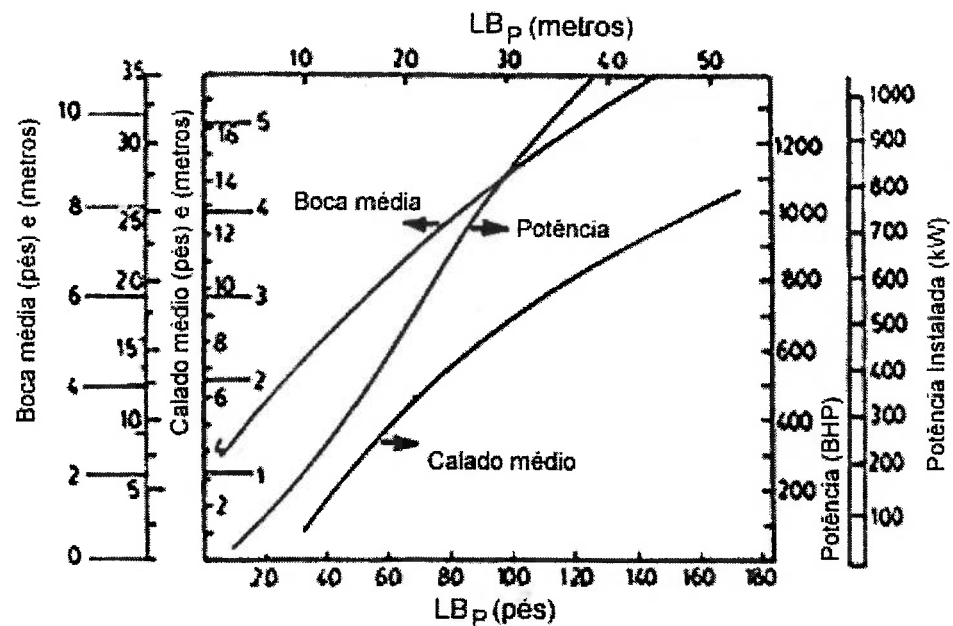


Figura 4.2.1 - Dimensões Preliminares do Empurradores [5].

4.2.2 - Chatas

É importante notar que, em rios canalizados, a definição da boca das chatas deve sempre levar em consideração a formação dos comboios, resultante da análise econômica e das restrições das vias em que deverão operar (larguras das câmaras de eclusas, vãos de pontes, etc.). Por exemplo, na hidrovia Tietê a menor largura da câmara de eclusa é 11,76 m o que fez escolher a boca máxima do comboio até 11m em função das operações exigidas dentro da eclusa e outras restrições existentes na via. Apresenta-se a seguir, formulações sugeridas por Bari [5] e IPT [19].

i) Bari :

$$B = 0,235 * L_{pp} \quad (\text{ft}) \quad (4.2.1)$$

ii) IPT :

$$B = 0,1418 * L + 4 \quad (\text{m}) \quad (4.2.2)$$

Onde B: $4 < B \text{ (m)} < 20$.

4.2.3 - Automotores

Nos automotores foram consideradas as formulações de Bari [5] e IPT [20].

i) Bari :

$$B = \frac{\left[1,8443 * \left(\frac{\Delta}{L_{PP} * C_B^{1/3}} \right) + 0,249 \right]}{C_B^{1/3}} \quad (\text{ft}) \quad (4.2.3)$$

L_{pp} = Comprimento entre perpendiculares (ft);

Na figura 4.2.2, Bari apresenta uma relação entre a boca calculada, através da equação 4.2.3 e a boca real da embarcação onde podem ser verificados os desvios encontrados na formulação.

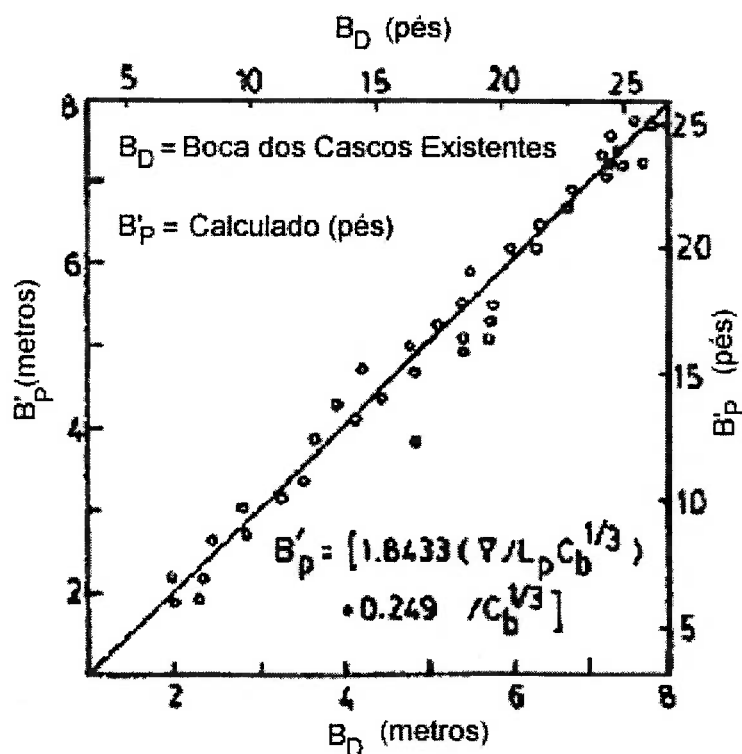


Figura 4.2.2 – Relação Estimada para Boca Calculada x Boca real [5].

ii) IPT

A partir da referência 18 (figura 4.2.3) foi feita uma regressão linear que nos dá os valores típicos de boca de automotores em função do comprimento.

$$B = 0,1786 * L \quad (\text{m}) \quad (4.2.4)$$

Onde B: $4 < B \text{ (m)} < 20$

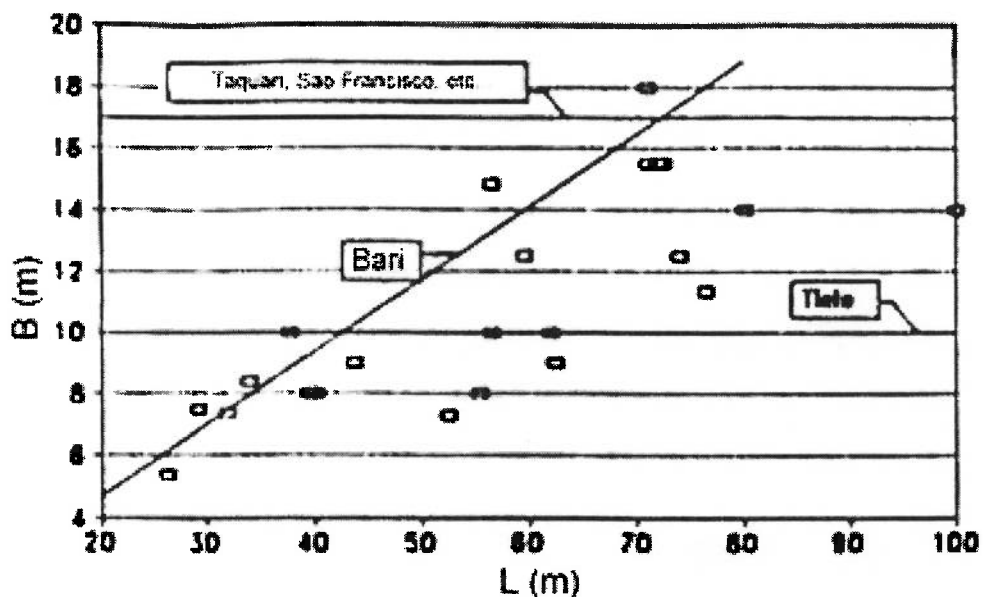


Figura 4.2.3 – Boca x Comprimento [20].

4.3 – Calado (H):

Trata-se de um item difícil de indicar parâmetros ou fórmulas, pois depende basicamente das restrições físicas da via navegável e representa um dos mais

importantes itens nesta fase do projeto. Deve-se aproveitar ao máximo permitido pelas condições físicas da via e nas dinâmicas do escoamento em águas rasas. Apesar disto, são apresentadas algumas formulações elaboradas a partir dos dados do IPT [18] para orientação da escolha deste parâmetro.

4.3.1 - Automotores

i) IPT

Nota-se na figura 4.3.1 uma grande dispersão dos pontos, pois essa dimensão depende muito das características da via.

$$H = 0,0337 * L + 0,2045 \quad (\text{m}) \quad (4.3.1)$$

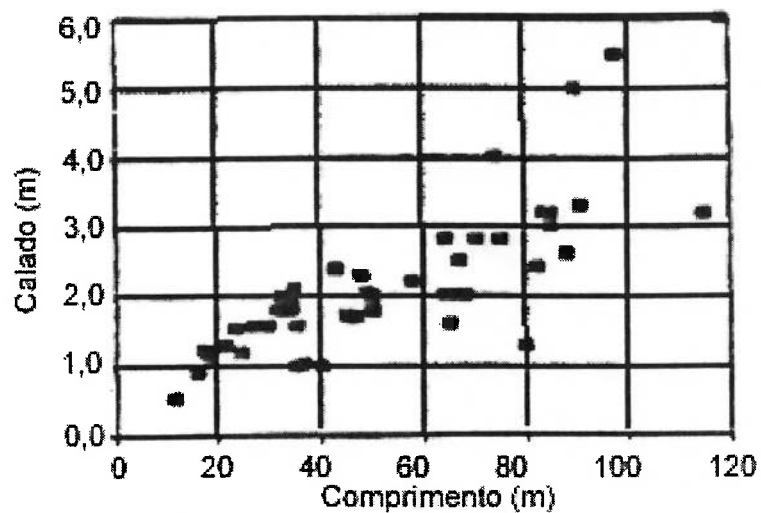


Figura 4.3.1 – Calado x Comprimento [20].

ii) Bari :

$$H = \frac{h - 0,50}{1,25} \quad (\text{ft}) \quad (4.3.2)$$

h – Profundidade local (ft).

4.3.2 – Empurradores

O calado do empurrador não é aqui abordado porque deverá integrar o comboio com as chatas, e este, desde que não seja maior que o das chatas não deverá apresentar problemas. No entanto, o calado do empurrador é fundamental para a definição do escoamento ao redor do seu casco e na região de instalação de seus propulsores.

4.3.3 – Chatas

i) IPT

A referência 17 (figura 4.3.2), apresenta a relação de vários valores de calados de várias chatas em função do comprimento, para algumas das vias que são os calados dos respectivos rios citados na figura 4.3.2.

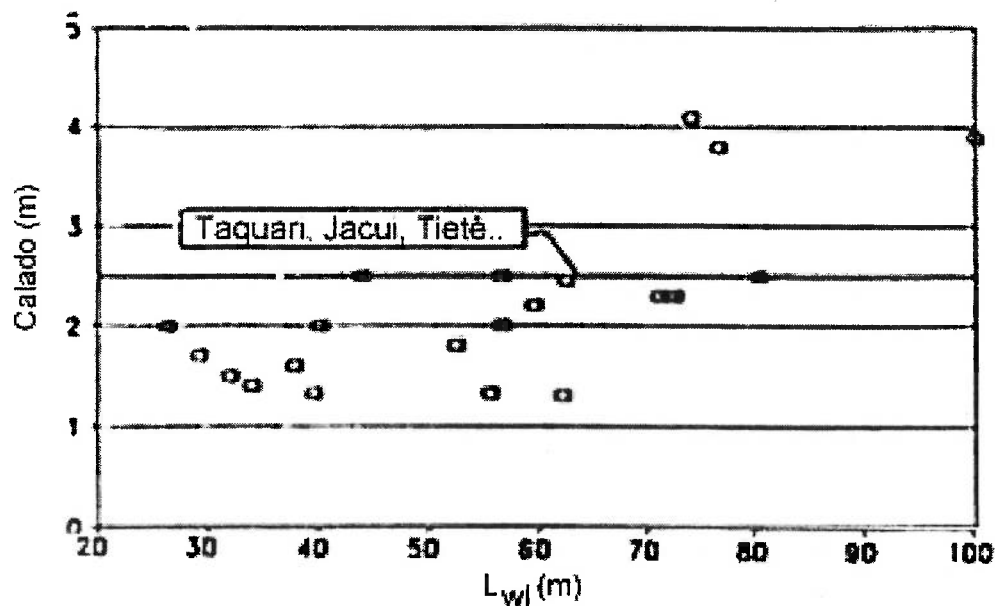


Figura 4.3.2 – Calado x Comprimento [19].

ii) Bari

$$H = \frac{h}{1,25} \quad (\text{ft}) \quad (4.3.3)$$

Onde h é profundidade local (ft).

4.4 – Pontal (P):

Este parâmetro depende basicamente do tipo de carga (o pontal é maior para embarcações de cargas de baixo fator de estiva), das relações com o calado, da borda livre exigida e de outras restrições físicas da via.

4.5 - Deslocamento (Δ):

Embora este parâmetro seja determinado a partir dos estudos econômicos do transporte de carga e arranjo da embarcação, são apresentadas algumas formulações para orientar o projeto.

4.5.1 - Empurradores

O deslocamento normalmente é consequência dos outros parâmetros e do volume necessário para alojar o motor que propulsionará o conjunto; no entanto, Bari apresenta como $\Delta = 250$ tons um padrão para dimensões principais (L, B, H) das embarcações - tipo de Bangladesh; e IPT [21] apresenta essa formulação para o cálculo de deslocamento.

$$\Delta = 0,0013 * L_{wl}^3 + 0,5286 * L_{wl}^2 - 20,436 * L_{wl} + 326,84 \quad (t) \quad (4.5.1)$$

O valor de L_{WL} é dada em metros.

4.5.2 - Chatas

i) Bari

A figura 4.5.1, mostra a variação do LxBxH x peso leve em relação a todos os tipos de embarcações estudados por Bari [5] ($100\text{ t} < \Delta < 800\text{ t}$).

Assim, nota-se na figura que o deslocamento de chatas também é em função das restrições físicas da via e resultado da análise econômica. Neste item, deve-se aproveitar o deslocamento máximo permitido em função do número de Froude do calado ou da profundidade do local, que influencia no escoamento ao redor da chata/comboio.

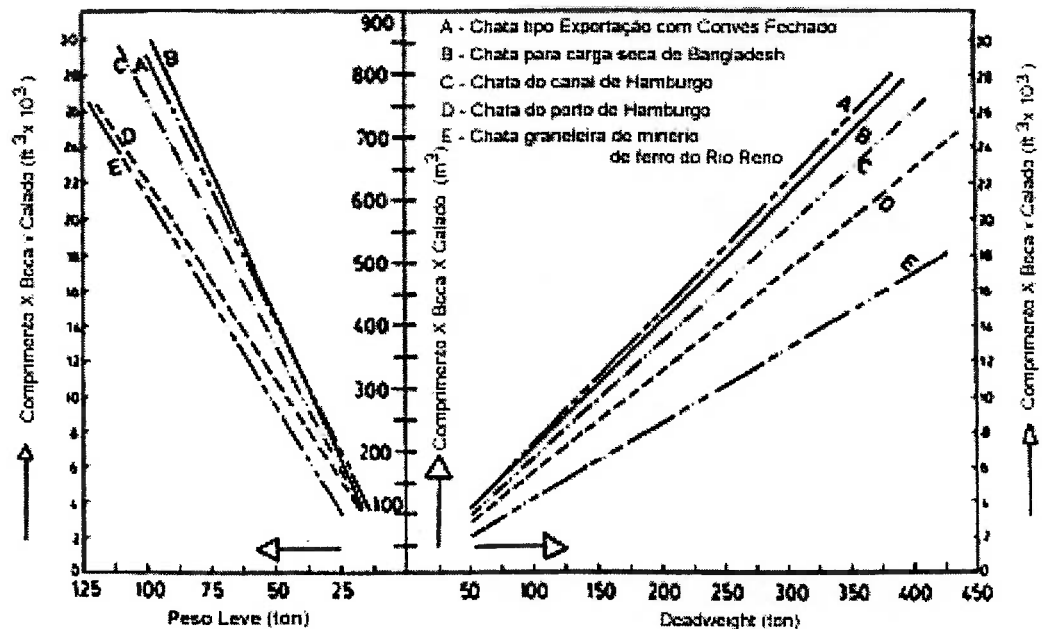


Figura 4.5.1 – Dimensões dos Diferentes Tipos de Chatas [5].

4.5.3 - Automotores

Para este item, somente a fórmula de Bari [5] mostrou-se como informação orientativa :

$$\Delta = 1,281 * DWT + 7,726 \quad (t) \quad (4.5.2)$$

4.6 - Coeficientes de Forma

4.6.1- Chatas

i) IPT

A referência 17 (Figura 4.5.2) apresenta uma relação C_b x Deslocamento onde o valor do deslocamento está compreendido entre $250 < \Delta < 4500$ (tons), que poderá auxiliar na definição da embarcação.

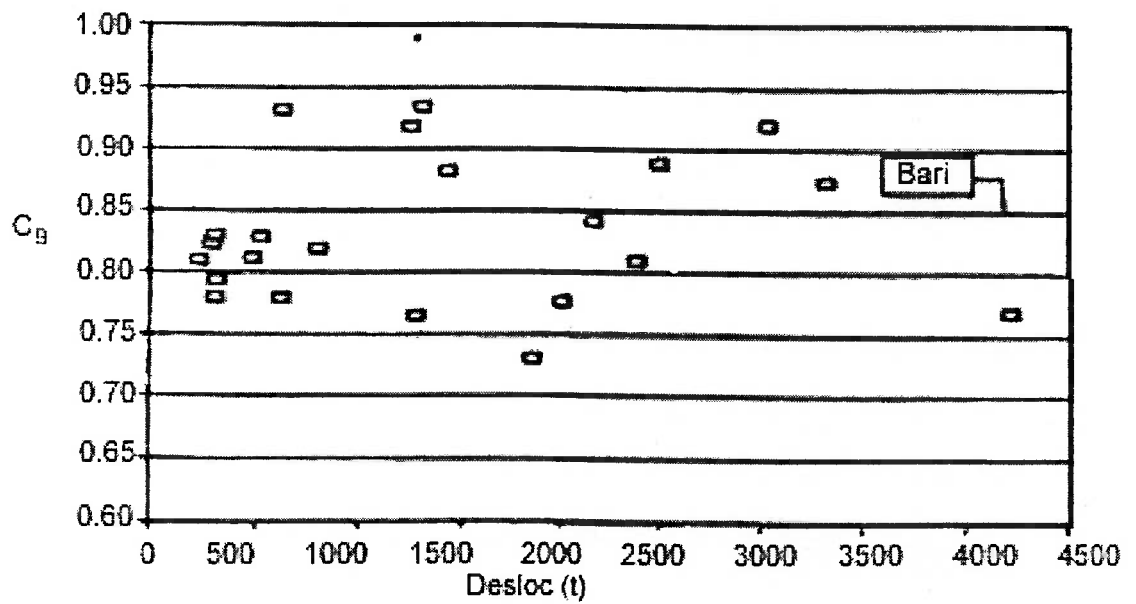


Figura 4.6.2 – C_B x Deslocamento [19].

A análise dos coeficientes de forma só tem sentido nos automotores, pois os coeficientes das chatas são consequência dos outros itens em função do número de Froude anteriormente citados.

4.6.2- Automotores

i) Bari :

$$C_B = 1,0 - 0,425 * \frac{V \text{ (nós)}}{\sqrt{L \text{ (ft)}}} \quad (4.6.1)$$

“Uma das coisas mais difíceis é conseguir projetar um hélice que não faça uma embarcação mover-se. Hélices completamente inadequados acabam funcionando”.

Saunders

Capítulo 5 - Propulsão

A propulsão de uma embarcação é efetuada por uma máquina que fornece torque a um eixo, e o propulsor da embarcação transforma-se este torque em empuxo que vence as forças de resistência à propulsão.

O projeto do sistema propulsor de uma embarcação, consiste na obtenção da melhor integração motor-casco-hélice, de tal forma a obter-se um rendimento máximo do sistema.

De acordo com as condições e perfil da missão da embarcação, a escolha do sistema de propulsão pode deparar-se com vários tipos possíveis de máquinas e de propulsores, assim a sua consideração deverá ser feita com critério e bom senso que a engenharia solicita.

A principal característica dos propulsores de embarcações fluviais é a necessidade de adaptação à operação em profundidades pequenas, com deslocamentos relativamente grandes, ou seja, os propulsores têm que operar com altos carregamentos, que resultam da combinação de pequenos diâmetros com altos empuxos. De modo semelhante, há uma influência do "fator fluvial" (águas rasas,

formas cheias, grandes bocas, etc..) sobre as distribuições de velocidades e pressões ao longo dos cascos e, principalmente nas regiões dos propulsores, alterando de maneira significativa as forças de resistência ao avanço e os coeficientes propulsivos das embarcações.

Altos carregamentos significam baixas eficiências dos propulsores, em uma faixa situada entre 25% e 45% de rendimento. Assim, por ser um *aspecto crítico*, a eficiência do propulsor adquire uma importância vital para o desempenho de uma embarcação fluvial, apesar de tal fato não despertar a devida atenção da maioria dos armadores fluviais brasileiros, tendo assim um sistema de transporte inadequado o que muitas vezes levam a condenar até o sistema em detrimento aos outros sistemas de transporte. Apresenta-se a seguir a relação dos propulsores indicados para automotores e empurradores, visto que as chatas não apresentam propulsão própria.

As opções dos tipos de propulsores para automotores e empurradores não divergem das opções para embarcações marítimas de pequeno e médio portes:

- Hélices Convencionais de Passos Fixos (Série B-Troost);
- Hélices em Dutos (Série Kaplan);
- Hélices de Passo Controlável;
- Hélices de Eixo Vertical;
- Hélices de Pás Destacáveis ;etc...

Contudo, dadas as características da nossa navegação fluvial, que exige baixo custo de investimento, facilidade de manutenção e a maior eficiência hidrodinâmica possível, apenas dois tipos de propulsores têm sido mais utilizados: os hélices

convencionais (B-TROOST) e os hélices em dutos (Kaplan), sendo este último utilizado também como protetor de hélice necessários devido às condições críticas da navegação fluvial.

Os hélices da série B-TROOST são os mais conhecidos e utilizados para hélices convencionais sem dutos, apresentam como maiores vantagens o baixo custo de fabricação e a quantidade de informações acumuladas e disponíveis para o seu projeto adequado, uma gama de variações dos parâmetros geométricos (número de pás, razões de áreas - A_e/A_o , etc...), bom desempenho hidrodinâmico e facilidade para a construção.

Para a navegação fluvial, a série B-TROOST pode ser utilizada sem caimento “*rake*” e sem assimetria do contorno “*skew*”, a fim de não comprometer o rendimento do propulsor quando operando a ré.

A série Kaplan combinada com os dutos da NSMB - *Nederland Ship Model Basin (Wageningen)* constitui-se a principal fonte de consulta para projetos de hélices em dutos; apresentam custos um pouco maiores que os hélices convencionais na maior parte da faixa de operação das embarcações fluviais e requerem maiores cuidados de instalação e de manutenção que o sistema de hélices convencionais, apresentam como principal vantagem o aumento de empuxo em velocidades baixas comparando-se com hélices sem dutos.

Foi apresentado por C&L - Christopoulos & Latorre [8], um hélice denominado Semi-Kaplan, que é um caso intermediário de distribuição de cordas, entre o Kaplan e o B-TROOST . A vantagem é a sua distribuição de passos, mais carregada na ponta das pás, que segundo C & L, mostrou-se mais adaptado para o

trabalho em embarcações fluviais de alto carregamento. As curvas características para o projeto destes hélices são as mesmas da série Kaplan.

Preocupações técnicas que deve-se ter com os dutos :

- A distância entre as pontas das pás dos hélices e as paredes internas dos dutos deve ser a menor possível. Utiliza-se como limite superior a distância 0.7% do diâmetro do hélice.
- A geometria do duto deve ser precisa, dentro dos padrões ISO de construção, principalmente não havendo ovalização em que obrigue a aumentar as distâncias entre as pontas das pás e o duto. Da mesma forma, sua instalação deve ser cuidadosa e sem imprecisões.

A utilização de hélices com ou sem dutos também afeta a manobrabilidade das embarcações. Em manobras à vante, a tendência é que os dutos piorem um pouco a manobrabilidade da embarcação, devido a sua grande área lateral.

Do ponto de vista estritamente hidrodinâmico, seria recomendável que fossem utilizados, na maior parte dessas embarcações, os hélices em dutos, já que a presença do duto representa um ganho de eficiência em baixas velocidades e uma melhor uniformização do campo de velocidades do hélice, desde que seja elaborado adequadamente, caso contrário poderá ocorrer exatamente o contrário, maior resistência e eficiência pior do conjunto propulsor hélice + duto + casco .

Os cálculos deverão seguir os procedimentos normais de projeto, considerando-se a potência efetiva em águas rasas, bem como as eficiências propulsivas nestas condições de escoamento restritivas.

O alto carregamento de um hélice sempre resulta em eficiência baixa e pode, também causar sérios problemas relacionados com vibrações e cavitação e há ainda outros fatores complicadores para hélices, tais como cita Padovezi [36]:

- A proximidade do fundo, e das margens do rio (às vezes);
- A presença de troncos, pedras ou outros corpos nas águas (que podem forçar a adoção de sistemas de proteção de choques);
- A necessidade de realização de manobras (exigindo que os propulsores tenham boa eficiência a ré);
- Grandes variações na formação de comboios fluviais (alterando o deslocamento global e a distribuição de velocidades - campo de esteiras - nas regiões dos propulsores);
- As formas cheias e com fundos planos, às vezes até com a presença de túneis de popa, piorando a distribuição de esteiras junto ao hélice.

O fato de se tratar de embarcações fluviais faz com que a questão da definição da condição de operação do conjunto motor-casco-hélice seja muito mais complicada que em qualquer embarcação marítima.

Assim há variação significativa das relações:

- profundidade/calado;
- a variação da formação de comboios de chatas;

- a presença de velocidade de corrente;
- a necessidade de freqüentes alterações de velocidades e manobras à vante e a ré.

Indicando, assim, uma solução ótima e única com hélices de passos fixos.

5.1 - Problemas de Propulsores de Embarcações Fluviais

No cálculo de propulsores de embarcações fluviais deveremos levar em conta alguns problemas inerentes à operação; dentre eles os mais importantes são :

- Danos nas Pás – causados por presença de troncos nas águas, ou outros flutuantes, e batidas em bancos de areia;
- Abrasão - operação em águas arenosas e com fundos constituídos de cascalhos ou de material abrasivo semelhante;
- Erosão por cavitação - pode trazer desde problemas de perda de eficiência, passando por aumentos de vibrações induzidas, até chegar à erosão por cavitação. Para evitar essa ocorrência, Burril in Padovezi [36] indica manter a quantidade de cavitação nas pás abaixo de um valor considerado crítico; a adoção como limite da curva referente à 10% de cavitação no dorso tem evitado a ocorrência de problemas de erosão além de garantir a inexistência da queda de empuxo por cavitação excessiva. BURRIL adota a relação entre o índice de cavitação σ e o coeficiente de

empuxo δ_c , sendo que a aproximação da curva que corresponde ao limite proposto de 10% de cavitação no dorso é:

$$\delta_c = 0,494 * \sigma^{0,88} \quad (5.1)$$

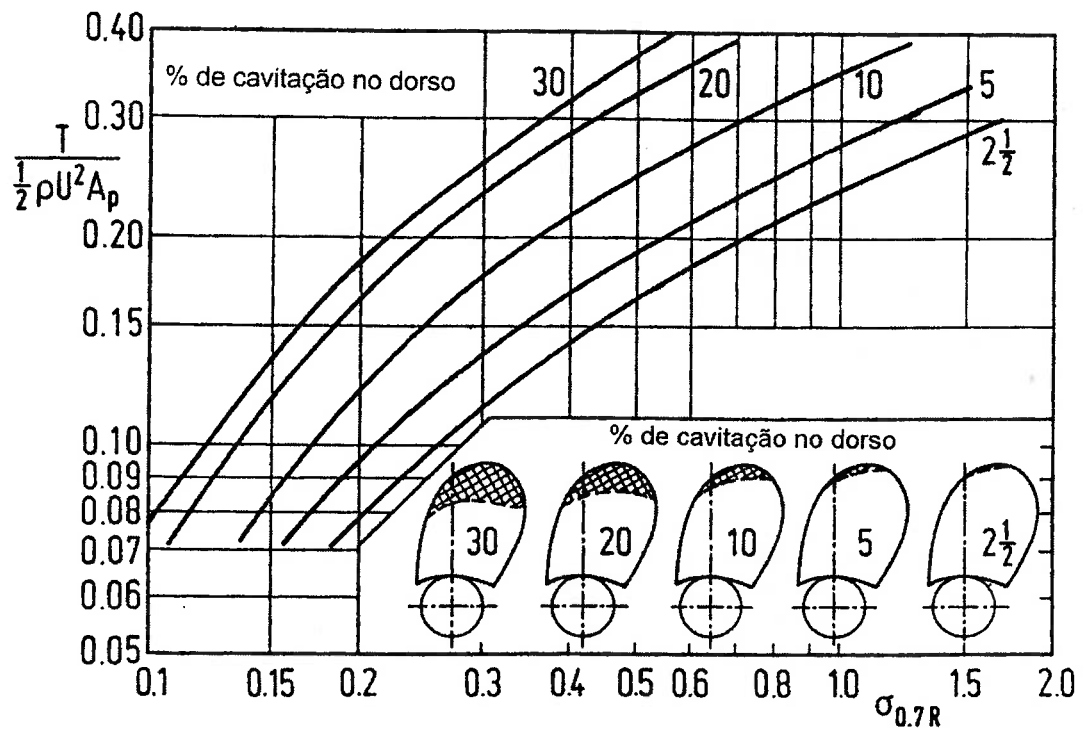


Figura 5.1 – Diagrama de Burril para Previsão de Quantidades de Cavitação em Pás de Hélices [38].

- Imperfeições Geométricas nas Pás - podem piorar muito as condições de cavitação em operação, além de alterar as curvas características dos hélices; com cantos vivos e alterações nas distribuições de espessuras e desbalanceamentos mecânicos e hidrodinâmicos entre pás (vibrações). Padovezi [36] recomenda adotar para a confecção de hélices de

embarcações fluviais de carga, as tolerâncias da classe 3 da norma ISO 484;

- Vibrações Induzidas pelo Propulsor;
- Variações dos Passos - a característica mais presente é de alteração constante dos pontos de operação, o ideal seria trabalhar-se com hélices de passos controláveis; de modo a adaptar-se automaticamente o passo para cada condição que se apresentar. Porém, é difícil de ser adotada devido aos altos custos de instalação e manutenção envolvidos. Solução mais viável: a adoção de hélices de pás destacáveis, que possibilitaria a alteração de passos (2 ou 3 opções) manualmente. Poderiam ter seus passos adequados para trabalhar em época de águas cheias (com maiores profundidades) e em épocas de estiagem (águas baixas), poderiam ter passos alterados para uma condição mais favorável de operação. Outra vantagem é a facilidade para trocar-se uma ou mais pás que tenham sido avariadas em operação, Padovezi [36].

5.2 – Condições de Projeto

Uma das maiores dúvidas em hélices é em que condição projetá-lo. De todas as condições, (bollard-pull (tração estática), corrida livre, deslocamento, formação de comboios), Padovezi [38] mostra que a condição de projeto do hélice deve ser escolhida fazendo-se uma média ponderada em função do tempo de todas as condições de operação do comboio.

5.3. - Diâmetros e Números de Hélices

Os diâmetros de hélices de embarcações fluviais são, por definição, restritos pelos calados; quase sempre o maior diâmetro possível será o diâmetro ótimo.

É importante a adoção de valores de distâncias entre pontas das pás e cascos adequados. O diâmetro pode ser aumentado um pouco quando se adota túnel de popa; solução que se possível deve ser evitada; os túneis podem introduzir problemas de vibrações e de alterações dos coeficientes propulsivos.

Padovezi [37] indica o coeficiente de potência específica qpa como um quociente entre a potência no eixo DHP e a área do disco do hélice A_s .

$$qpa \text{ máximo} = 380 \text{ hp/m}^2 \text{ para hélices sem dutos} \quad (5.3.1)$$

$$qpa \text{ máximo} = 460 \text{ hp/m}^2 \text{ para hélices com dutos.} \quad (5.3.2)$$

O diâmetro necessário pode ser reduzido aumentando-se a quantidade de hélices na embarcação. Em águas muito rasas, pode ser necessário adotar-se três ou quatro hélices. O inconveniente é a maior quantidade de máquinas necessárias, com custos proporcionalmente maiores.

5.4 - Coeficientes Propulsivos

O projeto do hélice depende de uma maneira direta, dos coeficientes propulsivos, que resultam da interação entre os cascos e o hélice em operação. A influência das particularidades da navegação fluvial se faz sentir :

- os coeficientes propulsivos variam e muito com o número de hélices;
- com a formação dos comboios de chata;
- com as profundidades.

Os ensaios de auto-propulsão com comboios fluviais mostraram que a composição do comboio e a relação profundidade/calado afeta muito os coeficientes propulsivos, a ponto de inviabilizar a sua utilização (com três chatas em paralelo, de um empurrador bi-hélice). O empurrador de três hélices mostra-se mais adequado para empurrar comboios com formação mais largas.

Os valores dos coeficientes de esteira (w) e redução da força propulsora (t) variam sensivelmente com a variação de velocidade de modo diferente dos coeficientes de embarcação convencionais.

Capítulo 6 - Estabilidade

De forma geral, devido às suas formas relativamente cheias, com altos coeficientes de bloco, fundos chatos e grandes bocas, tanto as chatas como os automotores tendem a não apresentar problemas de estabilidade.

Assim, as aplicações dos critérios de estabilidade consagradas para embarcações marítimas poderão ser suficientes. Praticamente, pode-se afirmar que a estabilidade destas embarcações poderá constituir-se em problema apenas na hipótese de haver um carregamento com distribuição completamente inadequada de suas cargas, ou de seus passageiros, pertences e acessórios - tal fato é facilmente evitável através da elaboração de recomendações de procedimentos de carga e descarga, o que, aliás, é necessário para todos os tipos de embarcações fluviais ou marítimas.

Por outro lado, a estabilidade dos empurradores, principalmente navegando escoteiro (fora do comboio), merece atenção especial, devido principalmente, às suas características de comprimento pequeno, calados baixos e potências altas instaladas. É importante notar que os empurradores possuem áreas vélicas relativamente grandes, assim, como são levados a realizar manobras bruscas com

curvas de pequenos raios. Estes dois fatores dinâmicos (força lateral de vento e curvas “fechadas”) podem, em condições operacionais desfavoráveis, aumentar o risco à integridade de uma embarcação que não tenha uma margem satisfatória de estabilidade estática.

Assim é apresentada a análise somente para empurrador .

Bari [5] apresenta várias formulações para garantia da estabilidade de empurradores em diferentes países. Entretanto, considera a fórmula de Simpson [45] satisfatória. Tal fórmula calcula um valor de boca B para garantir-se um valor de altura metacêntrica GM que satisfaça aos critérios de estabilidade:

$$B = \left[KM - \left[H \left(\frac{5 * C_{WP} - 2 * C_B}{6 * C_{WP}} \right) \right] \frac{H}{BM} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{ft}) \quad (6.1)$$

$$GM = KB + BM - KG \quad (6.2)$$

Onde :

H- Calado (ft);

C_{WP} - Coeficiente da linha d'água;

KM – Posição vertical do metacentro (ft);

BM – Raio metacêntrica (ft).

A faixa de estabilidade de um empurrador é muito importante. Para o empurrador, a faixa de estabilidade positiva pode ser de até 70 graus.

No projeto final, ela é adotada para garantir uma adequada borda-livre f . Pelo critério de Simpsom que Bari sugere, deve-se ter uma borda livre mínima igual a 10% da boca [5].

$$f \geq 0,10 * B \quad (6.3)$$

Capítulo 7 – Resistência à Propulsão

7.1- Componentes da Resistência

A resistência do navio ou de outro corpo flutuante em água se compõe de diferentes parcelas que não são facilmente separáveis, porque uma interfere sobre as outras. A grande maioria dos conhecimentos até hoje conhecidos na Engenharia Naval nesta área são teórico-experimentais.

Para se conhecer a resistência total ao avanço do navio, o mais simples é rebocar através de um cabo e medir-se a tensão R na direção horizontal do cabo. O valor desta resistência é função da condição do fluido (água) ao redor do casco (forma ondas ou outras perturbações). Esta resistência do navio é normalmente medida em águas calmas.

As componentes da resistência total podem ser subdivididas em:

- a) Resistência de atrito: devido ao atrito entre água e o casco, correspondendo às forças tangenciais a superfície do casco;
- b) Resistência de turbilhonamento: devido à formação de turbilhões e vórtices;
- c) Resistência de ondas: devido à formação de ondas próprias; componente perpendicular ao casco;
- d) Resistência do ar: (parte emersa) que é composta por atrito e turbilhonamento;
- e) Outras de menor interferência: resistência de “spray”, de onda de quebramento, etc...

7.2 – Resistência à Propulsão

É um dos itens mais importantes dentro da espiral de projeto, já que este deverá definir a máquina propulsora (motor); assim o dimensionamento inadequado poderá repercutir durante a vida da embarcação, podendo resultar em empreendimento de má retorno ao armador, inviabilizando a empreitada em alguns casos.

São apresentadas a seguir, formulações de resistência à propulsão que permitem estimar este valor em função das características principais e ainda servirem como orientações gerais para elaboração ou melhorias das linhas do casco.

- *Automotores*

O cálculo da resistência de automotores poderá ser realizado como se navegassem em águas profundas através de séries sistemáticas, hoje, em sua grande maioria, já automatizadas, que mais se aproximem das linhas dos cascos. Posteriormente, devem ser efetuadas as correções devido ao efeito de águas rasas, tais como o apresentado em PNA [39], através de curvas de Schlichling que fornece a correção na velocidade em função do $(\sqrt{A_x/h})$ versus $V^2/g*h$ que tem fornecido bons resultados - figura 7.4.1. ou através de formulações que serão analisadas posteriormente.

- *Empurradores*

Os empurradores deverão estar na esteira da chata ou de seu comboio, assim a resistência deverá ser uma porcentagem a acrescentar sobre o das chatas. Assim, Bari apresenta, como sugestão para este acréscimo, a seguinte formulação:

Bari [5]:

$$R = 0,07289 * e^{\left(\frac{1,45}{h-H}\right)} * V^{2,0} * H^{\left(0,60 + \frac{50}{W-B_F}\right)^{0,38}} * L_F^{0,38} * B_F^{1,19} \text{ (lbf)} \quad (7.2.1)$$

$$L_F = L * N_C ; B_F = B * N_R \quad (7.2.2)$$

Onde:

L = Comprimento do comboio (ft);

N_c = número de chatas em linha;

B = Boca do comboio (ft);

N_R = Número de chatas em colunas;

h = Profundidade (ft);

H = Calado (ft);

W = Largura da via (ft);

V = Velocidade (nós);

R = Resistência ao avanço (lbf).

Como ilustração, são apresentados nas figuras 7.2.1, 7.2.2 e 7.2.3 empurradores típicos utilizados na navegação americana, europeia e ex-União

Soviética Navegação, com o intuito de mostrar empurradores quinados, de formas curvas, bi e tri-hélices e com popa em semi-túnel.

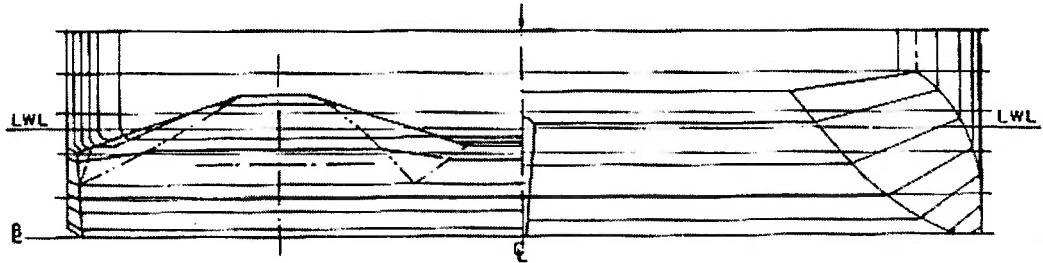


Figura 7.2.1 – Empurrador Quinado [21].

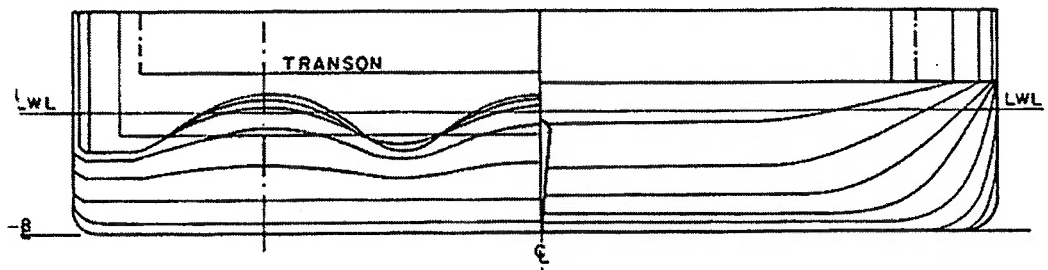


Figura 7.2.2 – Empurrador de Formas Curvas Tri-Hélice [21].

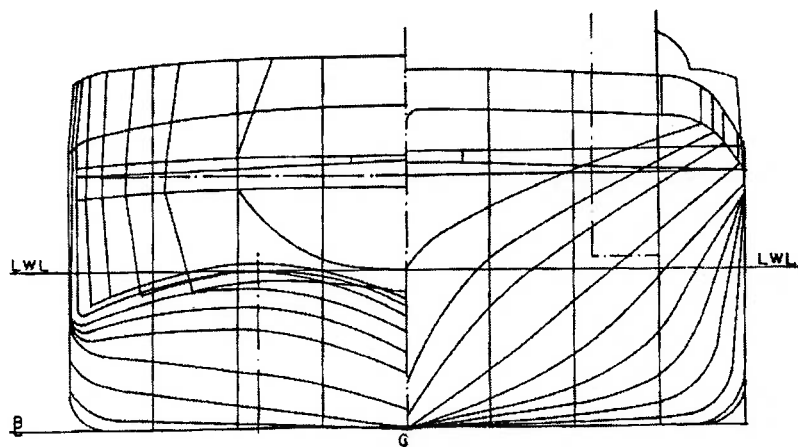


Figura 7.2.3 – Empurrador com Semi-Túnel [21].

- *Chatas*

Estudos experimentais de laboratório e dados de campo IPT [19] permitiram deduzir as seguintes considerações para a resistência hidrodinâmica das chatas isoladas, que são úteis no desenvolvimento das linhas:

a) A altura livre da superfície da água à chapa de encosto de vante deve ser tal que evite o empilhamento da água na velocidade de operação. Deve-se evitar também que a água embarque pela proa. Isto é tanto mais válido quanto maiores forem as velocidades;

b) O raio de concordância do fundo entre corpo de vante e paralelo médio tem a importância maior que o ângulo de inclinação do fundo do corpo de vante;

c) Raios crescentes no bojo tendem a diminuir a resistência à propulsão. Mas deve-se evitar raios maiores que o calado leve, pois assim minimiza-se o escorregamento lateral, quando navegando nesta condição. Na maioria dos casos este limite está em torno de 30 cm;

d) Raios de curvatura no bojo do corpo de vante tendem a melhorar o escoamento diminuindo a resistência;

e) A inclinação do corpo de saída deve ser mais suave que o corpo de vante, aumentando-se os raios de concordância a fim de minimizar os efeitos de separação.

A inclinação máxima permissível estaria entre 22 e 23 graus;

f) Introduzindo-se uma altura de fundo no corpo de vante produz uma redução na resistência;

g) Um estreitamento lateral do corpo de vante produz uma redução na resistência. Mas, para utilização em comboios este afilamento é desfavorável;

h) Para chatas de maior velocidade (8 a 12 nós), introduzindo uma imersão da chapa de encosto de popa de cerca de 15 cm, tem-se uma redução na resistência ao avanço;

i) Com a variação de C_r (coeficiente residual) em função de L/B (comprimento x boca), observa-se a tendência de diminuição de C_r com o aumento de L/B , como nas demais embarcações;

j) A relação Boca-Calado (B/H), nos indica a forma da seção mestra já que os coeficientes de seção mestra é próximo de 1,0. Ainda é muito difícil prever como variará o coeficiente de resistência residual, ao aumentar B/H , pois seu aumento levará a superfícies molhadas maiores;

k) Em se tratando de chatas isoladas em condição leve, percebe-se uma tendência de diminuição de C_r com aumento de B/H , porém, quando se analisa somente embarcações na condição carregada, observa-se uma grande dispersão;

l) Em todas as relações analisadas, houve grandes variações de C_r para um valor de um determinado adimensional (ou C_v , ou L/B , ou B/H), o que indica que além destes, outros fatores estão influenciando na determinação do coeficiente de resistência residual C_r . Entre outros fatores, as formas do corpo de entrada e de

saída, bem como o tipo de proa e o raio de concordância entre o corpo de vante e o fundo da chata.

Na figura 7.2.4, observa-se as várias formas típicas de chatas que são listados por Roorda [43].

A partir das considerações acima, são sugeridas três equações para calcular a resistência:

Howe [19]:

$$R = F * e^{\left(\frac{1,46}{h-H}\right)} * V^2 * H^{\left(\frac{0,6+50}{W-B}\right)} * L^{0,38} * B^{1,19} \quad (\text{lbf}) \quad (7.2.3)$$

h = Profundidade do Canal (ft);

H = Calado do Comboio (ft);

V = velocidade ao avanço (nós);

B = Boca do Comboio (ft);

W = Largura do canal (ft);

R = Resistência ao avanço (lbf);

F = Fator de Multiplicação = 0,07289.

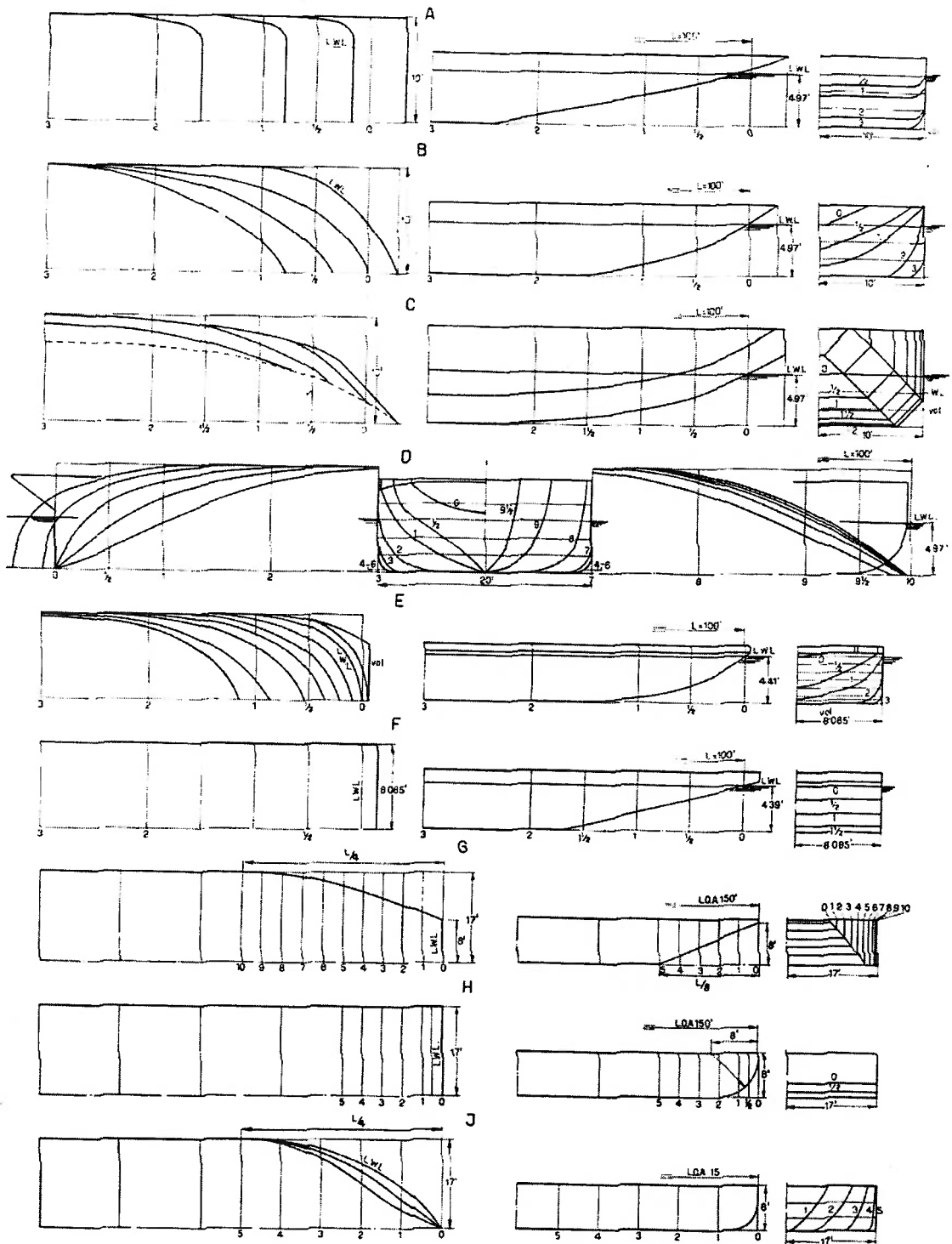


Figura 7.2.4 – Roorda – Formas de Chatas [43].

Bronzini [19]:

$$R = r * V^2 \quad (\text{lbf}) \quad (7.2.4)$$

Onde r é definido por :

$$r = 0,0118 * B_C * H^{\frac{2}{5}} * \left[L_C + 70,5 + \left(1 - \frac{L_C}{328} \right) * \sqrt{\frac{C_B}{(1 - C_B)}} \right] * K_C * K_F \quad (7.2.5)$$

$$K_C = 2,42C_B^2 - 3,43C_B + 1,34 \quad (7.2.6)$$

$$K_F = 1,0 \text{ (para até 2 chatas)} \quad (7.2.7)$$

L_C = Comprimento do comboio (ft);

B_C = Boca do comboio (ft);

H = Calado do comboio (ft);

V = Velocidade (ft/s);

R = Resistência ao avanço (lbf).

Schale [19]:

$$EHP = 5,113 * 10^{-5} * \Delta * \left(\frac{L}{B} \right)^{-0,473} * V^{3,46} \quad (7.2.8)$$

EHP - Potência Efetiva;

Δ - Deslocamento (t);

V - Velocidade (km/h);

$\frac{L}{B}$ - Razão Comprimento (m) - Boca (m);

L_e - Comprimento do corpo de entrada (m);

L_s - Comprimento do corpo de saída (m);

Restrições para aplicação da fórmula de Schale:

- L_e : em torno de 20% de L;
- L_s : em torno de 10% de L;
- calado da ordem de 3m;
- profundidade igual ou superior a 5 vezes o calado;
- coeficiente de bloco em torno de 0,9.

Foi feita uma comparação entre os dados de ensaios de resistência ao avanço da chata do Comboio do Rio Araguaia e estas formulações, chegando-se para faixas usuais de velocidade de operação, a resultados, com as três formulações, bastantes satisfatórios, o que nos leva a crer que se possa utilizar para estimativas preliminares de resistência.

7.3 – Efeito de Águas Rasas

O aumento das dimensões dos navios, bem como as velocidades dos navios cargueiros em geral, modificou o conceito de profundidade até então adotado, determinadas condições que outrora eram em águas profundas passaram a ser consideradas como águas rasas.

Antes, porém, faz necessária novamente a definição de águas rasas, na navegação em locais com restrição do fundo, ou melhor, com profundidade limitada e largura “infinita”, ou seja que não há influencia lateral.

Esse efeito não ocorre só pelas dimensões dos navios que foram aumentadas, mas também pelo crescente aumento na demanda de transporte através do sistema aquaviário, tanto de cabotagem como de navegação interior que fez com que aumentassem as velocidades de cruzeiro, daí a importância deste assunto neste tema.

Na navegação interior, a restrição do calado não é definida somente pelas eclusas, mas também pelos materiais que compõem o fundo, pois pode haver pontos onde há presença de bancos de areia, podendo provocar perda de hélices, lemes, encalhe ou ainda manobrabilidade prejudicada.

Normalmente, a influência de águas rasas é caracterizada pelo número de Froude de profundidade, relacionado-se a velocidade do navio com a profundidade local, expresso por:

$$F_h = \frac{V}{\sqrt{g * h}} \quad (7.3.1)$$

Onde :

h = profundidade local.

Os principais efeitos de águas rasas são os seguintes:

- A velocidade ao redor do casco varia, fazendo com que aumente a resistência de atrito, bem como as outras partes da resistência, principalmente vórtice e resistência de ondas que pode ser traduzida em uma necessidade de maior potência.
- Variação das pressões ao redor do casco;
- Mudança de trim;
- Sinkage (afundamento paralelo);
- Perda de manobrabilidade;
- Perda de estabilidade;
- e outros de menor efeitos.

Entre todos os itens acima citados, o de maior importância neste trabalho é a resistência. Tachibana [47] apresenta resultados típicos da potência em função da velocidade na figura 7.3.1.

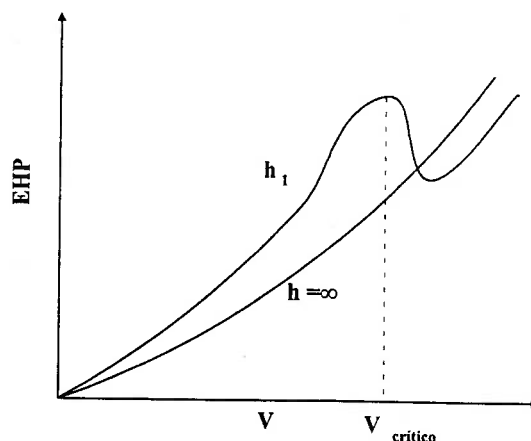


Figura 7.3.1 – Variação Típica do Efeito de Águas Rasas [47].

$V_{\text{crítico}}$ = Velocidade crítica.

O gráfico acima mostra uma maior variação da potência em função da velocidade, fazendo aparecer a crista na curva de EHP para profundidade finita, com bastante nitidez e logo após esta crista aparece um cavado na curva, podendo chegar a ter até uma potência menor do que em profundidade infinita.

Considerando uma mesma embarcação, à medida que diminuimos a profundidade h do local de navegação esta crista aparece numa velocidade menor. Quando a velocidade ultrapassa este ponto de crista, a potência necessária torna-se menor que quando em águas profundas - devido às mudanças das condições de fluxo ao redor do casco, fazendo com que a embarcação seja transportada pela frente de onda própria. Tachibana [47] apresenta a profundidade velocidade em que inicia o aparecimento do efeito de águas rasas como :

$$h = 0,311 * \lambda_1 \quad (7.3.2)$$

Onde λ_1 – Comprimento de onda;

Ou seja, quando o comprimento de onda relativamente à profundidade está numa razão de 0.311, começa a aparecer o efeito de águas rasas, ou ainda quando:

$$V = 0,702 * V_w \quad (7.3.3)$$

V_w = Velocidade da onda.

Isto é, quando a velocidade atinge 0,702 da velocidade de ondas longas V_w inicia o aparecimento do efeito, esta velocidade é chamada de velocidade crítica e a ela associamos o chamado número de Froude de profundidade:

$$F_h = \frac{V}{\sqrt{g * h}} \quad (7.3.4)$$

$$V_w = \sqrt{g * h} \quad (7.3.5)$$

Os efeitos de águas rasas ocorrem juntamente com um aumento do ângulo de abertura de formação das ondas próprias, (diferente dos 19°28') e da altura das ondas transversais. Quando, porém, F_N torna-se maior que um número de Froude crítico (teoricamente igual a 1), o sistema de ondas transversais desaparece, restando apenas as ondas divergentes, o que explica a diminuição da resistência do navio nestas condições. A resistência chega a ser menor que a encontrada em águas profundas.

7.4 – Formulações para Águas Rasas

A dificuldade de levar em conta os efeitos de águas rasas, leva-nos a buscar um outro caminho, pois sabe-se que os ensaios em águas rasas são mais difíceis de serem efetuados que os ensaios em águas profundas; assim como há necessidade de aproveitar os resultados de águas profundas que são realizados para navios convencionais, e, como consequência, toda a metodologia de estimativa de resistência nas ferramentas de projeto de navios convencionais.

Para consideração do efeito de águas rasas, foram levantadas três formulações apresentadas a seguir:

Lackenby [47]:

$$\frac{dV}{V} = 0,1242 * \left(\frac{A_M}{h^2} - 0,05 \right) + 1 - \left\{ \tanh \left(\frac{gh}{V^2} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (7.4.1)$$

Onde

$\frac{g * h}{V^2}$ - representa o quadrado do número de Froude de profundidade ;

$\frac{A_M}{h^2}$ - mostra as restrições do canal de navegação;

$\frac{dV}{V}$ - perda de velocidade.

Sudô [53]:

$$\frac{dC_f}{C_f} = 191,4 * \left(\sqrt{\frac{A_M}{h^2}} - 0,32 \right)^2 + 16,57 * \left(\sqrt{\frac{A_M}{h^2}} - 0,32 \right) \quad (7.4.2)$$

$\frac{dC_f}{C_f}$ - variação do coeficiente de resistência ao atrito.

Schlichting's [39]:

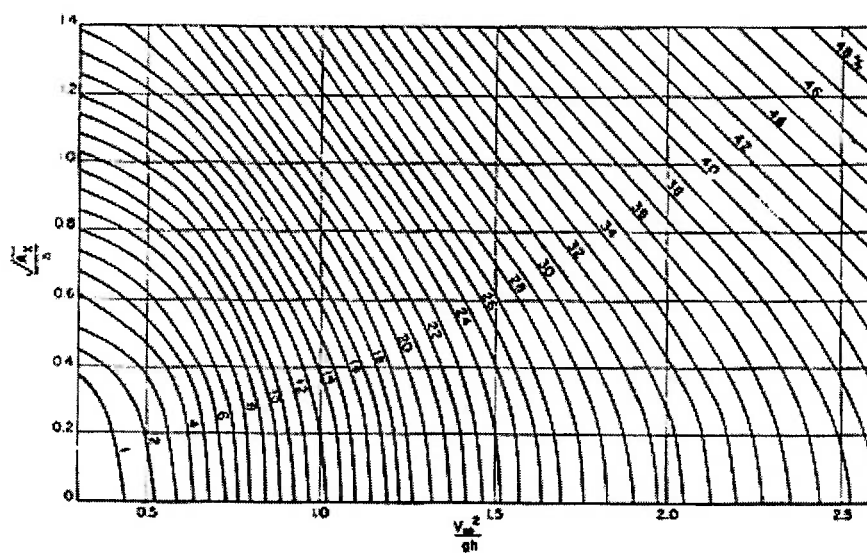


Figura 7.4.1 – Gráfico de Schlichting's [39].

$$\frac{dV}{V} = f \left[\left(\frac{V_\infty^2}{g^* h} \right), \left(\frac{\sqrt{A_M}}{h} \right) \right] \quad (7.4.3)$$

A semelhança entre as duas primeiras fórmulas está no termo $\frac{A_M}{h^2}$, da mesma forma que na formulação de Schlichting nota-se a existência de um termo equivalente ao F_h de profundidade finita $\left(\frac{V_\infty^2}{g * h} \right)$.

As fórmulas de Lackenby [47] e Schlichting's [39] são definidas em função da diferença de velocidade com a resistência; em outras palavras, fica a necessidade de saber qual velocidade é necessária para uma mesma resistência com a influência do efeito de águas rasas, ou, quanto perde em porcentagem de velocidade para mesma potência, ou mesmo em números significativos, perde-se com esse efeito; já a formulação de Sudô [53] relaciona o coeficiente de atrito C_f com a resistência, ou seja, considera que o efeito de águas rasas se dá sobre a resistência de atrito, sendo invariável a parte da resistência residual.

Capítulo 8 - Aplicação a um Caso - Comboio Rio Araguaia

Com o objetivo de validar as formulações apresentadas nos capítulos anteriores, tomou-se as embarcações do rio Araguaia-Tocantins para analisar, já que a Administração da Hidrovia Araguaia Tocantins – **AHITAR** permitiu, através do IPT que foi o idealizador do conceito e projeto, que os dados dos resultados em modelo reduzido e em escala real fossem utilizados para a presente pesquisa (anexo 2).

8.1 – Características do Comboio Araguaia

O comboio ensaiado no tanque de provas e em escala real no rio Araguaia-Tocantins tem as seguintes características :

Tabela 8.1.1 - Características da Embarcação da AHITAR.

	Empurrador	Chata
Comprimento Total (m)	18,5	40,0
Comprimento entre Perpendiculares (m)	16,3	39,2
Boca Moldada (m)	6,0	8,0
Calado Máximo (m)	1,4	2,0
Calado Médio Mínimo (m)	1,1	0,7
Calado de Projeto (m)	1,2	2,0
Deslocamento de Projeto (t)	97,5	530
Deslocamento da Chata -1,6m (t)	-	408
Deslocamento Leve (t)	73,2	130
Potência Instalada (kW)	2x224	-
Rotação Máxima dos Motores (rpm)	1.800	-
Relação de Redução de Rotação	1:3,13	-

8.2 – Resultados

Foram usadas as formulações anteriormente apresentadas nos capítulos 4, 6 e 7, e os resultados são mostrados a seguir; comentários sobre cada formulação serão

feitos posteriormente, bem como serão apresentados a sugestões para serem empregadas nas hidrovias aqui no Brasil.

8.2.1 – Dimensões Principais

Tabela 8.2.1 – Resultado das formulações apresentadas para Chata.

	Bari	IPT	Real
Comprimento	35,14	-	40,00
Boca	8,26	9,67	8,00

Tabela 8.2.2 – Resultado das formulações apresentadas para Empurradores.

	Bari	IPT	Latorre	Real
Comprimento	20,00	-	25,24	18,50
Boca	7,00	-	-	6,00
Calado	1,8 - 2,00	-	-	1,40
Deslocamento	-	139,81	-	97,50
Profundidade	3,00	-	-	-

Tabela 8.2.3 – Resultado das formulações apresentadas para Automotores.

	Bari	IPT	Real
Comprimento	50,39	-	49,15
Boca	6,75	8,78	8,00
Calado	-	1,86	1,90
Deslocamento	-	626,95	590,00
Coefficientes de Forma	0,70	-	-

8.2.2 – Resistência

Para a validação das formulações apresentadas em capítulos anteriores, apresentam-se, a seguir, os resultados para as mesmas condições já mencionadas anteriormente, para comboio de uma chata e duas chatas em paralelo comparadas às obtidas no laboratório hidrodinâmico com a condição de profundidade infinita (Experimental).

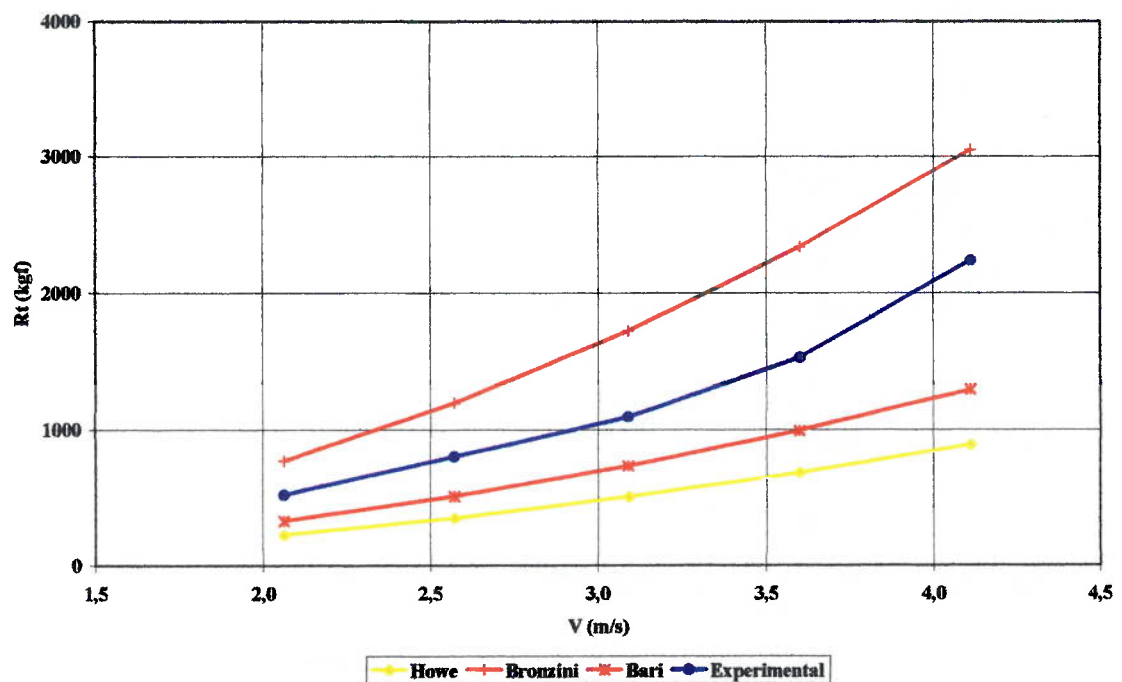


Figura 8.2.1 – Gráfico de Comparação das Formulações de Resistência para Uma Chata.

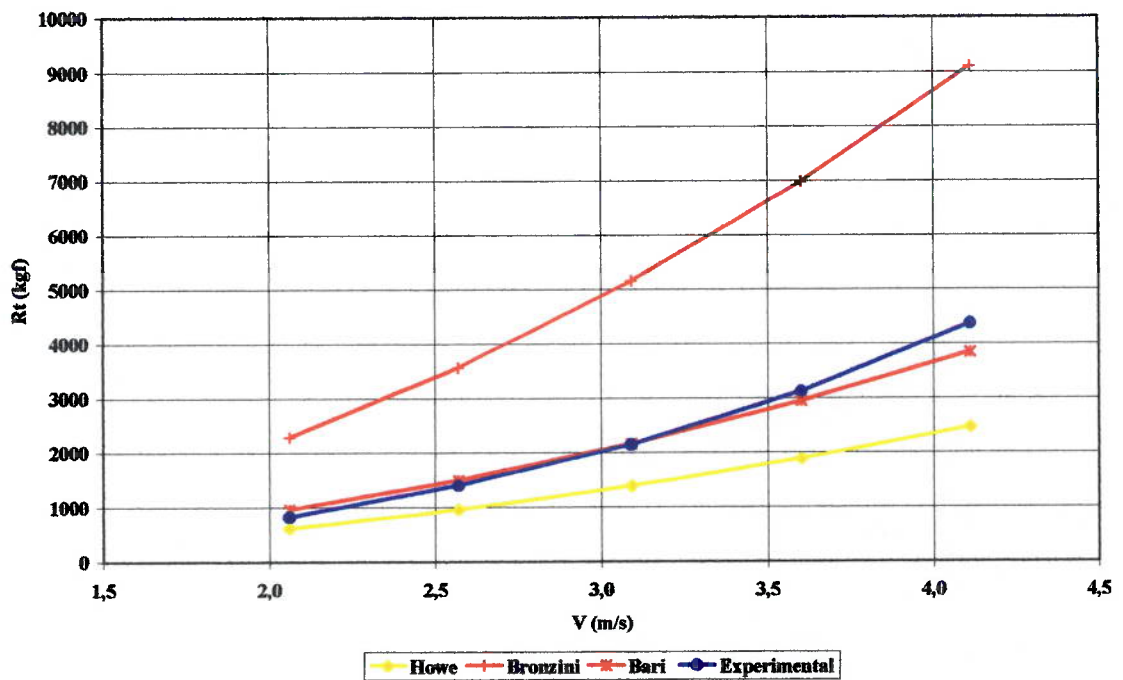


Figura 8.2.2 – Gráfico de comparação das formulações de resistência para Duas Chatas em Paralelo.

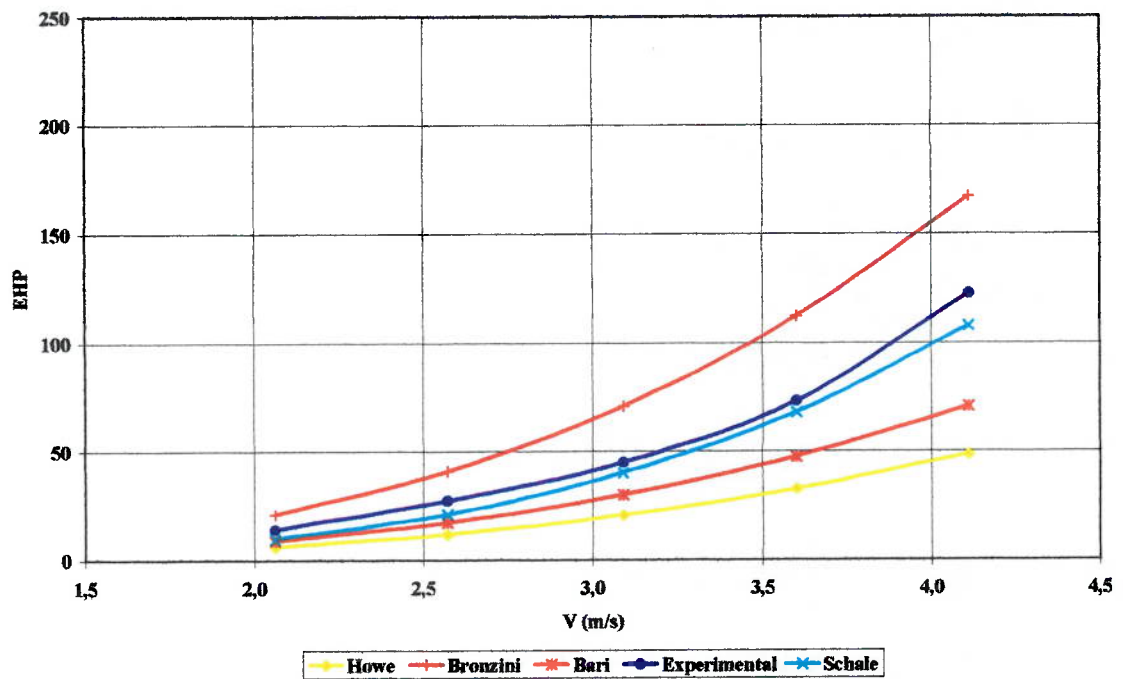


Figura 8.2.3 – Gráfico de Potência de todas as formulações apresentadas para Uma Chata.

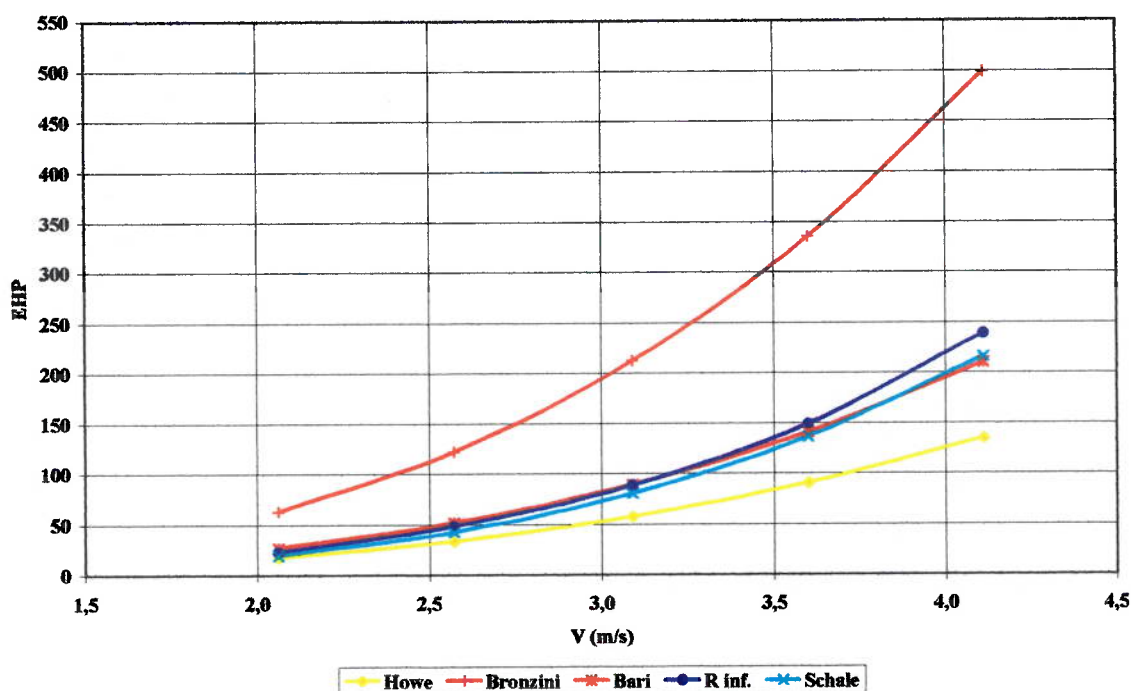


Figura 8.2.4 – Gráfico de Potência de todas as formulações apresentadas para Duas Chatas em Paralelo.

8.2.3 – Efeitos de Águas Rasas

Como os resultados obtidos a partir das formulações propostas em 7.2.3, 7.2.4 e 7.2.8 por Howe, Bari, Schale e Bronzini apresentam resultados bastantes diferentes, notamos que as formulações para corrigir os resultados de águas profundas tornam-se importantes. Assim, com a aplicação das formulações 7.4.1, 7.4.2 e 7.4.3, chegou-se a diferentes valores de resistência ao avanço para profundidade $h = 9\text{m}$. Os resultados são apresentados nos gráficos (8.2.5 e 8.2.6), onde temos resultados dos ensaios realizados no tanque de Provas do IPT, com

modelo em escala 1:13 e extrapolados para escala real, com consideração de profundidade infinita comparativamente aos resultados calculados (anexo 3 e 4).

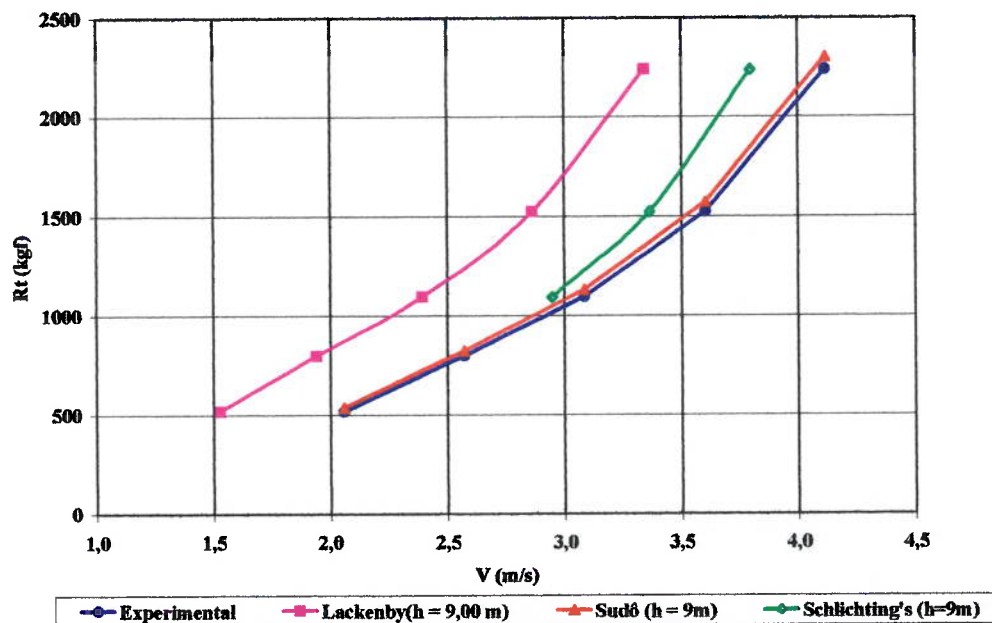


Figura 8.2.5 – Comparação da Resistência com as Formulações Adotadas para Uma Chata.

Para a correlação dos resultados dos cálculos até aqui efetuados pudessem ser feitas com os resultados de medições em escala real navegando no rio Araguaia, foi necessário efetuar-se transformações dos valores das resistências em torque necessário nos eixos, e para tanto, foram utilizados os valores dos coeficientes hidrodinâmicos de interação casco-hélice levantados em ensaios com modelo reduzido.

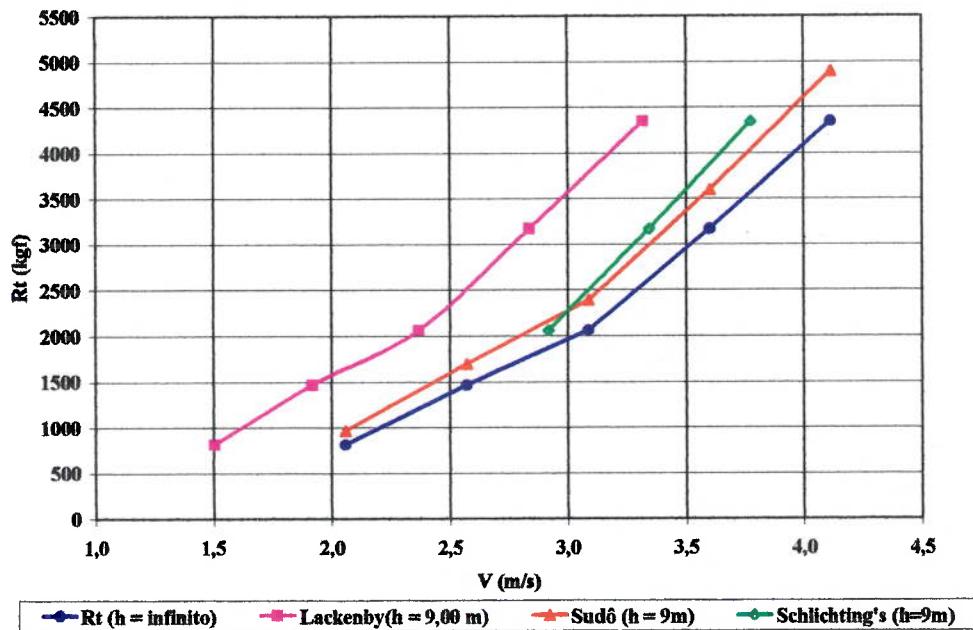


Figura 8.2.6 – Comparação da Resistência com as Formulações Adotadas para Duas Chatas em Paralelo.

Então com os dados de resistência ao avanço e a metodologia de cálculo indicada na figura 8.2.7, que consistiu em obter um torque $Q_{\text{normativo}}$ para comparar com o $Q_{\text{experimental}}$ obtido na escala real, viabilizou-se assim a presente correlação.

Os valores de torques em escala real, foram obtidos através de instrumentação especialmente desenvolvida para avaliação das provas de mar, onde se mede a deformação do eixo e rotação.

Para os cálculos de torque a partir dos valores da resistência obtidos acima (figuras 8.2.5 e 8.2.6), foram considerados os coeficientes hidrodinâmicos resultantes dos ensaios de autopulsão com modelo reduzido em laboratório hidrodinâmico do IPT.

Com os valores de $Q_{\text{normativo}}$, foi realizada, então a comparação com os valores de $Q_{\text{experimental}}$ fornecidos pelo IPT; nas figuras 8.2.7 e 8.2.9 são mostrados os resultados dessa comparação.

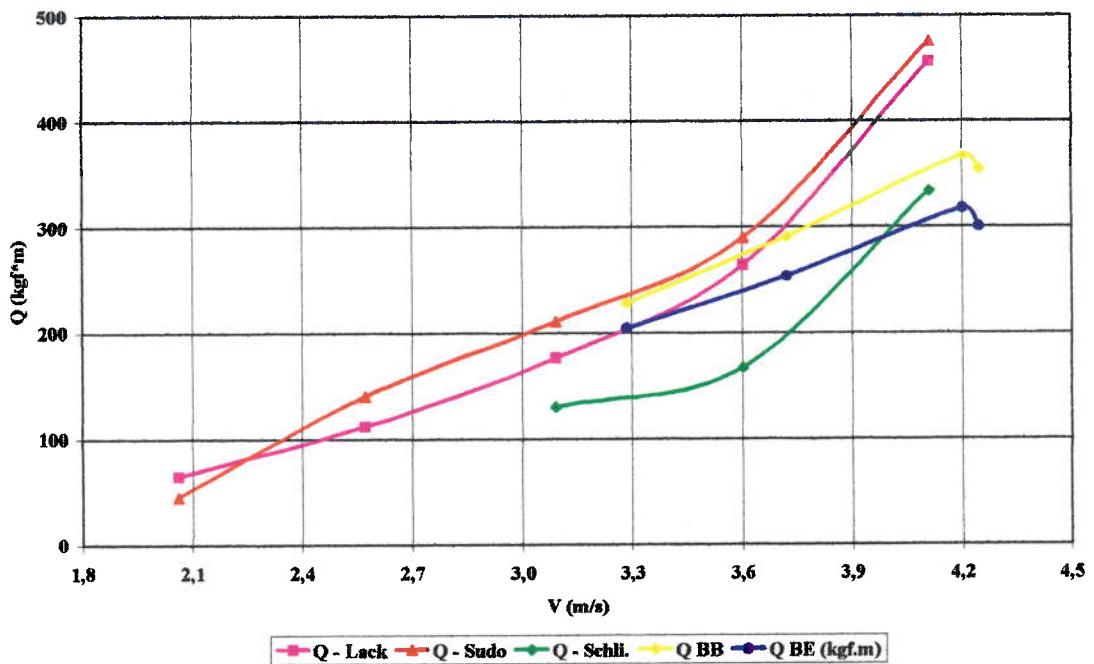


Figura 8.2.7 – Resultados da comparação de Q para as três formulações com os resultados de escala real para comboio de Uma Chata.

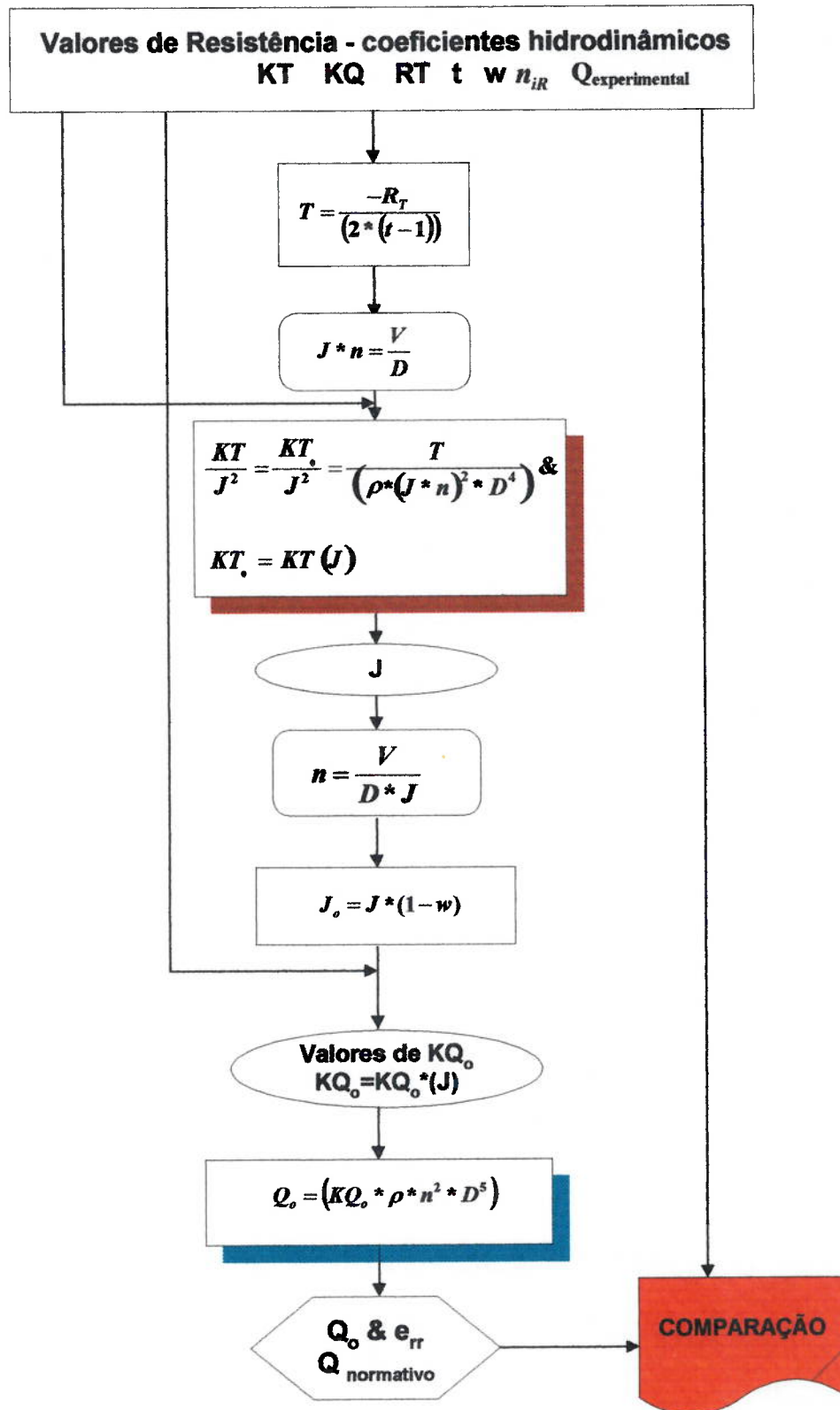


Figura 8.2.8 – Diagrama de blocos sobre a metodologia de cálculo efetuada.

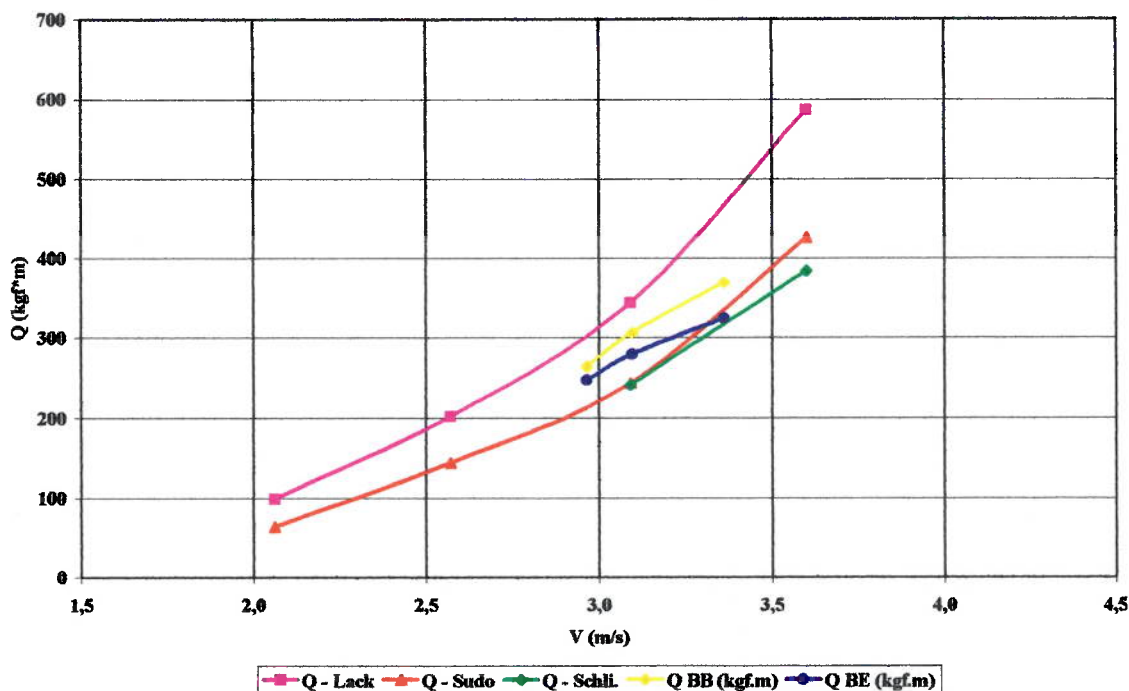


Figura 8.2.9 - Resultados da comparação de Q para as três formulações para comboio de Duas Chatas em Paralelo.

Os resultados não apresentaram consistência nas velocidades mais elevadas da faixa ensaiada, porque os coeficientes hidrodinâmicos para transformação dos diversos valores de resistência foram provenientes dos ensaios de auto-propulsão com modelo reduzido em águas profundas. Assim a metodologia adotada ainda não representava a realidade, notando-se que ainda necessitavam de correções a serem introduzidas nos coeficientes hidrodinâmicos (coeficiente de redução da força propulsora e coeficiente de esteira).

Para isto, introduziu-se a correção dos coeficientes de esteira (w) e de redução da força propulsora (t) advindos dos ensaios com modelos reduzidos. Como as considerações do efeito de águas rasas se faziam na mudança de velocidade para

uma mesma potência, fez-se necessária a obtenção da relação entre t e w . Após análise de diversas formulações que forneciam a relação do coeficiente de esteira e do coeficiente de redução da força propulsora, tomou-se a fórmula 8.3.1 de Lamerem [53], que mais se aproximava dos resultados experimentais do modelo reduzido quando se comparava os dois coeficientes hidrodinâmicos, pois necessitava-se a sistematização das correções a serem introduzidas na metodologia.

$$t = 0,70 * w + 0,06 \quad (8.3.1)$$

Assim encontrada a relação de t e w , efetuou-se a correção de w considerando correção semelhante à correção efetuada quando da consideração da resistência através da definição:

$$w = \frac{V - V_o}{V} \quad (8.3.2)$$

Onde V_o é a velocidade do ensaio de auto-propulsão para águas abertas. A velocidade V obtida ainda nos cálculos de resistência deve ser corrigida com a diferença de V fornecida pelas equações de Lackenby e Schlichting's equação 7.4.1 e 7.4.3. Para a V obtida por Sudô adotou-se a correção de Lackenby, equação 7.4.1.

Assim, corrigindo w , e através da relação encontrada entre w e t , pode-se aplicar a formulação de Lamerem (equação 8.3.1), obtendo os valores do coeficiente de redução da força propulsora t respectivamente.

Obtidos os novos coeficientes hidrodinâmicos, partiu-se então para um novo cálculo de $Q_{\text{normalizado}}$ seguindo o mesmo desenvolvimento apresentado no fluxograma da figura 8.2.7 (anexo 5).

Com isso, apresenta-se a seguir nas figuras 8.2.10 e 8.2.11 os resultados de $Q_{\text{normalizado}}$ comparados com $Q_{\text{experimental}}$ com os coeficientes corrigidos.

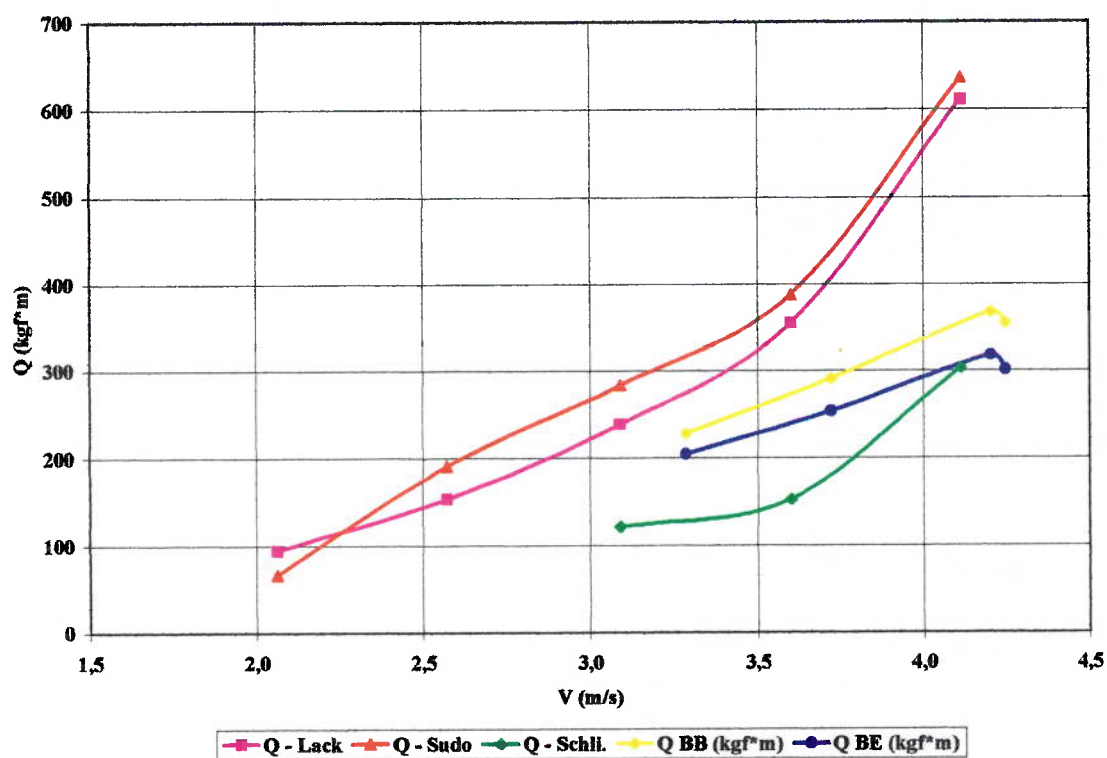


Figura 8.2.10 – Resultados de Q com Correção dos Coeficientes w e t para Uma Chata.

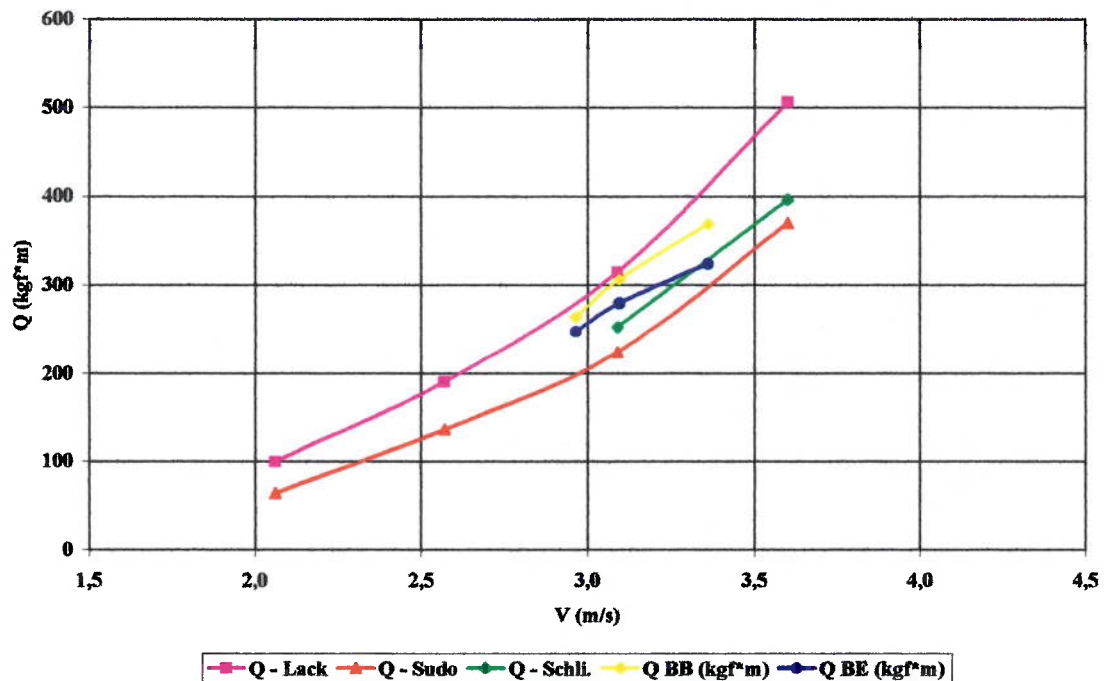


Figura 8.2.11 – Resultados de Q com Correção dos Coeficientes \underline{w} e \underline{t} para Duas Chatas em Paralelo.

Os resultados obtidos até aqui, figuras 8.2.8 a 8.2.11 ainda apresentam diferenças nas velocidades mais elevadas dentro da faixa ensaiada, indicando que deveremos levar em consideração o efeito da influência do número de Froude de profundidade e restrições das secções. Assim, tomou-se as teorias apresentadas por Tachibana [48] em seu desenvolvimento teórico da consideração do efeito de águas rasas, quando introduziu o termo não-linear na teorias até então consideradas por Tuck, ou seja, uma parcela que traduzisse de forma semelhante o efeito do número de Froude de profundidade. Após considerações de diversas formulações, é proposta

a seguinte que mais se aproxima dos resultados experimentais obtidos com o comboio protótipo do rio Araguaia.

$$\frac{dV}{V} = 0,1242 * \left(\frac{A_M}{h^2} - 0,05 \right) + 1 - \left\{ \tanh \left(\frac{g * h}{V^2} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} - V \left(\frac{A_M}{h^2} \right)^{-1} \quad (8.3.3)$$

A seguir são apresentadas nas figuras 8.2.12 e 8.2.13 os resultados da equação 8.3.3, de TADA para resistência, comparando-os com os resultados da formulação de Lackenby para as condições de uma chata e duas chatas em paralelo, com o intuito de observar o comportamento para velocidades mais elevadas da faixa aqui considerada.

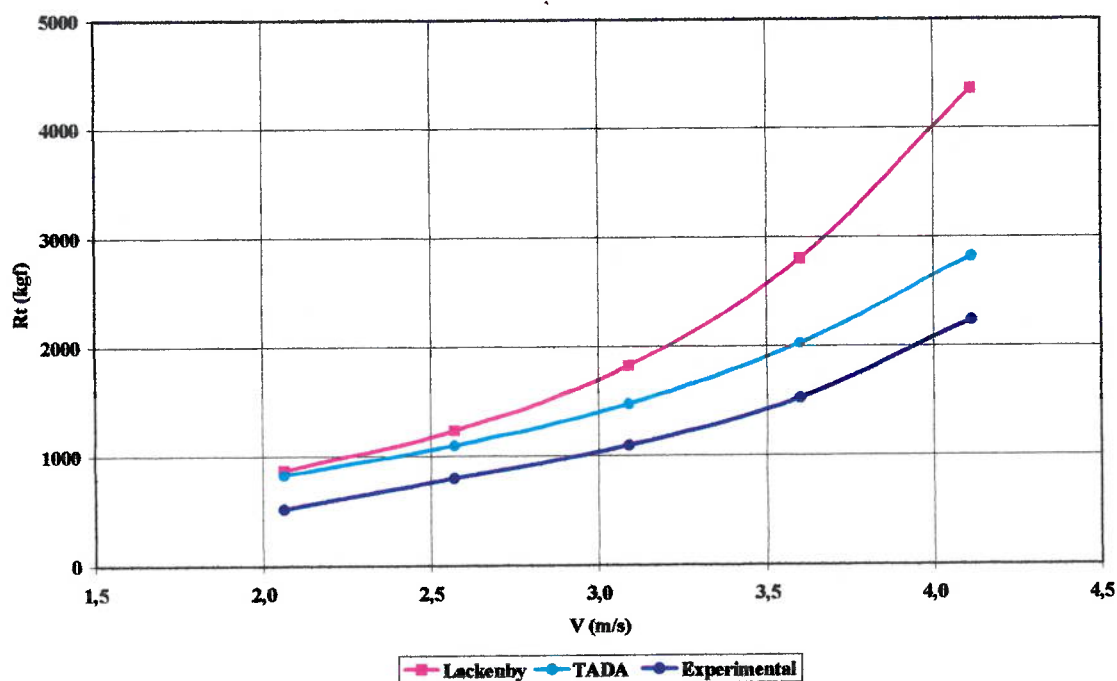


Figura 8.2.12 - Gráfico de Comparação de Resistência de TADA para Uma Chata.

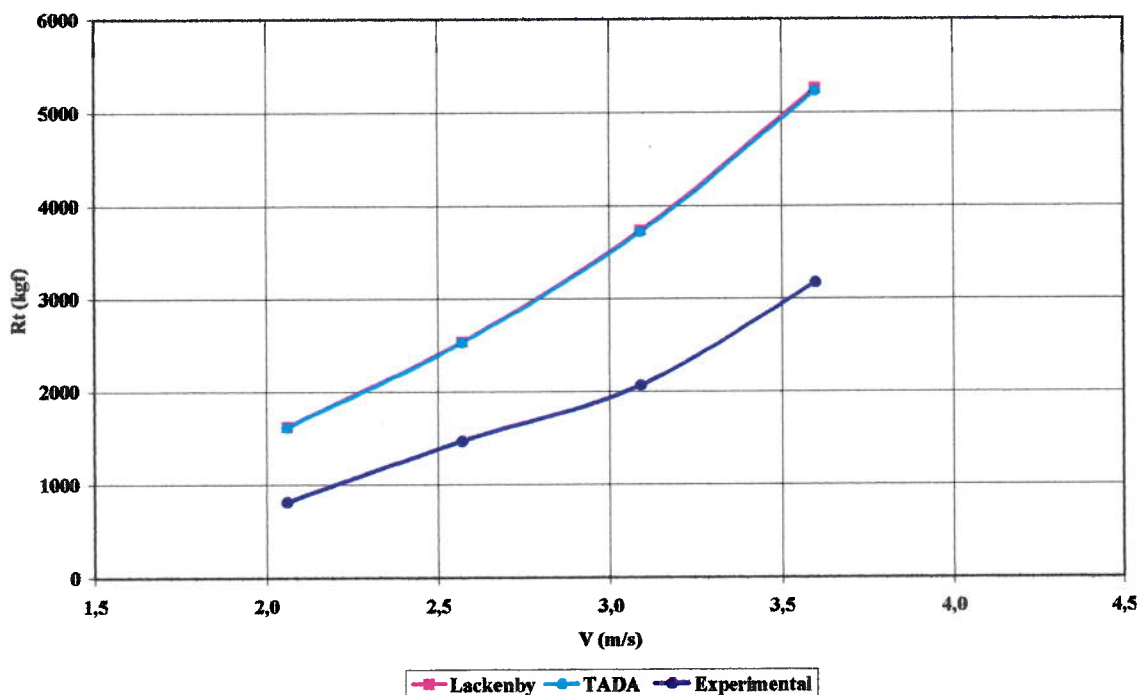


Figura 8.2.13 – Gráfico de Comparação de Resistência de TADA para Duas Chatas em Paralelo.

Os resultados dos cálculos das resistências, têm o mesmo aspecto mantendo as tendências das outras correções de águas rasas, no entanto, para podermos comparar com o resultado experimental em escala real aqui utilizado para correlação, necessita-se transformar os mesmos para os respectivos torques.

Como as tentativas anteriores para correção dos coeficientes de esteira (w) e de redução da força propulsora (t) não tiveram os resultados esperados de introduzir melhor a correção da consideração do efeito de águas rasas; aqui será considerado os mesmos coeficientes obtidos do ensaio de auto-propulsão com modelo reduzido, ou seja, sem que haja a correção nos coeficientes hidrodinâmicos.

Com isso, efetuou-se toda a metodologia de cálculo apresentada no anteriormente para a comparação de $Q_{\text{normativo}}$ com o $Q_{\text{experimental}}$, de acordo com o fluxograma apresentado na figura 8.2.8. A seguir, nas figuras 8.2.14 e 8.2.15 são mostrados os resultados desses cálculos (anexo 6).

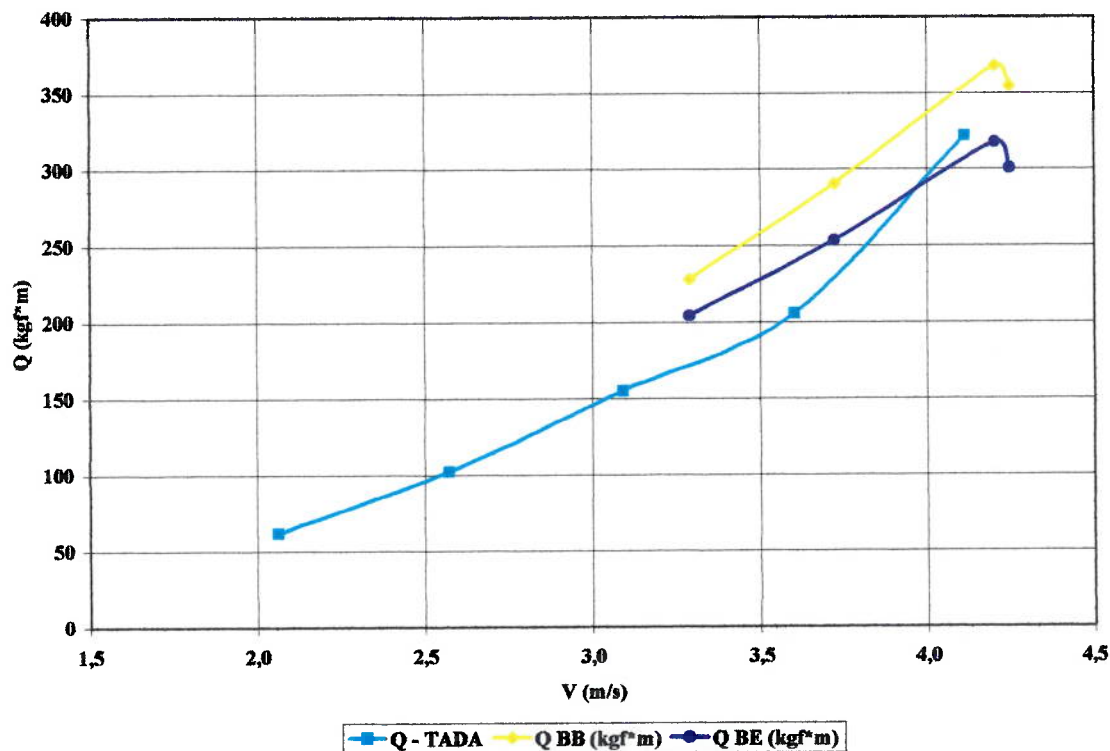


Figura 8.2.14 – Gráfico de Comparação de Torque para Uma Chata.

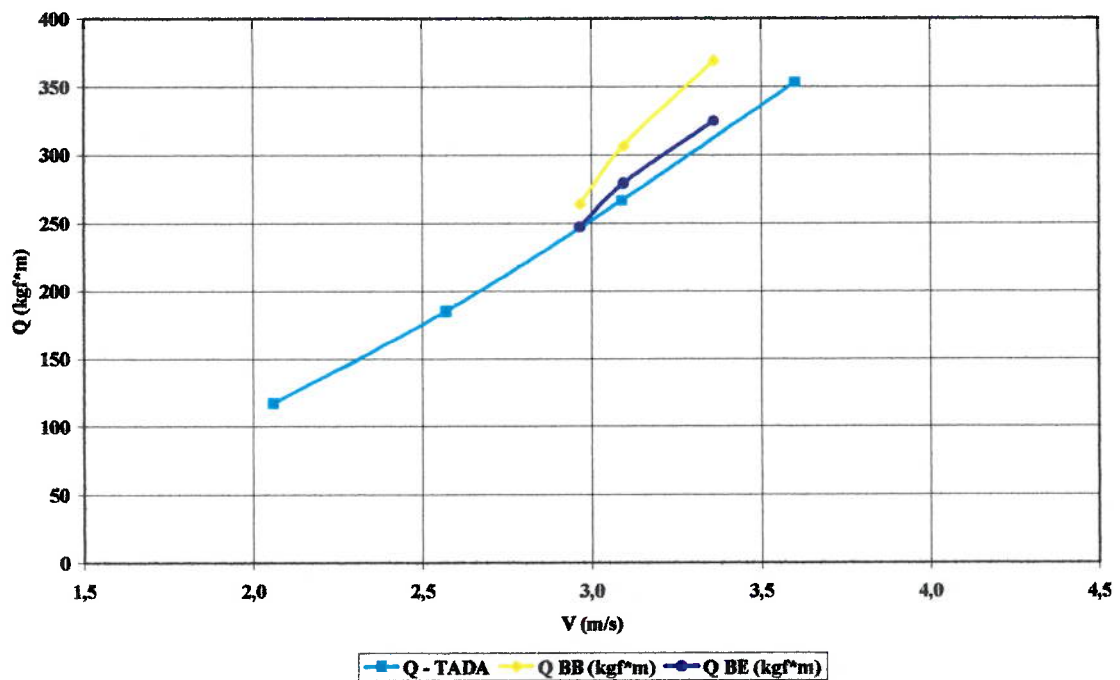


Figura 8.2.15 - Gráfico de Comparação de Torque para Duas Chatas em Paralelo.

Nas figuras 8.2.14 e 8.2.15 notamos que as correções com consideração da influencia da restrição da secção do canal fez com que as formulações aqui consideradas se aproximassem dos resultados obtidos experimentais nas provas de mar com o Comboio fluvial do rio Araguaia. Dando desta forma, uma formulação que introduz o efeito de águas rasas nos resultados obtidos em ensaios convencionais ou através de séries sistemáticas.

Capítulo 9 - Conclusões

Como conclusões da presente pesquisa poderemos enumerar :

- a) As formulações apresentadas para determinação das características principais apresentaram resultados satisfatórios quando aplicadas às embarcações do rio Araguaia, havendo porém, considerações a serem esplanadas aqui:
 - essas formulações são indicadas para uma primeira estimativa das dimensões principais dentro da espiral de projeto, levando-se em consideração que nas vias aqui abordadas há restrições físicas severas de dimensões;
 - as análises e considerações feitas neste trabalho mostraram a importância em aproveitar ao máximo todas as restrições físicas e sem que seja prejudicada a eficiência operacional;
- b) As formulações de Howe, apesar de levarem em conta a profundidade, e de Bronzini, necessitam serem corrigidas com a introdução do efeito de águas rasas, como aqui considerado;

- c) As formulações de Sudô, Schlichting's e Lackenby para introdução do efeito de águas rasas ainda não são satisfatórias para os casos aqui estudados;
- d) A relação existente entre o coeficiente de esteira com o coeficiente de redução da força propulsora obtido em ensaio de auto-propulsão com modelo reduzido em condições de águas profundas, poderá ser utilizada após a correção do coeficiente de esteira com formulações semelhantes às obtidas para a resistência à propulsão;
- e) A formulação apresentada neste trabalho com consideração semelhantes dos efeitos não-lineares de resultado do estudo teórico, apresentou-se bastante realista, ou seja, conseguiu expressar bem os efeitos de águas rasas quando comparados com os resultados experimentais, podendo, desta forma, ser introduzida nas metodologias de projeto convencionais, permitindo a utilização das ferramentas até aqui com pequenas modificações;
- f) Todos os resultados obtidos através de utilização de séries sistemáticas ou com modelo reduzido em águas profundas poderão ser corrigidos com mais exatidão, dando resultados mais próximos da navegação em águas rasas.

Capítulo 10 - Proposta de Continuação de Trabalho

Em função das dificuldades e restrições encontradas ao longo do desenvolvimento desta parte da pesquisa poderemos enumerar os seguintes itens para a continuação do trabalho:

- a) Consideração dos problemas de manobrabilidade levando em conta correções semelhantes a aqui considerada quando da análise da potência;
- b) A análise mais critérios da estabilidade para orientar melhor o carregamento, movimentação de carga, não só dos empurradores, mas também das barcaças ou ainda quando se tem passageiros junto com a carga;
- c) Aplicação nas embarcações da CESP, para melhorar compreensão do comportamento das diferentes considerações levantadas nesta parte da pesquisa, pois possuem mais informações de resultados com modelo reduzido e em escala real, necessitando para isto a obtenção de aprovação para utilização dos seus resultados;

- d) Estudos para a adaptação de outras ferramentas de projeto de navios convencionais para embarcações fluviais, tomando como exemplo o caso aqui utilizado de aplicação do efeito de águas rasas;
- e) Execução de outros ensaios com modelo reduzido e em escala real nas mesmas condições para se obter melhor correlação. Para tanto propõe-se a utilização do diagrama da figura 10.1 que poderá nos fornecer elementos para melhor entendimento dos problemas que encontramos durante o desenvolvimento do projeto otimizado e adaptado as condições locais e consequentemente do barateamento do custo operacional do sistema;

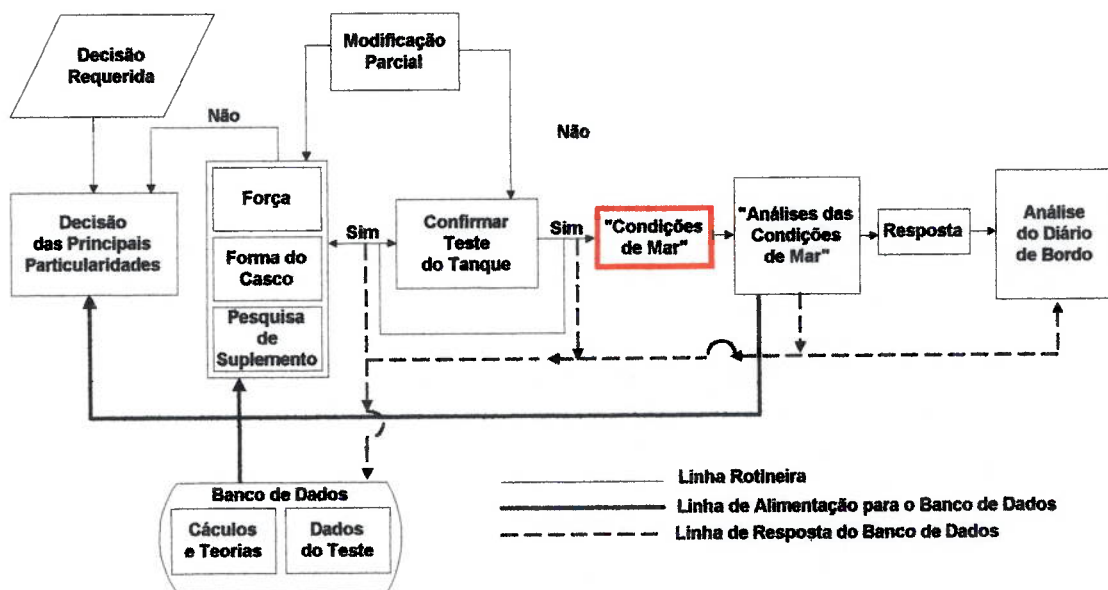


Figura 10.1 – Diagrama de Blocos [51]

- f) Execução de mais ensaios em escala real com o comboio Araguaia, pois conforme observado, alguns dados de torque não se apresentaram consistente;

- g) Desenvolvimento teórico de consideração do efeito de águas rasas na manobrabilidade, estabilidade direcional, afundamento e mudança de trim, entre outros, devido às mudanças de condições de escoamento ao redor do casco.

Capítulo 11 - Bibliografia

- [1] ALMEIDA, C. E. : **“Obras de Transposição de Desnível em Barragens de Aproveitamento Múltiplos”** Tese de Cátedra, EPUSP, São Paulo, 1968.
- [2] ARGYRIADIS, D. A : **“Modern Tug Design with Particular Emphasis on Propeller Design, Maneuverability, and Endurance”** - Transaction SNAME - The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Volume 65, 1957, pp 362 - 444.
- [3] BABADOPULOS, J. L.; REIS, M.A.S : **“Critérios, Normas e Recomendações de Projeto, Construção e Operação de Embarcações Fluviais”** - 13^o Congresso Nacional de Transportes Marítimos e Construção Naval e Offshore, SOBENA, Rio de Janeiro, 1990.
- [4] BAIER, L. A. : **“American River Towboats”** - International Shipbuilding Progress, Volume.6, n^o 63, November 1959, pp 482-485.
- [5] BARI, A., CHOWDHURY, K. H. : **“Design Of Small Inland Commercial Vessels”** - International Shipbuilding Progress, Volume 36, n^o 405, April 1989, pp 19-50.

- [6] BOGDANOV, B. V. – **“Towing Vessel Hull and Form Coefficients”**. In Bogadanov et alli., *Towing Vessels, Design and Construction*, Sudostroeniye, Leningrad, 1974, pp 118-132. English translation : LATORRE & DÜNON [24].
- [7] BRINATTI, H. **“Propulsão – Revisão”**, EPUSP. São Paulo, 1981.
- [8] CHRISTOPPOULOS, B. ; LATORRE , R. – **“River Towboat Hull and Propulsion”**. *Marine Tecnology*, Volume 20, nº 3, July ,1983, pp 209-226.
- [9] COURTSAL, D. P. : **“The Marine Business in the Central United States”** Transaction SNAME - The Society of Naval Architets and Marine Engineers, Volume 79, 1971, pp 542-578.
- [10] SILVA, J. L. C. ; SOUZA, W. F.; CHAVES, E. N. : **“Cabotagem e Navegação Interior : Instrumentos de Minimização do “Custo Brasil” Gerado nos Transportes”**. 17º Congresso Nacional de Transportes Marítimos, Construção Naval e Offshore, SOBENA, Rio de Janeiro, 1998.
- [11] DANN, A.W. : **“Modern Developments in Towboats and Barges for Inland Waterways”** - *Civil Engineering*, October 1940, pp 638-640.
- [12] DARIO, G. B.; TACHIBANA, T. – **“Desempenho Hidrodinâmico de Embarcações Fluviais”** - 15º Congresso Panamericano de Ingeniería Naval, Transporte Marítimo e Ingeniería Portuária - IPEN, Montevidéo, Uruguai, 1997.

- [13] DARIO, G. B.; TACHIBANA, T. – **“Análise do Efeito de Profundidade no Projeto de Embarcações Fluviais”**, 17^o Congresso nacional de Transportes Marítimos, Construção Naval e Offshore, SOBENA, Rio de Janeiro, 1998.
- [14] EDWARDS, V. B.; Cole, F. C. : **“Water Transportation on Inland Rivers”**. Historical Transaction SNAME - The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1943, pp 400-422.
- [15] GRUNTHANER, G. L. : **“Commercial Transportation on the Inland Waterways”**. Transaction - SNAME - The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Volume 70, 1962, pp 84-127.
- [16] GULIEV, U. M. : **“On Squat Calculations for Vessels Going in Shallow Water and Through Channels”** - PIANC, Volume I, n^o 7, 1971, pp 17-22.
- [17] HIRATA, K : **“HIDRODINÂMICA (do navio) I”** - Notas de Aula - Fatec-Jahu, 1991.
- [18] HIRATA, K.; LOPEZ, M. R. F.; GONÇALVES, A. L. : **“Dados Preliminares para Projeto de Embarcações de Pequeno e Médio Porte”** - Instituto Panamericano de Ingeniería Naval, Transporte Marítimo e Ingeniería Portuaria. XII COPINAVAL, Buenos Aires, Setiembre/Octubre 1991, pp 209-231.
- [19] HIRATA, K. ; PADOVEZI, C. D. ; GONÇALVES, A. L. **“Projeto Hidrodinâmico de Chatas”** - In. : 14^o Congresso Nacional de Transportes Marítimos e Construção Naval e Offshore, SOBENA, Rio Janeiro, 1992, Volume 2, pp 111-148.

- [20] HIRATA, K. ; PADOVEZI, C. D. ; GONÇALVES, A. L. **“Projeto Hidrodinâmico de Automotores”** - In. : 15º Congresso Nacional de Transportes Marítimos e Construção Naval e Offshore, SOBENA, Rio Janeiro, 1994, Volume 2, pp 183-197.
- [21] HIRATA, K. ; PADOVEZI, C. D. ; DARIO, G. B. : **“Projeto Hidrodinâmico de Empurradores Fluviais”** - 16º Congresso Nacional de Transportes Marítimos e Construção Naval e Offshore, SOBENA, Rio de Janeiro, 1996, pp 107-113.
- [22] IPT/SIDARPA/SINDARMA : **“Projeto de Embarcações para o Transporte Interior de Passageiros e Cargas”** - Metodologia e Critérios - Manual do Usuário” - IPT. 1989 .
- [23] IPT/AHITAR/CPD/MT: **“Navegação no Rio Araguaia – Recomendações para Projeto, Construção e Operação de Embarcações”**, 1998.
- [24] LATORRE, R., DÜNOW, H. H. : **“Improvement of River Towboat Propulsion: Translations of Selected German and Russian Technical Articles”**. University of Michigan. DNAME. Report nº 243. November 1981.
- [25] LATORRE, R. LUTHRA, G. TANG, K. : **“Improvement of Inland Waterway Vessel and Barge Tow Performance: Translations of Selected Chinese, German and Russian Technical Articles”**. University of Michigan. DNAME. Report nº 249. September 1982.

- [26] LATORRE, R. : **“River Towboat Tunnel Stern”** , Internacional Shipbuilding Progress – Marine Technology Monthly, Volume 29, October 1982, nº 328, pp 252.
- [27] LATORRE, R. : **“Shallow River Pushboat Preliminary Design”**. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol.111, July 1985. pp 678-692.
- [28] LESCOVAR NETO, F. : **“Considerações sobre Estabilidade Estática e Manobrabilidade em Projetos de Rebocadores”**- 11º Congresso Nacional de Transportes Marítimos e Construção Naval e Offshore, SOBENA, Rio de Janeiro, 1986, pp 59-68.
- [29] LUTHRA, G. : **“Investigation of the Wake Field of Triple and Quadruple Screw Pusher Towboats”** - in LATORRE 1982.
- [30] LUTHRA, G.; HEUSER, H. **“Inland Vessels - General Considerations and Recent Developments Related to the Design and Operation”** . 8º Pan American Congress on Naval Engineering - IPEN, pp 407 1983.
- [31] MARCHAL, J. L. J. - **“Avant-Projet de Navire”** - Université the Liège - Faculté des Scienses Appliquées - L. H. C. N. 1988.
- [32] OOSTERVELD, M. W. C. : **“Ducted Propeller Systems Suitable for Tugs and Pushboats”**. International Shipbuilding Progress, Volume19, nº 219, November 1972, pp 351-371.

- [33] PADOVEZI, C. D. : **"Otimização de Hélices de Pequenas Embarcações Utilizando Séries Sistemáticas"**. 11º Congresso Pan-Americano Engenharia Naval e Engenharia Portuária, IPEN, Viña del Mar, Outubro 1989.
- [34] PADOVEZI, C. D. : **"Ensaio em Escala Real do Comboio de Pesquisas do Rio Araguaia"**. 13º Congresso Nacional de Transportes Marítimos e Construção Naval e Offshore, SOBENA, Rio de Janeiro, 1990, pp 195-223.
- [35] PADOVEZI, C. D. : **"Desempenho Propulsivo e em Manobras de um Comboio Fluvial Navegando em Águas Restritas"** 14º Congresso Nacional de Transportes Marítimos e Construção Naval e Offshore, SOBENA, Rio de Janeiro, 1992, pp 61-80.
- [36] PADOVEZI, C. D. : **"Propulsores de Embarcações Fluviais de Carga"**. 15º Congresso Nacional de Transportes Marítimos e Construção Naval e Offshore, SOBENA, Rio de Janeiro, 1994, pp 1-11 (não incluído nos anais).
- [37] PADOVEZI, C. D. : **"Características de Propulsão e de Manobras de Comboios Fluviais para uma Navegação Segura"** – 16º Congresso Nacional de Transportes Marítimos e Construção Naval e Offshore, SOBENA, Rio de Janeiro, 1996.
- [38] PADOVEZI, C. D. : **"Aplicação de Resultados de Escala Real no Projeto de Embarcações Fluviais"**. Dissertação de Mestrado, 1997, EPUSP, São Paulo.
- [39] PNA : **Principles of Naval Architects** – Volume I II e III, 1998.
- [40] Resultados do Ensaio de Resistência à Propulsão, Relatório nº 22.681 – IPT, São Paulo.

- [41] RIVA, J. C. T. : **“Sobrelargura de Canais”**. Tese de Doutorado, EPUSP, São Paulo, 1982.
- [42] RIVA, J. C. T. : **“Projeto de Embarcações Fluviais”**. Notas de aulas. Fatec-JH. 1993.
- [43] ROORDA, E. M. N. : **“Small Seagoing Craft and Vessels for Inland Navigation”**- Technical Publishing Company H Stam - Haarlem- Holanda - 1957, pp 80-86.
- [44] ROSSI, A R. : **“Projeto de uma Embarcação para Turismo na Hidrovia Tietê-Paraná**, 14º Congresso Nacional de Transportes Marítimos e Construção Naval e Offshore, SOBENA, Rio de Janeiro, 1992, pp 23-47.
- [45] SYMPSON, D. S. : **“Small Craft Construction and Design”** Transaction - SNAME -The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Volume 59, 1951.
- [46] TACHIBANA, T. - **“Propulsão em Engenharia Naval e Oceânica”** EPUSP, São Paulo.
- [47] TACHIBANA, T. : **“Hidrodinâmica Aplicada – Hidrodinâmica do Navio II”**, Série Sistemática de Hélices, EPUSP, São Paulo.
- [48] TACHIBANA, T. - **“Investigação do Efeito de Águas Rasas”** Tese de Doutorado, EPUSP, São Paulo, 1977.
- [49] TACHIBANA, T. : **“Investigation of Shallow Water Effects on Ship”**. International Towing tank Conference, 16º Leningrad, September, 1981, Proceedings, Volume. 2, pp 16-19.

- [50] TACHIBANA, T. : **“An investigation into the Sinkage of a Ship at the Transcritical Speed in Shallow Water”**. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, December, 1981, V. 50, pp 56-62 & Naval Architecture and Ocean Engineering , Volume 19, pp 29-35.
- [51] TACHIBANA, T. - **“Propeller Protection System for River Ship”** 16º Congresso Nacional de Transportes Marítimos e Construção Naval e Offshore, SOBENA, Rio de Janeiro, 1996.
- [52] TACHIBANA, T.; PADOVEZI, C. D.; TAKEI, Y. - **“Avaliação Experimental dos Efeitos de Imperfeições nas Pás de Hélices”** – 16º Congresso Nacional de Transportes Marítimos e Construção Naval e Offshore, SOBENA, Rio de Janeiro, 1996, pp 221-228.
- [53] The Kansai Society of Naval Architects of Japan. **Manual de Engenharia Naval**, 1976, em Japonês.
- [54] WOOD, J. N. ; CALDWELL, A – **“Caldwell’s Screw Tug Design”** – Hustshinson Educational, 1969.

ANEXOS

ANEXOS 1

A seguir são apresentadas as dimensões das embarcações de Bangladesh. [5].

	Empurrador (m)	Chata (m)	Automotor (m)
Comprimento Total	17,30	27,07	27,21
Comprimento entre Perpendiculares	15,40	-	25,86
Boca	4,57	6,46	6,18
Calado de Projeto (m)	1,30	1,73	1,78
Deslocamento Leve (t)	-	53,22	-
Deslocamento de Projeto (t)	-	257,44	-
Potência Instalada (kW)	2 x 136	-	47,00

ANEXOS 2

Tabela A.1.1 - Ensaio de Resistência ao Avanço no Tanque de Provas do IPT com modelo em escala 1:13 do Comboio Araguaia - Extrapolação para escala real $h = \infty$, para as condições: Uma Chata e Duas Chatas em Paralelo.

Uma Chata H = 2,00 m

Vm (m/s)	RTm (gt)	CTm*10 ³	Rnm	CFm*10 ³	CRm*10 ³
0,571	340	6,19	2,23E+06	3,97	2,22
0,713	515	6,00	2,79E+06	3,80	2,22
0,856	710	5,74	3,35E+06	3,66	2,08
0,999	970	5,76	3,91E+06	3,56	2,21
1,141	1370	6,23	4,46E+06	3,47	2,76

Vs (m/s)	Rns	CFs*10 ³ (ITTC)	CTs*10 ³	Rts(kgf)
2,06	1,05E+08	2,058	4,278	5116,2
2,57	1,31E+08	1,996	4,216	794,9
3,09	1,57E+08	1,946	4,026	1094,2
3,60	1,83E+08	1,906	4,116	1522,9
4,11	2,09E+08	1,872	4,632	2238,1

Duas Chatas em Paralelo

Vm (m/s)	RTm (gt)	CTm*10 ³	Rnm	CFm*10 ³	CRm*10 ³
0,571	535	6,20	2,23E+06	3,90	2,23
0,713	910	6,75	2,79E+06	3,80	2,95
0,856	1270	6,54	3,35E+06	3,66	2,88
0,999	1880	7,11	3,91E+06	3,56	3,55
1,141	2530	7,33	4,46E+06	3,47	3,86

Vs (m/s)	Rns	CFs*10 ³ (ITTC)	CTs*10 ³	Rts(kgf)
2,06	1,05E+08	2,058	4,288	812,9
2,57	1,31E+08	1,996	4,946	1464,8
3,09	1,57E+08	1,946	4,826	2059,1
3,60	1,83E+08	1,906	5,456	3169,7
4,11	2,09E+08	1,872	5,732	4346,9

Tabela A.1.2 - Ensaio de Resistência de Auto - Propulsão no Tanque de Provas do IPT com modelo em escala 1:13 do Comboio Araguaia - Extrapolação para escala real $h=2,0\text{m}$, para Uma Chata e Duas Chatas em Paralelo.

Condição	V (m/s)	t	w	ni H	ni R
Uma Chata	4,120	0,339	0,272	0,908	1,014
	3,600	0,330	0,261	0,906	1,139
	3,030	0,321	0,253	0,909	1,075
	2,570	0,274	0,241	0,956	1,139
	2,060	0,161	0,212	1,065	1,200
Duas Chatas em Paralelo	3,600	0,405	0,332	0,891	0,980
	3,030	0,333	0,265	0,908	1,016
	2,570	0,244	0,185	0,927	1,070
	2,060	0,110	0,079	0,966	1,159

Tabela A.1.3 - Ensaio em Escala Real Medidas nos Eixos (n e Q) e de Velocidades Oitava Viagem - Hélices B-Troost $H = 9\text{m}$.

Condição	Ensaio	Rotações n(rpm)		V (m/s)	Q BB (kgf·m)	Q BE (kgf·m)	sentido da corrida
		BB	BE				
Uma Chata $H = 1,98\text{ m}$	D111	1765	1720	2,64	363	315,9	subida
	D311	1725	1691	5,85	346	285,0	descida
	D511	1370	1349	1,65	228	203,6	subida
	D611	1362	1342	4,92	228	205,0	descida
	D711	1746	1722	5,77	365	315,9	descida
	D911	1755	1718	2,63	370	318,7	subida
	D1011	1524	1510	1,97	281	251,3	subida
D1111	1587	1516	5,47	300	255,5	descida	
Duas Chatas Paralelo $H = 1,98\text{ m}$	D112	1538	1579	4,53	305	282,2	descida
	D212	1557	1563	1,66	308	276,6	subida
	D312	1728	1724	1,82	375	331,3	subida
	D412	1712	1701	4,90	363	317,3	descida
	D512	1433	1459	1,53	265	242,9	subida
	D712	1411	1494	4,40	263	251,3	descida

Tabela A.1.4 – Dados do Hélice da Série B-Troost.

J	KT	η_p (%)	10 KQ
0,000	0,224	0,0	0,203
0,020	0,219	3,5	0,200
0,040	0,214	6,9	0,196
0,060	0,208	10,3	0,193
0,080	0,203	13,7	0,189
0,100	0,197	17,0	0,185
0,120	0,192	20,2	0,181
0,140	0,186	23,4	0,177
0,160	0,180	26,5	0,173
0,180	0,174	29,4	0,169
0,200	0,167	32,4	0,165
0,220	0,161	35,2	0,160
0,240	0,154	37,8	0,156
0,260	0,147	40,4	0,151
0,280	0,140	42,8	0,146
0,300	0,133	45,1	0,141
0,320	0,126	47,1	0,136
0,340	0,119	49,0	0,131
0,360	0,111	50,7	0,126
0,380	0,104	52,1	0,120
0,400	0,096	53,2	0,115
0,420	0,088	54,0	0,109
0,440	0,080	54,4	0,103
0,460	0,072	54,3	0,097
0,480	0,064	53,6	0,091
0,500	0,056	52,2	0,085
0,520	0,047	49,9	0,079
0,540	0,039	46,4	0,072
0,560	0,030	41,4	0,066
0,580	0,022	34,2	0,059
0,600	0,013	24,1	0,052
0,620	0,004	9,4	0,045
0,640	0,005	-12,8	0,037

Características do hélice:

$$D = 1,15 \text{ m};$$

$$\frac{P}{D} = 0,55;$$

$$\frac{A_e}{A_o} = 0,50;$$

$$Z = 4 \text{ pás.}$$

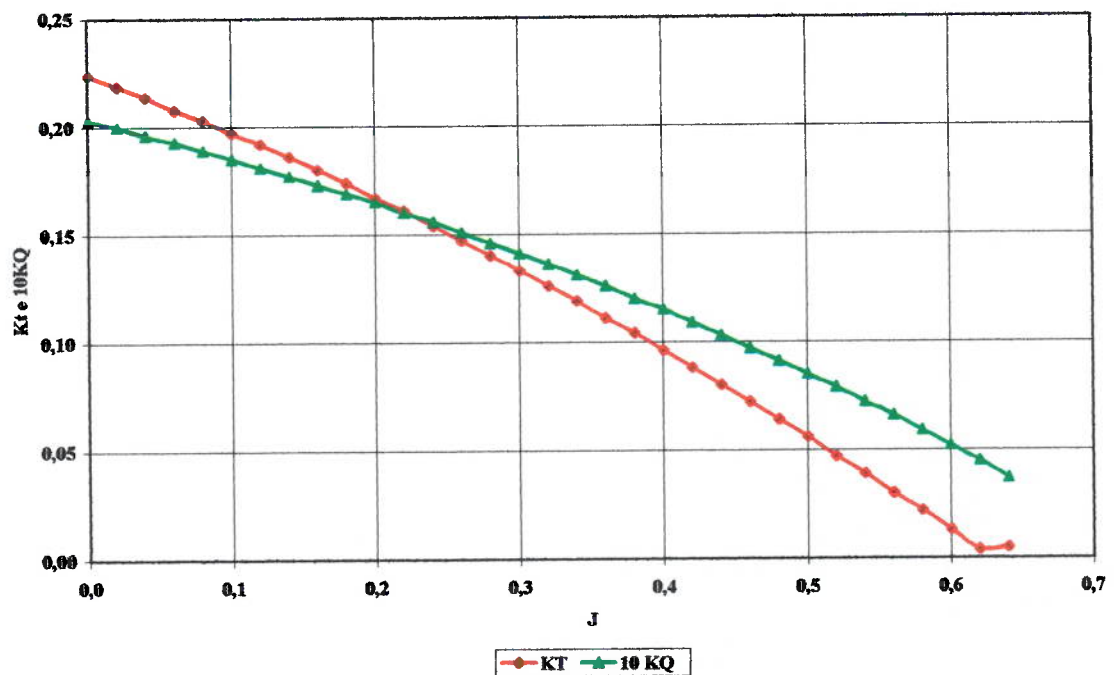


Figura A.1.1 – Curvas de KT e KQ do Hélice B-Troost .

Equações de KT e KQ obtidas a partir do gráfico que serão utilizadas na metodologia de cálculo:

$$KT = 0,1824 * J^3 - 0,3175 * J^2 - 0,2216 * J + 0,2231 \quad (A.1.1)$$

$$KQ = -0,0373 * J^3 - 0,1184 * J^2 - 0,1677 * J + 0,2031 \quad (A.1.2)$$

ANEXOS 3

Para todas as formulações apresentadas a seguir foram usados os seguintes valores:

Profundidade (h) = 9 m;

Calado (H) = 2 m.

Tabela A.2.1 – Cálculo da área da secção mestra para as duas condições estudadas.

Area Sm	
15,58	Condição : 1 Chata
31,16	Condição : 2 Chatas em Paralelo

Tabela A.2.2 - Resultados da resistência para a equação de Lackenby.

V(m/s)	dV/V (Uma Chata)	dV/V (2 Chatas em Par.)
2,059	0,5320	0,5558
2,571	0,6287	0,6526
3,086	0,6937	0,7176
3,602	0,7401	0,7639
4,114	0,7746	0,7985

Através dos dados obtidos foi feita uma plotagem e com isso conseguiu-se a equação da curva para as duas condições :

Uma Chata :

$$R_T = 229,92 * V^3 - 1368,7 * V^2 + 3338,3 * V - 2208,7 \quad (\text{A.2.1})$$

Duas Chatas em Paralelo :

$$R_T = 93,981 * V^3 - 224,12 * V^2 + 1313,7 * V - 956,91 \quad (\text{A.2.2})$$

Com isso os valores de R_T para Lackenby, ficaram assim:

Tabela A.2.3 – Valores de resistência para Lackenby para as duas condições : Uma Chata e Duas Chatas em Paralelo.

V(m/s)	1 Chata	2 Chatas em Par.
2,06	869,901	1619,801
2,57	1233,403	2534,298
3,03	1736,395	3580,353
3,60	2797,976	5252,592
4,12	4391,581	7223,748

Tabela A.2.4 – Tabela do cálculo de $\frac{\Delta C_f}{C_f}$ da equação de Sudô.

delta Cf/Cf (1)	delta Cf/Cf (2)
0,0466	0,2249

Para o cálculo do $\frac{\Delta C_f}{C_f}$, foram admitidas as seguintes considerações:

$$\frac{\Delta C_f}{C_f} = S \quad (\text{A.2.3})$$

Tabela A.2.5 – Desenvolvimento da formulação de Sudô.

Vs (m/s)	CFs*10 ³	Delta Cf (1)	Delta Cf (2)	Delta Rfh (1)	Delta Rfh (2)
2,060	2,06E-03	0,00010	0,00046	1,71E+01	1,50E+02
2,570	2,00E-03	0,00009	0,00045	2,59E+01	2,27E+02
3,090	2,00E-03	0,00009	0,00045	3,74E+01	3,28E+02
3,600	1,91E-03	0,00009	0,00043	4,84E+01	4,26E+02
4,110	1,87E-03	0,00009	0,00042	6,20E+01	5,45E+02

Em cada coluna apresentada na tabela acima, foi feito um cálculo diferente que será mostrado e explicado a seguir:

A segunda coluna refere-se aos valores fornecidos pelo IPT, dos ensaios no Tanque de Provas.

A terceira e quarta colunas referem-se à:

$$\Delta C_F = S * C_F \quad (\text{A.2.4})$$

A quinta e sexta coluna referem-se à:

$$\Delta C_F = S * C_F \quad (\text{A.2.5})$$

$$\frac{1}{2} * \rho * V^2 * \Delta C_F = S * C_F * \frac{1}{2} * \rho * S_M * V^2 \quad (\text{A.2.6})$$

$$\Delta R_{F_h} = S * R_{F_\infty} \quad (\text{A.2.7})$$

Tabela A.2.6 – Resultados de resistência usando Sudô.

Vs (m/s)	1 Chata	2 Chatas em Par
2,060	533,327	963,392
2,570	820,754	1691,975
3,090	1131,575	2387,506
3,600	1571,344	3595,359
4,110	2300,115	4891,808

Para obter esses valores foram necessários as seguintes hipóteses:

$$R_{T_h} = R_{T_\infty} + (R_{F_\infty} * S) \quad (\text{A.2.8})$$

As equações que descrevem melhor esses pontos são:

Uma Chata :

$$R_T = 166,81 * V^3 - 1270,5 * V^2 + 3759,1 * V - 3277,2 \quad (\text{A.2.9})$$

Duas Chatas em Paralelo:

$$R_T = 83,11 * V^3 - 322,97 * V^2 + 1442,2 * V - 1348,2 \quad (\text{A.2.10})$$

Tabela A.2.7 – Resultados dos cálculos para a equação de Schlichting's.

V inf/gh	Raiz(A sm)/h
0,0481	0,4386
0,0749	0,6202
0,1080	
0,1471	
0,1919	

Tabela A.2.8 – Dados obtidos do gráfico de Schlichting's.

(raiz(Am)/h)/Vinf/gh	0,4386	0,6202	V (m/s)
0,048	-	-	
0,075	-	-	
0,108	14%	17%	3,086
0,147	24%	26%	3,602
0,192	32%	34%	4,114

Tabela A.2.9 – Resultados de resistência para o método de Schlichting's para Uma Chata.

V (m/s)	dV/Vinf.	Schlichting's	Rt Schlichting's
3,086	0,14	2,946	1094,2
3,602	0,24	3,362	1522,9
4,114	0,32	3,794	2238,1

Tabela A.2.10 – Resultados de resistência para o método de Schlichting's para Duas Chatas em Paralelo.

V (m/s)	dV/Vinf.	Schlichting's	Rt Schlichting's
3,086	0,17	2,916	2059,1
3,602	0,26	3,342	3169,7
4,114	0,34	3,774	4346,9

As equações que descrevem esses valores são dadas por:

Uma Chata:

$$R_T = 736,29 * V^2 - 3613,2 * V + 5348,2 \quad (\text{A.2.11})$$

Duas Chatas em Paralelo :

$$R_T = 134,73 * V^2 + 1766,3 * V - 4238,1 \quad (\text{A.2.12})$$

Tabela A.2.11 – Resultados de resistência para as formulações usadas nas duas condições , Uma Chata e Duas Chatas em Paralelo.

V(m/s)	Lackenby (1)	Lackenby (2P)
2,06	869,901	1619,801
2,57	1233,403	2534,298
3,03	1736,395	3580,353
3,60	2797,976	5252,592
4,12	4391,581	7223,748

V(m/s)	Sudô (1)	Sudô (2P)
2,06	533,327	963,392
2,57	820,754	1691,975
3,03	1088,881	2368,614
3,60	1571,344	3595,359
4,12	2310,095	4924,050

V(m/s)	Schlichting's (1)	Schlichting's (2P)
2,06	-	-
2,57	-	-
3,03	1160,009	2350,732
3,60	1522,900	3169,700
4,12	2959,897	5326,017

ANEXOS 4

Tabela A.3.1 – Dados do ensaio de resistência de auto-propulsão no tanque de provas do IPT, com modelo em escala 1:13 do Comboio Araguaia-Tocantins para escala real $H = 2,00$ m , já mostrado anteriormente.

Condição	V (m/s)	t	w	ni R
Uma Chata	2,060	0,161	0,212	1,200
	2,570	0,274	0,241	1,139
	3,030	0,321	0,253	1,075
	3,600	0,330	0,261	1,139
	4,120	0,339	0,272	1,014
Duas Chatas em Paralelo	2,060	0,110	0,079	1,159
	2,570	0,244	0,185	1,070
	3,030	0,333	0,265	1,016
	3,600	0,405	0,332	0,980

Primeiros passos para seguir o diagrama de blocos que foi mostrado no capítulo 8 (figura 8.2.8). Já com os dados do IPT, e os resultados de resistência das equação estudadas, segue o cálculo do T (empuxo do propulsor), que é mostrado a seguir:

Tabela A.3.2 – Cálculo de T para as três equações e para Uma Chata.

(t - 1) 1 Chata	T (Lackenby)	T (Sudô)	T (Schlichting's)
-0,839	518,415	317,835	
-0,726	849,451	1130,516	
-0,679	1278,641	1603,654	854,204
-0,670	2088,041	2345,289	1136,493
-0,661	3321,922	3494,849	2238,954

Tabela A.3.3 – Cálculo de T para as três equações para Duas Chatas em Paralelo.

(t - 1) 2P	T (Lackenby)	T (Sudô)	T (Schlichting's)
-0,890	910,001	541,232	-
-0,756	1676,123	1119,031	-
-0,667	2683,923	1775,573	1762,168
-0,595	4413,943	3021,310	2663,613

Para esse cálculo partiu-se da seguinte equação:

$$T = \frac{R_T}{2 * (1 - t)} \quad (\text{A.3.1})$$

O número 2 da formulação T, indica o número de hélices da embarcação.

Tabela A.3.4 – Cálculo do $\frac{KT_o}{J^2}$ para as três equações na condição Uma Chata.

$KT_o/(J^2)$ - Lackenby	$KT_o/(J^2)$ - Sudô	$KT_o/(J^2)$ - Schlichting's
0,907	0,556	-
0,955	1,270	-
1,034	1,297	0,691
1,196	1,343	0,651
1,453	1,528	0,979

Tabela A.3.5 – Cálculo do $\frac{KT_o}{J^2}$ para as três equações na condição Duas Chatas

em Paralelo.

$KT_o/(J^2)$ - Lackenby	$KT_o/(J^2)$ - Sudô	$KT_o/(J^2)$ - Schlichting's
1,592	0,947	-
1,884	1,258	-
2,170	1,436	1,425
2,528	1,730	1,526

Para conseguir isolar a razão $\frac{KT_o}{J^2}$ foi feita o seguinte desenvolvimento matemático:

Partiu-se que:

$$KT_o = \frac{T}{\rho * n^2 * D^4} \quad (\text{A.3.2})$$

Onde adotou n como sendo $= \frac{J^2}{G^2}$;

Onde G é igual a: $\frac{D}{V_o}$, portanto:

$$KT_o = \frac{T}{\rho * \left(\frac{J^2}{G} * D^4 \right)} \quad (\text{A.3.3})$$

$$KT_o * J^2 = \frac{T * G^2}{\rho * D^4} \quad (\text{A.3.4})$$

Com isso, obtive equações que, como eram de terceiro grau, foi necessário fazer um programa no Matlab para tal cálculo, devido ao grande número de equações.

Os resultados do programa de Matlab, podem ser vistos na tabela A.3.6, onde são apresentadas três possíveis soluções para J . Sabe-se que esse valor tem que real e positivo e estar entre uma faixa de número que corresponde à : $0,2 < J < 0,4$.

Assim sendo, o valor de J foi obtido para ser usado em cálculos futuros.

Tabela A.3.6 – Dados de saída do programa Matlab, para o cálculo de J.

	X1	X2	X3
-1,22428	6,8631	0,3533	-0,5044
-1,27212	7,1208	0,3476	-0,4941
-1,35126	7,5477	0,3388	-0,4783
-1,51339	8,4241	0,3228	-0,4498
-1,77012	9,8157	0,3018	-0,4129
-0,87344	4,9831	0,4076	-0,6022
-1,58798	8,8280	0,3162	-0,4381
-1,61403	8,9691	0,3140	-0,4343
-1,66073	9,2222	0,3102	-0,4276
-1,84574	10,2263	0,2964	-0,4035
-1,00811	5,7024	0,3837	-0,5591
-0,96841	5,4900	0,3902	-0,5709
-1,29656	7,2526	0,3448	-0,4891
-1,90921	10,5711	0,2921	-0,3961
-2,20114	12,1593	0,2746	-0,3663
-2,48742	13,7192	0,2604	-0,3424
-2,84552	15,6730	0,2454	-0,3180
-1,26419	7,0781	0,3486	-0,4958
-1,57508	8,7581	0,3173	-0,4401
-1,75303	9,7229	0,3031	-0,4151
-2,04791	11,3253	0,2834	-0,3811
-1,74219	9,6641	0,3039	-0,4165
-1,84304	10,2116	0,2966	-0,4038

Na tabela a seguir é mostrado como a condição do valor de J foi mantido, e quais seus valores.

Tabela A.3.7 – Resultados ótimos de J para as três equações para Uma Chata.

V (m/s)	J - Lackenby	J - Sudô	J - Schlichting's
2,060	0,3533	0,4076	-
2,570	0,3476	0,3162	-
3,030	0,3388	0,3140	0,3837
3,600	0,3228	0,3102	0,3902
4,120	0,3018	0,2964	0,3448

Tabela A.3.8 – Resultados ótimos de J para as três equações para Duas Chatas em Paralelo.

V (m/s)	J - Lackenby	J - Sudô	J - Schlichting's
2,060	0,2921	0,3486	-
2,570	0,2746	0,3173	-
3,030	0,2604	0,3031	0,3039
3,600	0,2454	0,2834	0,2966

A partir do cálculo de J, partiu-se para o cálculo de n (rotação), que foi obtida através da seguinte equação:

$$J = \frac{V}{n * D} \quad (\text{A.3.5})$$

portanto,

$$n = \frac{V}{J * D} \quad (\text{A.3.6})$$

Esses valores podem ser observados nas tabelas a seguir A.3.9 e A.3.10.

Tabela A.3.9 – Resultado de n (rotação) para as três equações para Uma Chata.

n - Lackenby	n - Sudô	n - Schlichting's
5,0702	4,3948	-
6,4292	7,0676	-
7,7768	8,3910	6,8668
9,6978	10,0917	8,0226
11,8708	12,0871	10,3904

Tabela A.3.10 – Resultado de rotação (n) para as três equações para Duas Chatas em Paralelo.

n - Lackenby	n - Sudó	n - Schlichting's
6,1325	5,1386	-
8,1383	7,0431	-
10,1182	8,6928	8,6699
12,7565	11,0460	10,5544

Para o cálculo de J_o , isto é, coeficiente de avanço em água aberta, foi feita a seguinte consideração:

$$J_o = \frac{V_o}{n_o * D} \quad (\text{A.3.7})$$

Para essa equações foram admitidas as seguintes hipóteses:

$$n = n_o;$$

$$V \neq V_o;$$

$$KT = KT_o;$$

$$KQ \neq KQ_o;$$

$$Q \neq Q_o;$$

$$J \neq J_o;$$

$$w = \frac{V - V_o}{V};$$

$$V_o = V(1 - w). \quad (\text{A.3.8})$$

Tabela A.3.11 – Cálculo de J_o para as três equações para Uma Chata.

Jo - Lackenby	Jo - Sudô	Jo - Schlichting's
0,2784	0,3212	-
0,2638	0,2400	-
0,2531	0,2346	0,2866
0,2385	0,2292	0,2884
0,2197	0,2158	0,2510

Tabela A.3.12 – Cálculo de J_o para as três equações para Duas Chatas em Paralelo.

Jo - Lackenby	Jo - Sudô	Jo - Schlichting's
0,2690	0,3211	-
0,2238	0,2586	-
0,1914	0,2228	0,2234
0,1639	0,1893	0,1981

Para o cálculo de KQ_o , foi usada a equação da curva de KQ fornecida pelo IPT, a equação é a seguinte:

$$10KQ_o = -0,0373 * J_o^3 - 0,1184 * J_o^2 - 0,1677 * J_o + 0,2031; \quad (A.3.9)$$

Com isso os valores obtidos estão nas tabelas A.3.13 e A.3.14.

Tabela A.3.13 – Cálculo de KQ_o para as três equações para Uma Chata.

KQo - Lackenby	KQo - Sudô	KQo - Schlichting's
0,014643	0,013579	0,020310
0,014993	0,015552	0,020310
0,015247	0,015677	0,014443
0,015585	0,015799	0,014400
0,016014	0,016103	0,015295

Tabela A.3.14 – Cálculo de KQ_o para as três equações para Duas Chatas em Paralelo.

KQo - Lackenby	KQo - Sudó	KQo - Schlichting's
0,014869	0,013582	0,020310
0,015922	0,015117	0,020310
0,016640	0,015945	0,015932
0,017226	0,016686	0,016494

Seguindo o diagrama de blocos, agora é a vez de calcular o Q_o , esse foi obtido da seguinte forma:

$$KQ_o = \frac{Q_o}{\rho * n^2 * D^5} \quad (\text{A.3.10})$$

então :

$$Q_o = KQ_o * \rho * n^2 * D^5 \quad (\text{A.3.11})$$

Portanto, estão a seguir nas tabelas A.3.15 e A.3.16 os valores de Q_o para Uma Chata e Duas Chatas.

Tabela A.3.15 – Cálculo de Q_o para as três equações para Uma Chata.

Qo - Lackenby	Qo - Sudó	Qo - Schlichting's
77,1292	53,7356	-
126,9797	159,1701	-
188,9389	226,1656	139,5380
300,3228	329,6694	189,9075
462,3864	482,0307	338,3474

Tabela A.3.16 – Cálculo de Q_o para as três equações para Duas Chatas em Paralelo.

Qo - Lackenby	Qo - Sudó	Qo - Schlichting's
114,5753	73,4819	-
216,0749	153,6496	-
349,0666	246,8775	245,3747
574,3661	417,1453	376,4590

O penúltimo passo, é o cálculo de Q , e este foi obtido admitindo-se:

$$e_r = \frac{Q_o}{Q}; \quad (\text{A.3.12})$$

$$Q = \frac{Q_o}{e_r}; \quad (\text{A.3.13})$$

Encontram-se nas tabelas A.3.17 e A.3.18 os valores de Q para Uma Chata e Duas Chatas em Paralelo e para as três equações.

Tabela A.3.17 – Cálculo de Q para as três equações para Uma Chata.

Q - Lackenby	Q - Sudó	Q - Schlichting's
64,274	44,780	-
111,483	139,746	-
175,757	210,387	129,803
263,672	289,438	166,732
456,002	475,375	333,676

Tabela A.3.18 – Cálculo de Q para as três equações para Duas Chatas em Paralelo.

Q - Lackenby	Q - Sudô	Q - Schlichting's
98,857	63,401	-
201,939	143,598	-
343,569	242,990	241,511
586,088	425,658	384,142

Tabela A.3.19 – Valores de Q experimental - fornecidos pelo IPT.

	V (m/s)	Q BB (kgf.m)	Q BE (kgf.m)
Uma Chata H = 1,98 m	3,29	228,000	204,300
	3,72	290,500	253,400
	4,20	367,500	317,300
	4,25	354,500	300,450
Duas Chatas Paralelo H = 1,98 m	2,97	264,000	247,100
	3,10	306,500	279,400
	3,36	369,000	324,300

Tabela A.3.20 – Comparação dos valores de Q normalizados, Q experimental e para as três equações, para a condição Uma Chata.

Vs (m/s)	Q - Lack	Q - Sudo	Q - Schli.	V (m/s)	Q BB (kgf.m)	Q BE (kgf.m)
2,06	64,274	44,780	-	3,29	228,000	204,300
2,57	111,483	139,746	-	3,72	290,500	253,400
3,09	175,757	210,387	129,803	4,20	367,500	317,300
3,60	263,672	289,438	166,732	4,25	354,500	300,450
4,11	456,002	475,375	333,676			

Tabela A.3.21 - Comparação dos valores de Q normatizados, Q experimental e para as três equações, para condição Duas Chatas em Paralelo.

Vs (m/s)	Q - Lack	Q - Sudo	Q - Schli	V (m/s)	Q BB (kgf*m)	Q BE (kgf*m)
2,06	98,857	63,401	-	2,97	264,000	247,100
2,57	201,939	143,598	-	3,10	306,500	279,400
3,09	343,569	242,990	241,511	3,36	369,000	324,300
3,60	586,088	425,658	384,142			

ANEXOS 5

Tabela A.4.1 – Correção dos Coeficientes w e t de Lackenby para Uma Chata.

Vs (m/s)	w	Vo	dV/V	dV*V	V n1 (m/s)	w n1
2,06	0,212	1,6233	0,532	1,0958	3,1558	0,4856
2,57	0,241	1,9506	0,629	1,6157	4,1857	0,5340
3,09	0,253	2,2634	0,694	2,1434	5,2334	0,5675
3,60	0,261	2,6604	0,740	2,6642	6,2642	0,5753
4,11	0,272	2,9994	0,775	3,1836	7,2936	0,5888

Tabela A.4.2 – Correção dos Coeficientes w e t de Lackenby para Duas Chatas em Paralelo.

Vs (m/s)	w	Vo	dV/V Par.	dV*V	V n1 (m/s)	w n1
2,06	0,079	1,8973	0,556	1,145	2,060	0,0790
2,57	0,185	2,0946	0,653	1,677	2,570	0,1850
3,09	0,265	2,2271	0,718	2,217	3,090	0,2793
3,60	0,332	2,4048	0,764	2,750	3,600	0,3320

Tabela A.4.3 – Correção dos Coeficientes w e t de Schlichting's para Uma Chata.

Vs (m/s)	w	Vo	dV/V inf.	dV*V	V (m/s) corrig.	w n1
2,06	0,212	1,6233	-	-	-	-
2,57	0,241	1,9506	-	-	-	-
3,09	0,253	2,2634	0,14	0,4326	3,0900	0,2675
3,60	0,261	2,6604	0,24	0,8640	3,6000	0,2610
4,11	0,272	2,9994	0,32	1,3152	4,1100	0,2702

Tabela A.4.4 – Correção dos Coeficientes w e t de Schlichting's para Duas Chatas em Paralelo.

Vs (m/s)	w	Vo	dV/Vinf.	dV*V	V (m/s) corrig.	w n1
2,06	0,079	1,8973	-	-	-	-
2,57	0,185	2,0946	-	-	-	-
3,09	0,265	2,2271	0,17	0,525	3,615	0,3840
3,60	0,332	2,4048	0,26	0,936	4,536	0,4698

Tabela A.4.5 – Valores de t e w para Lackenby para Uma Chata.

Vs (m/s)	w n1	t (calculado)
2,06	0,4856	0,3999
2,57	0,5340	0,4338
3,09	0,5675	0,4573
3,60	0,5753	0,4627
4,11	0,5888	0,4721

Tabela A.4.6 – Valores de t e w para Lackenby para Duas Chatas em Paralelo.

Vs (m/s)	wn1	t (calculado)
2,06	0,0790	0,1153
2,57	0,1850	0,1895
3,09	0,2793	0,2555
3,60	0,3320	0,2924

Tabela A.4.7 – Valores de t e w para Schlichting's para Uma Chata.

Vs (m/s)	w n1	t (calculado)
2,06	-	-
2,57	-	-
3,09	0,2675	0,2473
3,60	0,2610	0,2427
4,11	0,2702	0,2492

Tabela A.4.8 – Valores de t e w para Schlichting's para Duas Chatas em Paralelo.

V_s (m/s)	w n1	t (calculado)
2,06	-	-
2,57	-	-
3,09	0,3840	0,3288
3,60	0,4698	0,3889

Tabela A.4.9 – Novos coeficientes para as equações de Lackenby e Sudô.

Condição	V (m/s)	t (corrigido)	w (corrigido)	$n_i R$
Uma Chata	2,060	0,400	0,486	1,200
	2,570	0,434	0,534	1,139
	3,030	0,457	0,568	1,075
	3,600	0,463	0,575	1,139
	4,120	0,472	0,589	1,014
Duas Chatas em Paralelo	2,060	0,115	0,079	1,159
	2,570	0,190	0,185	1,070
	3,030	0,255	0,279	1,016
	3,600	0,292	0,332	0,980

Tabela A.4.10 – Resultados de T para Lackenby e Sudô para Uma Chata.

$(t - 1)$ 1Chata	T (Lackenby)	T (Sudô)
-0,600	724,841	444,392
-0,566	1089,168	1449,550
-0,543	1599,649	2006,258
-0,537	2603,785	2924,572
-0,528	4159,786	4376,329

Tabela A.4.11 - Resultados de T para Lackenby e Sudô para Duas Chatas em Paralelo.

$(t - 1)$ 2P	T (Lackenby)	T (Sudô)
-0,885	915,452	544,474
-0,811	1563,416	1043,785
-0,745	2404,504	1590,721
-0,708	3711,555	2540,531

Esses cálculos foram efetuados utilizando as mesmas formulações apresentadas no anexo 3.

Tabela A.4.12 – Novos coeficientes para a equação de Schlichting's.

Condição	V (m/s)	t (corrigido)	w (corrigido)	ni R
Uma Chata	2,060	-	-	1,200
	2,570	-	-	1,139
	3,030	0,2473	0,2675	1,075
	3,600	0,2427	0,2610	1,139
	4,120	0,2492	0,2702	1,014
Duas Chatas em Paralelo	2,060	-	-	1,159
	2,570	-	-	1,070
	3,030	0,3288	0,3840	1,016
	3,600	0,3889	0,4698	0,980

Tabela A.4.13 – Resultados de T para Schlichting's para Uma Chata.

(t - 1) 1Chata	T (Schlichting's)
-	-
-	-
-0,753	770,565
-0,757	1005,480
-0,751	1971,162

Tabela A.4.14 – Resultados de T para Schlichting's para Duas Chatas em Paralelo.

(t - 1) 2P	T (Schlichting's)
-	-
-	-
-0,671	1751,128
-0,611	2593,391

Tabela A.4.15 – Resultado de J^*n , adotando o diâmetro do propulsor, sendo um B-Troost, igual a 1,15 m.

J^*n
1,7913
2,2348
2,6348
3,1304
3,5826

Tabela A.4.16 – Resultados de $\frac{KT_o}{J^2}$ das três equações para Uma Chata.

$KT/(J^2)$ - Lackenby	$KT/(J^2)$ - Sudô	$KT/(J^2)$ - Schlichting's
1,268	0,777	-
1,224	1,629	-
1,293	1,622	0,623
1,491	1,675	0,576
1,819	1,914	0,862

Tabela A.4.17 – Resultados de $\frac{KT_o}{J^2}$ das três equações para Duas Chatas em

Paralelo.

$KT/(J^2)$ - Lackenby	$KT/(J^2)$ - Sudô	$KT/(J^2)$ - Schlichting's
1,601	0,952	-
1,757	1,173	-
1,944	1,286	1,416
2,126	1,455	1,485

Tabela A.4.18 – Resultados do programa Matlab para as inúmeras equações de KT.

	X1	X2	X3
-1,58535	8,8137	0,3164	-0,4385
-1,54151	8,5763	0,3203	-0,4453
-1,61079	8,9515	0,3143	-0,4348
-1,80878	10,0256	0,2990	-0,4080
-2,13651	11,8074	0,2782	-0,3723
-1,09480	6,1670	0,3705	-0,5353
-1,94651	10,7739	0,2897	-0,3919
-1,93953	10,7359	0,2901	-0,3927
-1,99250	11,0239	0,2868	-0,3869
-2,23120	12,3230	0,2730	-0,3636
-0,94049	5,3408	0,3951	-0,5797
-0,89337	5,0894	0,4038	-0,5952
-1,17946	6,6219	0,3590	-0,5145
-1,91875	10,6230	0,2915	-0,3950
-2,07448	11,4699	0,2818	-0,3784
-2,26151	12,4881	0,2714	-0,3609
-2,44323	13,4783	0,2624	-0,3458
-1,26986	7,1087	0,3479	-0,4946
-1,49051	8,3003	0,3249	-0,4535
-1,60358	8,9125	0,3149	-0,4358
-1,77255	9,8289	0,3016	-0,4126
-1,73326	9,6156	0,3046	-0,4177
-1,80282	9,9932	0,2994	-0,4088

Tabela A.4.19 – Resultados de J para as três equações para Uma Chata.

J - Lackenby	J - Sudó	J - Schlichting's
0,3164	0,3705	-
0,3203	0,2897	-
0,3143	0,2901	0,3951
0,2990	0,2868	0,4038
0,2782	0,2730	0,3590

Tabela A.4.20 – Resultados de J para as três equações para Duas Chatas em Paralelo.

J - Lackenby	J - Sudó	J - Schlichting's
0,2915	0,3479	-
0,2818	0,3249	-
0,2714	0,3149	0,3046
0,2624	0,3016	0,2994

Tabela A.4.21 – Resultados de n (rotação) para as três equações para Uma Chata.

n - Lackenby	n - Sudó	n - Schlichting's
5,6615	4,8348	-
6,9772	7,7141	-
8,3830	9,0823	6,6686
10,4697	10,9150	7,7524
12,8778	13,1231	9,9794

Tabela A.4.22 – Resultados de n (rotação) para as três equações para Duas Chatas em Paralelo.

n - Lackenby	n - Sudó	n - Schlichting's
6,1451	5,1489	-
7,9304	6,8784	-
9,7081	8,3670	8,6500
11,9300	10,3794	10,4557

Tabela A.4.23 – Resultados de J_o para as três equações para Uma Chata.

Jo - Lackenby	Jo - Sudô	Jo - Schlichting's
0,1627	0,1906	-
0,1493	0,1350	-
0,1359	0,1255	0,2894
0,1270	0,1218	0,2984
0,1144	0,1123	0,2620

Tabela A.4.24 – Resultados de J_o para as três equações para Duas Chatas em Paralelo.

Jo - Lackenby	Jo - Sudô	Jo - Schlichting's
0,2685	0,3204	-
0,2297	0,2648	-
0,1956	0,2270	0,1876
0,1753	0,2015	0,1587

Equação de KQ_o , a mesma citada no anexo 3, equação A.3.9.

$$10KQ_o = -0,0373 * J_o^3 - 0,1184 * J_o^2 - 0,1677 * J_o + 0,2031$$

Tabela A.4.25 – Resultados de KQ_o para as três equações para Uma Chata.

KQo - Lackenby	KQo - Sudô	KQo - Schlichting's
0,017251	0,016658	-
0,017531	0,017821	-
0,017802	0,018012	0,014374
0,017982	0,018085	0,014152
0,018231	0,018273	0,015036

Tabela A.4.26 – Resultados de KQ_0 para as três equações para Duas Chatas em Paralelo.

KQ_0 - Lackenby	KQ_0 - Sudô	KQ_0 - Schlichting's
0,014882	0,013598	-
0,015789	0,014970	-
0,016549	0,015850	0,016722
0,016987	0,016420	0,017335

Tabela A.4.27 – Resultados de Q_0 para as três equações para Uma Chata.

Q_0 - Lackenby	Q_0 - Sudô	Q_0 - Schlichting's
113,2964	79,7858	-
174,8595	217,2904	-
256,3375	304,4363	130,9793
403,8666	441,4726	174,2761
619,4807	644,7835	306,8255

Tabela A.4.28 – Resultados de Q_0 para as três equações para Duas Chatas em Paralelo.

Q_0 - Lackenby	Q_0 - Sudô	Q_0 - Schlichting's
115,1498	73,8672	-
203,4569	145,1203	-
319,5736	227,3638	256,3597
495,3642	362,4623	388,2952

Tabela A.4.29 – Resultados de Q normativo para as três equações para Uma Chata.

Q - Lackenby	Q - Sudô	Q - Schlichting's
94,4137	66,4882	-
153,5202	190,7729	-
238,4535	283,1966	121,8412
354,5800	387,5967	153,0080
610,9277	635,8812	302,5892

Tabela A.4.30 – Resultados de Q normativo para as três equações para Duas Chatas em Paralelo.

Q - Lackenby	Q - Sudó	Q - Schlichting's
99,3527	63,7336	-
190,1467	135,6265	-
314,5409	223,7832	252,3225
505,4737	369,8595	396,2196

Tabela A.4.31 – Comparação dos dados experimentais e dos resultados das três equações para Uma Chata.

Vs (m/s)	Q - Lack	Q - Sudo	Q - Schli.	V (m/s)	Q BB (kgf*m)	Q BE (kgf*m)
2,06	94,4137	66,4882		3,285	228,00	204,300
2,57	153,5202	190,7729		3,720	290,50	253,400
3,09	238,4535	283,1966	121,8412	4,200	367,50	317,300
3,60	354,5800	387,5967	153,0080	4,245	354,50	300,450
4,11	610,9277	635,8812	302,5892			

Tabela A.4.32 - Comparação dos dados experimentais e dos resultados das três equações para Duas Chatas em Paralelo.

Vs (m/s)	Q - Lack	Q - Sudo	Q - Schli.	V (m/s)	Q BB (kgf*m)	Q BE (kgf*m)
2,06	99,3527	63,7336		2,965	264,00	247,100
2,57	190,1467	135,6265		3,095	306,50	279,400
3,09	314,5409	223,7832	252,3225	3,360	369,00	324,300
3,60	505,4737	369,8595	396,2196			

ANEXOS 6

Tabela A.5.1 – Dados dos coeficientes fornecidos pelo IPT.

Condição	V (m/s)	t	w	ni R
Uma Chata	2,060	0,161	0,2120	1,200
	2,570	0,274	0,2410	1,139
	3,030	0,321	0,2530	1,075
	3,600	0,330	0,2610	1,139
	4,120	0,339	0,2720	1,014

Tabela A.5.2 – Valores de Resistência para Uma Chata.

Vs (m/s)	Rt - Lackenby	Rt - IPT	Rt - TADA
2,060	869,901	516,2	827,344
2,570	1233,403	794,9	1099,264
3,090	1821,637	1094,2	1472,589
3,600	2797,976	1522,9	2026,699
4,110	4354,044	2238,1	2819,995

Tabela A.5.3 - Valores de Resistência para Duas Chatas em Paralelo.

Vs (m/s)	Rt - Lackenby	Rt - IPT	Rt - TADA
2,060	1619,801	812,900	1613,348
2,570	2534,298	1464,800	2522,879
3,090	3735,283	2059,100	3716,914
3,600	5252,592	3169,700	5225,349

Tabela A.5.4 – Valores de J*n.

J*n
1,7913
2,2348
2,6348
3,1304
3,5826

Tabela A.5.5 – Valor de T para Uma Chata.

(t - 1) 1Chata	T - TADA
-0,839	493,054
-0,726	757,069
-0,679	1084,381
-0,670	1512,462
-0,661	2133,128

Tabela A.5.6 – Tabela A.5.5 – Valor de T para Duas Chatas em Paralelo.

(t - 1) 2P	T - TADA
-0,885	911,805
-0,811	1425,839
-0,745	2100,664
-0,708	2953,176

Tabela A.5.7 – Valores de $\frac{KT_o}{J^2}$ para as duas condições, Uma Chata e**Duas Chatas em Paralelo.**

$KT_o/(J^2) (1)$	$KT_o/(J^2) - (2P)$
0,8624179	1,5948709
0,8507997	1,6023677
0,8767074	1,6983581
0,8662386	1,6913843
0,9327828	

Tabela A.5.8 – Resultados do programa Matlab para as raízes de J para**Uma Chata.**

	X1	X2	X3
-1,21383	6,8069	0,3546	-0,5067
-1,25640	7,0361	0,3495	-0,4974
-1,38025	7,7042	0,3358	-0,4728
-1,48796	8,2865	0,3252	-0,4540
-1,72767	9,5853	0,3050	-0,4184
-1,17992	6,6244	0,3589	-0,5144
-1,16830	6,5619	0,3604	-0,5172
-1,19421	6,7013	0,3571	-0,5111
-1,18374	6,6449	0,3584	-0,5136
-1,25028	7,0031	0,3502	-0,4987
-1,22300	6,8562	0,3535	-0,5047
-1,27111	7,1154	0,3477	-0,4943
-1,40120	7,8174	0,3336	-0,4690
-1,51278	8,4208	0,3229	-0,4499
-1,75722	9,7457	0,3028	-0,4145
-1,21886	6,8339	0,3540	-0,5056
-1,26546	7,0849	0,3484	-0,4955
-1,39422	7,7797	0,3343	-0,4703
-1,50546	8,3812	0,3235	-0,4511
-1,74941	9,7033	0,3033	-0,4156

Tabela A.5.9 - Resultados do programa Matlab para as raízes de J para**Duas Chatas em Paralelo.**

	X1	X2	X3
-1,91725	10,6148	0,2916	-0,3952
-1,92602	10,6625	0,2910	-0,3942
-2,02337	11,1918	0,2849	-0,3837
-2,01702	11,1573	0,2853	-0,3843
-1,91237	10,5883	0,2919	-0,3957
-1,91987	10,6291	0,2914	-0,3949
-2,01586	11,151	0,2853	-0,3844
-2,00888	11,113	0,2858	-0,3852
-1,91801	10,619	0,2915	-0,3951
-1,92668	10,6661	0,2910	-0,3941
-2,02396	11,195	0,2848	-0,3836
-2,01751	11,16	0,2852	-0,3843
-1,91561	10,6059	0,2917	-0,3954
-1,92424	10,6528	0,2911	-0,3944
-2,02147	11,1815	0,2850	-0,3839
-2,01519	11,1473	0,2854	-0,3845

Tabela A.5.13 – Valores de Q_o para as duas condições, Uma Chata e Duas Chatas em Paralelo.

Q_o (1)	Q_o (2P)
74,194	114,766
116,288	188,112
166,459	285,346
233,984	409,314
326,014	

Tabela A.5 14 – Resultados para comparação do valor de Q normalizado da equação de TADA para Uma Chata.

V_s (m/s)	Q	V (m/s)	Q_{BB} (kgf·m)	Q_{BE} (kgf·m)
2,06	61,8282	3,285	228,00	204,300
2,57	102,0964	3,720	290,50	253,400
3,09	154,8460	4,200	367,50	317,300
3,60	205,4293	4,245	354,50	300,450
4,11	321,5131			

Tabela A.5 15 - Tabela A.5 14 – Resultados para comparação do valor de Q normalizado da equação de TADA para Duas Chatas em Paralelo.

V_s (m/s)	Q	V (m/s)	Q_{BB} (kgf·m)	Q_{BE} (kgf·m)
2,06	117,11	2,97	264,000	247,100
2,57	185,15	3,10	306,500	279,400
3,09	266,68	3,36	369,000	324,300
3,60	353,16			

Tabela A.5.10 – Cálculo de rotação para as duas condições; Uma Chata e Duas Chatas em Paralelo.

n - (1)	n (2P)
4,9911	6,1367
6,2008	7,6691
7,3783	9,2351
8,7345	10,9532
10,2302	

Tabela A.5.11 – Cálculo de J_o para as duas condições; Uma Chata e Duas Chatas em Paralelo.

$J_o - 1$	$J_o (2P)$
0,2828	0,2688
0,2735	0,2375
0,2668	0,2056
0,2649	0,1909
0,2549	

Equação da curva de KQ_o já apresentada no anexo 3, equação A.3.9.

$$10KQ_o = -0,0373 * J_o^3 - 0,1184 * J_o^2 - 0,1677 * J_o + 0,2031$$

Tabela A.5.12 – Cálculo de KQ para as duas condições, Uma Chata e Duas Chatas em Paralelo.

KQ (1)	KQ (2P)
0,014536	0,014873
0,014760	0,015610
0,014923	0,016329
0,014968	0,016651
0,015203	