

BERNARDO LUIS RODRIGUES DE ANDRADE

**MODELO DE SÍNTESE E OTIMIZAÇÃO POR MÚLTIPLOS CRITÉRIOS PARA O
PROJETO PRELIMINAR DE EMBARCAÇÕES**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Engenharia

São Paulo
2001

BERNARDO LUIS RODRIGUES DE ANDRADE

**MODELO DE SÍNTESE E OTIMIZAÇÃO POR MÚLTIPLOS CRITÉRIOS PARA O
PROJETO PRELIMINAR DE EMBARCAÇÕES**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Engenharia

Área de Concentração :
Engenharia Naval

Orientador :
Oscar Brito Augusto

São Paulo
2001

Onde está a vida que perdemos vivendo?

Onde está a sabedoria que perdemos no conhecimento?

Onde está o conhecimento que perdemos na informação?

T.S. Eliot (The Rock, 1934)

*À minha esposa Elines
e ao meu filho Pedro*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Oscar Brito Augusto pela amizade, confiança e incentivo ao longo desta pequena maratona.

Aos meus colegas e companheiros do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica pela compreensão e apoio.

À minha esposa e ao meu filho pelo tempo que lhes foi roubado.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas	iii
Lista de Símbolos.....	iv
Resumo	ix
Abstract.....	x
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO	7
2. MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA O PROJETO PRELIMINAR	9
2.1 O PROJETO DE ENGENHARIA	9
2.2 O PROJETO PRELIMINAR DE NAVIOS E EMBARCAÇÕES	12
2.3 PROPOSTA DE MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA O PROJETO PRELIMINAR	25
3. OTIMIZAÇÃO E PROGRAMAÇÃO POR OBJETIVOS APLICADOS AO PROJETO.....	32
4.OTIMIZAÇÃO DAS DIMENSÕES E COEFICIENTES DE FORMA.....	39
4.1 MODELO DE SÍNTESE DAS CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS	40
4.1.1 Deslocamento (Δ)	42
4.1.2 Potência Instalada (P_S)	42
4.1.3 Capacidade de Carga ($DWTC$)	44
4.1.4 Pesos e Centros	45
4.1.5 Altura Metacêntrica (GM).....	48
4.1.6 Borda Livre (BL).....	51
4.1.7 Comportamento no Mar	51
4.1.8 Atributos Complementares.....	53
4.1.9 Resultados do Modelo de Síntese	54
4.1.9 Restrições de Modelagem	56

4.2 MODELO DE OTIMIZAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS.....	58
5. SÍNTESE E OTIMIZAÇÃO DA FORMA DO CASCO.....	63
5.1 MODELO DE SÍNTESE DA FORMA DO CASCO	66
5.2 MODELO DE SÍNTESE DA LINHA D'ÁGUA DE PROJETO	74
5.2.1 A Carenagem das Linhas d'Água	77
5.2.2 Ângulo de Entrada da Linha d'Água de Projeto.....	79
5.2.3 Inclinação ou Derivada Máxima no Corpo de Saída da Linha d'Água de Projeto.....	81
5.2.4 Concavidade nos Corpos de Entrada e Saída da Linha d'Água de Projeto.....	83
5.2.5 Tamanho e Posição do Corpo Paralelo da Linha d'Água de Projeto	85
5.2.6 Boca da Linha d'Água de Projeto na Popa	86
5.2.7 A Síntese da Linha d'Água de Projeto	87
5.3 MODELO DE SÍNTESE DA CURVA VERTICAL DE ÁREAS.....	97
5.3.1 A Transformação e o Mapeamento da Curva Vertical de Áreas	102
5.3.2 A Síntese da Curva Vertical de Áreas	114
5.4 MODELO DE SÍNTESE DA SEÇÃO MESTRA.....	118
5.5 MODELO DE SÍNTESE DO PERFIL LONGITUDINAL.....	130
5.5.1 O Perfil na Região de Popa	132
5.6 MODELO DE SÍNTESE DO PLANO DE LINHAS D'ÁGUA.....	137
5.6.1 As Condições de Carenagem para o Plano de Linhas d'Água	140
5.6.2 A Síntese do Plano de Linhas d'Água	142
6. EXEMPLO DE APLICAÇÃO E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS.....	162
6.1 EXEMPLO : PROJETO PRELIMINAR DE NAVIO GRANELEIRO.....	162
6.2 SÍNTESE E OTIMIZAÇÃO DAS DIMENSÕES E COEFICIENTES DE FORMA DO NAVIO GRANELEIRO.....	164
6.3 SÍNTESE E OTIMIZAÇÃO DA LINHA D'ÁGUA DE PROJETO	171
6.4 SÍNTESE E OTIMIZAÇÃO DA CURVA VERTICAL DE ÁREAS.....	177
6.5 SÍNTESE E OTIMIZAÇÃO DA SEÇÃO MESTRA	182

6.6 SÍNTESE DO PERFIL LONGITUDINAL	187
6.7 A SÍNTESE DO CASCO DO NAVIO GRANELEIRO	191
7. CONCLUSÕES	205
ANEXO A	211
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	219

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Projeto Preliminar com os Modelos Usuais de Otimização.....	25
Figura 2.2- Diagrama do Modelo de Otimização Proposto para o Projeto Preliminar	27
Figura 4.1- Posição do Leme e Comprimento entre Perpendiculares.....	50
Figura 5.1- Curvas de Fronteira para a Superfície do Casco	69
Figura 5.2- Curva Vertical de Áreas.....	69
Figura 5.3- Descrição Genérica de uma Linha d'Água	74
Figura 5.4- Linhas d'Água com Formas Degeneradas	79
Figura 5.5 Inclinação Máxima no Corpo de Saída	81
Figura 5.6 Concavidade e Forma da Linha d'Água	83
Figura 5.7- Curva Vertical de Áreas.....	97
Figura 5.8- Curva Adimensional de Áreas	99
Figura 5.9- Sistema de Coordenadas $[x_1, y_1]$	103
Figura 5.10- Sistema de Coordenadas $[x_2, y_2]$	104
Figura 5.11- Curva no Plano $[x_2, y_2]$	105
Figura 5.12- Curva Adimensional Transformada.....	107
Figura 5.13- Mapeamento das Formas de Lewis Estendidas.....	111
Figura 5.14- Seção Mestre.....	118
Figura 5.15- Curva Adimensional da Seção Mestre	121
Figura 5.16- Seção Mestre de Forma Regular	124
Figura 5.17- Perfil Longitudinal	130
Figura 5.18- Abertura do Perfil de Popa.....	133
Figura 5.19- Plano de Linhas d'Água	137
Figura 6.1- Linha d'Água de Projeto : Caso 1	173
Figura 6.2- Linha d'Água de Projeto : Caso 2.....	173

Figura 6.3- Curva Vertical de Áreas : Caso 1.....	179
Figura 6.4- Curva Vertical de Áreas : Caso 2.....	180
Figura 6.5- Seção Mestre : Caso 1	186
Figura 6.6- Seção Mestre : Caso 2	186
Figura 6.7- Perfil Longitudinal : Caso 1.....	188
Figura 6.8- Perfil Longitudinal : Caso 2.....	189
Figura 6.9- Plano de Linhas d'Água do Navio Graneleiro : Caso 1.....	197
Figura 6.10- Plano de Balizas do Navio Graneleiro : Caso 1	197
Figura 6.11- Plano de Linhas d'Água do Navio Graneleiro : Caso 2.....	197
Figura 6.12- Plano de Balizas do Navio Graneleiro : Caso 2	197
Figura 6.13- Plano de Balizas de Modelo da Série 60.....	204
Figura A1- Mapeamento Conforme de Seções Transversais de Embarcações	213
Figura A2- Mapeamento Conforme da Seção Normalizada	214
Figura A3- Formas Degeneradas da Transformada de 4 Termos	217

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Coeficiente para Cálculo do Peso Estrutural	45
Tabela 6.1 - Resultados para o Navio Graneleiro.....	167
Tabela 6.2 - Dados para a Síntese da Linha d'Água de Projeto	171
Tabela 6.3 - Prioridades para a Síntese da Linha d'Água de Projeto	172
Tabela 6.4 - Resultados da Linha d'Água de Projeto.....	173
Tabela 6.5 - Coeficientes dos Polinômios $y_1(x)$ e $y_2(x)$	174
Tabela 6.6 - Dados para a Síntese da Curva Vertical de Áreas	177
Tabela 6.7 - Prioridades para a Síntese da Curva Vertical de Áreas	178
Tabela 6.8 - Resultados da Curva Vertical de Áreas.....	179
Tabela 6.9 - Variáveis do Modelo de Síntese da Curva Vertical de Áreas.....	180
Tabela 6.10 - Dados para a Síntese da Seção Mestra	182
Tabela 6.11 - Prioridades para a Síntese da Seção Mestra	183
Tabela 6.12 - Resultados da Etapa 1 da Síntese da Seção Mestra	184
Tabela 6.13 - Resultados da Etapa 2 da Síntese da Seção Mestra	185
Tabela 6.14 - Dimensões do Hélice e do Leme para os Casos 1 e 2	188
Tabela 6.15 - Calados e Coordenadas do Final das Linhas : Caso 1	190
Tabela 6.16 - Calados e Coordenadas do Final das Linhas : Caso 2.....	190
Tabela 6.17 - Dados das Linhas d'Água : Caso 1.....	192
Tabela 6.18 - Dados das Linhas d'Água : Caso 2.....	193
Tabela 6.19 - Prioridades para a Síntese do Plano de Linhas d'Água	193
Tabela 6.20 - Resultados Relativos às Metas para os Planos de Linhas d'Água.....	194
Tabela 6.21 - Atributos e Características das Linhas d'Água : Caso 1.....	195
Tabela 6.22 - Atributos e Características das Linhas d'Água : Caso 2.....	196
Tabela 6.23 - Dados do Casco Série 60	203

LISTA DE SÍMBOLOS

- α_e : meio ângulo de entrada da linha d'água (graus ou rad.).
- α_{max} : inclinação máxima no corpo de saída da linha d'água (graus ou rad.).
- φ_{po} , φ_h : ângulos do perfil na popa (graus ou rad.).
- α_{pw} : ângulo de aproamento do navio em relação à direção de incidência das ondas (graus).
- α_{rf} : ângulo de elevação do fundo da seção mestra -"rise of floor"- (graus ou rad.).
- α_s : meio ângulo de saída da linha d'água (graus ou rad.).
- α , β : ângulos das tangentes à curva adimensional de áreas e à curva adimensional da seção mestra, nos pontos de calados zero e 1, respectivamente (graus ou rad.).
- β_{fl} : ângulo de inclinação do costado da seção mestra -"flare"- (graus ou rad.).
- γ_a : peso específico da água (ton/m³).
- Δ : deslocamento da embarcação (ton).
- $\Delta\ell$: deslocamento leve (ton).
- ∇ : volume deslocado pelo casco no calado de projeto (m³).
- ϕ_0 , ϕ_T : ângulos das tangentes à curva vertical de áreas nos pontos de calados zero e T, respectivamente (graus ou rad.).
- A_{\otimes} : área da seção mestra (m²).
- a, b, c, d, e : coeficientes do polinômio $y_1(x)$.
- A_{CV} : área compreendida entre a curva vertical de áreas e o eixo de calados (m²).
- A_e : área do corpo de entrada de uma linha d'água qualquer (m²).
- A_L : área do leme (m²).
- A_s : área do corpo de saída de uma linha d'água qualquer (m²).
- A_W : área de uma linha d'água qualquer (m²).
- A_{WL} : área da linha d'água no calado de projeto (m²).
- b , t : coordenadas da extremidade superior da curva adimensional de áreas.
- B : boca (m).
- BL : borda livre (m).
- BL_{min} : borda livre mínima (m).
- BM : raio metacêntrico (m).
- B_{max} : boca máxima admissível (m).

- B_T : boca da linha d'água na popa - "popa transom" - (m).
- B_W : boca máxima de uma linha d'água qualquer (m).
- C_θ : coeficiente da seção mestra.
- C_1, C_2, C_3, C_4 : coeficientes da transformada conforme da curva adimensional transformada.
- C_b : coeficiente de bloco.
- C_{gCA} : centro geométrico da curva adimensional de áreas.
- C_{gCV} : centro geométrico da área A_{CV} .
- ch_{db} : coordenada horizontal do centro do setor circular do bojo da seção mestra (m).
- c_L : corda do leme (m).
- C_p : coeficiente prismático.
- C_{SM} : centro geométrico da seção mestra.
- C_{VC} : centro de carena do casco.
- CV_{db} : coordenada vertical do centro do setor circular do bojo da seção mestra (m).
- C_W : coeficiente de linha d'água.
- C_{Wp} : coeficiente de linha d'água baseado no comprimento entre perpendiculares.
- D : pontal (m).
- d_i : variável de desvio em relação a uma meta de projeto.
- D_p : diâmetro do hélice (m).
- DWT_C : capacidade de carga (ton).
- DWT_{Cr} : capacidade de carga requerida (ton).
- DWT_{Op} : carga operacional (ton).
- Er_C : erro no cálculo de C_θ .
- Er_k : erro no cálculo de $k_{C_{SM}}$.
- $f(h)$: função que representa a curva adimensional de áreas ou a curva adimensional da seção mestra.
- f, g, h, i, j : coeficientes do polinômio $y_2(x)$.
- F_n : número de Froude.
- f_p : margem de projeto para o deslocamento leve.
- f_s : fator de serviço para a potência instalada.
- f_c^n : função auxiliar de carenagem das linhas d'água.
- F_{ic}^n : função individual de carenagem das linhas d'água.

- F_{GC} : função geral de carenagem do plano de linhas d'água.
- g : aceleração da gravidade (m/seg²).
- GM : altura metacêntrica (m).
- GM_{min} : altura metacêntrica mínima (m).
- h : calado adimensional para as curvas adimensional de áreas e adimensional da seção mestra.
- h_{DB} : altura do duplo fundo (m).
- I_{WL} : momento de inércia transversal da linha d'água de projeto (m⁴).
- KB : posição vertical do centro de carena (m).
- k_{CSM} : altura do centro geométrico da seção mestra (m).
- KG : altura do centro de gravidade da embarcação (m).
- Kg_c : altura do centro de gravidade da carga (m).
- Kg_f : altura do centro de gravidade do combustível (m).
- Kg_M : altura do centro de gravidade da praça de máquinas (m).
- Kg_O : altura do centro de gravidade de equipamentos e acessórios (m).
- Kg_S : altura do centro de gravidade da estrutura (m).
- ℓ_{pw} : comprimento do corpo paralelo (m).
- ℓ_w : comprimento da onda (m).
- L : comprimento entre perpendiculares (m).
- LCB : posição longitudinal do centro de carena medida a partir da proa (m).
- LCB_{\otimes} : posição longitudinal do centro de carena medida como porcentagem do comprimento entre perpendiculares, a partir da seção situada a meio comprimento entre perpendiculares (%).
- LCF_W : coordenada longitudinal do centro de flutuação de uma linha d'água qualquer (m).
- LCF_{WL} : posição longitudinal do centro de flutuação da linha d'água de projeto (m).
- L_{max} : comprimento máximo admissível (m).
- L_{PM} : comprimento do corpo paralelo médio da embarcação (m).
- L_W : comprimento de uma linha d'água qualquer (m).
- L_{WL} : comprimento da linha d'água no calado de projeto (m).
- M_{sf}^{CA} : momento estático da curva adimensional de áreas em relação ao eixo horizontal.
- M_{sf}^{SA} : momento estático da área interna da curva adimensional da seção mestra, em relação eixo horizontal.

- M_{SF}^{SM} : momento estático de meia seção mestra em relação ao eixo horizontal (m^3).
- M_{SX}^{CT} : momento estático da curva adimensional transformada, em relação ao eixo horizontal.
- M_{SY}^{CT} : momento estático da curva adimensional transformada, em relação ao eixo vertical.
- N_W : número de linhas d'água no plano de linhas d'água.
- P_l : prioridade associada a uma meta de projeto.
- P_S : potência instalada ou do motor (hp).
- R_b : raio do setor circular que representa o bojo da seção mestra regular (m).
- R_g : autonomia (milhas náuticas).
- R_{gr} : autonomia requerida (milhas náuticas).
- S : dobro da área interna da curva adimensional de áreas.
- S_L : envergadura do leme (m).
- T : calado de projeto (m).
- t_{ew} : período médio de encontro das ondas (seg).
- T_{max} : calado máximo admissível (m).
- t_{nh} : período natural de heave (seg).
- t_{np} : período natural de pitch (seg).
- t_{nr} : período natural de roll (seg).
- $tolC$: valor máximo admitido para o erro no cálculo de C_{Φ} .
- $tolk$: valor máximo admitido para o erro no cálculo de k_{CSM} .
- t_w : período médio do mar (seg).
- T_W : calado de uma linha d'água qualquer (m).
- V_k : velocidade de serviço (nós).
- V_{kr} : velocidade de serviço requerida (nós).
- V_S : velocidade do navio (m/seg).
- V_W : velocidade da onda (m/seg).
- W_f : peso de combustível (ton).
- W_M : peso da praça de máquinas (ton).
- W_O : peso de equipamentos, acessórios e subsistemas (ton).
- W_S : peso da estrutura (ton).
- X_{B1} : coordenada longitudinal do início do corpo paralelo (m).

- X_{B2} : coordenada longitudinal do fim do corpo paralelo (m).
- X_{CLP} : coordenada longitudinal do centro do corpo paralelo da linha d'água (m).
- X_f : coordenada longitudinal do fim (popa) da linha d'água (m).
- X_{fW} : coordenada longitudinal do final de uma linha d'água qualquer (m).
- X_i : coordenada longitudinal do início (proa) da linha d'água (m).
- X_{LPM} : coordenada longitudinal do centro do corpo paralelo médio (m).
- X_{B1}^{Nw} : coordenada longitudinal de início do corpo paralelo da linha no calado zero (m).
- X_{B2}^{Nw} : coordenada longitudinal do fim do corpo paralelo da linha no calado zero (m).
- X_0^{2d} : coordenada longitudinal do ponto de inclinação máxima no corpo de saída da linha d'água (m).
- $y_1(x)$: polinômio que descreve o corpo de entrada da linha d'água.
- $y_2(x)$: polinômio que descreve o corpo de saída da linha d'água.
- Y_{max} : meia boca máxima da linha d'água (m).

RESUMO

Apresenta-se neste trabalho a proposta de um novo modelo para realização do projeto preliminar de embarcações, no qual o problema de projeto é formulado como um problema de otimização por múltiplos critérios onde, diferentemente dos modelos correntes, a definição da forma do casco é incorporada, de modo hierárquico, como objetivo do processo de otimização.

No modelo proposto, o problema básico do projeto preliminar é subdividido em dois problemas sequenciais de síntese: 1) o da determinação das dimensões e coeficientes de forma; 2) o da definição da geometria do casco.

Para a solução destes problemas desenvolveu-se um conjunto de modelos de síntese e otimização, baseados na técnica da programação por objetivos, que foram implantados num sistema computacional integrado, que possibilita a execução sequencial do projeto preliminar de embarcações, até a definição matemática otimizada da forma do casco.

Os modelos de síntese e otimização da forma do casco representam um novo procedimento automatizado, proposto com a finalidade de substituir o procedimento tradicional que faz uso de séries sistemáticas ou de distorções controladas de cascos de navios similares para esta definição.

A aplicação a um exemplo, referente ao projeto de um navio graneleiro, indica que os modelos elaborados, em particular o modelo de síntese da forma do casco, fornecem resultados coerentes e compatíveis com a experiência e a prática de projeto de embarcações e representam uma poderosa ferramenta de apoio às atividades de avaliação e tomada de decisão que permeiam a execução do projeto preliminar de embarcações.

ABSTRACT

This work presents a new model for the preliminary design of ships, in which the design problem is formulated as a multiple criteria optimization problem where, unlike current models, the definition of hull shapes is incorporated hierarchically as an optimization problem objective.

In the proposed model, the basic problem of preliminary design is subdivided into two sequential synthesis problems: 1) determination of dimensions and form coefficients; 2) definition of hull geometry.

A number of synthesis and optimization models were developed to solve these problems, based on goal programming techniques, and these were implemented in an integrated computational system that allows the sequential execution of the preliminary design of ships up to the mathematical definition of an optimized hull form.

These models for the synthesis and optimization of hull forms represent a novel automated procedure proposed as a substitute for traditional procedures that make use either of systematic series or of controlled distortions of similar hulls.

Application to a case study – the design of a bulk carrier – indicates that the proposed models, and in particular the hull form synthesis model, produce coherent results, compatible with experience and practice in ship design, and therefore represent a powerful support tool to the activities of evaluation and decision-making that pervade the execution of preliminary ship designs.

1. INTRODUÇÃO

O navio e as embarcações, em geral, são produtos frequentemente classificados como um dos mais complexos sistemas de engenharia produzidos pelo homem e fornecem um bom exemplo de integração de subsistemas. Nas suas versões comerciais, estes produtos são fabricados fundamentalmente para atender as demandas relativas ao transporte de cargas, pessoas e aos serviços de apoio em atividades realizadas no oceano (exploração de petróleo, por exemplo), utilizando-se da água (mar, rios, lagos) como meio de suporte para realização de suas funções.

Para realizar adequadamente estas funções, estes produtos devem possuir características e atributos que lhes permitam satisfazer um conjunto normalmente grande de requisitos e restrições que refletem ou traduzem as aspirações ou preocupações de natureza técnica (desempenho, segurança, etc.), econômica (receita, custos), legal, ambiental, política, etc., manifestadas pelos clientes destes produtos, ou seja, pelas pessoas, organizações, instituições, etc., que, de uma forma ou outra, são envolvidas ou afetadas pelo uso ou operação dos mesmos.

Como exemplo típico destas aspirações pode-se citar as seguintes: embarcações devem suportar esforços que estão entre os maiores da natureza; devem ser auto-suficientes e prover sua própria energia; devem abrigar em segurança seus passageiros, tripulantes e cargas, durante sua operação; devem operar sem provocar danos à natureza; e devem fornecer um serviço justificável dos pontos de vista econômico ou estratégico. Alguns dos atributos sobre os quais, em geral, se estabelecem os requisitos e restrições que refletem estas aspirações, são os seguintes: velocidade de serviço; capacidade de carga; autonomia; custo inicial e

operacional; estabilidade; estanqueidade; resistência estrutural; manobrabilidade; comportamento no mar; etc.

Estes atributos resultam da ação conjunta dos diversos subsistemas escolhidos para compor e formar a embarcação e a breve descrição acima indica a complexidade do sistema formado.

O sistema "embarcação" é classificado normalmente como "grande sistema" devido ao fato de que para descrevê-lo é necessário que se especifique um grande número de características relativas aos diversos sub-sistemas que o compõem, como por exemplo: forma do casco; arranjo geral; arranjo estrutural; especificação de máquinas, equipamentos e acessórios; especificação de materiais, etc.

O problema de conceber um sistema deste tipo, ou seja, uma embarcação, possui três características fundamentais: 1) é um problema que envolve a determinação de um grande número de características (variáveis) para definir uma solução; 2) é um problema que envolve múltiplos requisitos e restrições; 3) os requisitos geram objetivos que são normalmente conflitantes; por exemplo, estabelecer um requisito de baixo consumo de combustível leva a um objetivo de minimizar a resistência ao avanço que, por sua vez, induz uma solução com forma de casco fina e longa, normalmente associada a um maior peso estrutural (para a mesma capacidade de carga), indesejável do ponto de vista de um possível requisito de baixo custo inicial.

Problemas com estas características apresentam também, como consequência, uma outra importante propriedade: são problemas abertos que admitem um grande número de soluções, quando não infinitas delas, uma vez que um grande número de

combinações de níveis de atendimento dos requisitos pode ser obtido de um sem número de diferentes soluções viáveis do ponto de vista do atendimento às restrições impostas ao problema. Esta propriedade traz à tona duas das principais dificuldades do processo de síntese de uma solução de um problema desta natureza: a) estabelecer um critério satisfatório para julgar o mérito de diferentes soluções; b) possuir alguma certeza de que entre as soluções geradas para comparação encontram-se aquelas, ou aquela, de melhor mérito possível segundo o critério de julgamento estabelecido, ou seja, a solução "ótima".

Problemas desta natureza, que aparecem tanto na concepção de produtos como em outras atividades, são chamados na literatura de "Problemas de Múltiplos Objetivos" [1], e envolvem um grande número de tomadas de decisão durante o processo de busca de soluções ou processo de síntese. No âmbito da Engenharia, este processo nada mais é do que o Projeto de Engenharia.

Para que se possa obter soluções satisfatórias, a metodologia de projeto adotada deve ser capaz de lidar adequadamente com estas dificuldades e conflitos, encaminhando naturalmente o processo de identificação e escolha para aquele que seria o projeto ótimo.

No caso de grandes sistemas e, em particular, de navios e embarcações, o projeto é normalmente subdividido em fases ou etapas para que se possa lidar adequadamente com o grande número de características e especificações a ser determinado. As etapas deste processo são usualmente conhecidas como : Projeto Preliminar; Projeto de Contrato e Projeto de Construção ou Detalhamento.

O projeto preliminar envolve a seleção do conjunto das características da

embarcação, as chamadas características principais, que tem maior influência nos atributos que refletem as principais aspirações dos clientes e que, em geral, estão associados aos aspectos econômicos (receita e custo) e de segurança da embarcação. Estas características incluem normalmente a forma do casco, com suas dimensões principais e coeficientes de forma, a potência instalada, o arranjo geral e o arranjo estrutural. Destas, a forma, ou descrição geométrica do casco, é, em geral, a mais importante pois, é dela que fundamentalmente depende a avaliação dos principais atributos da embarcação, tais como: resistência ao avanço; estabilidade; resistência estrutural; comportamento no mar; manobrabilidade; capacidade de carga; etc.

Nas outras duas etapas, realiza-se o refinamento e o detalhamento da solução definida no projeto preliminar, determinando-se as demais características necessárias. No entanto, não se espera que haja mudanças significativas nas características principais já definidas. É, portanto, na etapa do projeto preliminar que ocorre a atividade fundamental de geração e seleção de soluções do problema de concepção da embarcação.

A metodologia clássica usualmente empregada no projeto preliminar de embarcações não sofreu mudanças significativas nos últimos 50 anos. Ela é caracterizada por uma sequência de tarefas trabalhosas, de natureza iterativa, que envolvem o levantamento e a extrapolação de dados de embarcações já existentes, a aplicação de métodos de tentativa e erro para definir e alterar as características principais e a execução de diversas análises para avaliação dos atributos das soluções geradas. Normalmente, a repetição sequencial deste processo permite que se obtenha um conjunto de soluções viáveis, isto é, que atendam às restrições

impostas ao problema. No entanto, a obtenção de soluções satisfatórias, do ponto de vista dos requisitos, requer normalmente uma boa dose de experiência e uma solução ótima provavelmente só será encontrada por acaso.

A despeito de sua complexidade e inconveniência, a maior desvantagem desta metodologia é que ela tende a produzir apenas uma solução aceitável e não a melhor solução possível. Em outras palavras, é um método que pode ser classificado como de "satisfação" ao invés de "otimização".

Mais recentemente diversas metodologias alternativas vêm sendo propostas para realização do projeto preliminar, baseadas essencialmente na formulação do problema de projeto como um problema de otimização. A aplicação dos métodos de otimização no projeto foi impulsionada pelo aumento da capacidade de processamento dos computadores, já que as técnicas numéricas empregadas nestes métodos exigem normalmente uma grande quantidade de cálculos matemáticos repetitivos, que desencorajavam sua utilização em problemas muito complexos.

Diversas abordagens já foram propostas para atacar o problema de otimização. Na maioria delas, o modelo de otimização é formulado de modo a considerar um único critério ou medida de mérito na função objetivo. Nestes casos, elege-se o requisito mais importante para se estabelecer o critério de mérito e trata-se os demais como restrições fictícias. No entanto, no caso de problemas de engenharia em geral e de projeto de embarcações, em particular, que, em sua maioria, envolvem múltiplos critérios com os mais variados graus de importância, as soluções "ótimas" fornecidas por estes modelos devem ser sempre vistas com alguma reserva, dado que a modelagem força o problema real em um problema de

critério único. Além disto, a necessidade de se tratar todos os demais requisitos como restrições rígidas pode, eventualmente, eliminar o espaço de soluções viáveis e impedir a obtenção de soluções para o problema de otimização.

Para tratar estas questões e formular adequadamente o problema de otimização, surgiram nos últimos anos algumas técnicas [1] desenvolvidas no sentido de considerar simultaneamente os vários critérios, e seus graus de importância, presentes no problema de projeto. Estas técnicas compõem o que se convencionou chamar de "Multiple Criteria Decision Making Methods - (MCDM)"[1]. Aquela que vem apresentando os resultados mais promissores na modelagem do problema de projeto preliminar de embarcações é a técnica conhecida com "Programação por Objetivos" ("Goal Programming"). Exemplos de sua aplicação no projeto preliminar de navios podem ser vistos em Lyon e Mistree [8], Sen [11], Ray e Sha [13] e Sen e Bari [14].

Em todas estas aplicações, o modelo de otimização envolve apenas a definição das dimensões principais e dos coeficientes de forma. A solução ótima fornecida, além destas características, apresenta também estimativas de outras características e atributos tais como: potência do motor; capacidade de carga; raio metacêntrico; pesos e centros dos principais subsistemas; períodos naturais, etc. Invariavelmente, a forma do casco, que é a característica fundamental da embarcação, não é tratada por estes modelos de otimização. A sua definição, ou não é feita, ou é aproximada posteriormente através do uso de séries sistemáticas ou distorções controladas de cascos já existentes.

Em outras palavras, a definição da forma do casco, uma tarefa essencial do projeto preliminar, é excluída dos modelos de otimização usualmente propostos para formular o problema de projeto.

1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

Tendo em vista as limitações de abrangência dos modelos descritos, o objetivo deste trabalho é propor um novo modelo de otimização para o projeto preliminar, empregando também a técnica da Programação por Objetivos, mas incorporando no processo, de forma hierárquica, a geração do casco da embarcação. O modelo proposto é na realidade a formulação como um problema de otimização, do procedimento empregado no método tradicional de projeto para gerar a forma do casco, exceto no aspecto fundamental de que o casco é gerado matematicamente ao invés de se utilizar, como é usual, séries sistemáticas ou distorções de cascos de embarcações semelhantes.

A proposta básica do modelo é dividir o problema de otimização em subproblemas formulados através da técnica da Programação por Objetivos e utilizar os resultados das soluções ótimas dos subproblemas precedentes, como objetivos para os subsequentes. Como resultado final, além das características e atributos mencionados acima, o modelo fornece o plano de linhas ou a descrição matemática do casco da embarcação, que podem ser estruturados para servir como dados de entrada para programas de análise e arquitetura naval capazes de definir, avaliar ou calcular mais precisamente características e atributos tais como: arranjo geral; arranjo estrutural; curvas hidrostáticas; curvas de estabilidade; resistência estrutural; comportamento no mar; etc.

O modelo proposto foi implementado num sistema computacional integrado batizado de SHOPS (“**S**hip and **H**ull **O**ptimization **S**ystem”) que fornece, além das características principais da solução ótima, o plano de linhas otimizado hierarquicamente. O sistema encontra-se em versão preliminar e requer ainda a confecção de interfaces gráficas que tornem mais amigável o seu uso em projeto, porém se mostrou uma poderosa ferramenta para a definição das características de uma embarcação nas fases preliminares de projeto.

Nos capítulos seguintes descreve-se os conceitos envolvidos na formulação do modelo de otimização proposto, a técnica da programação por objetivos e, de forma detalhada, a modelagem do problemas de otimização das dimensões e dos coeficientes de forma do navio e de otimização da forma do casco. Ao final apresenta-se um exemplo de projeto comparando-se os resultados obtidos através do modelo proposto com resultados da bibliografia.

2. MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA O PROJETO PRELIMINAR

Como já fora mencionado no capítulo 1, o objetivo principal deste trabalho é o de propor um modelo de otimização para realização do projeto preliminar de navios e embarcações no qual a forma do casco também seja tratada como variável no processo de síntese. Neste capítulo apresenta-se a descrição conceitual deste modelo, sua função e os resultados que podem ser obtidos da sua aplicação. Para isto, inicialmente discute-se alguns conceitos relacionados ao projeto de engenharia e ao projeto preliminar de navios, que formam o arcabouço conceitual para o modelo proposto e ajudam a definir o contexto em que o mesmo está inserido.

2.1 O PROJETO DE ENGENHARIA

Existem inúmeras definições de Projeto de Engenharia, abrangendo diferentes níveis de abstração. Para os propósitos deste trabalho, entende-se que a seguinte definição, proposta por Dym e Levitt [2], é a mais adequada: "Projeto de Engenharia é a sistemática e inteligente geração e avaliação de especificações para artefatos cujas forma e funções atendam requisitos e satisfaçam restrições estabelecidas".

Nesta definição, artefatos devem ser entendidos no sentido mais amplo, desde objetos concretos, até sistemas ou procedimentos; e especificações devem ser entendidas como todos os tipos de características e atributos que representam ou descrevem o artefato (sua forma e funções) e que são necessários definir para que o mesmo possa ser fabricado, operado, mantido, etc. Um conjunto de especificações descrevendo um artefato que satisfaça às restrições e atenda, em alguma medida, os requisitos estabelecidos representa uma solução para o problema de engenharia abordado.

O processo de geração destas soluções é o chamado processo de projeto para o qual, da mesma forma, existem inúmeros modelos propostos para representá-lo. No caso do projeto naval, o modelo mais conhecido e aplicado é a chamada "Espiral de Projeto", proposta por Evans, que faz parte de uma classe de modelos que procuram representar o processo de projeto de grandes sistemas de engenharia.

Estes modelos, subdividem o processo de projeto em etapas sucessivas que se diferenciam basicamente pelos tipos de atividades ou tarefas atribuídas a cada etapa e pela quantidade e precisão das especificações definidas ao final delas.

As etapas fundamentais do projeto, segundo alguns destes modelos [2], são: a) o Projeto Preliminar ; b) o Projeto de Contrato ou de Detalhamento; c) o Projeto de Construção ou Fabricação.

O projeto preliminar é a etapa na qual se realiza a geração de diversas alternativas preliminares de solução, e se faz a análise, avaliação e comparação destas diversas alternativas. Ao final desta etapa, normalmente uma das soluções preliminares é escolhida para a sequência do projeto. As especificações geradas e trabalhadas nesta etapa são as chamadas especificações principais, que são aquelas que têm maior influência ou impacto nos atributos considerados fundamentais para avaliação das soluções. Estes atributos estão em geral associados a aspectos econômicos e de desempenho da solução.

Na etapa do projeto de contrato realiza-se o refinamento e detalhamento da solução preliminar escolhida e define-se as especificações dos sub-sistemas e componentes de mais baixo nível, não tratados ou superficialmente tratados no projeto preliminar. Normalmente não se espera nesta etapa alterações significativas

nas especificações principais definidas na etapa anterior. Ao final desta etapa é gerado um conjunto quase completo das especificações necessárias para descrever e representar a solução.

Na etapa do projeto de construção, produz-se todas as especificações de produção e montagem necessárias para a fabricação da solução.

O projeto preliminar é normalmente considerado como a etapa mais emblemática do processo de projeto por representar a fase mais criativa deste processo. É nesta etapa que as atividades de síntese e avaliação são exaustivamente realizadas para gerar, modificar e otimizar as alternativas de solução, culminando com a escolha da solução preliminar. A finalidade básica destas atividades é identificar dentro do espaço de soluções um subconjunto, ou subespaço, de soluções viáveis, ou seja, de soluções que atendam as restrições inicialmente estabelecidas, e seleccionar neste subespaço a mais "eficiente" segundo os critérios adotados para avaliação das soluções.

Para que este processo de identificação e seleção de alternativas seja factível, em termos de tempo e custo, e eficaz, em termos de apontar as melhores alternativas, é fundamental a escolha adequada das características principais e dos atributos que serão considerados para descrever a solução preliminar. Para o projeto de grandes sistemas, como é o caso de navios e embarcações, esta escolha é de importância fundamental para que se consiga avaliar de forma adequada o mérito das soluções.

A eficácia deste processo depende também dos métodos de análise empregados para se avaliar os atributos escolhidos. No projeto preliminar, dada a

pequena quantidade de informação disponível e a necessidade de se executar um grande número de análises para o processo de síntese, faz-se uso normalmente de modelos e métodos simplificados, além de estimativas com base em experiência e resultados anteriores, evitando-se a aplicação de métodos de análise muito elaborados. Tais métodos exigem o conhecimento prévio de um grande número de especificações, normalmente não disponíveis no início do projeto, além de consumirem um tempo elevado para cada análise.

É neste aspecto que reside uma das principais diferenças entre as etapas do projeto preliminar e do projeto de contrato, consequência basicamente da atividade de síntese que caracteriza a primeira etapa. Na etapa do projeto de contrato procura-se utilizar os métodos de análise mais sofisticados disponíveis, essencialmente porque se está analisando uma única solução preliminar já definida na etapa anterior. Neste caso, a análise mais elaborada assume então um caráter de verificação e, se for o caso, de refinamento em algumas das especificações principais desta solução.

Tendo em vista estas características das diversas etapas do projeto, pode-se concluir que é na etapa do projeto preliminar que a aplicação de modelos e métodos de otimização pode trazer os maiores ganhos, fundamentalmente no aspecto de identificação das melhores ou da melhor solução para o problema de engenharia.

2.2 O PROJETO PRELIMINAR DE NAVIOS E EMBARCAÇÕES

O projeto de navios e embarcações convencionais se desenvolve a partir da definição de um conjunto de requisitos e restrições que representam o que se

convencionou chamar de "Requisitos do Armador". Estes requisitos e restrições são estabelecidos sobre vários dos atributos e características da embarcação que, quando combinados segundo determinados critérios gerais, refletem as principais aspirações e preocupações de seus armadores. Os quatro aspectos de desempenho da embarcação que normalmente definem estes critérios são os seguintes:

- (1) Receita operacional : definida essencialmente pela capacidade de carga, tipo de carga, velocidade de serviço, autonomia, rota, portos servidos, sistema de carregamento e descarregamento, etc.
- (2) Segurança : definida pela estabilidade, altura metacêntrica (GM), comportamento no mar (períodos naturais de arfagem(heave), caturro(pitch) e jogo(roll)), manobrabilidade, resistência estrutural, tipo e quantidade de equipamentos de segurança e salvatagem, capacidade de atendimento às normas e regulamentos de segurança e navegação, etc.
- (3) Custo Operacionais : definido pelo tipo e potência da instalação propulsora, tipo e quantidade de sistemas auxiliares, consumo de combustível, número de tripulantes, taxas de portos e canais, sistema de carregamento e descarregamento, seguros, etc.
- (4) Custo de Construção : definido essencialmente pelo arranjo estrutural, peso estrutural, geometria do casco (tamanho do corpo paralelo médio, dimensões principais, etc.), tipo e potência da instalação propulsora, tipo e quantidade de sistemas auxiliares, arranjo geral, selo de classificação, etc.

Em geral, é com base nestes aspectos de desempenho que o armador julga o mérito de uma solução proposta para a embarcação. No entanto, a avaliação completa e precisa destes aspectos normalmente só é conhecida nas etapas de detalhamento do projeto, quando se está definindo e especificando aqueles subsistemas e componentes de menor importância relativa para a função básica da embarcação.

Nas fases iniciais do projeto, ou seja, na etapa do projeto preliminar, quando se está procurando determinar conjuntos limitados de especificações que descrevem as possíveis soluções e as informações disponíveis são ainda escassas, a avaliação dos aspectos de desempenho é, em geral, substituída pela avaliação de certos atributos e características que são identificados como sendo os de maior impacto nestes aspectos. Neste caso, os critérios mais gerais são normalmente substituídos por requisitos e restrições estabelecidos sobre tal conjunto de atributos, formando os chamados requisitos do armador, que, de alguma forma, refletem as aspirações em relação àqueles aspectos de desempenho. O julgamento do mérito das soluções preliminares é feito então em função do grau de atendimento a estes requisitos e restrições.

Os requisitos são normalmente estabelecidos de duas maneiras: a) através da fixação de metas (valores) desejadas para certos atributos e características ou; b) através da fixação de objetivos (minimizar, maximizar, reduzir, etc.) para certos atributos e características. As restrições, por sua vez, são estabelecidas fixando-se limites máximos e mínimos aceitáveis para os valores de características e atributos.

Embora certamente variem de acordo com a embarcação em projeto, existem alguns requisitos básicos, estabelecidos na forma de metas e objetivos, que estão

presentes na maioria das definições de requisitos do armador. As metas e objetivos que normalmente representam estes requisitos de projeto são as seguintes:

- **Metas e Objetivos (Requisitos do Armador)**

- Atender a capacidade de carga requerida.
- Atender a velocidade de serviço requerida.
- Atender a autonomia requerida.
- Atender a altura metacêntrica requerida.
- Minimizar o deslocamento do navio.
- Minimizar a potência instalada.

Eventualmente, requisitos envolvendo outros atributos tais como manobrabilidade, comportamento no mar, etc., podem também estar presentes nestas definições.

As restrições que usualmente fazem parte dos requisitos do armador estabelecem limites do seguinte tipo:

- **Restrições (Requisitos do Armador)**

- Nas dimensões principais, para atender limitações de portos, canais e rotas de navegação.
- Na estabilidade de modo geral e na estabilidade inicial e avariada, em particular, para atender normas e regulamentos internacionais relativos à segurança da navegação.
- Na borda livre, também para atender regulamentos de segurança.
- Nas tensões e deslocamentos estruturais, para atender regulamentos das sociedades classificadoras.
- Nos períodos naturais ou amplitudes associadas aos movimentos de heave, pitch e roll, tendo em vista a segurança da tripulação, da carga e da embarcação.

O objetivo básico do projeto preliminar é encontrar dentro do espaço das soluções viáveis, ou seja, daquelas que satisfazem as restrições, a solução que

melhor atenda o conjunto de metas e objetivos, segundo alguma função de mérito estabelecida pelos armadores e projetistas. Esta função de mérito deve evidentemente contemplar a importância relativa entre as diferentes metas e objetivos de modo que se possa comparar as soluções com base no grau de atendimento a cada uma delas.

Para se determinar a viabilidade e o mérito de cada solução é necessário que seja avaliado o conjunto básico de atributos da embarcação associados às metas, objetivos e restrições estabelecidas. Para navios mercantes convencionais estes atributos são normalmente os seguintes:

- **Atributos**

- Velocidade de serviço (V_k)
- Autonomia (R_g)
- Deslocamento (Δ)
- Deslocamento leve ($\Delta \ell$)
- Carga operacional (DWT_{op})
- Capacidade de carga (DWT_c)
- Potência do motor (P_s)
- Borda livre (BL)
- Altura metacêntrica (GM)
- Posição Longitudinal do Centro de Carena (LCB)
- Posição Vertical do Centro de Carena (KB)
- Períodos naturais de heave, pitch e roll (t_{nh} , t_{np} , t_{nr})
- Resistência Estrutural
- Curvas Hidrostáticas
- Curvas de Estabilidade
- Resistência ao Avanço
- Comportamento no Mar (curvas de resposta em frequência - RAO)
- Manobrabilidade

Para avaliar cada um destes atributos é necessário definir certas características da embarcação com base nas quais pode-se aplicar os métodos ou modelos apropriados para calcular cada um deles. Para os atributos anteriormente listados as características que normalmente devem ser definidas na etapa de projeto preliminar são as seguintes:

- **Características**

- Forma ou geometria da superfície do casco, com suas dimensões e coeficientes de forma, representada ou descrita pelo Plano de Linhas.
- Arranjo geral preliminar, representando a distribuição preliminar de pesos e centros.
- Arranjo estrutural preliminar, representando a distribuição preliminar de pesos e centros e a geometria estrutural da seção mestra.

Desta lista, a forma do casco é a característica fundamental para a avaliação dos atributos listados, até porque as duas últimas, para serem adequadamente definidas, dependem da definição prévia desta geometria. Estas características, juntamente com os atributos associados, formam o conjunto das especificações principais que representam uma solução preliminar de projeto.

A atividade fundamental na etapa do projeto preliminar é tentar gerar um número suficiente de soluções preliminares para que se consiga caracterizar adequadamente o espaço de soluções viáveis, de modo a permitir a identificação da solução "ótima" segundo os critérios e a função de mérito estabelecidos. A eficácia deste processo de síntese está evidentemente ligada tanto ao tempo disponível para realização do projeto como ao tempo que se gasta para gerar uma solução.

Como a descrição destas soluções envolve a definição da forma do casco, que

é uma tarefa trabalhosa e demorada, seja ela feita através de desenhos, eletrônicos ou não, ou matematicamente, o procedimento usualmente adotado no projeto preliminar de navios convencionais, para reduzir o tempo gasto na geração de soluções, é, inicialmente, representar a forma do casco através apenas de suas dimensões principais e coeficientes de forma. Com base nestas dimensões e coeficientes determina-se, através de métodos aproximados e formulações semi-empíricas ou baseadas em dados estatísticos, as demais características principais e os atributos associados. Após a escolha de uma solução preliminar, gera-se a forma do casco e avalia-se, por métodos mais precisos, os atributos da solução. As dimensões e coeficientes usualmente empregados para representar as características principais são os seguintes:

- **Características Geométricas Principais**

- Comprimento entre perpendiculares (L)
- Boca (B)
- Calado (T)
- Pontal (D)
- Coeficiente de Bloco (Cb)
- Coeficiente Prismático (Cp)
- Coeficiente de Linha d'água (Cw)

As definições adotadas neste trabalho para os coeficientes de forma acima listados, são as seguintes:

$$C_b = \frac{\nabla}{L * B * T} \quad (2.1)$$

$$C_p = \frac{\nabla}{L * A_{\otimes}} \quad (2.2)$$

$$C_w = \frac{A_{WL}}{L_{WL} * B} \quad (2.3)$$

onde: ∇ = volume deslocado pelo casco no calado de projeto.

A_{\otimes} = área da seção mestra.

A_{WL} = área da linha d'água no calado de projeto.

L_{WL} = comprimento da linha d'água no calado de projeto.

Tendo em vista os objetivos deste trabalho, a descrição acima apresentada representa um conjunto de condições típicas encontradas na grande maioria dos projetos de navios convencionais. Condições específicas, presentes em diferentes projetos, podem eventualmente ser acrescentadas, caso a caso, à esta descrição, não invalidando, no entanto, o contexto mais geral apresentado.

Com base nesta descrição, o problema básico do projeto preliminar pode ser dividido em duas partes e definido da seguinte maneira:

- (1) determinar, segundo a função de mérito escolhida, o conjunto de dimensões principais, coeficientes de forma e os atributos associados, representando as especificações principais da embarcação, que melhor atende às metas e objetivos do projeto, dentre aqueles que satisfazem as restrições estabelecidas;
- (2) gerar um plano de linhas que represente a superfície do casco, com as dimensões principais e coeficientes de forma acima determinados.

Esta descrição define o problema básico do projeto preliminar, independentemente do processo ou método de solução adotado para resolvê-lo. A

definição é válida tanto para a aplicação do método tradicional como para a aplicação de outros métodos, tais como os de otimização.

Este problema apresenta as seguintes características fundamentais: a) é um problema de síntese e otimização; b) em geral admite um número muito grande, senão infinito, de soluções viáveis; c) é um problema que envolve objetivos, ou critérios, múltiplos e conflitantes.

São estas características intrínsecas do problema de projeto de uma embarcação as responsáveis pelas limitações do método tradicional de executar o projeto preliminar.

O método tradicional, que se mantém praticamente o mesmo pelos últimos 50 anos, é essencialmente um processo de síntese iterativo, que se inicia com a coleta de dados de navios similares já existentes e a organização dos mesmos em gráficos ou tabelas relacionando as diversas variáveis (características geométricas) entre si e com os atributos de interesse. Com base nas metas e objetivos estabelecidos obtêm-se, dos gráficos e tabelas, um conjunto de especificações (características geométricas) a partir do qual os atributos principais são avaliados de forma sequencial. Uma vez satisfeitas as restrições associadas a um atributo passa-se a avaliar o seguinte, alterando-se quando necessário alguma especificação, caso alguma restrição não esteja sendo satisfeita. O processo iterativo prossegue até que se obtenha um conjunto ou alguns conjuntos de especificações que representam as soluções viáveis do problema, das quais seleciona-se a mais "eficiente", segundo os critérios de mérito adotados. Um trabalho clássico que descreve este processo iterativo e apresenta, de forma detalhada, uma série de gráficos e formulações

relacionando características geométricas e atributos principais de embarcações já existentes, é o de Watson e Gilfillan [3].

Com base nas características geométricas principais desta solução, gera-se a descrição do casco da embarcação a partir de séries sistemáticas ou através de distorções controladas do plano de linhas ou da curva de áreas seccionais de navios semelhantes, conforme, por exemplo, os métodos apresentados em Schneekluth[16].

Definida a superfície do casco (plano de linhas) realiza-se, então, avaliações mais precisas dos atributos principais seguindo-se, por exemplo, a sequência clássica da espiral de projeto de Evans. Ao final destas avaliações, caso algumas das metas e objetivos não estejam sendo atendidas de acordo com as expectativas, altera-se as características geométricas principais, num processo cíclico até a obtenção de uma solução satisfatória.

O método é bastante trabalhoso e repetitivo, calcado essencialmente num processo de tentativa e erro, e requer uma grande dose de experiência para que se consiga gerar conjuntos satisfatórios de especificações. Ainda assim, não há como se garantir que o conjunto, ou conjuntos, de especificações gerado seja o melhor possível, ou seja, o método gera soluções aceitáveis mas não necessariamente a melhor ou as melhores. A hipótese básica do método é a de que projetos derivados de embarcações similares admitidas como "ótimas" não devem apresentar desvios importantes de desempenho e podem, assim, ser considerados eficientes.

O método tradicional é, portanto, muito mais um método de "satisfação" do que de "otimização" . Um solução ótima provavelmente só será obtida por acaso. Esta é a principal desvantagem ou limitação desta abordagem.

Para superar estas limitações e procurar tornar o projeto preliminar um efetivo processo de síntese e otimização, vêm sendo propostos, a partir dos últimos 30 anos, diversos procedimentos ou modelos que formulam o processo de projeto como um problema de otimização. Os modelos propostos variam tanto na forma de definir o problema como no método numérico empregado para resolvê-lo.

Nos primeiros modelos o problema de projeto é formulado de modo a envolver um único critério (meta ou objetivo) ou medida de mérito. Os métodos empregados são os de Programação Linear (ver Lyon [4] e Smith e Woodhead [5]) e de Programação Não-Linear (ver Nowacki et al. [6] e Keane et al.[7]).

O fato do problema do projeto preliminar envolver múltiplos critérios de decisão, objetivos conflitantes e restrições com diferentes exigências de satisfação, impulsionou mais recentemente a utilização dos métodos de tomada de decisão por múltiplos critérios ("Multiple Criteria Decision Making Methods" – MCDM) na formulação deste problema, em particular a técnica não-linear de Programação por Objetivos (Goal Programming). Com estes métodos, várias metas e objetivos podem ser considerados simultaneamente no processo de síntese e otimização da solução e tratados, na função de mérito, de acordo com a importância relativa de cada um. Exemplos da aplicação destes métodos ao projeto preliminar podem ser encontrados em Sen e Yang [1], Lyon e Mistree [8], Smith et al.[9], Mistree et al.[10], Sen [11], Ray e Sha [13] e Sen e Bari [14].

Em todos estes modelos, o conjunto das variáveis de decisão ou de projeto é normalmente formado pelas características geométricas principais, listadas anteriormente. Da mesma forma, o mérito das soluções é determinado a partir da

avaliação dos atributos e de acordo com o atendimento às metas e objetivos também já mencionados. No processo de busca da solução ótima, os atributos são avaliados através dos mesmos modelos e métodos aproximados empregados na abordagem tradicional, que formam o modelo matemático de síntese do problema de projeto. De acordo com a técnica de modelagem empregada, os atributos associados às metas e objetivos são então combinados de maneira adequada, para formar a função objetivo do modelo de otimização. Na maioria destes modelos, a solução "ótima" é aquela que minimiza a função objetivo. A descrição desta solução "ótima" normalmente fornece as características geométricas principais e a avaliação dos atributos e do mérito desta solução.

A vantagem fundamental destes modelos de otimização em relação ao método tradicional é a de que a solução obtida é uma solução ótima para os requisitos estabelecidos e não apenas uma adaptação de embarcações já existentes. Evidentemente que a "optimalidade" desta solução é limitada pelos modelos matemáticos de síntese utilizados, como de resto estão limitadas também as soluções providas pelo método tradicional. Além desta, há também as vantagens da enorme redução de tempo proporcionada por estes modelos na definição de soluções e da possibilidade de se conseguir investigar rapidamente alternativas de solução em função de alterações nos requisitos e na importância relativa entre eles.

Invariavelmente, no entanto, a definição da forma do casco (plano de linhas) não é diretamente incorporada nestes modelos de otimização.

Isto ocorre certamente porque a descrição matemática da superfície é extremamente complexa e exigiria a inclusão de um grande número de variáveis,

tornando inviável o processo numérico de otimização. No entanto, como a descrição completa de uma solução preliminar e a avaliação posterior, mais precisa, de alguns atributos tais como resistência estrutural, curvas hidrostáticas, curvas de estabilidade, curvas de comportamento no mar (RAO), etc. dependem do conhecimento da forma do casco, os modelos existentes acabam sugerindo a utilização do procedimento tradicional de geração do casco para complementação do projeto preliminar.

Nestes casos, no entanto, como a solução não deriva de embarcações já existentes, o emprego do procedimento tradicional pode se tornar mais trabalhoso do que efetivamente já é, além de, eventualmente, gerar superfícies com algumas propriedades geométricas que não correspondam, dentro de certas tolerâncias, àquelas definidas pelo processo de otimização, tais como: dimensões principais; coeficientes de forma; KB; LCB; volume deslocado; área da linha d'água de projeto; raio metacêntrico (BM); etc.

Além destas discrepâncias, que desconfiguram de certa forma a solução ótima, a adaptação ou distorção de cascos de navios não semelhantes pode fazer com que outras características geométricas importantes não tratadas diretamente no modelo de otimização, como ângulos de entrada e saída das linhas d'água, tamanhos dos corpos paralelo médio, de entrada e de saída, etc., assumam valores inadequados para as condições de operação e características gerais do navio em projeto.

Nestas condições, embora a solução inicialmente obtida seja ótima, o casco correspondente pode eventualmente não ter os atributos que correspondam aos desta solução e representar, portanto, a descrição de uma outra solução não-ótima

ou, eventualmente, não-viável.

Para resolver este problema de geração de forma propõe-se, neste trabalho, um novo modelo de otimização para realização do projeto preliminar que incorpore no processo a síntese matemática da geometria do casco correspondente à solução ótima obtida no processo inicial de otimização.

2.3 PROPOSTA DE MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA O PROJETO PRELIMINAR

Conforme já apresentado, os modelos usuais de otimização para o projeto preliminar contemplam apenas as dimensões principais e os coeficientes de forma como variáveis de projeto, adotando, na sequência, o método tradicional para geração do casco e demais especificações associadas à esta geometria (arranjo geral e arranjo estrutural preliminares). A figura 2.1 mostra um diagrama representativo do processo de projeto com o emprego destes modelos usuais de otimização.

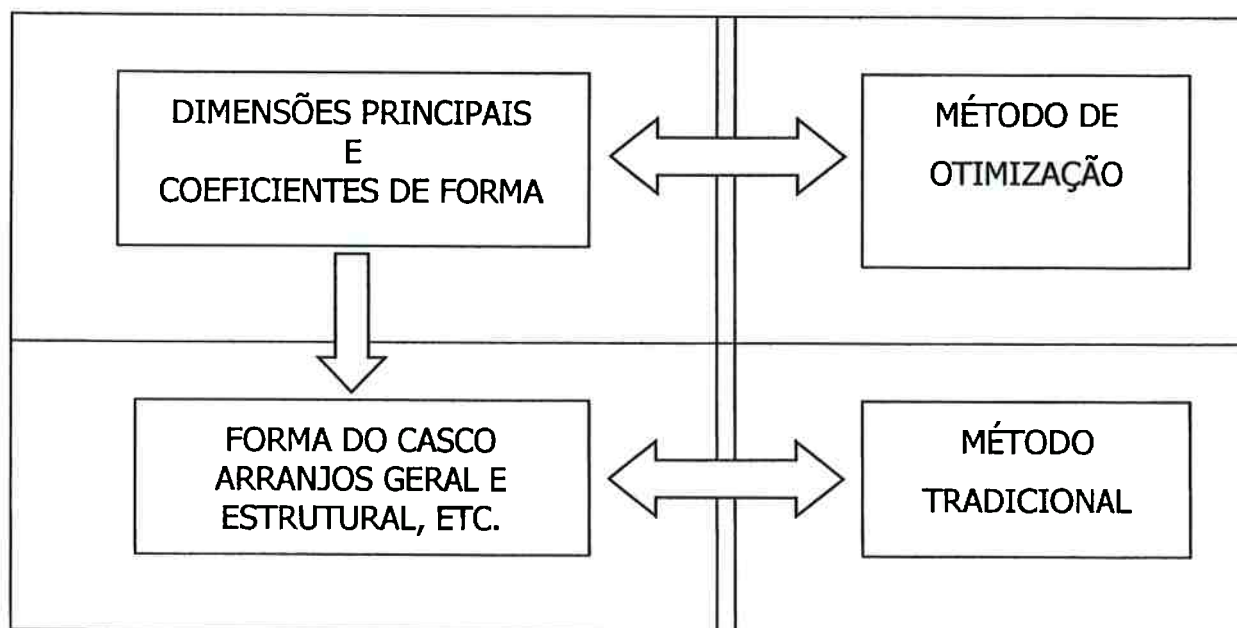


Figura 2.1 Projeto Preliminar com os Modelos Usuais de Otimização

Este procedimento é adotado nos modelos usuais devido essencialmente à complexidade matemática da representação da superfície do casco. A consideração adequada desta superfície introduz um grande número de variáveis de projeto tornando a solução numérica demorada, senão inviável, em termos de tempo de processamento. Por outro lado, o emprego do método tradicional para gerar o casco pode implicar nas imprecisões e problemas mencionados anteriormente.

Para eliminar estas dificuldades propõe-se neste trabalho um novo modelo de otimização para formulação do problema do projeto preliminar, onde a definição da forma do casco é incluída de forma hierárquica no processo de otimização para que este seja realizado em etapas e não seja penalizado por um número excessivo de variáveis.

A proposta básica do modelo consiste em distribuir as variáveis que representam as características principais do navio em diferentes níveis hierárquicos e estabelecer modelos de síntese independentes para otimizá-las de forma sequencial, de modo que a solução "ótima" obtida para as variáveis de um nível superior, representada por características e atributos, se transforme em metas ou objetivos para a otimização daquelas alocadas num nível hierárquico inferior. A subdivisão hierárquica proposta neste modelo é a seguinte :

Nível 1	Nível 2	Nível 3
Comprimento (L) Boca (B) Calado (T) Pontal (D) Cb Cp Cw	Forma do casco	Arranjo Geral Arranjo Estrutural

Esta subdivisão deriva do procedimento de projeto adotado no método tradicional e sua proposição foi motivada basicamente pela constatação empírica de que embora não se tenha como garantir que as soluções geradas pelo método tradicional sejam "ótimas" elas, invariavelmente, são soluções viáveis do ponto de vista das restrições. Em outras palavras, o método tradicional é capaz de identificar soluções dentro do espaço das soluções viáveis embora não tenha como garantir a identificação da solução "ótima" dentro deste espaço.

Neste trabalho, são propostos modelos independentes de otimização para as características alocadas nos níveis 1 e 2 da subdivisão adotada. Não serão contempladas as características do nível 3 que, portanto, devem continuar sendo determinadas através do método tradicional de projeto. A figura 2.2, a seguir, apresenta um diagrama do modelo geral de otimização proposto para execução do projeto preliminar de navios convencionais e não convencionais.

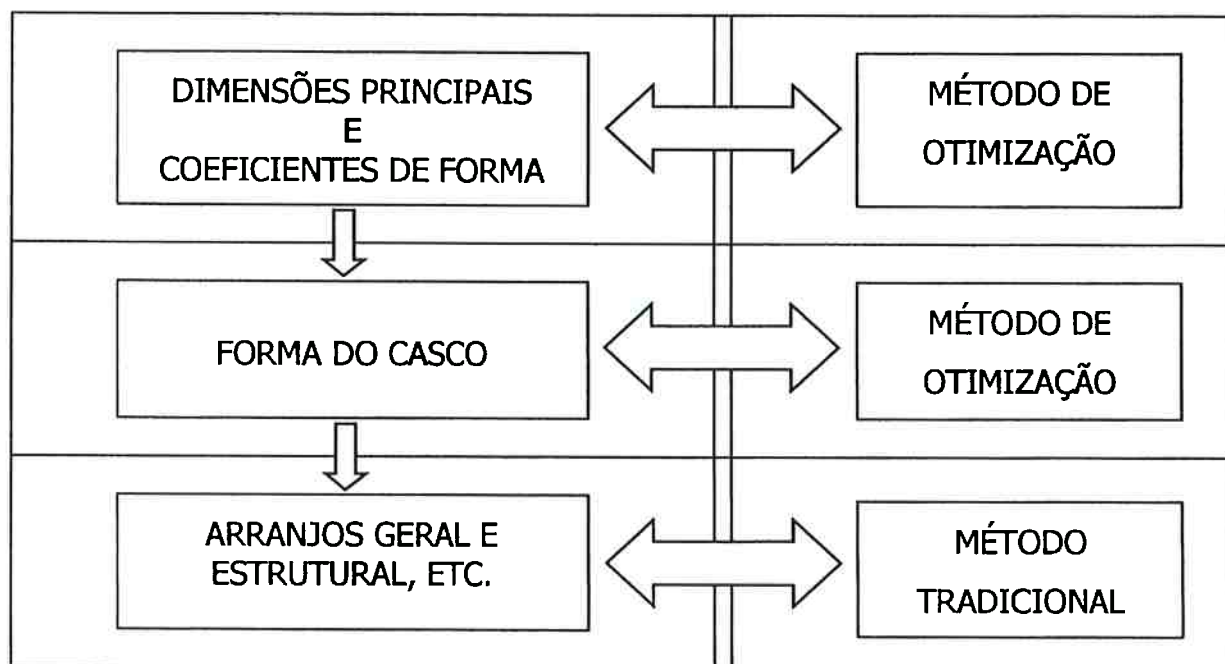


Figura 2.2 - Diagrama do Modelo de Otimização Proposto para o Projeto Preliminar

Os problemas de determinação das características do nível 1 e 2 têm a propriedade comum de envolver vários objetivos que, em geral, são conflitantes, ou seja, o atendimento a um deles deteriora o atendimento a outros. Para tratar desta questão, em ambos os casos, os problemas são formulados como problemas de otimização por múltiplos critérios, empregando-se a técnica de programação por objetivos para estruturar o modelo de otimização.

A condição essencial para formular um problema de projeto como um problema de otimização é, inicialmente, estruturá-lo de modo que o mesmo possa ser representado adequadamente através de modelos matemáticos de síntese. Em outras palavras, é necessário identificar as variáveis, definir as funções que permitem avaliar os atributos necessários e definir, também, as funções que permitem verificar o atendimento às metas, objetivos e restrições considerados. Esta representação ou modelo de síntese, para levar a resultados adequados, deve, tanto quanto possível, considerar todas as características ou especificações necessárias para uma avaliação razoável do mérito das soluções.

Os modelos de síntese quando associados a um determinado método de otimização e à uma determinada técnica numérica, formam o modelo de otimização que representa o problema de projeto.

Tendo em vista que, para as características geométricas principais, representadas pelas variáveis do nível 1, já existem diversos modelos de síntese e otimização propostos na literatura com eficiência e precisão comprovadas, adota-se, neste trabalho, para determinação destas características, o modelo de otimização proposto por Lyon e Mistree [8], que foi desenvolvido com base na técnica da

programação por objetivos e, para o qual, não só está publicada uma descrição razoavelmente detalhada como também uma série de exemplos de aplicação que podem servir de paradigma para comparação de resultados.

Para determinação da forma do casco, ou seja, das variáveis do nível 2, propõe-se neste trabalho, um modelo de síntese no qual a superfície do casco é representada pelo seu plano de linhas d'água e a definição desta superfície é obtida a partir da síntese deste plano. O modelo é baseado num procedimento que permite a definição matemática das linhas d'água a partir das características geométricas que representam a solução do problema de otimização das variáveis do nível 1, ou seja, das dimensões principais, dos coeficientes de forma e dos atributos geométricos associados.

Neste procedimento, o processo de síntese deste plano é dividido em cinco subproblemas independentes de síntese, envolvendo a definição da linha d'água de projeto; da distribuição das áreas das linhas d'água ao longo do calado; da seção mestra; do perfil longitudinal da embarcação e, finalmente, do próprio plano de linhas d'água. No modelo proposto, as linhas d'água são representadas através de polinômios e o processo de síntese, como um todo, visa determinar os coeficientes destes polinômios, de modo que o casco gerado possua as características e os atributos geométricos determinados no processo inicial de otimização.

Para resolver este problema de síntese, todos os subproblemas intermediários são formulados como problemas de otimização por múltiplos critérios, empregando-se a técnica da programação por objetivos. Na otimização de cada subproblema, as soluções ótimas fornecidas pelos processos anteriores de otimização se transformam

em metas e objetivos a serem atendidos, e a solução obtida é incorporada a estas metas e objetivos para o subproblema seguinte, culminando com a formação, também, de um processo geral hierárquico de otimização da forma do casco. Ao final do processo, obtém-se a definição da geometria do casco que satisfaz a condição de "optimalidade" definida no início do processo.

A solução numérica de todos estes processos de otimização é obtida através de um algoritmo de busca direta desenvolvido por Augusto [12]. Este algoritmo é uma evolução dos algoritmos "Simplex", de Nelder e Mead [33], e "Complex", de Box [34], para a busca do mínimo de uma função de múltiplas variáveis, contínuas ou discretas, submetida a restrições homogêneas ou não.

O método proposto por Augusto [12] se baseia no processo da busca sequencial do mínimo de uma função de mérito penalizada (SUMT, Sequential Unconstrained Minimization Technique), conforme o proposto por Fletcher [35], porém, incorpora no processo a alteração dinâmica do fator de penalização de forma a acelerar a convergência entre as seqüências. O algoritmo desenvolvido já se encontra elaborado para ser aplicado em qualquer tipo de problema de otimização. Maiores detalhes sobre os algoritmos, performances e suas aplicações podem ser vistos também nas referências [36] e [37].

O modelo de otimização das características geométricas principais e os diversos modelos intermediários, que compõem o modelo geral de otimização da forma do casco, foram integrados no sistema SHOPS para serem executados de forma sequencial. Ao final do processo geral de otimização obtém-se como resultado as características e atributos principais da embarcação, bem como a descrição

matemática do plano de linhas d'água do casco, que pode servir como dado de entrada para os mais diversos programas de análise utilizados na área de arquitetura naval.

Nos próximos capítulos apresenta-se uma descrição sucinta da técnica da programação por objetivos e do modelo de otimização das características geométricas principais e uma descrição detalhada do modelo de síntese e otimização da forma do casco. Ao final do trabalho, apresenta-se resultados da aplicação do sistema SHOPS e comparações com soluções apresentadas na literatura.

3. OTIMIZAÇÃO E PROGRAMAÇÃO POR OBJETIVOS APLICADOS AO PROJETO

Neste capítulo, apresenta-se, de forma sucinta, uma descrição das técnicas de otimização empregadas nos modelos de síntese e otimização propostos para o projeto preliminar de embarcações. Esta descrição segue a apresentação dos trabalhos de Sen [11], de Lyon e Mistree [8] e de Sen e Yang [1].

A formulação clássica de um problema de projeto como um problema de otimização pode ser representada da seguinte forma: definindo o vetor $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ como o vetor das variáveis de projeto (por exemplo, as características geométricas do casco), o problema posto é o de encontrar \mathbf{X} de tal forma que uma função objetivo ou de mérito $f(\mathbf{X})$ seja minimizada ou maximizada, sujeito a determinadas restrições $g_i(\mathbf{X})$, homogêneas ou não, representando limitações físicas ou de modelagem do problema. Como um problema de maximização pode ser transformado num de minimização pela troca de sinal da função objetivo, não há perda de generalidade na seguinte representação matemática do mesmo:

Achar

$$\min f(\mathbf{X})$$

sujeito a

$$g_i(\mathbf{X}) \geq 0 \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, k$$

$$g_i(\mathbf{X}) = 0 \quad ; \quad i = k + 1, k + 2, \dots, m$$

onde : min \equiv mínimo da função.

O objetivo do projeto é encontrar o vetor \mathbf{X} que minimize a função objetivo, dentro de um subespaço definido pelas restrições.

Diversas abordagens podem ser utilizadas para resolver este problema de otimização. Um dos métodos bastante empregados é o de transformar o problema

de otimização com restrições em um problema sem restrições através do uso de funções de penalização. Diversos tipos de função de penalização já foram propostos, envolvendo penalização interna, externa ou uma combinação de ambas. Empregando uma das formas mais simples desta técnica, de penalização interna, apenas para efeito de representação, o problema de otimização passa a ser o seguinte:

Achar

$$\min f_p(\mathbf{X}, r) = f(\mathbf{X}) + r \cdot \sum_{i=1}^m \frac{1}{g_i(\mathbf{X})} \quad ; \quad r \geq 0$$

onde r é o fator de penalização e as restrições homogêneas ou são utilizadas para eliminação de algumas variáveis ou são transformadas em restrições não-homogêneas através do emprego de tolerâncias ($|g(\mathbf{X})| \leq \varepsilon$).

Se inicialmente \mathbf{X} é escolhido dentro de uma região de soluções viáveis, ou seja, onde todas as restrições são satisfeitas, então necessariamente tem-se:

$$g_i(\mathbf{X}) \geq 0 \quad ; \quad i=1, \dots, m$$

Neste caso

$$\sum_{i=1}^m \frac{1}{g_i(\mathbf{X})}$$

será um número positivo, com valor tanto maior quanto mais próximo dos limites das restrições estiver o vetor \mathbf{X} . Portanto, o termo

$$r \cdot \sum_{i=1}^m \frac{1}{g_i(\mathbf{X})}$$

age como uma função de penalização garantindo que, num processo de busca, todas as soluções, representadas por diferentes vetores \mathbf{X} , são inicialmente mantidas afastadas das fronteiras das restrições. Reduzindo-se progressivamente o valor do fator de penalização r , a medida em que a busca é realizada, aproxima-se cada vez

mais das fronteiras das restrições e reduz-se o valor de $f_p(\mathbf{X},r)$, até que o valor de r seja tão pequeno que o valor mínimo de $f_p(\mathbf{X},r)$ torna-se virtualmente o valor mínimo de $f(\mathbf{X})$. O vetor \mathbf{X} correspondente a este ponto representa a solução ótima do projeto.

Algumas características importantes desta abordagem são as seguintes:

- Todas as restrições são rígidas e, portanto, de igual importância. Não há como se considerar uma maior ou menor flexibilidade no atendimento de restrições;
- Todas as restrições devem ser consistentes, ou seja, admite-se sempre a existência de uma região viável de soluções. Não é possível se considerar a existência de objetivos múltiplos e conflitantes.

Estas características, evidentemente, limitam a aplicação desta abordagem aos problemas de projeto engenharia que, invariavelmente, envolvem objetivos múltiplos e conflitantes e que tornam a solução essencialmente uma solução de compromisso, onde tais objetivos são mais ou menos atendidos de acordo com a importância relativa dada a cada um.

Para contornar tais limitações desenvolveram-se algumas generalizações da abordagem clássica do problema de otimização que possibilitam a consideração de objetivos múltiplos e conflitantes. Uma destas abordagens é a Programação por Objetivos ("Goal Programming") que é um método de otimização cuja formulação orienta a busca de soluções para que determinadas metas predefinidas sejam atingidas. Estas metas estão associadas aos requisitos especificados para avaliar o mérito das soluções. Uma vez fixadas metas representando os requisitos de projeto, o propósito da programação por objetivos é o de encontrar soluções cujo desempenho esteja o mais próximo possível das metas fixadas, ou seja, o propósito

é minimizar os desvios ou distâncias das metas. Neste processo algumas das metas, ou mesmo todas elas, podem eventualmente não ser atingidas. Os objetivos clássicos de minimização (ou maximização) podem ser introduzidos neste modelo definindo-se valores de metas inferiores ao menor valor que se poderia esperar para o atributo avaliado.

As soluções de projeto produzidas pelo uso deste tipo de técnica não conseguem sempre satisfazer todos os objetivos conflitantes e, portanto, elas são essencialmente soluções de compromisso, nas quais os desvios ou distâncias para as metas mais importantes são menores do que para as menos importantes. É evidente, portanto, que estas soluções não têm o significado de "ótimo" segundo o uso convencional deste termo.

Nesta abordagem, a representação matemática das metas e objetivos é a seguinte:

$$f_j(\mathbf{X})/b_j + d_j^- - d_j^+ = 1 \quad (3.1)$$

onde: $f_j(\mathbf{X})$ = objetivo j , em função das variáveis de projeto X , com nível de aspiração ou meta b_j .

\mathbf{X} = vetor das variáveis de projeto.

d_j^-, d_j^+ = variáveis de desvio representando, respectivamente, sub ou sobre atendimento à meta b_j , e com valores sempre ≥ 0 .

b_j = meta ou valor de aspiração do objetivo j .

Assim, o problema de otimização passa a ter a seguinte constituição:

- Se $f_j(\mathbf{X})$ precisa ser $\geq b_j$, então d_j^- é minimizado;
- Se $f_j(\mathbf{X})$ precisa ser $\leq b_j$, então d_j^+ é minimizado;
- Se $f_j(\mathbf{X})$ precisa ser $= b_j$, então ambos d_j^- e d_j^+ são minimizados;
- $d_j^- \cdot d_j^+ = 0$, já que não pode haver simultaneamente sub e sobre atendimento da meta.

Considerando-se agora que com esta nova formulação as metas e objetivos (requisitos) passam a definir um subespaço de aspiração que deve ser atingido tanto quanto possível e que, as restrições definem um subespaço dentro do qual as soluções devem necessariamente estar inseridas para satisfazer requisitos de viabilidade, o problema de síntese e otimização do projeto pode ser expresso como um problema de programação por objetivos generalizado, no qual a soma ponderada das variáveis de desvio deve ser minimizada, considerando-se a presença de metas e restrições. A representação matemática deste problema é a seguinte:

$$\min Z = \sum_{j=1}^N P_j \cdot (w_j^- \cdot d_j^- + w_j^+ \cdot d_j^+) \quad (3.2)$$

sujeito a :

$$f_j(\mathbf{X})/b_j + d_j^- - d_j^+ = 1 ; \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (3.3)$$

$$g_i(\mathbf{X}) \geq 0 ; \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (3.4)$$

$$g_i(\mathbf{X}) = 0 ; \quad i = k + 1, k + 2, \dots, m \quad (3.5)$$

onde : w_j^-, w_j^+ = pesos associados aos desvios da meta j ;

P_j = prioridade associada à meta j .

O problema de projeto passa a ser então o de encontrar o vetor \mathbf{X} das variáveis de projeto tal que as restrições $g_i(\mathbf{X})$ sejam satisfeitas e os objetivos $f_j(\mathbf{X})$ alcançados dentro da melhor aproximação possível. As restrições devem, evidentemente, ser consistentes pois, de outro modo, não haverá solução para o problema. As metas, no entanto, não precisam ser e, em geral, não serão consistentes.

Existem duas abordagens típicas para definir a função objetivo Z em termos de valores de prioridades e pesos:

- se todos os $P_j = 1$ e se $\sum_{j=1}^N (w_j^- + w_j^+) = 1$ a função objetivo assume a forma chamada de "Arquimediana" ("Arquimedean") ;
- se todos os pesos $w_j^- = w_j^+ = 1$ e se $P_1 \gg P_2 \gg P_3 \gg \dots \gg P_N$ a função objetivo assume a forma chamada de "Preeminente" ("Pre-emptive").

A forma Arquimediana é utilizada quando se tem bem definida a importância relativa entre as metas e é de interesse que haja interação entre elas. A forma Preeminente é empregada quando se tem apenas a ordem de importância das metas e se deseja que o atendimento às metas em um determinado nível de prioridade não afete o atendimento a metas em níveis superiores. Em geral, o mesmo problema abordado das duas formas não apresentará a mesma solução e a variação de valores de peso ou prioridades levará, também, a soluções distintas. Esta é a característica de maior interesse na formulação do problema através da técnica de programação por objetivos pois, permite uma maior liberdade de geração e comparação de soluções do que os métodos tradicionais de otimização, embora também introduza dificuldades associadas à definição dos pesos e prioridades.

A solução de problemas através desta técnica requer inicialmente o estabelecimento de um modelo matemático de síntese onde sejam definidos: as variáveis de projeto; os requisitos e restrições de projeto; e as funções que permitem a avaliação destes requisitos e restrições. A partir deste modelo formula-se o problema de otimização empregando-se a técnica da programação por objetivos. A estrutura do modelo de otimização resultante é composta dos seguintes itens:

- **Dados**

- Parâmetros fixos de projeto, dados pelo modelo de síntese.
- Requisitos (metas) de projeto (nível de aspiração b_j).
- Pesos e prioridades associados ao requisitos ($P_j ; w_j$).

- **Variáveis**

- Variáveis de projeto, dadas pelo modelo de síntese.
- Variáveis de desvio.

- **Restrições Implícitas**

- Restrições de projeto em termos das variáveis de projeto.

- **Restrições Explícitas (Limites)**

- Nas variáveis de projeto.
- Nas variáveis de desvio.

- **Metas**

- Em termos das variáveis de projeto e de desvio:

$$f_j(X)/b_j + d_j^- - d_j^+ = 1; j=1,..N$$

- **Função Objetivo a ser Minimizada**

- Em termos das variáveis de desvio e dos pesos e prioridades.

$$Z = \sum_{j=1}^N P_j \cdot (w_j^- \cdot d_j^- + w_j^+ \cdot d_j^+)$$

Com base nesta estrutura, o processo de solução deste problema de otimização pode ser resumido da seguinte forma: determinar os valores das variáveis de projeto e das variáveis de desvio que representam uma solução que satisfaz as restrições, atende tanto quanto possível as metas estabelecidas e minimiza a função objetivo Z.

Diversas técnicas numéricas, ou algoritmos, podem ser empregados para a solução do problema de otimização formulado através do método da programação por objetivos. Keane [7] apresenta uma lista não exaustiva daquelas, eventualmente, já empregadas em projeto de embarcações. Para este trabalho, conforme já comentado no capítulo 2, utilizou-se o método de busca direta desenvolvido por Augusto [12].

4. OTIMIZAÇÃO DAS DIMENSÕES E COEFICIENTES DE FORMA

Neste capítulo apresenta-se os modelos de síntese e otimização das dimensões principais e coeficientes de forma da embarcação (variáveis do nível 1 definidas no capítulo 2). Estes modelos são aqueles propostos por Lyon e Mistree [8] para solucionar a primeira parte do problema básico do projeto preliminar que é a de determinar o conjunto das características geométricas principais e atributos associados, que representa a embarcação que melhor atende às metas e objetivos e satisfaz as restrições estabelecidas nos requisitos do armador. Para este problema inicial de síntese as metas, os objetivos e as restrições consideradas são os seguintes:

- **Metas e Objetivos (Requisitos do Armador)**
 - Atender a capacidade de carga requerida: DWT_{cr} .
 - Atender a velocidade de serviço requerida: V_{kr} .
 - Atender a autonomia requerida: R_{gr} .
 - Atender a altura metacêntrica requerida: GMr .
 - Minimizar o deslocamento do navio: Δ .
 - Minimizar a potência instalada: P_s .

- **Restrições (Requisitos do Armador)**
 - Nos valores máximos das dimensões principais, para atender a limitações de portos, canais e rotas de navegação: L_{max} ; B_{max} ; T_{max} .
 - Na altura metacêntrica, para atender ao valor mínimo exigido em normas e regulamentos internacionais: GM_{min}
 - Na borda livre, para atender aos valores mínimos exigidos em normas e regulamentos internacionais: BL_{min} .
 - Nos períodos naturais de heave, pitch e roll, tendo em vista o período médio de encontro das ondas: t_{ew} .

Para solucionar este problema Lyon e Mistree [8] propõem um modelo matemático de síntese a partir do qual pode-se avaliar os atributos envolvidos nas metas, objetivos e restrições considerados no problema inicial de projeto, em função das dimensões principais e coeficientes de forma do casco. Este modelo de síntese foi construído com base nos mesmos métodos e procedimentos aproximados empregados no método tradicional de projeto para avaliar preliminarmente os atributos de embarcações convencionais. Tais métodos e procedimentos estão largamente difundidos na literatura de projeto naval e suas precisão e validade são consideradas adequadas para as fases iniciais de projeto.

A grande vantagem em se utilizar métodos e procedimentos aproximados simples, mas suficientemente precisos, é que o processo de otimização torna-se bastante rápido e, portanto, viabiliza a investigação de diferentes alternativas de solução para diferentes metas e prioridades consideradas na função objetivo.

4.1 MODELO DE SÍNTESE DAS CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS

O modelo de síntese tem por objetivo estabelecer as relações necessárias para se determinar os principais atributos da embarcação em função das características que representam as variáveis de projeto. Para a primeira parte do problema do projeto preliminar, estas variáveis são as seguintes:

- Variáveis de projeto
 - Comprimento: L
 - Boca : B
 - Calado: T
 - Pontal: D
 - Coeficiente de bloco: C_b
 - Coeficiente prismático: C_p
 - Coeficiente de linha d'água: C_w

Os atributos que devem ser determinados a partir destas variáveis são aqueles que compõem as especificações principais que descrevem a solução preliminar de projeto. Em particular, para se julgar o mérito das soluções, deve-se determinar os seguintes atributos envolvidos nos requisitos e restrições anteriormente estabelecidos:

- Atributos:

- deslocamento do navio: Δ ;
- potência instalada: P_S ;
- capacidade de carga: DWT_C ;
- altura metacêntrica: GM ;
- velocidade de serviço: V_k ;
- autonomia: R_g ;
- borda livre: BL ;
- período natural de heave: t_{nh} ;
- período natural de pitch: t_{np} ;
- período natural de roll: t_{nr} .

Para simplificar o problema de síntese, o modelo considera que a velocidade de serviço e a autonomia sejam parâmetros fixos, com valores iguais aos valores estabelecidos pelos requisitos, de modo que as metas associadas a estes atributos sejam automaticamente atendidas. Em termos matemáticos, esta simplificação é representada da seguinte forma:

$$V_k = V_{kr} \quad (4.1)$$

$$R_g = R_{gr} \quad (4.2)$$

Os demais atributos são determinados de acordo com os métodos e procedimentos definidos a seguir. Conforme já comentado, estes são os mesmos

métodos descritos em Lyon e Mistree [8] ou, quando não explicitados, em referências citadas por estes autores, para que se possa, posteriormente, comparar e validar adequadamente os resultados. Outros métodos podem eventualmente ser introduzidos no modelo de síntese, desde que permitam a avaliação dos atributos a partir do conjunto de variáveis de projeto definido anteriormente.

4.1.1 - Deslocamento (Δ)

$$\Delta = C_b * L * B * T * \gamma_a \quad (4.3)$$

onde : γ_a = peso específico da água (ton/m³)

4.1.2 - Potência Instalada (P_s)

O cálculo da potência instalada deve ser realizado através de um dos seguintes métodos aproximados, de acordo as características da embarcação:

(1) Método de Silverleaf e Dawson, sistematizado em Kupras [17] e em Lyon e Mistree [8]

• Validade do método:

- $6,4 \leq L/B \leq 7,7$
- $15 \leq L/T \leq 19$
- $0,5 \leq C_b \leq 0,85$
- $120 \text{ m} \leq L \leq 360 \text{ m}$
- $V_k \leq 30 \text{ nós}$
- Rotação do hélice (N): $85 \text{ rpm} \leq N \leq 185 \text{ rpm}$
- Potência instalada (P_s): $P_s \leq 100.000 \text{ hp}$

- Potência do motor (P_S) na velocidade V_k , em condições de serviço:

$$P_S = \frac{P_D}{(1 - f_S) * \eta_M} \text{ (hp)} \quad (4.4)$$

onde :

- f_S = fator de serviço
- $\eta_M = 0,98$: eficiência mecânica (assumida)
- P_D = potência fornecida ao hélice na velocidade V_k , em condições de prova de mar.

$$P_D = P_{DB} * \left(\frac{V_k}{V_B} \right)^{4,167 * \left(\frac{V_k}{V_B} \right)}$$

- V_B = Velocidade limite

$$V_B = (1,7 - 1,4 * C_b) * \sqrt{L / 0,3048}$$

- P_{DB} = potência fornecida na velocidade limite V_B .

$$P_{DB} = \left(\frac{76}{75} \right) * \left(\frac{0,71}{427,1} \right) * \left(\frac{Chi}{\eta_D} \right) * (1,0137 * L * B * T * C_b)^{\frac{2}{3}} * V_B^3$$

- Chi = fator de correlação modelo-escala real.

para $L / 0,3048 > 1000$:

$$Chi = 0,85$$

para $L / 0,3048 \leq 1000$:

$$Chi = 0,85 + 0,00185 * \left[\frac{(1000 - L * 3,28)}{100} \right]^{2,5}$$

- η_D = eficiência quase-propulsiva.

$$\eta_D = \eta_0 * \eta_H * \eta_R$$

- η_R = eficiência relativa rotativa.

$$\eta_R = 1,01 \text{ (assumida)}$$

- η_H = eficiência do casco:

para $C_b < 0.8$:

$$\eta_H = 0,385 + 0,7 * C_b + 0,11 * \left(\frac{B}{T}\right)$$

para $C_b \geq 0,8$:

$$\eta_H = 0,945 + 0,11 * \left(\frac{B}{T}\right) + 20 * (C_b - 0,8) * \left[0,595 - 0,11 * \left(\frac{B}{T}\right)\right]$$

– η_0 = eficiência do hélice em água aberta.

$$\eta_0 = 1,3 - 0,55 * C_b - 0,00267 * N$$

– N = rotação do hélice.

$$N = 100 \text{ rpm (assumida)}$$

(2) Método de Watson [18], sistematizado em Lyon e Mistree [8].

• Validade do método:

– Navios mercantes convencionais.

• Potência do motor (P_s) na velocidade V_k , em condições de serviço:

$$P_s = \frac{0,889 * \Delta^{\frac{2}{3}} * V_k^3 * \left[40 - \left(\frac{L}{61}\right) + 400 * (k - 1)^2 - 12 * C_b\right]}{(1 - f_s) * (15000 - 1,81 * N * \sqrt{L})} \text{ (hp)} \quad (4.5)$$

onde :

$$- k = C_b + \frac{V_k}{2 * \sqrt{3,28 * L}} ; k \geq 1,0$$

– $N = 100 \text{ rpm (assumida)}$

4.1.3 – Capacidade de Carga (DWTc)

$$DWTc = \Delta - W_s - W_M - W_O - W_f - f_p \quad (4.6)$$

onde:

– W_s = peso da estrutura (ton).

– W_M = peso da praça de máquinas (ton).

– W_O = peso de equipamentos, acessórios e subsistemas (ton).

– W_f = peso de combustível (ton).

– $f_p = 0,02 * (W_s + W_M + W_O)$ (margem de projeto para o deslocamento leve)

4.1.4 – Pesos e Centros

(1) Peso (W_s) e Centro de Gravidade (Kg_s) da Estrutura.

A estimativa do peso de aço da estrutura baseia-se no método proposto por Watson e Gilfillan [3], e a altura do centro de gravidade da estrutura baseia-se na aproximação fornecida em Kupras [17].

- Peso da estrutura W_s (ton)

$$W_s = W_{s7} * [1 + 0,5 * (C_b^1 - 0,7)] \quad (4.7)$$

onde:

- $C_b^1 = C_b + (1 - C_b) * \frac{0,8 * D - T}{3 * T}$
- $W_{s7} = K * E^{1,36}$
- $E = L * (B + T) + 0,85 * L * (D - T) + 250$
- K é um coeficiente que varia com o tipo de navio e seu valor médio encontra-se discriminado na tabela abaixo.

Tipo de navio	K
Tanque	0,0320
Produtos Químicos	0,0365
Graneleiro	0,0305
Container	0,0365
Carga Geral	0,0330
Carga Refrigerada	0,0335
Cabotagem	0,0295

Tabela 4.1 – Coeficiente para Cálculo de Peso Estrutural

- Altura do centro de gravidade Kg_S (m)

- para $L > 120$ m :

$$Kg_S = 0,01 * D * \left[46,6 + 0,135 * (0,81 - C_b) * \left(\frac{L}{D} \right)^2 \right] + 0,008 * D * \left(\frac{L}{B} - 6,5 \right) \quad (4.8)$$

- para $L \leq 120$ m

$$Kg_S = 0,01 * D * \left[46,6 + 0,135 * (0,81 - C_b) * \left(\frac{L}{D} \right)^2 \right] + 0,008 * D * \left(\frac{L}{B} - 6,5 \right) + 0,001 * D * \left[1 - \frac{L - 60}{60} \right] \quad (4.9)$$

(2) Peso (W_M) e Centro de Gravidade (Kg_M) da Praça de Máquinas.

- Peso da praça de máquinas W_M (ton)

- para motores diesel [3]

$$W_M = 9,38 * \left(\frac{P_S}{R_M} \right)^{0,84} + 0,56 * (P_S)^{0,7} \quad (4.10)$$

onde : $R_M = 100$ rpm (rotação adotada para o motor)

- para turbinas a vapor [8]

$$W_M = 8,8 * (P_S)^{0,5} \quad (4.11)$$

- Altura do centro de gravidade Kg_M (m) [8]

$$Kg_M = h_{DB} + 0,35 * (D - h_{DB}) \quad (4.12)$$

onde :

- h_{DB} : altura do duplo fundo

$$h_{DB} = 0,032 * B + 0,19 * \sqrt{T}$$

(3) Peso (W_0) e Centro de Gravidade (Kg_0) de Equipamentos e Acessórios.

- Peso de equipamentos e acessórios W_0 (ton) [3]

$$W_0 = 0,20 * L * B \quad (4.13)$$

- Altura do centro de gravidade Kg_0 (m) [17]

- Para $L \leq 125$ m

$$Kg_0 = D + 1,25 \quad (4.14)$$

- Para $125 \text{ m} \leq L < 250$ m

$$Kg_0 = D + 1,25 + 0,01 * (L - 125) \quad (4.15)$$

- Para $L \geq 250$ m

$$Kg_0 = D + 2,5 \quad (4.16)$$

(4) Peso (W_f) e Centro de Gravidade (Kg_f) do Combustível [8]

- Peso do combustível W_f (ton)

$$W_f = \frac{1,016 * Rg * P_s * F_R}{1000 * V_k} \quad (4.17)$$

$$\text{onde: } F_R = \frac{0,2265 * P_s}{P_s - 855}$$

- Altura do centro de gravidade Kg_f (m)

$$Kg_f = 0,67 * h_{DB} \quad (4.18)$$

(5) Centro de Gravidade da Carga Kg_c (m) [8]

- Altura do centro de gravidade Kg_c (m)

$$Kg_c = \frac{D}{2} + h_{DB} \quad (4.19)$$

4.1.5 – Altura Metacêntrica (GM)

$$GM = KB - KG + BM \quad (4.20)$$

onde:

- KB = altura do centro de carena.
- KG = altura do centro de gravidade da embarcação.
- BM = raio metacêntrico.

(1) Altura do Centro de Carena KB (m)

- Para $C_{\infty} < 0,90$ [8]

$$KB = \frac{T}{3} * \left(\frac{5}{2} - \frac{Cb}{Cw} \right) \quad (4.21)$$

- Para $C_{\infty} \geq 0,90$ [8]

$$KB = T * \frac{Cw}{Cb + Cw} \quad (4.22)$$

onde: C_{∞} = coeficiente da seção mestra

$$C_{\infty} = \frac{Cb}{Cp} \quad (4.23)$$

(2) Altura do Centro de Gravidade da Embarcação KG (m) [8]

$$KG = \frac{(W_S * Kg_S + W_M * Kg_M + W_O * Kg_O) * 1,02 + W_f * Kg_f + DWTc * Kg_c}{\Delta} \quad (4.24)$$

(3) Raio Metacêntrico BM (m)

$$BM = \frac{I_{WL}}{\nabla} \quad (4.25)$$

onde :

- ∇ = volume deslocado pela embarcação.
- I_{WL} = momento de inércia transversal da linha d'água de projeto.

- Volume deslocado pela embarcação ∇ (m³)

$$\nabla = C_b * L * B * T \quad (4.26)$$

- Momento de inércia transversal da linha d'água I_{WL} (m⁴) [15]

$$I_{WL} = C_{IT} * B^3 * L_{WL} \quad (4.27)$$

onde :

- C_{IT} = coeficiente de momento de inércia.
- L_{WL} = comprimento da linha d'água de projeto.

- Coeficiente de momento de inércia C_{IT} [15]

$$C_{IT} = 0,073 * C_w \quad (4.28)$$

- Comprimento da linha d'água de projeto L_{WL} (m)

A determinação do comprimento da linha d'água de projeto é fundamental tanto para a avaliação do momento de inércia transversal da área desta linha d'água, que é um dos atributos necessários para a avaliação preliminar da estabilidade estática, quanto para a definição da forma do casco. A determinação deste comprimento está associada à definição que se adota para o comprimento entre perpendiculares (L). No caso deste trabalho, adotou-se a definição convencional para navios mercantes dotados de leme compensado, ou seja, o ponto que define o comprimento entre perpendiculares é ponto de cruzamento do eixo do leme com a linha d'água de projeto. A figura 4.1 a seguir ilustra esta definição.

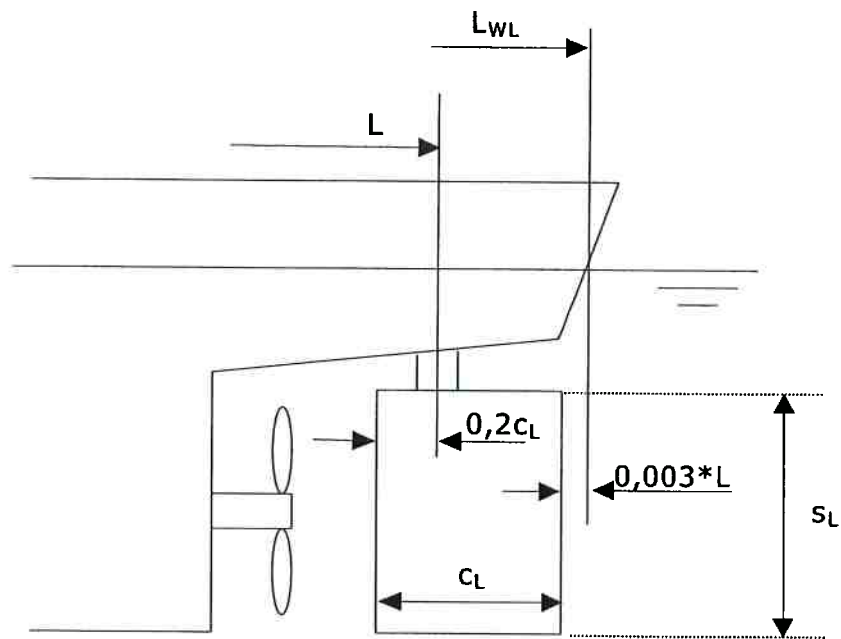


Figura 4.1 – Posição do Leme e Comprimento entre Perpendiculares

Com base nesta definição, a diferença entre os comprimentos da linha d'água de projeto e o comprimento entre perpendiculares é função do tamanho e posição do leme. Assim, conhecido o comprimento entre perpendiculares, resta determinar as características básicas do leme para se obter o comprimento da linha d'água, conforme ilustra a figura 4.1. Neste trabalho adotou-se as formulações e folgas sugeridas nas referências [19] e [20] para a estimativa preliminar das características do leme. A partir destas estimativas e do comprimento entre perpendiculares determina-se o comprimento da linha d'água, conforme descrito a seguir.

– Características do leme do navio

$$A_L = \frac{T * L}{100} * \left[1 + 25 * \left(\frac{B}{L} \right)^2 \right] \quad (4.29)$$

$$s_L = 0,7 * T \quad (4.30)$$

$$c_L = \frac{A_L}{s_L} \quad (4.31)$$

onde: A_L : área do leme.

s_L : envergadura do leme.

c_L : corda do leme.

Para determinação da posição do leme (ver figura 4.1), as seguintes definições foram adotadas com base nas folgas e posições sugeridas em [19] e [20]:

- distância do bordo de ataque do leme ao eixo : $0,2 * c_L$
- distância (folga) entre o bordo de fuga do leme e a extremidade a ré da linha d'água de projeto: $0,003 * L$
- Comprimento da linha d'água (L_{WL})

Com base nas características do leme acima definidas, e com o auxílio da figura 4.1, o comprimento da linha d'água de projeto pode ser estimado como segue:

$$L_{WL} = L + 0,8 * c_L + 0,003 * L \quad (4.32)$$

4.1.6 – Borda Livre (BL)

$$BL = D - T \quad (4.33)$$

4.1.7 – Comportamento no Mar

(1) Período Natural de Heave t_{nh} (seg) [8].

$$t_{nh} = 1,108 * \left[\frac{T * C_b * \left(\frac{B}{3 * T} + 1,2 \right)}{0,3048 * C_w} \right]^{1/2} \quad (4.34)$$

(2) Período Natural de Pitch t_{np} (seg) [8]

$$t_{np} = \frac{0,98 * T * Cb}{0,3048 * CW} * \left(0,6 + \frac{0,36 * B}{T} \right)^{1/2} \quad (4.35)$$

(3) Período Natural de Roll t_{nr} (seg) [8]

$$t_{nr} = \frac{0,44 * B}{\sqrt{0,3048 * GM}} \quad (4.36)$$

(4) Período Médio de Encontro das Ondas t_{ew} (seg) [8]

$$t_{ew} = \frac{\ell_w}{V_w + V_s * \cos \alpha_{pw}} \quad (4.37)$$

onde :

– ℓ_w = comprimento da onda (m)

$$\ell_w = \frac{g}{2 * \pi} * (t_w)^2$$

– V_w = velocidade da onda (m/seg)

$$V_w = \frac{\ell_w}{t_w}$$

– V_s = velocidade do navio em m/seg.

– α_{pw} = ângulo de aproamento do navio em relação à direção de incidência das ondas (graus)

$$\alpha_{pw} = 0^\circ \text{ (adotado)}$$

– t_w = período médio do mar (seg).

$$t_w = 8,0 \text{ seg (adotado)}$$

4.1.8 – Atributos Complementares

Os seguintes atributos complementares da embarcação são também avaliados no modelo de síntese:

(1) Posição Longitudinal do Centro de Carena LCB [21]

$$LCB = \frac{L_{WL}}{100} * (43,6 * Fn + 39,15) \text{ (m)} \quad (4.38)$$

onde:

- LCB = posição longitudinal do centro de carena, medida a partir da proa da embarcação.
- Fn = número de Froude

$$Fn = \frac{V_s}{\sqrt{g * L}}$$

V_s = velocidade do navio em m/seg.

Alternativamente :

$$LCB_{\otimes} = 50 - \frac{L_{WL}}{L} * (43,6 * Fn + 39,15) \text{ (%) } \quad (4.39)$$

onde:

- LCB_{\otimes} = posição longitudinal do centro de carena, medida como porcentagem do comprimento entre perpendiculares, a partir da seção situada a meio comprimento entre perpendiculares.

(2) Área da Linha d'Água de Projeto A_{WL} (m^2)

$$A_{WL} = C_W * L_{WL} * B \quad (4.40)$$

(3) Área da Seção Mestra A_{\otimes} (m^2)

$$A_{\otimes} = C_{\otimes} * B * T \quad (4.41)$$

(4) Deslocamento Leve $\Delta \ell$ (ton)

$$\Delta \ell = (W_s + W_M + W_O) * 1.02 \quad (4.42)$$

4.1.9 – Resultados do Modelo de Síntese

Os resultados, em termos de características e atributos, fornecidos pelo modelo de síntese descrito acima, são os seguintes:

- Características Principais
 - L : comprimento entre perpendiculares (m)
 - B : boca (m)
 - T : calado (m)
 - D : pontal (m)
 - C_b : coeficiente de bloco
 - C_p : coeficiente prismático
 - C_w : coeficiente de linha d'água

- Atributos Principais
 - Δ : deslocamento do navio (ton)
 - P_s : potência instalada (hp)
 - DWTc : capacidade de carga (ton)
 - GM : altura metacêntrica (m)
 - V_k : velocidade de serviço (nós)
 - R_g : autonomia (milhas náuticas)
 - BL : borda livre (m)
 - t_{nh} : período natural de heave (seg)
 - t_{np} : período natural de pitch (seg)
 - t_{nr} : período natural de roll (seg)
 - W_s : peso da estrutura (ton)
 - W_M : peso da praça de máquinas (ton)
 - W_O : peso de equipamentos, acessórios e subsistemas (ton)
 - W_f : peso de combustível (ton)
 - KB : altura do centro de carena (m)
 - KG : altura do centro de gravidade da embarcação (m)

- C_{\otimes} : coeficiente da seção mestra
- BM : raio metacêntrico (m)
- ∇ : volume deslocado pela embarcação (m^3)
- I_{WL} : momento de inércia transversal da linha d'água de projeto (m^4)
- L_{WL} : comprimento da linha d'água de projeto (m)
- A_L : área do leme (m^2)
- s_L : envergadura do leme (m)
- c_L : corda do leme (m)
- t_{ew} : período médio de encontro das ondas (seg)
- LCB : posição longitudinal do centro de carena em relação à proa (m)
- LCB_{\otimes} : posição longitudinal do centro de carena a partir da seção mestra (%)
- Fn : número de Froude
- A_{WL} : área da linha d'água de projeto (m^2)
- A_{\otimes} : área da seção mestra (m^2)
- Δl : deslocamento leve (ton)

Um dado conjunto formado pelas características e atributos principais acima listados, representa uma solução do problema inicial do projeto preliminar de uma embarcação. Os atributos desta solução são calculados em função das características principais, conforme o modelo de síntese adotado. O modelo de síntese, como já discutido, é elaborado com base em determinados métodos e procedimentos que nada mais são do que modelos, mais ou menos aproximados, para cálculo dos atributos. Para que os valores resultantes dos atributos sejam válidos é necessário que as variáveis (características) empregadas se mantenham dentro de certos limites que correspondam aos limites de validade destes modelos de cálculo.

Estes limites representam na realidade restrições impostas ao problema de síntese, e que são normalmente chamadas de restrições de modelagem. Elas podem

ser tanto restrições do tipo explícitas, ou seja, impostas diretamente sobre o valor das variáveis (características), como restrições implícitas, ou seja, impostas sobre funções que representam relações entre as variáveis. Para ser completo, um modelo de síntese deve, portanto, explicitar estas restrições de modelagem, de forma a evitar que soluções incoerentes sejam definidas.

4.1.9 – Restrições de Modelagem

Os limites de validade dos métodos e procedimentos empregados no modelo de síntese acima descrito, correspondem essencialmente aos valores das características principais, e de certas relações entre elas, que definem o universo usual das características de navios mercantes convencionais. Da mesma forma que os métodos e os procedimentos, estes limites também estão largamente difundidos na literatura de projeto naval. Para o modelo de síntese adotado, as restrições que correspondem a este limites de validade são, segundo Lyon e Mistree [8], as seguintes:

- Restrições de Modelagem

- $0,675 + \frac{1}{8} * \arctan\left(\frac{23 - 100 * Fn}{4}\right) \leq C_b \leq 0,725 + \frac{1}{8} * \arctan\left(\frac{23 - 100 * Fn}{4}\right)$ (4.43)

- $0,316 \leq C_w - 0,66 * C_b \leq 0,350$ (4.44)

- $0,0265 \leq C_p - 0,955 * C_b \leq 0,0569$ (4.45)

- $0,85 \leq \frac{C_p}{C_w} \leq 0,95$ (4.46)

- $0,85 \leq \frac{C_b}{C_p} \leq 0,995$ (4.47)

- $3,5 \leq \frac{L}{B} \leq 8,0$ (4.48)

$$- 8,0 \leq \frac{L}{D} \leq 16,0 \quad (4.49)$$

$$- 8,0 \leq \frac{L}{T} \leq 32,0 \quad (4.50)$$

$$- 1,2 \leq \frac{B}{D} \leq 2,5 \quad (4.51)$$

$$- 1,2 \leq \frac{B}{T} \leq 5,0 \quad (4.52)$$

$$- 0,5 \leq \frac{T}{D} \leq 1,0 \quad (4.53)$$

$$- 0,5 \leq C_b \leq 0,9 \quad (4.54)$$

$$- 0,7 \leq C_w \leq 0,9 \quad (4.55)$$

$$- 0,55 \leq C_p \leq 0,85 \quad (4.56)$$

As restrições acima definidas refletem a experiência e a prática de projeto de navios convencionais. Elas têm o mérito de evitar que no processo de síntese sejam percorridas regiões do espaço das soluções onde, pela experiência e prática, sabe-se que elas são pobres e ineficientes. Além do trabalho de Lyon e Mistree [8], discussões sobre estes limites e restrições podem ser vistas também nas seguintes referências: Watson e Gilfillan [3]; Comstock [19]; Watson [22]; Robb [23] e Rossel e Chapman [24].

Uma vez estabelecidas as restrições de modelagem, elas devem ser juntadas às restrições definidas nos requisitos do armador para formar o conjunto das restrições relativas ao problema de projeto ou de síntese.

Com base no modelo de síntese proposto, este problema consiste na determinação das características principais e atributos associados que satisfazem às restrições de modelagem e às restrições do armador, e representem a embarcação

que melhor atende, segundo o critério de mérito adotado, as metas e objetivos estabelecidos nos requisitos do armador.

Para se determinar a solução deste problema, ou seja, o conjunto das características e atributos principais da embarcação, propõe-se que o problema de síntese seja formulado como um problema de otimização por múltiplos critérios, através da técnica da programação por objetivos. A formulação do problema nestes termos estabelece o modelo de otimização das características principais da embarcação. Os resultados deste modelo formarão o conjunto de metas e objetivos para o modelo de otimização da forma do casco.

4.2 MODELO DE OTIMIZAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS

Para corresponder o mais fielmente possível ao problema de projeto, o modelo de otimização deve considerar adequadamente os requisitos e restrições estabelecidos para o projeto. Na programação por objetivos, conforme visto no capítulo 3, estes requisitos e restrições são considerados através de metas e restrições definidas no modelo de otimização.

Segundo os conceitos desta técnica, as metas do modelo de otimização devem ser estabelecidas em função das metas e objetivos do problema de projeto que, neste caso, correspondem aos requisitos do armador definidos no início deste capítulo. Como o modelo de síntese proposto garante automaticamente o atendimento às metas referentes à velocidade de serviço e à autonomia, as metas do modelo de otimização devem considerar apenas o atendimento aos seguintes requisitos:

- Atender a capacidade de carga requerida: DWT_{cr} .
- Atender a altura metacêntrica requerida: GMr .
- Minimizar o deslocamento do navio: Δ .
- Minimizar a potência instalada: P_S .

Para considerar adequadamente estes requisitos no modelo de otimização, Lyon e Mistree [8] propõem o estabelecimento das seguintes metas sobre os atributos associados aos requisitos:

- Meta 1: $DWT_c = DWT_{cr}$.
- Meta 2: $GM = GMr$.
- Meta 3: $\Delta = DWT_{cr}$.
- Meta 4: $P_S = 0$.

Além dos requisitos, o modelo deve também considerar as restrições de projeto, que no caso correspondem às restrições (requisitos do armador) definidas no início deste capítulo. Para considerá-las adequadamente no modelo de otimização, Lyon e Mistree [8] propõem o estabelecimento das seguintes restrições sobre os atributos associados às restrições de projeto:

- $L \leq L_{max}$ definido por portos e canais.
- $B \leq B_{max}$ definido por portos e canais.
- $T \leq T_{max}$ definido por portos e canais.
- $GM \geq GM_{min} = 0,15$ m.
- $BL \geq BL_{min}$ dada de acordo com a "International Freeboard Agreement" de 1966 [16].
- $t_{nh} \geq 1,2 * t_{ew}$
- $t_{np} \geq 1,2 * t_{ew}$
- $t_{nr} \geq t_{ew}$

Com base nestas metas e restrições, no modelo de síntese e nos conceitos da programação por objetivos apresentados no capítulo 3, o modelo proposto para otimização das dimensões principais e dos coeficientes de forma de um navio convencional tem a seguinte estrutura:

- **Dados**

- DWT_{cr}
- V_{kr}
- R_{gr}
- GM_r
- L_{max}
- B_{max}
- T_{max}
- GM_{min} = 0,15 m
- BL_{min} (tabela de borda livre)
- $\gamma_a = 1,025 \text{ ton/m}^3$
- $f_s = 0,2$ (fator de serviço)
- Tipo de navio: tanque; produtos químicos; graneleiro; container; carga geral; carga refrigerada; cabotagem.
- Tipo de motor: diesel; turbina a vapor.
- P₁; P₂; P₃; P₄ : prioridades atribuídas ao atendimento às metas.

- **Variáveis**

- L; B; T; D; C_b; C_p; C_w

- **Restrições Implícitas**

- $GM \geq GM_{min} = 0,15 \text{ m.}$
- $BL \geq BL_{min}$ dada de acordo com a tabela de borda livre.
- $t_{nh} \geq 1,2 * t_{ew}$
- $t_{np} \geq 1,2 * t_{ew}$

- $t_{nr} \geq t_{ew}$
- Restrições dadas pelas equações 4.43 a 4.45.

- **Restrições Explícitas (Limites)**

- $0,1 \leq L \leq 500$
- $0,1 \leq B \leq 100$
- $0,1 \leq T \leq 30$
- $0,1 \leq D \leq 50$
- $L \leq L_{max}$
- $B \leq B_{max}$
- $T \leq T_{max}$
- Restrições dadas pelas equações 4.54 a 4.56.

- **Metas**

$$(1) \quad \frac{DWT_c}{DWT_{cr}} + d_1^- - d_1^+ = 1 \quad (4.57)$$

$$(2) \quad \frac{GM}{GM_r} + d_2^- - d_2^+ = 1 \quad (4.58)$$

$$(3) \quad \frac{\Delta}{DWT_{cr}} + d_3^- - d_3^+ = 1 \quad (4.59)$$

$$(4) \quad 300 * \frac{P_s}{(DWT_{cr})^{2/3} * (Vkr)^3} + d_4^- - d_4^+ = 0 \quad (4.60)$$

- **Função Objetivo a ser Minimizada**

$$Z = P_1 * (d_1^- + d_1^+) + P_2 * (d_2^- + d_2^+) + P_3 * (d_3^- + d_3^+) + P_4 * (d_4^- + d_4^+) \quad (4.61)$$

onde:

- d_i^- : variável de desvio representando subatendimento da Meta i.

- d_i^+ : variável de desvio representando sobreatendimento da Meta i.
- P_i : prioridade associada à Meta i.

Este modelo de otimização foi implementado no sistema SHOPS, em ambiente Delphi, e deve ser sempre o primeiro processo de otimização a ser executado ao se iniciar o projeto preliminar da embarcação. A solução numérica deste problema de otimização é obtida através do algoritmo de busca direta desenvolvido por Augusto[12].

Os resultados fornecidos por este modelo são aqueles apresentados no item 4.1.9. Estes resultados são, posteriormente, empregados como metas e objetivos em todos os modelos intermediários de otimização empregados na síntese da forma do casco, cujo modelo geral de otimização está descrito no próximo capítulo.

5. SÍNTESE E OTIMIZAÇÃO DA FORMA DO CASCO

O processo de otimização descrito no capítulo anterior resulta na definição das variáveis do nível 1, ou seja, das dimensões principais e dos coeficientes de forma, e de alguns outros atributos associados à geometria do casco tais como: comprimento da linha d'água de projeto (L_{WL}); área da linha d'água de projeto (A_{WL}); momento de inércia transversal da linha d'água de projeto (I_{WL}); volume submerso do casco (∇); altura do centro de carena (KB); posição longitudinal do centro de carena (LCB) e área da seção mestra (A_{σ}).

O passo seguinte no projeto preliminar é definir a forma do casco da embarcação. Esta definição é fundamental tanto para que se possa especificar outras características importantes, como os arranjos geral e estrutural, como para que se possa realizar, nos ciclos subsequentes de projeto, análises e avaliações mais precisas de atributos tais como resistência ao avanço, resistência estrutural, comportamento no mar, propriedades hidrostáticas, estabilidade, etc.

Estas especificações e análises são normalmente realizadas através do emprego de sistemas computacionais de arquitetura naval que necessitam, como dado de entrada, de uma descrição adequada da forma do casco. Esta descrição, em geral, pode ser feita tanto através de um plano de linhas, quanto através de uma tabela de cotas indicando coordenadas de pontos da superfície do casco. Todavia, não é necessário, - e os sistemas computacionais em geral não exigem - principalmente nos ciclos iniciais de projeto, que se produza uma descrição detalhada e perfeitamente carenada da forma do casco. O detalhamento e o refinamento da forma podem ser deixados para os ciclos finais de projeto.

Entretanto, qualquer que seja o tipo de descrição a ser produzida, o problema central é como gerar uma forma de casco a partir de uns poucos parâmetros geométricos apenas, como os anteriormente apontados, e que atenda não só aos valores destes parâmetros como também possua valores adequados para algumas outras características geométricas associadas ao desempenho hidrodinâmico, aos desempenhos do hélice e leme, ao arranjo geral e à facilidade de construção, tais como : comprimento e posição do corpo paralelo; comprimento dos corpos de entrada e saída; ângulos de entrada e saída da linha d'água; concavidade ou convexidade da linha d'água; ângulo de "flare" das balizas; etc.

No método tradicional de projeto, conforme já comentado anteriormente, este problema é contornado gerando-se a forma do casco a partir da adaptação ou distorção da forma do casco de séries sistemáticas ou de embarcações do mesmo tipo, já existentes. Estas adaptações ou distorções são feitas normalmente com base em alterações sistemáticas realizadas tanto no plano de balizas como na curva de áreas seccionais destes cascos (ver, por exemplo, Schneekluth [16]), até que a forma resultante apresente valores considerados adequados para as características geométricas mais importantes.

As principais dificuldades e inconveniências deste processo tradicional são as seguintes: é um processo de tentativa e erro, muitas vezes demorado, e que requer, em geral, um projetista experiente para realizá-lo; é um processo que não permite identificar claramente os efeitos de determinados parâmetros geométricos na forma geral do casco e nem os conflitos provocados por diferentes parâmetros; as formas geradas possuem invariavelmente um "vício" de geometria pois tendem a reproduzir

a forma do casco já existente; não há como se garantir que os valores dos parâmetros predefinidos sejam obtidos e nem que se tenha chegado à forma que melhor aproxime estes valores e que possua as outras características geométricas já citadas e que não foram diretamente consideradas no processo inicial de otimização.

Embora hoje em dia este processo de adaptação e distorção possa ser feito em sistemas CAD dedicados à arquitetura naval, o emprego destes sistemas se presta apenas à mecanização do processo tradicional, com todas as suas dificuldades e limitações. Estas ferramentas, na realidade, são muito mais adequadas para uso nas fases finais do projeto, para refinamento e carenamento da forma do casco, para detalhamento do arranjo geral e estrutural, para arranjo e detalhamento de subsistemas e para geração de plantas e desenhos de construção.

O propósito principal deste trabalho é apresentar um novo método para definir a forma do casco, onde a geração desta forma possa ser feita de modo automático e sem algumas das dificuldades e inconveniências do processo tradicional. O objetivo final, no entanto, é o mesmo, ou seja, fornecer uma descrição da forma do casco adequada para permitir a especificação e a análise mais acurada de outras características e atributos da embarcação nas fases subsequentes de projeto. Não é propósito deste método a geração de um casco perfeitamente carenado o que, conforme já comentado, é fruto das fases mais avançadas do projeto.

Na abordagem proposta, a forma do casco é definida matematicamente através de um processo de otimização baseado na técnica da programação por objetivos. Para esta definição, propõe-se um modelo de síntese no qual a superfície é representada pelo plano de linhas d'água do casco e estas linhas d'água são descritas

matematicamente através de polinômios. A idéia central é determinar, a partir das características e atributos geométricos definidos no processo de otimização das variáveis do nível 1, um conjunto de equações polinomiais que descrevam um número suficiente de linhas d'água, em diferentes calados, para representar adequadamente a forma ou superfície do casco e formar o que seria o plano de linhas d'água. A partir deste conjunto de equações, define-se não só as linhas d'água, como também pode-se gerar todo o plano de linhas e a tabela de cotas associada, completando a descrição necessária da forma do casco.

Como será visto adiante, o processo de otimização é empregado para se determinar os vetores dos coeficientes dos polinômios que representam o conjunto de linhas d'água que melhor atende as características e atributos geométricos requeridos para o casco.

Este modelo de otimização da forma do casco foi consubstanciado no sistema SHOPS e pode ser executado, de forma sequencial e automática, após a otimização das dimensões principais e coeficientes de forma do navio.

Na sequência deste capítulo detalha-se os modelos propostos, bem como a estruturação matemática efetuada para implantá-los no sistema SHOPS.

5.1 MODELO DE SÍNTESE DA FORMA DO CASCO

O modelo de síntese proposto para definir a forma do casco de uma embarcação foi elaborado com base num procedimento simples proposto por Keane [27] para determinar o plano de linhas d'água de um casco a partir de alguns poucos

parâmetros geométricos. Para a elaboração do modelo, este procedimento foi desenvolvido e aperfeiçoado de modo que o problema de definição da forma do casco pudesse ser formulado como um problema de síntese e otimização.

A idéia central do modelo de síntese é a de que é possível representar adequadamente a superfície do casco a partir da definição matemática do conjunto de linhas d'água que forma o plano de linhas d'água do casco. Esta hipótese, evidentemente, só é plausível se houver a definição de um número suficiente de linhas para permitir a representação das principais características e propriedades geométricas do casco.

Para a definição destas linhas propõe-se que as mesmas sejam representadas matematicamente através de polinômios de grau suficiente para permitir que suas principais características geométricas e de forma possam ser adequadamente descritas. Assim, a definição de uma dada linha d'água é equivalente a determinação dos coeficientes dos polinômios empregados para representá-la matematicamente.

Da mesma forma, a definição do plano de linhas d'água é equivalente à determinação do conjunto, ou vetor, dos coeficientes dos polinômios que representam um número suficiente de linhas para descrever adequadamente a superfície do casco.

Para se determinar estes coeficientes a partir do conhecimento de uns poucos parâmetros e atributos geométricos do casco que se quer descrever, a proposta, baseada no procedimento de Keane [27], é que se estabeleça, com base nestes parâmetros e atributos, algumas condições geométricas que funcionem como limites para a forma ou geometria das linhas que se quer determinar e que sirvam também

como condições de contorno que os polinômios que representam estas linhas devem satisfazer.

Tendo em vista os parâmetros e atributos geométricos determinados no processo inicial de otimização e as características usuais dos cascos de embarcações propõe-se que parte destas condições sejam estabelecidas com base na definição de três curvas fundamentais geradas pela interseção da superfície do casco com o plano da superfície da água, com o plano de simetria longitudinal e com o plano, perpendicular aos outros dois, que corta a superfície na seção transversal de máxima área. Estas curvas são as que representam a linha d'água de projeto, o perfil longitudinal e a seção mestra do casco. Elas podem ser tratadas como curvas de fronteira pois, além de pertencerem à superfície do casco, elas definem prismas dentro dos quais toda esta superfície deve estar contida de modo a representar uma superfície com as características de uma casco de embarcação.

Como curvas de fronteira, estas três curvas servem para estabelecer certas propriedades geométricas que as demais linhas d'água devem possuir ou respeitar para formar um plano de linhas d'água coerente. A curva da seção mestra define a boca máxima de cada linha d'água; o perfil longitudinal define as coordenadas de início e fim de qualquer linha d'água e; a linha d'água de projeto representa a curva limite que circunscreve todas as demais linhas d'água entre o calado de projeto e o plano de base, ou calado zero, definindo os limites geométricos, ou de forma, das demais linhas. Na figura 5.1 ilustra-se esquematicamente estas três curvas.

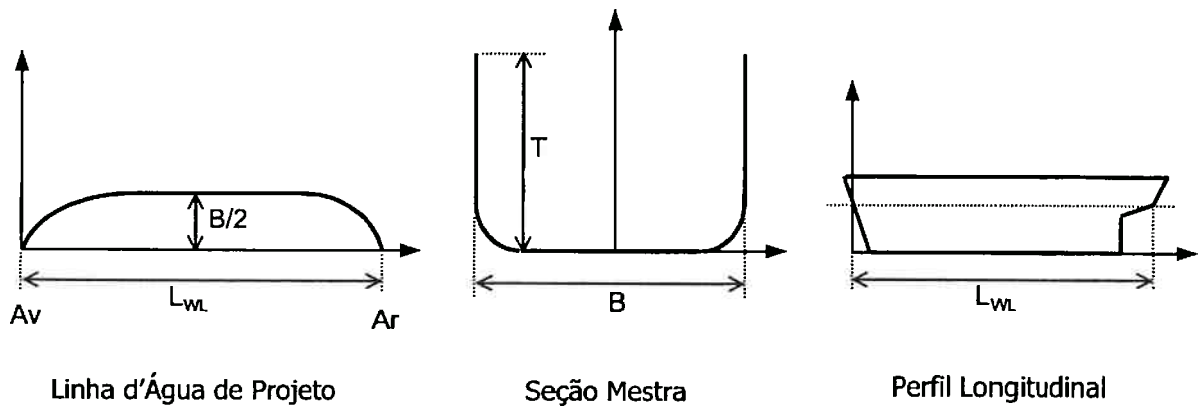


Figura 5.1 – Curvas de Fronteira para a Superfície do Casco

Uma vez definidas estas três curvas de fronteira e tendo em vista que a linha d'água de projeto deve circunscrever todas as demais linhas situadas em calados inferiores, propõe-se, seguindo a idéia do procedimento de Keane [27], que a condição final para determinação do plano de linhas d'água seja estabelecida com base na definição da distribuição vertical, ao longo do calado, do volume requerido para o casco. A distribuição vertical de volume é representada por uma curva, chamada de curva vertical de áreas, que indica as áreas das linhas d'água do casco em função do calado. A figura 5.2 ilustra esquematicamente esta curva.

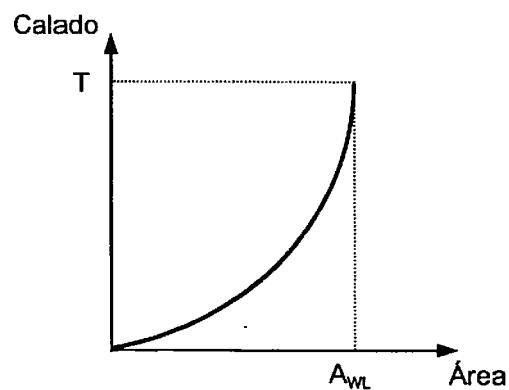


Figura 5.2 – Curva Vertical de Áreas

A curva vertical de áreas é equivalente à curva chamada de “tonelada por centímetro de imersão”(TCI), que usualmente faz parte das curvas hidrostáticas das embarcações. Além de indicar as áreas das linhas d’água, esta curva tem duas propriedades fundamentais: sua área interna tem valor igual ao volume deslocado e; a altura do centro geométrico desta área interna corresponde à altura do centro de carena do casco. Assim, definição da curva vertical de áreas permite que se obtenha a área que todas as linhas do plano de linhas d’água devem ter para que a superfície representada corresponda a um casco com volume e altura do centro de carena iguais aos requeridos.

A definição das quatro curvas acima descritas permite, portanto, que se determine certas características e atributos das linhas d’água que estabelecem limites para a forma de cada uma delas e condições de contorno que devem ser atendidas pelos polinômios que as representam. Com base nestes limites e condições pode-se, então, determinar os polinômios que representam o número de linhas fixado para compor o plano de linhas d’água do casco.

De acordo com o modelo proposto, o problema da definição da superfície do casco pode então ser considerado equivalente ao problema de definir as quatro curvas acima descritas, que permitem estabelecer as condições necessárias para se determinar os polinômios que descrevem um número suficiente de linhas para formar um plano de linhas d’água que, por sua vez, represente adequadamente a superfície de um casco que possua as características e atributos geométricos definidos no processo inicial de otimização. Além destas, espera-se também que a superfície representada possua valores e formas adequadas para algumas outras

características geométricas que exercem influência importante em alguns atributos já citados da embarcação.

Para se definir estas quatro curvas e, posteriormente, as linhas d'água, deve-se então estabelecer os modelos de síntese que permitam que as mesmas sejam obtidas a partir das características geométricas definidas no processo inicial de otimização e das outras características desejadas para a forma do casco.

As características e atributos geométricos do casco determinados no processo inicial de otimização são os seguintes :

L : comprimento entre perpendiculares.

L_{WL} : comprimento da linha d'água de projeto.

B : boca máxima da linha d'água de projeto.

T : calado de projeto do casco.

∇ : volume deslocado pelo casco.

A_{\circ} : área da seção transversal de máxima área (seção mestra)

A_{WL} : área da linha d'água de projeto.

I_{WL} : momento de inércia transversal da linha d'água de projeto.

KB : posição vertical do centro de carena.

LCB : posição longitudinal do centro de carena.

C_b : coeficiente de bloco

C_p : coeficiente prismático

C_w : coeficiente de linha d'água.

C_{\circ} : coeficiente de seção mestra.

Em seu trabalho, Keane [27] propõe modelos simples para se determinar as curvas que representam as linhas d'água, a seção mestra e a curva vertical de áreas, em função de certos parâmetros geométricos. Alguns destes parâmetros foram os apresentados acima. Os outros parâmetros, no entanto, são parâmetros mais difíceis de serem fixados previamente, pois envolvem determinadas características específicas da geometria do casco para as quais não se dispõe de métodos ou procedimentos para avaliação, tais como: comprimento da quilha; ângulos de inclinação do costado ("flare") e do fundo do casco; derivadas da curva vertical de áreas; etc. Uma vez fixados valores para estes parâmetros pode-se então obter, de forma determinada, os coeficientes dos polinômios que representam as diversas linhas d'água.

No entanto, para a obtenção de uma descrição final adequada da forma do casco, é necessário que se percorra um processo de tentativa e erro até que se consiga estabelecer valores para as características geométricas específicas que resultem numa forma aceitável. Além disto, como os modelos propostos por Keane [27] são bem simplificados, não se consegue garantir, através deste processo, que o casco gerado tenha valores de KB e LCB iguais aos valores determinados num processo preliminar qualquer de definição das características principais da embarcação. Não se consegue garantir também que a abertura de ré do casco seja suficiente para acomodar o hélice e o leme da embarcação, pois o procedimento não possibilita que se defina requisitos para a região de popa do perfil.

Para contornar estas limitações e aperfeiçoar as formas de casco possíveis de serem obtidas através deste procedimento, propõe-se, neste trabalho, novos modelos de síntese para se definir as quatro curvas acima mencionadas e o plano de

linhas d'água, nos quais os únicos parâmetros que necessitam estar previamente fixados são as características e atributos geométricos acima listados. Estes modelos foram elaborados de modo que o problema de determinação de cada uma das curvas e do plano de linhas d'água pudesse ser formulado como um problema de otimização por múltiplos critérios, empregando-se a técnica da programação por objetivos. Como resultado, propõe-se para cada problema um modelo individual de otimização para determinação das variáveis definidas nos modelos de síntese.

Os modelos de otimização propostos foram estruturados para serem aplicados de forma hierárquica até a definição completa do plano de linhas d'água e, portanto, da descrição do casco. Para isto, as características geométricas determinadas no processo inicial de otimização da embarcação e as características das curvas obtidas nos processos de otimização de níveis hierárquicos superiores, são tratadas como metas e objetivos a serem atendidos nos processos subsequentes de otimização para determinação das curvas restantes.

O modelo geral composto pelos modelos individuais de otimização de cada uma das curvas e do plano de linhas d'água, consubstancia-se no que se convencionou chamar de modelo de otimização da forma do casco. A hierarquia estabelecida entre os modelos individuais, para se chegar à forma do casco, dispõe a determinação das curvas na seguinte ordem: 1) linha d'água de projeto; 2) curva vertical de áreas; 3) seção mestra; 4) perfil longitudinal e ; 5) plano de linhas d'água.

Na sequência deste capítulo, descreve-se detalhadamente os modelos de síntese e otimização propostos para a definição de cada uma destas curvas e do plano de linhas d'água.

5.2 MODELO DE SÍNTESE DA LINHA D'ÁGUA DE PROJETO

Para definição de uma linha d'água qualquer e, em particular, da linha d'água de projeto, propõe-se, neste trabalho, uma descrição matemática genérica para representar a forma de uma linha d'água. Para esta descrição, a linha d'água é dividida em três partes : um corpo de entrada; um corpo paralelo médio; e um corpo de saída. Em termos matemáticos propõe-se que os corpos de entrada e saída sejam descritos através de polinômios do 4º grau e o corpo médio através de uma reta. Na figura 5.3, a seguir, ilustra-se esta descrição genérica para meia linha d'água, identificando o sistema de coordenadas adotado e os parâmetros geométricos relevantes para sua descrição matemática.

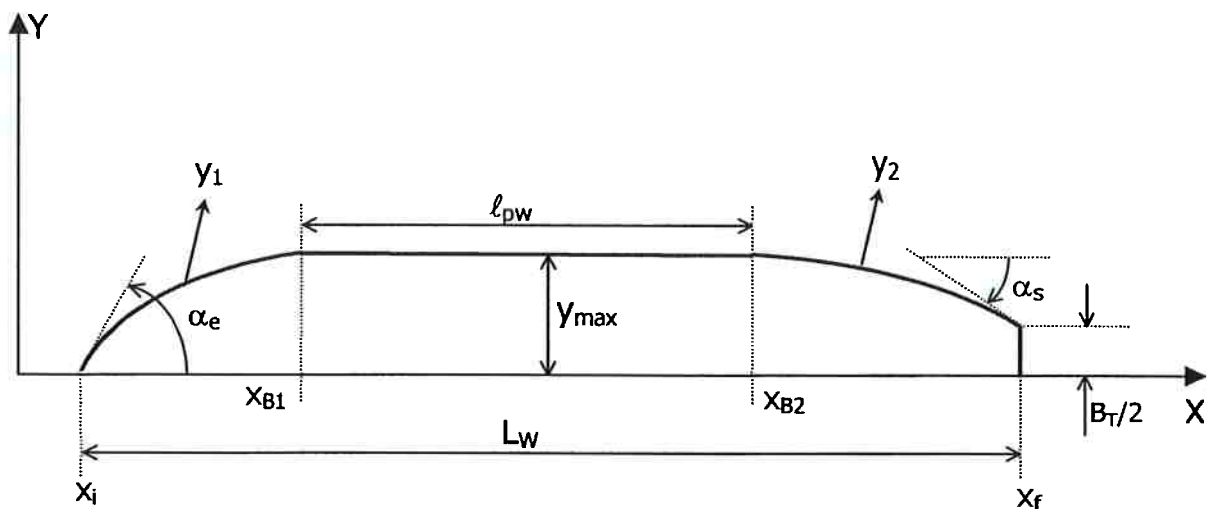


Figura 5.3 – Descrição Genérica de uma Linha d'Água

O significado dos símbolos e parâmetros indicados nesta figura são os seguintes:

x_i : coordenada longitudinal do início (proa) da linha d'água.

x_f : coordenada longitudinal do fim (popa) da linha d'água.

L_W : comprimento da linha d'água.

x_{B1} : coordenada longitudinal do início do corpo paralelo.

x_{B2} : coordenada longitudinal do fim do corpo paralelo.

ℓ_{pw} : comprimento do corpo paralelo.

y_{max} : meia boca máxima da linha d'água.

B_T : boca da linha d'água na popa (popa "transom").

α_e : meio ângulo de entrada da linha d'água.

α_s : meio ângulo de saída da linha d'água.

y_1 : polinômio que descreve o corpo de entrada da linha d'água.

y_2 : polinômio que descreve o corpo de saída da linha d'água.

Os polinômios de 4º grau que descrevem os corpos de entrada e saída são definidos da seguinte forma:

$$y_1(x) = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e \quad (5.1)$$

$$y_2(x) = fx^4 + gx^3 + hx^2 + ix + j \quad (5.2)$$

onde : a, b, c, d, e, f, g, h, i, j são os coeficientes destes polinômios.

A escolha de polinômios de 4º grau para representar as linhas d'água resulta de um compromisso entre o uso de uma função que permita, como será visto adiante, algum controle sobre características geométricas importantes como ângulos e derivadas no início e fim dos corpos de entrada e saída, e uma função que não implique num número excessivo de variáveis (coeficientes) a ser determinado. Keane [27], por exemplo, adota polinômios de 3º e 2º graus para representar os corpos de entrada e saída, respectivamente. Se, por um lado, o uso destas funções reduz o

número de variáveis a ser definido, por outro, limita as possibilidades de representação adequada de algumas características geométricas importantes.

Com base nestas definições, a descrição matemática genérica de uma linha d'água qualquer tem a seguinte forma :

$$\text{para } x_i \leq x \leq x_{B1} \quad (5.3)$$

$$y = y_1(x)$$

$$\text{para } x_{B1} \leq x \leq x_{B2} \quad (5.4)$$

$$y = y_{\max}$$

$$\text{para } x_{B2} \leq x \leq x_f \quad (5.5)$$

$$y = y_2(x)$$

Para definição completa de uma linha d'água deve-se então determinar, através de um processo de síntese, os valores das coordenadas x_i , x_f , x_{B1} , x_{B2} e y_{\max} e dos coeficientes dos polinômios $y_1(x)$ e $y_2(x)$. No caso da linha d'água de projeto, este processo de síntese deve procurar coordenadas e coeficientes que descrevam uma forma cujos valores de L_{WL} , B , A_{WL} e I_{WL} sejam iguais àqueles obtidos no processo inicial de otimização. Nos termos da descrição genérica proposta, estes objetivos têm a seguinte representação matemática:

$$x_i - x_f = L_{WL} \quad (5.6)$$

$$y_{\max} = \frac{B}{2} \quad (5.7)$$

$$2 * \left[\int_{x_i}^{x_{B1}} y_1 \cdot dx + (x_{B2} - x_{B1}) * y_{\max} + \int_{x_{B2}}^{x_f} y_2 \cdot dx \right] = A_{WL} \quad (5.8)$$

$$2 * \left[\int_{x_i}^{x_{B1}} \frac{y_1^3}{4} \cdot dx + \frac{y_{\max}^3}{3} * (x_{B2} - x_{B1}) + \int_{x_{B2}}^{x_f} \frac{y_2^3}{4} \cdot dx \right] = I_{WL} \quad (5.9)$$

Além disto, é desejável também que as linhas d'água e, em particular, a linha d'água de projeto, apresentem certos atributos e valores adequados para algumas outras características geométricas que, mesmo não fazendo parte das especificações principais ou variáveis do nível 1, exercem influência importante em certos atributos e características da embarcação, tais como: resistência ao avanço; facilidade de construção; eficiência do propulsor; eficiência do leme e arranjo geral. Baker [28], Saunders [26], Schneekluth [16] e Comstock [19] apresentam discussões e análises sobre estas características adicionais da linha d'água de projeto e de sua influência nos atributos da embarcação. Aquelas para as quais esta influência é mais significativa são as seguintes : "suavidade" ou "carenagem" da forma dos corpos de entrada e saída; ângulo de entrada; derivada máxima no corpo de saída; concavidade nos corpos de entrada e saída; tamanho e posição do corpo paralelo; boca da linha d'água na popa.

5.2.1 – A Carenagem das Linhas d'Água

A "suavidade" e "carenagem" das linhas ou superfície do casco tem influência direta sobre as características do escoamento em torno do casco, em particular na geração de vórtices ao longo do mesmo, que é um dos fenômenos responsáveis pela parcela da resistência ao avanço conhecida como resistência de forma. Para que o escoamento ocorra de forma suave, sem separação da camada limite e geração significativa de vórtices, as linhas do casco não devem ter descontinuidades ou mudanças bruscas de forma. Em termos matemáticos estas qualidades das linhas são representadas por sua continuidade e pela continuidade de suas derivadas primeira e segunda (raio de curvatura). Tendo em vista a descrição genérica proposta, estes

requisitos de carenagem podem ser traduzidos matematicamente nas seguintes condições:

$$\text{para } x=x_i \quad (5.10)$$

$$\Rightarrow y_1(x)=0$$

- para $x=x_{B1}$ (5.11)

$$\Rightarrow y_1(x)=y_{\max}$$

$$\Rightarrow \frac{d(y_1)}{dx} = 0$$

$$\Rightarrow \frac{d^2(y_1)}{dx^2} = 0$$

- para $x=x_{B2}$ (5.12)

$$\Rightarrow y_2(x)=y_{\max}$$

$$\Rightarrow \frac{d(y_2)}{dx} = 0$$

$$\Rightarrow \frac{d^2(y_2)}{dx^2} = 0$$

Embora as condições acima confirmem, em função da descrição genérica proposta, continuidade e suavidade para os corpos de vante e ré, elas não impedem a possível ocorrência de certas degenerações de forma, do tipo daquelas mostradas na figura 5.4, que estão inevitavelmente associadas à representação da linha através de polinômios. Evidentemente que estas formas degeneradas não representam linhas carenadas do ponto de vista da arquitetura naval.

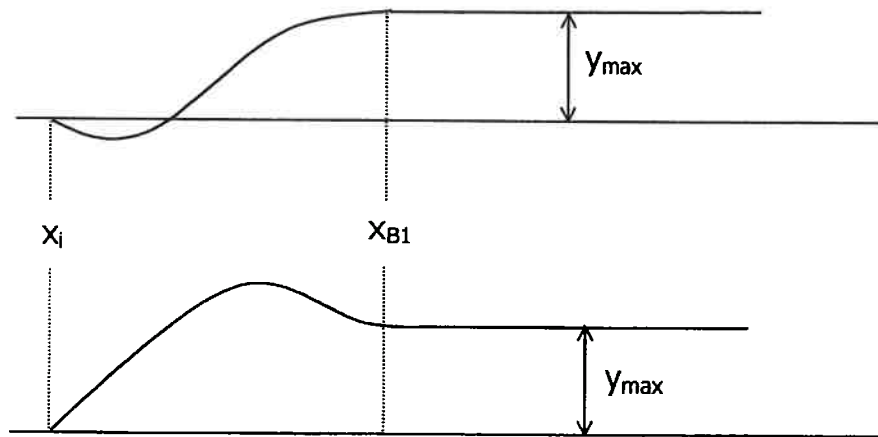


Figura 5.4 – Linhas d'Água com Formas Degeneradas

Não é difícil verificar que para polinômios de 4^o grau que satisfazem as condições anteriores, as seguintes condições adicionais são suficientes para evitar estas degenerações:

- para $x=x_i$ (5.13)

$$\Rightarrow \frac{d(y_1)}{dx} \geq 0 \text{ ou } \text{tg}(\alpha_e) \geq 0$$

- para $x=x_{B1}$ (5.14)

$$\Rightarrow \frac{d^3(y_1)}{dx^3} \geq 0$$

- para $x=x_f$ (5.15)

$$\Rightarrow \frac{d(y_2)}{dx} \leq 0 \text{ ou } \text{tg}(\alpha_s) \geq 0$$

- para $x=x_{B2}$ (5.16)

$$\Rightarrow \frac{d^3(y_2)}{dx^3} \leq 0$$

5.2.2 – Ângulo de Entrada da Linha d'Água de Projeto

O ângulo de entrada, ou o equivalente meio ângulo de entrada α_e , da linha d'água de projeto é uma característica geométrica ligada tanto à forma quanto ao

comprimento do corpo de vante da mesma que, por sua vez, são duas características que têm influência importante na distribuição de pressão na parte de vante do casco, próximo à superfície livre, e, conseqüentemente, sobre a geração e resistência de ondas do casco. Grandes ângulos de entrada estão associados a corpos de entrada "cheios" e de menor comprimento, enquanto ângulos pequenos estão associados a corpos de entrada "finos" e de maior comprimento.

A forma e, conseqüentemente, o ângulo de entrada adequado, em termos de se evitar uma excessiva resistência de ondas do casco, é função do número de Froude em que a embarcação deverá operar. Baker [28] apresenta uma série de resultados experimentais com modelos através dos quais compara a resistência ao avanço de diversas formas de casco nas quais, para um mesmo coeficiente de bloco, fora variado o ângulo de entrada e conseqüentemente a forma do corpo de vante da linha d'água, permitindo a identificação das condições em que ocorriam as menores resistências ao avanço. Schneckluth [16] e Comstock [19], apresentam tabelas baseadas em resultados empíricos (tabela 2.1, pg.48 da ref.[16] e tabela 18, pg.346 da ref.[19]) indicando faixas de valores adequados para o meio ângulo de entrada, como função do coeficiente prismático da embarcação. Saunders [26], por sua vez, apresenta um gráfico (fig.66.I, pg.479 da ref.[26]) indicando também uma faixa adequada destes valores como função do número de Froude. A tendência geral verificada em todas estas referências mostra uma redução nos valores adequados do ângulo de entrada com o aumento do número de Froude e redução do coeficiente prismático da embarcação.

Em termos do projeto da linha d'água de projeto, uma vez que já se conhece os valores de F_n e C_p , provenientes da otimização inicial, estas indicações podem ser

utilizadas tanto para fixar um determinado valor para o ângulo de entrada, quanto para estabelecer objetivos e restrições quanto a esta característica geométrica.

5.2.3 - Inclinação ou Derivada Máxima no Corpo de Saída da Linha d'Água de Projeto

A inclinação ou derivada máxima das linhas do corpo de ré da embarcação e, em particular da linha d'água de projeto, é determinante no que tange à separação da camada limite e à formação de vórtices na saída do escoamento. A formação de vórtices na saída tem efeito negativo sobre a resistência ao avanço, a eficiência do hélice e sobre a eficácia do leme. Na figura 5.5, a seguir, ilustra-se esta inclinação máxima para o corpo de saída da linha d'água.

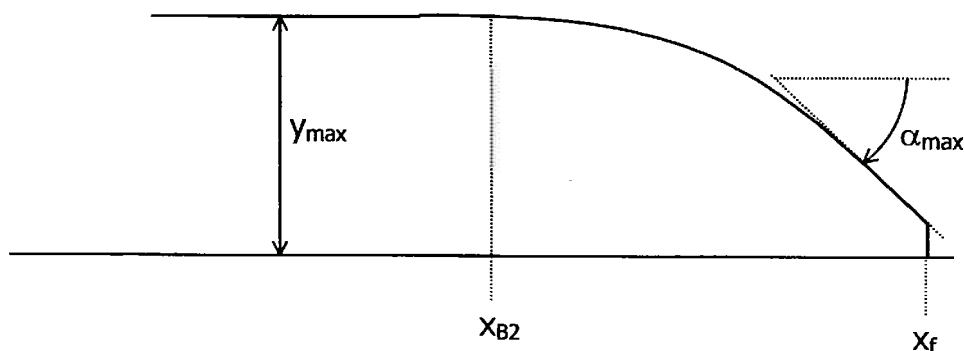


Figura 5.5 - Inclinação Máxima no Corpo de Saída

Em termos da descrição matemática proposta para as linhas d'água, esta inclinação máxima é igual ao módulo do valor mínimo da derivada de y_2 entre x_{B2} e x_f , ou seja:

$$\operatorname{tg}(\alpha_{\max}) = \left| \min \left(\frac{dy_2}{dx} \Big|_{x_{B2}}^{x_f} \right) \right| \quad (5.17)$$

A posição longitudinal em que a inclinação máxima ocorre pode ser obtida determinando-se os valores da coordenada x para os quais a derivada segunda de y_2 se anula. Com estas coordenadas pode-se determinar o valor mínimo da derivada de y_2 entre os pontos com coordenadas x_{B2} e x_f .

Saunders [26] e Baker [28] apresentam dados de resultados experimentais indicando valores máximos para esta inclinação, tanto para se evitar a formação excessiva de vórtices quanto para que não ocorra esta formação. Estes valores estão indicados a seguir.

- inclinação máxima para se evitar a formação excessiva de vórtices :
 - Baker [28] : $\alpha_{\max} \leq 16^\circ$ a 18°
 - Saunders [26] : $\alpha_{\max} \leq 13^\circ$ a 20°
- inclinação máxima para não haver qualquer formação de vórtices :
 - Baker [28] : $\alpha_{\max} \leq 12^\circ$
 - Saunders [26] : $\alpha_{\max} \leq 11^\circ$ a $12,5^\circ$

Para o projeto das linhas do casco, Saunders [26] sugere ainda, como regra geral, que, sempre que possível, a inclinação máxima das linhas deve ser mantida abaixo de 22° . Já Watson [22] indica que esta inclinação máxima não deve ultrapassar 30° nas linhas d'água situadas em calados cobertos pelo diâmetro do hélice.

5.2.4 - Concavidade nos Corpos de Entrada e Saída da Linha d'Água de Projeto

A presença ou não de concavidade nos corpos de entrada e saída da linha d'água define as características de forma e a distribuição da área nestas regiões da linha d'água. Dependendo dos ângulos de entrada e saída e do comprimento dos corpos de entrada e saída, a presença ou não desta concavidade implicará na existência de "ombros" mais ou menos acentuados na forma dos corpos de entrada e saída. Na figura 5.6 ilustra-se as três possibilidades de forma da linha definidas em função desta concavidade.

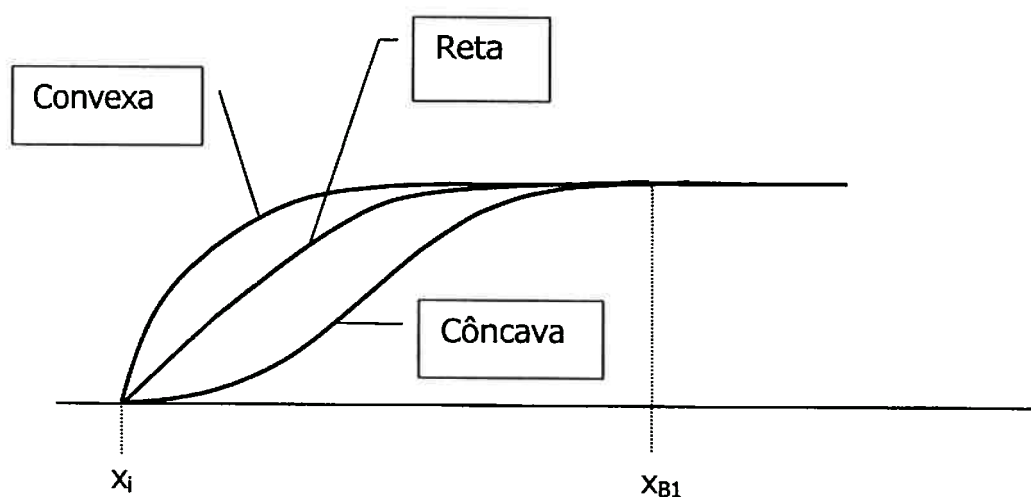


Figura 5.6 - Concavidade e Forma da Linha d'Água

No caso do corpo de entrada, dependendo do número de Froude em que opera a embarcação, a existência de ombro acentuado pode provocar a formação indesejada de ondas, com consequências negativas sobre a resistência ao avanço. No caso do corpo de saída, a existência de ombros acentuados propicia a geração indesejada de vórtices, com as consequências já mencionadas no item anterior.

Baker [28], nos ensaios já mencionados, apresenta resultados de resistência ao avanço de cascos de mesmo coeficiente de bloco, mas com linhas d'água com características distintas de concavidade. Comstock [19] apresenta tabela (tabela 18, pg.346) onde indica as características desejáveis de concavidade em função do coeficiente prismático e do número de Froude.

Em termos da descrição matemática proposta, pode-se associar estas características de concavidade aos sinais e valores das derivadas segunda de y_1 e y_2 no início e fim da linha d'água, respectivamente. As condições matemáticas que representam as três formas definidas na figura 5.6 são as seguintes:

- entrada côncava:

$$\frac{d^2y_1}{dx^2} > 0 \text{ em } x = x_i \quad (5.18)$$

- entrada reta:

$$\frac{d^2y_1}{dx^2} = 0 \text{ em } x = x_i \quad (5.19)$$

- entrada convexa:

$$\frac{d^2y_1}{dx^2} < 0 \text{ em } x = x_i \quad (5.20)$$

- saída côncava:

$$\frac{d^2y_2}{dx^2} > 0 \text{ em } x = x_f \quad (5.21)$$

- saída reta:

$$\frac{d^2y_2}{dx^2} = 0 \text{ em } x = x_f \quad (5.22)$$

- saída convexa:

$$\frac{d^2y_2}{dx^2} < 0 \text{ em } x = x_f \quad (5.23)$$

5.2.5 - Tamanho e Posição do Corpo Paralelo da Linha d'Água de Projeto

A existência de corpo paralelo na linha d'água de projeto está diretamente ligada à presença de corpo paralelo médio na embarcação e aos requisitos de área e momento de inércia transversal, estabelecidos para uma linha d'água com comprimento e boca prefixados.

O corpo paralelo médio do casco é uma característica desejável do ponto de vista de facilidade e custo de construção e do ponto de vista de arranjo de carga e facilidade nas operações de carga e descarga. Algumas vezes, sua presença é inevitável devido a limitações externas de boca e calado da embarcação. No entanto, o tamanho e posição deste corpo tem influência direta sobre os comprimentos dos corpos de entrada e saída do casco e sobre a posição longitudinal do centro de carena, que são características que exercem destacada influência sobre a resistência ao avanço da embarcação. Comstock [19] apresenta, na mesma tabela já mencionada anteriormente, faixas de valores empiricamente estabelecidas para a relação entre o comprimento do corpo paralelo médio do casco e o comprimento da embarcação, em função do coeficiente prismático e do número de Froude. Estas faixas representam um compromisso entre as vantagens e os efeitos negativos da presença do corpo paralelo médio.

Já Saunders [26], tendo em vista tanto a presença de corpos paralelos médios quanto os requisitos típicos de área e momento de inércia, apresenta gráficos (fig.66.J, pg.480 e fig.66.K, pg.481) que fornecem diretamente faixas de valores adequados para o comprimento e a posição do corpo paralelo da linha d'água de projeto, em função do coeficiente prismático da embarcação.

Em termos da descrição matemática proposta, estas faixas de valores podem

ser empregadas tanto para fixar valores de x_{B1} e x_{B2} , quanto para estabelecer restrições relativas aos valores máximo e mínimo destas coordenadas. Isto pode ser feito através do emprego das seguintes equações:

$$l_{PW} = x_{B2} - x_{B1} \quad (5.24)$$

$$x_{CLP} = (x_{B1} + x_{B2})/2 \quad (5.25)$$

onde : x_{CLP} é a posição longitudinal do centro do corpo paralelo da linha d'água.

5.2.6 - Boca da Linha d'Água de Projeto na Popa

O tamanho da boca no final da linha d'água está normalmente associado ao tipo de popa da embarcação. Navios mercantes convencionais, operando com números de Froude inferiores a 0,25, em geral possuem popas convencionais, conhecidas como popa "cruise", onde as linhas d'água terminam com boca nula para favorecer o escoamento para o hélice e para o leme. Já em navios mais rápidos, a importância de se limitar a inclinação máxima das linhas no corpo de saída, para efeito de resistência ao avanço, e, ao mesmo tempo, manter um escoamento adequado para o hélice e o leme, sem provocar aumentos indesejáveis no tamanho na linha de eixo, favorece o uso das chamadas popas "transom", onde as linhas d'água terminam abruptamente com uma boca não nula. Popas deste tipo podem, eventualmente, ser utilizadas também em casos onde o arranjo exige áreas maiores na popa ou em casos onde requisitos de estabilidade exigem maiores valores de momento de inércia transversal.

Em termos da descrição matemática proposta esta característica da popa pode ser contemplada na linha d'água de projeto, impondo-se valores ou restrições à boca B_T no final da mesma.

5.2.7 - A Síntese da Linha d'Água de Projeto

De acordo com a descrição genérica proposta, a definição geométrica de uma linha d'água se efetiva com a determinação das coordenadas x_i , x_f , x_{B1} , x_{B2} e y_{\max} e dos coeficientes dos polinômios $y_1(x)$ e $y_2(x)$. A escolha destas coordenadas e coeficientes deve ser feita de modo que a linha d'água possua tanto os atributos determinados no processo de otimização inicial, quanto as outras características e atributos definidos de acordo com os itens 5.2.1 a 5.2.6.

Para que este processo de definição de coordenadas e coeficientes seja eficiente, é fundamental que ele seja orientado a partir dos próprios atributos e características que se deseja obter na linha d'água. Isto pode ser feito estabelecendo-se um conjunto de condições de contorno para os polinômios, baseado nos parâmetros geométricos que definem estes atributos e características. Com isto, as variáveis a serem definidas passam a ser parâmetros geométricos fisicamente ligados a estes atributos e não mais coeficientes de polinômios para os quais não se consegue estabelecer nenhuma relação direta com estes.

Para a definição da linha d'água de projeto, as seguintes condições foram estabelecidas para formular o problema de síntese:

- $x_i = 0$ (5.26)

- $x_f = L_{WL}$ (5.27)

- $y_{\max} = \frac{B}{2}$ (5.28)

- para: $x = 0 \rightarrow y_1(x) = 0$ (5.29)

- para: $x = 0 \rightarrow \frac{dy_1(x)}{dx} = \text{tg}(\alpha_e)$ (5.30)

- para : $x = x_{B1} \rightarrow \frac{dy_1(x)}{dx} = 0$ (5.31)

- para: $x = x_{B1} \rightarrow \frac{d^2y_1(x)}{dx^2} = 0$ (5.32)

- para: $x = x_{B1} \rightarrow y_1(x) = \frac{B}{2}$ (5.33)

- para: $x = x_{B2} \rightarrow y_2(x) = \frac{B}{2}$ (5.34)

- para: $x = x_{B2} \rightarrow \frac{dy_2(x)}{dx} = 0$ (5.35)

- para: $x = x_{B2} \rightarrow \frac{d^2y_2(x)}{dx^2} = 0$ (5.36)

- para: $x = L_{WL} \rightarrow y_2(x) = \frac{B_T}{2}$ (5.37)

- para: $x = L_{WL} \rightarrow \frac{dy_2(x)}{dx} = -\text{tg}(\alpha_s)$ (5.38)

As equações 5.29 a 5.38 são condições de contorno para os polinômios y_1 e y_2 , estabelecidas a partir das condições de carenagem e em função dos parâmetros geométricos que traduzem os atributos e características descritos nos itens 5.2.1 e 5.2.6. Aplicando-se estas condições aos polinômios obtêm-se, após algum trabalho algébrico, as seguintes equações para os coeficientes:

$$a = \frac{1}{x_{B1}^3} * \left(\frac{3 * B}{2 * x_{B1}} - \text{tg}(\alpha_e) \right) \quad (5.39)$$

$$b = \frac{1}{x_{B1}^2} * \left(3 * \text{tg}(\alpha_e) - \frac{4 * B}{x_{B1}} \right) \quad (5.40)$$

$$c = \frac{1}{x_{B1}} * \left(\frac{3 * B}{x_{B1}} - 3 * \text{tg}(\alpha_e) \right) \quad (5.41)$$

$$d = \text{tg}(\alpha_e) \quad (5.42)$$

$$e = 0 \quad (5.43)$$

$$f = \frac{3}{2} * \frac{(B - B_T)}{(L_{WL} - X_{B2})^4} - \frac{\text{tg}(\alpha_s)}{(L_{WL} - X_{B2})^3} \quad (5.44)$$

$$g = \text{tg}(\alpha_s) * \frac{(L_{WL} + 3 * X_{B2})}{(L_{WL} - X_{B2})^3} - 2 * (B - B_T) * \frac{(L_{WL} + 2 * X_{B2})}{(L_{WL} - X_{B2})^4} \quad (5.45)$$

$$h = 3 * X_{B2} * (B - B_T) * \frac{(2 * L_{WL} + X_{B2})}{(L_{WL} - X_{B2})^4} - 3 * X_{B2} * \text{tg}(\alpha_s) * \frac{(L_{WL} + X_{B2})}{(L_{WL} - X_{B2})^3} \quad (5.46)$$

$$i = X_{B2}^2 * \text{tg}(\alpha_s) * \frac{(3 * L_{WL} + X_{B2})}{(L_{WL} - X_{B2})^3} - 6 * X_{B2}^2 * L_{WL} * \frac{(B - B_T)}{(L_{WL} - X_{B2})^4} \quad (5.47)$$

$$j = \frac{B_T}{2} - \frac{L_{WL} * \text{tg}(\alpha_s) * X_{B2}^3}{(L_{WL} - X_{B2})^3} + \frac{L_{WL}^2 * (L_{WL}^2 - 4 * L_{WL} * X_{B2} + 6 * X_{B2}^2) * (B - B_T)}{2 * (L_{WL} - X_{B2})^4} \quad (5.48)$$

É imediato verificar nestas últimas equações que a determinação dos coeficientes dos polinômios depende apenas do valor das variáveis X_{B1} , X_{B2} , α_e , α_s e B_T , que são parâmetros geométricos diretamente associados às características e atributos discutidos nos itens 5.2.1 a 5.2.6. Assim, uma vez que o valor das coordenadas x_i , x_f e y_{\max} foram diretamente fixados pelas equações 5.26, 5.27 e 5.28, a descrição completa da linha d'água torna-se função apenas da determinação destas 5 variáveis. Além disto, como as equações 5.26, 5.27 e 5.28 também impõe o atendimento aos valores de L_{WL} e B obtidos do processo inicial de otimização, os objetivos do processo de síntese da linha d'água passam a ser apenas o atendimento aos valores desejados de A_{WL} e I_{WL} , que deve ser verificado através da aplicação das equações 5.8 e 5.9.

Algumas condições adicionais podem, ainda, ser estabelecidas para orientar a determinação das 5 variáveis de modo a dotar a linha d'água de alguns dos atributos e características complementares discutidos anteriormente.

Para evitar as degenerações de forma no corpo de entrada, a aplicação das equações 5.13 e 5.14 fornece a seguinte restrição:

$$0 \leq \text{tg}(\alpha_e) \leq \frac{2 * B}{x_{B1}} \quad (5.49)$$

Da mesma forma, para o corpo de saída, as equações 5.15 e 5.16 fornecem:

$$0 \leq \text{tg}(\alpha_s) \leq 2 * \frac{(B - B_T)}{(L_{WL} - x_{B2})} \quad (5.50)$$

A inclinação máxima no corpo de saída pode ser obtida determinando-se a posição onde a derivada segunda de y_2 se anula. Um destes pontos tem coordenada longitudinal x_{B2} , em função da equação 5.36. O outro ponto tem a seguinte coordenada longitudinal:

$$x_0^{2d} = \frac{(L_{WL} + x_{B2})}{2} * \frac{\frac{(B - B_T)}{2 * (L_{WL} - x_{B2})} * \frac{(4 * L_{WL} + 2 * x_{B2})}{(L_{WL} + x_{B2})} - \text{tg}(\alpha_s)}{\frac{3 * (B - B_T)}{2 * (L_{WL} - x_{B2})} - \text{tg}(\alpha_s)} \quad (5.51)$$

A inclinação máxima, para uma forma não degenerada, pode, então, ser obtida das seguintes condições:

- se $x_{B2} \leq x_0^{2d} \leq L_{WL}$, então:

$$\text{tg}(\alpha_{\max}) = -1 * \left[4 * f * (x_0^{2d})^3 + 3 * g * (x_0^{2d})^2 + 2 * h * x_0^{2d} + i \right] \quad (5.52)$$

- se $x_0^{2d} < x_{B2}$ ou $x_0^{2d} > L_{WL}$, então:

$$\alpha_{\max} = \alpha_s \quad (5.53)$$

Com base nestas equações, pode-se controlar ou restringir a inclinação máxima no corpo de saída, de acordo com as indicações do item 5.2.3.

A concavidade no corpo de entrada pode ser controlada através da aplicação das condições estabelecidas pelas equações 5.18, 5.19 e 5.20, como segue:

- entrada côncava:

$$\operatorname{tg}(\alpha_e) < \frac{B}{x_{B1}} \quad (5.54)$$

- entrada reta:

$$\operatorname{tg}(\alpha_e) = \frac{B}{x_{B1}} \quad (5.55)$$

- entrada convexa:

$$\operatorname{tg}(\alpha_e) > \frac{B}{x_{B1}} \quad (5.56)$$

Da mesma forma, para a concavidade do corpo de saída, as seguintes condições podem ser estabelecidas a partir das equações 5.21, 5.22 e 5.23:

- saída côncava:

$$\operatorname{tg}(\alpha_s) < \frac{(B - B_T)}{(L_{WL} - x_{B2})} \quad (5.57)$$

- saída reta:

$$\operatorname{tg}(\alpha_s) = \frac{(B - B_T)}{(L_{WL} - x_{B2})} \quad (5.58)$$

- saída convexa:

$$\operatorname{tg}(\alpha_s) > \frac{(B - B_T)}{(L_{WL} - x_{B2})} \quad (5.59)$$

O tamanho e a posição do corpo paralelo da linha d'água de projeto podem ser controlados estabelecendo-se limites para os parâmetros geométricos que definem estes atributos. Com base nas equações 5.24 e 5.25, as seguintes restrições podem ser estabelecidas:

$$\ell_{pw}^i \leq x_{B2} - x_{B1} \leq \ell_{pw}^s \quad (5.60)$$

$$x_{CLP}^i \leq \frac{x_{B1} + x_{B2}}{2} \leq x_{CLP}^s \quad (5.61)$$

onde: ℓ_{pw}^i , ℓ_{pw}^s , x_{CLP}^i e x_{CLP}^s representam, respectivamente, limites inferiores e superiores para o tamanho e posição do corpo paralelo, que podem ser estabelecidos de acordo com as indicações apresentadas no item 5.2.5.

Finalmente, para evitar degenerações de forma, o tamanho da boca na popa da linha d'água deve ser mantido dentro dos seguintes limites:

$$0 \leq B_T \leq B \quad (5.62)$$

Todas as equações apresentadas neste item, juntamente com as equações 5.8 e 5.9, referentes ao cálculo da área e do momento de inércia, representam o modelo de síntese, ou a descrição matemática do problema de síntese da linha d'água de projeto. Solucionar este problema significa determinar as 5 variáveis acima mencionadas de modo a que a linha d'água atenda aos requisitos de área e de momento de inércia e, eventualmente, possua outros atributos e características especificados.

Para isto, propõe-se neste trabalho que este problema seja formulado também como um problema de otimização por múltiplos critérios, empregando-se a técnica

da programação por objetivos.

Para formular o modelo de otimização as 5 variáveis, x_{B1} , x_{B2} , α_e , α_s e B_T , são previamente adimensionalizadas para formar o seguinte conjunto de variáveis independentes, ou de decisão:

$$v_1 = \frac{x_{B1}}{L_{WL}} \quad (5.63)$$

$$v_2 = \frac{x_{B2}}{L_{WL}} \quad (5.64)$$

$$v_3 = \frac{\alpha_e}{\pi/2} \quad (5.65)$$

$$v_4 = \frac{\alpha_s}{\pi/2} \quad (5.66)$$

$$v_5 = \frac{B_T}{B} \quad (5.67)$$

Com base nos conceitos da programação por objetivos, propõe-se, então, a seguinte estrutura para o modelo de otimização da linha d'água de projeto:

Modelo de Otimização da Linha d'Água de Projeto

- **Dados:**

- A_{WLr} (área requerida, obtida do processo inicial de otimização)
- I_{WLr} (inércia requerida, obtida do processo inicial de otimização)
- L_{WL} (comprimento obtido do processo inicial de otimização)
- B (boca obtida do processo inicial de otimização)
- α_{er} (ângulo de entrada requerido)
- ℓ_{pw}^i (mínimo comprimento admissível para o corpo paralelo)

- ℓ_{pw}^s (máximo comprimento admissível para o corpo paralelo)
- x_{CLP}^i (mínima coordenada longitudinal admissível para o centro do corpo paralelo)
- x_{CLP}^s (máxima coordenada longitudinal admissível para o centro do corpo paralelo)
- α_{max}^s (inclinação máxima admissível no corpo de saída)
- tipo de entrada: côncava/reta ou convexa/reta
- tipo de saída: : côncava/reta ou convexa/reta

• **Variáveis:**

- $v_1 ; v_2 ; v_3 ; v_4 ; v_5$ (definidas de acordo com as equações 5.63 a 5.67)

• **Restrições Implícitas:**

$$\frac{\ell_{pw}^i}{L_{WL}} \leq v_2 - v_1 \leq \frac{\ell_{pw}^s}{L_{WL}} \quad (5.68)$$

$$\frac{x_{CLP}^i}{L_{WL}} \leq \frac{v_1 + v_2}{2} \leq \frac{x_{CLP}^s}{L_{WL}} \quad (5.69)$$

$$\frac{2 * B}{v_1 * L_{WL}} - \text{tg}(v_3 * \pi/2) \geq 0 \quad (5.70)$$

$$\frac{2 * B * (1 - v_5)}{L_{WL} * (1 - v_2)} - \text{tg}(v_4 * \pi/2) \geq 0 \quad (5.71)$$

$$\text{se entrada côncava/reta: } \frac{B}{v_1 * L_{WL}} - \text{tg}(v_3 * \pi/2) \geq 0 \quad (5.72)$$

$$\text{se entrada convexa/reta: } \text{tg}(v_3 * \pi/2) - \frac{B}{v_1 * L_{WL}} \geq 0 \quad (5.73)$$

$$\text{se saída c\u00f4ncava/reta: } \frac{B \cdot (1 - v_5)}{L_{WL} \cdot (1 - v_2)} - \text{tg}(v_4 \cdot \pi/2) \geq 0 \quad (5.74)$$

$$\text{se saída convexa/reta: } \text{tg}(v_4 \cdot \pi/2) - \frac{B \cdot (1 - v_5)}{L_{WL} \cdot (1 - v_2)} \geq 0 \quad (5.75)$$

$$\frac{\alpha_{\max}^s \cdot \pi}{180} - \alpha_{\max} \geq 0 \quad (5.76)$$

onde: α_{\max} \u00e9 determinado de acordo com as equa\u00e7\u00f5es 5.51, 5.52 e 5.53.

- **Restri\u00e7\u00f5es Expl\u00edcitas (Limites)**

$$0,05 \leq v_1 \leq 0,90 \quad (5.77)$$

$$0,05 \leq v_2 \leq 0,90 \quad (5.78)$$

$$0,0 \leq v_3 \leq 0,99 \quad (5.79)$$

$$0,0 \leq v_4 \leq 0,99 \quad (5.80)$$

$$0,0 \leq v_5 \leq 1,0 \quad (5.81)$$

- **Metas**

$$100 \cdot \frac{(A_{WL} - A_{WLr})}{A_{WLr}} + d_1^- - d_1^+ = 0 \quad (5.82)$$

$$100 \cdot \frac{(I_{WL} - I_{WLr})}{I_{WLr}} + d_2^- - d_2^+ = 0 \quad (5.83)$$

$$100 \cdot \frac{(v_3 - \alpha_{er}/90)}{\alpha_{er}/90} + d_3^- - d_3^+ = 0 \quad (5.84)$$

$$\text{onde: } A_{WL} = 2 \cdot \left[\int_0^{x_{B1}} y_1 \cdot dx + (x_{B2} - x_{B1}) \cdot \frac{B}{2} + \int_{x_{B2}}^{L_{WL}} y_2 \cdot dx \right] \quad (5.85)$$

$$I_{WL} = 2 * \left[\int_0^{x_{B1}} \frac{y_1^3}{4} \cdot dx + \frac{B^3}{24} * (x_{B2} - x_{B1}) + \int_{x_{B2}}^{L_{WL}} \frac{y_2^3}{4} \cdot dx \right] \quad (5.86)$$

- **Função Objetivo a ser Minimizada**

$$Z = P_1 * (d_1^- + d_1^+) + P_2 * (d_2^- + d_2^+) + P_3 * (d_3^- + d_3^+) \quad (5.87)$$

Este modelo de otimização da linha d'água de projeto foi implementado no sistema SHOPS para ser executado após a otimização inicial das dimensões principais e coeficientes de forma. A solução numérica do problema de otimização da linha d'água também é obtida através do algoritmo de busca direta desenvolvido por Augusto [12]. Como resultado do modelo proposto, obtêm-se as seguintes características e atributos da linha d'água de projeto:

- **Resultados**

- coeficientes dos polinômios y_1 e y_2
- x_{B1} , x_{B2} , ℓ_{pw} , x_{CLP} , B_T
- α_e , α_s , α_{max}
- A_{WL} , C_W , I_{WL} , C_{IT}
- LCF_{WL} (posição longitudinal do centro de flutuação ou centro da área)

$$\text{onde: } LCF_{WL} = \frac{2}{A_{WL}} * \left[\int_0^{x_{B1}} y_1 \cdot x \cdot dx + (x_{B2}^2 - x_{B1}^2) * \frac{B}{4} + \int_{x_{B2}}^{L_{WL}} y_2 \cdot x \cdot dx \right] \quad (5.88)$$

5.3 – MODELO DE SÍNTESE DA CURVA VERTICAL DE ÁREAS

A curva vertical de áreas representa a distribuição de áreas de linhas d'água em função, ou ao longo, do calado do navio. Ela é equivalente a uma curva hidrostática típica de embarcações conhecida como curva de "Tonelada por Centímetro de Imersão- TCI". Na figura 5.7 ilustra-se a configuração típica da curva vertical de áreas onde são identificados os seus principais parâmetros e características geométricas.

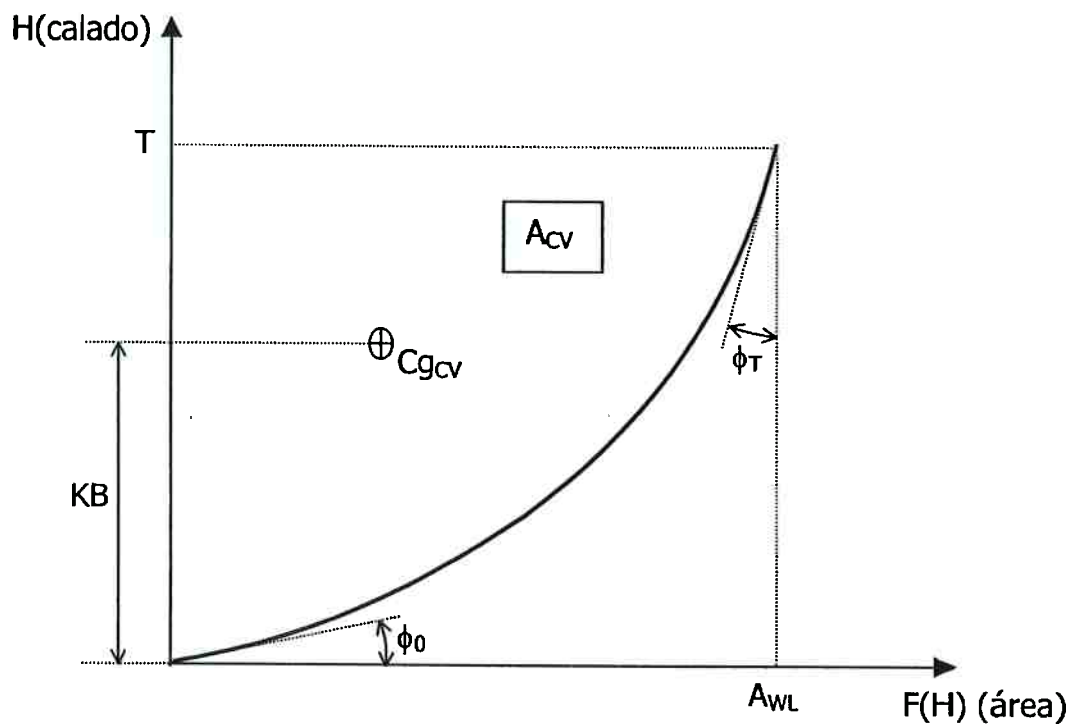


Figura 5.7 – Curva Vertical de Áreas

Os parâmetros indicados na figura 5.7 têm o seguinte significado:

A_{WL} : área da linha d'água de projeto.

T : calado do navio.

A_{CV} : área compreendida entre a curva e o eixo de calados.

Cg_{CV} : centro geométrico da área A_{CV} .

ϕ_0 , ϕ_T : ângulos das tangentes à curva nos pontos de calados zero e de projeto (T), respectivamente.

Com a ajuda da figura 5.7, é imediato verificar que a curva vertical de áreas de uma embarcação possui três propriedades importantes, relacionadas com características e atributos do casco. São estas as propriedades:

- (1) O valor da área A_{CV} é igual ao volume ∇ deslocado pelo casco.
- (2) A distância vertical do centro geométrico Cg_{CV} ao eixo das áreas é igual a altura do centro de carena KB do casco.
- (3) No calado de projeto T, a área fornecida pela curva corresponde a área A_{WL} da linha d'água de projeto.

Assim, a geração da curva vertical de áreas pode ser descrita como um processo de síntese que tem por objetivo determinar uma função que relacione as áreas das linhas d'água com os diferentes calados do navio e, para a qual, os valores das três propriedades acima sejam iguais aos valores de ∇ , KB e A_{WL} determinados nos processos anteriores de otimização.

De modo a conferir generalidade a este processo, é conveniente realizar a seguinte adimensionalização de variáveis:

$$h = \frac{H}{T} \quad (5.89)$$

$$f(h) = \frac{F(H)}{B * L} \quad (5.90)$$

A curva resultante desta adimensionalização, chamada de curva adimensional de áreas, está representada na figura 5.8.

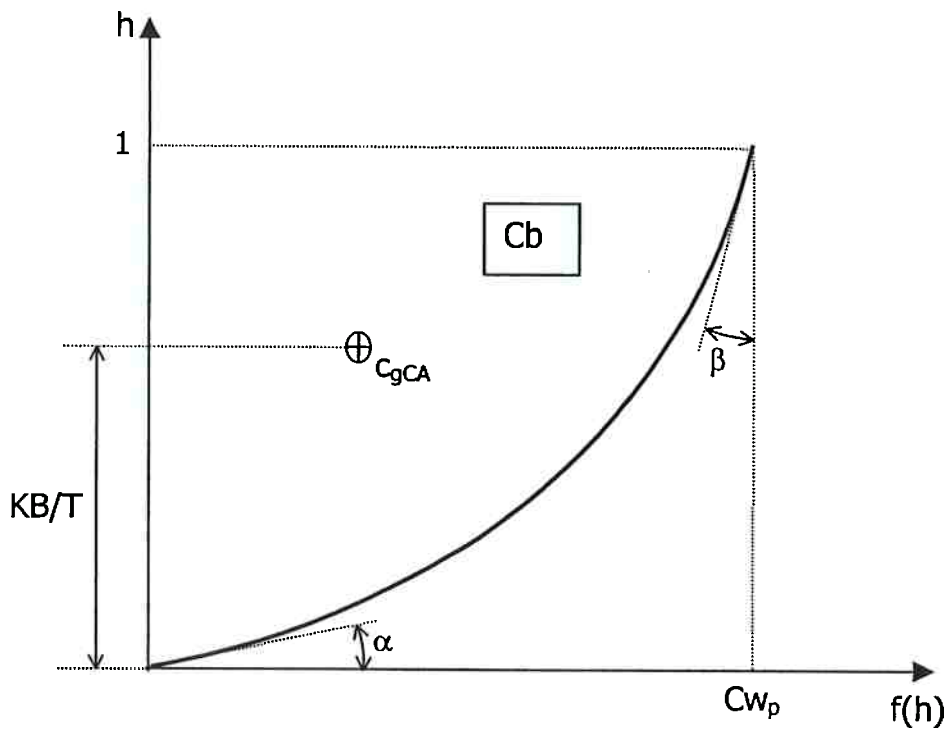


Figura 5.8 – Curva Adimensional de Áreas

Na figura 5.8, o centro geométrico passa a ser representado por C_{gCA} e as inclinações nas extremidades da curva, pelos ângulos α e β .

Como consequência desta adimensionalização, a curva adimensional de áreas apresenta as seguintes características:

- (1) a extremidade da curva, correspondente ao calado de projeto ($h=1$), tem coordenada horizontal ($f(1)$), igual ao coeficiente de linha d'água baseado no comprimento entre perpendiculares (Cw_p), onde:

$$Cw_p = \frac{A_{WL}}{L * B} \quad (5.91)$$

- (2) a área compreendida entre a curva e o eixo vertical (h) é igual ao coeficiente de bloco (Cb) da embarcação.

(3) a distância do centro geométrico (c_{gCA}) desta área ao eixo horizontal ($f(h)$) é igual a razão entre a altura do centro de carena e o calado da embarcação (KB/T).

Tendo em vista estas propriedades da curva adimensional de áreas, é conveniente redefinir o processo de geração da curva de áreas como um processo de síntese para se determinar a função $f(h)$ que represente uma curva para a qual, as três propriedades acima tenham valores iguais aos valores requeridos de C_b , KB/T e C_{wp} , obtidos nos processos anteriores de otimização. Em termos matemáticos estes objetivos podem ser representados da seguinte forma:

$$f(1) = C_{wp} \quad (5.92)$$

$$\int_0^1 f(h) \cdot dh = C_b \quad (5.93)$$

$$M_{sf}^{CA} = C_b * \frac{KB}{T} \quad (5.94)$$

onde: M_{sf}^{CA} é o momento estático, em relação eixo horizontal ($f(h)$), da área entre a curva adimensional e o eixo vertical (h), dado por:

$$M_{sf}^{CA} = \int_0^1 h \cdot f(h) \cdot dh \quad (5.95)$$

Para determinar a função $f(h)$, Keane [27] observa inicialmente que as curvas de área vertical, e suas correspondentes formas adimensionais, apresentam uma grande semelhança com a forma das balizas de embarcações. Em função desta semelhança, este autor sugere que, para representar, de forma aproximada, a curva

de áreas, se empregue a conhecida técnica de transformação conforme, desenvolvida por Lewis [29], para aproximar balizas de embarcações a partir do mapeamento de um círculo de raio unitário e com centro na origem do sistema de coordenadas. Esta transformação produz as chamadas "Formas de Lewis". Por esta equivalência, a boca, o calado e a área da baliza, que são os parâmetros empregados por Lewis [29] para determinar a função de transformação, são substituídos pela área da linha d'água de projeto, pelo próprio calado e pelo volume do casco, respectivamente, para se obter a representação da curva de áreas.

No entanto, o uso das formas de Lewis apresenta uma importante limitação pois não permite que se tente atender o atributo da altura do centro de carena (KB) do casco, tornando eventualmente grosseira esta aproximação da curva de áreas para o casco em projeto.

Neste sentido, propõe-se, neste trabalho, um aprimoramento da idéia de Keane [27], no qual a transformada de três termos de Lewis [29] é substituída por uma transformada de quatro termos, onde o quarto parâmetro é justamente a altura do centro de carena do casco.

Esta transformada com quatro parâmetros gera, a partir do círculo de raio unitário, o que se convencionou chamar [30] de "Forma de Lewis Estendida". No anexo A apresenta-se esta transformada e o procedimento para se determinar a função de transformação.

Por outro lado, o mapeamento conforme de curvas a partir de um círculo apresenta uma particularidade, associada à geometria do círculo, que é a de gerar curvas com derivada nula nos pontos de cruzamento com o eixo vertical e com

derivada infinita nos pontos de cruzamento com o eixo horizontal. Esta particularidade pode tornar irreal a aproximação da curva de áreas, principalmente nas regiões próximas ao calado de projeto e ao calado zero, pois impede a representação de outros valores de ângulos de inclinação como, por exemplo, aqueles indicados nas figuras 5.7 e 5.8.

Para contornar esta limitação, Keane [27] propõe uma transformação preliminar bastante engenhosa da curva de áreas, através da aplicação de algumas mudanças auxiliares de coordenadas, numa outra curva cujas inclinações nas extremidades são as apropriadas para serem obtidas através do mapeamento conforme de um círculo. Assim, uma vez obtida a curva de áreas transformada, através do mapeamento conforme, a aplicação inversa das mudanças de coordenadas produz a curva vertical de áreas desejada.

Este mesmo processo de transformação foi empregado neste trabalho mas, tendo em vista a proposta de inclusão do parâmetro KB como atributo a ser atendido na geração da curva vertical de áreas, foram determinadas algumas propriedades adicionais da transformação preliminar sugerida por Keane [27], de modo a considerar adequadamente este parâmetro. Na sequência deste item, detalha-se estas transformações preliminares e a aplicação do mapeamento conforme para geração da curva vertical de áreas.

5.3.1 – A Transformação e o Mapeamento da Curva Vertical de Áreas

Inicialmente, submete-se os eixos $f(h)$ e h a rotações α e β , respectivamente, de modo a transformar o sistema de coordenadas $[f(h), h]$ no sistema $[x_1, y_1]$, conforme mostra a figura 5.9. A relação entre as coordenadas destes dois sistemas,

que define esta transformação, é dada pelas seguintes equações:

$$x_1 = f(h) * (\cos \alpha + \operatorname{tg}(\alpha + \beta) * \operatorname{sen} \alpha) - h * \frac{\operatorname{sen} \beta}{\cos(\alpha + \beta)} \quad (5.96)$$

$$y_1 = h * [\cos \beta + \operatorname{tg}(\alpha + \beta) * \operatorname{sen} \beta] - f(h) * \frac{\operatorname{sen} \alpha}{\cos(\alpha + \beta)} \quad (5.97)$$

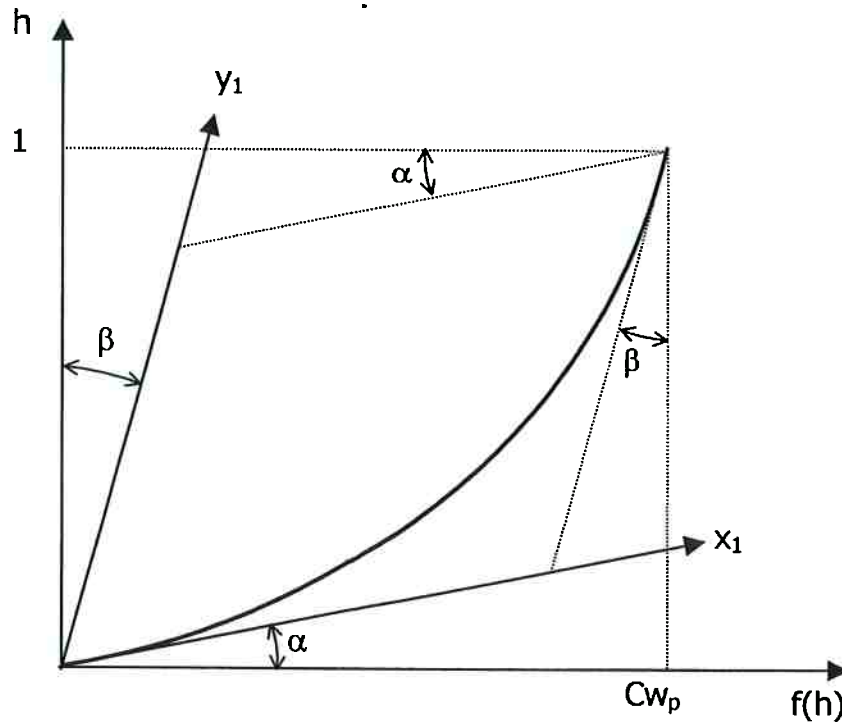


Figura 5.9 – Sistema de Coordenadas $[x_1, y_1]$

Sobre o sistema $[x_1, y_1]$ aplica-se agora uma segunda mudança de coordenadas, transformando-o no sistema ortogonal $[x_2, y_2]$, conforme se mostra na figura 5.10. Esta segunda mudança é definida pelas seguintes equações:

$$x_2 = x_1 * (\cos \alpha - \operatorname{sen} \alpha * \operatorname{tg} \beta) \quad (5.98)$$

$$y_2 = y_1 * \cos \beta \quad (5.99)$$

Se as coordenadas x_1 e y_1 nas equações 5.98 e 5.99 forem substituídas pelas equações 5.96 e 5.97 determina-se as equações que definem a mudança de

coordenadas equivalente a aplicação sequencial das duas anteriores. Efetuando-se então esta substituição obtêm-se as seguintes equações:

$$x_2 = f(h) - h * \operatorname{tg}\beta \quad (5.100)$$

$$y_2 = \frac{h - f(h) * \operatorname{tg}\alpha}{1 - \operatorname{tg}\alpha * \operatorname{tg}\beta} \quad (5.101)$$

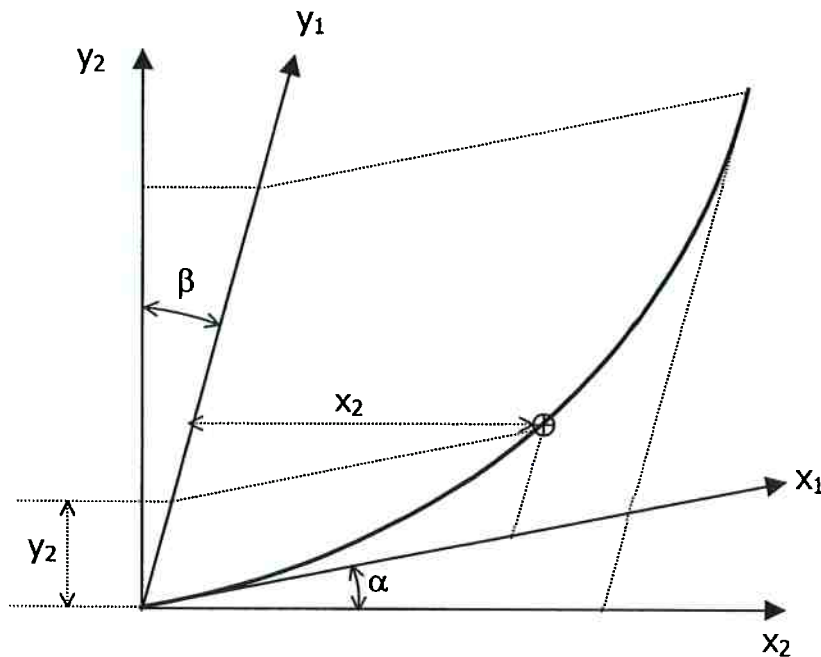


Figura 5.10 – Sistema de Coordenadas $[x_2, y_2]$

A mudança de coordenadas definida pelas equações 5.100 e 5.101 transforma a curva adimensional de áreas, no plano $[f(h), h]$, numa curva no plano $[x_2, y_2]$ com as características mostradas na figura 5.11.

Na figura 5.11, $S/2$ representa a área entre a curva e o eixo y_2 e, b e t , representam as coordenadas x_2 e y_2 da extremidade superior da curva. Para que esta extremidade represente corretamente o ponto $[Cw_p, 1]$ no plano $[f(h), h]$, os valores de suas coordenadas, obtidos das equações 5.100 e 5.101, devem ser os seguintes:

$$b = Cw_p - \text{tg}\beta \quad (5.102)$$

$$t = \frac{1 - Cw_p * \text{tg}\alpha}{1 - \text{tg}\beta * \text{tg}\alpha} \quad (5.103)$$

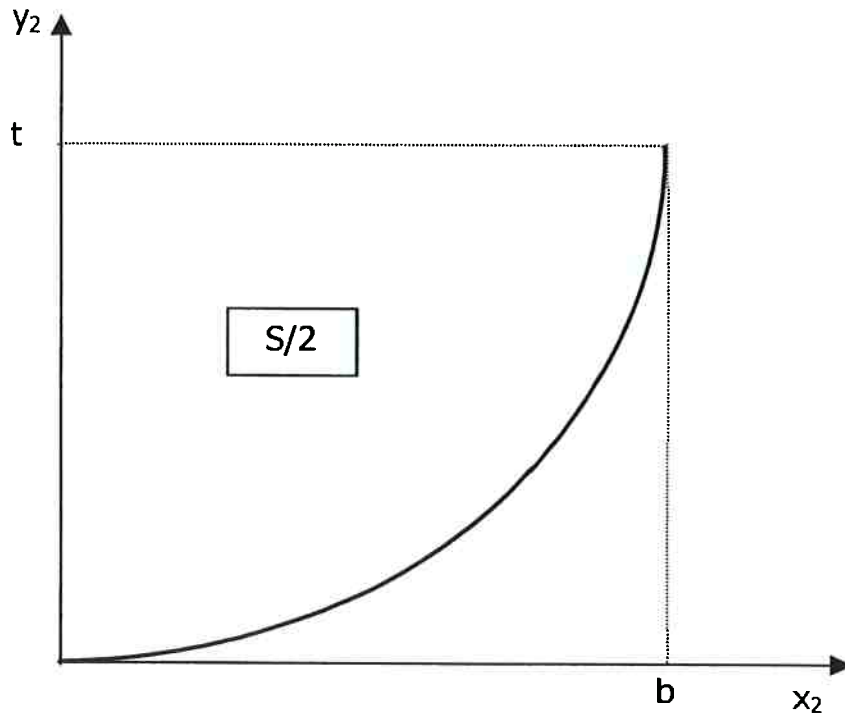


Figura 5.11 – Curva no Plano $[x_2, y_2]$

Das equações 5.100 e 5.101 pode-se obter também a seguinte relação entre derivadas nos planos $[f(h), h]$ e $[x_2, y_2]$:

$$\frac{dy_2}{dx_2} = \frac{\left(1 - \text{tg}\alpha * \frac{df}{dh}\right)}{\left(\frac{df}{dh} - \text{tg}\beta\right) * (1 - \text{tg}\alpha * \text{tg}\beta)} \quad (5.104)$$

Assim, nos pontos extremos da curva adimensional de áreas, onde as derivadas df/dh têm valores iguais à $\text{tg}\beta$ e $1/\text{tg}\alpha$, a curva no plano $[x_2, y_2]$ tem, segundo a equação 5.104, as seguintes derivadas:

$$\text{- para } \frac{df}{dh} = \operatorname{tg}\beta \quad (5.105)$$

$$\frac{dy_2}{dx_2} = \infty$$

$$\text{- para } \frac{df}{dh} = \frac{1}{\operatorname{tg}\alpha} \quad (5.106)$$

$$\frac{dy_2}{dx_2} = 0$$

Das equações 5.105 e 5.106 conclui-se que a curva no plano $[x_2, y_2]$, nos seus pontos extremos, tem tangentes paralelas aos eixos de coordenadas, que são características passíveis de serem obtidas através do mapeamento conforme de um círculo.

Finalmente, para completar a transformação da curva adimensional de áreas numa forma adequada para o mapeamento conforme, aplica-se uma última mudança de coordenadas ao sistema de eixos $[x_2, y_2]$, de modo a apenas inverter o sentido do eixo y_2 . Esta última mudança é definida pelas seguintes equações:

$$X = x_2 \quad (5.107)$$

$$Y = t - y_2 \quad (5.108)$$

Substituindo-se as equações 5.100 e 5.101 nas equações 5.107 e 5.108 obtêm-se as equações que definem a transformação da curva adimensional de áreas, no plano $[f(h), h]$, na curva adimensional transformada, no plano $[X, Y]$, mostrada na figura 5.12. Estas equações são as seguintes:

$$X = f(h) - h * \operatorname{tg}\beta \quad (5.109)$$

$$Y = \frac{(1 - Cw_p * \operatorname{tg}\alpha)}{(1 - \operatorname{tg}\alpha * \operatorname{tg}\beta)} - \frac{(h - f(h)) * \operatorname{tg}\alpha}{(1 - \operatorname{tg}\alpha * \operatorname{tg}\beta)} \quad (5.110)$$

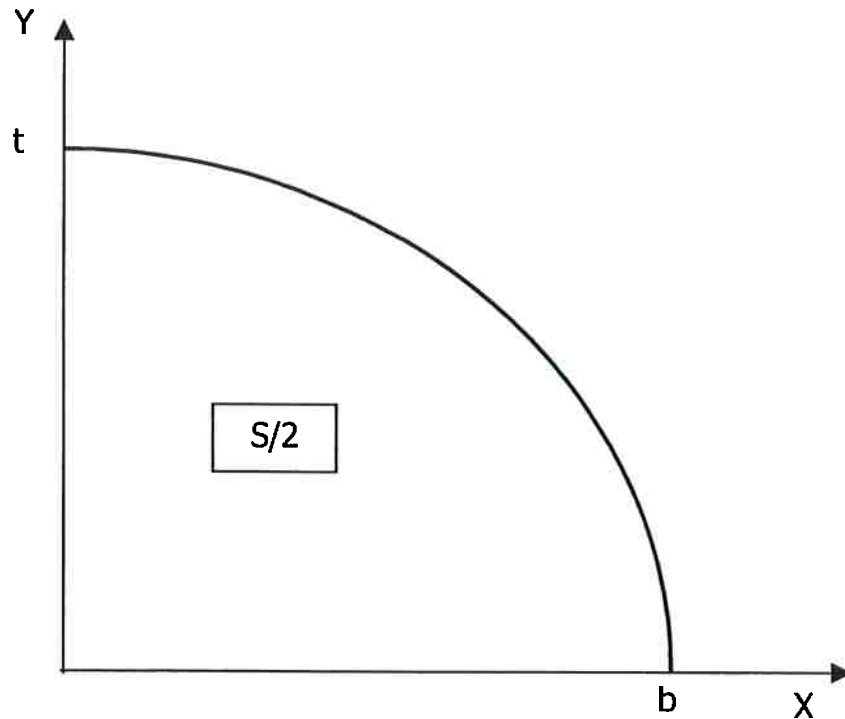


Figura 5.12 - Curva Adimensional Transformada

Através da manipulação algébrica das equações 5.109 e 5.110 pode-se obter as equações que definem a transformação inversa, ou seja, do plano $[X, Y]$ para o plano $[f(h), h]$. As equações desta transformação inversa são as seguintes:

$$h = \frac{(1 - Cw_p * tg\alpha)}{(1 - tg\alpha * tg\beta)} + X * \frac{tg\alpha}{(1 - tg\alpha * tg\beta)} - Y \quad (5.111)$$

$$f(h) = \frac{(tg\beta - Cw_p * tg\alpha * tg\beta)}{(1 - tg\alpha * tg\beta)} + X * \frac{1}{(1 - tg\alpha * tg\beta)} - Y * tg\beta \quad (5.112)$$

Assim, uma vez conhecidos a equação da curva transformada $Y=Y(X)$, no plano $[X,Y]$, e os ângulos α e β , pode-se determinar, através das equações 5.111 e 5.112, a equação $f(h)$ da curva adimensional de áreas ou as coordenadas de seus pontos. Se as coordenadas b e t , dadas pela equação $Y=Y(X)$, tiverem valores iguais

aos fornecidos pelas equações 5.102 e 5.103, e se as derivadas desta função em $X=0$ e em $X=b$ forem nula e infinita, respectivamente, a curva adimensional de áreas terá inclinações α e β nas suas extremidades e a extremidade superior terá coordenadas $[Cw_p, 1]$.

De posse da equação de $f(h)$, pode-se então calcular os valores resultantes para o coeficiente de bloco, o momento estático em relação ao eixo horizontal e a altura do centro geométrico, associados à função $f(h)$ obtida. Estes atributos são determinados através das seguintes equações:

$$C_b = \int_0^1 f(h) \cdot dh \quad (5.113)$$

$$M_{sf}^{CA} = \int_0^1 h \cdot f(h) \cdot dh \quad (5.114)$$

$$\frac{KB}{T} = \frac{M_{sf}^{CA}}{C_b} \quad (5.115)$$

As equações acima podem ser rescritas com base na transformação definida pelas equações 5.111 e 5.112. Para isto, deve-se, inicialmente, diferenciar a equação 5.111, o que fornece o seguinte resultado:

$$dh = \left(\frac{tg\alpha}{(1 - tg\alpha * tg\beta)} - \frac{dY}{dX} \right) * dX \quad (5.116)$$

Substituindo as equações 5.111, 5.112 e 5.116 no segundo membro das equações 5.113 e 5.114 e integrando, obtêm-se:

$$C_b = \frac{S}{2} + \frac{Cw_p}{2} - \frac{b * t}{2} \quad (5.117)$$

$$M_{sf}^{CA} = \frac{t^3 * tg\beta}{3} + \frac{b^3 * k_1^3 * tg^2\alpha}{3} + \frac{b^2 * t * tg\alpha * (2 * k_1^2 - k_1)}{2} +$$

$$+ b * t^2 * (k_1 - 1) + \frac{t * S}{2} - M_{sx}^{CT} + k_1 * tg\alpha * M_{sy}^{CT} \quad (5.118)$$

onde : $k_1 = \frac{1}{(1 - tg\alpha * tg\beta)}$ (5.119)

$S/2$: área da curva adimensional transformada, dada por:

$$\frac{S}{2} = \int_0^b Y \cdot dX \quad (5.120)$$

M_{sx}^{CT} : momento estático da curva adimensional transformada, em relação ao eixo X, dado por:

$$M_{sx}^{CT} = \int_0^b \frac{Y^2}{2} \cdot dX \quad (5.121)$$

M_{sy}^{CT} : momento estático da curva adimensional transformada, em relação ao eixo Y, dado por:

$$M_{sy}^{CT} = \int_0^b Y \cdot X \cdot dX \quad (5.122)$$

b, t : dados pelas equações 5.102 e 5.103, respectivamente.

Observando as equações 5.117 a 5.122 sugere-se a seguinte definição, mais específica, do problema de síntese da curva adimensional de áreas: dada uma trinca de valores requeridos de C_b , C_{w_p} e M_{sf}^{CA} , definida nos processos iniciais de otimização, o problema de síntese da curva adimensional de áreas é o da determinação dos ângulos α e β e da função que descreve uma curva adimensional transformada, com coordenadas e derivadas nos pontos extremos iguais às acima

mencionadas, de modo que os valores de C_b e M_{sf}^{CA} calculados através das equações 5.117 a 5.122, sejam iguais aos valores requeridos.

Para se obter esta função considera-se, conforme já antecipado no início deste item, que a curva adimensional transformada possa ser bem aproximada pelo mapeamento conforme de um círculo, realizado a partir da função de transformação que gera as formas conhecidas como "Formas de Lewis Estendidas". Este mapeamento está ilustrado na figura 5.13, a seguir. A função de transformação, daqui em diante chamada de função de Lewis-E (f_{LE}), e os procedimentos para se determinar seus coeficientes estão descritos no anexo A.

Neste anexo, mostra-se que a curva obtida através da função de Lewis-E, conforme representado na figura 5.13, pode ser descrita parametricamente através das seguintes equações:

$$\frac{X}{t} = c_1 * \cos \theta + c_2 * \cos \theta + c_3 * \cos 3\theta + c_4 * \cos 5\theta \quad (5.123)$$

$$\frac{Y}{t} = c_1 * \sin \theta - c_2 * \sin \theta - c_3 * \sin 3\theta - c_4 * \sin 5\theta \quad (5.124)$$

onde: $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$, conforme se mostra na figura 5.13.

Com as equações acima, é imediato verificar que a derivada dY/dX nas extremidades da curva, ou seja, quando $\theta=0$ e $\theta=\pi/2$, é infinita e zero respectivamente, atendendo portanto uma das condições necessárias para que a transformação definida pelas equações 5.111 e 5.112 gere uma curva adimensional com inclinações α e β em suas extremidades.

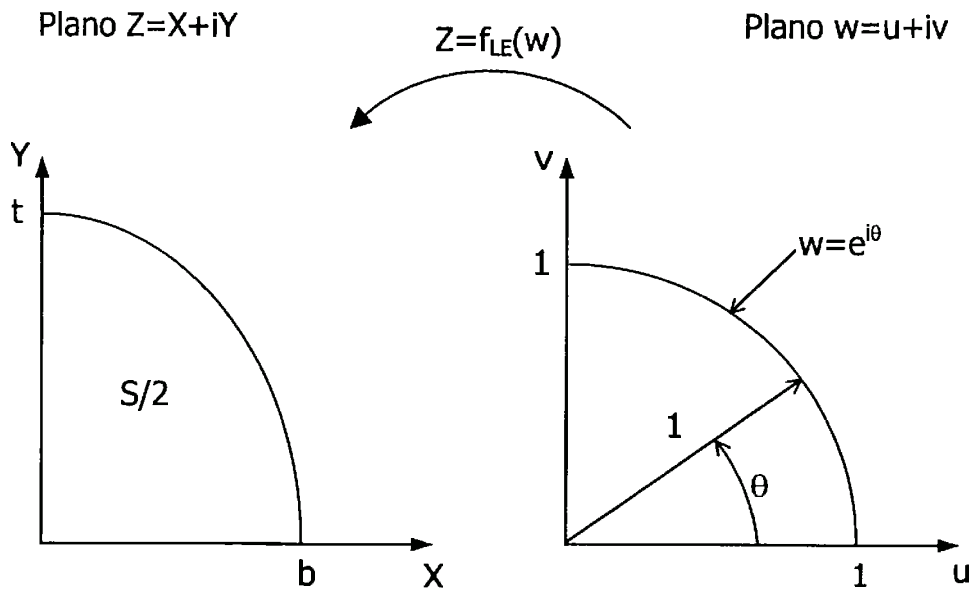


Figura 5.13 – Mapeamento das Formas de Lewis Estendidas

Para se determinar os coeficientes c_1 a c_4 deve-se estabelecer quatro condições a serem atendidas pela função de transformação. No caso das formas de Lewis estendidas mostra-se, no anexo A, que estas condições são estabelecidas impondo-se que as equações 5.123 e 5.124 satisfaçam os valores de b e t e das propriedades S e M_{sx}^{CT} , que se deseja obter na curva gerada. Desta imposição, com auxílio das equações 5.120 e 5.121, obtêm-se as seguintes relações:

$$\frac{b}{t} = c_1 + c_2 + c_3 + c_4 \quad (5.125)$$

$$1 = c_1 - c_2 + c_3 - c_4 \quad (5.126)$$

$$\frac{4}{\pi} * \frac{S}{2 * t^2} = \sum_{n=1}^4 (3 - 2n) * c_n^2 \quad (5.127)$$

$$\frac{4 * M_{sx}^{CT}}{t^3} = \sum_{l=1}^4 \sum_{m=1}^4 \sum_{n=1}^4 (3 - 2n) * c_l * c_m * c_n * I_{lmn} \quad (5.128)$$

onde:

$$J_{lmn} = \frac{1}{9 - 2(l + m + n)} - \frac{1}{3 - 2(l - m + n)} + \frac{1}{3 - 2(l + m - n)} + \frac{1}{3 - 2(-l + m + n)} \quad (5.129)$$

Além destas relações, em Reed e Nowacki [31] pode-se obter também a função que relaciona o momento estático em relação ao eixo Y (M_{sy}^{CT}) com os coeficientes das equações da curva transformada:

$$\frac{8 * M_{sy}^{CT}}{t^3} = \sum_{l=1}^4 \sum_{m=1}^4 \sum_{n=1}^4 (3 - 2n) * c_l * c_m * c_n * J_{lmn} \quad (5.130)$$

onde :

$$J_{lmn} = \frac{(-1)^{(4-l-m-n)}}{9 - 2(l + m + n)} + \frac{(-1)^{(l+l-m-n)}}{3 - 2(-l + m + n)} + \frac{(-1)^{(l-l+m-n)}}{3 - 2(l - m + n)} + \frac{(-1)^{(l-l-m+n)}}{3 - 2(l + m - n)} \quad (5.131)$$

Das equações 5.125 a 5.128, que relacionam os quatro coeficientes com propriedades da curva gerada, as duas primeiras podem ser analiticamente eliminadas, chegando-se a:

$$c_1 = \frac{b/t + 1}{2} - c_3 \quad (5.132)$$

$$c_2 = \frac{b/t - 1}{2} - c_4 \quad (5.133)$$

Os resultados acima indicam que, dados dois ângulos α e β e valores de b e t calculados de acordo com as equações 5.102 e 5.103, se os coeficientes c_1 e c_2 forem determinados de acordo com as equações 5.132 e 5.133, então as condições dadas por 5.125 e 5.126 serão satisfeitas e as equações 5.123 e 5.124 representarão uma curva transformada cujas coordenadas nas extremidades serão exatamente b e t , atendendo, portanto, as condições necessárias para que a curva adimensional

tenha uma extremidade superior com coordenadas $[C_{wp}, 1]$.

Para completar a definição da curva adimensional de áreas resta, portanto, determinar os coeficientes c_3 e c_4 de modo que os valores de S , M_{sx}^{CT} , e M_{sy}^{CT} , quando calculados de acordo com as equações 5.127, 5.128 e 5.130 e levados às equações 5.117 e 5.118, forneçam resultados de C_b , M_{sf}^{CA} e KB iguais aos valores requeridos, definidos nos processos iniciais de otimização. No entanto, esta determinação deve ser feita de modo que os coeficientes c_3 e c_4 satisfaçam algumas condições adicionais para que a curva transformada, definida pelas equações 5.123 e 5.124, não tenha alguma das possíveis formas degeneradas associadas ao mapeamento conforme adotado, das quais alguns exemplos estão mostrados no anexo B. Estas condições, de acordo com o anexo A, são as seguintes:

$$1 - 4 * c_3 - 4 * c_4 \geq 0 \quad (5.134)$$

$$\frac{b}{t} - 4 * c_3 + 4 * c_4 \geq 0 \quad (5.135)$$

$$8 * c_3 - 24 * c_4 + 1 \geq 0 \quad (5.136)$$

$$8 * c_3 + 24 * c_4 + \frac{b}{t} \geq 0 \quad (5.137)$$

$$\begin{aligned} & \max[0; c_4] * \max\left[0; \left(9 * c_3^2 - 10 * c_3 * c_4 + 145 * c_4^2 - 20 * \frac{b}{t} * c_4\right)\right] * \\ & * \max[0; (3 * c_3 + 25 * c_4)] * \max[0; (5 * c_4 - c_3)] \leq 0 \end{aligned} \quad (5.138)$$

$$\begin{aligned} & \max[0; -c_4] * \max\left[0; \left(9 * c_3^2 + 10 * c_3 * c_4 + 145 * c_4^2 + 20 * c_4\right)\right] * \\ & * \max[0; (3 * c_3 - 25 * c_4)] * \max[0; (-5 * c_4 - c_3)] \leq 0 \end{aligned} \quad (5.139)$$

onde: $\max[x;y]$ é um operador que retorna o maior valor entre x e y .

5.3.2 – A Síntese da Curva Vertical de Áreas

De acordo com o apresentado no item anterior, as equações 5.89, 5.90, 5.102, 5.103, 5.111, 5.112, 5.117, 5.118, 5.123, 5.124, 5.127, 5.128, 5.130, 5.132 e 5.133, juntamente com as condições 5.134 a 5.139, representam o modelo de síntese, ou a descrição matemática do problema de síntese da curva vertical de áreas. Este problema consiste na determinação de quatro variáveis, os ângulos α e β e os coeficientes c_3 e c_4 , que, quando substituídas nas equações acima, geram uma curva vertical de áreas de forma não degenerada e que tem valores de C_b e M_{sf}^{CA} (ou KB) iguais aos valores fornecidos pelos processos iniciais de otimização.

Para solucionar este problema propõe-se, neste trabalho, que o mesmo seja também formulado como um problema de otimização por múltiplos critérios, empregando-se a técnica da programação por objetivos. Neste caso, as variáveis de decisão no modelo de otimização são: α ; β ; c_3 e c_4 .

Com base nos conceitos da programação por objetivos delineados no capítulo 3, propõe-se então a seguinte estrutura para o modelo de otimização da curva vertical de áreas:

Modelo de Otimização da Curva Vertical de Áreas

- **Dados:**

- C_b (coeficiente de bloco requerido, obtido do processo inicial de otimização)
- $C_{w_{pr}}$ (coeficiente da linha d'água de projeto, baseado no comprimento entre perpendiculares, obtido na otimização desta linha d'água)
- KB_r (altura requerida do centro de carena, obtida do processo inicial de otimização)

- T_r (calado de projeto requerido, obtido do processo inicial de otimização)
- α^s (valor máximo admissível para o ângulo α)
- β^s (valor máximo admissível para o ângulo β)
- c_3^i (valor mínimo admissível para o coeficiente c_3)
- c_3^s (valor máximo admissível para o coeficiente c_3)
- c_4^i (valor mínimo admissível para o coeficiente c_4)
- c_4^s (valor máximo admissível para o coeficiente c_4)

• **Variáveis:**

- $\alpha ; \beta ; c_3 ; c_4$

• **Restrições Implícitas:**

$$1 - 4 * c_3 - 4 * c_4 \geq 0 \quad (5.140)$$

$$\frac{b}{t} - 4 * c_3 + 4 * c_4 \geq 0 \quad (5.141)$$

$$8 * c_3 - 24 * c_4 + 1 \geq 0 \quad (5.142)$$

$$8 * c_3 + 24 * c_4 + \frac{b}{t} \geq 0 \quad (5.143)$$

$$\max[0; c_4] * \max\left[0; \left(9 * c_3^2 - 10 * c_3 * c_4 + 145 * c_4^2 - 20 * \frac{b}{t} * c_4\right)\right] * \quad (5.144)$$

$$* \max[0; (3 * c_3 + 25 * c_4)] * \max[0; (5 * c_4 - c_3)] \leq 0$$

$$\max[0; -c_4] * \max\left[0; \left(9 * c_3^2 + 10 * c_3 * c_4 + 145 * c_4^2 + 20 * \frac{b}{t} * c_4\right)\right] * \quad (5.145)$$

$$* \max[0; (3 * c_3 - 25 * c_4)] * \max[0; (-5 * c_4 - c_3)] \leq 0$$

$$\text{onde: } b = Cw_{pr} - tg\beta \quad (5.146)$$

$$t = \frac{1 - Cw_{pr} * tg\alpha}{1 - tg\beta * tg\alpha} \quad (5.147)$$

- **Restrições Explícitas (Limites):**

$$0 \leq \alpha \leq \alpha^s \quad (5.148)$$

$$0 \leq \beta \leq \beta^s \quad (5.149)$$

$$c_3^i \leq c_3 \leq c_3^s \quad (5.150)$$

$$c_4^i \leq c_4 \leq c_4^s \quad (5.151)$$

- **Metas:**

$$\frac{(Cb - Cb_r)}{Cb_r} + d_1^- - d_1^+ = 0 \quad (5.152)$$

$$\frac{\left(M_{sf}^{CA} - Cb_r * \frac{KB_r}{T_r} \right)}{Cb_r * \frac{KB_r}{T_r}} + d_2^- - d_2^+ = 0 \quad (5.153)$$

onde:

$$\rightarrow Cb = \frac{S}{2} + \frac{Cw_{pr}}{2} - \frac{b * t}{2} \quad (5.154)$$

$$\rightarrow M_{sf}^{CA} = \frac{t^3 * tg\beta}{3} + \frac{b^3 * k_1^3 * tg^2\alpha}{3} + \frac{b^2 * t * tg\alpha * (2 * k_1^2 - k_1)}{2} + b * t^2 * (k_1 - 1) + \frac{t * S}{2} - M_{sx}^{CT} + k_1 * tg\alpha * M_{sy}^{CT} \quad (5.155)$$

$$\rightarrow k_1 = \frac{1}{(1 - \operatorname{tg}\alpha * \operatorname{tg}\beta)} \quad (5.156)$$

→ b e t dados pelas equações 5.146 e 5.147, respectivamente.

→ S dado pela equação 5.127.

→ M_{sx}^{CT} dado pela equação 5.128.

→ M_{sy}^{CT} dado pela equação 5.130.

→ c_1 e c_2 dados pelas equações 5.132 e 5.133, respectivamente.

- **Função Objetivo a ser Minimizada:**

$$Z = P_1 * (d_1^- + d_1^+) + P_2 * (d_2^- + d_2^+) \quad (5.157)$$

Este modelo de otimização da curva vertical de áreas foi implementado no sistema SHOPS e deve ser executado após a otimização da linha d'água de projeto. A solução numérica deste problema de otimização é também obtida através do algoritmo de busca direta desenvolvido por Augusto [12]. Como resultado do modelo proposto, obtêm-se as seguintes características da curva vertical de áreas:

- **Resultados:**

- funções $h(\theta)$ e $f(\theta)$, conforme figura 5.8.
- ângulos α e β .
- C_b e K_B .

5.4 – MODELO DE SÍNTESE DA SEÇÃO MESTRA

Neste trabalho considera-se que a seção mestra seja a seção transversal de maior área na embarcação e que a mesma possa estar localizada longitudinalmente em qualquer posição e não necessariamente a meio comprimento entre perpendiculares. Por hipótese, considera-se também que as bocas máximas das linhas d'água do casco ocorram exatamente na posição da seção mestra. Na figura 5.14 ilustra-se a forma típica da meia seção mestra onde identifica-se os principais parâmetros e características geométricas desta baliza.

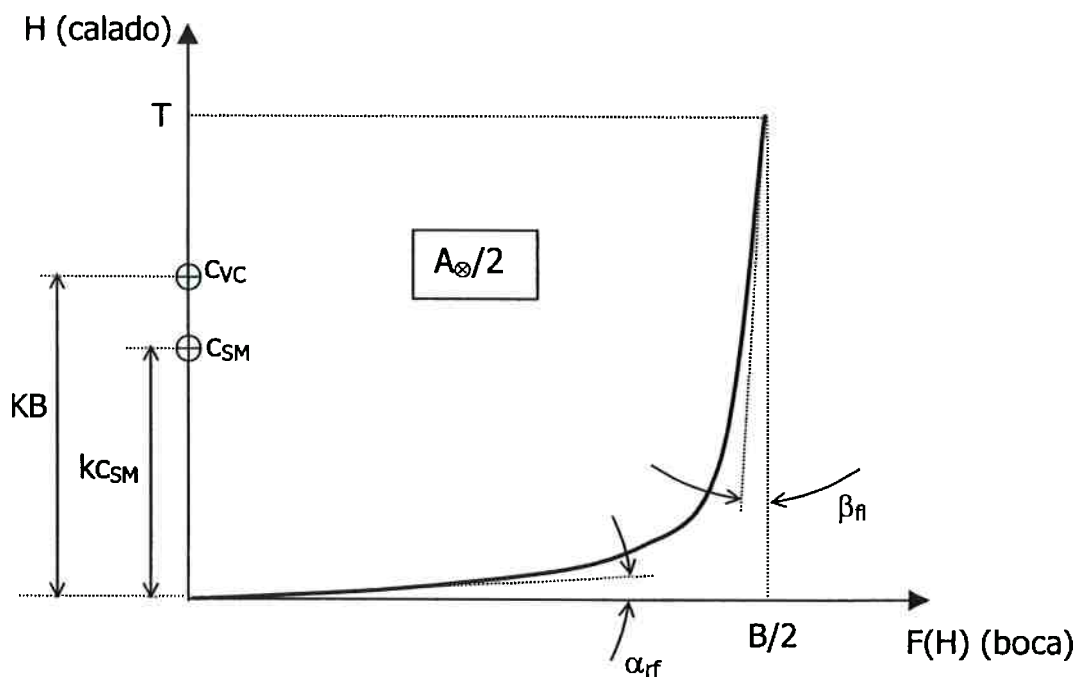


Figura 5.14 – Seção Mestra

Os parâmetros indicados na figura 5.14 têm o seguinte significado:

A_{\otimes} : área da seção mestra.

T : calado do navio.

B : boca do navio.

c_{SM} : centro geométrico da seção mestra.

c_{VC} : centro de carena do casco.

$k_{c_{SM}}$: altura do centro geométrico da seção mestra.

KB : altura do centro de carena do casco.

α_{rf} : ângulo de elevação do fundo da seção ("rise of floor").

β_{fl} : ângulo de inclinação do costado da seção ("flare").

Tendo em vista a hipótese formulada acima e com a ajuda da figura 5.14, considera-se que a curva que define meia seção mestra seja equivalente a uma função que relaciona as bocas máximas das linhas d'água do casco com o calado. Com base na figura 5.14, duas propriedades importantes desta curva ou função podem ser identificadas. Estas propriedades são as seguintes:

- (1) O valor da área entre a curva e o eixo dos calados é igual à metade da área A_{\otimes} da seção mestra.
- (2) No calado de projeto T , a boca fornecida pela curva corresponde à metade da boca B da linha d'água de projeto.

Assim, a geração da baliza da seção mestra pode ser descrita como um processo de síntese que tem por objetivo determinar uma função que relacione as bocas das linhas d'água com os diferentes calados do navio e, para a qual, o valor das duas propriedades acima seja igual aos valores de $A_{\otimes}/2$ e $B/2$, determinados nos processos anteriores de otimização.

É importante garantir neste processo de síntese que a altura resultante do centro geométrico desta baliza ($k_{c_{SM}}$) seja coerente com a altura (KB) do centro de carena do casco. Tendo em vista as formas usuais dos cascos das embarcações e o

fato da seção mestra ser a seção de maior área transversal, o seu centro geométrico situa-se normalmente abaixo do centro de carena. Para se estimar de forma coerente esta posição, pode-se utilizar o mesmo método de estimativa da altura do centro de carena do casco, empregado no processo de otimização inicial. Aplicando então este método, o valor esperado para a altura do centro geométrico da seção mestra é o seguinte:

- Para $C_{\otimes} < 0.90$

$$k_{C_{SM}} = \frac{T}{3} * \left(\frac{5}{2} - C_{\otimes} \right) \quad (5.158)$$

- Para $C_{\otimes} \geq 0.90$

$$k_{C_{SM}} = T * \left(\frac{1}{C_{\otimes} + 1} \right) \quad (5.159)$$

onde: C_{\otimes} é o coeficiente de seção mestra, dado por:

$$C_{\otimes} = \frac{C_b}{C_p} \quad (5.160)$$

Assim, na definição dada acima para o processo de síntese da seção mestra é conveniente incluir também o atendimento a altura do centro geométrico da seção, determinado de acordo com as equações acima.

De modo a conferir generalidade a este processo é conveniente realizar a seguinte adimensionalização de variáveis:

$$h = \frac{H}{T} \quad (5.161)$$

$$f(h) = \frac{F(H)}{B/2} \quad (5.162)$$

A curva resultante desta adimensionalização, chamada de curva adimensional da seção mestra, está representada na figura 5.15 a seguir.

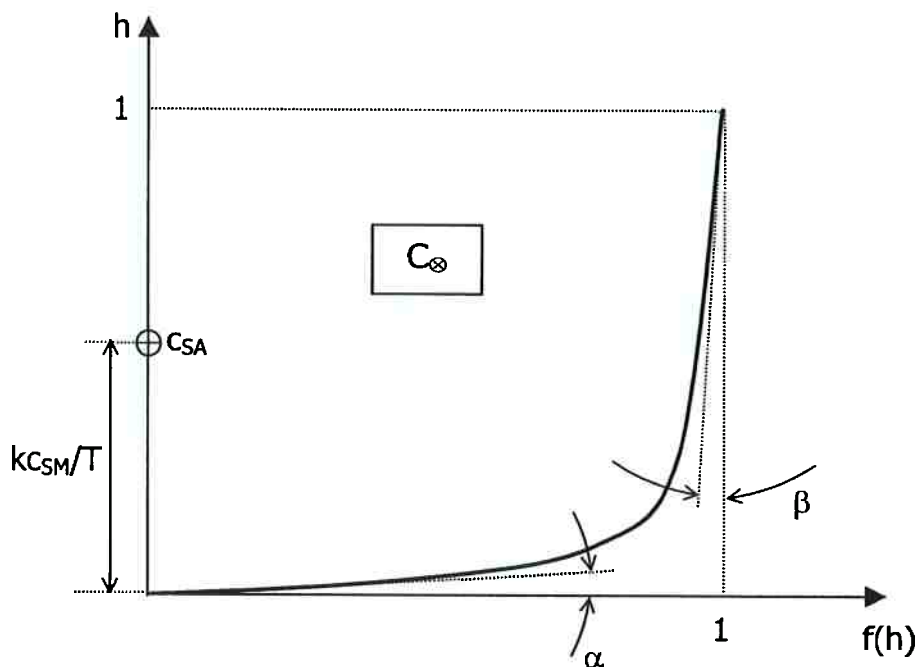


Figura 5.15 – Curva Adimensional da Seção Mestra

Na figura 5.15, o centro geométrico passa a ser representado por c_{SA} e as inclinações nas extremidades da curva pelos ângulos α e β .

Como consequência desta adimensionalização, a curva adimensional da seção mestra apresenta a seguintes características:

- (1) a extremidade da curva correspondente ao calado de projeto ($h=1$), tem coordenada horizontal ($f(1)$) igual a 1.
- (2) a área compreendida entre a curva e o eixo vertical (h) é igual ao coeficiente de seção mestra (C_{∞}) da embarcação.
- (3) a distância do centro geométrico (c_{SA}) desta área ao eixo horizontal ($f(h)$) é igual a razão entre a altura do centro geométrico da seção mestra e o calado da embarcação (kC_{SM}/T).

Tendo em vista estas propriedades da curva adimensional da seção mestra, é conveniente redefinir o processo de geração da seção mestra como um processo de síntese para se determinar uma função $f(h)$ tal que $f(1)=1$ e tal que a curva representada por ela apresente valores para as duas últimas propriedades acima iguais aos valores requeridos de C_{∞} e kc_{SM}/T , obtidos dos processos anteriores de otimização. Em termos matemáticos estes objetivos podem ser representados da seguinte forma:

$$f(1) = 1 \quad (5.163)$$

$$\int_0^1 f(h) \cdot dh = C_{\infty} \quad (5.164)$$

$$M_{sf}^{SA} = C_{\infty} * \frac{kc_{SM}}{T} \quad (5.165)$$

onde: M_{sf}^{SA} é o momento estático, em relação eixo horizontal ($f(h)$), da área entre a curva adimensional e o eixo vertical (h), dado por:

$$M_{sf}^{SA} = \int_0^1 h \cdot f(h) \cdot dh \quad (5.166)$$

É imediato verificar que o problema acima é exatamente igual ao problema de geração da curva adimensional de áreas descrito no item anterior, devendo-se apenas trocar os valores Cw_p , C_b e KB/T , referentes à curva vertical, pelos equivalentes 1 , C_{∞} e kc_{SM}/T , referentes à seção mestra.

Assim, com base na discussão apresentada no item 5.3 e na semelhança entre os problemas de síntese da seção mestra e da curva vertical de áreas, o caminho

natural para a geração da seção mestra seria também o de considerar que a mesma pode ser aproximadamente representada pelas formas de Lewis estendidas, de modo que o processo de síntese desta seção seria exatamente o mesmo que o da curva vertical de áreas. No entanto, esta representação é limitada para a geometria desta seção, tendo em vista que os coeficientes de seção mestra podem assumir valores maiores do que 0,95 e, em muitos casos, valores praticamente iguais a 1. Nestes casos, conforme apresentado no anexo A, não se consegue obter, através da transformação conforme adotada, uma forma não degenerada que tenha uma área equivalente a estes valores de coeficiente de seção mestra e uma altura coerente de centro geométrico, o que tornaria bastante pobre a representação destas seções.

Para contornar esta situação, propõe-se, então, que a seção mestra possa ser aproximada através de duas representações distintas. A primeira representação seria através das formas de Lewis estendidas. A segunda, chamada de representação por "formas regulares", onde considera-se que o contorno da seção mestra seja formado através de uma combinação de retas e arcos de círculo, as linhas retas formando o fundo e o costado, e os arcos de círculo formando o bojo da seção. Na figura 5.16, a seguir, ilustra-se esta representação onde identifica-se os principais parâmetros e características geométricas associadas à mesma.

Os parâmetros adicionais indicados nesta figura têm o seguinte significado:

R_b : raio do setor circular que representa o bojo.

ch_{cb} : coordenada horizontal do centro do setor circular.

cv_{cb} : coordenada vertical do centro do setor circular.

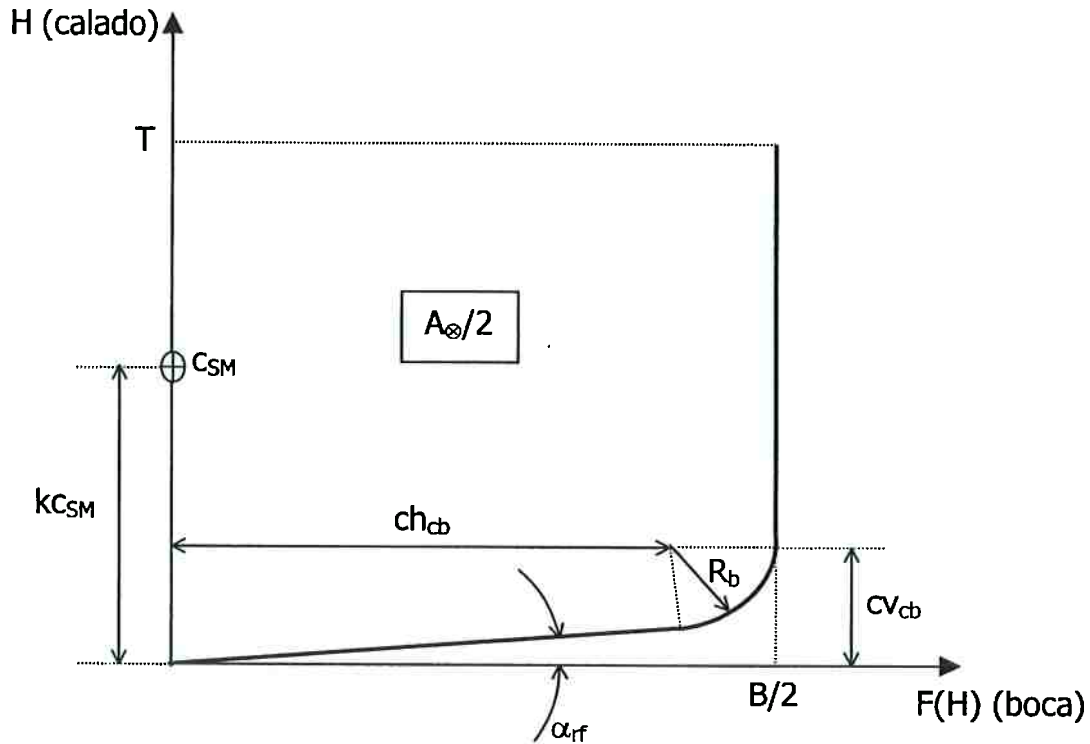


Figura 5.16 – Seção Mestra de Forma Regular

Com base na descrição acima e na figura 5.16, após algum trabalho algébrico, pode-se obter as seguintes relações entre os parâmetros que caracterizam a seção mestra de forma regular:

$$R_b = \sqrt{\frac{4 * (1 - C_{\otimes}) * B * T - B^2 * \operatorname{tg} \alpha_{rf}}{8 * \left(\frac{1 - \operatorname{tg} \alpha_{rf}}{1 + \operatorname{tg} \alpha_{rf}} + \frac{\alpha_{rf}}{2} - \frac{\pi}{4} \right)}} \quad (5.167)$$

$$\frac{A_{\otimes}}{2} = \frac{B * T}{2} - \frac{B^2 * \operatorname{tg} \alpha_{rf}}{8} - R_b^2 * \left[\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\alpha_{rf}}{2} \right) - \frac{\pi}{4} + \frac{\alpha_{rf}}{2} \right] \quad (5.168)$$

$$M_{SF}^{SM} = \frac{B * T^2}{4} - R_b^2 * \left[\frac{R_b}{\cos \alpha_{rf}} + \operatorname{tg} \alpha_{rf} * \left(\frac{B}{2} - R_b \right) \right] * \left[\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\alpha_{rf}}{2} \right) - \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\alpha_{rf}}{2} \right) \right] +$$

$$+ \frac{R_b^3}{3} * \left[\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\alpha_{rf}}{2} \right) * \cos \alpha_{rf} + \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\alpha_{rf}}{2} \right) * \frac{(1 - \operatorname{sen} \alpha_{rf})}{2} - 1 + \operatorname{sen} \alpha_{rf} \right] -$$

$$\frac{B^3 * \operatorname{tg}^2 \alpha_{rf}}{48} \quad (5.169)$$

$$kC_{SM} = \frac{M_{SF}^{SM}}{A_{\otimes}/2} \quad (5.170)$$

$$cv_{cb} = \frac{R_b}{\cos \alpha_{rf}} + \left(\frac{B}{2} - R_b \right) * \operatorname{tg} \alpha_{rf} \quad (5.171)$$

$$ch_{cb} = \frac{B}{2} - R_b \quad (5.172)$$

onde: M_{SF}^{SM} é o momento estático de meia seção mestra em relação ao eixo horizontal (F(H)).

A definição da seção mestra através das equações acima se faz de forma determinada, ou seja, fixa-se o valor de α_{rf} e , juntamente com os valores requeridos de B, T e C_{\otimes} , calcula-se os valores resultantes de R_b , ch_{cb} , cv_{cb} e kC_{SM} .

A representação da seção através da forma regular definida acima somente é aplicada no processo de síntese caso a representação por formas de Lewis estendidas se mostre insatisfatória. Isto normalmente ocorrerá em casos onde o coeficiente de seção mestra requerido for maior do que 0,95. Nestas situações, a seção é bastante "cheia", muito próxima de um retângulo, e a aproximação por formas regulares, embora bastante simples, tende a representar de forma adequada a seção mestra.

Desta forma, de acordo com as propostas de representação, a geração da seção mestra pode, eventualmente, se dar em duas etapas. Numa primeira etapa a geração da seção mestra pode ser definida como um processo de síntese exatamente igual ao processo de síntese da curva vertical de áreas, devendo-se apenas substituir os valores Cw_p , C_b e KB/T , empregados nas equações indicadas no

item 5.3.2, pelos equivalentes 1, C_{∞} e kc_{SM}/T referentes à seção mestra. Caso o erro entre o valores de C_{∞} ou de kc_{SM} obtidos e o valores requeridos seja maior do que um erro máximo admissível, realiza-se a segunda etapa de geração, na qual define-se a seção mestra através das equações das formas regulares apresentadas.

Tendo em vista esta definição do problema de síntese da seção mestra, propõe-se neste trabalho que a primeira etapa seja formulada como um problema de otimização por múltiplos critérios exatamente igual ao problema de síntese da curva vertical de áreas. Caso o resultado, em termos dos valores de C_{∞} e kc_{SM} , não seja satisfatório, adota-se um valor fixo para α_{rf} , tornando o problema determinado, e a seção mestra passa a ser representada através de uma forma regular com características determinadas diretamente através das equações acima definidas.

Com base nestas considerações propõe-se então a seguinte estrutura para o modelo de otimização da seção mestra:

Modelo de Otimização da Seção Mestra

- **Dados:**

- $C_{\infty r}$ (coeficiente de seção mestra requerido, obtido do processo inicial de otimização)
- kc_{SMr} (altura requerida do centro geométrico da seção mestra, obtida através das equações 5.158 ou 5.159)
- T_r (calado de projeto requerido, obtido do processo inicial de otimização)
- B_r (boca requerida da linha d'água de projeto, obtida do processo inicial de otimização)
- α^s (valor máximo admissível para o ângulo α)
- β^s (valor máximo admissível para o ângulo β)
- c_3^i (valor mínimo admissível para o coeficiente c_3)

- c_3^s (valor máximo admissível para o coeficiente c_3)
- c_4^i (valor mínimo admissível para o coeficiente c_4)
- c_4^s (valor máximo admissível para o coeficiente c_4)
- tolC (valor máximo admitido para o erro de C_{\otimes})
- tolk (valor máximo admitido para o erro de kc_{SM})
- α_{fir} (ângulo de elevação do fundo requerido para formas regulares)

Etapa 1

- **Variáveis:**

- $\alpha ; \beta ; c_3 ; c_4$

- **Restrições Implícitas:**

- $1 - 4 * c_3 - 4 * c_4 \geq 0$ (5.173)

- $\frac{b}{t} - 4 * c_3 + 4 * c_4 \geq 0$ (5.174)

- $8 * c_3 - 24 * c_4 + 1 \geq 0$ (5.175)

- $8 * c_3 + 24 * c_4 + \frac{b}{t} \geq 0$ (5.176)

- $\max[0; c_4] * \max\left[0; \left(9 * c_3^2 - 10 * c_3 * c_4 + 145 * c_4^2 - 20 * \frac{b}{t} * c_4\right)\right] * \max[0; (3 * c_3 + 25 * c_4)] * \max[0; (5 * c_4 - c_3)] \leq 0$ (5.177)

- $\max[0; -c_4] * \max\left[0; \left(9 * c_3^2 + 10 * c_3 * c_4 + 145 * c_4^2 + 20 * \frac{b}{t} * c_4\right)\right] * \max[0; (3 * c_3 - 25 * c_4)] * \max[0; (-5 * c_4 - c_3)] \leq 0$ (5.178)

onde: $b = 1 - \text{tg}\beta$ (5.179)

$$t = \frac{1 - \text{tg}\alpha}{1 - \text{tg}\beta * \text{tg}\alpha} \quad (5.180)$$

• **Restrições Explícitas (Limites):**

$$- 0 \leq \alpha \leq \alpha^s \quad (5.181)$$

$$- 0 \leq \beta \leq \beta^s \quad (5.182)$$

$$- c_3^i \leq c_3 \leq c_3^s \quad (5.183)$$

$$- c_4^i \leq c_4 \leq c_4^s \quad (5.184)$$

• **Metas:**

$$(1) \frac{(C_{\otimes} - C_{\otimes r})}{C_{\otimes r}} + d_1^- - d_1^+ = 0 \quad (5.185)$$

$$(2) \frac{\left(M_{sf}^{SA} - C_{\otimes r} * \frac{kC_{SMr}}{T_r} \right)}{C_{\otimes r} * \frac{kC_{SMr}}{T_r}} + d_2^- - d_2^+ = 0 \quad (5.186)$$

onde:

$$\rightarrow C_{\otimes} = \frac{S}{2} + \frac{1}{2} - \frac{b * t}{2} \quad (5.187)$$

$$\rightarrow M_{sf}^{SA} = \frac{t^3 * \text{tg}\beta}{3} + \frac{b^3 * k_1^3 * \text{tg}^2\alpha}{3} + \frac{b^2 * t * \text{tg}\alpha * (2 * k_1^2 - k_1)}{2} + b * t^2 * (k_1 - 1) + \frac{t * S}{2} - M_{sx}^{CT} + k_1 * \text{tg}\alpha * M_{sy}^{CT} \quad (5.188)$$

$$\rightarrow k_1 = \frac{1}{(1 - \text{tg}\alpha * \text{tg}\beta)} \quad (5.189)$$

→ b e t dados pelas equações 5.179 e 5.180, respectivamente.

→ S dado pela equação 5.127.

→ M_{sx}^{CT} dado pela equação 5.128.

→ M_{sy}^{CT} dado pela equação 5.130.

→ c_1 e c_2 dados pelas equações 5.132 e 5.133, respectivamente.

- **Função Objetivo a ser Minimizada:**

$$Z = P_1 * (d_1^- + d_1^+) + P_2 * (d_2^- + d_2^+) \quad (5.190)$$

- **Avaliação do Erro de C_{\otimes} e de kc_{SM}**

- $ErC = \left| \frac{C_{\otimes} - C_{\otimes r}}{C_{\otimes r}} \right| \quad (5.191)$

- $Erk = \left| \frac{kc_{SM} - kc_{SMr}}{kc_{SMr}} \right| \quad (5.192)$

- Se $ErC > tolC$ ou $Erk > tolk$ então passa-se à etapa 2.

Etapa 2

- R_b : de acordo com a equação 5.167.
- M_{SF}^{SM} : de acordo com a equação 5.169.
- kc_{SM} : de acordo com a equação 5.170.
- cv_{cb} : de acordo com a equação 5.171.
- ch_{cb} : de acordo com a equação 5.172.

Este modelo de otimização da seção mestra foi implementado no sistema SHOPS e deve ser executado após a otimização da curva vertical de áreas. A solução numérica da etapa 1 deste problema de otimização é também obtida através do algoritmo de busca direta desenvolvido por Augusto [12]. Como resultado do modelo proposto obtêm-se as seguintes características da seção mestra:

- **Resultados:**

- funções $h(\theta)$ e $f(\theta)$, e ângulos α e β conforme figura 5.15.
- função $F(H)$ e ângulo α_{rf} conforme figura 5.16.
- C_{\otimes} e kc_{SM} .

5.5 – MODELO DE SÍNTESE DO PERFIL LONGITUDINAL

O perfil longitudinal da embarcação é a curva que resulta da interseção da superfície do casco com o plano vertical longitudinal que corresponde ao plano de simetria do casco. Ela é a última das três curvas de fronteira que são necessárias, de acordo com o método proposto para geração do casco, para que se possa definir o plano de linhas d'água que irá representar a superfície do casco. Para efeito deste trabalho, considera-se que o perfil seja formado a partir da união de três trechos de curvas representando, respectivamente, as regiões de proa, média e de popa do casco. Na figura 5.17 ilustra-se, de forma esquemática, esta composição do perfil longitudinal.

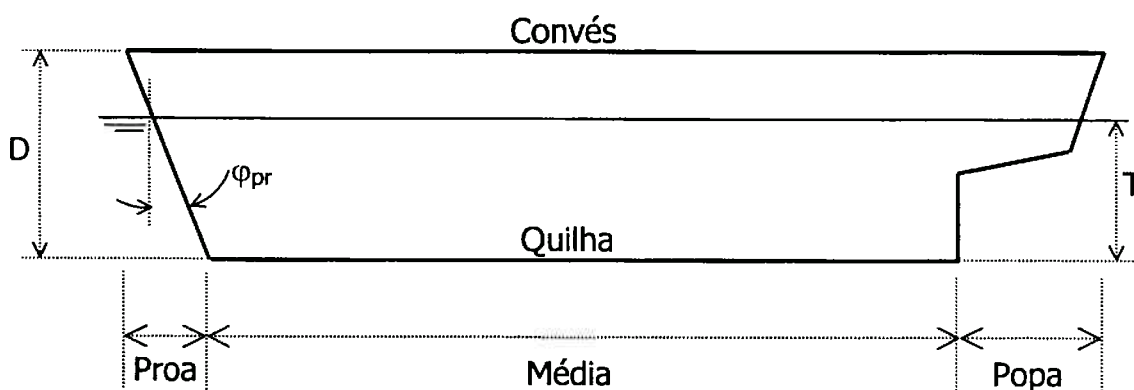


Figura 5.17 – Perfil Longitudinal

Com o auxílio da figura 5.17, é imediato verificar que a forma da porção do perfil correspondente à parte imersa do casco, situada abaixo do calado de projeto, define as coordenadas longitudinais de início e fim de qualquer linha d'água localizada num calado inferior a este. Portanto, a forma desta porção do perfil tem uma influência importante na definição do plano de linhas d'água pois estabelece os limites longitudinais dentro dos quais deverão se localizar as linhas d'água que formarão este plano.

A forma do perfil na região imersa do casco é definida essencialmente pelas aberturas de popa e proa do casco e pelo formato da quilha. Basicamente, a abertura de popa é definida pela necessidade de espaço para acomodar adequadamente o hélice e o leme da embarcação. Normalmente, a quilha, em navios mercantes convencionais, é reta e paralela à linha do calado de projeto, tendo em vista a facilidade de construção e de docagem da embarcação. A forma da roda de proa, para um dado comprimento de linha d'água de projeto e coeficiente de bloco da embarcação, normalmente resulta como consequência da distribuição longitudinal de áreas nas diversas linhas d'água para atender a posição longitudinal especificada para o centro de carena (LCB).

Das características listadas acima que definem a forma do perfil longitudinal, exceto aquelas relativas à região de proa, nenhuma das demais foi explicitamente considerada nos processos anteriores de otimização. Deste modo, não é razoável desenvolver um modelo de síntese para o perfil visando sua formulação como um problema de otimização, principalmente nas regiões da popa e da quilha, já que não se dispõe de elementos para se estabelecer metas e objetivos para esta otimização relacionados com atributos e características do casco determinados anteriormente. No caso da região de proa, de acordo com a discussão apresentada acima, é mais razoável que a definição da forma do perfil ocorra como consequência do modelo de síntese do plano de linhas d'água, que está descrito no próximo item.

Sendo assim e tendo em vista que a linha reta é a forma usual da quilha em navios convencionais, o modelo de síntese da forma do perfil a ser definido neste item se limitará apenas à região da popa e fornecerá a geometria desta região de

forma determinada, deixando a região de proa para ser definida no processo de síntese do plano de linhas d'água. Como resultado deste modelo, além da definição do perfil popa, se obterá também o valor das coordenadas x_f do final de qualquer linha d'água situada em calado inferior ao de projeto.

5.5.1 – O Perfil na Região de Popa

Conforme já comentado, a forma do perfil na região de popa é definida pelo tamanho da abertura necessária para acomodar o hélice e o leme da embarcação. No caso do hélice, esta abertura deve ser suficiente para manter a circunferência definida pelo diâmetro do hélice acima da linha da quilha e para propiciar folgas adequadas entre o casco e a ponta do hélice, de modo a evitar problemas de vibração no casco. No caso do leme, a abertura deve ser suficiente para acomodar a área de leme necessária para dotar a embarcação das características desejadas de manobrabilidade e para mantê-lo com as extremidades inferior e de ré situadas acima da linha da quilha e antes do final da linha d'água de projeto, respectivamente. Na figura 5.18 ilustra-se as características desta abertura de popa e identifica-se as folgas que devem ser respeitadas para atender estes requisitos.

Para definir a geometria da abertura é necessário primeiro definir os tamanhos do hélice e leme e estabelecer as folgas necessárias. No processo inicial de otimização o tamanho e a posição do leme já foram preliminarmente estimados para se determinar o comprimento da linha d'água de projeto. Para o hélice, da mesma forma, adota-se neste trabalho formulações empíricas para estimativas de diâmetro e folgas baseadas em estatísticas de valores observados em embarcações existentes e em valores típicos sugeridos por Sociedades Classificadoras.

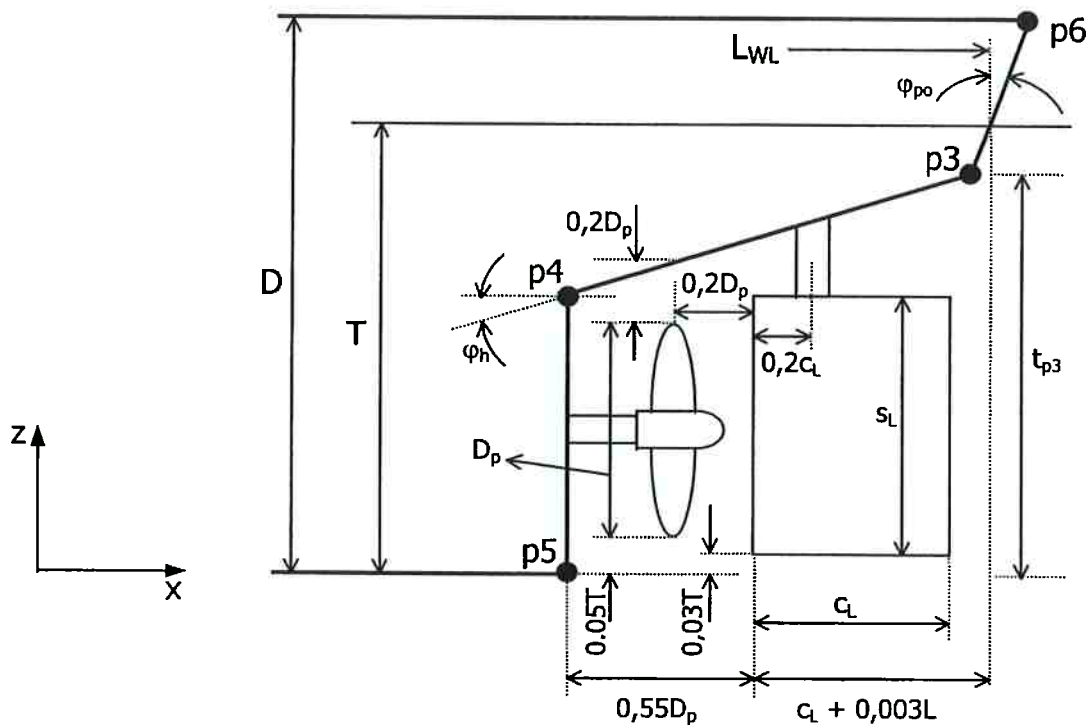


Figura 5.18 – Abertura do Perfil de Popa

As folgas indicadas na figura 5.18 já refletem os valores sugeridos em [19], e as dimensões do hélice e leme são determinadas a partir das seguintes estimativas:

(1) Hélice [32]

$$D_p = 0,65 * T \quad (5.193)$$

$$D_p \leq 8,5 \text{ m} \quad (5.194)$$

onde: D_p : diâmetro do hélice.

(2) Leme (ver capítulo 4)

$$A_L = \frac{T * L}{100} * \left[1 + 25 * \left(\frac{B}{L} \right)^2 \right] \quad (5.195)$$

$$s_L = 0,7 * T \quad (5.196)$$

$$c_L = \frac{A_L}{s_L} \quad (5.197)$$

onde: A_L : área do leme.

s_L : envergadura do leme.

c_L : corda do leme.

Estabelecidas as dimensões do hélice e do leme e as folgas indicadas na figura 5.18, o passo seguinte é determinar a curva que define a abertura do perfil de popa com as características desejadas. Tendo em vista a pequena quantidade de informações disponíveis para determinação desta curva e o fato de que o perfil a ser determinado representa uma aproximação da forma do casco, estabelece-se que a curva do perfil de popa será aproximada por três segmentos de reta ligando os pontos p_3 , p_4 , p_5 e p_6 indicados na figura 5.18. As coordenadas destes pontos podem ser determinadas a partir das folgas e dimensões mostradas nesta figura, adotando-se para isto, uma condição suplementar de que a coordenada vertical do ponto p_3 , representada na figura pela dimensão t_{p3} , não seja maior do que o calado de projeto T . O procedimento para se determinar estas coordenadas e, conseqüentemente, o perfil da popa, está resumido a seguir:

(1) Avaliação inicial de t_{p3}

$$t_{p3} = (c_L + 0,003 * L + 0,55 * D_p) * \left(\frac{1,2 * D_p - 0,68 * T}{0,35 * D_p} \right) + 0,73 * T \quad (5.198)$$

(2) Se $t_{p3} \geq T$, então:

$$- \operatorname{tg} \varphi_h = \frac{(0,95 * T - 1,2 * D_p)}{(c_L + 0,003 * L + 0,2 * D_p)} \quad (5.199)$$

– ponto p3

$$x_{p3} = L_{WL} \quad (5.200)$$

$$z_{p3} = T \quad (5.201)$$

– ponto p4

$$x_{p4} = L_{WL} - (0,003 * L + c_L + 0,55 * D_p) \quad (5.202)$$

$$z_{p4} = T - (0,003 * L + c_L + 0,55 * D_p) * \text{tg} \varphi_h \quad (5.203)$$

– ponto p5

$$x_{p5} = L_{WL} - (0,003 * L + c_L + 0,55 * D_p) \quad (5.204)$$

$$z_{p5} = 0 \quad (5.205)$$

– ponto p6

$$x_{p6} = L_{WL} + (D - T) * \text{tg} \varphi_{po} \quad (5.206)$$

$$z_{p6} = D \quad (5.207)$$

(3) Se $t_{p3} < T$, então:

$$\text{tg} \varphi_h = \frac{(1,2 * D_p - 0,68 * T)}{0,35 * D_p} \quad (5.208)$$

– ponto p3

$$x_{p3} = L_{WL} - (T - t_{p3}) * \left(\cos \varphi_{po} + \frac{\text{sen} \varphi_{po}}{\text{tg} \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_h - \varphi_{po} \right)} \right) * \text{sen} \varphi_{po} \quad (5.209)$$

$$z_{p3} = T - (T - t_{p3}) * \left(\cos \varphi_{po} + \frac{\text{sen} \varphi_{po}}{\text{tg} \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_h - \varphi_{po} \right)} \right) * \cos \varphi_{po} \quad (5.210)$$

– ponto p4

$$x_{p4} = L_{WL} - (0,003 * L + c_L + 0,55 * D_p) \quad (5.211)$$

$$z_{p4} = 0,73 * T \quad (5.212)$$

– ponto p5

$$x_{p5} = L_{WL} - (0,003 * L + c_L + 0,55 * D_p) \quad (5.213)$$

$$z_{p5} = 0 \quad (5.214)$$

– ponto p6

$$x_{p6} = L_{WL} + (D - T) * \text{tg}\varphi_{po} \quad (5.215)$$

$$z_{p6} = D \quad (5.216)$$

As equações acima formam o modelo matemático de síntese do perfil de popa. Verifica-se nas mesmas que o perfil de popa, segundo este modelo, pode ser completamente determinado a partir apenas das dimensões principais do casco definidas no processo inicial de otimização, devendo-se somente especificar um valor desejado para o ângulo φ_{po} que, sem nenhuma implicação importante, pode ser adotado como zero. Determinadas, então, as coordenadas dos pontos do perfil de popa, é imediato se calcular a posição longitudinal do final de qualquer linha d'água situada num calado inferior ao de projeto, posição esta que será representada daqui em diante pelo símbolo x_{fW} .

O modelo de síntese descrito neste item foi implementado no sistema SHOPS, devendo ser executado após a definição da seção mestra. Para sua execução, deve-se fixar previamente o número N_w de linhas que formarão o plano de linhas d'água, de modo que a síntese do perfil calcule e forneça os calados e as coordenadas x_{fW} destas linhas para aplicação posterior na síntese do plano.

5.6 - MODELO DE SÍNTESE DO PLANO DE LINHAS D'ÁGUA

Para se completar a definição da superfície do casco de acordo com o modelo de síntese proposto no item 5.1, resta agora determinar o plano de linhas d'água do casco. Para que este plano represente uma boa aproximação desta superfície, é necessário que o mesmo seja formado por um conjunto adequado de N_w linhas d'água, situadas entre o calado de projeto e o calado zero, que permita a obtenção de um número suficiente de pontos para se gerar um plano de balizas e uma tabela de cotas apropriados para os programas de desenho e análise a serem aplicados nos ciclos subsequentes do projeto. Na figura 5.19 ilustra-se esquematicamente este plano.

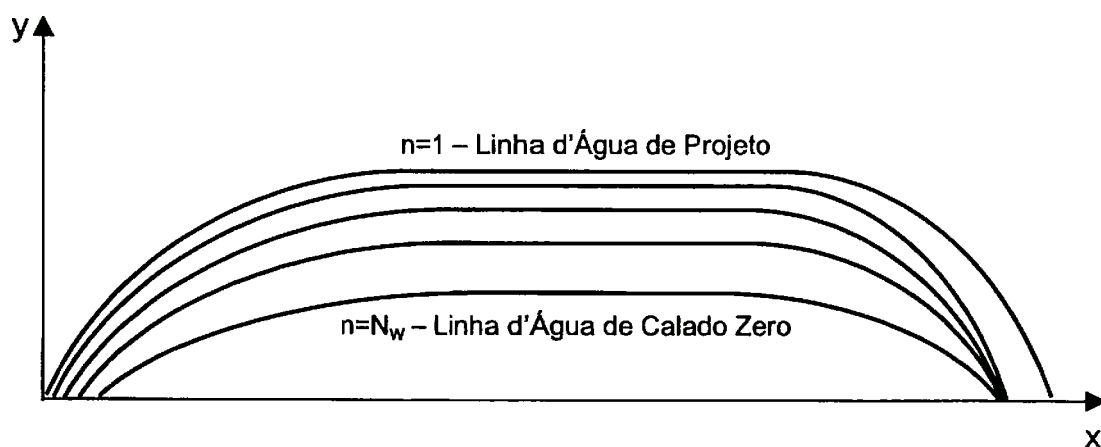


Figura 5.19 – Plano de Linhas d'Água

Destas N_w linhas d'água, uma delas é a linha d'água de projeto, cuja síntese já foi realizada através de um processo anterior de otimização. Resta, portanto, a definição geométrica de $N_w - 1$ linhas para se formar o plano de linhas d'água. Para se realizar esta definição, considera-se também que estas $N_w - 1$ linhas possam ser

adequadamente representadas pela descrição matemática genérica proposta no item 5.2.

Tendo em vista esta descrição genérica, representada pelas equações 5.3, 5.4 e 5.5, a definição completa do plano de linhas d'água pode ser entendida como um processo de síntese no qual deve-se determinar os valores das coordenadas x_i , x_f , x_{B1} , x_{B2} e y_{max} e dos coeficientes dos polinômios y_1 e y_2 representando $N_W - 1$ linhas d'água, situadas em $N_W - 1$ calados distintos entre o calado de projeto e o calado zero, de tal forma que as mesmas possuam valores de área A_W , boca B_W e coordenada de popa x_{fW} dados respectivamente pela curva vertical de áreas, pela seção mestra e pelo perfil longitudinal, definidos nos processos anteriores de otimização. Além disto, o plano de linhas d'água assim obtido deve ser tal que represente um casco cujo valor de LCB seja igual ao definido no processo inicial de otimização, e cujo tamanho do corpo paralelo médio (L_{PM}) se situe dentro das faixas de valores discutidas no item 5.2.5, que atendem de alguma forma requisitos de facilidade e baixo custo de construção,

Os objetivos individuais acima, para cada linha d'água n , podem ser expressos matematicamente da seguinte forma:

$$x_f^n = x_{fW}^n \quad (5.217)$$

$$y_{max}^n = \frac{B_W^n}{2} \quad (5.218)$$

$$2 * \left(\int_{x_f^n}^{x_{B1}^n} y_1^n \cdot dx + (x_{B1}^n - x_{B2}^n) * y_{max}^n + \int_{x_{B2}^n}^{x_f^n} y_2^n \cdot dx \right) = A_W^n \quad (5.219)$$

Dos objetivos gerais para o casco, aquele referente à posição longitudinal do centro de carena pode ser matematicamente expresso da seguinte forma:

$$\frac{\int_0^T \text{LCF}_W^n * A_W^n \cdot dz}{\nabla} = \text{LCB} \quad (5.220)$$

Como o número de linhas d'água a ser determinado é discreto, a equação acima pode ser substituída pela seguinte aproximação:

$$\frac{\sum_{n=1}^{N_W-1} \left(\frac{\text{LCF}_W^n * A_W^n + \text{LCF}_W^{n+1} * A_W^{n+1}}{2} \right) * (T_W^n - T_W^{n+1})}{\nabla} = \text{LCB} \quad (5.221)$$

onde : n =1 corresponde à linha d'água de projeto e n = N_W corresponde à linha d'água situada no calado zero.

O objetivo referente ao corpo paralelo médio pode ser estabelecido com base nas indicações de tamanho (L_{PM}) fornecidas por Comstock [19], ou nas indicações de tamanho e posição do centro do corpo paralelo (x_{LPM}) fornecidas por Saunders [26] (fig.66.L, pg.483 e fig.66.M, pg.484), conforme discutido no item 5.2.5.

É importante notar nesta definição dada ao processo de síntese do plano de linhas d'água que, ao se conseguir que as N_W -1 linhas d'água atendam aos valores de A_W dados pela curva vertical de áreas, automaticamente está-se garantindo que a superfície gerada tenha valores de ∇ (volume do casco), C_b (coeficiente de bloco) e KB (altura do centro de carena) iguais aos valores definidos nos processos anteriores de otimização. Se, ao mesmo tempo, os valores de B_W e x_{FW} forem igualmente atendidos, garante-se também que a superfície represente um casco com valores de A₀ (área da seção mestra), C₀ (coeficiente da seção mestra) e Cp (coeficiente

prismático) iguais aos obtidos naqueles processos de otimização e que, este casco tem uma abertura de popa igual ao perfil definido para acomodar adequadamente o hélice e o leme da embarcação.

Embora não seja objetivo deste processo a obtenção de uma superfície perfeitamente carenada, é necessário estabelecer também um conjunto mínimo de condições que deve-se procurar atender na definição das $N_w - 1$ linhas d'água, de modo que a superfície por elas representada não tenha uma forma com características impróprias para formar um casco de embarcação. Tais condições, chamadas de condições de carenagem, estão descritas a seguir.

5.6.1 - As Condições de Carenagem para o Plano de Linhas d'Água.

As condições de carenagem que deve-se procurar atender no processo de síntese das $N_w - 1$ linhas d'água, estão itemizadas a seguir. Para facilidade de apresentação considera-se que a linha d'água de projeto seja a linha 1 e que as demais sejam identificadas pelo índice n , onde $2 \leq n \leq N_w$.

$$(1) \quad \alpha_e^n \leq \alpha_e^{n-1} \quad (5.222)$$

$$(2) \quad x_i^n \geq x_i^{n-1} \quad (5.223)$$

$$(3) \quad x_{B1}^n \geq x_{B1}^{n-1} \quad (5.224)$$

$$(4) \quad \text{para: } x_i^n \leq x \leq x_{B1}^{n-1}$$

$$y_1^n(x) \leq y_1^{n-1}(x) \quad (5.225)$$

$$(5) \quad x_{B2}^n \geq x_{B1}^n \quad (5.226)$$

$$(6) \quad x_{B2}^n \leq x_{B2}^{n-1} \quad (5.227)$$

$$(7) \quad \text{para: } x_{B2}^{n-1} \leq x \leq x_f^n$$

$$y_2^n(x) \leq y_2^{n-1}(x) \quad (5.228)$$

$$(8) \quad \text{Se } T_W^n \leq z_{p4} \rightarrow B_T^n = 0 \quad (5.229)$$

onde: z_{p4} é a coordenada vertical do ponto $p4$ do perfil longitudinal definido no item 5.5.

$$(9) \quad \text{Se } T_W^n \leq z_{p4} \text{ e } T_W^{n-1} \leq z_{p4} \rightarrow \alpha_s^n \leq \alpha_s^{n-1} \quad (5.230)$$

As condições (1), (2), (3), (4), (6) e (7) refletem características usuais de formas de casco de navios convencionais, nas quais as linhas d'água situadas em calados inferiores ficam normalmente contidas dentro dos limites das áreas das linhas situadas nos calados maiores. As condições (4) e (7), em particular, impõem que as curvas que representam os corpos de entrada e saída das linhas em calados inferiores não tenham coordenadas transversais maiores do que as das linhas em calados superiores, para nenhum valor de coordenada longitudinal dentro destes corpos.

A condição (5) tem a função de evitar a ocorrência da impossibilidade física do final do corpo paralelo de uma linha ocorrer numa coordenada longitudinal menor do que o início deste corpo.

As condições (8) e (9) têm a função de garantir uma saída adequada para as linhas d'água situadas na região do hélice e do leme, de modo a não prejudicar o

escoamento para estes componentes.

Além das 9 condições acima, as linhas d'água devem, também, atender às condições de carenagem estabelecidas pelas equações 5.10, 5.11 e 5.12, para a linha d'água de projeto, e às condições para evitar degenerações de forma estabelecidas pelas equações 5.13, 5.14, 5.15 e 5.16, todas apresentadas no item 5.2.1.

5.6.2 - A Síntese do Plano de Linhas d'Água

Da mesma forma que para a linha d'água de projeto, o modelo de síntese das demais $N_w - 1$ linhas d'água é definido a partir do estabelecimento de condições de contorno para os polinômios y_1^n e y_2^n , baseadas nos parâmetros geométricos que definem algumas das características e atributos que se deseja para estas linhas.

Estas condições de contorno são essencialmente as mesmas definidas no item 5.2.7 para a linha d'água de projeto, mas com três alterações, sendo duas delas motivadas pela discussão apresentada no início deste item 5.6 e a outra pela indefinição do perfil de proa do casco discutida no item 5.5.

Na discussão inicial do item 5.6, mostra-se que o atendimento aos valores de A_w , B_w , e x_{nw} são as condições necessárias para se satisfazer quase todos os demais atributos do casco definidos nos processos anteriores de otimização. Neste sentido, para que seja possível garantir o atendimento a área A_w fornecida pela curva vertical de áreas, substitui-se as duas condições de contorno relativas aos ângulos de entrada e saída (condições 5.30 e 5.38), estabelecidas para a linha d'água de projeto, por duas novas condições formuladas em função das áreas A_e e A_s dos

corpos de entrada e saída das demais linhas d'água. Além disto, como no item 5.5 não se determinou um perfil de proa para o casco, não é possível que se fixe valores para a coordenada longitudinal de início das demais linhas d'água (x_i^n) da mesma forma que se fez na condição 5.26 para a linha d'água de projeto. Neste caso, esta coordenada assume a condição de incógnita no modelo de síntese do plano de linhas. Com isto, as condições de contorno para estas linhas passam a ser as seguintes:

- $x_f^n = x_{fW}^n$ (5.231)

- $y_{\max}^n = \frac{B_W^n}{2}$ (5.232)

- para: $x = x_i^n \rightarrow y_1^n(x) = 0$ (5.233)

- para: $x = x_{B1}^n \rightarrow \frac{dy_1^n(x)}{dx} = 0$ (5.234)

- para: $x = x_{B1}^n \rightarrow \frac{d^2y_1^n(x)}{dx^2} = 0$ (5.235)

- para: $x = x_{B1}^n \rightarrow y_1^n(x) = \frac{B_W^n}{2}$ (5.236)

- $\int_{x_i^n}^{x_{B1}^n} y_1^n(x) \cdot dx = A_e^n$ (5.237)

- para: $x = x_{B2}^n \rightarrow y_2^n(x) = \frac{B_W^n}{2}$ (5.238)

- para: $x = x_{B2}^n \rightarrow \frac{dy_2^n(x)}{dx} = 0$ (5.239)

- para: $x = x_{fW}^n \rightarrow \frac{d^2 y_2^n(x)}{dx^2} = 0$ (5.240)

- para: $x = x_{fW}^n \rightarrow y_2^n(x) = \frac{B_T^n}{2}$ (5.241)

- $\int_{x_{B2}^n}^{x_{fW}^n} y_2^n(x) \cdot dx = A_s^n$ (5.242)

As condições acima, quando aplicadas aos polinômios dados pelas equações 5.1 e 5.2, fornecem, após algum trabalho algébrico, as seguintes equações para os coeficientes:

$$a_n = \left[\frac{15 * B_W^n}{2} - \frac{20 * A_e^n}{(x_{B1}^n - x_i^n)} \right] * \frac{1}{(x_{B1}^n - x_i^n)^4} \quad (5.243)$$

$$b_n = \left[\frac{10 * A_e^n * (3 * x_{B1}^n + x_i^n)}{(x_{B1}^n - x_i^n)} - B_W^n * (11 * x_{B1}^n + 4 * x_i^n) \right] * \frac{2}{(x_{B1}^n - x_i^n)^4} \quad (5.244)$$

$$c_n = -3 * x_{B1}^n * (2 * a_n * x_{B1}^n + b_n) \quad (5.245)$$

$$d_n = (x_{B1}^n)^2 * (8 * a_n * x_{B1}^n + 3 * b_n) \quad (5.246)$$

$$e_n = \frac{B_W^n}{2} - (x_{B1}^n)^3 * (3 * a_n * x_{B1}^n + b_n) \quad (5.247)$$

$$f_n = \left[\frac{3 * B_W^n + B_T^n}{2} - \frac{4 * A_s^n}{(x_{fW}^n - x_{B2}^n)} \right] * \frac{5}{(x_{fW}^n - x_{B2}^n)^4} \quad (5.248)$$

$$g_n = \frac{20 * A_s^n * (x_{fW}^n + 3 * x_{B2}^n)}{(x_{fW}^n - x_{B2}^n)^5} - \frac{2 * [x_{fW}^n * (4 * B_W^n + B_T^n) + x_{B2}^n * (11 * B_W^n + 4 * B_T^n)]}{(x_{fW}^n - x_{B2}^n)^4} \quad (5.249)$$

$$h_n = -3 * \left[2 * f_n * (x_{B2}^n)^2 + g_n * x_{B2}^n \right] \quad (5.250)$$

$$i_n = 8 * f_n * (x_{B2}^n)^3 + 3 * g_n * (x_{B2}^n)^2 \quad (5.251)$$

$$j_n = \frac{B_T^n}{2} + f_n * \left[6 * (x_{FW}^n)^2 * (x_{B2}^n)^2 - 8 * x_{FW}^n * (x_{B2}^n)^3 - (x_{FW}^n)^4 \right] + \\ g_n * \left[3 * x_{B2}^n * (x_{FW}^n)^2 - 3 * x_{FW}^n * (x_{B2}^n)^2 - (x_{FW}^n)^3 \right] \quad (5.252)$$

É imediato verificar nas equações acima que a determinação dos coeficientes dos polinômios para cada linha d'água depende apenas do valor das seis variáveis x_i^n , x_{B1}^n , x_{B2}^n , A_e^n , A_s^n e B_T^n . Como as equações 5.231 e 5.232 fixam diretamente os valores de x_f^n e y_{max}^n , a descrição completa de cada linha d'água torna-se função apenas da determinação daquelas seis variáveis. Além disto, como estas duas últimas equações garantem o atendimento aos objetivos individuais dados pelas equações 5.217 e 5.218, os objetivos do processo de síntese do plano de linhas d'água tornam-se apenas o atendimento aos valores desejados de A_W^n para cada uma das $N_W - 1$ linhas d'água e o atendimento aos valores de LCB e, eventualmente, aos valores de L_{PM} e x_{LPM} , para o casco.

Da mesma forma que para a linha d'água de projeto, pode-se também estabelecer algumas condições adicionais, com base nas condições de carenagem dadas no item 5.6.1, de modo a limitar o espaço de busca das seis variáveis e dotar as demais linhas das características desejadas de carenagem.

Antes de se explicitar estas condições, dado o aspecto fundamental do atendimento aos valores de A_W^n dados pela curva vertical de áreas, já discutido anteriormente, é conveniente, primeiro, que se procure uma condição que possa

garantir este atendimento, de modo que o plano de linhas d'água obtido venha, efetivamente, representar o casco com os atributos geométricos definidos nos processos anteriores de otimização. Evidentemente que, ao se estabelecer esta condição, automaticamente se estará atendendo ao último dos objetivos individuais do processo de síntese deste plano, restando, portanto, somente o atendimento aos objetivos gerais referentes ao casco.

Para se estabelecer esta condição, a idéia é empregar-se exatamente a equação 5.219, referente ao atendimento às áreas A_W^n , para eliminar a variável A_e^n acima mencionada e garantir-se que os valores das áreas das $N_W - 1$ linhas d'água sejam exatamente os valores dados pela curva vertical de áreas. Considerando então uma forma mais compacta da equação 5.219 e reordenando seus termos obtêm-se:

$$A_e^n = \frac{A_W^n}{2} - (x_{B2}^n - x_{B1}^n) * \frac{B_W^n}{2} - A_s^n \quad (5.253)$$

Tomando-se nesta equação A_W^n como o valor dado pela curva vertical de áreas, a mesma estabelece uma relação direta de dependência da variável A_e^n com três das variáveis acima mencionadas, o que reduz o número total delas para as cinco restantes além de, automaticamente, garantir o atendimento aos objetivos individuais do processo de síntese. Desta forma, a introdução da equação acima simplifica o modelo de síntese, não só pela diminuição do número de variáveis como também pela eliminação de um de seus principais objetivos.

Voltando-se agora para as condições adicionais de carenagem, também é possível, através de algumas delas, simplificar o modelo de síntese do plano de linhas d'água.

Para isto, considere-se primeiro a substituição das equações acima, nas equações 5.13 a 5.16, referentes às condições para se evitar degenerações de forma, cujo resultado segue abaixo:

- corpo de entrada:

$$\left[\frac{3 * B_W^n * (x_{B1}^n - x_i^n)}{10} \right] \leq A_e^n \leq \left[\frac{4 * B_W^n * (x_{B1}^n - x_i^n)}{10} \right] \quad (5.254)$$

- corpo de saída:

$$\left[\frac{(3 * B_W^n + 2 * B_T^n) * (x_{rW}^n - x_{B2}^n)}{10} \right] \leq A_s^n \leq \left[\frac{(4 * B_W^n + B_T^n) * (x_{rW}^n - x_{B2}^n)}{10} \right] \quad (5.255)$$

Rearranjando-se estas duas equações obtêm-se:

$$0 \leq \frac{10 * A_e^n}{B_W^n * (x_{B1}^n - x_i^n)} - 3 \leq 1 \quad (5.256)$$

$$0 \leq \left[\frac{10 * A_s^n}{(x_{rW}^n - x_{B2}^n)} - 3 * B_W^n - 2 * B_T^n \right] * \frac{1}{(B_W^n - B_T^n)} \leq 1 \quad (5.257)$$

Com base nos termos das equações 5.256 e 5.257 define-se as seguintes variáveis:

$$v_3^n = \frac{10 * A_e^n}{B_W^n * (x_{B1}^n - x_i^n)} - 3 \quad (5.258)$$

$$v_4^n = \left[\frac{10 * A_s^n}{(x_{rW}^n - x_{B2}^n)} - 3 * B_W^n - 2 * B_T^n \right] * \frac{1}{(B_W^n - B_T^n)} \quad (5.259)$$

que, de acordo com as equações 5.256 e 5.257, devem variar entre os seguintes limites para evitar a ocorrência de formas degeneradas:

$$0 \leq v_3^n \leq 1 \quad (5.260)$$

$$0 \leq v_4^n \leq 1 \quad (5.261)$$

Das definições de v_3^n e v_4^n , dadas por 5.258 e 5.259, pode-se obter as seguintes relações:

$$x_i^n = x_{B1}^n - \frac{10 * A_e^n}{B_W^n * (v_3^n + 3)} \quad (5.262)$$

$$A_s^n = \frac{\left[(3 + v_4^n) + \frac{B_T^n}{B_W^n} * (2 - v_4^n) \right] * B_W^n * (x_{rW}^n - x_{B2}^n)}{10} \quad (5.263)$$

As duas últimas equações estabelecem relações das variáveis A_s^n e x_i^n com as três outras variáveis do modelo de síntese e com as duas novas variáveis v_3^n e v_4^n . Como para estas duas novas variáveis pôde-se estabelecer limites bastante simples, dentro dos quais deve-se manter seus valores para que as linhas não apresentem degeneração de forma, é conveniente então substituir as variáveis A_s^n e x_i^n pelas novas v_3^n e v_4^n e utilizar as relações 5.262 e 5.263 para se determinar os valores das duas anteriores. Isto simplifica o processo de síntese pois tanto elimina a necessidade de se verificar continuamente o atendimento às condições para evitar degenerações como, também, estabelece claramente os limites de variação para duas das cinco variáveis.

Com base no desenvolvimento acima pode-se descrever o processo de síntese do plano de linhas d'água como um processo para se determinar $N_W - 1$ conjuntos das cinco variáveis x_{B1}^n , x_{B2}^n , B_T^n , v_3^n e v_4^n que descrevem as linhas d'água, de modo

que elas formem um plano de linhas d'água que represente um casco com valores de LCB e L_{PM} iguais aos definidos pelos processos anteriores de otimização. Além disto, deve-se procurar obter linhas que atendam ainda as 9 condições de carenagem descritas no item 5.6.1.

Para considerar estas condições restantes de carenagem, propõe-se para o plano de linhas uma nova abordagem para o tratamento destas condições, baseada no fato de que o plano de linhas a ser obtido representa uma aproximação matemática do casco, não necessariamente carenada. A função deste plano de linhas, conforme já comentado, é essencialmente fornecer as coordenadas de um número suficiente de pontos da superfície do casco, de modo a permitir uma descrição adequada do mesmo para uso em outros programas de análise e arquitetura naval, inclusive em programas CAD apropriados para gerar superfícies carenadas a partir destes pontos. Evidentemente, espera-se que as deficiências de carenagem do plano de linhas d'água sejam as menores possíveis para que a representação não se torne grosseira e inaproveitável. Sendo assim, propõe-se que as condições de carenagem, ao invés de serem tratadas como restrições, sejam tratadas como objetivos a serem atendidos no processo de síntese do plano de linhas d'água.

Para isto, propõe-se a definição de uma função, chamada aqui de "função geral de carenagem", que deve ser construída com base nas nove condições de carenagem de tal forma que seus valores sejam somente positivos ou nulos. O valor da função será positivo quando alguma, ou algumas, das condições de carenagem não estiver sendo atendida, e será nulo quando todas as condições estiverem sendo atendidas simultaneamente.

Antes de se explicitar esta função, considere-se, preliminarmente, as seguintes funções auxiliares, baseadas em cada uma das nove condições de carenagem listadas no item 5.6.1:

$$(1) \quad f_{c1}^n = 100 * (\alpha_e^n - \alpha_e^{n-1}) \quad (5.264)$$

$$(2) \quad f_{c2}^n = 100 * \frac{(x_i^{n-1} - x_i^n)}{L_{WL}} \quad (5.265)$$

$$(3) \quad f_{c3}^n = 100 * \frac{(x_{B1}^{n-1} - x_{B1}^n)}{L_{WL}} \quad (5.266)$$

$$(4) \quad f_{c4.1}^n = 100 * \frac{y_1^n(x_i^n) - y_1^{n-1}(x_i^n)}{L_{WL}} \quad (5.267)$$

$$f_{c4.2}^n = 100 * \frac{y_1^n \left(\frac{3x_i^n + x_{B1}^{n-1}}{4} \right) - y_1^{n-1} \left(\frac{3x_i^n + x_{B1}^{n-1}}{4} \right)}{L_{WL}} \quad (5.268)$$

$$f_{c4.3}^n = 100 * \frac{y_1^n \left(\frac{x_i^n + x_{B1}^{n-1}}{2} \right) - y_1^{n-1} \left(\frac{x_i^n + x_{B1}^{n-1}}{2} \right)}{L_{WL}} \quad (5.269)$$

$$f_{c4.4}^n = 100 * \frac{y_1^n \left(\frac{x_i^n + 3x_{B1}^{n-1}}{4} \right) - y_1^{n-1} \left(\frac{x_i^n + 3x_{B1}^{n-1}}{4} \right)}{L_{WL}} \quad (5.270)$$

$$(5) \quad f_{c5}^n = 100 * \frac{(x_{B1}^n - x_{B2}^n)}{L_{WL}} \quad (5.271)$$

$$(6) \quad f_{c6}^n = 100 * \frac{(x_{B2}^n - x_{B2}^{n-1})}{L_{WL}} \quad (5.272)$$

$$(7) \quad f_{c7.1}^n = 100 * \frac{y_2^n(x_{FW}^n) - y_2^{n-1}(x_{FW}^n)}{L_{WL}} \quad (5.273)$$

$$f_{c7.2}^n = 100 * \frac{y_2^n \left(\frac{3x_{fW}^n + x_{B2}^{n-1}}{4} \right) - y_2^{n-1} \left(\frac{3x_{fW}^n + x_{B2}^{n-1}}{4} \right)}{L_{WL}} \quad (5.274)$$

$$f_{c7.3}^n = 100 * \frac{y_2^n \left(\frac{x_{fW}^n + x_{B2}^{n-1}}{2} \right) - y_2^{n-1} \left(\frac{x_{fW}^n + x_{B2}^{n-1}}{2} \right)}{L_{WL}} \quad (5.275)$$

$$f_{c7.4}^n = 100 * \frac{y_2^n \left(\frac{x_{fW}^n + 3x_{B2}^{n-1}}{4} \right) - y_2^{n-1} \left(\frac{x_{fW}^n + 3x_{B2}^{n-1}}{4} \right)}{L_{WL}} \quad (5.276)$$

$$(8) \quad f_{c8}^n = 100 * \frac{B_T^n}{L_{WL}} \text{ se } T_W^n \leq z_{p4} \quad (5.277)$$

$$f_{c8}^n = 0 \text{ se } T_W^n > z_{p4} \quad (5.278)$$

$$(9) \quad f_{c9}^n = 100 * (\alpha_s^n - \alpha_s^{n-1}) \text{ se } T_W^{n-1} \leq z_{p4} \quad (5.279)$$

$$f_{c9}^n = 0 \text{ se } T_W^{n-1} > z_{p4} \quad (5.280)$$

As funções auxiliares f_c^n , acima definidas, representam cada uma das nove condições de carenagem propostas no item 5.6.1. As condições (4) e (7) definidas pelas equações 5.225 e 5.228, que são condições de natureza contínua, foram ambas substituídas, por simplicidade, por quatro condições de natureza discreta que estabelecem o atendimento às condições originais em quatro pontos definidos entre os limites dados pelas equações 5.225 e 5.228.

As funções f_c^n foram construídas de forma que, se forem positivas, indicam que a condição de carenagem não está sendo atendida e, se forem negativas ou nulas, indicam o atendimento à condição de carenagem. Com base nisto, define-se a

seguinte função individual de carenagem para a linha d'água n:

$$F_{ic}^n = \max(0, f_{c1}^n) + \max(0, f_{c2}^n) + \max(0, f_{c3}^n) + \max(0, f_{c4.1}^n) + \max(0, f_{c4.2}^n) + \\ + \max(0, f_{c4.3}^n) + \max(0, f_{c4.4}^n) + \max(0, f_{c5}^n) + \max(0, f_{c6}^n) + \max(0, f_{c7.1}^n) + (5.281) \\ + \max(0, f_{c7.2}^n) + \max(0, f_{c7.3}^n) + \max(0, f_{c7.4}^n) + \max(0, f_{c8}^n) + \max(0, f_{c9}^n)$$

onde: $\max(0, f_c^n)$ representa um operador que retorna o maior valor entre 0 e f_c^n .

É imediato verificar na equação 5.281 que se alguma das funções f_c^n for positiva, ou seja, se alguma das condições de carenagem não estiver sendo atendida na linha d'água n, a função individual de carenagem F_{ic}^n terá um valor maior do que zero para esta linha d'água. Por outro lado, se todas as funções f_c^n forem negativas ou nulas, indicando que todas as condições de carenagem estão sendo atendidas na linha d'água n, a função individual de carenagem F_{ic}^n terá um valor nulo para esta linha d'água. Com base nesta função individual de carenagem, define-se então a seguinte função geral de carenagem para todo o plano de linhas d'água formado pelas N_w-1 linhas tratadas neste modelo de síntese:

$$F_{GC} = \sum_{n=2}^{N_w} F_{ic}^n \quad (5.282)$$

Se as condições de carenagem forem atendidas em todas as $N_w -1$ linhas d'água F_{GC} terá valor nulo, caso contrário terá um valor positivo que será tanto maior quanto mais condições estiverem sendo violadas ou quanto maiores forem os valores numéricos destas violações, ou seja, quanto menos carenado estiver o plano de linhas d'água, de acordo com as condições de carenagem estabelecidas.

Assim, considerando-se a carenagem como um objetivo no modelo de síntese,

o seu atendimento será efetivado se o plano de linhas d'água tiver uma função geral de carenagem igual a zero.

Uma última simplificação do modelo de síntese pode ainda ser conseguida a partir dos objetivos referentes ao corpo paralelo médio.

O tamanho e a posição longitudinal do centro do corpo paralelo médio são definidos pelas coordenadas x_{B1} e x_{B2} referentes à linha d'água no calado zero, definição esta que pode ser mantida mesmo no caso desta linha possuir área nula. Nas referências já citadas, ao invés de valores ótimos, recomenda-se faixas de valores adequados tanto para o tamanho quanto para a posição deste corpo, como função do coeficiente prismático da embarcação. Desta forma, é mais conveniente definir limites explícitos para as variáveis acima mencionadas do que tratar estes atributos de corpo paralelo como objetivos no modelo de síntese. Para isto, considere-se as seguintes definições e limites para o tamanho e posição do centro do corpo paralelo:

$$L_{PM} = x_{B2}^{Nw} - x_{B1}^{Nw} \quad (5.283)$$

$$x_{LPM} = \frac{x_{B1}^{Nw} + x_{B2}^{Nw}}{2} \quad (5.284)$$

$$L_{PM}^i \leq \frac{L_{PM}}{L_{WL}} \leq L_{PM}^s \quad (5.285)$$

$$x_{LPM}^i \leq \frac{x_{LPM}}{L_{WL}} \leq x_{LPM}^s \quad (5.286)$$

onde: - x_{B1}^{Nw} e x_{B2}^{Nw} representam as coordenadas longitudinais de início e fim do corpo paralelo da última linha d'água, com calado zero.

- L_{PM} e x_{LPM} representam o tamanho e a coordenada longitudinal do centro do corpo paralelo médio do casco.
- $L_{PM}^i, L_{PM}^s, x_{LPM}^i$ e x_{LPM}^s representam limites relativos inferiores e superiores para L_{PM} e x_{LPM} , estabelecidos de acordo com as referências [19] e [26].

Substituindo-se as equações 5.283 e 5.284 nas equações 5.285 e 5.286, obtêm-se, após algum rearranjo, as seguintes relações:

$$0 \leq \frac{\left(x_{B2}^{Nw} - x_{B1}^{Nw} \right) - L_{PM}^i}{L_{WL} \left(L_{PM}^s - L_{PM}^i \right)} \leq 1 \quad (5.287)$$

$$0 \leq \frac{\left(x_{B2}^{Nw} + x_{B1}^{Nw} \right) - 2 * x_{LPM}^i}{2 * \left(x_{LPM}^s - x_{LPM}^i \right)} \leq 1 \quad (5.288)$$

Com base nas duas equações acima, define-se as seguintes variáveis associadas à síntese da linha d'água situada no calado zero ($n=N_w$):

$$v_1^{Nw} = \frac{\left(x_{B2}^{Nw} - x_{B1}^{Nw} \right) - L_{PM}^i}{L_{WL} \left(L_{PM}^s - L_{PM}^i \right)} \quad (5.289)$$

$$v_2^{Nw} = \frac{\left(x_{B2}^{Nw} + x_{B1}^{Nw} \right) - 2 * x_{LPM}^i}{2 * \left(x_{LPM}^s - x_{LPM}^i \right)} \quad (5.290)$$

cujos limites de variação, segundo 5.287 e 5.288, são:

$$0 \leq v_1^{Nw} \leq 1 \quad (5.291)$$

$$0 \leq v_2^{Nw} \leq 1 \quad (5.292)$$

Combinando-se as equações 5.289 e 5.290 obtêm-se:

$$\frac{x_{B1}^{N_w}}{L_{WL}} = v_2^{N_w} * (x_{LPM}^s - x_{LPM}^i) - v_1^{N_w} * \frac{(L_{PM}^s - L_{PM}^i)}{2} + x_{LPM}^i - \frac{L_{PM}^i}{2} \quad (5.293)$$

$$\frac{x_{B2}^{N_w}}{L_{WL}} = v_2^{N_w} * (x_{LPM}^s - x_{LPM}^i) + v_1^{N_w} * \frac{(L_{PM}^s - L_{PM}^i)}{2} + x_{LPM}^i + \frac{L_{PM}^i}{2} \quad (5.294)$$

Como $x_{B1}^{N_w}$ e $x_{B2}^{N_w}$ dados pelas duas equações acima correspondem, no modelo de síntese do plano, às variáveis x_{B1}^n e x_{B2}^n para $n=N_w$, é conveniente então substituí-las pelas duas novas variáveis $v_1^{N_w}$ e $v_2^{N_w}$, já que estas últimas, se mantidas entre os limites dados por 5.291 e 5.292, garantem um corpo paralelo médio para o casco com tamanho e posição situados dentro das faixas adequadas de valores, estabelecidos por 5.285 e 5.286. Com isto, simplifica-se o processo de síntese, pois elimina-se dos objetivos o atendimento estes atributos do corpo paralelo médio.

A substituição de variáveis acima realizada corresponde, na realidade, a uma transformação de objetivo em restrição, como aliás já havia sido feito para o caso das variáveis A_s^n e x_i^n . Este procedimento, embora simplifique o processo de síntese, pode muitas vezes eliminar o espaço de soluções viáveis. Para diminuir este risco no caso da definição da linha d'água $n=N_w$, pode-se acrescentar uma variável a mais no conjunto de cinco variáveis que definem esta linha. Propõe-se então que, para esta linha, a coordenada longitudinal de sua extremidade final ($x_f^{N_w}$) seja transformada em variável ao invés de ser fixada com o valor dado pelo perfil longitudinal ($x_{fW}^{N_w}$) e estabelece-se para isto uma faixa de variação admissível, de modo que seu valor resulte o mais próximo possível do valor estabelecido no perfil. Tendo em vista o

caráter adimensional dado às outras coordenadas desta linha através das equações 5.293 e 5.294, define-se então da seguinte forma a coordenada adicional para a linha $n=N_w$:

$$v_6^{N_w} = \frac{x_f^{N_w}}{L_{WL}} \quad (5.295)$$

Desta forma, para a linha d'água $n=N_w$, deve-se substituir em todas as equações anteriores o valor de $x_{RW}^{N_w}$ dado pelo perfil longitudinal, pelo valor de $x_f^{N_w}$ obtido através da equação 5.295.

Finalmente, tendo em vista a padronização de variáveis e a maior facilidade para o estabelecimento de limites, é conveniente também adimensionalizar as variáveis restantes. Deste modo, o conjunto de variáveis que define as linhas consideradas no modelo de síntese do plano de linhas d'água é o seguinte:

- para $2 \leq n \leq N_w - 1$

$$v_1^n = \frac{x_{B1}^n}{L_{WL}} \quad (5.296)$$

$$v_2^n = \frac{x_{B2}^n}{L_{WL}} \quad (5.297)$$

v_3^n : definida pela equação 5.258.

v_4^n : definida pela equação 5.259.

$$v_5^n = \frac{B_T^n}{B_W^n} \quad (5.298)$$

- para $n=N_w$ (linha d'água situada no calado zero)

v_1^n : definida pela equação 5.289.

v_2^n : definida pela equação 5.290.

v_3^n : definida pela equação 5.258.

v_4^n : definida pela equação 5.259.

$$v_5^n = \frac{B_T^n}{B_W^n} \quad (5.299)$$

$v_6^{N_w}$: definida pela equação 5.295.

De acordo com o que se discutiu ao longo deste item, pode-se também definir os seguintes valores limites para as variáveis destes conjuntos:

- para $2 \leq n \leq N_w - 1$

$$\frac{X_{B1}^1}{L_{WL}} \leq v_1^n \leq \frac{X_{B2}^1}{L_{WL}} \quad (5.300)$$

$$\frac{X_{B1}^1}{L_{WL}} \leq v_2^n \leq \frac{X_{B2}^1}{L_{WL}} \quad (5.301)$$

$$0 \leq v_3^n \leq 1 \quad (5.302)$$

$$0 \leq v_4^n \leq 1 \quad (5.303)$$

$$0 \leq v_5^n \leq 1 \quad (5.304)$$

- para $n=N_w$ (linha d'água situada no calado zero)

$$0 \leq v_1^n \leq 1 \quad (5.305)$$

$$0 \leq v_2^n \leq 1 \quad (5.306)$$

$$0 \leq v_3^n \leq 1 \quad (5.307)$$

$$0 \leq v_4^n \leq 1 \quad (5.308)$$

$$0 \leq v_5^n \leq 0 \quad (5.309)$$

$$0,65 * \frac{X_{FW}^{N_w}}{L_{WL}} \leq v_6^{N_w} \leq \frac{X_{FW}^{N_w}}{L_{WL}} \quad (5.310)$$

Os limites definidos nas equações 5.300 e 5.301 são decorrentes da condição de carenagem que estipula que o corpo paralelo de uma linha d'água seja menor ou igual ao da linha d'água anterior, o que transforma as coordenadas do corpo paralelo da linha d'água de projeto em limites máximo e mínimo dos corpos das demais linhas. Um raciocínio similar se aplica aos limites dados na equação 5.304, que representam o fato de que a boca na popa de uma linha não pode ser maior do que a boca máxima desta linha. No caso da última linha d'água, os limites dados na equação 5.309 decorrem diretamente da condição de carenagem 5.229. Os demais limites correspondem aos que foram determinados e apresentados ao longo da elaboração do modelo de síntese do plano de linhas d'água.

As equações apresentadas ao longo deste item representam o modelo matemático de síntese do plano de linhas d'água. Com base no modelo elaborado, pode-se descrever o processo de síntese deste plano como um processo para se

determinar $N_w - 1$ conjuntos das cinco variáveis $v_1^n, v_2^n, v_3^n, v_4^n$ e v_5^n e a variável $v_6^{N_w}$, que definem $N_w - 1$ linhas d'água situadas em calados distintos entre o calado de projeto e o calado zero, de modo que elas constituam um plano de linhas d'água que represente um casco cujo valor de LCB seja igual ao valor definido no processo inicial de otimização e cujo valor da função geral de carenagem seja nulo.

Para que o plano obtido possa representar satisfatoriamente a superfície do casco é necessário que ele seja formado por número (N_w) adequado de linhas d'água. Admitindo que este número se situe entre 5 e 10 é imediato concluir que o número total de variáveis a ser definido inviabiliza qualquer procedimento de síntese que não seja necessariamente numérico. Desta forma, propõe-se também que o problema de síntese do plano de linhas d'água seja formulado como um problema de otimização por múltiplos critérios, empregando-se nesta formulação a técnica da programação por objetivos.

Assim, com base nos conceitos da programação por objetivos delineados no capítulo 3, propõe-se a seguinte estrutura para o modelo de otimização do plano de linhas d'água:

Modelo de Otimização do Plano de Linhas d'Água

- **Dados:**

- N_w (número de linhas d'água do plano – perfil longitudinal)
- T_W^n (calado das N_w linhas d'água – perfil longitudinal)
- A_W^n (área das N_w linhas d'água – curva vertical de áreas)
- B_W^n (boca das N_w linhas d'água – curva da seção mestra)
- x_{FW}^n (coordenada final das N_w linhas d'água – perfil longitudinal)

- $x_i^1, x_{B1}^1, x_{B2}^1, x_f^1, B_W^1, B_T^1, \alpha_e^1, \alpha_s^1, \gamma_1^1(x), \gamma_2^1(x)$ (descrição da linha d'água de projeto: $n=1$)
- L_{PM}^i, L_{PM}^s (limites inferior e superior do tamanho do corpo paralelo médio)
- x_{LPM}^i, x_{LPM}^s (limites inferior e superior do centro do corpo paralelo médio)
- LCB_T (posição longitudinal do centro de carena, obtida do processo inicial de otimização)

• **Variáveis:**

- $v_1^n, v_2^n, v_3^n, v_4^n, v_5^n$; onde: $2 \leq n \leq N_w$
- $v_6^{N_w}$

• **Restrições Implícitas:**

- Nenhuma

• **Restrições Explícitas (Limites):**

- para $2 \leq n \leq N_w - 1$

$$\frac{x_{B1}^1}{L_{WL}} \leq v_1^n \leq \frac{x_{B2}^1}{L_{WL}} \quad (5.311)$$

$$\frac{x_{B1}^1}{L_{WL}} \leq v_2^n \leq \frac{x_{B2}^1}{L_{WL}} \quad (5.312)$$

$$0 \leq v_3^n \leq 1 \quad (5.313)$$

$$0 \leq v_4^n \leq 1 \quad (5.314)$$

$$0 \leq v_5^n \leq 1 \quad (5.315)$$

- para $n=N_w$

$$0 \leq v_1^n \leq 1 \quad (5.316)$$

$$0 \leq v_2^n \leq 1 \quad (5.317)$$

$$0 \leq v_3^n \leq 1 \quad (5.318)$$

$$0 \leq v_4^n \leq 1 \quad (5.319)$$

$$0 \leq v_5^n \leq 0 \quad (5.320)$$

$$0,65 * \frac{X_{FW}^{N_w}}{L_{WL}} \leq v_6^{N_w} \leq \frac{X_{FW}^{N_w}}{L_{WL}} \quad (5.321)$$

• **Metas:**

$$(1) \quad 100 * \frac{(LCB - LCB_r)}{LCB_r} + d_1^- - d_1^+ = 0 \quad (5.322)$$

$$(2) \quad F_{GC} - d_2^+ = 0 \quad (5.323)$$

onde: LCB é dado pela equação 5.221 e F_{GC} é dado pela equação 5.282.

• **Função Objetivo a ser Minimizada:**

$$Z = P_1 * (d_1^- + d_1^+) + P_2 * d_2^+ \quad (5.324)$$

Este modelo de otimização do plano de linhas d'água foi implementado no sistema SHOPS e deve ser executado ao final de todo o processo de síntese aplicado ao projeto preliminar da embarcação. A solução numérica deste problema de otimização é obtida também através do algoritmo de busca direta desenvolvido por Augusto [12]. Como resultado final obtêm-se as seguintes características do plano de linhas d'água:

• **Resultados:**

- $x_i^n, x_{B1}^n, x_{B2}^n, x_f^n, B_W^n, B_T^n, \alpha_e^n, \alpha_s^n, A_e^n, A_s^n, A_W^n, LCF_W^n, T_W^n, y_1^n(x), y_2^n(x)$ das N_w linhas d'água.
- LCB do casco.
- F_{GC} do plano de linhas d'água.

6. EXEMPLO DE APLICAÇÃO E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo, apresenta-se um exemplo de aplicação do modelo de otimização proposto para o projeto preliminar de navios e embarcações e compara-se os resultados obtidos com aqueles fornecidos na literatura.

O exemplo de aplicação refere-se ao projeto preliminar de um navio graneleiro para operar através do canal de Panamá, transportando minério de ferro e carvão. Este exemplo foi escolhido por dois motivos relacionados à possibilidade de se realizar uma comparação mais abrangente dos resultados do modelo proposto.

O primeiro é devido ao fato de ser um exemplo para o qual existem duas soluções publicadas na literatura, obtidas através de metodologias distintas, que fornecem em detalhe as características principais e os atributos do navio projetado. Estas soluções, que se referem à primeira parte do problema do projeto preliminar, estão descritas nos trabalhos de Lyon e Mistree [8] e de Gilfillan [15].

O segundo motivo está relacionado ao fato de que o navio a ser projetado é de tipo bem convencional e apresenta, como se verá adiante, características geométricas que permitem uma adequada representação do seu casco a partir das formas da tradicional série 60 [25]. Assim, com base nesta série é possível realizar uma comparação qualitativa do casco gerado pelo modelo proposto para síntese da forma do casco, que representa a solução para a segunda parte do problema do projeto preliminar.

6.1 EXEMPLO : PROJETO PRELIMINAR DE NAVIO GRANELEIRO

Este exemplo foi proposto originalmente por Gilfillan [15] e reproduzido por Lyon e Mistree [8], para efeito de comparação de resultados obtidos através de

diferentes metodologias. Os dados iniciais do projeto, definidos por Gilfillan [15] com base em critérios econômicos por ele estabelecidos, são os seguintes:

(1) Tipo de Navio

- Navio graneleiro para transporte de minério de ferro e carvão através do canal do Panamá.

(2) Requisitos do armador

- Deadweight de carga (DWTcr) = 58.768,5 ton
- Autonomia (Rgr) = 22.000 milhas náuticas
- Velocidade de serviço (Vkr) = 15,0 nós
- Tipo de motor : Diesel de baixa rotação

(3) Restrições (Canal do Panamá)

- Boca máxima (B_{max}) = 32,32 m
- Calado máximo (T_{max}) = 12,20 m
- Comprimento máximo (L_{max}) = 290,0 m

Para efeito de comparação, os resultados das soluções deste problema estão separados e apresentados em dois grupos, relacionados aos dois problemas de síntese que caracterizam o projeto preliminar. O primeiro grupo refere-se aos resultados da síntese e otimização das características principais da embarcação e estão listadas tanto as características geométricas obtidas quanto os principais atributos avaliados no sistema SHOPS e nas referências citadas. O segundo grupo refere-se à síntese e otimização da forma do casco e estão listados os resultados obtidos em todos os modelos intermediários de síntese, bem como as curvas e planos fornecidos pelo sistema SHOPS e sua comparação com a série 60.

6.2 SÍNTESE E OTIMIZAÇÃO DAS DIMENSÕES E COEFICIENTES DE FORMA DO NAVIO GRANELEIRO

Para a solução da primeira parte do problema do projeto preliminar do navio graneleiro empregou-se o modelo de otimização descrito no capítulo 4, baseado na técnica da programação por objetivos. Para permitir uma comparação mais precisa de resultados adotou-se, no sistema SHOPS, as mesmas metas e função objetivo utilizadas por Lyon e Mistree [8] para determinar a solução deste projeto.

No entanto, estes autores não fornecem os valores que utilizaram para as prioridades associadas a cada uma das metas. Desta forma, para efeito de comparação de resultados, considerou-se neste trabalho dois conjuntos distintos de prioridades, cujos valores foram ajustados de acordo com os dois propósitos seguintes: 1) para produzir uma solução na qual o comprimento entre perpendiculares fosse igual ao valor do comprimento "ótimo" calculado através de uma expressão aproximada, elaborada por Schneekluth [16] com base em estatísticas de resultados de modelos de otimização, de forma que se possa avaliar a capacidade do sistema SHOPS em produzir soluções que atendam diferentes critérios de julgamento; 2) para produzir uma solução igual a solução original de Gilfillan [15], que foi também o propósito manifestado por Lyon e Mistree [8], de forma que se possa avaliar a confiabilidade do modelo de otimização.

Para satisfazer o segundo propósito basta ajustar as prioridades para tentar reproduzir a solução de Gilfillan [15]. Para satisfazer o primeiro propósito as prioridades foram ajustadas para que a solução tivesse um comprimento próximo ou igual ao fornecido pela seguinte expressão [16], cujo objetivo é fornecer uma

estimativa do comprimento "ótimo" para atender aos requisitos habituais das empresas de navegação:

$$L = 1,1 * (3,2 * \Delta^{0,3} * V_k^{0,3}) \quad (6.1)$$

Para o exemplo em questão, empregando-se os próprios resultados de Gilfillan [15], o comprimento "ótimo", dado por 6.1, seria:

$$L = 233,89 \text{ m.}$$

Assim, os dados, as metas, a função objetivo e as prioridades empregadas no sistema SHOPS, e que compõem o modelo de otimização para resolver o problema inicial de projeto do navio graneleiro, são os seguintes:

- **Dados**

- DWTcr = 58.768,50 ton
- Vkr = 15 nós
- Rgr = 22.000 milhas náuticas
- GMr = 2,62 m (conforme Gilfillan [15])
- L_{max} = 290,0 m
- B_{max} = 32,32 m
- T_{max} = 12,20 m
- GM_{min} = 0,15 m (conforme Gilfillan [15])
- BL_{min} = tabela de borda livre.
- $\gamma_a = 1,025 \text{ ton/m}^3$
- $f_s = 0,2$ (fator de serviço conforme Gilfillan [15])
- tipo de navio: graneleiro.
- tipo de motor: diesel (conforme Gilfillan[15]).

- **Prioridades**

- Caso 1:

$$P_1 = 10,0$$

$$P_2 = 0,1$$

$$P_3 = 3,5$$

$$P_4 = 0,04$$

- Caso 2:

$$P_1 = 10,0$$

$$P_2 = 0,2$$

$$P_3 = 2,0$$

$$P_4 = 0,03$$

- **Metas**

$$(1) \frac{DWTc}{DWTcr} + d_1^- - d_1^+ = 1$$

$$(2) \frac{GM}{GMr} + d_2^- - d_2^+ = 1$$

$$(3) \frac{\Delta}{DWTcr} + d_3^- - d_3^+ = 1$$

$$(4) 300 * \frac{P_s}{(DWTcr)^{2/3} * (Vkr)^3} + d_4^- - d_4^+ = 0$$

- **Função Objetivo a ser Minimizada**

$$Z = P_1 \cdot (d_1^- + d_1^+) + P_2 \cdot (d_2^- + d_2^+) + P_3 \cdot (d_3^- + d_3^+) + P_4 \cdot (d_4^- + d_4^+)$$

Na tabela 6.1 a seguir apresenta-se, para comparação, os resultados de projeto obtidos com o modelo proposto (SHOPS) para os casos 1 e 2, os resultados de Lyon e Mistree [8] e os resultados de Gilfillan [15]. A solução de Gilfillan foi obtida através de um processo de otimização por "enumeração", ou seja, pela comparação

de soluções geradas a partir da variação individual e discreta das variáveis de projeto. Já a solução apresentada por Lyon e Mistree foi obtida através do modelo de otimização por múltiplos critérios, implementado com a técnica da programação por objetivos, que serviu de base para o sistema SHOPS.

CARACTERÍSTICAS E ATRIBUTOS	RESULTADOS			
	SHOPS Caso 1	SHOPS Caso 2	LYON E MISTREE [8]	GILFILLAN [15]
L (m)	231,05	241,85	240,01	243,84
B (m)	31,81	32,32	32,00	31,70
T (m)	12,15	12,20	12,20	12,19
D (m)	18,77	19,37	18,77	18,13
C _b	0,842	0,819	0,824	0,820
C _w	0,897	0,883	0,872	0,891
C _p	0,847	0,838	0,829	0,828
C _⊙	0,993	0,976	0,995	0,990
Δ (ton)	76.984,8	80.011,8	79.158,3	79.217,5
P _s (hp)	17.346,3	16.629,1	13.389,0	16.946,0
KB (m)	6,33	6,39	6,27	6,42
BM (m)	6,61	6,87	6,58	6,54
KG (m)	10,21	10,64	9,31	10,34
GM (m)	2,73	2,62	3,54	2,62
W _s (ton)	11.210,1	12.132,6	13.090,6	12.594,3
W _M (ton)	1.374,9	1.330,2	804,9	1.339,1
W _O (ton)	1.469,8	1.563,2	1.417,3	1.543,3
W _r (ton)	6.158,2	5.916,8	4.827,2	3.894,3
Δℓ (ton)	14.335,8	15.326,5	15.619,1	16.249,9
LCB _⊙ (%)	+2,93	+3,11	+0,25	+1,99
DWTc (ton)	56.490,8	58.768,5	58.712,1	58.768,5

TABELA 6.1 – Resultados para o Navio Graneleiro

Para maior clareza, a discussão dos resultados da tabela 6.1 será apresentada separadamente para os casos 1 e 2.

Inicialmente, observando-se os resultados do caso 2, é imediato verificar que a solução gerada pelo sistema SHOPS apresenta praticamente as mesmas características e atributos das soluções de Lyon e Mistree e de Gilfillan. Algumas diferenças, no entanto, devem ser observadas considerando-se que a solução de Gilfillan é na realidade a base correta de comparação, já que ela representa o paradigma empregado por Lyon e Mistree para validar o modelo de otimização por eles proposto.

Lembrando que os requisitos de projeto indicados no início deste capítulo foram estabelecidos a partir da solução de Gilfillan, pode-se observar na tabela que a solução do sistema SHOPS atendeu integralmente às metas relativas à capacidade de carga (DWT_{cr}) e à altura metacêntrica (GMr). Já o resultado de Lyon e Mistree fornece uma solução com valor quase exato da capacidade de carga mas com um desvio de 35% em relação à altura metacêntrica requerida.

Com relação às demais características e atributos, as três soluções são bastante próximas, com exceção feita aos resultados referentes à potência instalada e ao peso de combustível. Com relação à potência, os resultados do sistema SHOPS e de Gilfillan são praticamente coincidentes, mas os de Lyon e Mistree diferem consideravelmente destes, com uma diferença da ordem de 20%. Como este valor equivale aproximadamente à margem de serviço adotada, é possível que Lyon e Mistree não tenham considerado adequadamente esta margem, uma vez que não se observa nenhuma referência direta a este valor no trabalho deste autores.

Por outro lado, embora diferentes, os valores de peso de combustível nos resultados do sistema SHOPS e de Lyon e Mistree são coerentes, tendo em vista que no modelo de síntese a quantidade de combustível é função da potência instalada. No entanto estes valores são bastante diferentes do valor apresentado por Gilfillan, havendo uma diferença da ordem de 50% entre a solução deste autor e a solução do sistema SHOPS, embora as potências instaladas sejam praticamente iguais. O motivo desta diferença é o fato de Gilfillan empregar um valor constante de consumo específico para avaliar a quantidade de combustível, enquanto no modelo de síntese do sistema SHOPS este consumo, como já mencionado, é função da potência instalada. Esta diferença no peso do combustível é provavelmente a responsável pela pequena diferença observada no deslocamento total fornecido pelo sistema SHOPS em relação ao resultado de Gilfillan.

De modo geral, no entanto, os três conjuntos de características e atributos refletem basicamente a mesma solução para o problema inicial de projeto preliminar do navio graneleiro, indicando que o sistema SHOPS está elaborado de maneira adequada e pode ser considerado confiável.

Os resultados para o caso 1 demonstram o potencial do modelo de otimização do sistema SHOPS para investigação e busca de alternativas de solução em função de diferentes critérios de julgamento. Tendo em vista o propósito estabelecido para a elaboração deste caso 1, verifica-se que a alteração de prioridades foi capaz de levar a solução para um comprimento praticamente igual ao sugerido pela expressão de Schneekluth [16], com uma diferença da ordem de apenas 1%.

Embora este comprimento tenha sido praticamente atingido, verifica-se que houve uma pequena perda na capacidade de carga, que resulta numa diferença de

aproximadamente 4% em relação à capacidade requerida. Por outro lado, observa-se uma redução de 11% no peso da estrutura, em relação ao resultado de Gilfillan, fato que representa uma redução significativa em termos do custo inicial do navio.

Com estes resultados demonstra-se que a alteração nas prioridades relativas das metas pode efetivamente reproduzir diferentes critérios para julgamento das soluções e permitir uma ampla investigação de soluções "ótimas" para o mesmo problema de projeto, de acordo com as particulares aspirações ou requisitos de cada armador ou projetista.

Com base nestas comparações, pode-se considerar que o modelo de otimização das características principais está adequadamente implementado no sistema SHOPS e fornece soluções coerentes para a primeira parte do problema do projeto preliminar.

Para determinar a solução da segunda parte do problema de projeto do navio graneleiro, aplicou-se o modelo de síntese e otimização da forma do casco implementado no sistema SHOPS.

O processo foi aplicado para os casos 1 e 2, utilizando-se os resultados da otimização inicial como metas e objetivos para a síntese da linha d'água de projeto, da curva vertical de áreas, da seção mestra, do perfil longitudinal e do plano de linhas d'água de cada caso. Como as características e atributos principais são bastante similares e as soluções iniciais se referem ao projeto da mesma embarcação, empregou-se nos dois casos as mesmas metas e prioridades em cada um dos modelos intermediários de otimização que levam à definição da forma do casco.

6.3 SÍNTESE E OTIMIZAÇÃO DA LINHA D'ÁGUA DE PROJETO

Para a definição da linha d'água de projeto associada às soluções referentes aos casos 1 e 2, dadas na tabela 6.1, empregou-se o modelo de síntese e otimização proposto no item 5.3 do capítulo 5. Os dados, as metas, a função objetivo e as prioridades adotados no modelo de otimização da linha d'água de projeto do navio graneleiro, para os casos 1 e 2, são os seguintes:

- **Dados**

DADOS	CASO 1	CASO 2
A_{WL} (m ²)	6.724,48	7.032,52
I_{WL} (m ⁴)	496.654,05	536.173,21
L_{WL} (m)	235,63	246,57
B (m)	31,81	32,32
α_{er} (graus)	35°	35°
ℓ_{pw}^i	0,45	0,45
ℓ_{pw}^s	0,70	0,70
x_{CLP}^i	0,42	0,42
x_{CLP}^s	0,48	0,48
α_{max}^s (graus)	35°	35°
Tipo de entrada	Convexa/reta	Convexa/reta
Tipo de saída	Convexa/reta	Convexa/reta

Tabela 6.2 – Dados para a Síntese da Linha d'Água de Projeto

- **Prioridades**

PRIORIDADES	CASO 1	CASO 2
P ₁	750	750
P ₂	300	300
P ₃	0,1	0,1

Tabela 6.3 – Prioridades para a Síntese da Linha d'Água de Projeto

- **Metas – Casos 1 e 2**

$$(1) \quad 100 * \frac{(A_{WL} - A_{WLR})}{A_{WLR}} + d_1^- - d_1^+ = 0$$

$$(2) \quad 100 * \frac{(I_{WL} - I_{WLR})}{I_{WLR}} + d_2^- - d_2^+ = 0$$

$$(3) \quad 100 * \frac{(\alpha_e / (\pi/2) - \alpha_{er} / 90)}{\alpha_{er} / 90} + d_3^- - d_3^+ = 0$$

- **Função Objetivo a ser Minimizada**

$$Z = P_1 \cdot (d_1^- + d_1^+) + P_2 \cdot (d_2^- + d_2^+) + P_3 \cdot (d_3^- + d_3^+)$$

A tabela 6.4 apresenta os resultados dos principais atributos das linhas d'água de projeto, para os casos 1 e 2, obtidos do sistema SHOPS. Para os atributos envolvidos nas metas, na tabela indica-se também o valor requerido. Na sequência, apresenta-se as figuras 6.1 e 6.2, onde mostra-se os desenhos, também fornecidos pelo sistema SHOPS, que representam as meias linhas d'água de projeto para os casos 1 e 2, respectivamente.

LINHA d'ÁGUA	CASO 1	CASO 2
A_{WL} (m ²)	6.724,05	7.047,36
A_{WLr} (m ²)	6.724,48	7.032,52
I_{WL} (m ⁴)	497.422,43	528.738,31
I_{WLr} (m ⁴)	496.654,05	536.173,21
α_e (graus)	47,3°	39,7°
α_{er} (graus)	35°	35°
α_s (graus)	34,6	30,4°
α_{max} (graus)	34,6	30,4°
x_{B1} (m)	34,30	40,41
x_{B2} (m)	185,03	191,06
B_T (m)	0,27	0,12
C_w	0,897	0,884
C_{wr}	0,897	0,883

Tabela 6.4 – Resultados da Linha d'Água de Projeto

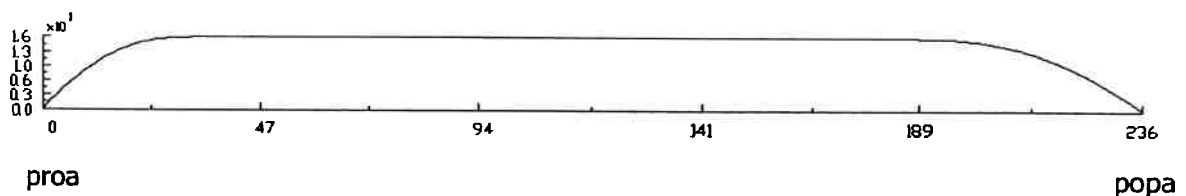


Figura 6.1 – Linha d'Água de Projeto : Caso 1

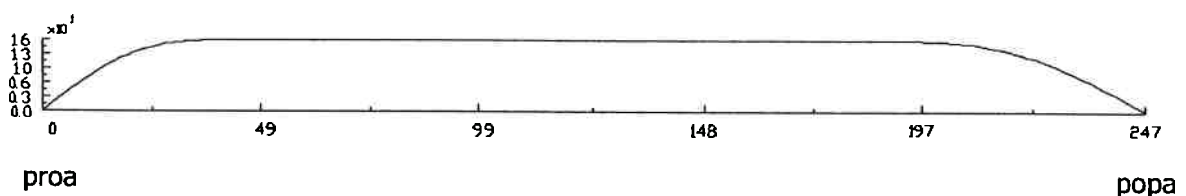


Figura 6.2 – Linha d'Água de Projeto : Caso 2

Na tabela 6.5, a seguir, mostra-se os coeficientes dos polinômios $y_1(x)$ e $y_2(x)$, determinados pelo sistema SHOPS, que descrevem, respectivamente, os corpos de entrada e saída destas linhas d'água.

		CASO 1	CASO 2
Coefficientes do Polinômio $y_1(x)$	a	$7,649 \times 10^{-6}$	$5,611 \times 10^{-6}$
	b	$-3,932 \times 10^{-4}$	$-4,356 \times 10^{-4}$
	c	$-1,354 \times 10^{-2}$	$-2,182 \times 10^{-3}$
	d	1,082	$8,290 \times 10^{-1}$
	e	0	0
Coefficientes do Polinômio $y_2(x)$	f	$1,893 \times 10^{-6}$	$1,655 \times 10^{-6}$
	g	$-1,619 \times 10^{-3}$	$-1,451 \times 10^{-3}$
	h	$5,096 \times 10^{-1}$	$4,692 \times 10^{-1}$
	i	-70,311	-66,550
	j	3.612,759	3.519,164

Tabela 6.5 – Coeficientes dos Polinômios $y_1(x)$ e $y_2(x)$

Com os resultados da síntese da linha d'água de projeto, apresentados na tabela 6.4 e nas figuras 6.1 e 6.2, mostra-se que o modelo de otimização proposto é uma ferramenta bastante adequada para o projeto desta linha d'água.

Em termos das metas de projeto, na tabela 6.4 mostra-se que a meta referente à área da linha d'água foi efetivamente atendida em ambos os casos, sendo a maior diferença da ordem de 0,2% para o caso 2. A meta referente ao momento de inércia também foi praticamente atendida para o caso 1 e atendida com precisão suficiente no caso 2, onde a diferença ficou na ordem de 1,4%.

Já a meta referente ao ângulo de entrada, estabelecida de acordo com os valores sugeridos nas referências [19] e [26], tendo em vista a resistência ao avanço do casco, não foi atendida no caso 1, sendo a diferença neste caso da ordem de 35%, e foi precariamente atendida no caso 2, onde a diferença ficou na ordem de 13%. A menor distância para a meta, que ocorre no caso 2, está claramente ligada ao fato da linha d'água possuir, neste caso, um comprimento maior, o que permite acomodar um corpo de entrada mais longo e também, conseqüentemente, um menor ângulo de entrada, como pode-se constatar através dos valores de x_{B1} e α_e .

Adicionalmente, esta conclusão fornece uma indicação do motivo pelo qual a meta referente ao ângulo de entrada não foi adequadamente atendida em ambos os casos. As restrições de projeto do navio graneleiro impõem limitações de boca e calado à embarcação, fazendo com que, para um mesmo comprimento, mais volume de casco deva ser alocado nos corpos de entrada e saída, para que se mantenha uma mesma capacidade de carga. Como isto é indesejável, em termos de resistência ao avanço, a tendência é de que se procure aumentar o comprimento para afilar o casco e simultaneamente manter a capacidade de carga. Por outro lado, caso o comprimento não sofra acréscimos relevantes, para não causar um aumento indesejado do peso estrutural e, conseqüentemente do deslocamento total do navio, a solução para acomodar o volume necessário nos corpos de entrada e saída é torná-los mais "cheios", ou seja, com comprimentos mais curtos e ângulos de entrada e saída maiores.

Como nas metas do processo inicial de otimização estavam presentes os objetivos de minimizar a potência instalada e de minimizar o deslocamento, ambos diretamente influenciados pela forma do casco, é evidente que o comprimento obtido

em ambos os casos resultou de uma solução de compromisso que procurou atender aos objetivos de acordo com a prioridade estabelecida. Como em ambos os casos a prioridade dada à minimização do deslocamento foi bem superior à da minimização da potência, de ordem mais do que 50 vezes maior, as soluções tenderam para navios mais "cheios", ou seja de menor comprimento e menores corpos de entrada e saída. Uma evidência interessante deste conflito de soluções está no fato de que a potência instalada no caso 2 é menor do que a do caso 1, ocorrendo o oposto em relação ao peso estrutural e ao deslocamento, como se mostra na tabela 6.1. O reflexo disto se fez sentir no processo de síntese da linha d'água de projeto, mais precisamente sobre o ângulo de entrada destas linhas, que no caso 2 resultou bem mais próximo da meta do que no caso 1.

Uma análise similar pode ser feita para os valores dos ângulos de saída que, no caso 1, superou em 15% o valor máximo de 30° recomendado por Watson [22] para não ocorrer deterioração do escoamento para o hélice e o leme da embarcação.

O reflexo final deste conflitos de objetivos na geometria da linha d'água pode ser visto nas figuras 6.1 e 6.2, onde mostra-se uma forma de linha característica de navio "cheio", com o centro de carena posicionado a vante do meio comprimento da embarcação e o corpo de vante com comprimento menor do que o corpo de ré.

A discussão acima mostra claramente a importância de se dispor de uma ferramenta de síntese que permita considerar simultaneamente vários objetivos de projeto, pois isto torna possível não só investigar diferentes soluções como também identificar nos resultados as influências e os conflitos gerados por cada objetivo.

6.4 SÍNTESE E OTIMIZAÇÃO DA CURVA VERTICAL DE ÁREAS

Para a definição da curva vertical de áreas associada às soluções referentes aos casos 1 e 2, dadas na tabela 6.1, e às respectivas linhas d'água de projeto definidas no item anterior, empregou-se o modelo de síntese e otimização proposto no item 5.3 do capítulo 5. Os dados, as metas, a função objetivo e as prioridades adotados no modelo de otimização da curva vertical de áreas do navio graneleiro, para os casos 1 e 2, são os seguintes:

- **Dados**

DADOS	CASO 1	CASO 2
C_{b_r}	0,842	0,819
$C_{W_{pr}}$	0,915	0,902
KB_r (m)	6,33	6,39
T_r (m)	12,15	12,20
α^s (graus)	10°	10°
β^s (graus)	10°	10°
c_3^i	-1	-1
c_3^s	1	1
c_4^i	-1	-1
c_4^s	1	1

Tabela 6.6 – Dados para a Síntese da Curva Vertical de Áreas

- **Prioridades**

PRIORIDADES	CASO 1	CASO 2
P_1	1	1
P_2	1	1

Tabela 6.7 – Prioridades para a Síntese da Curva Vertical de Áreas

- **Metas – Casos 1 e 2**

$$(1) \frac{(Cb - Cb_r)}{Cb_r} + d_1^- - d_1^+ = 0$$

$$(2) \frac{\left(M_{sf}^{CA} - Cb_r * \frac{KB_r}{T_r} \right)}{Cb_r * \frac{KB_r}{T_r}} + d_2^- - d_2^+ = 0$$

- **Função Objetivo a ser Minimizada**

$$Z = P_1 \cdot (d_1^- + d_1^+) + P_2 \cdot (d_2^- + d_2^+)$$

Na tabela 6.8 apresenta-se os resultados dos principais atributos das curvas verticais de área, para os casos 1 e 2, obtidos do sistema SHOPS. Para os atributos envolvidos nas metas, na tabela indica-se também o valor requerido. Na sequência, apresenta-se as figuras 6.3 e 6.4, onde mostra-se os desenhos, também fornecidos pelo sistema SHOPS, que representam as curvas verticais de áreas para os casos 1 e 2, respectivamente.

CURVA VERTICAL DE ÁREAS	CASO 1	CASO 2
Cb	0,842	0,819
Cb _r	0,842	0,819
KB/T	0,523	0,525
KB _r /T _r	0,521	0,524
Cw _p	0,915	0,902
Cw _{pr}	0,915	0,902
T (m)	12,15	12,20
T _r (m)	12,15	12,20

Tabela 6.8 – Resultados da Curva Vertical de Áreas

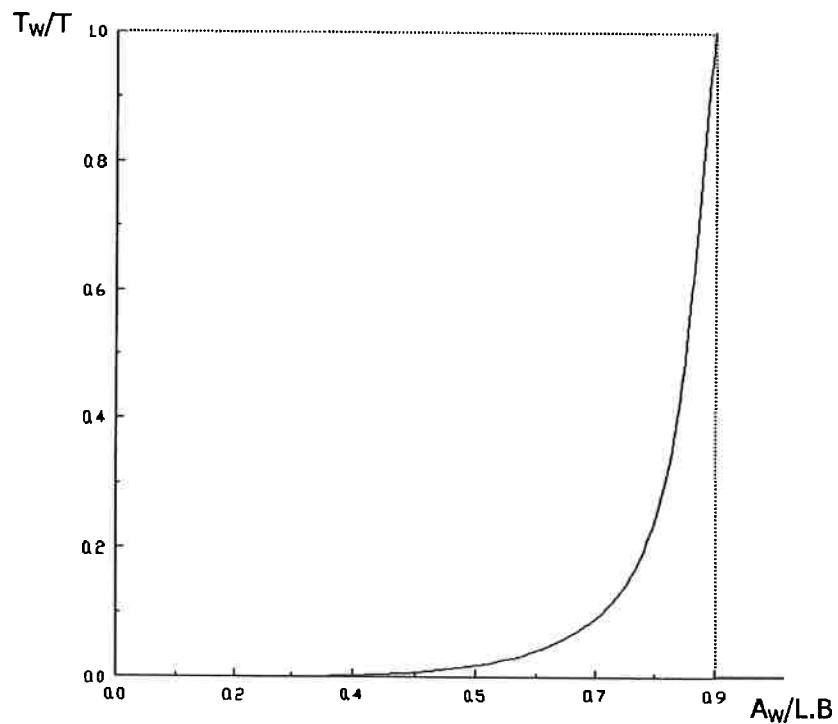


Figura 6.3 – Curva Vertical de Áreas : Caso 1

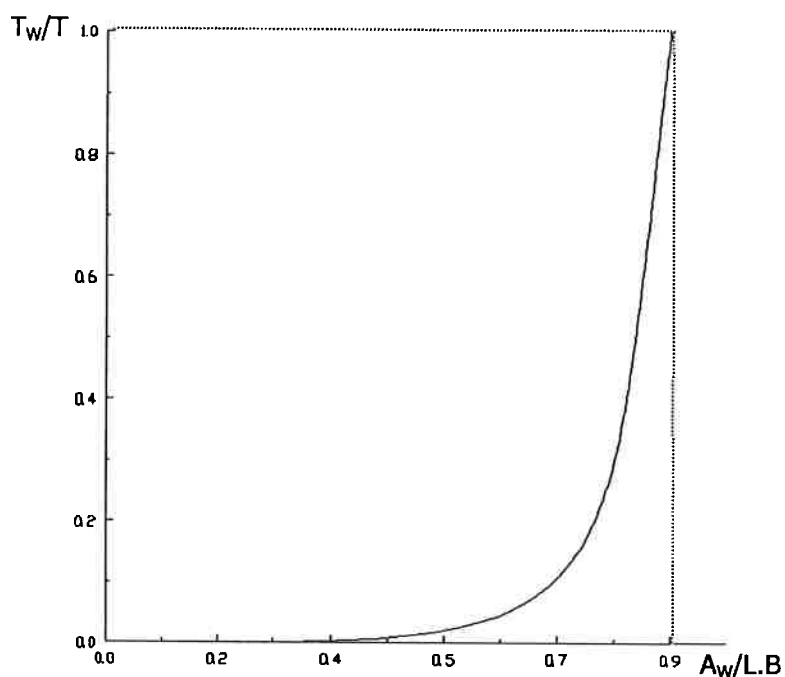


Figura 6.4 – Curva Vertical de Áreas : Caso 2

Na tabela 6.9, a seguir, mostra-se os valores das variáveis independentes obtidos nos processos de síntese da curva vertical de área, para ambos os casos, conforme o modelo definido no item 5.3.2, do capítulo 5.

VARIÁVEIS	CASO 1	CASO 2
C_3	$-1,197 \times 10^{-1}$	$-1,189 \times 10^{-1}$
C_4	$1,772 \times 10^{-3}$	$2,048 \times 10^{-3}$
β (graus)	$5,18^0$	$6,70^0$
α (graus)	0	0

Tabela 6.9 – Variáveis do Modelo de Síntese da Curva Vertical de Áreas

Os resultados mostrados na tabela 6.8 e nas figuras 6.3 e 6.4, indicam que os modelos de síntese e otimização propostos são bastante adequados para definição da curva vertical de áreas de uma embarcação.

Na tabela 6.8 mostra-se que, em ambos os casos, a distribuição de áreas resultante do processo de síntese forma uma curva cuja área interna (área entre a curva e o eixo de calados) atende exatamente as metas referentes ao coeficiente de bloco e, portanto, ao volume deslocado. Em relação à altura do centro de carena, na tabela mostra-se que as metas foram praticamente atendidas, sendo a maior diferença da ordem de apenas 0,5% para o caso 1.

Nas figuras 6.3 e 6.4 mostra-se as curvas verticais de áreas para os casos 1 e 2, respectivamente, obtidas através da substituição dos valores das variáveis, indicados na tabela 6.9, nas equações do modelo de síntese proposto no item 5.3.2. As curvas mostradas nas figuras são praticamente idênticas, já que metas nos dois casos são muito semelhantes. A forma destas curvas sugere uma embarcação com casco bastante "cheio" e prismático, ou seja, com uma variação pequena das áreas de linhas d'água até próximo ao calado zero ou plano de base, o que era de se esperar tendo em vista os resultados obtidos no processo inicial de otimização.

Esta característica, no entanto, muda radicalmente na região do calado zero, onde, em ambas as curvas, ocorre uma grande variação de área com uma pequena mudança de calado. Como se verá adiante, esta alta taxa de variação causa algumas dificuldades na síntese do plano de linhas d'água no que tange à definição de linhas d'água situadas no calado zero, ou em calados muito próximos a este, caso a área destas linhas não seja nula ou de valor muito pequeno quando comparado à área da linha d'água de projeto.

6.5 SÍNTESE E OTIMIZAÇÃO DA SEÇÃO MESTRA

Para a definição da seção mestra das embarcações representadas pelas soluções referentes aos casos 1 e 2, dadas na tabela 6.1, e com as linhas d'água de projeto e curvas verticais de área definidas nos itens anteriores, empregou-se o modelo de síntese e otimização proposto no item 5.4 do capítulo 5. Os dados, as metas, a função objetivo e as prioridades adotados nas etapas 1 e 2 definidas no modelo de otimização da seção mestra para o navio graneleiro, para os casos 1 e 2, são os seguintes:

- **Dados**

DADOS	CASO 1	CASO 2
$C_{\theta r}$	0,993	0,976
$k_{C_{SMr}}$ (m)	6,09	6,17
T_r (m)	12,15	12,20
B_r (m)	31,81	32,32
α^s (graus)	0	0
β^s (graus)	0	0
C_3^i	-1	-1
C_3^s	1	1
C_4^i	-1	-1
C_4^s	1	1
tolC	1×10^{-4}	1×10^{-4}
tolk	1×10^{-3}	1×10^{-3}
α_{frr} (graus)	0	0

Tabela 6.10 – Dados para a Síntese da Seção Mestra

- **Prioridades**

PRIORIDADES	CASO 1	CASO 2
P_1	1	1
P_2	1	1

Tabela 6.11 – Prioridades para a Síntese da Seção Mestra

- **Metas – Casos 1 e 2**

$$(1) \frac{(C_{\otimes} - C_{\otimes r})}{C_{\otimes r}} + d_1^- - d_1^+ = 0$$

$$(2) \frac{\left(M_{sf}^{SA} - C_{\otimes r} * \frac{kC_{SMr}}{T_r} \right)}{C_{\otimes r} * \frac{kC_{SMr}}{T_r}} + d_2^- - d_2^+ = 0$$

- **Função Objetivo a ser Minimizada**

$$Z = P_1 \cdot (d_1^- + d_1^+) + P_2 \cdot (d_2^- + d_2^+)$$

- **Avaliação do Erro de C_{\otimes} e de kC_{SM}**

$$- \text{ErC} = \left| \frac{C_{\otimes} - C_{\otimes r}}{C_{\otimes r}} \right|$$

$$- \text{Erk} = \left| \frac{kC_{SM} - kC_{SMr}}{kC_{SMr}} \right|$$

- Se $\text{ErC} > \text{tolC}$ ou $\text{Erk} > \text{tolk}$ então passa-se à etapa 2.

- **Etapa 2 – Seção Mestre de Forma Regular**

- R_b : de acordo com a equação 5.167.
- M_{SF}^{SM} : de acordo com a equação 5.169.
- k_{CSM} : de acordo com a equação 5.170.
- cv_{cb} : de acordo com a equação 5.171.
- ch_{cb} : de acordo com a equação 5.172.

Na tabela 6.12, mostra-se os resultados obtidos na etapa 1 do processo de síntese da seção mestra, ou seja, através da aplicação do modelo de síntese baseado na transformação conforme proposta nos itens 5.3 e 5.4 do capítulo 5.

RESULTADOS ETAPA 1 TRANSFORMADA CONFORME	CASO 1	CASO 2
C_{\emptyset}	0,957	0,957
$C_{\emptyset r}$	0,993	0,976
k_{CSM} (m)	6,28	6,31
k_{CSMr} (m)	6,09	6,17
T (m)	12,15	12,20
T_r (m)	12,15	12,20
B (m)	31,81	32,32
B_r (m)	31,81	32,32
ErC	$3,6 \times 10^{-2}$	$1,9 \times 10^{-2}$
tolC	1×10^{-4}	1×10^{-4}
Erk	$3,1 \times 10^{-2}$	$2,3 \times 10^{-2}$
tolk	1×10^{-3}	1×10^{-3}

Tabela 6.12 – Resultados da Etapa 1 da Síntese da Seção Mestre

Como era de se esperar, as diferenças entre os valores obtidos e os valores requeridos, de coeficiente de seção mestra e de altura do centro geométrico, foram maiores do que as tolerâncias estabelecidas para se aceitar a seção resultante da síntese com base na transformação conforme proposta. Este resultado já havia sido antecipado no item 5.4, tendo em vista as limitações da transformada de quatro termos em mapear curvas com coeficiente de área, ou de seção mestra, com valores superiores a aproximadamente 0,95, como é o caso dos coeficientes obtidos nas soluções iniciais dos casos 1 e 2 referentes ao navio graneleiro.

Neste caso, o sistema SHOPS automaticamente refaz a síntese empregando o modelo de formas regulares, conforme definido no item 5.4. Os resultados destas formas regulares de seção, para os casos 1 e 2, estão na tabela 6.13, a seguir.

RESULTADOS ETAPA 2 FORMAS REGULARES	CASO 1	CASO 2
C_{∞}	0,993	0,976
$C_{\infty r}$	0,993	0,976
k_{CSM} (m)	6,10	6,17
k_{CSMr} (m)	6,09	6,17
R_b (m)	2,51	4,65
cv_{cb} (m)	2,51	4,65
ch_{cb} (m)	13,81	11,51
α_{fr} (graus)	0	0

Tabela 6.13 – Resultados da Etapa 2 da Síntese da Seção Mestra

Na tabela 6.13 mostra-se que os resultados da seção mestra de forma regular, para os casos 1 e 2, atendem integralmente aos requisitos referentes ao coeficiente

de seção mestra, como era de se esperar já que o modelo de síntese, neste caso, impõe o valor requerido como parâmetro fixo. No caso da altura do centro geométrico, o requisito foi plenamente atendido no caso 2, e atendido com um erro mínimo, da ordem de 0,2%, no caso 1. Nas figuras 6.5 e 6.6, a seguir, mostra-se os desenhos das seções de forma regular fornecidos pelo sistema SHOPS, para os casos 1 e 2, respectivamente.

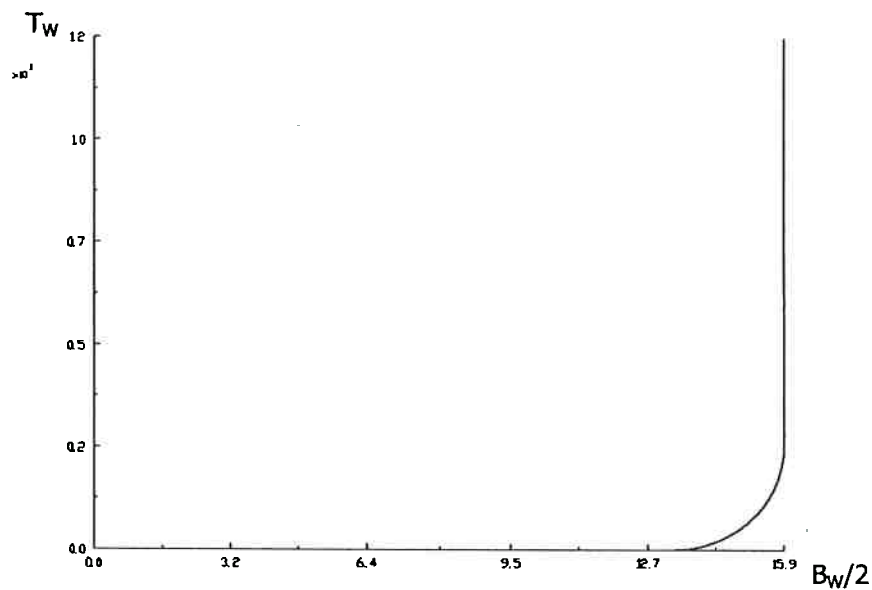


Figura 6.5 – Seção Mestra : Caso 1

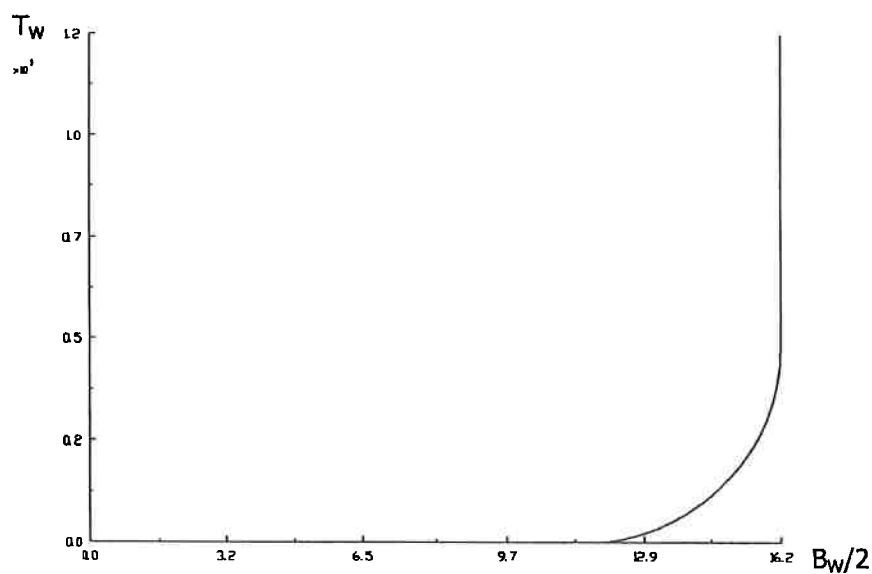


Figura 6.6 – Seção Mestra : Caso 2

Nas figuras 6.5 e 6.6 mostra-se claramente o efeito da redução do coeficiente de seção mestra na forma da seção, como ocorre do caso 1 para o caso 2. De qualquer modo, em ambos os casos, o valor elevado deste coeficiente implica numa seção "cheia", sugerindo também uma embarcação de casco bastante prismático, com variações expressivas de boca ocorrendo apenas nas regiões próximas ao calado zero. Esta característica, da mesma forma que no caso da curva vertical de áreas, também é responsável por certas dificuldades na definição das linhas d'água situadas neste calado ou bem próximas a ele.

Estas dificuldades estão relacionadas com o fato da curva de áreas eventualmente indicar, por sua forma, uma área não nula para a linha d'água no calado zero, numa região onde a variação das áreas é muito acentuada. Como a área não é nula, necessariamente a linha d'água deverá ter também uma boca não nula e com valor coerente com a área indicada. Como esta linha se situa também numa região de variação muito acentuada de bocas, qualquer pequeno erro ou aproximação tanto na síntese da seção mestra como na síntese da curva vertical de áreas pode, eventualmente, resultar em valores de boca e área não coerentes entre si, comprometendo, posteriormente, a definição desta linha d'água na síntese do plano de linhas d'água.

6.6 SÍNTESE DO PERFIL LONGITUDINAL

A síntese do perfil longitudinal é realizada pelo sistema SHOPS, através da aplicação direta das equações definidas no item 5.5, que definem o perfil na popa da embarcação e permitem, posteriormente, que se determine as coordenadas da extremidade final das linhas d'água situadas nos calados escolhidos para formar o

plano de linhas d'água.

O perfil da popa é definido basicamente em função de estimativas das dimensões do hélice e do leme da embarcação, realizadas conforme as aproximações definidas no item 5.5. Para os casos 1 e 2, estas dimensões são as seguintes:

DIMENSÕES DO HÉLICE E DO LEME	CASO1	CASO2
D_p (m)	7,90	7,93
A_L (m ²)	41,38	42,68
s_L (m)	8,51	8,54
c_L (m)	4,86	5,00

Tabela 6.14 – Dimensões do Hélice e do Leme para os Casos 1 e 2

Com base nestas dimensões, aplica-se as equações definidas no item 5.5 e obtêm-se as coordenadas dos pontos que definem o perfil de popa. As figuras 6.7 e 6.8 a seguir, ilustram o perfil longitudinal definido pelo sistema SHOPS. Nestas figuras, o perfil na região de proa é apenas ilustrativo, já que as coordenadas longitudinais do início das linhas serão definidas na síntese do plano de linhas d'água.

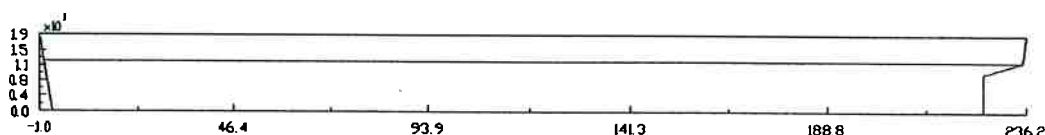


Figura 6.7 – Perfil Longitudinal : Caso 1

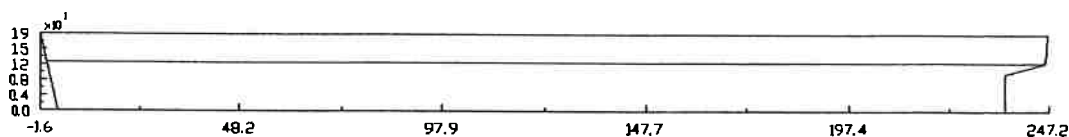


Figura 6.8 – Perfil Longitudinal : Caso 2

Para se definir as coordenadas do final das linhas d'água é necessário fixar-se primeiro o número de linhas que será definido na síntese do plano de linhas d'água e o calado de cada uma. Para a definição deste número aparentemente não existe nenhuma prática usual de projeto que oriente esta escolha. É mais provável que este número seja definido caso a caso, em função das características e da forma esperada para o casco da embarcação. Considera-se neste trabalho que um número entre 5 e 10 linhas seja suficiente para representar adequadamente a superfície do casco de um navio convencional, para os propósitos de uso em programas de análise e de arquitetura naval nos ciclos subsequentes do projeto preliminar.

Para o exemplo em questão, adotou-se um plano formado por oito linhas, incluindo as linhas d'água de projeto e a linha situada no calado zero, de modo que a síntese do mesmo deve contemplar a definição de sete linhas d'água. A distribuição destas linhas ao longo eixo de calados, entre o calado de projeto e o calado zero, é realizada automaticamente pelo sistema SHOPS de modo a concentrar mais linhas nas regiões de maior variação da área na curva de áreas vertical. Para os casos 1 e 2 os calados estabelecidos para as oito linhas, com base na curva vertical de áreas, e

as coordenadas longitudinais, definidas através do perfil longitudinal, são os seguintes:

NÚMERO DA LINHA	CALADO (m)	x_{fw} (m)
1	12,15	235,63
2	9,46	226,36
3	7,18	225,73
4	5,25	225,73
5	3,60	225,73
6	2,20	225,73
7	1,01	225,73
8	0	225,73

Tabela 6.15 – Calados e Coordenadas do Final das Linhas : Caso 1

NÚMERO DA LINHA	CALADO (m)	x_{fw} (m)
1	12,20	246,57
2	9,51	237,08
3	7,22	236,49
4	5,27	236,49
5	3,62	236,49
6	2,21	236,49
7	1,02	236,49
8	0	236,49

Tabela 6.16 – Calados e Coordenadas do Final das Linhas : Caso 2

6.7 A SÍNTESE DO CASCO DO NAVIO GRANELEIRO

De acordo com o modelo de síntese da superfície do casco proposto no capítulo 5, uma vez definidas as quatro curvas anteriores, resta determinar o plano de linhas d'água para se completar a definição do casco da embarcação. Para isto, de acordo com o modelo de síntese e otimização deste plano, proposto no item 5.6, deve-se empregar os resultados da síntese e otimização das quatro curvas anteriores e da síntese e otimização inicial das características principais da embarcação, para se formular o conjunto de metas, objetivos, restrições e parâmetros fixos que definem o problema de síntese e otimização do plano de linhas d'água. Assim, com base nos resultados anteriores e no modelo proposto no item 5.6, os dados, as metas, a função objetivo e as prioridades para a síntese dos cascos do navio graneleiro que representam as soluções referentes aos casos 1 e 2, são os seguintes:

- **Dados : Caso 1**

- $N_W = 8$
- $L_{PM}^i = 0,25$
- $L_{PM}^s = 0,45$
- $x_{LPM}^i = 0,40$
- $x_{LPM}^s = 0,48$
- $LCB_r = 108,75$ m
- $x_i^1, x_{B1}^1, x_{B2}^1, x_f^1, B_W^1, B_T^1, \alpha_e^1, \alpha_s^1, y_1^1(x), y_2^1(x)$: dados da linha d'água de projeto ($n=1$), apresentados nas tabelas 6.2, 6.4 e 6.5.

- dados nas $N_w - 1$ linhas d'água

n	T_w (m)	A_w (m ²)	B_w (m)	x_{rw} (m)
2	9,46	6.583,48	31,81	226,36
3	7,18	6.463,95	31,81	225,73
4	5,25	6.335,62	31,81	225,73
5	3,60	6.159,88	31,81	225,73
6	2,20	5.872,07	31,77	225,73
7	1,01	5.299,49	30,81	225,73
8	0	2.418,62	26,79	225,73

Tabela 6.17 – Dados das Linhas d'Água : Caso 1

- **Dados : Caso 2**

- $N_w = 8$
- $L_{PM}^i = 0,25$
- $L_{PM}^s = 0,45$
- $x_{LPM}^i = 0,40$
- $x_{LPM}^s = 0,48$
- $LCB_r = 113,41$ m
- $x_i^1, x_{B1}^1, x_{B2}^1, x_f^1, B_w^1, B_T^1, \alpha_e^1, \alpha_s^1, y_1^1(x), y_2^1(x)$: dados da linha d'água de projeto ($n=1$), apresentados nas tabelas 6.2, 6.4 e 6.5.

– dados nas $N_w - 1$ linhas d'água

n	T_w (m)	A_w (m ²)	B_w (m)	x_{rw} (m)
2	9,51	6.853,98	32,32	237,08
3	7,22	6.694,12	32,32	236,49
4	5,27	6.534,74	32,32	236,49
5	3,62	6.334,55	32,08	236,49
6	2,21	6.026,19	30,93	236,49
7	1,02	5.432,30	28,82	236,49
8	0	2.481,25	23,01	236,49

Tabela 6.18 – Dados das Linhas d'Água : Caso 2

- **Prioridades**

PRIORIDADES	CASO 1	CASO 2
P_1	10	10
P_2	10.000	10.000

Tabela 6.19 – Prioridades para a Síntese do Plano de Linhas d'Água

- **Metas – Casos 1 e 2**

$$(1) \frac{(LCB - LCB_r)}{LCB_r} + d_1^- - d_1^+ = 0$$

$$(2) F_{GC} - d_2^+ = 0$$

- **Função Objetivo a ser Minimizada**

$$Z = P_1 * (d_1^- + d_1^+) + P_2 * d_2^+$$

Nas tabelas 6.20, 6.21 e 6.22, a seguir, mostra-se os resultados da síntese dos planos de linhas d'água, realizada através do sistema SHOPS, para os casos 1 e 2. Na tabela 6.20 apresenta-se os resultados relativos aos atributos envolvidos nas metas estabelecidas para os problemas de síntese. Nas tabelas 6.21 e 6.22 apresenta-se os valores obtidos para os principais atributos e características das linhas que formam os planos de linhas d'água dos cascos referentes aos casos 1 e 2, respectivamente.

Após as tabelas apresenta-se as figuras 6.9 e 6.10, onde mostra-se o plano de linhas d'água e o plano de balizas do casco do navio graneleiro referente à solução do caso 1. Em seguida apresenta-se as figuras 6.11 e 6.12 com os mesmos planos para o caso 2. Os planos de balizas são determinados pelo sistema SHOPS após a definição dos planos de linhas d'água. O usuário do sistema indica o número de balizas que deseja e o sistema calcula as coordenadas dos pontos de cada seção transversal, com base nas equações que definem cada linha d'água. No desenho do plano de balizas, fornecido pelo sistema SHOPS, os pontos das seções são ligados através de segmentos de reta, apenas para efeito de apresentação gráfica.

- **Resultados Relativos às Metas**

METAS	RESULTADOS CASO 1	RESULTADOS CASO 2
LCB (m)	108,75	114,13
LCB _r (m)	108,75	113,41
F _{GC}	0	0

Tabela 6.20 – Resultados Relativos às Metas para os Planos de Linhas d'Água

• **Resultados : Linhas d'Água do Casco do Caso 1**

	LINHAS D'ÁGUA						
	2	3	4	5	6	7	8
x_i (m)	0	0	0	0,01	0,02	0,02	36,14
x_f (m)	226,36	225,73	225,73	225,73	225,73	225,73	143,41
x_{B1} (m)	34,42	34,52	34,55	34,58	38,39	51,21	62,08
x_{B2} (m)	179,86	167,59	151,09	127,94	127,86	127,27	126,63
α_e (°)	47,25	47,25	47,11	44,25	43,84	30,81	1,76
α_s (°)	52,46	44,36	36,69	29,78	16,92	1,93	1,85
B_T (m)	0,18	0,14	0,04	0,01	0	0	0
A_e (m ²)	785,08	787,81	787,62	776,22	872,82	1102,63	419,07
A_s (m ²)	1.172,35	1.443,63	1.840,88	2.414,04	2.157,02	1.853,19	270,63
LCF (m)	113,26	111,51	109,71	107,67	104,30	102,25	91,50
a	$7,5 \times 10^{-6}$	$7,3 \times 10^{-6}$	$7,4 \times 10^{-6}$	$9,8 \times 10^{-6}$	$5,0 \times 10^{-6}$	$2,3 \times 10^{-6}$	$9,0 \times 10^{-5}$
b	$-3,8 \times 10^{-4}$	$-3,7 \times 10^{-4}$	$-3,8 \times 10^{-4}$	$-6,3 \times 10^{-4}$	$-2,9 \times 10^{-4}$	$-2,4 \times 10^{-4}$	$-1,86 \times 10^{-2}$
c	$-1,37 \times 10^{-2}$	$-1,39 \times 10^{-2}$	$-1,35 \times 10^{-2}$	$-4,7 \times 10^{-3}$	$-1,03 \times 10^{-2}$	$3,5 \times 10^{-3}$	1,447
d	1,082	1,082	1,076	$9,74 \times 10^{-1}$	$9,61 \times 10^{-1}$	$5,96 \times 10^{-1}$	-48,25
e	$-7,6 \times 10^{-4}$	$-1,1 \times 10^{-3}$	$-4,6 \times 10^{-3}$	$-6,1 \times 10^{-3}$	$-2,16 \times 10^{-2}$	$-1,42 \times 10^{-2}$	581,49
f	$-2,8 \times 10^{-6}$	$-8,2 \times 10^{-7}$	$-2,6 \times 10^{-7}$	$-9,0 \times 10^{-8}$	$1,9 \times 10^{-7}$	$4,6 \times 10^{-7}$	$5,0 \times 10^{-4}$
g	$2,0 \times 10^{-3}$	$5,2 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-4}$	$4,0 \times 10^{-5}$	$-1,4 \times 10^{-4}$	$-2,9 \times 10^{-4}$	$-2,64 \times 10^{-1}$
h	$-5,28 \times 10^{-1}$	$-1,22 \times 10^{-1}$	$-2,65 \times 10^{-2}$	$-5,8 \times 10^{-3}$	$3,29 \times 10^{-2}$	$6,77 \times 10^{-2}$	52,35
i	62,44	12,67	2,24	$3,57 \times 10^{-1}$	-3,40	-6,73	-4.599,1
j	-2.752,2	-476,08	-52,25	8,76	143,27	261,05	151.300,6

Tabela 6.21 – Atributos e Características das Linhas d'Água : Caso 1

• **Resultados : Linhas d'Água do Casco do Caso 2**

	LINHAS D'ÁGUA						
	2	3	4	5	6	7	8
x_i (m)	0	0,03	0,03	0,03	0,06	0,46	40,10
x_f (m)	237,08	236,49	236,49	236,49	236,49	236,49	150,76
x_{B1} (m)	41,24	43,30	45,52	46,30	46,55	46,77	46,89
x_{B2} (m)	191,03	152,64	152,63	150,64	150,59	150,48	150,37
α_e (°)	39,66	39,66	39,66	39,65	39,44	23,40	6,78
α_s (°)	40,04	37,49	29,20	19,82	13,18	4,87	0
B_T (m)	0,08	0,03	0,02	0,01	0	0	0
A_e (m ²)	940,70	994,37	1.053,68	1.068,20	1.040,47	893,54	94,17
A_s (m ²)	1.072,49	2.166,10	2.019,54	1.918,51	1.767,19	1.550,17	5,37
LCF (m)	118,21	116,37	114,47	112,31	110,93	110,60	96,69
a	$4,9 \times 10^{-6}$	$3,6 \times 10^{-6}$	$2,5 \times 10^{-6}$	$2,1 \times 10^{-6}$	$1,7 \times 10^{-6}$	$5,0 \times 10^{-6}$	$1,60 \times 10^{-2}$
b	$-3,8 \times 10^{-4}$	$-2,7 \times 10^{-4}$	$-1,7 \times 10^{-4}$	$-1,3 \times 10^{-4}$	$-9,0 \times 10^{-5}$	$-5,6 \times 10^{-4}$	-2,85
c	$-3,0 \times 10^{-3}$	$-5,7 \times 10^{-3}$	$-7,8 \times 10^{-3}$	$-8,8 \times 10^{-3}$	$-1,01 \times 10^{-2}$	$1,31 \times 10^{-2}$	190,01
d	$8,29 \times 10^{-1}$	$8,29 \times 10^{-1}$	$8,29 \times 10^{-1}$	$8,29 \times 10^{-1}$	$8,24 \times 10^{-1}$	$4,21 \times 10^{-1}$	-5.620,3
e	$-2,0 \times 10^{-3}$	$-2,19 \times 10^{-2}$	$-2,19 \times 10^{-2}$	$-2,28 \times 10^{-2}$	$-5,24 \times 10^{-2}$	$-1,95 \times 10^{-1}$	62.150,4
f	$2,1 \times 10^{-6}$	$-3,2 \times 10^{-7}$	$3,2 \times 10^{-8}$	$3,2 \times 10^{-7}$	$4,8 \times 10^{-7}$	$6,6 \times 10^{-7}$	1.505,4
g	$-1,9 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-4}$	$-5,0 \times 10^{-5}$	$-2,4 \times 10^{-4}$	$-3,6 \times 10^{-4}$	$-4,7 \times 10^{-4}$	-906.256,1
h	$6,22 \times 10^{-1}$	$-4,48 \times 10^{-2}$	$1,83 \times 10^{-2}$	$6,68 \times 10^{-2}$	$9,54 \times 10^{-2}$	$1,25 \times 10^{-1}$	$2,05 \times 10^8$
i	-88,87	4,54	-2,56	-7,90	-11,08	-14,31	$-2,05 \times 10^{10}$
j	4.720,9	-156,91	140,58	358,36	488,67	620,19	$7,72 \times 10^{11}$

Tabela 6.22 – Atributos e Características das Linhas d'Água : Caso 2

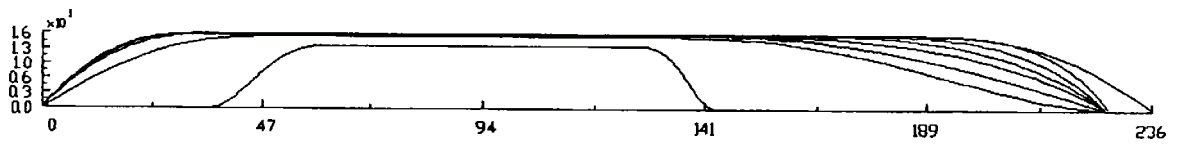


Figura 6.9 – Plano de Linhas d'Água do Navio Graneleiro: Caso 1

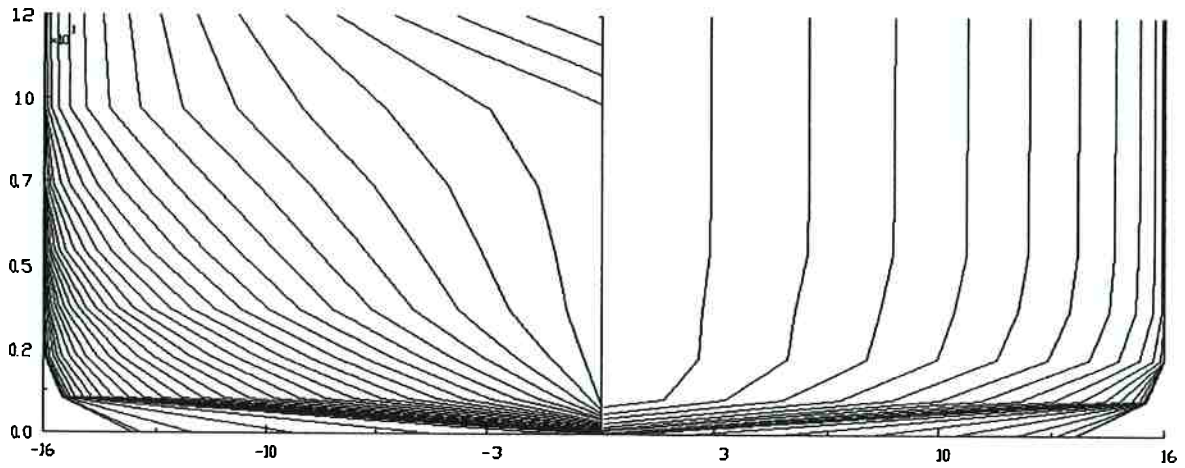


Figura 6.10 – Plano de Balizas do Navio Graneileiro: Caso 1

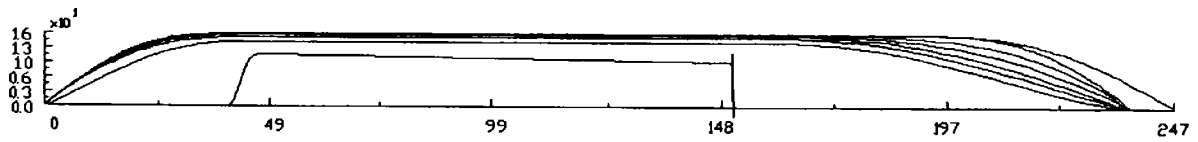


Figura 6.11 – Plano de Linhas d'Água do Navio Graneleiro: Caso 2

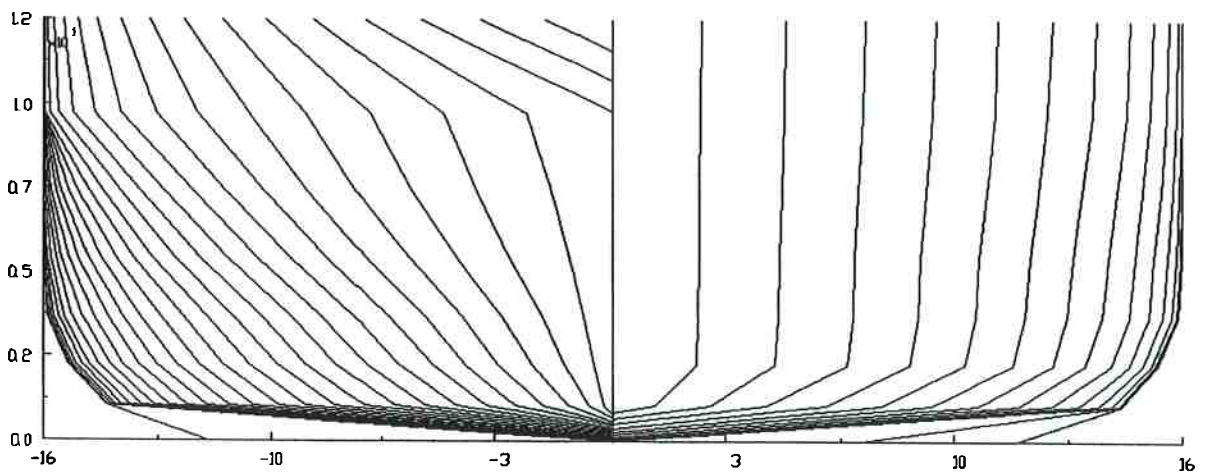


Figura 6.12 – Plano de Balizas do Navio Graneleiro: Caso 2

Nos resultados da tabela 6.20 mostra-se que a meta referente à posição longitudinal do centro de carena foi plenamente atendida no caso 1, e atendida de forma bastante satisfatória no caso 2, com uma diferença da ordem de apenas 0,63%. No caso da carenagem do plano de linhas d'água a meta foi plenamente atendida pois, em ambos os casos, obteve-se um valor nulo para a função geral de carenagem (F_{GC}), o que indica que nenhuma das condições definidas no item 5.6 foi violada. Isto pode ser constatado também através dos resultados apresentados nas tabelas 6.21 e 6.22.

Adicionalmente, nestas duas últimas tabelas pode-se observar os valores determinados pelo processo de otimização para as coordenadas x_i , de início das linhas d'água, que definem a forma do perfil de proa da embarcação, conforme havia sido estabelecido no modelo de síntese.

Estes resultados indicam, em tese, que os planos de linhas obtidos através do sistema SHOPS representam adequadamente o casco do navio graneleiro para os casos 1 e 2, tendo em vista o atendimento satisfatório às metas, objetivos e restrições definidas de acordo com os resultados da otimização inicial das características principais e dos coeficientes de forma. No entanto, para se ter uma razoável confiança nesta afirmação é necessário que se avalie também a forma e a geometria destes planos e dos planos de baliza associados, para verificar se os modelos de síntese e otimização definem linhas d'água e balizas com formas que efetivamente representem superfícies com as características dos cascos de embarcações. Esta avaliação pode ser feita preliminarmente com base nas figuras 6.9 a 6.12.

Nas figuras 6.9 e 6.11 representa-se graficamente os planos de linhas d'água obtidos através dos modelos de síntese e otimização. Em ambos os casos, com exceção da menor linha d'água, que representa a linha situada no calado zero, ou plano de base, todas as demais linhas d'água possuem formas com as mesmas características usualmente observadas em navios convencionais. A posição e distribuição destas linhas representam claramente um casco de formas "cheias", ou prismático, com um centro de carena localizado razoavelmente a vante da seção média, de modo a permitir um afinamento das linhas na região de popa para que não haja deterioração no escoamento para o hélice e o leme. É de se observar que estas características tornam os corpos de entrada destas linhas, na região de proa, praticamente coincidentes, o que redundava também em balizas de formas "cheias" nesta região, como se pode verificar nas figuras 6.10 e 6.12. Tendo em vista os requisitos e o tipo do navio utilizado como exemplo, estas eram, na realidade, características de forma esperadas para o casco deste navio.

Com relação aos planos de baliza, em que pese o fato dos pontos deste plano estarem ligados por segmentos de reta, a forma geral das balizas é efetivamente similar às formas usualmente encontradas em cascos de navios convencionais. É de se ressaltar, além das características da proa acima mencionadas, o fato do processo de síntese conseguir ajustar as linhas d'água de modo que as balizas na região de popa passem de uma forma convexa para uma forma côncava, adaptando o casco à necessidade de espaço para acomodação do hélice e do leme, conforme definido na síntese do perfil longitudinal. A única descaracterização de forma ocorre também na região do plano de base, em função dos problemas de definição das linhas d'água situadas no calado zero.

Os resultados para as linhas d'água situadas no plano de base não são satisfatórios, como se pode ver tanto nas figuras 6.9 e 6.11 como nos planos de baliza, particularmente para o caso 2. A causa para esta deficiência de forma está provavelmente relacionada aos valores da área ou da boca definidos com base nas curvas de áreas vertical e da seção mestra, conforme já fora antecipado nos itens 6.4 e 6.5.

Fica evidente, observando-se as figuras 6.9 e 6.11, que estes valores não estão adequados para a faixa de comprimento dos corpos paralelo médios estabelecida como requisito nos dados iniciais do modelo de otimização (entre 25% e 45% de L_{WL}). Para esta faixa de comprimentos, definida de acordo com as referências [19] e [26], aparentemente ou o valor fixado para a boca da linha d'água está maior do que o valor que seria adequado, ou a área fixada está menor do que o valor adequado, ou ambos os casos. Para respeitar todos os valores fixados e atender os requisitos relativos ao corpo paralelo do casco, o processo de síntese trouxe os pontos de início e fim das linhas d'água para muito próximo dos pontos de início e fim do corpo paralelo destas linhas, respectivamente, já que a diferença nas coordenadas longitudinais x_{B1} e x_{B2} , destes últimos pontos, define o tamanho do corpo paralelo médio do casco. Os resultados nas tabelas 6.21 e 6.22 confirmam estas afirmações.

Isto, além de descaracterizar os perfis de proa e popa na região do plano de base, fez com que as linhas d'água adquirissem uma forma mais retangular, não apropriada para o casco de um navio, como pode-se observar nas figuras 6.9 e 6.11. Estes problemas de forma estão refletidos também pela mudança brusca de tendência, em relação às demais linhas, que se observa tanto nos valores das

coordenadas x_i e x_f , quanto nos valores dos coeficientes dos polinômios das linhas d'água situadas no calado zero, indicados nas tabelas 6.21 e 6.22. Na figura 6.11, referente ao caso 2, observa-se inclusive uma falha no desenho da última linha d'água, devida a erros de aproximação no algoritmo auxiliar de desenho, do sistema SHOPS, provocados pelos elevados valores dos coeficientes do polinômio $y_2(x)$ que representa o corpo de saída desta linha d'água.

A definição inadequada dos valores da boca e da área da linha d'água situada no calado zero está associada a grande taxa de variação destes valores que ocorre nesta região do casco, conforme comentado nos itens 6.4 e 6.5. Devido a esta taxa elevada, qualquer pequeno erro de aproximação nas curvas vertical de área e da seção mestra na região próxima ao plano base resulta numa variação muito grande de valores de área e de boca para as linhas d'água ali situadas. Como qualquer modelo de síntese envolve sempre alguma dose de aproximação, é justamente nestas situações que estes modelos tendem a apresentar os maiores erros e deficiências.

Dificuldades semelhantes são relatadas por Keane [27] na aplicação do procedimento simplificado por ele proposto para gerar o plano de linhas d'água do casco de embarcações.

Duas soluções simplistas poderiam ser, eventualmente, adotadas para se evitar estas deficiências. A primeira seria a de relaxar as exigências com relação ao tamanho do corpo paralelo médio do casco. Isto certamente faria com que o casco resultante não possuísse um corpo paralelo de tamanho adequado para as características gerais e operacionais da embarcação, penalizando também, eventualmente, o custo de fabricação da mesma.

A outra solução seria a de impor que a área, e portanto também a boca, das linhas d'água situadas no plano de base fosse nula. Isto corresponderia, na realidade, a impor que todas as balizas possuísem alguma elevação de fundo, de modo a terminarem com boca nula no ponto comum de interseção com o plano de simetria e com o plano de base. Esta é uma solução proposta por Keane [27], mas que tende a descaracterizar a forma dos cascos, principalmente de grandes navios mercantes convencionais.

Estas duas soluções são, na realidade, também deficientes. Considera-se que a solução mais indicada seja a de efetivamente aperfeiçoar-se os modelos de síntese nesta região próxima ao calado zero.

De qualquer modo, tendo em vista que as deficiências de forma se restringem a uma região bastante limitada e que, como se pode ver nas figuras, não comprometem a definição geral das balizas e das linhas d'água, considera-se que a descrição do casco, gerada através dos modelos de síntese e otimização propostos, é suficientemente precisa para atender as necessidades dos programas usuais de arquitetura naval, empregados nas definições e análises realizadas nos ciclos subsequentes do projeto.

Finalmente, para sedimentar a validade dos resultados, compara-se a seguir os planos de balizas fornecidos pelo sistema SHOPS com uma reprodução do plano de balizas de um dos cascos da clássica série 60 [25], desenvolvida para fornecer resultados de resistência ao avanço para navios mercantes de formas convencionais, com características do mesmo tipo das do navio graneleiro empregado como exemplo neste trabalho. O casco refere-se aos modelos do grupo com coeficiente de bloco igual a 0,80, portanto bem próximo dos valores das soluções obtidas nos casos

1 e 2. As características gerais do casco deste grupo que mais se aproxima das características do navio graneleiro estão apresentadas na tabela 6.23 a seguir.

	Série 60 Modelo nº 4251 [25]
L/B	7,5
B/T	2,5
α_e (°)	38,9
C _b	0,800
C _p	0,805
C _∞	0,994
C _w	0,871
LCB _∞ (%)	+2,5

Tabela 6.23 – Dados do Casco Série 60

Na tabela 6.23 mostra-se que, embora as características não coincidam exatamente com aquelas obtidas para o navio graneleiro, elas são suficientemente próximas para permitir uma comparação de formas com os resultados do sistema SHOPS, até porque, caso se aplicasse o processo tradicional de projeto, este casco da série 60, com as características da tabela, seria um fortíssimo candidato a servir de casco base para ser modificado até o atendimento das características geométricas do navio graneleiro. Na figura 6.13, a seguir, mostra-se o plano de balizas deste modelo da série 60.

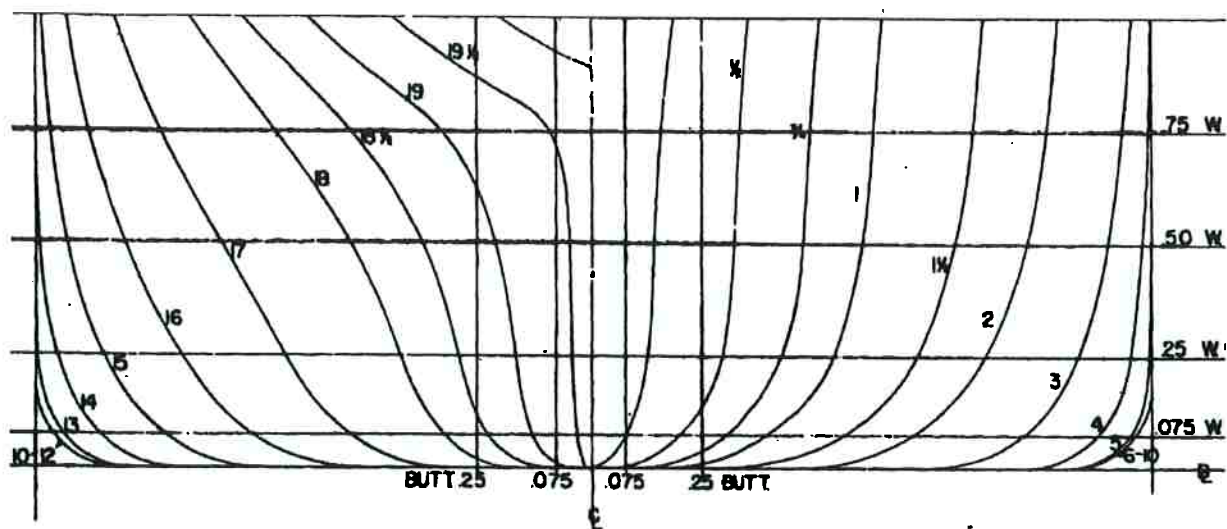


Figura 6.13 – Plano de Balizas de Modelo da Série 60

Comparando-se os planos mostrados nas figuras 6.10 e 6.12 com o da figura 6.13, pode-se verificar que é notável a semelhança da forma geral das balizas determinadas pelo sistema SHOPS com a forma geral das balizas do casco da série 60, com exceção, evidentemente, da região próxima ao plano de base. Na realidade, qualquer outro resultado seria surpreendente e indicaria uma deficiência nos modelos de síntese e otimização já que, dificilmente seria possível a obtenção de formas muito distintas das apresentadas pela série 60, para um navio com as características geométricas e de forma apresentadas pelo navio graneleiro do exemplo.

Com esta comparação final, considera-se que os modelos de síntese e otimização, propostos para formular e resolver os problemas de definição das características principais e da forma do casco de embarcações, fornecem resultados válidos e coerentes, e se mostram como uma ferramenta de grande potencial para apoiar o processo de tomada de decisão e de definição de soluções durante o projeto preliminar de navios e embarcações.

7. CONCLUSÕES

Neste trabalho, abordou-se as duas principais fases que compõem o problema básico que caracteriza o projeto preliminar de embarcações, ou seja: 1) a determinação das dimensões, coeficientes de forma e atributos que descrevem a embarcação que melhor atende aos requisitos e às restrições de projeto, de acordo com critério de mérito previamente estabelecido; 2) a definição da forma do casco associada às características e atributos determinados na fase 1.

O objetivo principal do trabalho foi o de propor e avaliar um novo modelo para realização do processo de projeto preliminar, no qual o problema de projeto é formulado como um problema de otimização onde, diferentemente dos modelos correntes, a definição da forma do casco da embarcação é incorporada, de forma hierárquica, como objetivo do processo de otimização.

No modelo proposto as duas fases do projeto são tratados de forma separada, mas hierárquica, e, para resolvê-los, desenvolveu-se dois conjuntos de modelos de síntese e otimização formulados com base na técnica da programação por objetivos, com a finalidade de se tratar adequadamente a presença de objetivos, restrições e critérios múltiplos e, frequentemente, conflitantes, que caracteriza tais problemas. Estes modelos foram estruturados de modo que as soluções ótimas dos problemas previamente abordados se tornam metas e objetivos para os problemas subsequentes. Para sua aplicação, os modelos foram implantados num sistema computacional integrado, batizado de sistema SHOPS, que possibilita a execução sequencial do projeto preliminar de embarcações, até a definição matemática da forma do casco.

Os modelos para determinação das características e atributos principais foram desenvolvidos com base naqueles já propostos na literatura. Já os modelos de síntese e otimização da forma do casco representam um novo procedimento, proposto com a finalidade de substituir o procedimento tradicional de definição do casco da embarcação, que faz uso de séries sistemáticas ou de distorções controladas de cascos de navios similares para esta definição.

Visou-se com este novo procedimento, principalmente, tratar a definição da forma como um processo de decisão racional, orientado por metas e objetivos, para que o casco gerado tenha uma forma com atributos que, efetivamente, correspondam aos atributos de desempenho inicialmente definidos e não seja apenas uma adaptação, realizada com base em formas geradas a partir de diferentes objetivos e critérios de mérito com o intuito de apenas aproximar o melhor possível algumas dimensões e coeficientes.

Como propósito subsidiário, procurou-se também eliminar o processo de tentativa e erro envolvido no procedimento tradicional e, com isto, reduzir o tempo necessário para a definição da forma do casco.

Os resultados obtidos para o exemplo de aplicação, referente a um navio graneleiro, indicam que os modelos elaborados, em particular o modelo de síntese da forma do casco, representam adequadamente os problemas do projeto preliminar e fornecem resultados coerentes e compatíveis com a experiência e a prática de projeto de embarcações.

A análise dos resultados mostra que a formulação dos problemas de projeto como problemas de otimização por múltiplos critérios propicia ao projetista as condições e os elementos necessários para uma avaliação racional da influência dos

diversos requisitos, restrições e critérios de mérito na solução obtida. Adicionalmente, permite a investigação orientada de novas alternativas de solução e oferece as condições de apoio necessárias para as decisões a serem tomadas. Em particular, os resultados obtidos com o modelo de síntese da forma do casco mostraram a viabilidade de se tratar o problema da definição da forma do casco como um problema de otimização por múltiplos critérios, no qual os objetivos são estabelecidos a priori, com base nos atributos que se deseja obter para o casco em projeto, e a definição do casco é realizada de forma racional, orientada diretamente pelos valores destes atributos.

Os resultados obtidos para o navio graneleiro, e sua comparação final com o casco da série 60, indicam que o procedimento proposto é capaz de fornecer, além de soluções viáveis e que atendam os atributos desejados, as indicações necessárias da influência destes atributos nas características geométricas do casco gerado. Isto, além de fornecer as orientações para eventuais investigações de alternativas de solução, inverte, de certo modo, a situação provocada pelo procedimento tradicional no qual os atributos da solução deixam de ser os que foram inicialmente estabelecidos e passam a ser aqueles que inevitavelmente resultam dos processos de adaptação e distorção dos cascos similares.

Embora os resultados tenham se mostrado, de modo geral, bastante satisfatórios, o modelo de síntese da forma do casco apresenta uma pequena deficiência relacionada à definição da linha d'água situada no plano de base, ou calado zero. Esta deficiência, eventualmente, pode ser corrigida através de duas soluções simples sugeridas no item 6.6 ou, através de um aperfeiçoamento no próprio modelo que leve em consideração as causas identificadas de sua ocorrência.

De qualquer modo, como a deficiência está restrita à uma região limitada e de fronteira da superfície do casco, não tendo provocado, em primeira instância, nenhuma deterioração observável no restante da forma, considera-se que o modelo proposto fornece uma descrição da superfície do casco com precisão suficiente para servir como dado de entrada para os programas de análise e de arquitetura naval empregados nos ciclos subsequentes do projeto.

Em termos de eficiência, os modelos de otimização se mostraram muito rápidos até a síntese do perfil longitudinal, não sendo consumido, no total, um tempo muito maior do que 60 segundos para obtenção das soluções. Já na síntese do plano de linhas d'água, os tempos consumidos no exemplo do navio graneleiro passaram a ser da ordem de 4 horas para a solução do caso 2 e de 7 horas para o caso 1, empregando-se um computador Pentium III de 800 Mhz. Embora, em princípio, elevados, estes tempos são desprezíveis quando comparados ao tempo total consumido num processo tradicional que empregue programas CAD. Neste aspecto talvez resida ainda algum campo de investigação visando o aumento da eficiência do modelo de otimização.

Em termos da implementação dos modelos, os resultados indicam que o sistema SHOPS, que integra todo o processo de otimização do projeto preliminar, foi elaborado de forma adequada, necessitando apenas de aperfeiçoamentos em sua interface gráfica para torná-lo mais amigável e mais agradável esteticamente.

Tendo em vista os bons resultados inicialmente obtidos, toma-se a liberdade de se sugerir, a seguir, alguns tópicos para futuros desenvolvimentos, investigações e aperfeiçoamentos do modelo proposto.

O primeiro, evidentemente, está ligado ao aperfeiçoamento do modelo de síntese do casco, no que diz respeito à definição da linha d'água situada no plano de base, quando a área desta linha não for nula. Esta é uma deficiência do modelo proposto e uma possível solução, para minimizar as deficiências de forma desta linha, talvez seja estabelecer, no modelo de síntese da seção mestra, algum procedimento para se determinar a boca desta linha d'água com base tanto na área já determinada através da curva vertical de áreas quanto na faixa de valores que se deseja para o corpo paralelo médio da embarcação.

Com relação aos modelos de otimização, um campo interessante de investigação está relacionado com a aplicação de outros métodos ou técnicas que possibilitem o tratamento de objetivos e critérios múltiplos e conflitantes. Alguns exemplos e aplicações destes métodos podem ser vistos em Sen e Yang [1].

Outro campo interessante para investigação, está relacionado com a aplicação dos algoritmos ou técnicas numéricas de otimização. O algoritmo desenvolvido por Augusto [12] se mostrou extremamente eficiente e confiável na solução dos problemas. Entretanto, a aplicação de outros algoritmos ao problema de síntese e otimização do casco pode, eventualmente, propiciar elementos para aperfeiçoamento do processo numérico para esta aplicação específica. Isto vale principalmente para o problema de síntese do plano de linhas d'água, que foi modelado como um problema de otimização sem restrições implícitas, para os quais há uma gama bastante grande de algoritmos apropriados [38].

Com relação à síntese do plano de linhas d'água, um aperfeiçoamento que pode ser bastante interessante, se não implicar em tempo excessivo de processamento numérico, é o de se incorporar algumas condições indiretas de

carenagem relacionadas com a forma das balizas que resultam a partir da definição das linhas d'água. Dependendo do grau de atendimento à estas condições talvez seja possível obter-se um casco com um nível de carenamento já bastante próximo daqueles fornecidos em programas CAD convencionais. Um sugestão para se estabelecer estas condições de forma e carenagem pode ser a aplicação de um procedimento, baseado na proposta de Reed e Nowacki [31], de se representar a forma das balizas através de transformadas conforme com múltiplos coeficientes, determinados através do método dos mínimos quadrados.

Considerando-se ainda a forma das balizas e também a distribuição longitudinal de volume que elas representam, outro campo interessante de desenvolvimento seria o de incorporar como objetivo, nos modelos de síntese e otimização, o atendimento a certos atributos relacionados ao comportamento no mar, como por exemplo os relativos às acelerações e amplitudes de movimento da embarcação. O atendimento a estes objetivos poderia ser buscado através da otimização da distribuição longitudinal das áreas das balizas (curva de áreas seccionais), conforme, por exemplo, o modelo sugerido por Grigoropoulos e Athanassoulis [30].

Finalmente, para aumentar a abrangência de aplicação do sistema SHOPS, novos modelos de síntese das características principais poderiam ser desenvolvidos e incorporados ao sistema, não só para o projeto de navios mercantes convencionais, mas também para o projeto preliminar de embarcações militares, embarcações de apoio (rebocadores), embarcações não convencionais (catamaran, swath, etc.), embarcações fluviais e, até mesmo, embarcações de recreio.

ANEXO A

FORMAS DE LEWIS ESTENDIDAS

A.1 - Introdução

O uso das técnicas de mapeamento conforme para representar aproximadamente seções transversais e, com isto, descrever matematicamente o casco de embarcações, ganhou impulso a partir do trabalho de Lewis [29], onde esta abordagem foi empregada para se determinar a massa adicional de navios.

O mapeamento conforme destas seções é obtido a partir da transformação geral de Theodorsen, que mapea uma curva no plano w em outra curva no plano Z , de acordo com a seguinte função:

$$Z = t * \left[\sum_{n=0}^{\infty} c_n * w^{(1-n)} \right] \quad (\text{A.1})$$

onde:

- $w = u + iv$, representa pontos da curva no plano w .
- $Z = X + iY$, representa pontos da curva no plano Z .
- c_n : constantes complexas.
- t : constante real qualquer.

Curvas no plano Z com dois eixos de simetria, que pode-se admitir como sendo o caso de seções transversais de embarcações, podem ser obtidas tomando-se w como pontos sobre o círculo de raio unitário e empregando-se o seguinte caso particular ($f(w)$) da função geral acima:

$$Z = t * f(w) = t * \left[\sum_{n=1}^{\infty} c_n * w^{(3-2n)} \right] \quad (\text{A.2})$$

onde:

- $w = e^{i\theta}$, são pontos sobre o círculo de raio unitário.
- $Z = X + iY$, representa pontos da curva no plano Z .
- c_n : constantes reais.
- t : constante real qualquer.

$$- f(w) = \left[\sum_{n=1}^{\infty} C_n * w^{(3-2n)} \right] \quad (A.3)$$

Na figura A1, a seguir, ilustra-se a transformação representada pela equação A.2. Nesta figura, por conveniência matemática, a seção transversal está desenhada no plano Z de forma invertida. Devido à simetria, representa-se apenas meia seção, o que limita a variação do ângulo θ ao primeiro quadrante do plano w, ou seja:

$$- 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \quad (A.4)$$

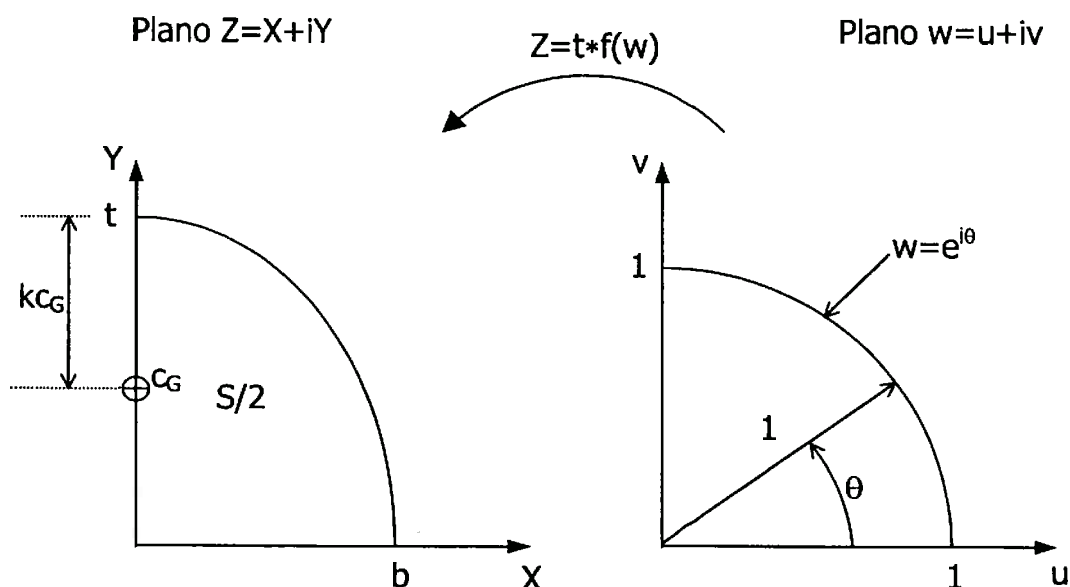


Figura A1 – Mapeamento Conforme de Seções Transversais de Embarcações

Os parâmetros indicados na figura A1 têm o seguinte significado:

b : meia boca da seção.

t : calado da seção.

c_G : centro geométrico da seção.

kc_G : altura do centro geométrico da seção.

S : área total da seção transversal.

Sem perda de generalidade, a curva no plano Z pode ser normalizada pelo parâmetro t, gerando uma curva no plano z onde:

$$z = x + iy = \frac{Z}{t} = \frac{X}{t} + i \frac{Y}{t} \quad (\text{A.5})$$

Tendo em vista a transformação dada pela equação A.2, a curva no plano z é obtida através da seguinte transformação:

$$z = f(w) = \left[\sum_{n=1}^{\infty} c_n * w^{(3-2n)} \right] \quad (\text{A.6})$$

A transformação definida por A.6 está representada na figura A2, a seguir.

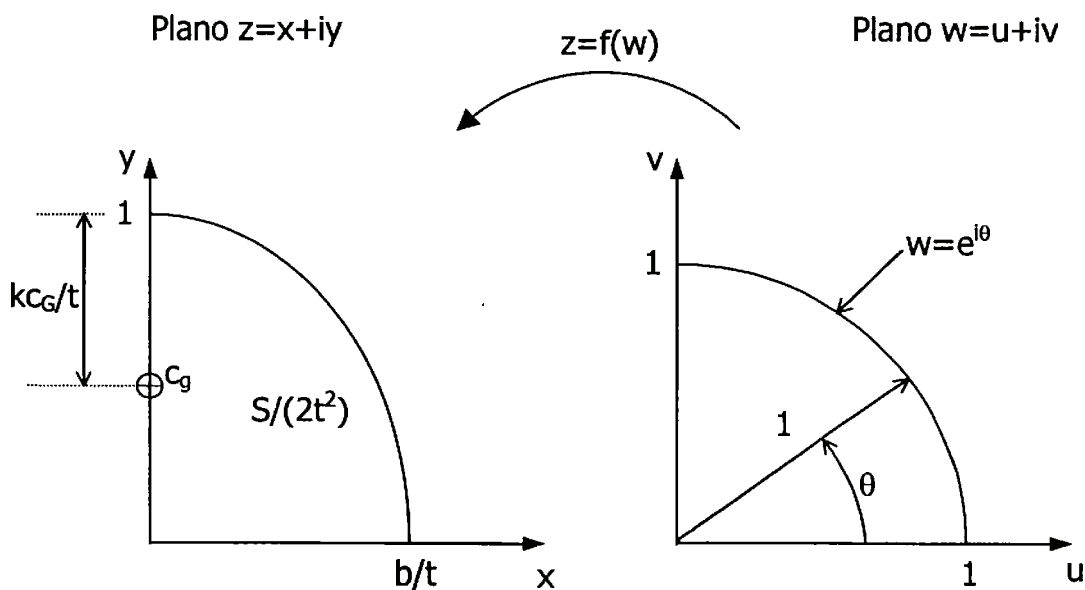


Figura A2 – Mapeamento Conforme da Seção Normalizada

Substituindo na equação A.6 o valor de w para o círculo unitário ($w=e^{i\theta}$) obtêm-se as seguintes equações paramétricas da curva no plano z:

$$x(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n * \cos(3 - 2n)\theta \quad (\text{A.7})$$

$$y(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n * \text{sen}(3 - 2n)\theta \quad (\text{A.8})$$

A.2 – As Formas de Lewis Estendidas

A determinação da função $f(w)$, ou seja, dos coeficientes c_n , pode ser feita estabelecendo-se n condições a serem atendidas pela função $f(w)$ para que a mesma represente o mais fielmente possível a seção transversal. O caso mais simples é o das chamadas "Formas de Lewis", onde apenas três parâmetros ($n=3$) são utilizados para definir a função. Neste caso, Lewis [29] estabeleceu que as condições a serem atendidas são: a meia boca b/t , o calado 1 e a área $S/(2t^2)$ da seção normalizada; o que resulta numa função de transformação de três termos.

Para melhorar a representação das seções, Grigoropoulos [30] descreve uma transformação de quatro termos na qual a quarta condição a ser atendida é a altura do centro geométrico da seção (kc_G/t). A função de quatro termos resultante gera curvas no plano z que se convencionou chamar de "Formas de Lewis Estendidas".

Para se obter os coeficientes que definem estas formas, deve-se aplicar, então, as quatro condições seguintes:

$$x(0) = \lambda \quad (\text{A.9})$$

$$y\left(\frac{\pi}{2}\right) = 1 \quad (\text{A.10})$$

$$\int_0^{b/t} y \cdot dx = \sigma * \lambda \quad (\text{A.11})$$

$$\int_0^{b/t} \frac{y^2}{2} \cdot dx = \sigma * \lambda * (1 - \kappa) \quad (\text{A.12})$$

$$\text{onde: } \lambda = \frac{b}{t} \quad (\text{A.13})$$

$$\sigma = \frac{S}{2 * b * t} \quad (\text{A.14})$$

$$\kappa = \frac{kc_G}{t} \quad (\text{A.15})$$

Aplicando-se nestas quatro condições as equações A.7 e A.8 obtêm-se, segundo [30], as seguintes relações a serem atendidas pelos coeficientes:

$$\sum_{n=1}^4 c_n = \lambda \quad (\text{A.16})$$

$$\sum_{n=1}^4 (-1)^{n+1} * c_n = 1 \quad (\text{A.17})$$

$$\sum_{n=1}^4 (3 - 2n) * c_n^2 = \frac{4 * \lambda * \sigma}{\pi} \quad (\text{A.18})$$

$$\sum_{l=1}^4 \sum_{m=1}^4 \sum_{n=1}^4 (3 - 2n) * I_{lmn} * c_l * c_m * c_n = 4 * (1 - \kappa) * \lambda * \sigma \quad (\text{A.19})$$

onde:

$$I_{lmn} = \frac{1}{9 - 2(l + m + n)} - \frac{1}{3 - 2(l - m + n)} + \frac{1}{3 - 2(l + m - n)} + \frac{1}{3 - 2(-l + m + n)} \quad (\text{A.20})$$

Para uma trinca de valores (λ , σ , κ) definidos com base na seção que se quer representar, as relações acima formam um sistema não-linear com respeito aos coeficientes (c_1 , c_2 , c_3 e c_4). Deste sistema, as duas primeiras equações podem ser analiticamente eliminadas. Esta eliminação fornece:

$$c_1 = \frac{\lambda + 1}{2} - c_3 \quad (\text{A.21})$$

$$c_2 = \frac{\lambda - 1}{2} - c_4 \quad (\text{A.22})$$

Levando A.21 e A.22 nas equações A.18 e A.19, fica-se então com um sistema não-linear de duas equações em c_3 e c_4 , que deve ser resolvido através de um processo numérico conveniente. Obtidos estes dois coeficientes, com a aplicação de A.21 e A.22, define-se então completamente a função de transformação $f(w)$ e a curva mapeada do círculo unitário. No entanto, Grigoropoulos [30] mostra que, dependendo dos valores da trinca $(\lambda, \sigma, \kappa)$, a função $f(w)$ obtida, embora satisfazendo as quatro condições estabelecidas, pode gerar curvas de forma degeneradas no plano z , ou seja, curvas que não correspondem às formas usuais de seções transversais. Na figura A3, a seguir, ilustra-se algumas das formas degeneradas que podem ser obtidas da transformada de quatro termos.

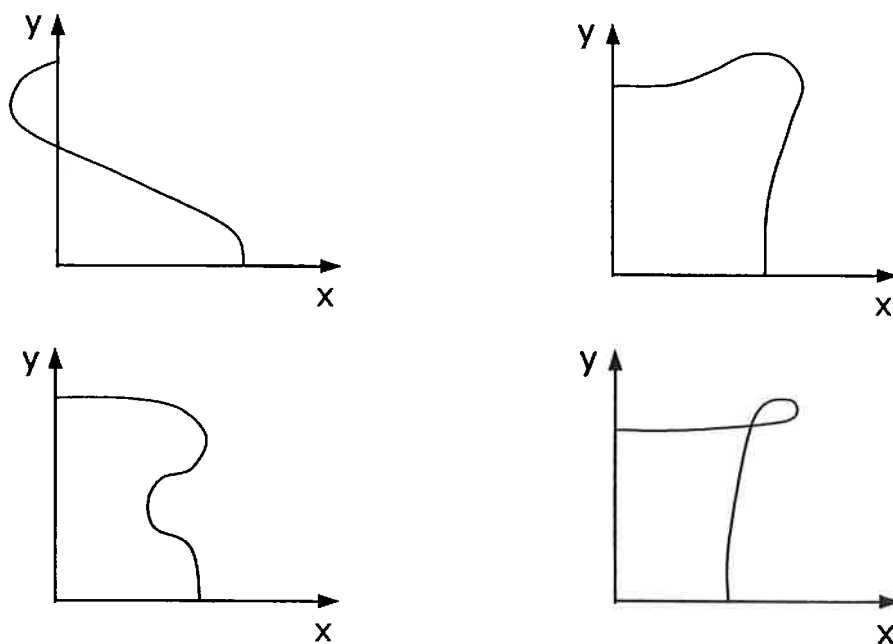


Figura A3 – Formas Degeneradas da Transformada de 4 Termos

Para evitar estas degenerações de forma, Grigoropoulos [30] mostra que é necessário que os coeficientes c_3 e c_4 satisfaçam algumas condições adicionais dadas

pelas seguintes equações:

$$1 - 4 * c_3 - 4 * c_4 \geq 0 \quad (\text{A.23})$$

$$\lambda - 4 * c_3 + 4 * c_4 \geq 0 \quad (\text{A.24})$$

$$8 * c_3 - 24 * c_4 + 1 \geq 0 \quad (\text{A.25})$$

$$8 * c_3 + 24 * c_4 + \lambda \geq 0 \quad (\text{A.26})$$

$$\begin{aligned} & \max[0; c_4] * \max[0; (9 * c_3^2 - 10 * c_3 * c_4 + 145 * c_4^2 - 20 * \lambda * c_4)] * \\ & * \max[0; (3 * c_3 + 25 * c_4)] * \max[0; (5 * c_4 - c_3)] \leq 0 \end{aligned} \quad (\text{A.27})$$

$$\begin{aligned} & \max[0; -c_4] * \max[0; (9 * c_3^2 + 10 * c_3 * c_4 + 145 * c_4^2 + 20 * c_4)] * \\ & * \max[0; (3 * c_3 - 25 * c_4)] * \max[0; (-5 * c_4 - c_3)] \leq 0 \end{aligned} \quad (\text{A.28})$$

onde: $\max[x;y]$ é um operador que retorna o maior valor entre x e y.

As duas últimas condições significam que se os segundos termos dentro dos operadores "max" em cada equação forem todos simultaneamente positivos, a transformada obtida gerará uma forma degenerada.

Com base nestas condições Grigoropoulos apresenta em [30] uma série de gráficos de c_4 em função de c_3 , onde são identificadas as regiões, e os valores correspondentes da trinca de parâmetros $(\lambda, \sigma, \kappa)$, onde a transformada de quatro termos não gera curvas degeneradas. A partir destes gráficos é possível verificar que esta transformada é capaz de representar adequadamente seções cujo parâmetro σ não ultrapasse um valor máximo de aproximadamente 0,95. Isto, evidentemente, limita as possibilidades de mapeamento de seções transversais ou curvas muito "cheias", como ocorre normalmente em navios cujo coeficiente de bloco é elevado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Sen, P. ;Yang, J.B. **Multiple Criteria Decision Support in Engineering Design**. Londres, Springer-Verlag, 1998.
- [2] Dym, C.L. **Engineering Design : A Synthesis of Views**. Cambridge, Cambridge University Press, 1994.
- [3] Watson, D.G.M. ; Gilfillan, A.W. Some Ship Design Methods. **Transactions RINA**, v.118, p.279-324, 1976.
- [4] Lyon, T.D. A Calculator-Based Preliminary Ship Design Procedure. **Marine Technology**, v.19, n.2, p.140-158, abril/1982.
- [5] Smith, G.H. ; Woodhead, R.G. A Design Scheme for Ship Structures. **Transactions RINA**, v.116, p.47-66, 1974.
- [6] Nowacki, H. ; Brusis, F. ; Swift, P.M. Tanker Preliminary Design – An Optimization Problem with Constraints. **Transactions SNAME**, v.78, 1970.
- [7] Keane, A.J. ; Price, W.G. ; Schachter, R.D. Optimization Techniques in Ship Concept Design. **Transactions RINA**, v.132, p.123-143, 1990.
- [8] Lyon, T.D. ; Mistree, F. A Computer-Based Method for the Preliminary Design of Ships. **Journal of Ship Research**, v.29, n.4, p.251-269, dez/1985.
- [9] Smith, W.F. ; Kamal, S. ; Mistree, F. The Influence of Hierarchical Decisions on Ship Design. **Marine Technology**, v.24, n.2, p.131-142, abril/1987.
- [10] Mistree,F. et al. Decision-Based Design: A Contemporary Paradigm for Ship Design. **Transactions SNAME**, v.98, p.565-597, 1990.
- [11] Sen, P. Marine Design: The Multiple Criteria Approach. **Transactions RINA**, v.133, p.261-276, 1991.
- [12] Augusto, O.B. A Mixed Continuous and Discrete Nonlinear Constrained Algorithm for Optimizing Ship Hull Structural Design. **Ocean Engineering Journal**, v.25, n.9, p.793-811, 1998.
- [13] Ray, T. ; Sha, O.P. Multicriteria Optimization Model for a Containership Design. **Marine Technology**, v.31, n.4, p.258-268, out/1994.

- [14] Sen, P. ; Bari, A. Inland waterway Fleet Replacement: Evaluation with Multiple Objectives. **Transactions RINA**, v.127, p.205-220, 1985.
- [15] Gilfillan, A.W. The Economic Design of Bulk Cargo Carriers. **Transactions RINA**, v.111, p.113-140, 1969.
- [16] Schneekluth, H. **Ship design for efficiency and economy**. Inglaterra, Butterworth & Co. Ltd., 1987.
- [17] Kupras,L.K. Optimisation Method and Parametric Study in Precontracted Ship Design. **International Shipbuilding Progress**, v.23, n.261, p.138-155, 1976.
- [18] Watson, D.G.M. Estimating Preliminary Dimensions in Ship Design. **Transactions IESS**, v.105, p.110-184, 1961-62.
- [19] Comstock, J.P. **Principles of Naval Architecture**. Revised Edition, New York, SNAME, 1974.
- [20] Lewis, E.V. **Principles of Naval Architecture**. Second Revised Edition, New York, SNAME, 1989.
- [21] Harvald, AA.SV. **Resistance and Propulsion of Ships**. USA, John Wiley & Sons. Inc., 1983.
- [22] Watson, D.G.M. Designing Ships for Fuel Economy. **Transactions RINA**, p.505-521, 1981.
- [23] Robb, A.McC. **Theory of Naval Architecture**. London, Charles Griffin & Co.Ltd, 1952.
- [24] Rossel, H.E.; Chapman, L.B. **Principles of Naval Architecture.**, vol.1, New York, SNAME, 1942.
- [25] Todd, F.H.; Stuntz, G.R.; Pien, P.C. Series 60 – The Effect upon Resistance and Power of Variation in Ship Proportions. **Transactions SNAME**, vol.65, p.445-589, 1957.
- [26] Saunders, H.E. **Hydrodynamics in Ship Design**. , vol.2, New York, SNAME, 1957.

- [27] Keane, A.J. A Computer Based Method for Hull Form Concept Design : Applications to Stability Analyses **Transactions RINA**, p.61-75, 1987.
- [28] Baker, G.S. **Ship Design, Resistance and Screw Propulsion**, vol. 1, Liverpool, Charles Birchall & Sons Ltd., 1948.
- [29] Lewis, F.M. The Inertia of the Water Surrounding a Vibrating Ship. **Transactions SNAME**, vol.37, p.1-20, 1929.
- [30] Grigoropoulos, G.J. ; Athanassoulis, G.A. Investigation of na Extended-Lewis Form Family of Ships Sections and its Application to Seakeeping Optimization. **Transactions RINA**, p.131-144, 1996.
- [31] Reed, A.M. ; Nowacki, H. Interactive Creation of Fair Ship Lines. **Marine Technology**, v.18, n.2, p.96-112, june/1974.
- [32] MAN B&W. **Basic Principles of Ship Propulsion**. , brochura, MAN B&W Diesel A/S.
- [33] Nelder, J.A. A Simplex Method for Function Minimization. **Computer Journal**, v.7, n.4, p.308-313, Jan/1965.
- [34] Box, M.J. A New Method of Constrained Optimization and Comparasion with other Methods. **Computer Journal**, v.8, n.1, April/1965.
- [35] Fletcher, R. Mathematical-Programming Methods – A Critical Review. **in Optimum Structural Design**, John Wiley & Sons, GB, 1973.
- [36] Augusto, O.B. Projeto Racional Otimizado e Automatizado da Estrutura de Embarcações. **Tese de Livre Docência**, Depto. Eng. Naval e Oceânica, Escola Politécnica da USP, 1996.
- [37] Augusto, O.B. Um Método Misto de Programação Não Linear e suas Aplicações no Projeto Estrutural de Embarcações. **Pesquisa Operacional**, v.18, n.2, dez/1998.
- [38] Belegundu, A.D.; Chandrupatla, T.R. **Optimization Concepts and Applications in Engineering**. New Jersey, Prentice-Hall Inc., 1999.