

**Marcos de Parahyba Campos**

**Projeto Racional de Embarcações a Vela**

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

**São Paulo  
1995**

**Marcos de Parahyba Campos**

## **Projeto Racional de Embarcações a Vela**

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

**Área de Concentração:  
Engenharia Naval**

**Orientador:  
Prof. Dr. Kazuo Nishimoto**

**São Paulo  
1995**



**DEDALUS - Acervo - EPMN**



31600010041

**Agradeço a todos que me  
ajudaram a chegar até aqui.**

# SUMÁRIO

## SUMÁRIO

### LISTA DE FIGURAS

### LISTA DE TABELAS

### LISTA DE ABREVIATURAS

### LISTA DE SÍMBOLOS

### RESUMO

### ABSTRACT

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2. A ESPIRAL DE PROJETO</b>	<b>7</b>
<b>3. DIMENSÕES PRINCIPAIS E COEFICIENTES DE FORMA</b>	<b>12</b>
<b>3.1. DIMENSÕES DO CASCO</b>	<b>13</b>
3.1.1. Comprimento Total e de Linha D'água	13
3.1.2. Boca e Calado	14
3.1.3. Borda Livre	17
3.1.4. Deslocamento	18
<b>3.2. DIMENSÕES DA QUILHA E DO LEME</b>	<b>20</b>
<b>3.3. DIMENSÃO DO VELAME</b>	<b>22</b>
3.3.1. Capacidade de Carregar Velas	23
3.3.2. Relação Área Vélica-Deslocamento	24
3.3.3. Relação Área Vélica-Superfície Molhada	25
3.3.4. Dimensões Geométricas	25
<b>4. INTEGRAÇÃO CASCO-VELA</b>	<b>27</b>
<b>4.1. MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO</b>	<b>33</b>
4.1.1. 1º Método de Oossanen	34



4.1.2. 2º Método de Oossanen	37
4.1.3. Método de Milgram	41
<b>5. FORÇAS AERODINÂMICAS</b>	<b>45</b>
<b>5.1. TRIÂNGULO DE VELOCIDADES</b>	<b>46</b>
<b>5.2. FATORES GEOMÉTRICOS</b>	<b>48</b>
5.2.1. Áreas e Centros de Esforços	49
5.2.1.1. Formulações da IMS	49
5.2.1.2. Método Geométrico	54
5.2.2. Fator de Interferência	56
5.2.2.1. Velame de Contra-Vento (Genoa e Mestra)	57
5.2.2.2. Velame de Ventos Largos (Balão e Mestra)	58
5.2.3. Razão de Aspecto da Genoa	58
5.2.4. Interferência do mastro	59
<b>5.3. COMPOSIÇÃO DAS FORÇAS AERODINÂMICAS</b>	<b>60</b>
5.3.1. Componentes Constitutivas	61
5.3.1.1. Coeficientes Aerodinâmicos da IMS	65
5.3.1.2. Coeficientes Aerodinâmicos de Milgram	68
5.3.1.3. Resistência Devido ao Descolamento	70
5.3.1.4. Resistência Induzida	71
5.3.1.5. Resistência Parasita	73
5.3.2. Componentes no Referencial do Movimento	76
<b>6. FORÇAS HIDRODINÂMICAS</b>	<b>77</b>
<b>6.1. FORÇAS NO CASCO</b>	<b>82</b>
6.1.1. Força Lateral	82
6.1.1.1. Nomoto & Tatano	83
6.1.1.2. Van Oossanen	84
6.1.1.3. Gerritsma	84
6.1.2. Resistência ao Avanço	85
6.1.2.1. Resistência Viscosa	86
6.1.2.2. Resistência de Onda	88
6.1.2.3. Resistência Adicional em Ondas	93
6.1.2.4. Resistência Devido a Banda	95
6.1.2.5. Resistência Devido a Atitude do Casco	96
6.1.2.6. Resistência Induzida	96
<b>6.2. FORÇAS NA QUILHA</b>	<b>99</b>
6.2.1. Força Lateral	101
6.2.1.1. Nomoto & Tatano	101
6.2.1.2. Van Oossanen	101
6.2.1.2.1. Efeito da Forma da Ponta	103
6.2.1.2.2. Inclinação da Curva de Sustentação por Ângulo de Ataque na Sua Parte Linear	104
6.2.1.2.3. Efeito da Viscosidade na Inclinação da Curva de Sustentação	105
6.2.1.2.4. Cálculo do Valor do Raio de Aspecto Efetivo	105

6.2.1.2.5. Efeitos de Interação Entre Casco/Bulbo e a Superfície de Sustentação	107
6.2.1.2.6. Efeito Não Linear na Sustentação	109
6.2.1.2.7. Efeito do Ângulo de "Flap"	110
6.2.1.3. Gerritsma	111
6.2.2. Resistência ao Avanço	112
6.2.2.2. Resistência Induzida	113
<b>6.3. FORÇAS NO LEME</b>	<b>115</b>
6.3.1. Força Lateral	117
6.3.1.1. Efeito da Forma da Ponta	117
6.3.1.2. Inclinação da Curva de Sustentação por Ângulo de Ataque na Sua Parte Linear	117
6.3.1.3. Efeito da Viscosidade na Inclinação da Curva de Sustentação	118
6.3.1.4. Cálculo do Valor do Raio de Aspecto Efetivo	118
6.3.1.5. Efeitos de Interação Entre Casco e Leme	119
6.3.1.6. Efeito Não Linear na Sustentação	120
6.3.1.7. Efeito do Ângulo de "Flap"	120
6.3.2. Resistência ao Avanço	121
6.3.2.1. Resistência Viscosa	121
6.3.2.2. Resistência Induzida	122
<b>6.4. FORÇAS NO BULBO</b>	<b>122</b>
6.4.1. Força Lateral	123
6.4.2. Resistência ao avanço	123
6.4.2.1. Viscosa	123
6.4.2.2. Induzida	124
<b>6.5. FORÇAS NA ASA</b>	<b>124</b>
6.5.1. Resistência ao Avanço	124
<b>7. O PROGRAMA DE PREDIÇÃO DE VELOCIDADE VPP-PB</b>	<b>126</b>
<b>7.1. O PROGRAMA VPP-PB</b>	<b>126</b>
7.1.1. Determinação das Condições de Operação	126
7.1.2. Dados de Entrada	127
7.1.3. Dados de Saída	129
7.1.4. Integração Casco-Vela	130
7.1.5. Modelos Matemáticos Utilizados	132
7.1.5.1. Modelo Hidrodinâmico	132
7.1.5.1.1. Resistência ao avanço	132
7.1.5.1.2. Força Lateral	133
7.1.5.2. Modelo Aerodinâmico	134
<b>8. VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>135</b>
<b>8.1 RESISTÊNCIA AO AVANÇO</b>	<b>136</b>
8.1.1 Comparação Com Resultados Publicados	136
8.1.2 Variação Paramétrica	137
8.1.2.1 Coeficiente Volumétrico	137



8.1.2.2 Relação $Bwl/T_c$	141
8.1.2.3 Posição Longitudinal do Centro de Flutuação	144
<b>8.2 FORÇA LATERAL</b>	<b>145</b>
<b>8.3 COEFICIENTES AERODINÂMICOS</b>	<b>148</b>
<b>9. MODELO PARA OTIMIZAÇÃO DA PERFORMANCE</b>	<b>150</b>
9.1 VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS	151
9.2 GERAÇÃO DA SÉRIE SISTEMÁTICA	153
9.3 ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS 27 MODELOS DA SÉRIE	158
9.3.1 Avaliação da Variação da Quilha	160
9.3.2 Avaliação da Variação da Razão Boca/Calado	169
9.3.3 Avaliação da Variação do Coeficiente Volumétrico	175
9.4 ANÁLISE DAS FORÇAS HIDRODINÂMICAS DESENVOLVIDAS:	179
<b>10. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE CONTINUAÇÃO</b>	<b>182</b>
10.1 CONCLUSÕES	182
10.1.1 Desenvolvimento do Programa Para Predição de Velocidade	182
10.1.2 Análise Orientativa dos Resultados	184
10.1.3 Filosofia de Projeto	186
10.2 SUGESTÕES DE CONTINUAÇÃO	187
<b>11. BIBLIOGRAFIA ESPECÍFICA:</b>	<b>189</b>
<b>12. BIBLIOGRAFIA GERAL:</b>	<b>191</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Fluxograma de Projeto	10
Figura 3.1: Embarcações Semelhantes, $L/B \times L$	15
Figura 3.2: Embarcações Semelhantes, $L/T_{\text{máx}} \times L$	16
Figura 3.3: Relação entre Borda Livre e $L_{wl}$ (Miller)	17
Figura 3.4: Embarcações Semelhantes, Coef. Vol. $\times L$	18
Figura 3.5: Embarcações Semelhantes, $L_{\text{astro}}/\Delta \times L$	19
Figura 3.6: Embarcações Semelhantes, Capacidade de Carregar Velas	23
Figura 3.7: Embarcações Semelhantes, $A_v/\nabla^{2/3} \times L$	24
Figura 4.1: Equilíbrio de Forças no Plano Horizontal	27
Figura 4.2-A: Momentos no Plano Transversal	29
Figura 4.2-B: Momentos no Plano Longitudinal	29
Figura 4.2-C: Momentos no Plano Horizontal	30
Figura 4.3: Integração Casco-Vela (1º Modo de Oossanen)	36
Figura 4.4: Integração Casco-Vela (2º Modo de Oossanen)	40
Figura 4.5: Exemplo de Gráfico de Integração Utilizado por Milgram	42
Figura 4.6: Integração Casco-Vela (Método de Milgram)	44
Figura 5.1: Triângulo de Velocidades	47
Figura 5.2: Nomenclatura Adotada Para Plano Vélido	49
Figura 5.3: Método Geométrico Para a Obtenção do Centro de Esforços Aerodinâmicos	54
Figura 5.4: Forças Aerodinâmicas	62
Figura 5.6: Coeficientes da IMS Para Balão	67
Figura 5.7: Coeficientes da IMS Para Genoa	67
Figura 5.8: Coeficientes da IMS Para Vela Mestra Marconi e "Full-Batten"	67



Figura 5.9: Coeficientes Aerodinâmicos Gerados Pelo VPP-PB	68
Figura 5.10: Resistência Induzida em Um Fólio	72
Figura 5.11: Decomposição das Forças Aerodinâmicas	76
Figura 6.1: Esquema de Forças Hidrodinâmicas Atuantes em Um Veleiro	77
Figura 6.2: Diagrama de Forças Hidrodinâmicas em Um Veleiro	78
Figura 6.3: Forças Hidrodinâmicas em Cada Componente das Obras Vivas	79
Figura 6.4-A: Diagrama das Forças no Casco	81
Figura 6.4-B: Diagrama das Forças na Quilha	81
Figura 6.4-C: Diagrama das Forças no Leme	82
Figura 6.4-D: Diagrama das Forças no Bulbo e Asa	82
Figura 6.5: Fólio Sujeito a Escoamento Com Ângulo de Ataque	97
Figura 6.7: Nomenclatura Para Superfície de Sustentação	99
Figura 6.7: Ângulo de Incidência Efetivo do Fluido	100
Figura 6.8: Tipos de Pontas de Quilhas	103
Figura 7.1: Fluxograma de Integração Casco-Vela VPP-PB	131
Figura 8.1: Resistência de Onda Para o Modelo 22 - Fung/VPP-PB	136
Figura 8.2: Comparativo de Resistência Para Coeficientes Volumétricos	137
Figura 8.3: Comparativo P/ Coef. Vol. -VPP-PB $V_v=6.0$ nós	139
Figura 8.4: Comparativo P/ Coef. Vol. - VPP-PB $V_v=21.0$ nos	139
Figura 8.5: Resistência ao Avanço Para Coef. Vol.=4.97 e $VV=6.0$ nós	140
Figura 8.6: Resistência ao Avanço Para Coef. Vol.=4.97 e $VV=21.0$ nós	141
Figura 8.7: Comparativo da Resistência Para $Bwl/T_c$	142
Figura 8.8: Variação Paramétrica de $Bwl/T_c$ - VPP-PB, $V_v=6.0$ nós	143
Figura 8.9: Variação Paramétrica de $Bwl/T_c$ - VPP-PB, $V_v=21.0$ nós	143
Figura 8.10: Comparativo da Resistência de Onda Para LCF	144
Figura 8.11: Comparativo do $C_L$ Entre Oossanen e Whilcker	145
Figura 8.12: Comparativo Entre Quilhas Para Velocidade VPP-PB	146
Figura 8.13: Comparativo Entre Quilhas Para Deriva VPP-PB	147

Figura 8.14: Comparativo Entre Quilhas Para Vmg VPP-PB	148
Figura 8.15: Coeficientes Aerodinâmicos Gerados Pelo VPP-PB	149
Figura 9.1: Fluxograma Para Geração de Modelos Para Análise de Performance	152
Figura 9.2: Arranjos Vélcos e Quilhas	154
Figura 9.3-A: Curvas Hidrostáticas - Modelo Mãe (LCB,VCB,LCF,KMt)	156
Figura 9.3-B: Curvas Hidrostáticas - Modelo Mãe (Volume, Deslocamento, Awl)	156
Figura 9.3-C: Curvas Hidrostáticas - Modelo Mãe ( $C_B, C_P, C_{wl}, C_M$ )	156
Figura 9.4: Planos de Linhas dos Modelos 1 à 9	157
Figura 9.5 Fluxograma Para a Escolha da Embarcação Ótima	160
Figura 9.6-A: Comparativo das Quilhas p/ Velocidade $V_v=6.0$ nós	162
Figura 9.6-B: Comparativo das Quilhas p/ Velocidade $V_v=15.0$ nós	162
Figura 9.6-C: Comparativo das Quilhas p/ Velocidade $V_v=21.0$ nós	163
Figura 9.7-A: Comparativo das Quilhas p/ Deriva $V_v=6.0$ nós	164
Figura 9.7-B: Comparativo das Quilhas p/ Deriva $V_v=15.0$ nós	164
Figura 9.7-C: Comparativo das Quilhas p/ Deriva $V_v=21.0$ nós	164
Figura 9.8-A: Comparativo das Quilhas p/ Vmg $V_v=6.0$ nós	166
Figura 9.8-B: Comparativo das Quilhas p/ Vmg $V_v=15.0$ nós	167
Figura 9.8-C: Comparativo das Quilhas p/ Vmg $V_v=21.0$ nós	168
Figura 9.9-A: Comparativo de $B_{wl}/T_c$ p/ Velocidade $V_v=6.0$ nós	172
Figura 9.9-B: Comparativo de $B_{wl}/T_c$ p/ Velocidade $V_v=15.0$ nós	172
Figura 9.9-C: Comparativo de $B_{wl}/T_c$ p/ Velocidade $V_v=21.0$ nós	173
Figura 9.10: Comparativo de $B_{wl}/T_c$ Para a Banda	173
Figura 9.11-A: Comparativo de $B_{wl}/T_c$ p/ Vmg $V_v=6.0$ nós	174
Figura 9.11-B: Comparativo de $B_{wl}/T_c$ p/ Vmg $V_v=15.0$ nós	174
Figura 9.11-C: Comparativo de $B_{wl}/T_c$ p/ Vmg $V_v=21.0$ nós	174
Figura 9.12-A: Comparativo do Coef. Vol. p/ Velocidade $V_v=6.0$ nós	176
Figura 9.12-B: Comparativo do Coef. Vol. p/ Velocidade $V_v=15.0$ nós	176
Figura 9.12-C: Comparativo do Coef. Vol. p/ Velocidade $V_v=21.0$ nós	177



Figura 9.13-A: Comparativo do Coef. Vol. $p/V_{mg}$ $V_v=6.0$ nós	178
Figura 9.13-B: Comparativo do Coef. Vol. $p/V_{mg}$ $V_v=15.0$ nós	178
Figura 9.13-C: Comparativo do Coef. Vol. $p/V_{mg}$ $V_v=21.0$ nós	179
Figura 9.14: Forças Laterais Hidrodinâmicas	180
Figura 9.15: Resistência ao Avanço	181

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Velocidades Limites Para Cascos Deslocantes	14
Tabela 3.2: Embarcações Semelhantes, Relação L/Lwl	14
Tabela 3.3: Embarcações Semelhantes, Relação L/B	16
Tabela 3.4: Relação Entre Áreas Laterais do Casco, Quilha, Leme e Vélca	21
Tabela 3.5: Razões de Aspecto da Vela Principal	26
Tabela 3.6: Distribuição da Área Vélca	26
Tabela 5.1: Coeficientes da IMS Para Balão	66
Tabela 5.2: Coeficientes da IMS Para Genoa	66
Tabela 5.3: Coeficientes da IMS Para Vela Marconi e "Full-Batten"	66
Tabela 5.4: Coeficientes Aerodinâmicos de Milgram	70
Tabela 5.5: Coeficientes de Arrasto Devido a Separação	71
Tabela 6.1: Coeficientes Delft Para $0.125 \leq F_n \leq 0.450$	92
Tabela 6.2: Coeficientes Delft Para $0.475 \leq F_n \leq 0.700$	93
Tabela 9.1: Valores Médios dos Adimensionais	153
Tabela 9.2-A: Dimensões Principais dos Modelos da Série	155
Tabela 9.2-B: Dimensões Principais dos Modelos da Série	155
Tabela 9.3: Valores Constantes Para Todos os Modelos	155
Tabela 9.4: Dimensões dos Apêndices	158



## LISTA DE ABREVIATURAS

- IACC = "International America's Cup Class". Regra que determina os veleiros que competem na Copa América.
- IMS = "International Measurement System". Regra internacional para veleiros de oceano, baseada na velocidade ótima (obtida através da utilização de um programa de predição de velocidade) atingível por um veleiro.
- MIT = "Institute Massachusetts Technology"
- IOR = "International Offshore Rule". Regra internacional para veleiros de oceano, baseada na obtenção de um "rating" que equipare veleiros diferentes.
- VPP = "Velocity Prediction Program". Programa para predição de velocidade de veleiros.
- YURI = "Yacht Union Racing International". Organização internacional que regulamenta as competições a vela.

## **ABSTRACT**

The subject of this dissertation is the rational design of sailing yacht using a velocity prediction program.

When sailing, the yacht presents angle of heel, angle of yawl and velocity, result of equilibrium between aerodynamics and hidrodynamics forces and moments. Some mathematical models are introduced to obtain these forces and moments, and diferents ways of integration between hull and rig are explain.

One analytical model of performance optimization is suggested making variations in some coefficients and dimensions, showing the effect on performance.

The design of sailing yacht is a complex task ande the naval engineer has to define the operational conditions before begins the project. The sailing yacht has "personalit", doing its best in some conditions of wind and sea. The VPP is a good tool for discovery its "personalit" and make the theoretical approach of design close to practical approach.



## LISTA DE SÍMBOLOS

- $1+k$  = Fator de forma tridimensional, que procura levar em conta a resistência viscosa adicional do corpo em relação a placa plana
- $1+\sigma$  = Fator de correção para sustentação não elíptica
- $a$  = Subíndice para designar grandezas referentes a asa
- $A_b$  = Área do balão
- $A_g$  = Área da genoa
- $A_{gm}$  = Área da genoa de mezena
- $A_{lc}$  = Área lateral do casco em um corte longitudinal na linha de centro
- $A_{lb}$  = Área lateral do bulbo em um corte longitudinal na linha de centro
- $A_m$  = Área da vela de mezena
- $A_N$  = Área normalizada
- $A_p$  = Área da vela mestra principal
- $A_{p_c}$  = Área parasita do casco acima da linha d'água
- $A_{p_m}$  = Área parasita da mastreação
- $A_{p_t}$  = Área parasita da tripulação
- $AR_e$  = Razão de aspecto efetiva
- $AR_{Gerr}$  = Razão de aspecto sugerida por Gerritsma levando em conta a influência do casco.
- $AR'_e$  = Razão de aspecto efetiva, definida como o dobro da geométrica, com a envergadura estendida até a linha d'água
- $A_v$  = Área vélica total
- $A_{wl}$  = Área da linha d'água
- $A'_L$  = Área lateral da quilha com a envergadura estendida até a linha d'água
- $A_{\Delta}$  = Área do triângulo de proa

- B** = Boca máxima do casco
- b** = Envergadura da superfície de sustentação medida no local onde a linha de 1/4 da corda intercepta a ponta
- b<sub>asa</sub>** = Envergadura da asa medida na face superior ao longo da linha de 1/4 da corda
- Bl** = Borda livre
- b<sub>l</sub>** = Envergadura do leme
- B<sub>L<sub>m</sub></sub>** = Borda livre média
- bm<sub>f</sub>** = Envergadura média do "flap"
- b<sub>q</sub>** = Envergadura da quilha medida da sua parte superior até o encontro com as asas, excetuando-se o arredondamento na região do encontro
- Bwl** = Boca do casco na linha d'água
- c** = Corda máxima da superfície de sustentação
- C<sub>B</sub>** = Coeficiente de bloco
- C<sub>D</sub>** = Coeficiente de arrasto total
- C<sub>D0</sub>** = Coeficiente de arrasto parasita vindo das obras mortas como casco, casaria, mastro, estaiamento tripulação, etc.
- C<sub>D<sub>b</sub></sub>** = Coeficiente de arrasto parasita da vela balão
- C<sub>D<sub>g</sub></sub>** = Coeficiente de arrasto parasita da vela genoa
- C<sub>DI</sub>** = Coeficiente de arrasto induzido
- C<sub>DP</sub>** = Coeficiente de arrasto parasita
- C<sub>D<sub>p</sub></sub>** = Coeficiente de arrasto parasita da vela marconi (mestra ou mezena)
- C<sub>DS</sub>** = Coeficiente de arrasto devido a separação do escoamento.
- C<sub>F</sub>** = Coeficiente de resistência friccional (ITTC)
- C<sub>L</sub>** = Coeficiente de sustentação
- C<sub>L<sub>b</sub></sub>** = Coeficiente de sustentação da vela balão
- C<sub>L<sub>g</sub></sub>** = Coeficiente de sustentação da vela genoa
- C<sub>L<sub>p</sub></sub>** = Coeficiente de sustentação da vela marconi (mestra ou mezena)
- C<sub>L<sub>αPonta</sub></sub>** = Coeficiente dependente da forma da ponta da superfície de sustentação



- $C_{L_{\alpha^2}}$  = Constante relacionada à sustentação não linear da superfície de sustentação  
 $c_{L_{\alpha^2\text{Ponta}}}$  = Coeficiente dependente do formato da ponta da superfície de sustentação  
 $C_M$  = Coeficiente de secção mestra  
 $cm_f$  = Corda média do "flap"  
 $C_P$  = Coeficiente prismático  
 $c_p$  = Corda na ponta  
 $c_r$  = Corda na raiz  
 $c_{R_{ms}}$  = Comprimento da corda na raiz da asa  
 $C_{Rc}$  = Coeficiente de resistência total do casco  
 $C_V$  = Coeficiente da resistência viscosa  
 $C_{wp}$  = Coeficiente de linha d'água  
 $DG$  = Diagonal da genoa, distância do punho da vela à testa.  
 $Dm_m$  = Diâmetro médio do mastro de mezena  
 $Dm_p$  = Diâmetro médio do mastro principal  
 $DP$  = Diagonal do triângulo de vante, distância do pé-do-mastro ao estai de proa  
 $E$  = Relação entre a área do "flap" e a área total da superfície de sustentação  
 (incluindo o "flap")  
 $E_A$  = Empuxo aerodinâmico (na direção do movimento)  
 $E_{gm}$  = Comprimento da esteira da vela de proa de mezena  
 $E_m$  = Comprimento da esteira da vela de mezena  
 $E_p$  = Comprimento da esteira da vela mestra principal  
 $f$  = Fator de redução da área vélica sem alteração na posição vertical do centro de aplicação dos esforços aerodinâmicos  
 $F_b$  = Fração de área entre a vela mestra e o balão  
 $F_d$  = Fator de diâmetro, que pondera o diâmetro do mastro com seu comprimento exposto, área e arrasto da vela mestra  
 $F_{end}$  = Fator de interferência do convés sobre a razão de aspecto da vela genoa  
 $F_g$  = Fração de área entre a área da genoa e a área do triângulo de vante

- $F_{gm}$  = Fração de área entre a área da vela de mezena e a vela de proa de mezena  
 $FI_b$  = Fator de interferência da vela mestra sobre a vela balão  
 $FI_g$  = Fator de interferência da vela mestra sobre a vela genoa  
 $FI_{gm}$  = Fator de interferência da vela de mezena sobre a vela de proa de mezena  
 $FI_m$  = Fator de interferência da vela de proa de mezena sobre a vela mestra  
 $FL_A$  = Força lateral aerodinâmica (~~na direção do movimento~~)  
*perpendicular ao*  
 $FL_c$  = Força lateral do casco  
 $FL_q$  = Força lateral da quilha sem a parcela não linear da sustentação  
 $FL_{q0}$  = Força lateral desenvolvida pela quilha como fólio sem influência do bulbo, casco e sem a parcela não linear da sustentação  
 $FL_{TA}$  = Força lateral total aerodinâmica (na direção perpendicular ao vento aparente)  
 $FL_{TH}$  = Força lateral total hidrodinâmica  
 $F_m$  = Fração de área entre a genoa de mezena e a vela mestra  
 $F_n$  = Número de Froude  
 $F_{pt}$  = Relação entre a área da genoa e do triângulo de proa a ser utilizado no cálculo da razão de aspecto do velame.  
 $g$  = Aceleração da gravidade  
 $gm$  = Subíndice que designa as grandezas referentes a vela genoa de mezena  
 $GM$  = Altura metacêntrica  
 $GM_{gm}$  = Valor do contorno médio da vela de proa de mezena tomado a 1/2 de  $P_{gm}$   
 $GM_m$  = Valor do contorno médio da vela de mezena tomado a 1/2 de  $E_m$   
 $GM_p$  = Valor do contorno médio da vela mestra principal tomado a 1/2 de  $E_p$   
 $GS_m$  = Valor do contorno superior da vela de mezena tomado a 3/4 de  $E_m$   
 $GS_p$  = Valor do contorno superior da vela mestra principal tomado a 3/4 de  $E_p$   
 $h$  = Altura do mastro  
 $h_B$  = Máxima altura vertical do bulbo assumindo que a mesma esteja situada próxima da localização da linha de 1/4 da corda da quilha na ponta.  
 $HBL$  = Comprimento da testa/valuma do balão



- $H_{c_m}$  = Altura da casaria em função do comprimento total L  
 $h_l$  = Distância do topo do leme a linha d'água incluindo efeito de onda  
 $H_m$  = Altura do mastro de mezena  
 $H_p$  = Altura do mastro principal  
 $HR_m$  = Altura da retranca da vela de mezena  
 $HR_p$  = Altura de retranca da vela mestra principal  
 $I$  = Altura do triângulo de proa (distância do convés ao estai de proa medido junto ao mastro)  
 $J$  = Comprimento da base do triângulo de proa (distância do pé do estai de proa ao pé do mastro)  
 $k_s$  = Fator que leva em conta a influência da viscosidade na inclinação da curva de sustentação com o ângulo de ataque para escoamentos bidimensionais  
 $K_{Sb}$  = Coeficiente de separação para vela balão  
 $k_{sf_q}$  = Efeito da viscosidade relativo ao fator de efetividade do "flap"  
 $K_{Sg}$  = Coeficiente de separação para vela genoa (de proa ou mezena)  
 $K_{Sp}$  = Coeficiente de separação para vela marconi (mestra ou mezena)  
 $L$  = Comprimento total do casco  
 $l$  = Subíndice para designar grandezas referentes ao leme  
 $L_a$  = Comprimento da asa  
 $L_b$  = Comprimento do bulbo  
 $L_{B_n}$  = Fator de interação do bulbo sobre o escoamento na quilha  
 $LBL$  = Comprimento da esteira do balão  
 $LBm$  = Distância entre mastros  
 $l_{CA}$  = Posição longitudinal do centro de esforços aerodinâmicos medida a partir da PPAV  
 $LCB$  = Posição longitudinal do centro de flutuação dada como porcentagem do comprimento total  
 $L_{c_n}$  = Fator de interação do casco sobre o escoamento na superfície de sustentação

- $l_{CH}$  = Posição longitudinal do centro de esforços hidrodinâmicos medida a partir da PPAV
- $L_e$  = Comprimento do mastro exposto acima do término do estai de vante
- $L_{wl}$  = Comprimento da linha d'água
- $m$  = Subíndice que designa as grandezas referentes a vela de mezena
- $M_{EmbA}$  = Momento de emborcamento aerodinâmico
- $M_{EndE}$  = Momento de endireitamento estático
- $M_{GuiA}$  = Momento de guinada aerodinâmico
- $M_{GuiH}$  = Momento de guinada hidrodinâmico
- $m_t$  = Massa da tripulação
- $MT1$  = Momento para mudar o trim de uma unidade (estático)
- $M_{TrimA}$  = Momento de trim aerodinâmico
- $M_{TrimE}$  = Momento de trim estático
- $PBL$  = Comprimento do pau do balão
- $P_{gm}$  = Altura da testa da vela de proa de mezena
- $P_m$  = Altura da testa da vela de mezena
- $P_p$  = Altura da testa da vela mestra principal
- $q$  = Subíndice para designar grandezas referentes à quilha
- $r$  = Fator de redução da área vélica com alteração na posição vertical do centro de esforços aerodinâmicos (rizar a vela)
- $R_{AdO}$  = Resistência adicional em ondas
- $RA_{L_e}$  = Razão de aspecto da porção exposta do mastro
- $R_{At}$  = Resistência devido a atitude do casco
- $R_B$  = Resistência de banda
- $R_C$  = Resistência hidrodinâmica do casco
- $Re$  = Número de Reynolds
- $R_{I_H}$  = Resistência induzida hidrodinâmica
- $R_O$  = Resistência de ondas próprias



- $R_{TA}$  = Resistência total aerodinâmica  
 $R_{TH}$  = Resistência total hidrodinâmica  
 $R_{V_H}$  = Resistência viscosa hidrodinâmica  
 $S_b$  = Superfície molhada do bulbo  
 $S_c$  = Superfície molhada do casco  
 $t$  = Espessura máxima da superfície de sustentação  
 $T_c$  = Calado máximo do casco (sem quilha)  
 $T_{máx}$  = Calado máximo da embarcação  
 $TR$  = Razão entre a corda na ponta e a corda na raiz da superfície de sustentação ("taper ratio")  
 $trim$  = Diferença de calado entre popa e a proa  
 $V$  = Velocidade efetiva do fluido perpendicular a superfície de sustentação  
 $V_A$  = Intensidade do vento aparente.  
 $V_B$  = Velocidade da embarcação.  
 $V_f$  = Velocidade do fluido  
 $V_{f_{perp}}$  = Parcela, no plano horizontal, da velocidade do fluido perpendicular a velocidade da embarcação  
 $V_{mg}$  = Velocidade ótima da embarcação (componente de  $V_b$  na direção do vento)  
 $V_V$  = Intensidade do vento real.  
 $x_q$  = Posição da linha de um quarto de corda da quilha medida a partir do encontro da roda de proa com a linha d'água  
 $x_r$  = Distância da linha de 1/4 de corda do leme na raiz até o encontro da roda de proa com a linha d'água  
 $z_b$  = Posição vertical do centro de esforços da vela balão  
 $z_{CA}$  = Altura do centro de aplicação dos esforços aerodinâmicos medido a partir da linha de base  
 $z_{CH}$  = Altura do centro de aplicação dos esforços hidrodinâmicos medido a partir da linha de base

- $z_g$  = Posição vertical do centro de esforços da genoa  
 $z_{gm}$  = Posição vertical do centro de esforços da vela de proa de mezena  
 $z_m$  = Posição vertical da vela de mezena  
 $z_p$  = Posição vertical do centro de esforços da vela mestra principal  
 $\alpha_c$  = Ângulo de fundo do casco na posição da linha de um quarto de corda da superfície de sustentação, relativo ao ponto na superfície do casco tomado a uma distância de metade da corda ao longo do contorno a partir da intersecção da superfície com o casco  
 $\alpha_{i_{q \rightarrow r}}$  = Ângulo induzido da quilha sobre o leme  
 $\beta$  = Ângulo de deriva.  
 $\beta_A$  = Ângulo de incidência do vento aparente medido a partir da linha de centro da embarcação.  
 $\beta_{ll}$  = Ângulo do leme dado pelo timoneiro em relação a linha de centro da embarcação  
 $\beta_V$  = Ângulo de incidência do vento real medido a partir da linha de centro da embarcação.  
 $\delta$  = Ângulo de "flap" medido a partir da linha de centro da embarcação  
 $\delta_{Cd}$  = Coeficiente de incremento do arrasto da vela mestra para armações fracionadas  
 $\delta_{Cl}$  = Coeficiente de redução da sustentação da vela mestra para armações fracionadas  
 $\nabla$  = Volume deslocado pela embarcação  
 $\Delta$  = Deslocamento leve da embarcação  
 $\Delta_c$  = Deslocamento do casco (sem apêndices)  
 $\Delta FL$  = Força adicional lateral na superfície de sustentação devido ao ângulo de "flap"  
 $\frac{\partial C_L}{\partial \alpha}$  = Tangente da curva do coeficiente de sustentação pelo ângulo de ataque para superfícies de sustentação



$\left(\frac{\partial \alpha}{\partial \delta}\right)$  = Fator de efetividade do "flap", ou fator de inclinação da curva do ângulo de ataque com o ângulo de "flap"

$\left(\frac{\partial \alpha}{\partial \delta}\right)_{th}$  = Valor teórico bidimensional para o fator de efetividade do "flap"

$\epsilon_A$  = Ângulo aerodinâmico de arrasto no plano horizontal. Definido como:  
 $\arctan(R_{TA}/FL_{TA})$ .

$\epsilon_H$  = Ângulo hidrodinâmico de arrasto no plano horizontal. Definido como:  
 $\arctan(R_{TH}/FL_{TH})$ .

$\phi$  = Ângulo de banda da embarcação.

$\Lambda$  = Ângulo de caimento da superfície de sustentação em relação a linha de 1/4 da corda.

$\Lambda_d$  = Ângulo de caimento do bordo de ataque do "flap"

$\nu$  = Viscosidade cinemática da água

$\rho_{Ar}$  = Densidade do ar

$\rho_{H_2O}$  = Densidade da água

$\tau$  = Metade do ângulo do bordo de fuga da superfície de sustentação

## RESUMO

Este trabalho tem por objetivo dar subsídios ao engenheiro naval para o projeto racional de embarcação a vela, utilizando uma nova ferramenta de análise: o programa para predição de velocidades.

O comportamento da embarcação a vela é resultado da integração entre as forças e momentos resultantes da ação do vento sobre a vela e da interação das obras vivas com a água. São sugeridas diferentes metodologias de integração e modelos matemáticos para a determinação das forças atuantes.

A análise paramétrica para verificação da precisão do modelo matemático, bem como a aplicação de uma metodologia de otimização de performance permitem uma busca direcionada das dimensões ideais de um veleiro para uma dada condição de projeto.

As principais conclusões podem ser divididas em três áreas: a que se refere ao programa de predição de velocidade, a que se refere ao modelo de análise e a que se refere a filosofia de projeto. O programa de predição de velocidade é uma ferramenta de análise muito útil e seu desenvolvimento confere flexibilidade e credibilidade aos resultados. O modelo de análise indica a necessidade da definição das condições de projeto da embarcação, pois não é possível obter um veleiro com a melhor performance em todas as condições de vento. Finalmente o programa para predição de velocidade vem aproximar os engenheiros teóricos daqueles mais práticos e vice-versa.



## 1. INTRODUÇÃO

As embarcações a vela foram as primeiras embarcações auto-propelidas que o homem utilizou as quais desde sua criação vem passando por aperfeiçoamentos e refinamentos na tentativa de tornar mais eficiente o aproveitamento desta fonte limpa e gratuita de energia, que é o vento.

A primeira notícia de embarcação movida a vela remonta de 3.500 A.C., no Egito, onde foram encontrados vestígios de balsas feitas com juncos envergando uma pequena vela quadrada. Em 1969, com uma embarcação semelhante e tão precária quanto as originais, Thor Hayerdhal cruzou o Atlântico norte.

Por volta de 1.500 A.C. os fenícios passaram a dominar o Mediterrâneo com embarcações mais robustas (construídas de madeira) e dotadas de mais de um mastro. As embarcações fenícias foram facilmente absorvidas pela civilização greco-romana sendo-lhes incorporados alguns aperfeiçoamentos. Entre eles, e o principal, estava a utilização de velas triangulares (velas latinas). Apesar destas velas também serem utilizadas pelos árabes (nos "Dhow's"), acredita-se que os gregos foram os primeiros a envergá-las; eram armadas em longas vergas e tinham como principal vantagem a flexibilidade de uso, permitindo que o barco pudesse navegar melhor no través e até mesmo contra o vento, alternando-se o lado de utilização da vela e descrevendo uma trajetória em zigue-zague.

Na região norte da Europa, antigas pinturas nas rochas indicam uma longa tradição náutica dos vikings, mesmo antes destes povos serem atacados pelas galeras romanas. Suas embarcações eram extremamente robustas e apesar de serem propulsionadas a maior parte do tempo por remos, também envergavam uma vela quadrada em um único mastro feita, possivelmente, de couro. As medidas de suas embarcações diferiam bastante das encontradas no Mediterrâneo, tendo uma relação comprimento-boca da ordem de cinco, enquanto aquelas tinham para este adimensional o valor de três.



Antes do século IX, no Oceano Índico, os juncos de madeira chineses e japoneses já arriscavam viagens até a costa africana com suas velas quadradas armadas sobre pequenas ripas de bambu em mais de um mastro. Alguns acreditam que estas velas inspiraram os árabes na criação das velas latinas. A característica mais surpreendente destas embarcações era a presença de compartimentos estanques.

No fim do século XIV a Europa já possuía tecnologia suficiente para um salto qualitativo no projeto de embarcações. Eram conhecidas as velas latinas que permitiam navegar mais junto ao vento e também as velas quadradas que apresentavam grande facilidade de manobra (motivo pelo qual foi adotada, em detrimento das latinas, pelos espanhóis e portugueses), já havia sido experimentado o castelo de popa mais elevado (herança greco-romana) que possibilitava uma melhor visão e maior ação mecânica do timoneiro sobre o leme, era utilizado apenas um leme central (apresentado pelos nórdicos no século XII) e por fim eram conhecidas as técnicas para construção de cascos de madeira fortes e que pudessem envergarem vários mastros. Todo este conhecimento resultou no aparecimento da carraca, que por possuir mais de um mastro e mais de uma vela envergada em cada um, proporcionou a força adicional para a criação de "grandes navios", alguns até com seis conveses. Foi numa carraca de dimensões mais modestas, porém não menos robusta, que Cristovão Colombo partiu para a descoberta das Índias.

As carracas evoluíram naturalmente para o galeão, que tinha como principal diferença a remoção do alto castelo de proa eliminando a tendência do navio de sair do curso. O galeão passou incólume os próximos duzentos anos até que em 1850 surgiram os clíperes, representantes da fase final e mais dinâmica da navegação comercial a vela.

Os clíperes foram considerados os cavalos de corrida dos oceanos, detendo vários recordes de velocidade e singradura por muitos anos (quebrados apenas no fim da década de 80, começo da de 90). Derivados das escunas, os clíperes eram embarcações muito esguias, envergavam uma grande área vélica (em alguns casos superior a 4.000 m<sup>2</sup>) e transportavam cargas de baixo peso específico (chás e especiarias), o que favorecia as altas velocidades e a facilidade em cortar as ondas. Envergando de quatro a cinco



mastros eles dominaram por 30 anos os sete mares até serem substituídos definitivamente pelas embarcações a motor. Era o fim dos veleiros puros como embarcações comerciais.

Os clíperes ainda singravam os mares com soberania quando em 1851 um fato histórico iria moldar o conceito da moderna embarcação a vela no século XX: foi a disputa da Copa dos Cem Guinéis pela escuna América, disputa que posteriormente seria chamada de Copa América. Com o declínio dos clíperes as embarcações a vela passaram a existir apenas no círculo dos iates e das competições, e é neste contexto que o aperfeiçoamento das mesmas acontecerá. Enquanto o projeto de iates de cruzeiro procura um aumento do conforto bem como a facilidade no manuseio das velas por tripulações reduzidas, a Copa América serve como um grande laboratório para o desenvolvimento dos veleiros em geral: cascos, velas e equipamentos. É graças a esta competição que se tem o aparecimento da armação marconi (a moderna vela triangular envergada no mastro a partir de 1930), o desenvolvimento das obras vivas, com o projeto de cascos com menor superfície molhada e apêndices incomuns e eficientes, a utilização de materiais exóticos na construção de cascos, mastros e velas, etc...

Até o começo da década de oitenta os veleiros de competição eram projetados, praticamente, dentro de restritas regras (a classe Doze Metros Internacional na Copa América e a IOR nas competições oceânicas em geral) que procuravam igualar barcos diferentes através de penalizações nas dimensões que, acreditava-se, proporcionavam maiores velocidades, como o comprimento da linha d'água, área vélica e calado. Estas dimensões eram introduzidas em fórmulas que originavam um número, o "rating" que corrigia o tempo dispendido por uma embarcação durante uma regata, e que por este motivo era minimizado ao máximo pelos arquitetos navais. O resultado disto foi que os barcos passaram a ser extremamente semelhantes e não objetivavam mais a velocidade máxima possível para um determinado comprimento, mas sim a máxima velocidade que não comprometesse o "rating" da embarcação.

Porém, no começo da década de oitenta uma nova regata veio soprar uma brisa de renovação no cenário da arquitetura naval. A "BOC Challenge Cup" inovava ao utilizar



uma regra que, ao invés de submeter a embarcação a uma fórmula, apenas limitava seu comprimento máximo e impunha algumas medidas mínimas de segurança, como número de compartimentos estanques e equipamentos de navegação a serem embarcados. O resultado disto foi a criação de veleiros extremamente radicais e voltados apenas para a máxima velocidade possível.

O acerto das regras da BOC foi tão grande que recentemente foram adotadas na regata "Withbread Arould the World" regras semelhantes que definiram uma nova classe, a W60 em substituição aos maxis (veleiros de oitenta pés) utilizados até então. O sucesso também veio incentivar um trabalho que vinha sendo desenvolvido dentro do IMT de se criar uma regra que não tutelasse o projeto à fórmulas mas sim a procura da velocidade. Era o começo da IMS.

Na verdade a IMS ("International Measurement System") não representa uma regra propriamente dita (a não ser no que concerne a segurança e aos padrões mínimos de conforto) mas estabelece uma estimativa da velocidade ótima atingível pela embarcação e que o comandante deve tentar se aproximar ao máximo. Desta maneira a IMS gira em torno de uma nova maneira de se enxergar a embarcação, o VPP ("Velocity Prediction Program"). O VPP foi (e ainda esta sendo) desenvolvido a partir de dados experimentais obtidos em tanques de provas e túneis de vento, bem como de valores medidos em escala real de veleiros de série construídos nos Estados Unidos, de modo que uma predição segura da velocidade possa ser feita a partir de dados como: o plano de linhas e a estabilidade de uma determinada embarcação. Inicialmente o programa era apenas uma ferramenta de análise da performance nas regatas, sendo utilizado em medições de embarcações já construídas, mas, na medida em que se foi tornando confiável e conhecido, os arquitetos navais puderam utilizá-lo também no projeto de embarcações testando diferentes soluções antes de se decidir por alguma delas. Simulações e resultados extrapolados de tanques de testes tornaram-se acessíveis a qualquer pessoa possuidora deste programa.



Outros VPP's apareceram principalmente depois do desafio à Copa América de 1984 vencido pela Austrália e que tinha feito uso desta ferramenta no projeto de seu veleiro (o Australia II). Porém, estes VPP's são extremamente especializados neste tipo de embarcações (12 Metros Internacional e a partir de 1991 os IACC's) e geralmente não estão disponíveis ao público, ao contrário do fornecido pela IMS.

É neste contexto do desenvolvimento de embarcações movidas a vela que se insere este trabalho, a primeira tentativa dentro da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo de produzir um programa de predição de velocidades de veleiros a partir de publicações especializadas. O objetivo inicial de se desenvolver um VPP foi se tornando mais amplo a medida em que se travava contato com novas informações e sentia-se a necessidade de fazê-las conhecidas, resultando desta maneira em um trabalho que procura orientar o engenheiro (arquiteto) naval nos passos preliminares do projeto.

Sendo assim a dissertação pode ser dividida em três grandes blocos:

1. Os capítulos 1, 2 e 3 procuram familiarizar o engenheiro com o projeto de embarcações a vela, comentando as particularidades da sua metodologia, bem como apresentando valores médios para alguns adimensionais além de introduzir outros específicos para o projeto de veleiros.
2. Os capítulos 4, 5 e 6 podem ser considerados o corpo teórico da dissertação. Nestes capítulos serão apresentadas algumas metodologias para a integração casco-vela, bem como modelos matemáticos para a obtenção das forças aerodinâmicas e hidrodinâmicas.
3. Os capítulos finais, 7, 8, 9 e 10 introduz o programa para a predição de velocidade (acompanhado de um pequeno manual e testes de validação), uma sugestão para um modelo de análise orientativo e as conclusões finais.

Para a elaboração de gráficos dos adimensionais baseados em embarcações semelhantes, foram pesquisadas, em publicações especializadas, o maior número possível de embarcações de cruzeiro e regata/cruzeiro (também chamadas de cruzeiro rápido)

construídas no Brasil e nos Estados Unidos durante a década de oitenta com comprimento de 4.8 a 15.2 metros. Com isto fica delimitado o campo da pesquisa.

O programa de predição de velocidade foi desenvolvido para condições de regime permanente e águas calmas, cobrindo uma faixa de velocidade compreendida entre os números de Froude de 0.125 e 0.750. O modelo aerodinâmico permite a utilização de vela genoa ou balão e opta por aquela que proporcionar maior velocidade. Se o veleiro atingir ângulos maiores do que trinta graus de banda, automaticamente a área vélica é reduzida segundo orientação prévia do usuário.

No modelo de análise sugerido serão elaboradas vinte e sete combinações diferentes de casco, quilha e velame (a partir da variação sistemática de algumas dimensões) para um dado comprimento total. Os modelos serão submetidos ao programa VPP, gerando resultados que permitirão avaliar como diferentes mudanças em alguns parâmetros podem alterar significativamente o desempenho final da embarcação para determinadas condições de vento. Esta avaliação comparativa é feita baseada na teoria hidrodinâmica e aerodinâmica desenvolvida nos capítulos iniciais desta dissertação.

Este trabalho procura trazer uma colaboração a este grupo tão restrito de engenheiros navais que projetam embarcações a vela no Brasil e que muitas vezes por falta de informações atualizadas ou até mesmo devido a um certo preconceito quanto a maneira científica de se realizar projetos de veleiros, usam apenas de sua intuição ou embarcações semelhantes como ferramentas de projeto, não conseguindo muitas vezes aferir novas idéias ou nuances que lhes permitiriam ganho em performance por outra maneira que não seja a construção de um protótipo nem sempre bem sucedido.



## 2. A ESPIRAL DE PROJETO

O primeiro passo no desenvolvimento do projeto de uma embarcação é a elaboração de uma espiral de projeto que reproduza de maneira mais objetiva e racional possível a sequência de fases a ser seguida no seu desenvolvimento. No caso de embarcações não convencionais, como é o caso de veleiros, a elaboração de uma espiral de projeto específica é fundamental visto muitas das etapas não serem de total domínio da equipe de projetistas ou simplesmente a maneira singular como cada fase interage com as outras. Naturalmente a espiral deve refletir a experiência e conhecimentos teóricos dos executores do projeto, as preferências pessoais ou maneiras particulares de encaminhar os problemas (desde que não firam o encadeamento lógico necessário), bem como os equipamentos materiais disponíveis na fase de desenvolvimento como por exemplo computadores, tanques de teste e outros.

O fluxograma da figura 2.1 apresenta uma sugestão de espiral de projeto representada aqui como um diagrama de blocos. O retângulo com linha mais fina representa os tópicos desenvolvidos nesta dissertação e as linhas tracejadas são desvios que devem ser percorridos para a interação dos valores pertinentes ao projeto.

As principais diferenças da metodologia apresentada na figura 2.1 em relação à espiral de projeto de uma embarcação convencional são:

- A elaboração de um plano de linhas nas etapas preliminares do projeto. Isto se deve a dificuldade em se encontrar regressões que permitam o cálculo da estabilidade fazendo uso apenas das dimensões principais e dos coeficientes de forma.
- O cálculo da propulsão antes da integração. Em embarcações convencionais a velocidade de serviço é um requisito do armador que deve ser atingido. Sendo assim, a resistência ao avanço é função desta velocidade e a definição

da propulsão é resultado da integração casco-hélice-motor para a velocidade de projeto. Em embarcações a vela a velocidade de operação é uma decorrência do processo de integração, e não o ponto inicial para o cálculo da resistência ao avanço. Para determinar a velocidade atingível em uma dada condição de vento é necessário calcular previamente a resistência ao avanço e a força propulsora gerada pelo velame. Por isto a necessidade se calcular a propulsão antes de se efetuar a integração.

No início do desenvolvimento da embarcação deverão ser utilizados como dados de entrada os requisitos do armador, as dimensões e coeficientes decorrentes da pesquisa de navios semelhantes e os requisitos adicionais, que são formulados pelo projetista afim de complementar os requisitos dados pelo armador.

De posse destes dados pode-se partir para a definição do casco através da determinação de suas dimensões principais (comprimento, boca, calado, área vélica) e coeficientes de forma. Procura-se nesta fase gerar um casco não muito diferente dos já existentes, sendo ele apenas um esboço do que será a embarcação final. Encerra esta fase a elaboração do plano de linhas.

O passo seguinte consiste no cálculo da estabilidade estática do navio. Como nesta fase ainda não se possui o centro de gravidade da embarcação, algumas hipóteses deverão ser feitas afim de se avaliar se o casco é ou não seguro, segundo alguma regra, do ponto de vista da estabilidade. Caso este quesito não seja atendido, o primeiro laço do projeto é realizado, voltando-se as dimensões principais e alterando-as até que se atenda aos requisitos de segurança mínimos. Os critérios de estabilidade (e consequentemente de segurança) costumam ser função do tipo de utilização do veleiro, da sociedade classificadora responsável pelo seguro e até mesmo do país onde a embarcação irá operar. Eles são baseados nas curvas de momento de emborcamento (para vento constante e para rajadas) e nas curvas de momento restaurador dinâmico, para diferentes condições de carga e área vélica.



A determinação das dimensões principais e coeficientes de forma permitem que, fazendo-se uso de uma série sistemática ou de regressões, seja possível determinar a resistência ao avanço da embarcação. No caso de embarcações a vela, o cálculo da resistência implica em cálculos mais elaborados que para uma embarcação convencional, pois a mesma deverá ser calculada para as condições de embarcação com deriva e banda. O intuito é determinar também o valor da força lateral que surge quando a embarcação navega com ângulo de deriva, afim de equilibrar a força lateral proveniente do velame.

As forças provenientes do velame (lateral e avante) também são deduzidas com o auxílio de uma série sistemática de velas ou ainda com os coeficientes presentes no programa de predição de velocidade da YURI.

Com as forças hidrodinâmicas que atuam no casco e as aerodinâmicas que atuam nas velas passa-se a integração casco-vela, que nada mais é que a determinação do ângulo de deriva, ângulo de banda e velocidade da embarcação para uma dada condição de vento. Caso não seja atendido o requisito de velocidade da embarcação serão necessárias alterações no projeto. Estas alterações podem ocorrer no casco afim de torná-lo mais hidrodinâmico ou mais estável (para que possa carregar maior velame) ou ainda o velame poderá ser aumentado até o limite da estabilidade da embarcação. Esta procura de dimensões que atendam a velocidade de projeto está representada pela linhas pontilhadas que saem do passo integração.

Determinadas as dimensões principais, bem como os esforços atuantes e seus pontos de aplicação, pode-se partir para a elaboração do plano estrutural, que consiste na determinação do tipo de arranjo e seus escantilhões. Esta geração dos elementos estruturais poderá ser feita com o auxílio de sociedades classificadoras, de maneira racional e até mesmo através de uma análise computacional utilizando-se elementos finitos.

O próximo passo no projeto seria a determinação do arranjo geral, tanto do convés como do interior, com um levantamento preliminar de todos os equipamentos que a embarcação possuirá, seu peso e dimensão. O objetivo nesta fase é dispor estes

equipamentos da maneira mais eficiente possível na embarcação. Quando isto não for possível, deve-se alterar as dimensões da embarcação e reiniciar todo o processo anteriormente descrito.

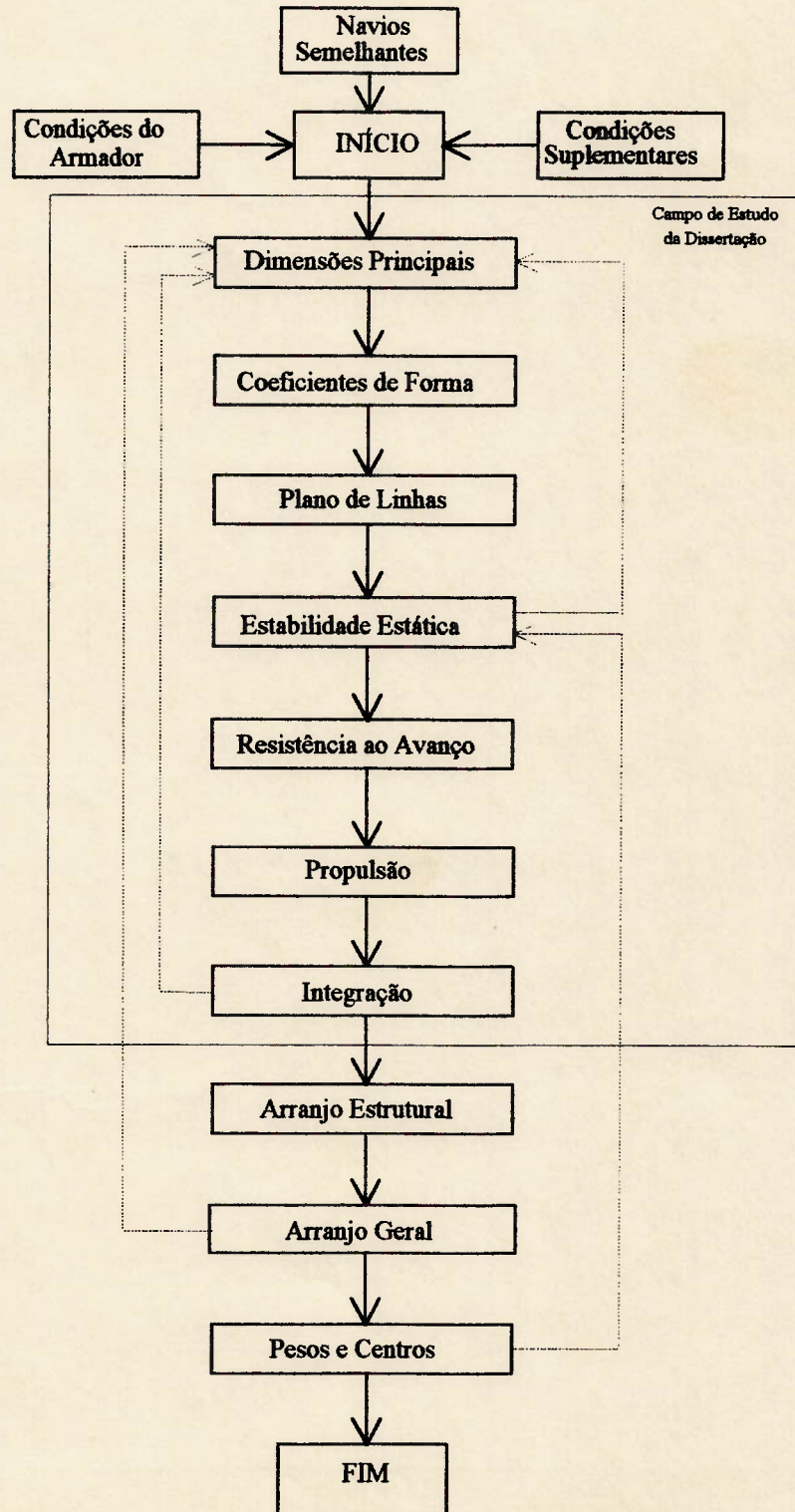


Figura 2.1: Fluxograma de Projeto



Com o dimensionamento dos elementos estruturais e dos equipamentos presentes na embarcação pode-se então calcular o peso total da mesma e seu centro de gravidade nas várias condições de operação da vida útil do veleiro. Com a posição do centro de gravidade deve-se retornar ao cálculo da estabilidade e reconsiderar as hipóteses que inicialmente foram feitas.

Por fim quando todas estas fases tiverem sido realizadas o projeto preliminar estará encerrado e passar-se-á para a realização do projeto de detalhamento que não é o objetivo deste trabalho.

### **3. DIMENSÕES PRINCIPAIS E COEFICIENTES DE FORMA**

Para a escolha das dimensões principais deve-se ter claro no início do projeto o objetivo final do veleiro, que pode ser basicamente dois: regata ou cruzeiro. Estes diferentes usos são conflitantes e dificilmente conciliáveis, pois enquanto no primeiro caso procura-se desenvolver um barco com máxima performance: leve, com pequena borda livre, máxima área vélica e grande calado; no segundo a prioridade é o conforto interno, sem muita preocupação com o deslocamento, borda livre alta que proporcione um bom pé-direito, área vélica facilmente controlável por uma tripulação reduzida e pouco calado.

Esta pequena comparação já evidencia algumas diferenças entre estas duas aplicações para embarcações a vela, mas mesmo quando se trata da mesma aplicação, deve-se ter cuidado na escolha das dimensões principais, pois pequenas variações nas mesmas resultam em grandes diferenças de desempenho.

Este capítulo tem por objetivo discutir a maneira como as variações de algumas dimensões influenciam o projeto como um todo, seja do ponto de vista da performance, seja sobre a ótica do conforto e também apresentar alguns adimensionais específicos desenvolvidos para embarcações a vela. Para isto utilizou-se basicamente duas publicações, a apresentada por MILLER (1990) e a de OOSSANEN (1981), bem como uma lista de embarcações semelhantes obtidas em revistas especializadas.

Quando se utiliza embarcações semelhantes para a determinação das dimensões principais, deve-se ter cuidado em se escolher embarcações desenvolvidas para situações semelhantes a que se esta projetando. As relações apresentadas aqui sobre forma de gráfico foram obtidas de embarcações produzidas em série no Brasil e nos Estados Unidos para uso geral em cruzeiro rápido/regata da década de oitenta. Alguns gráficos



apresentam dispersão pois as embarcações pesquisadas possuíam objetivos de utilização variados. Este fato porém não invalida os gráficos apresentados, mas concede a eles o caráter apenas orientativo, devendo o engenheiro levantar seus próprios gráficos correspondentes, restringindo sua pesquisa a embarcações com utilização semelhante a que pretende projetar.

### **3.1. DIMENSÕES DO CASCO**

#### **3.1.1. Comprimento Total e de Linha D'água**

Na escolha do comprimento de linha d'água da embarcação dois fatores devem ser levados em conta: custo e desempenho. Quando se projeta utilizando regras internacionais como a IOR e a IMS, custo não tem tanta importância, visto que normalmente o proprietário já procura o projetista com a categoria a ser disputada na regata escolhida, o que fixa aproximadamente o comprimento total e o de linha d'água. Quando não se está projetando para alguma regra de "rating" específica, o proprietário fixa o máximo custo da embarcação e o projetista, baseado em sua experiência, determina um comprimento correspondente. Quando se tem uma certa flexibilidade na escolha do comprimento, uma busca sistemática, fazendo-se uso de um VPP ("Velocity Prediction Program"), pode ser empreendida na tentativa de se encontrar a melhor relação entre custo e performance.

Estipular o custo de uma embarcação é uma tarefa complexa, pois depende da qualidade do equipamento, material do casco, mão-de-obra empregada e jogo de velas entre outras coisas, mas alguns autores consideram que o custo é função do comprimento de linha d'água elevado ao cubo.

Visto que a resistência de onda varia significativamente com o comprimento de linha d'água, esta dimensão tem um grande impacto sobre a performance da embarcação. Para veleiros com um alto valor do coeficiente volumétrico (embarcações deslocantes)

existe praticamente um limite na velocidade atingida em condições normais de vento e mar (principalmente na condição de contravento) que corresponde a um número de Froude de 0.45. A tabela 3.1 representa as velocidades limites para esta situação em função do comprimento.

Lwl (m)	2.0	4.0	8.0	16.0	32.0	64.0
$2.75\sqrt{Lwl}$ (nós)	3.9	5.5	7.8	11.0	15.6	22.0

Tabela 3.1: Velocidades Limites para Cascos Deslocantes

Para cascos com coeficiente volumétrico de valor superior a sete, a resistência de onda é sensivelmente reduzida e os valores de velocidade apresentados acima podem ser largamente superados.

Pode-se determinar o comprimento total da embarcação utilizando-se da relação entre L e Lwl apresentada por MILLER (1990) que compara os valores para 28 embarcações da década de cinquenta com 46 embarcações da década de oitenta na tabela 3.2.

	L/Lwl (1950)	L/Lwl (1980)
Máximo	1.43	1.37
Média	1.32	1.23
Mínimo	1.17	1.08

Tabela 3.2: Embarcações Semelhantes, Relação L/Lwl

A década de noventa apresenta uma tendência cada vez maior de se utilizar o maior valor possível do comprimento da linha d'água afim de se minimizar o efeito da resistência de onda. Isto acontece principalmente em embarcações medidas pela IMS e nas regatas que fixam apenas o máximo comprimento total.

### 3.1.2. Boca e Calado

A determinação da boca e do calado de uma embarcação a vela esta relacionada basicamente à dois fatores: a superfície molhada e a estabilidade. Nos últimos anos têm-



se notado um incremento da boca, fazendo com que a estabilidade devido a forma (decorrente do aumento da área de linha d'água e consequentemente do momento de inércia) predomine sobre a estabilidade devido ao deslocamento. O aumento da boca resulta em um aumento da superfície molhada que pode ser compensado por uma variação correspondente na área vélica, afim de não se prejudicar o desempenho em ventos leves, quando a resistência é preponderantemente de atrito.

A relação entre boca e calado ( $Bwl/T_c$ ) também influencia a resistência de onda, porém de maneira mais discreta que no caso da de atrito. Percebe-se um incremento naquela resistência com o aumento de  $Bwl/T_c$  para números de Froude maiores que 0.4. Porém para veleiros com altos valores da relação comprimento-deslocamento (coeficiente volumétrico,  $L/\nabla^{1/3}$ ) um decremento da resistência de onda será sentido para altas velocidades quando se aumenta a relação boca-calado.

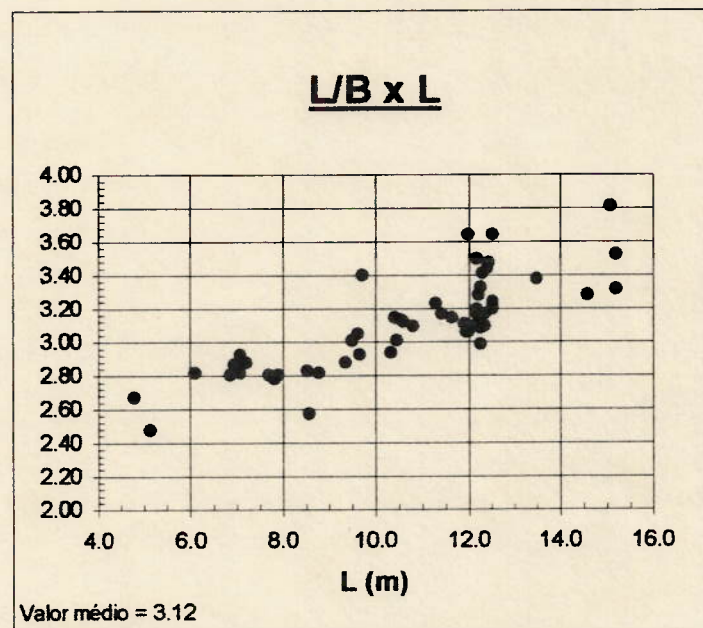


Figura 3.1: Embarcações Semelhantes.  $L/B \times L$

MILLER (1990) apresenta os valores máximos, médios e mínimos encontrados para a relação comprimento total-boca (apresentado na tabela 3.2), que é semelhante ao

valor médio obtido no levantamento realizado em revistas especializadas que se encontra no gráfico da figura 3.1.

	L/B (1950)	L/B (1980)
Máximo	5.20	4.10
Média	3.96	3.25
Mínimo	3.24	2.63

Tabela 3.3: Embarcações Semelhantes, Relação L/B

MILLER(1990) determina o calado do casco através da relação entre  $L_w/T_c$ , apresentando um valor médio para este adimensional de 18.0. Porém no caso de embarcações extremamente leves (ULDB's, "ultra lighth displacement boats") este valor pode chegar a 27.0. O caso oposto, embarcações deslocantes, apresenta para este adimensional o valor 13.0.

Este mesmo autor procura relacionar a boca na linha d'água com o calado total da embarcação apresentando os seguintes valores conforme os apêndices utilizados: 1.6 para veleiros dotados de quilha, 2.05 para quilha aladas, e 2.2 para veleiros de bolina.

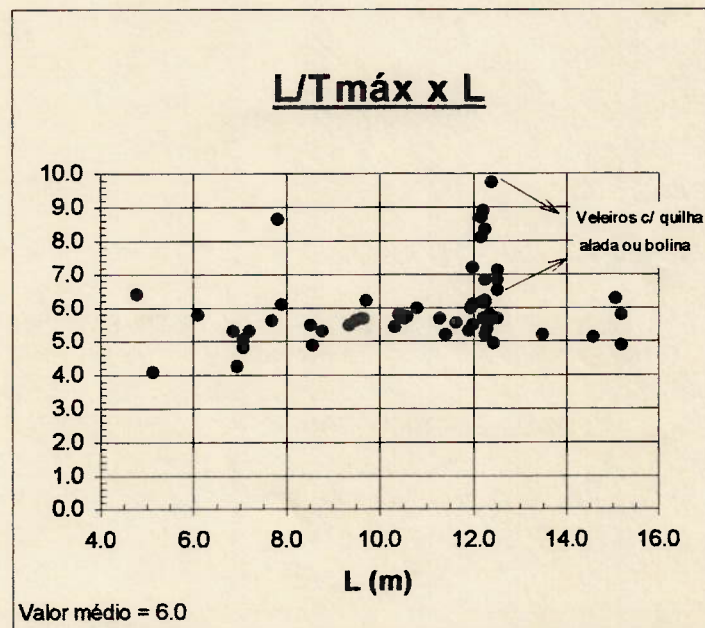


Figura 3.2: Embarcações Semelhantes, L/Tmáx x L



Já um levantamento da relação comprimento/calado máximo (figura 3.2) a partir de embarcações semelhantes mostra uma grande concentração em torno do valor 5.5. Porém a medida em que se aprofunda a pesquisa (como foi feito na região em torno dos 12 metros de comprimento) surge uma dispersão, resultado esperado visto este adimensional sofrer forte influência do objetivo da embarcação e conseqüentemente da eficiência que se quer dos apêndices como geradores de força lateral (embarcações de cruzeiro, por exemplo, possuem pequeno calado com a adoção de quilhas aladas e bolinas enquanto as de regata possuem quilhas mais profundas e eficientes).

### **3.1.3. Borda Livre**

A borda livre é determinada em função da utilização que se pretende para a embarcação. Normalmente embarcações de regata apresentam um pequena borda livre afim de se reduzir a área exposta ao vento e conseqüentemente diminuir a resistência parasita aerodinâmica bem como o peso estrutural. Isto porém torna o convés da embarcação extremamente "molhado" em mares mais agitados. Já para veleiros de cruzeiro a borda livre é alta, permitindo um alto pé-direito no interior bem como uma navegação mais "seca" e confortável em mares bravios para os tripulantes no convés.

MILLER (1990) apresenta uma relação linear para a razão borda livre/ $L_{wl}$  como pode ser visto na figura 3.3. Além disto também sugere que a relação entre as bordas livres na proa e na popa sejam da ordem de 1.4 para embarcações com o estilo das da década de cinquenta e de 1.28 para as de características semelhantes as da década de oitenta.

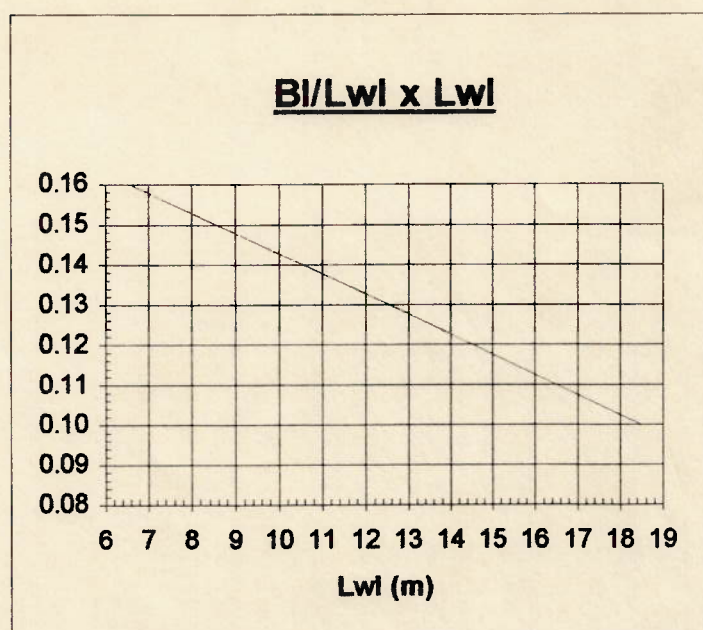


Figura 3.3: Relação entre Borda Livre e Lwl (Miller)

#### 3.1.4. Deslocamento

A relação entre comprimento de linha d'água e volume deslocado, chamado de coeficiente volumétrico e definido como  $Lwl/\nabla^{1/3}$ , é o principal parâmetro a influenciar a resistência de onda. O deslocamento também irá influir no total de lastro a ser carregado pela embarcação. A relação entre deslocamento, lastro e área vélica determina a estabilidade do veleiro e sua "capacidade de carregar velas" (a ser definido mais adiante). A escolha do deslocamento é uma decisão delicada pelo fato de que o deslocamento interfere construtivamente na estabilidade e destrutivamente na resistência.

O deslocamento total da embarcação está intimamente ligado à quantidade de contraventos em relação aos ventos largos que se espera que ela encontre durante a sua vida útil, ou mais comumente, nos tipos de regata que disputará. Em muitas regatas oceânicas de longo curso a porcentagem de orça desenvolvida pela embarcação é muito pequena, e neste caso é importante a minimização do deslocamento. Mesmo nestes casos, quando se necessita melhorar a velocidade ótima, procura-se aumentar a relação



entre lastro e deslocamento mesmo que isto implique num aumento da resistência de ondas.

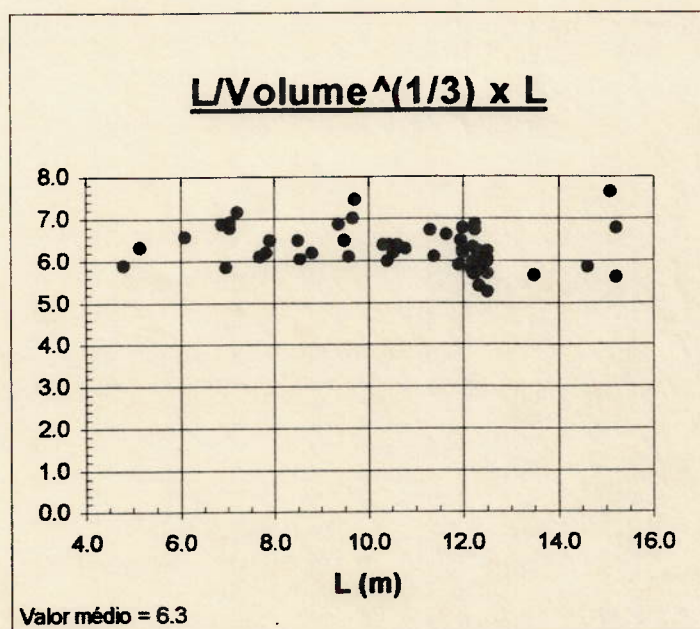


Figura 3.4: Embarcações Semelhantes, L x Coef. Vol.

Para ventos de moderados a fortes e buscando-se uma maximização da performance em contravento, o único caminho a ser seguido é o incremento da capacidade de carregar velas através do aumento da estabilidade com uma quantidade de lastro maior e conseqüentemente um deslocamento maior. A relação entre deslocamento e lastro também indica a eficiência do arranjo estrutural da embarcação, na medida em que, ao se obter um casco estruturalmente leve, pode-se aumentar o lastro afim de se atingir o deslocamento necessário para a "capacidade de carregar velas" desejada.

O gráfico 3.4, relacionando comprimento com deslocamento, mostra uma razoável concentração em torno do valor 6.3 para o coeficiente volumétrico. Já a relação entre deslocamento e lastro mostra uma dispersão grande, fruto da tentativa de se melhorar a velocidade ótima através da adoção de mais ou menos lastro conforme o deslocamento do casco.

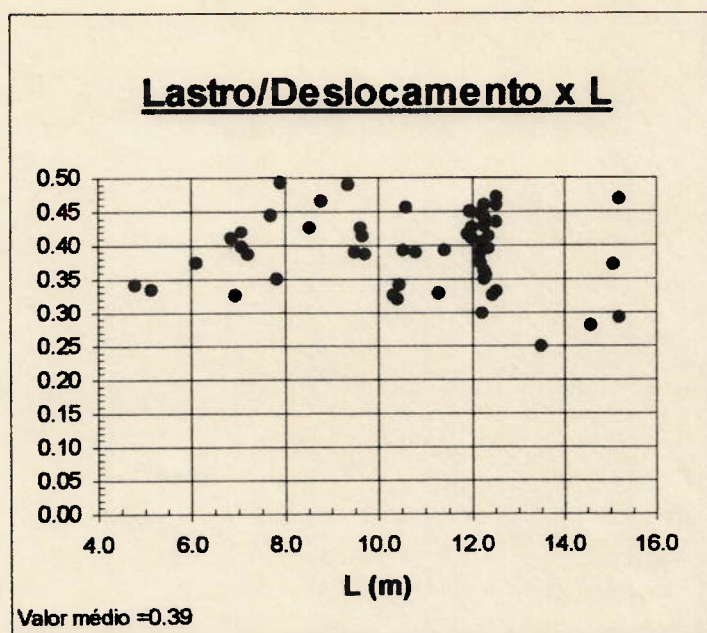


Figura 3.5: Embarcações Semelhantes, Lastro/Deslocamento x L

### 3.2. DIMENSÕES DA QUILHA E DO LEME

Quilha e leme apresentam uma função muito bem definida no desempenho de uma embarcação a vela: gerar força lateral com o máximo de eficiência afim de equilibrar a força proveniente das velas (esta discussão é apresentada no capítulo 4). O leme também acumula a função de prover manobrabilidade ao veleiro.

Em relação à geração da força lateral, a quilha e o leme podem ser vistos como asas operando sobre um pequeno ângulo de ataque (deriva) compreendido entre 4 e 6 graus. Sendo assim, muitas formas para a secção longitudinal da quilha têm sido desenvolvidas e defendidas por diferentes autores. Alguns preferem quilhas trapezoidais devido a facilidade de construção, outros preferem as semi-elípticas em uma tentativa de redução do arrasto induzido, outros ainda as desenham como um retângulo de alta razão de aspecto afim de se obter uma estrutura mais forte para sustentar um grande bulbo de chumbo em sua extremidade.

A vitória do Austrália II na Copa América de 1983, trouxe alguns complicadores para o projeto da quilha ao incluir na mesma apêndices que funcionavam como



"winglets", ou seja, pequenas asas na extremidade inferior da quilha que aumentavam sua razão de aspecto efetiva melhorando a geração de força lateral, e ainda fazendo uso do vórtice existente na extremidade da superfície de sustentação para gerar uma força no sentido do movimento e compensar o aumento da resistência ao avanço devido ao incremento da superfície molhada. As quilhas aladas foram vistas como revolucionárias na época, mas o tempo provou que sua aplicação era extremamente restrita e dependente das condições do mar e da velocidade desenvolvida pelo veleiro, não se aplicando à grande faixa de aplicações de um veleiro oceânico. Atualmente só se encontram estes apêndices nas embarcações IACC ("International America's Cup Class"), e em alguns modelos de embarcações de cruzeiro, onde são utilizadas como "carregadoras de chumbo" afim de se manter o centro de gravidade baixo com um pequeno calado.

As duas características principais de uma superfície de sustentação (leme e quilha) são a área lateral e a razão de aspecto.

	Mínimo	Médio	Máximo
Área Lateral do Casco/Área Vélica (s/ quilha)	0.11	0.16	0.19
Área Lateral do Casco/Área Vélica (c/ quilha)	0.07	0.11	0.14
Área da Quilha/Área Lateral do Casco	0.25	0.32	0.44
Área do Leme/Área Lateral do Casco	0.06	0.10	0.18

Tabela 3.3: Relação Entre Áreas Laterais do Casco, Quilha, Leme e Vélica

A área lateral é função da força de sustentação que se quer gerar afim de se obter um pequeno ângulo de ataque e conseqüentemente de deriva. A tabela 3.3 apresenta algumas relações entre área lateral do casco em função da área vélica para veleiros dotados de quilha ou não e área lateral da quilha e do leme em função da área lateral do casco.

Já a razão de aspecto relaciona-se com a eficiência na geração da força de sustentação com a menor resistência induzida possível. No capítulo sete é mostrado que quanto maior a razão de aspecto, maior será a eficiência da quilha/leme. Porém a razão de aspecto não pode ser livremente estipulada visto estar condicionada com a área lateral

e o calado máximo desejado para a embarcação. Geralmente a razão de aspecto geométrico da quilha para embarcações IOR ou IMS gira em torno de 1.0, enquanto que para regras que não penalizem o calado este fator encontra-se entre 2.5 e 3.0, mesma razão de aspecto encontrada para os lemes em geral.

### 3.3. DIMENSÃO DO VELAME

Os arranjos vélicos mais comuns encontrados nas embarcações atuais são:

- "Sloop": armação de um único mastro dotada de uma vela de proa, a genoa. Pode ser armado ao tope, quando o estai de vante termina no ponto mais alto do mastro ou ser fracionada, quando o estai de vante encontra o mastro em um ponto abaixo do tope.
- "Cuter": armação semelhante ao "sloop" sendo porém sempre armada ao tope e possuindo mais de uma vela de proa.
- "Cat": armação de um mastro que possui apenas uma grande vela principal, não envergando nenhuma vela de proa.
- "Ketch": armação de dois mastros, envergando velas de proa, sendo o principal o de vante e estando o de mezena situado por ante à vante da roda de leme.
- "Yawl": armação semelhante ao "ketch" possuindo porém, seu mastro de mezena por ante à ré da roda de leme.
- "Cat-Ketch": embarcação de dois mastros, sem utilizar velas de proa, com o mastro de mezena por ante à vante da roda de leme.
- Escuna: embarcação de dois mastros com velas de proa onde o mastro principal é o de ré.

A escolha de uma ou outra armação é uma tarefa difícil e muitas vezes leva em conta mais os gostos pessoais do proprietário e do projetista do que suas características técnicas. Atualmente 90% dos veleiros produzidos, de regata ou cruzeiro, apresentam a



armação em "sloop". Deve-se isso às vantagens do menor custo (um único mastro e inventário de velas reduzido) e o menor número de cabos de controle das velas (escotas e adriças), facilitando as manobras. Alguns projetistas preferem armações em dois mastros pois tanto a área vélica fica melhor dividida e conseqüentemente a força a ser empregada nos cabos torna-se menor, como também os esforços estruturais nos pontos de fixação das ferragens e mastros diminuem. A eficiência menor do mastro de mezena, que teria seu fluxo desviado pelo mastro de vante, parece não ser mais um problema na obtenção de grandes performances depois da vitória incontestável do barco "Stainleger II" na regata "Withbread" de (1990-1991), quando derrotou, em todas as condições de vento, todas as outras embarcações armadas em "sloop".

Além disto outros fatores devem ser levados em conta como a razão de aspecto das velas (altura da testa dividida pelo comprimento da esteira), altura do mastro principal e área vélica total. Para facilitar a escolha faz-se uso de alguns adimensionais que relacionam área vélica, altura do mastro, superfície molhada e deslocamento como será apresentado a seguir.

Também serão sugeridos alguns valores para a geometria das velas e distribuição das áreas vélicas.

### 3.3.1. Capacidade de Carregar Velas.

Este adimensional está ligado particularmente à habilidade em se velejar no contravento. Ele procura relacionar o momento de emborcamento, dado como função da área vélica e da altura do mastro, com o momento de endireitamento dado pelo deslocamento como apresentado na fórmula 3.1.

$$\text{Capacidade de Carregar Velas} = \frac{A_v \cdot h}{\nabla} \quad (3.1)$$

Onde  $A_v$  é a área vélica e  $h$  a altura do mastro, no caso de embarcações com dois mastros  $h$  refere-se ao mastro principal.

A figura 3.6 traz o gráfico baseado na pesquisa de embarcações semelhantes para este adimensional em função do comprimento.

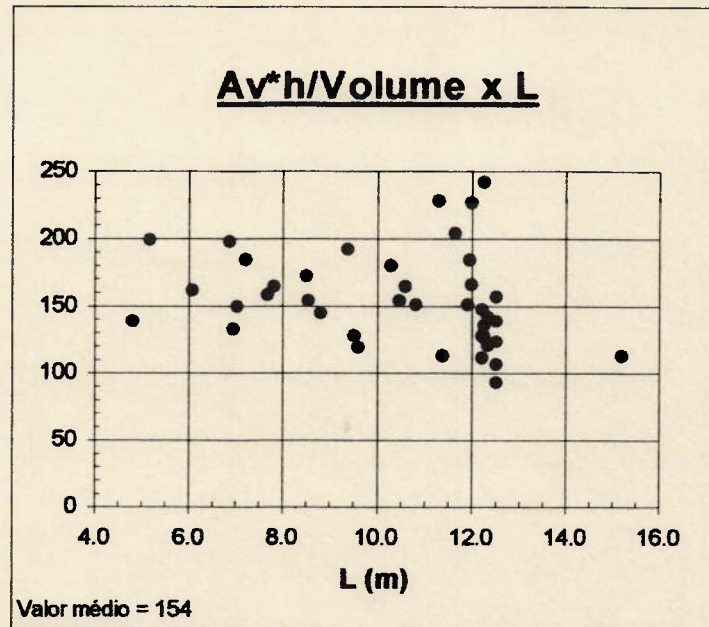


Figura 3.6: Embarcações Semelhantes, Capacidade de Carregar Velas

### 3.3.2. Relação Área Véllica-Deslocamento

Uma outra maneira de se obter a área vélica é através do adimensional  $Av/\nabla^{2/3}$ . Desde que a resistência de onda é diretamente relacionada com a razão entre comprimento da linha d'água e o deslocamento, o gráfico entre a relação área vélica-deslocamento e coeficiente volumétrico é uma boa indicação da performance do veleiro em ventos fortes.

A figura 3.7 apresenta os valores encontrados para esta relação a partir de embarcações semelhantes. Pode-se perceber que existe uma tendência dos valores se agruparem em uma diagonal no centro do gráfico. Este comportamento do adimensional reflete um compromisso entre a boa performance em contravento e em ventos de popa. Os pontos situados acima desta diagonal apresentam uma melhor performance contra o vento para um dado deslocamento e comprimento de linha d'água, enquanto que os situados abaixo da diagonal andam melhor em ventos de popa.



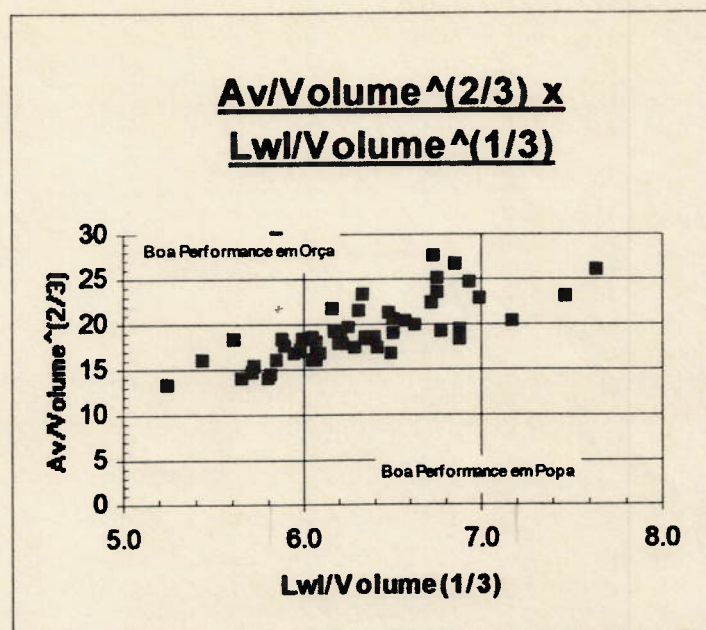


Figura 3.7: Embarcações Semelhantes,  $Av/\nabla^{2/3} \times Lwl/\nabla^{1/3}$

### 3.3.3. Relação Área Vélica-Superfície Molhada

Obviamente a relação entre área vélica e superfície molhada ( $Av/Sc$ ) procura quantificar a performance da embarcação em ventos leves (fracos), quando a parcela de atrito na resistência ao avanço torna-se mais acentuada. Muitos dos modernos iates de regata possuem um alto mastro e grande área vélica para uma boa performance em ventos leves, porém são obrigados a reduzir suas velas prematuramente com o aumento do vento.

MILLER (1990) recomenda os valores de 2.0, 2.28 e 2.55 como o mínimo, a média e o máximo admissível para este adimensional, em todas as faixas de comprimento da embarcação.

### 3.3.4. Dimensões Geométricas

MILLER (1990) recomenda alguns valores de razões de aspecto para vela principal que ele encontrou em suas pesquisas de embarcações semelhantes, bem como

valores de distribuição de área entre as velas e o triângulo de proa. Estas conclusões são apresentadas nas tabelas 3.4 e 3.5 respectivamente.

Razão de Aspecto da Vela Principal	
Mínimo (1980)	2.10:1
Médio (1980)	2.95:1
Máximo (1980)	3.51:1
Médio (1950)	2.20:1

Tabela 3.5: Razões de Aspecto da Vela Principal

	Triângulo de Proa	Principal	Mezena
Mínimo p/"Sloop"	58%	42%	---
Médio p/"Sloop"	50%	50%	---
Máximo p/"Sloop"	27%	73%	---
"Yawl"	43%	47%	10%
"Ketch"	46%	39%	15%

Tabela 3.6: Distribuição da Área Vélica



## 4. INTEGRAÇÃO CASCO-VELA

A abordagem do tema da integração entre casco e vela anteriormente a apresentação das forças propulsoras e de resistência, contradizendo o fluxograma apresentado na figura 2.1, faz-se necessária ante a complexidade da interação das forças atuantes em um veleiro e busca facilitar a compreensão da maneira como as diferentes componentes destas forças atuam no equilíbrio da embarcação.

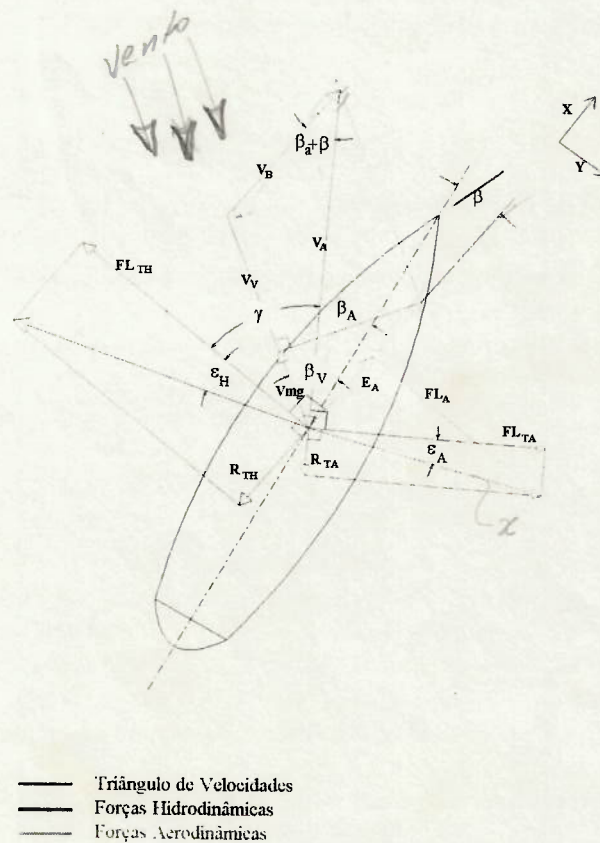


Figura 4.1: Equilíbrio de Forças no Plano Horizontal.

A grande dificuldade na integração casco-vela de um veleiro, que não encontra similar em seus colegas movidos a motor, deve-se ao fato de a força resultante da ação do vento nas velas e a resultante de forças no casco não atuarem na mesma direção e no

mesmo plano, estando ainda a maior parte do tempo em uma direção não coincidente com a linha de centro da embarcação. Isto resultará em momentos desequilibrantes da mesma ordem de grandeza que os momentos restituidores do casco, de origem hidrostática, obrigando a embarcação, quando navegando a vela, a adotar uma atitude<sup>1</sup> completamente diferente da atitude que teria se estivesse navegando a motor.

A figura 4.1 apresenta de maneira esquemática as forças aero e hidrodinâmicas em um plano horizontal quando a embarcação se apresenta navegando em orça. Nesta condição de navegação, ou quando recebendo o vento de través, ou ainda em popa folgada, a ação do vento sobre a vela dará origem a uma força que poderá ser decomposta em duas componentes: uma com a mesma direção do vento aparente (vetor representando o vento resultante da combinação vetorial do vento real com a velocidade da embarcação) e outra perpendicular a direção do mesmo. Chamou-se a primeira de Resistência Total Aerodinâmica ( $R_{TA}$ ) e a segunda de Força Lateral Total Aerodinâmica ( $FL_{TA}$ ). No capítulo 5 será tratado com mais detalhes as diferentes componentes e a origem da resultante aerodinâmica. No momento, deve-se ater ao fato de que a resultante também pode ser decomposta no sentido do movimento da embarcação, gerando um Empuxo Aerodinâmico ( $E_A$ ) e uma Força Lateral Aerodinâmica ( $FL_A$ ), perpendicular a trajetória.

É importante perceber que o sistema de coordenadas para a decomposição das forças encontra-se com seu eixo X alinhado com a direção do movimento da embarcação e não com sua linha de centro (observar figura 4.1). No decorrer deste trabalho este será o referencial adotado, estando sua origem situada no ponto mais extremo da proa do casco.

A força lateral aerodinâmica atinge valores até cinco vezes maiores que o empuxo fornecido pelas velas. Visto que na condição normal de navegação a mesma apresenta equilíbrio entre as forças aero e hidrodinâmicas, a embarcação deverá tomar uma atitude que gere uma força lateral afim de equilibrar esta componente fora da linha de centro.

---

<sup>1</sup> O termo atitude da embarcação está sendo utilizado para definir a posição de equilíbrio da embarcação, ou seja, sua velocidade, ângulo de banda e de deriva.



Esta mudança de atitude consiste na tomada de um ângulo de ataque (deriva) do casco e consequentemente dos apêndices, de modo que o escoamento em torno destes elementos hidrodinâmicos gere uma diferença de pressão e consequentemente uma sustentação. Esta sustentação é representada na figura 4.1 como uma Força Lateral Total Hidrodinâmica ( $FL_{TH}$ ). No capítulo 6 esta força e suas componentes serão apresentadas com mais detalhes. O importante neste ponto é perceber que a oposição à força lateral desenvolvida pela vela surge no casco a partir da tomada de um ângulo de deriva.

O desenvolvimento de velocidade acarretará uma resistência ao avanço que será função também do valor da força lateral total desenvolvida como é explicado no capítulo 6. Esta força naturalmente irá equilibrar o empuxo fornecido pelas velas. Para isto a embarcação sofrerá uma aceleração até que o equilíbrio seja atingido.

Pelo desenvolvimento acima apresentado obtém-se o equilíbrio de forças no plano horizontal. Porém, ao contrário do que está representado na figura 4.1, o centro de aplicação destas forças não são coincidentes. Isto ocasionará, mesmo depois de atingido o equilíbrio de forças, momentos nos três eixos que necessitarão novamente de uma mudança de atitude da embarcação.

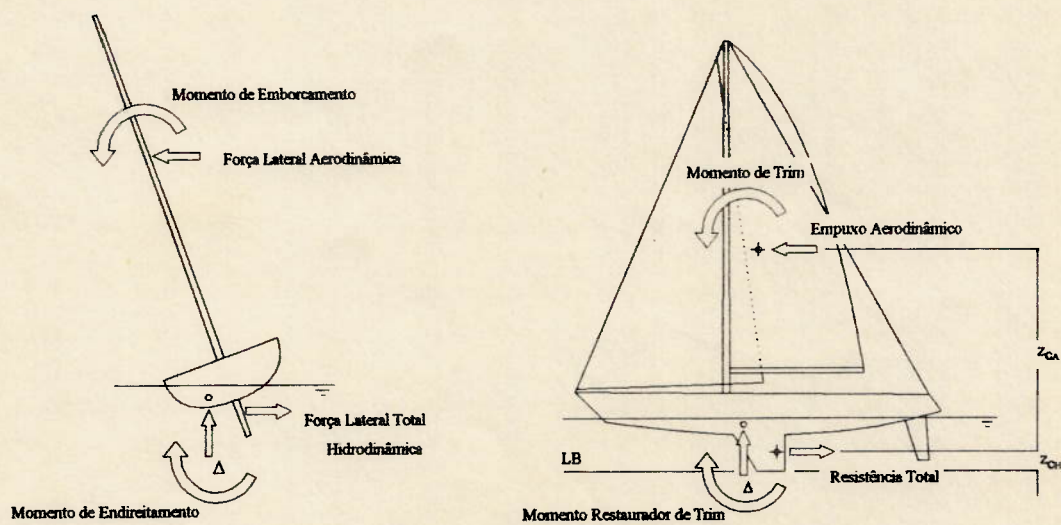


Figura 4.2-A: Momentos no Plano Transversal Figura 4.2-B: Momentos no Plano Longitudinal

O momento mais evidente trata-se do momento de emborcamento, como pode ser visualizado na figura 4.2-A, resultante da aplicação do binário  $FL_A-FL_{TH}$  com um braço de momento que é a distância entre o centro de esforços aerodinâmicos ( $z_{CA}$ ) e o centro de aplicação da resultante hidrodinâmica ( $z_{CH}$ ). Este momento de emborcamento tende a ser equilibrado pelo momento de endireitamento estático da embarcação ( para isto a mesma deverá tomar um ângulo de banda) e do correto posicionamento da tripulação. No caso do equilíbrio não ser atingido deve-se diminuir a área vélica ou reduzir a altura do centro de aplicação dos esforços aerodinâmicos.

No sentido longitudinal a força de resistência ao avanço combinada com o empuxo aerodinâmico e a diferença de posicionamento de seus centros de aplicação origina um momento de trim que faz com que a embarcação apresente uma tendência a mergulhar a proa até que o deslocamento do centro de carena para vante aumente o momento de trim e se obtenha o equilíbrio também nesta direção. Assim como o momento de emborcamento, este também é equilibrado segundo características hidrostáticas do casco em estudo.

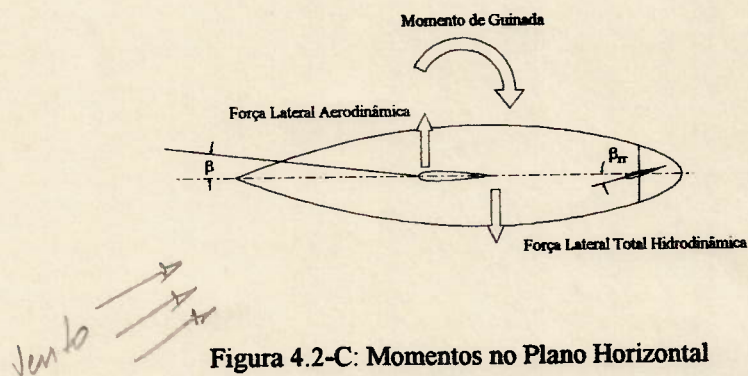


Figura 4.2-C: Momentos no Plano Horizontal

O último dos momentos atuantes na embarcação é o que atua no plano descrito na figura 4.2-C que é o momento de guinada. Ele se deve a diferença de posicionamento longitudinal dos centros de aplicação de esforços resultantes. Este talvez seja o momento mais difícil de se quantificar devido tanto a fatores técnicos quanto humanos. Pelos fatores técnicos têm-se a dificuldade em se determinar corretamente a posição do centro



vélico visto o formato da vela variar conforme a intensidade do vento e do material com que é feito. Pelo lado humano as dificuldades são maiores ainda, visto a tripulação determinar, através de regulagens, o formato das velas, o comandante escolher qual o plano vélico mais apropriado para a condição encontrada e por fim a intervenção do timoneiro, que ao mudar o ângulo do leme, altera o seu ângulo de ataque variando a força lateral do mesmo e conseqüentemente a ponderação no cálculo do centro de aplicação das forças hidrodinâmicas. Apesar disto, muitos autores recomendam métodos geométricos para a determinação do centro de esforços aerodinâmicos e uma média ponderada com as forças em cada componente das obras vivas (casco, leme, bolina/quilha, etc.) para a obtenção do ponto de aplicação dos esforços hidrodinâmicos. Apesar de todas estas variáveis, procura-se simplificar o problema com uma estimativa geométrica para os esforços aerodinâmicos e posiciona-se o centro de esforços hidrodinâmicos sob a mesma vertical através da atuação do leme apenas. Na figura 4.2-C, a título de ilustração, o leme encontra-se com um ângulo  $\beta_{\text{r}}$  além do ângulo de deriva, que resulta em um momento de guinada típico da manobra de orçar, mudando a direção da embarcação.

Do que foi exposto acima pode-se resumir a integração casco-vela como a obtenção da solução das seguintes expressões:

$$FL_{\text{TH}} = FL_{\text{A}} \quad (4.1-A)$$

$$R_{\text{TH}} = E_{\text{A}} \quad (4.1-B)$$

$$M_{\text{EmbA}} = M_{\text{EndE}} \quad (4.1-C)$$

$$M_{\text{TrimA}} = M_{\text{Trime}} \quad (4.1-D)$$

$$M_{\text{GuiA}} = M_{\text{GuiH}} \quad (4.1-E)$$

As equações (4.1-C) a (4.1-E) podem ser escritas como:

$$FL_{\text{A}} \cdot (z_{\text{CA}} + z_{\text{CH}}) = \Delta \cdot GM \quad (4.2-A)$$

$$E_{\text{A}} \cdot (z_{\text{CA}} + z_{\text{CH}}) = MT1 \cdot \text{trim} \quad (4.2-B)$$

$$FL_{\text{A}} \cdot l_{\text{CA}} = l_{\text{CH}} \cdot FL_{\text{TH}} \quad (4.2-C)$$

Onde:

$FL_{TH}$	= Força lateral total hidrodinâmica
$FL_A$	= Força lateral aerodinâmica (na direção do movimento)
$R_{TH}$	= Resistência total hidrodinâmica
$E_A$	= Empuxo aerodinâmico (na direção do movimento)
$M_{EmbA}$	= Momento de emborcamento aerodinâmico
$M_{EndE}$	= Momento de endireitamento estático
$M_{TrimA}$	= Momento de trim aerodinâmico
$M_{TrimE}$	= Momento de trim estático
$M_{GuiA}$	= Momento de guinada aerodinâmico
$M_{GuiH}$	= Momento de guinada hidrodinâmico
$z_{CA}$	= Altura do centro de aplicação dos esforços aerodinâmicos medido a partir da linha de base
$z_{CH}$	= Altura do centro de aplicação dos esforços hidrodinâmicos medido a partir da linha de base
$\Delta$	= Deslocamento leve da embarcação
$GM$	= Altura metacêntrica
$MT1$	= Momento para mudar o trim de uma unidade (estático)
trim	= Diferença de calado entre popa e proa
$l_{CA}$	= Posição longitudinal do centro de esforços aerodinâmicos medida a partir da PPAV
$l_{CH}$	= Posição longitudinal do centro de esforços hidrodinâmicos medida a partir da PPAV

É importante lembrar que as forças aero e hidrodinâmicas atuantes em um veleiro são interdependentes. Ou seja, se por algum motivo a força nas velas for aumentada, haverá um aumento no ângulo de deriva para proporcionar um aumento na força hidrodinâmica, ou se o timoneiro quiser manter o mesmo rumo deverá ajustar o ângulo de leme. Acontecerá também um aumento no ângulo de banda para compensar o



acrécimo no momento de emborcamento. Na verdade as ações são um pouco mais complexas do que apresentadas acima visto acontecerem simultaneamente, mas o resultado final é o mesmo: equilíbrio de forças e momentos.

Da figura 4.1 pode-se obter através de transformações trigonométricas a seguinte relação:

$$\beta_A + \beta = \varepsilon_H + \varepsilon_A \quad (4.3)$$

Onde:

$\beta_A$  = ângulo entre o vento aparente e a linha de centro do veleiro.

$\beta$  = ângulo de deriva.

$\varepsilon_H$  = ângulo hidrodinâmico de arrasto no plano horizontal. Definido como:  $\arctan(R_{TH}/FL_{TH})$ .

$\varepsilon_A$  = ângulo aerodinâmico de arrasto no plano horizontal. Definido como:  $\arctan(R_{TA}/FL_{TA})$ .

$R_{TA}$  = Resistência total aerodinâmica

Estas equações são muito utilizadas em modelos matemáticos e expressam a interdependência entre as forças de resistência e lateral aero e hidrodinâmicas, podendo servir de prova real para a constatação da correta integração de forças.

#### 4.1. MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO

A partir das equações 4.1 e 4.2 pode-se desenvolver uma metodologia para gerar um modelo matemático que obtenha o equilíbrio necessário entre forças e momentos para se efetuar a integração casco-vela. Alguns modelos sugeridos por OOSSANEN (1993) e MILGRAM (1971) serão reproduzidos aqui a título de ilustração, visto existirem diversos caminhos para a obtenção da integração, podendo o engenheiro desenvolver sua própria metodologia ou apenas adaptando as já conhecidas para seu modelo matemático ou para condições mais específicas. A complexidade do modelo reside no fato de que as grandezas envolvidas (velocidade, ângulo de banda e deriva) são

interdependentes, enquanto as equações de equilíbrio (equações de forças e momentos) são calculadas individualmente. Desta maneira o processo geralmente é realizado de forma interativa, baseado em valores iniciais que vão sendo atualizados a medida em que as equações de equilíbrio vão sendo satisfeitas.

O objetivo principal da integração é obter a velocidade da embarcação, seu ângulo de deriva e banda e sua velocidade ótima em relação ao vento. Porém outros dados poderão ser gerados, como a melhor vela para uma determinada condição de vento, máxima área vélica admissível em função do ângulo de banda, trim, forças atuantes em cada elemento das obras vivas entre outros, bastando para isto que o usuário desenvolva códigos mais complexos a partir dos aqui apresentados.

Pode-se perceber que cada método têm suas particularidades e procura levar em conta determinados aspectos da integração casco-vela. O interesse em desenvolver um método próprio vem justamente de se ter maior controle sobre os aspectos que o engenheiro julgar mais importantes.

#### **4.1.1. 1º Método de Oossanen**

O primeiro método a ser enfocado é um dos métodos sugeridos por VON OOSSANEN (1993) e é também um dos mais utilizados. Neste método as forças hidrodinâmicas são obtidas em função das aerodinâmicas calculadas nos primeiros passos do fluxograma. A partir de um determinado valor de velocidade e direção do vento obtém-se as forças de empuxo e lateral aerodinâmica e através de laços interativos encadeados (vide o fluxograma da figura 4.3) busca-se a obtenção dos valores do ângulo de banda, da velocidade da embarcação e do ângulo de deriva individualmente, voltando ao começo do laço para a atualização destas grandezas. O processo passo-a-passo para este modelo é apresentado a seguir:

1. Entrada dos parâmetros que descrevem o casco, quilha, leme, bolina, plano vélico e tripulação.



2. Especificação da velocidade real do vento e sua direção.
3. Adoção dos valores iniciais para a velocidade, ângulo de banda e ângulo de deriva.
4. Cálculo, a partir do triângulo de velocidades, do vento aparente e seu ângulo de incidência.
5. Cálculo das forças de sustentação e arrasto aerodinâmicas e suas componentes no sentido do movimento e perpendicular a ele.
6. Obtenção do momento de emborcamento a partir da força lateral aerodinâmica.
7. Cálculo do ângulo de banda com o auxílio do momento de endireitamento obtido através da análise da estabilidade estática da embarcação.
8. Se o ângulo de banda obtido não for igual ao inicialmente adotado os passos de 4 a 7 deverão ser repetidos, visto o momento de emborcamento ser função do ângulo de banda.
9. Cálculo da velocidade da embarcação cuja resistência total ao avanço seja igual ao valor do empuxo aerodinâmico calculado anteriormente.
10. Se a velocidade encontrada diferir da adotada no passo 3 deve-se retornar ao passo 4 e reiniciar o processo visto todas as grandezas inicialmente calculadas serem função da velocidade.
11. Cálculo do ângulo de deriva que gere uma força lateral total hidrodinâmica de igual valor a força lateral aerodinâmica.
12. Se os ângulos de deriva inicial e final não forem compatíveis deve-se repetir os passos 4 até 11 .
13. Após a convergência ser obtida um novo valor de ângulo de aproamento ou da velocidade do vento são calculados voltando-se ao passo 2.
14. Finalmente pode-se desenhar na tela o diagrama polar de velocidades e imprimir um arquivo com os dados de saída de interesse do usuário.

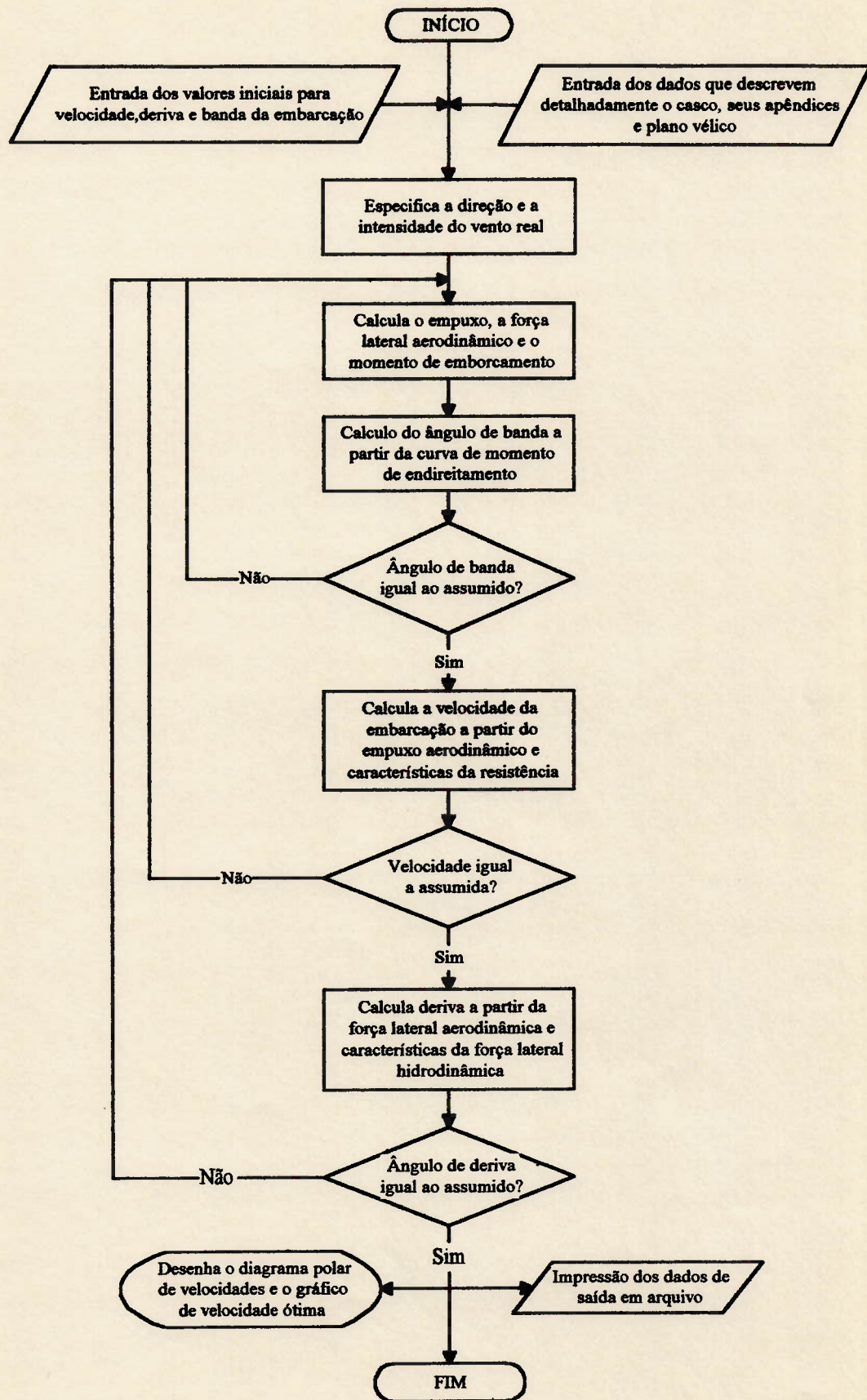


Figura 4.3: Integração Casco-Vela (1º Modo de Oossanen)



#### 4.1.2. 2º Método de Oossanen

O segundo processo adotado por OOSSANEN (1993), e que ele adota em seu VPP, difere bastante do primeiro. Neste segundo método parte-se das forças hidrodinâmicas para se obter as forças aerodinâmicas e conseqüentemente o ângulo e velocidade do vento aparente e num último estágio o vetor vento real.

A principal vantagem neste método é a rapidez, visto o cálculo das forças hidrodinâmicas ser efetuado apenas uma vez, gerando uma matriz de forças em função da velocidade e do ângulo de deriva que é consultada sempre que preciso. A partir da resultante hidrodinâmica e da velocidade da embarcação chega-se facilmente aos valores das forças aerodinâmicas envolvidas no equilíbrio da embarcação. A resultante aerodinâmica por sua vez permite o cálculo do vetor vento aparente e conseqüentemente do vento real para aquela condição de deriva e velocidade.

O autor justifica a mudança de enfoque no fato de que neste segundo método as forças hidrodinâmicas têm um papel mais central no cálculo, o que resulta em uma situação mais favorável no modelo matemático visto as forças hidrodinâmicas serem mais conhecidas que suas similares aerodinâmicas.

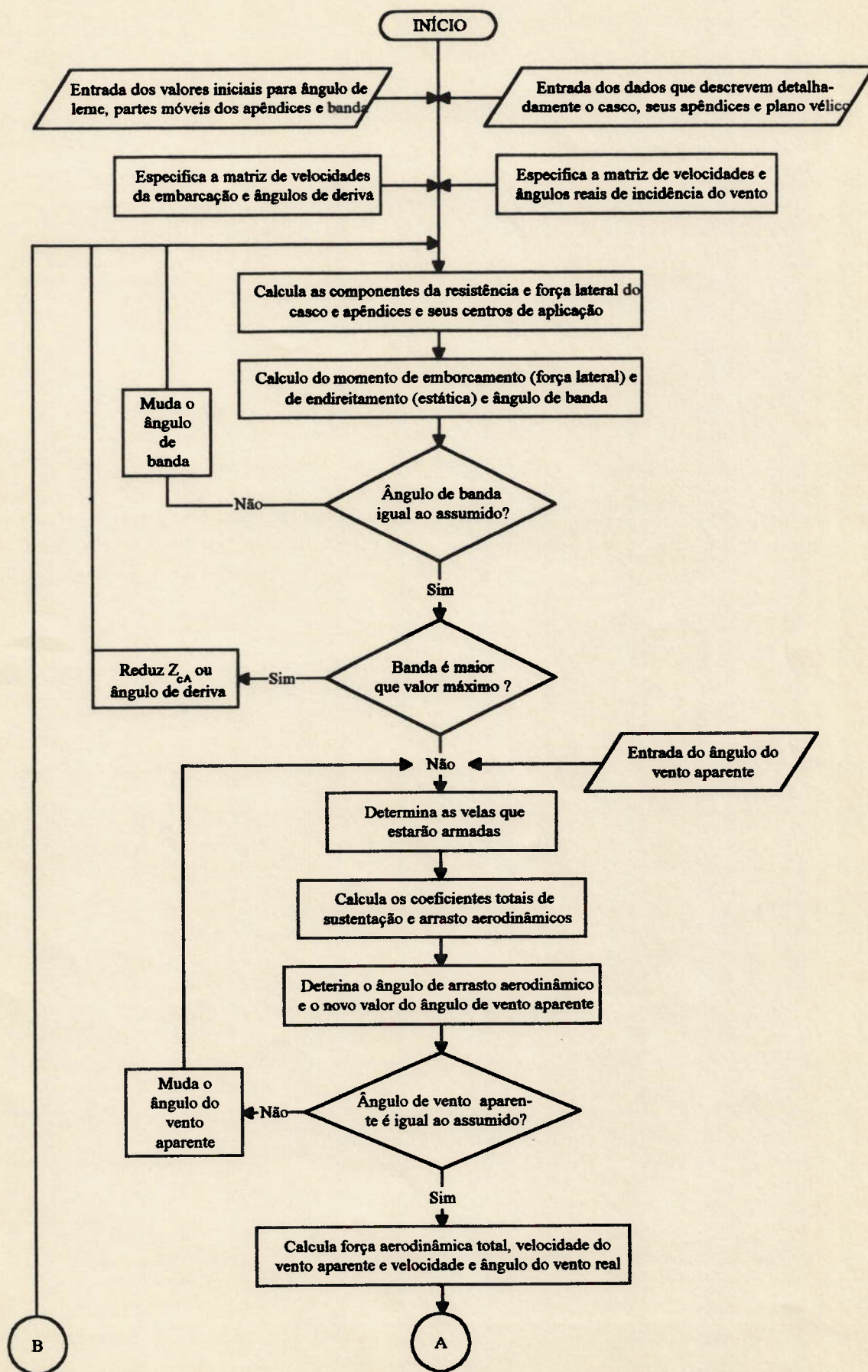
O fluxograma da figura 4.4 apresenta a metodologia descrita sucintamente acima e traz um refinamento que é a procura de um ângulo de leme que equilibre a embarcação no seu plano horizontal. Muitos métodos de integração não utilizam o leme como um apêndice móvel em seus modelos, partindo do princípio que o posicionamento da quilha em relação ao velame já forneça intrinsecamente o equilíbrio, ou que o comandante, a partir de uma escolha de velas, atua sobre o posicionamento do centro de esforço aerodinâmico evitando uma tendência mais acentuada de orçar ou arribar do veleiro. Este mesmo fluxograma é apresentado passo a passo a seguir:

1. Entrada dos parâmetros que descrevem o casco, quilha, leme, bolinas, plano vélico e tripulação.

2. Adoção de valores iniciais para o ângulo do leme, partes móveis dos apêndices ("flap" do leme e da quilha) e ângulo de banda.
3. Especificação da matriz de velocidades e ângulos de deriva que acredita-se a embarcação desenvolverá na faixa de ventos a ser estudada.
4. Especificação da matriz com os valores de vento real (intensidade e direção).
5. Cálculo da resultante hidrodinâmica e suas componentes de uma maneira direta (sem interações) a partir da matriz de velocidades e deriva do veleiro.
6. Cálculo do momento de emborcamento baseado na força lateral total hidrodinâmica, e obtenção do ângulo de banda a partir da curva de momento de endireitamento.
7. Repete-se os passos 5 e 6 caso o ângulo de banda encontrado não seja o mesmo que foi inicialmente adotado.
8. No caso do equilíbrio ocorrer para uma banda muito acentuada (por exemplo, maior que trinta graus) pode-se adotar duas medidas: a redução do velame através do rizo (redução da área e da altura do centro de aplicação dos esforços) ou trocando-se as velas (diminuição apenas da área). Dentro do modelo matemático o primeiro caso reflete-se numa diminuição do braço de emborcamento, enquanto no segundo caso recorre-se a uma diminuição do ângulo de deriva. Feitas estas modificações retorna-se ao passo 5.
9. Neste ponto do modelo já se tem a resultante hidrodinâmica para todas as condições de navegação que possivelmente o veleiro encontrará. Passa-se então a obtenção dos ventos aparentes que ocasionariam a matriz de velocidade e deriva. Isto acontece segundo um método iterativo cujo primeiro passo é a adoção de um valor inicial para o vento aparente.
10. A partir do ângulo de vento aparente pode-se determinar que tipo de velas serão envergados: balão para ventos largos ou genoa para ventos mais orçados.
11. Cálculo dos coeficientes aerodinâmicos totais (sustentação e arrasto).
12. Cálculo do ângulo de arrasto aerodinâmico e hidrodinâmico e do novo valor do ângulo de vento aparente com o auxílio da equação 4.3.



13. No caso do vento aparente calculado não ser o mesmo que o anteriormente adotado retorna-se ao item 10.
14. De posse do ângulo de vento aparente, velocidade da embarcação e deriva pode-se obter através do triângulo de velocidades o valor da intensidade do vento aparente e do vento real. Pode-se calcular as forças aerodinâmicas também.
15. Determina-se um ângulo de leme que equilibre o momento de guinada no plano horizontal.
16. Caso o ângulo do leme não seja igual ao adotado deve-se retornar ao começo do processo no passo 5 visto a resultante hidrodinâmica variar sensivelmente com esta grandeza.
17. Uma vez que todas as convergências tenham sido obtidas, têm-se uma matriz com os valores de interesse (velocidade do veleiro, deriva, banda, velocidade ótima, condições do velame) e uma segunda matriz com os ângulos e intensidade de vento real relacionada com a primeira. A partir desta segunda matriz pode-se obter as grandezas para as condições de vento real inicialmente impostas (passo 4) através de interpolação.
18. Passa-se então para a gravação de um arquivo de saída e confecção do diagrama polar de velocidades.





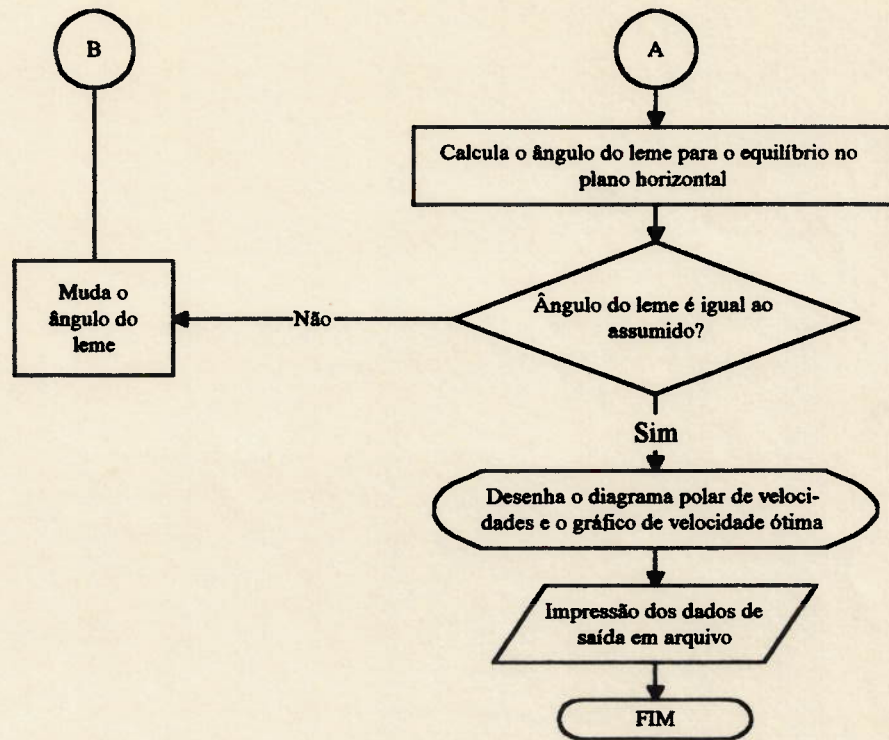


Figura 4.4: Integração Casco-Vela (2º Modo de Oossanen)

#### 4.1.3. Método de Milgram

O último dos métodos aqui apresentados é o sugerido por MILGRAM (1971) em sua série de velas e assemelha-se ao 2º método de OOSSANEN (1993) no sentido de evitar muitos laços iterativos. O método basicamente calcula de uma maneira direta os valores da resultante hidrodinâmica para uma matriz de valores de velocidade e deriva. A integração é feita calculando-se a resultante aerodinâmica para um valor do par velocidade/deriva da embarcação e buscando-se, a partir de um valor da resultante aerodinâmica, os ângulos de deriva que igualem a força lateral e o empuxo. Se estes ângulos não coincidirem é realizada uma mudança na velocidade. Os valores são encontrados por interpolação com a matriz de resultantes hidrodinâmicas.

Para cada valor do par intensidade/direção do vento real pode-se representar a procura do ângulo de deriva pelo gráfico da figura 4.5, onde observa-se para cada valor da velocidade os dois ângulos de deriva, um que iguala a força lateral e outro que iguala a resistência ao avanço. A convergência é obtida à medida que se aumenta a velocidade.

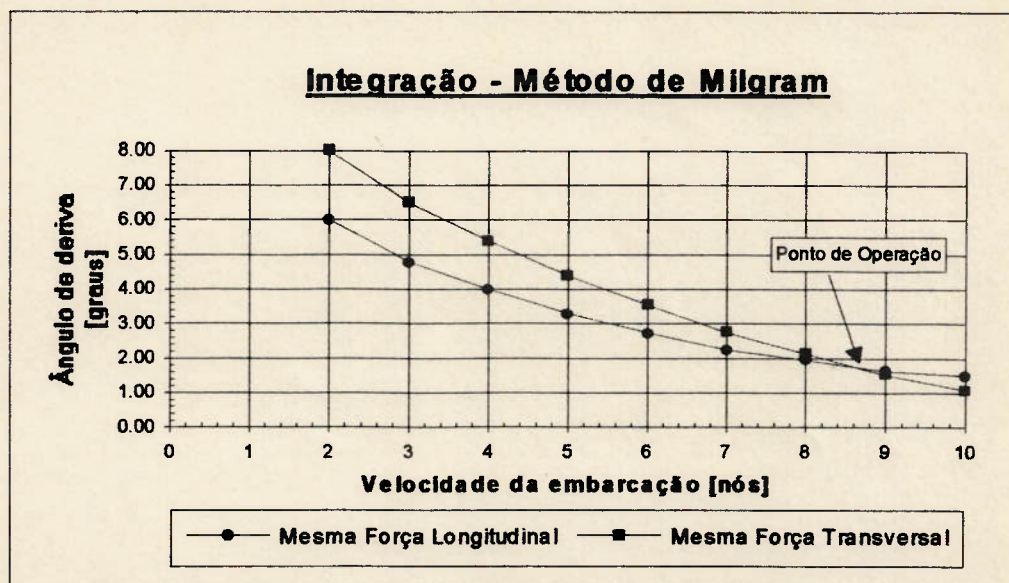


Figura 4.5: Exemplo de Gráfico de Integração Utilizado por Milgram

Descreve-se a seguir passo-a-passo o fluxograma da figura 4.6:

1. Entrada dos parâmetros que descrevem o casco, quilha, leme, bolina, plano vélico e tripulação.
2. Especificação da matriz de velocidades e ângulos de deriva que acredita-se a embarcação irá desenvolver.
3. Para cada valor do par velocidade/deriva determina-se a força lateral, momento de emborcamento, momento de endireitamento e consequentemente o ângulo de banda.
4. Cáculo da resistência de onda, atrito, induzida (a partir da força lateral) e total do casco e apêndices para cada valor de velocidade e deriva.
5. Especificação da matriz com os valores de intensidade e ângulo de incidência do vento real.
6. Adoção do primeiro valor de velocidade para dar início a integração.
7. Para a velocidade inicialmente adotada determina-se vetor vento aparente a partir do triângulo de velocidades.
8. Calculo da resultante hidrodinâmica e suas componentes no sentido do movimento e perpendicular a ele.



9. Determinação através da matriz de forças hidrodinâmicas de um primeiro ângulo de deriva  $\gamma_1$  que equilibre a força transversal ao movimento.
10. Determinação através da matriz de forças hidrodinâmicas de um segundo ângulo de deriva  $\gamma_2$  que equilibre a força no sentido do movimento.
11. Enquanto os valores de  $\gamma_1$  e  $\gamma_2$  forem diferentes deve-se repetir os passos 6 a 10.
12. Em função do ângulo de deriva é determinado o ângulo de banda por interpolação.
13. Os passos 5 a 11 devem ser repetidos para cada valor do vetor velocidade real do vento.
14. Impressão dos dados de saída e construção do diagrama polar de velocidade.

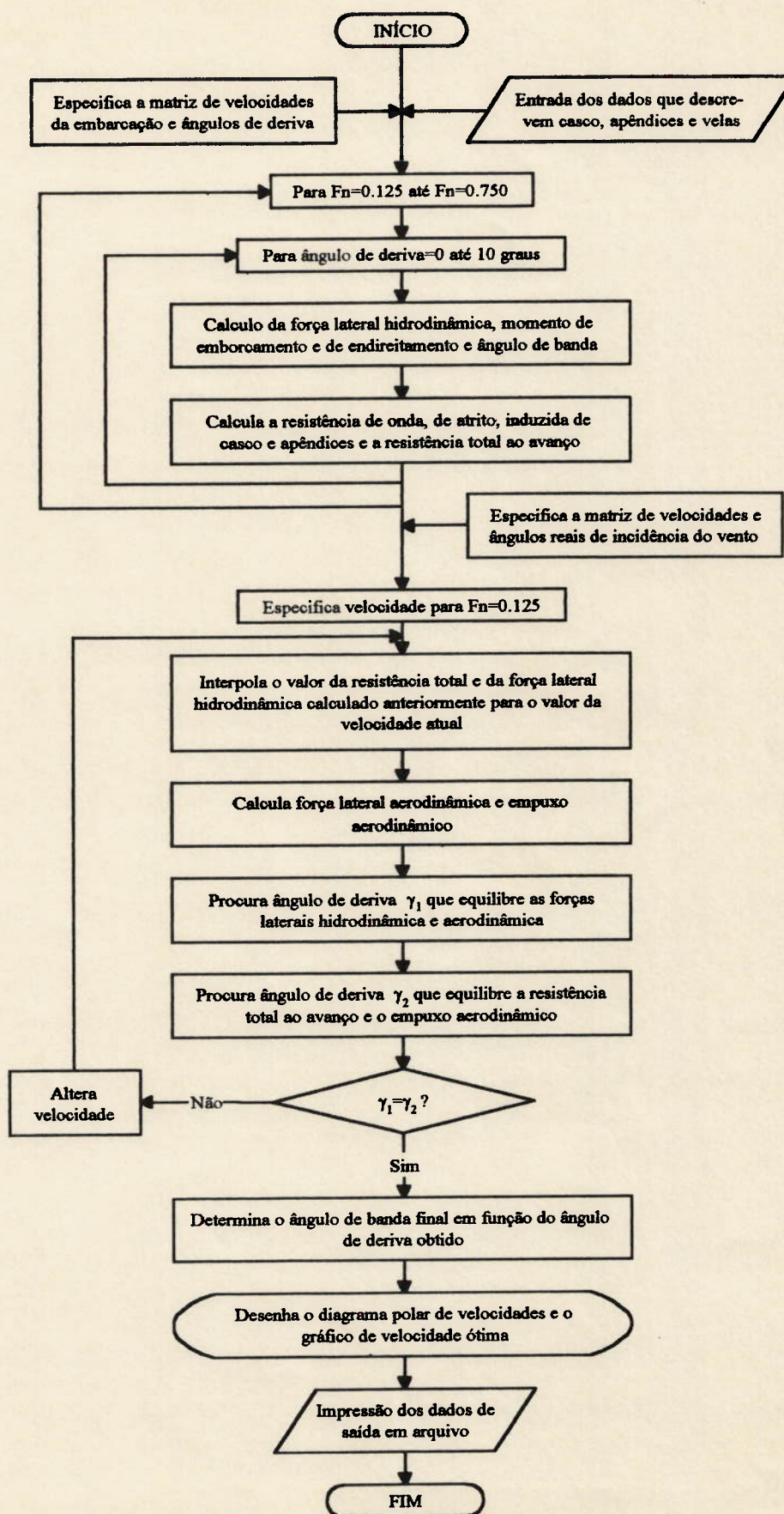


Figura 4.6: Integração Casco-Vela (Método de Milgram)



## 5. FORÇAS AERODINÂMICAS

A determinação das forças aerodinâmicas atuantes sobre as velas da embarcação apresenta muitas dificuldades quando comparada com a determinação das forças hidrodinâmicas. Isto se deve principalmente a três fatores:

O primeiro fator está relacionado com a dificuldade em se reproduzir em escala a rugosidade e outras propriedades (como elasticidade) do material de que são feitas as velas, propriedades estas que influem no cálculo da resistência e da sustentação, uma vez que alteram o formato da vela e conseqüentemente o escoamento e o campo de pressões desenvolvido pelo vento.

O segundo fator está relacionado ao descolamento do fluxo. Quando a embarcação está orçando, com as velas perfeitamente reguladas, gerando um alto coeficiente de sustentação ou quando está em popa rasa, atuando no que se convencionou chamar modo de arrasto, há uma considerável separação do escoamento em relação às velas. Como em ensaios de túnel de vento não é possível atingir-se números de Reynolds equivalentes aos obtidos em escala real, e visto que o fenômeno de descolamento está intimamente ligado a este adimensional, os resultados advindos destes experimentos não apresentam a precisão desejada.

Por fim, o último fator a dificultar a determinação das forças atuantes no velame é de ordem prática. A interação entre velas é dependente de muitas variáveis, entre outras as superposições (entre genoa e mestra ou mestra e balão), a distância entre elas, o ângulo em relação ao vento, a regulagem (o quanto a vela se apresenta "gorda" ou "chata" na valuma ou na testa), e que são praticamente impossíveis de serem reproduzidos fielmente em túneis de vento.

Alguns trabalhos práticos, baseados em ensaios em túnel de vento e medições em escala real (coeficientes da IMS), e outros teóricos como a série de MILGRAM (1971),

que serão enfocados como alternativas neste trabalho, têm sido desenvolvidos, porém nenhum destes esforços têm-se refletido conclusivo. No entanto estes trabalhos fornecem um valor razoável da sustentação e do arrasto gerados pelo velame, considerando que as velas estejam sempre atuando em seus ótimos ângulos de aproamento e regulagem durante todo o tempo. Desta maneira não necessariamente o velame em escala real desenvolverá as forças previstas, mas assume-se no modelo que a embarcação esteja navegando com todo o seu potencial de velocidade.

Antes de focar a composição de forças aerodinâmicas e como obtê-las, necessita-se definir algumas variáveis importantes para a determinação das mesmas, como o vento aparente (calculado através do triângulo de velocidades), o cálculo das áreas e centros de esforços e fatores geométricos que influem na qualidade do escoamento e conseqüentemente no valor das forças desenvolvidas.

### **5.1. TRIÂNGULO DE VELOCIDADES**

Devido a velocidade desenvolvida pela embarcação, o vento que incide sobre o velame não é apenas o vento que estiver atuando naquele ambiente (chamado de vento verdadeiro), mas sim uma combinação vetorial entre as duas velocidades (do barco e do vento) que resultará em um vetor chamado vento aparente, como pode ser visto na figura 5.1. A disposição geométrica destes três vetores, velocidade do barco, velocidade verdadeira do vento e velocidade aparente do vento é chamado de triângulo de velocidades.

Na determinação das forças aerodinâmicas é fundamental o conhecimento da intensidade e direção da velocidade aparente, o que pode ser obtido através de transformações trigonométricas a partir das grandezas conhecidas como a velocidade e deriva da embarcação e velocidade e ângulo de aproamento do vento verdadeiro. As equações 5.1 e 5.2 apresentam os valores de velocidade e ângulo do vento aparente atuando no centro de esforço das forças aerodinâmicas:



$$V_A = \sqrt{(V_V \cdot \sin(\beta_V) \cdot \cos(\phi))^2 + (V_V \cdot \cos(\beta_V) + V_B)^2} \quad (5.1)$$

$$\beta_A = \text{ArcTan} \left( \frac{V_V \cdot \sin(\beta_V) \cdot \cos(\phi)}{V_V \cdot \cos(\beta_V) + V_B} \right) \quad (5.2)$$

Onde:

- $V_A$  = Intensidade do vento aparente.  
 $V_V$  = Intensidade do vento real.  
 $V_B$  = Velocidade da embarcação.  
 $\beta_A$  = Ângulo de incidência do vento aparente medido a partir da linha de centro da embarcação.  
 $\beta_V$  = Ângulo de incidência do vento real medido a partir da linha de centro da embarcação.  
 $\phi$  = Ângulo de banda da embarcação.

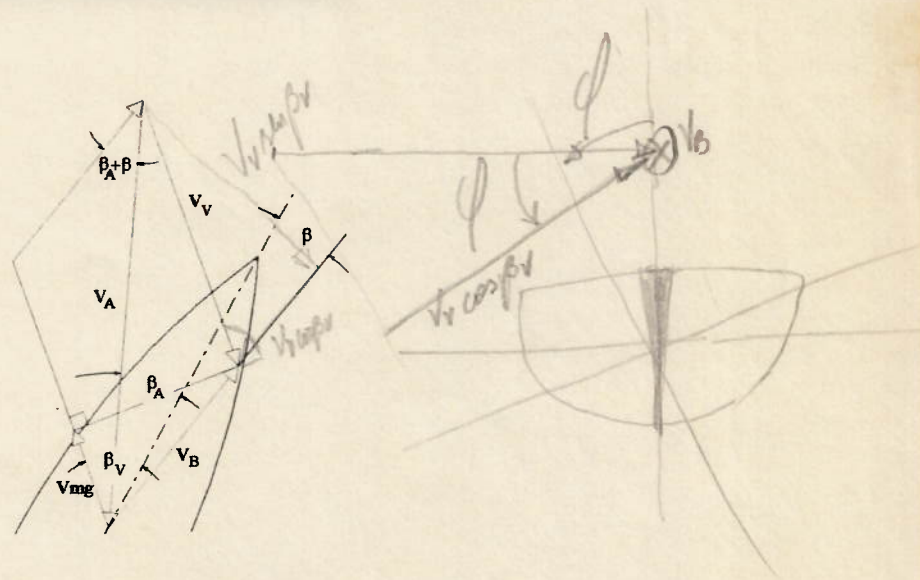


Figura 5.1: Triângulo de Velocidades

A figura 5.1 representa o triângulo de velocidades em um plano horizontal. Porém como se deseja obter o vento aparente na direção em que a resultante aerodinâmica irá atuar, surge o coseno do ângulo de banda nas equações acima, decompondo a velocidade aparente naquela direção.

Além do cálculo da velocidade aparente o triângulo de velocidades ajuda a definir uma outra grandeza que é a velocidade ótima da embarcação em relação ao vento. Esta grandeza indica qual a velocidade real da embarcação na direção do vento.

$$V_{mg} = V_B \cdot \cos(\beta_v + \beta \cdot \cos(\phi)) \quad (5.3)$$

A velocidade ótima ("speed made good"), é uma importante ferramenta de análise do rendimento da embarcação nas pernas de empopada ou contravento de uma regata (ou nas mesmas mareações para uma embarcação de cruzeiro) pois indica a real velocidade com que a embarcação se dirige à próxima bóia a ser montada.

## 5.2. FATORES GEOMÉTRICOS

No modelo aerodinâmico sugerido pela IMS, além do cálculo dos coeficientes de resistência e sustentação, são necessárias correções no valor destes coeficientes em função de alguns fatores ligados a geometria adotada no velame da embarcação. Estes fatores são basicamente três: superposição das velas, interferência no rendimento da vela grande em mastreações fracionadas e diminuição da razão de aspecto efetiva da genoa em função da diminuição da mesma e conseqüentemente da sua separação do convés (que deixa de atuar como uma placa terminal).

A IMS também sugere algumas formulações para o cálculo das áreas das velas e seus centros de esforços. Além desta metodologia também serão apresentadas as de MARCHAJ (1982) e OOSSANEN (1993) para o cálculo do centro de esforço aerodinâmico a partir da sua geometria.



## 5.2.1. Áreas e Centros de Esforços

### 5.2.1.1. Formulações da IMS

O cálculo para as áreas das velas baseia-se na geometria das mesmas com algumas pequenas modificações, enquanto a posição vertical dos centros de pressão de cada uma delas é adotada fixa e sugerida em função do comprimento da testa da vela.

Na vela grande por exemplo preferiu-se calcular a área dividindo-a em três trapézios, um a meia altura e outro a  $3/4$  da altura total da vela mestra como pode ser visto na figura 5.2. Além disto na integração da área não se usou o comprimento da corda da vela nestas posições mas sim o seu contorno ("girth"). Este cuidado deve-se a uma tendência de se ter a valuma da vela principal cada vez maior o que é possível com o auxílio de talas. São as modernas velas taladas ("full-batten").

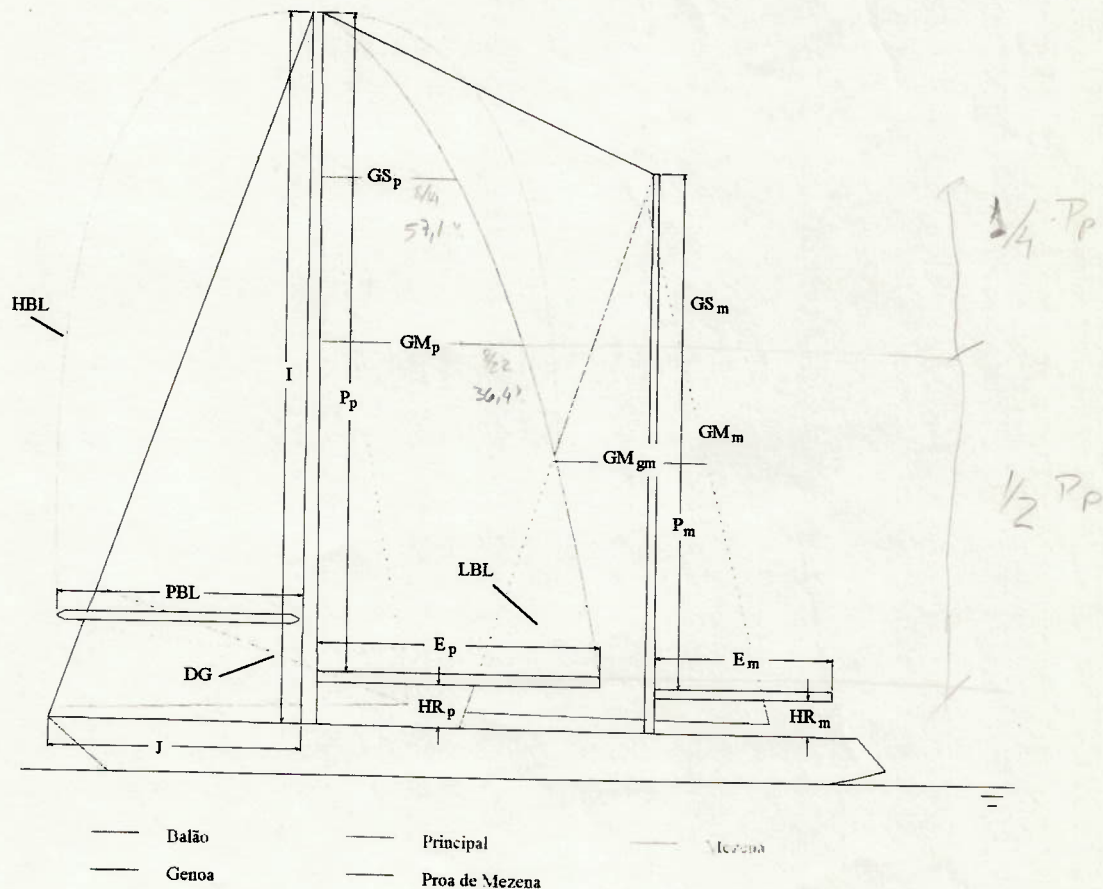


Figura 5.2: Nomenclatura Adotada Para o Plano Véllico

Já no caso do balão a área foi considerada como 73% da área de um retângulo com as dimensões da esteira e da valuma desta vela.

As velas genoa e buja foram tratadas como triângulos enquanto a vela de proa de mezena foi dividida em dois trapézios, com a base a meia altura da esteira da mesma. Calcula-se ainda a área do triângulo de proa e a área normalizada, que será usada como referência nos cálculos das forças aerodinâmicas, que é a soma da área do triângulo de vante com as áreas da vela principal e de mezena.

$$A_b = 0.73LBL \cdot HBL \quad (5.4)$$

$$A_g = \frac{(\sqrt{I^2 + J^2}) \cdot DG}{2} \quad (5.5)$$

$$A_p = \left( \frac{P_p}{2} \cdot \frac{(E_p + GM_p)}{2} + \frac{P_p}{4} \cdot \frac{(GS_p + GM_p)}{2} + \frac{P_p}{4} \cdot \frac{GS_p}{2} \right) \quad (5.6)$$

$$A_{gm} = P_{gm} \cdot \frac{(2GM_{pm} + E_{gm})}{4} \quad (5.7)$$

$$A_m = \left( \frac{P_m}{2} \cdot \frac{(E_m + GM_m)}{2} + \frac{P_m}{4} \cdot \frac{(GS_m + GM_m)}{2} + \frac{P_m}{4} \cdot \frac{GS_m}{2} \right) \quad (5.8)$$

$$A_{\Delta} = \frac{(I \cdot J)}{2} \quad (5.9)$$

$$A_N = A_{\Delta} + A_p + A_m \quad (5.10)$$

Onde:

- $A_b$  = Área do balão
- $LBL$  = Comprimento da esteira do balão
- $HBL$  = Comprimento da testa/valuma do balão
- $PBL$  = Comprimento do pua do balão
- $A_g$  = Área da genoa
- $DG$  = Diagonal da genoa, distância do punho da vela até a testa



- $I$  = Altura do triângulo de proa (distância do convés ao estai de proa medido junto ao mastro)  
 $J$  = Comprimento da base do triângulo de proa (distância do pé do estai de proa ao pé do mastro)  
 $A_p$  = Área da vela mestra principal  
 $P_p$  = Altura da testa da vela mestra principal  
 $E_p$  = Comprimento da esteira da vela mestra principal  
 $GS_p$  = Valor do contorno superior da vela mestra principal tomado a  $3/4$  de  $E_p$   
 $GM_p$  = Valor do contorno médio da vela mestra principal tomado a  $1/2$  de  $E_p$   
 $A_{gm}$  = Área da genoa de mezena  
 $P_{gm}$  = Altura da testa da vela de proa de mezena  
 $GM_{gm}$  = Valor do contorno médio da vela de proa de mezena tomado a  $1/2$  de  $P_{gm}$   
 $E_{gm}$  = Comprimento da esteira da vela de proa de mezena  
 $A_m$  = Área da vela de mezena  
 $P_m$  = Altura da testa da vela de mezena  
 $E_m$  = Comprimento da esteira da vela de mezena  
 $GS_m$  = Valor do contorno superior da vela de mezena tomado a  $3/4$  de  $E_m$   
 $GM_m$  = Valor do contorno médio da vela de mezena tomado a  $1/2$  de  $E_m$   
 $A_{\Delta}$  = Área do triângulo de proa  
 $A_N$  = Área normalizada

Os centros de esforços recomendados pela IMS são dados em função da envergadura de cada vela conforme as equações (5.11) a (5.16) . No caso das velas

principal e mezena acrescentou-se o valor da altura da retranca de modo que todos os centros de esforços tivessem como referência o convés.

$$z_b = 0.59I \quad (5.11)$$

$$z_g = 0.39I \quad (5.12)$$

$$z_p = 0.39P_p + HR_p \quad (5.13)$$

$$z_{gm} = 0.39P_m + HR_m \quad (5.14)$$

$$z_m = 0.39P_m + HR_m \quad (5.15)$$

*con travessa*

$$z_{cA} = \frac{z_g \cdot A_g + z_p \cdot A_p + z_{gm} \cdot A_{gm} + z_m \cdot A_m}{A_g + A_p + A_{gm} + A_m} \quad (5.16-A)$$

*balão*

$$z_{cA} = \frac{z_b \cdot A_b + z_p \cdot A_p + z_{gm} \cdot A_{gm} + z_m \cdot A_m}{A_b + A_p + A_{gm} + A_m} \quad (5.16-B)$$

Onde:

- $z_b$  = Posição vertical do centro de esforços da vela balão
- $z_g$  = Posição vertical do centro de esforços da genoa
- $z_p$  = Posição vertical do centro de esforços da vela mestra principal
- $z_{gm}$  = Posição vertical do centro de esforços da vela de proa de mezena
- $z_m$  = Posição vertical do centro de esforços da vela de mezena
- $HR_p$  = Altura da retranca da vela mestra principal
- $HR_m$  = Altura da retranca da vela de mezena

Para a obtenção do valor do centro de esforços aerodinâmicos total,  $z_{cA}$ , pode-se realizar uma média ponderada como indica as equações (5.16-A) e (5.16-B), sendo a primeira para a configuração de contravento e a segunda para ventos largos, quando se utiliza o balão.



Já para o cálculo do fator de interferência devido a sobreposição de velas é necessário calcular algumas frações de área, ou seja a relação entre as áreas de duas velas que irão se sobrepor. O cálculo das frações de área é apresentado a seguir nas equações (5.17) à (5.21).

$$F_g = \frac{A_g - \text{Min}(A_g, A_{\Delta})}{A_g} \quad (5.17)$$

$$F_b = \text{Min}\left(\frac{A_p}{A_b}, \left(1 - 1.488 \frac{\text{PBL}}{\text{LBL}}\right)\right) \quad (5.18)$$

$$F_m = \frac{A_{gm}}{A_p} \quad (5.19)$$

$$F_{gm} = \frac{A_m}{A_{gm}} \quad (5.20)$$

$$F_{pt} = \text{Min}\left(1, \frac{A_g}{A_{\Delta}}\right) \quad (5.21)$$

Onde:

$F_g$  = Fração de área entre a área da genoa e a área do triângulo de vante

$F_b$  = Fração de área entre a vela mestra e o balão

$F_m$  = Fração de área entre a genoa de mezena e a vela mestra

$F_{gm}$  = Fração de área entre a área da vela de mezena e a vela de proa de mezena

$F_{pt}$  = Relação entre a área da genoa e do triângulo de vante

PBL = Comprimento do pau do balão

$\text{Min}(a,b)$  = Função matemática que retorna o menor valor entre  $a$  e  $b$

É interessante notar que a fração de área não é apenas uma relação entre as áreas, mas também leva em conta o posicionamento das velas, como ocorre quando se compara a genoa ao triângulo de vante e a mestra ao comprimento do pau do balão.

### 5.2.1.2. Método Geométrico

O método geométrico não difere muito do sugerido pela IMS no que diz respeito ao cálculo da área vélica. Porém, no que concerne a obtenção do centro de esforços ele se baseia na disposição das velas e seus tamanhos. Sua grande vantagem é de sugerir não só a posição vertical do centro vélico mas também a posição longitudinal do mesmo.

Utilizando a figura 5.3 como auxílio pode-se enumerar passos para a obtenção do centro vélico.

- Embarcações de um mastro:

1. Traça-se uma reta a partir do tope do mastro dividindo a base do triângulo de proa ao meio.
2. Traça-se uma segunda reta a partir do bico de proa dividindo o trecho do pé do mastro até o fim do estai de proa em duas partes iguais.
3. Determina-se o centro de aplicação dos esforços aerodinâmicos para o triângulo de proa como a intersecção destas duas retas.
4. Traça-se uma reta do tope do mastro dividindo a esteira da vela mestra ao meio.

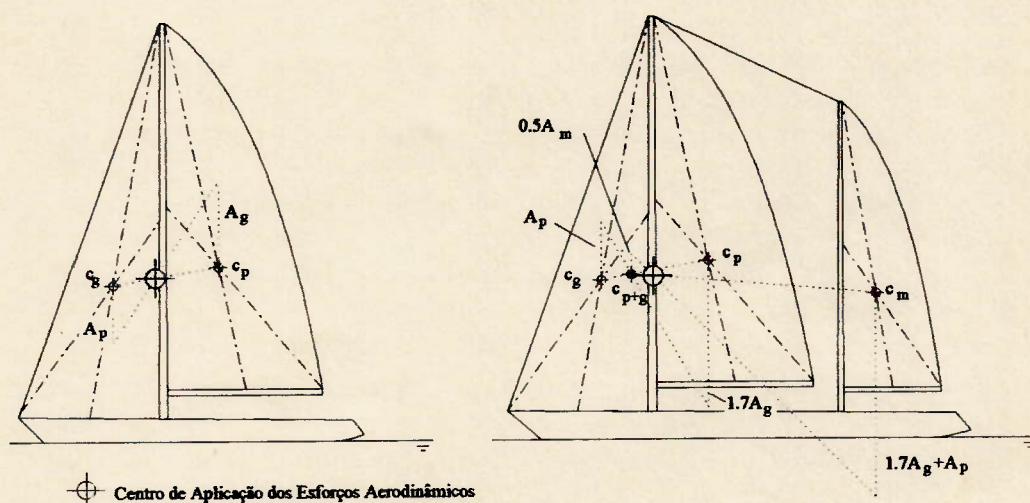


Figura 5.3: Método Geométrico Para Obtenção do Centro de Esforços Aerodinâmicos

5. Traça-se outra reta dividindo a testa da vela mestra ao meio a partir do punho de sotavento.



6. Determina-se o centro de esforços aerodinâmicos da vela mestra como a intersecção destas duas últimas retas.
  7. Traça-se uma reta vertical para baixo com o valor da área da vela grande a partir do centro de esforços aerodinâmicos do triângulo de proa.
  8. Traça-se uma reta vertical para cima com o valor da área do triângulo de proa a partir do centro de esforços aerodinâmicos da vela grande.
  9. Traça-se uma terceira reta unindo as extremidades das duas anteriores.
  10. Traça-se uma quarta reta unindo os dois centros de esforços de cada vela.
  11. Determina-se o centro de esforços aerodinâmicos do velame como a intersecção entre as duas retas anteriores.
- Embarcações com dois mastros:
    1. Repete-se os passos de 1 a 6 do procedimento para embarcações com um mastro para o mastro principal.
    2. Traça-se uma reta vertical para cima com o valor da área da vela mestra a partir do centro de esforços do triângulo de proa.
    3. Traça-se uma reta vertical para baixo com o valor 70% maior da área do triângulo de proa a partir do centro de esforços aerodinâmicos da vela principal.
    4. Determina-se o centro de esforços aerodinâmicos do mastro de vante pela intersecção destas últimas duas retas.
    5. Repete-se os passos 4, 5 e 6 do procedimento para embarcações com um mastro para o mastro de mezena.
    6. Traça-se uma reta vertical para cima com 50% do valor da área da vela de mezena a partir do centro de aplicação dos esforços para o mastro principal.
    7. Traça-se uma reta com o valor da soma das áreas da vela mestra e 170% da área do triângulo de proa a partir do centro de esforços da vela de mezena.
    8. Traça-se uma reta unindo as extremidades das duas anteriores.
    9. Traça-se uma reta unindo os centros vélicos do mastro de vante e da vela de mezena.

10. Determina-se o centro de aplicação dos esforços aerodinâmicos na intersecção das duas últimas retas.

A justificativa para a multiplicação da área da vela de mezena por 0.5, no passo 6, vem do fato de esta vela ter um rendimento baixo em função das perturbações impostas pelo velame do mastro principal no escoamento.

Esta metodologia pode parecer a primeira vista pouco precisa, mas ela foi obtida de modo empírico e tanto OOSSANEN (1985) quanto MARCHAJ (1982) e GERRITSMA (1981) a recomendam em seus trabalhos.

A adoção do centro vélico fixo independentemente da mareação e da velocidade do vento bem como do centro de esforços hidrodinâmicos é uma simplificação resultado da dificuldade em determiná-los em ventos que não sejam os de proa.

Esta simplificação é razoável pois o centro de esforços hidrodinâmicos apresenta uma variação muito pequena em seu posicionamento em função da mareação sendo a atuação do leme a principal responsável por esta alteração. Do ponto de vista aerodinâmico, a posição do centro de esforços é mais dependente do ângulo de incidência do vento. Entretanto, para ventos largos, onde o  $l_{CA}$  atinge a posição mais distante daquela determinada geometricamente, a força lateral é pequena, minimizando o efeito do momento de guinada e conseqüentemente a imprecisão na determinação da posição longitudinal dos centros de esforços.

No que se refere a posição vertical do centro de esforços, ela praticamente não se altera nas diferentes condições de navegação (enquanto não ocorrer o rizo das velas).

### **5.2.2. Fator de Interferência**

A superposição de velas é uma prática comum no projeto de veleiros. Procura-se desta maneira gerar uma área vélica maior ao mesmo tempo em que se enfatiza o "efeito de chaminé" (redirecionamento do fluxo de vento da região de barlavento da vela mais a proa para a região de sotavento da vela mais a popa). Desta maneira o ponto de



descolamento do fluxo na vela mais a popa é retardado evitando a perda de eficiência principalmente em orça.

O sobreposição de velas traz o inconveniente de se dificultar o seu manejo durante a manobra de cambiar, visto que em geral elas apresentam interferências com o mastro e estais de proa (no caso de armações de um só mastro) ou com a retranca da mestra do mastro de proa (no caso de embarcações de mais de um mastro). Por esses motivos em condições de vento forte ou na expectativa de um grande número de mudanças de bordo opta-se por velas menores que não apresentem estes tipos de problemas.

Apresenta-se a seguir o fator de interferência recomendado pela IMS em seu programa VPP-89 (reproduzido no trabalho de POOR (1986)). Estes fatores são na verdade equações em função do vento aparente que variam a porcentagem da área vélica efetiva de um valor unitário (quando não há interferência) até um valor máximo da razão de sobreposição das velas como foi calculado no item 5.2.1.

#### **5.2.2.1. Velame de Contra-Vento (Genoa e Mestra)**

O fator de interferência da mestra sobre a genoa será:

- Para  $\beta_A \leq 135^\circ$  :  $FI_g = 1$  (5.22-A)

- Para  $\beta_A > 135^\circ$  :  $FI_g = 1 - F_g \cdot \left( \frac{\beta_A - 135}{45} \right)$  (5.22-B)

O fator de interferência da vela de proa de mezena sobre a mestra será:

- Para  $\beta_A < 90^\circ$  :  $FI_m = 1$  (5.23-A)

- Para  $\beta_A \geq 90^\circ$  :  $FI_m = 1 - F_m \cdot \left( \frac{1 + 1.5x + 0.5x^3}{2} \right)$  (5.23-B)

$$\text{Onde } x = \frac{(\beta_A - 135)}{45}$$

O fator de interferência da vela de mezena sobre a proa de mezena será:

- Para  $\beta_A < 45^\circ$  :  $FI_{gm} = 0$  (5.24-A)

Ou seja não será usada a vela de proa de mezena para ângulos de vento aparente menores que  $45^\circ$ .

- Para  $45^\circ \leq \beta_A < 60^\circ$  :  $FI_{gm} = 1 - \left( \frac{60 - \beta_A}{15} \right)^2$  (5.24-B)

- Para  $60^\circ \leq \beta_A < 90^\circ$  :  $FI_{gm} = 1$  (5.24-C)

- Para  $\beta_A \geq 90^\circ$  :  $FI_{gm} = 1 - F_{gm} \cdot \left( \frac{1 + 1.5x - 0.5x^3}{2} \right)$  (5.24-D)

$$\text{Onde } x = \frac{(\beta_A - 135)}{45}$$

### **5.2.2.2. Velame de Ventos Largos (Balão e Mestra)**

Quando se estiver trabalhando com ângulos de vento aparente maiores que  $110^\circ$  e em alguns casos para ventos aparentes entre  $70^\circ$  e  $110^\circ$  (caso a eficiência seja maior que a configuração de contravento) utiliza-se a vela balão ao invés da genoa. Isto se deve à grande área de exposição desta vela e seu formato, que permite um melhor desempenho no modo de arrasto.

Desta maneira um novo fator de interferência entre a vela mestra e a de proa deverá ser calculado. O fator de interferência da mestra sobre o balão será dado por:

- Para  $\beta_A \leq 135^\circ$  :  $FI_b = 1$  (5.25-A)

- Para  $\beta_A > 135^\circ$  :  $FI_b = 1 - F_b \cdot \left( \frac{\beta_A - 135}{45} \right)^2$  (5.25-B)

O fator de interferência da vela de proa de mezena sobre a mestra e da vela de mezena sobre a proa de mezena será calculado de maneira idêntica ao caso da configuração para contravento.

### **5.2.3. Razão de Aspecto da Genoa**

Quando a genoa se encontra armada com sua área máxima, sua parte inferior praticamente encosta no convés que passa então a funcionar de maneira similar a uma placa terminal aplicada em uma asa. Sendo assim o escoamento na região inferior da genoa pode ser tratado como um escoamento bidimensional o que acarreta uma razão de aspecto efetiva maior que a razão de aspecto geométrica. Porém quando se começa a



diminuir a área vélica da genoa enrolando-a no estai de vante ou trocando-a por outra menor, abre-se uma brecha entre a esteira da vela e o convés. Através desta brecha o ar tende a fluir da região de maior pressão (barlavento) para a região de menor pressão (sotavento) trazendo uma característica tridimensional ao escoamento, que passa a apresentar vórtices, reduzindo a sustentação da vela e aumentando seu arrasto. Isto pode ser traduzido para as equações de força como um decremento na razão de aspecto efetiva desta vela. Este decremento é sugerido pela IMS através de um fator  $F_{\text{end}}$  dado pela formulação abaixo:

- Para  $\beta_A < 30^\circ$  :  $F_{\text{end}} = F_{\text{pt}}$  (5.26-A)

- Para  $30 \leq \beta_A \leq 90^\circ$  :  $F_{\text{end}} = F_{\text{pt}} \cdot \left( \frac{1 - 1.5x + 0.5x^3}{2} \right)$  (5.26-B)

$$\text{Onde } x = \frac{(\beta_A - 60)}{30}$$

- Para  $90^\circ < \beta_A$  :  $F_{\text{end}} = 0$  (5.26-C)

#### 5.2.4. Interferência do mastro

Para armações fracionadas, ou seja, aquelas em que o estai de proa não termina no tope do mastro, a porção da vela mestra que se situa acima do fim do estai é afetada adversamente pelo mastro, que perturba o escoamento ao mesmo tempo em que a ausência da genoa não permite o efeito chaminé, colaborando para o descolamento do fluxo na porção de sotavento da vela mestra.

Esta interferência do mastro é levada em conta no modelo através de um acréscimo na sua resistência e um decréscimo na sustentação total da vela mestra. Para isto é calculado previamente a porção do mastro exposta e sua razão de aspecto em relação ao comprimento total da vela mestra.

$$L_c = P_p + HR_p - I$$

$$RA_{L_c} = \left( \frac{L_c}{P_p} \right)^2$$

$$F_d = 1 + 2L_e + 1.13 \frac{L_e \cdot Dm_p}{A_p \cdot C_{Dp}}$$

Onde:

$L_e$  = Comprimento do mastro exposto acima do término do estai de vante

$RA_{L_e}$  = Razão de aspecto da porção exposta do mastro

$F_d$  = Fator de diâmetro, que pondera o diâmetro do mastro com seu comprimento exposto, área e arrasto da vela mestra

$Dm_p$  = Diâmetro médio do mastro principal

$C_{Dp}$  = Arrasto parasita da vela mestra

O cálculo para o coeficiente de incremento do arrasto ( $\delta_{Cd}$ ) é apresentado nas equações (5.28-A) à (5.28-C).

- Para  $\beta_A < 40^\circ$  :  $\delta_{Cd} = F_d$  (5.28-A)

- Para  $40^\circ \leq \beta_A \leq 90^\circ$  :  $\delta_{Cd} = x \cdot F_d + (1 - x)$  (5.28-B)

$$\text{Onde } x = \frac{\left(\frac{65 - \beta_A}{25}\right)^3}{2} + 0.5$$

- Para  $\beta_A > 90^\circ$  :  $\delta_{Cd} = 1$  (5.28-C)

Já a redução da sustentação é dada através do coeficiente  $\delta_{Cl}$  na fórmula (5.29).

$$\delta_{Cl} = 1 - 0.5 \cdot F_d \quad (5.29)$$

É importante ressaltar que esta influência do mastro só é significativa para ventos aparentes menores que  $90^\circ$ , visto que para aproamentos acima deste ângulo o velame opera no modo de arrasto. No caso do veleiro estar armado com balão,  $\delta_{Cl} = 1$ .

### 5.3. COMPOSIÇÃO DAS FORÇAS AERODINÂMICAS

A atuação do vento sobre as velas pode ocorrer de duas maneiras distintas conforme as forças aerodinâmicas predominantes:



A primeira delas é quando a vela funciona como um fólio, desenvolvendo um alto valor do coeficiente de sustentação em relação ao coeficiente de arrasto. Acontece geralmente em mareações de proa até o través, quando o ângulo de incidência do escoamento com a vela é pequeno, assim como o descolamento total do fluxo a sotavento. Por estas razões a força de maior intensidade é a sustentação.

A segunda forma de atuação é quando a vela funciona como um para-quedas e é chamada de modo de arrasto. Acontece geralmente em mareações de través folgado a popa, onde as velas praticamente não geram sustentação devido ao grande descolamento do fluxo. Desta maneira a força de empuxo aerodinâmico que impulsiona a embarcação a vante é em sua maior parte composta pelo arrasto aerodinâmico.

Apesar das duas maneiras distintas de atuar do velame, o par arrasto/sustentação aerodinâmica terá sempre componentes na direção do movimento ou perpendicular a ele, fazendo com que o empuxo e a força lateral aerodinâmica sejam uma soma destas parcelas. Como esta recomposição de forças é feita em relação ao referencial definido no capítulo 5, figura 5.1, será discutido no item 5.3.2.

Antes disto porém, se faz necessária uma maior explicação de como obter o valor das forças de sustentação e arrasto e suas componentes, bem como uma explicação da sua forma de atuação.

### **5.3.1. Componentes Constitutivas**

A maneira como a vela interage com o vento, mesmo quando operando no modo de arrasto, permite modelá-la como um fólio, e passa-se a utilizar a mesma nomenclatura da aerodinâmica. Sendo assim uma vela (fólio) sujeito a ação do vento, incidindo com um determinado ângulo de ataque, gera basicamente duas forças: uma de sustentação (Força Lateral Total Aerodinâmica,  $FL_{TA}$ ), perpendicular ao vento aparente e outra de arrasto ( Resistência Total Aerodinâmica,  $R_{TA}$ ), no sentido do escoamento. Estas forças são representadas esquematicamente na figura 5.4.

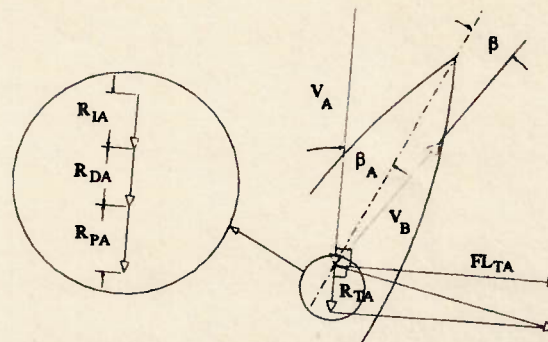


Figura 5.4: Forças Aerodinâmicas

A força de sustentação tem praticamente uma única componente, resultante da integração das diferenças de pressão entre a região de barlavento e sotavento da vela, e por definição é representada em uma direção perpendicular a velocidade do escoamento incidente. Seu valor é obtido pelas equações (5.30-A) e (5.30-B), sendo a primeira para configuração de velame com genoa e a segunda para quando o balão estiver armado.

$$(FL_{TA})_{\text{popa}} = \frac{1}{2} (C_L)_{\text{popa}} \rho_{Ar} V_A^2 A_N \quad (5.30-A)$$

$$(FL_{TA})_{\text{orça}} = \frac{1}{2} (C_L)_{\text{orça}} \rho_{Ar} V_A^2 A_N \quad (5.30-B)$$

Onde:

$C_L$  = Coeficiente de sustentação aerodinâmico

$\rho_{Ar}$  = Densidade do ar

popa = Sub-índice que indica que a vela de proa armada é o balão

orça = Sub-índice que indica que a vela de proa armada é a genoa

O coeficiente de sustentação aerodinâmico é uma composição dos coeficientes de cada vela multiplicados pelos fatores geométricos que influem no escoamento como apresentado anteriormente. Para cada vela o coeficiente correspondente poderá ser obtido na tabela fornecida pela IMS (item 5.3.1.1) ou nos valores analíticos calculados por MILGRAM (1971) (item 5.3.1.2). Para as configurações de orça ou vento em popa o  $C_L$  aerodinâmico é dado pelas fórmulas (5.31-A) e (5.31-B).



$$(C_L)_{proa}^{100\%} = \frac{(C_{L_g} \cdot FI_g \cdot A_g + C_{L_p} \cdot FI_m \cdot A_p \cdot (\delta_{Cl})_p + C_{L_s} \cdot FI_{gm} \cdot A_{gm} + C_{L_r} \cdot A_m \cdot (\delta_{Cl})_m)}{A_N}$$

(5.31-A)

$$(C_L)_{popa}^{100\%} = \frac{(C_{L_b} \cdot FI_b \cdot A_b + C_{L_p} \cdot FI_m \cdot A_p \cdot (\delta_{Cl})_p + C_{L_s} \cdot FI_{gm} \cdot A_{gm} + C_{L_r} \cdot A_m \cdot (\delta_{Cl})_m)}{A_N}$$

(5.31-B)

Onde:

$(C_L)_{proa}^{100\%}$  = Coeficiente de sustentação total aerodinâmico com a área vélica totalmente exposta na configuração genoa/mestra

$(C_L)_{popa}^{100\%}$  = Coeficiente de sustentação total aerodinâmico com a área vélica totalmente exposta na configuração balão/mestra

$C_{L_g}$  = Coeficiente de sustentação da genoa

$C_{L_p}$  = Coeficiente de sustentação da vela marconi (mestra ou mezena)

$C_{L_s}$  = Coeficiente de sustentação da vela balão

Pode-se perceber que o coeficiente de sustentação utilizada pela genoa e pela vela de proa de mezena são iguais, o mesmo ocorrendo com o da vela principal e de mezena. Esta simplificação deve-se ao fato de se modelar os dois mastros sem a interferência de um sobre o outro, somando-se o resultado que teriam se atuassem individualmente. Por outro lado o coeficiente de decremento de sustentação devido a interferência do mastro deve ser calculado separadamente para o mastro principal e para o de mezena visto a diferença de configuração vélica que poderá existir entre eles.

No caso da embarcação apresentar um ângulo de banda muito acentuado uma diminuição da área das velas ou uma mudança no formato das mesmas faz-se necessária afim de se reduzir a força lateral ou o centro de pressões ou ambos.

Geralmente, em um primeiro ataque ao problema da banda, o comandante costuma alterar a regulagem da vela para um formato mais achatado diminuindo a sustentação. No modelo matemático o parâmetro  $f$  (do inglês "flat") representa esta perda de

*flat*

sustentação. Mais recentemente com o advento dos enroladores de genoa este parâmetro também assumiu o papel da redução da área vélica sem alterar a posição do centro de esforços aerodinâmicos.

No caso da banda continuar indesejável, uma atitude mais radical deverá ser tomada com a redução da área vélica e também da altura do centro de pressão aerodinâmico (rizar as velas). O parâmetro  $r$  (do inglês "reef") traduz estas modificações para o modelo matemático. *reef*

Desta maneira, o coeficiente de sustentação total aerodinâmico atuante no velame (presente nas equações 5.30), após as possíveis modificações de forma ou rizo das velas, tanto para a configuração de velame de ventos de proa ou de popa, será dado por:

$$C_L = (C_L)^{100\%} \cdot r^2 \cdot f \quad (5.32)$$

O termo de rizo aparece elevado a segunda potência pois a redução da área ocorre tanto na esteira da vela quanto na testa. É importante observar que, para o cálculo das forças, a área utilizada é sempre o valor da área normalizada  $A_N$ . A redução de área vélica já está embutida no valor de  $r$ .

A força de resistência total aerodinâmica, que possui direção coincidente com a do escoamento, costuma ser dividida em várias componentes numa tentativa de reproduzir melhor, através de um modelo matemático, o que acontece na realidade. Neste modelo a resistência aerodinâmica é resultado da soma de três componentes: a resistência parasita, a resistência induzida e a resistência de descolamento. Como cada um desses componentes atuam sobre o velame e como obter seus coeficientes será apresentado nos itens 5.3.1.3 a 5.3.1.5. O importante neste momento é saber que a resistência total aerodinâmica é dada pela fórmula (5.33).

$$(R_{TA})_{\text{popa}} = \frac{1}{2} (C_D)_{\text{popa}} \rho_{Ar} V_A^2 A_N \quad (5.33-A)$$

$$(R_{TA})_{\text{proa}} = \frac{1}{2} (C_D)_{\text{proa}} \rho_{Ar} V_A^2 A_N \quad (5.33-B)$$



Onde:

$C_D$  = Coeficiente de arrasto total

A soma de cada componente da resistência é apresentada na fórmula (5.34).

$$C_D = C_{D0} + C_{DP} \cdot f \cdot r^2 + (C_{DI} + C_{DS}) \cdot f^2 \cdot r^2 \quad (5.34)$$

Onde:

$C_{D0}$  = Coeficiente de arrasto parasita vindo das obras mortas como casco, casaria, mastro, estaiamento, tripulação, etc.

$C_{DP}$  = Coeficiente de arrasto parasita

$C_{DI}$  = Coeficiente de arrasto induzido

$C_{DS}$  = Coeficiente de arrasto devido a separação do escoamento.

Assim como no caso da força de sustentação, a resistência também terá seu valor total afetado por modificações que venham a ocorrer na configuração do velame como mudança da forma e da área exposta. Ao contrário da sustentação, onde a redução da área acarreta um prejuízo para a velocidade da embarcação devido a redução da força total de sustentação (e conseqüentemente do empuxo aerodinâmico), os parâmetros  $r$  e  $f$  acarretam uma diminuição no arrasto aerodinâmico o que é benéfico no cômputo geral da força de empuxo. Esta redução da resistência aerodinâmica, através de uma redução da área vélica, é muitas vezes adotada em ventos largos levíssimos, onde um balão de menores dimensões é preferido por acarretar menos arrasto aumentando a eficiência do velame.

### **5.3.1.1. Coeficientes Aerodinâmicos da IMS**

A alternativa que têm sido mais comumente utilizada na determinação das forças aerodinâmicas na embarcação tem sido os parâmetros fixados pela IMS, que fornecem os coeficientes de sustentação e da resistência parasita das velas genoa (ou buja), balão, mestra tipo marconi, mestra talada ("full-batten") e das obras mortas do casco. Além disto são fornecidas formas de se corrigir o efeito de superposição e distanciamento das

velas e exposição da área do mastro em armações fraccionadas (já mencionadas no item 5.2).

Esses coeficientes e parâmetros procuram refletir as velas em sua melhor performance, perfeitamente regulada, e com aproamento em relação ao vento que otimize seu rendimento. Desta maneira, nem sempre esta performance pode ser obtida na água durante todo o tempo. Estes valores fornecidos pela IMS, quando multiplicados pela área e pela pressão dinâmica do vento aparente, fornecem valores razoáveis das forças obtidas em escala real.

Como os coeficientes foram determinados através de um modelo bidimensional testado em túnel de vento, eles infelizmente não levam em consideração a influência da razão de aspecto da vela.

Os valores dos coeficientes de sustentação e da resistência parasita aerodinâmica em função do ângulo de vento aparente para as velas balão e genoa são fornecidos nas tabelas 5.1 e 5.2 respectivamente. Os gráficos presentes nas figuras 5.6 e 5.7 mostram a variação destas grandezas.

Os coeficientes da IMS para vela grande do tipo marconi e talada são dados na tabela 5.3 e seu comportamento em função do ângulo de vento aparente pode ser melhor visualizado com o auxílio do gráfico na figura 5.8.

Balão			Genoa/Buja			Mestra			Mestra F.B.	
$\beta_A$	$C_{1h}$	$C_{Dh}$	$\beta_A$	$C_{1g}$	$C_{Dg}$	$\beta_A$	$C_{1m}$	$C_{Dm}$	$C_{1mf}$	$C_{Dmf}$
28	0.00	0.10	7	0.00	0.05	0	0.00	0.05	0.00	0.03
41	1.31	0.15	15	1.00	0.02	7	1.00	0.03	1.15	0.03
46	1.56	0.20	20	1.38	0.03	9	1.22	0.03	1.40	0.03
60	1.71	0.40	27	1.45	0.04	12	1.35	0.03	1.55	0.03
75	1.69	0.70	50	1.43	0.25	60	1.25	0.11	1.44	0.10
100	1.40	1.00	60	1.25	0.35	90	0.96	0.31	0.96	0.28
130	0.83	1.10	100	0.40	0.73	120	0.58	0.67	0.58	0.67
150	0.50	1.10	150	0.00	0.95	150	0.25	1.11	0.25	1.11
180	0.00	1.10	180	-0.10	0.90	180	-0.1	1.20	-0.10	1.20

Tabela 5.1: Coeficientes da IMS Para Balão

Tabela 5.2: Coeficientes da IMS Para Genoa

Tabela 5.3: Coeficientes da IMS Para Vela Marconi e "Full-Batten"



Onde:

$C_{Db}$  = Coeficiente de arrasto parasita para a vela balão

$C_{Dg}$  = Coeficiente de arrasto parasita para a genoa

$C_{Dp}$  = Coeficiente de arrasto parasita para a vela marconi (mestra e mezena)

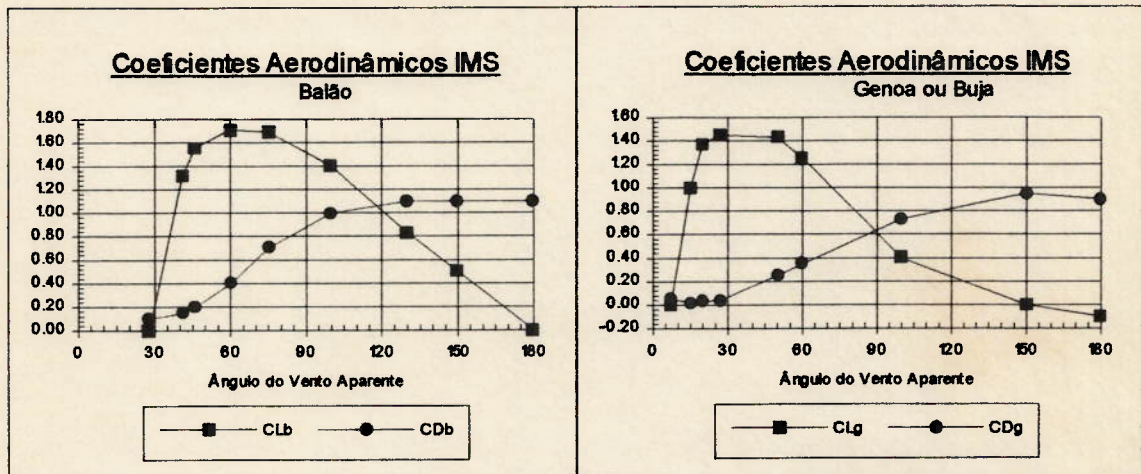


Figura 5.6: Coeficientes da IMS Para Balão

Figura 5.7: Coeficientes da IMS Para Genoa

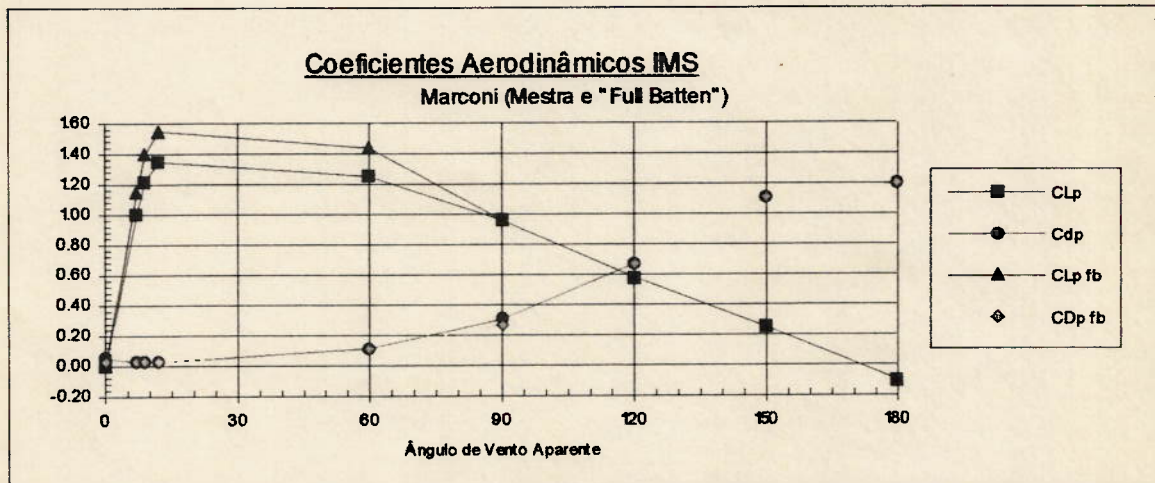


Figura 5.8: Coeficientes IMS Para Vela Mestra Marconi e "Full-Batten"

Pode-se perceber que os grandes e irregulares intervalos do ângulo de vento aparente atrapalham muito a determinação dos coeficientes aerodinâmicos para um valor qualquer de  $\beta_A$ . A própria IMS recomenda para a obtenção dos valores intermediários

que se realize a aproximação por uma função do terceiro grau. Foi desenvolvida então uma rotina (dentro do programa VPP-PB) que aproxima, cada quatro pontos consecutivos, por uma curva polinomial do terceiro grau gerando os valores de todos os coeficientes de dois em dois graus. O resultado está na figura 5.9. Para manter a continuidade das curvas alguns pontos a mais foram adicionados aos das tabelas 5.1, 5.2 e 5.3. O ajuste foi feito tendo por base o gráfico dos coeficientes aerodinâmicos gerados a partir da mesma tabela da IMS presente no trabalho de ANTRIM (1990) na página 298.

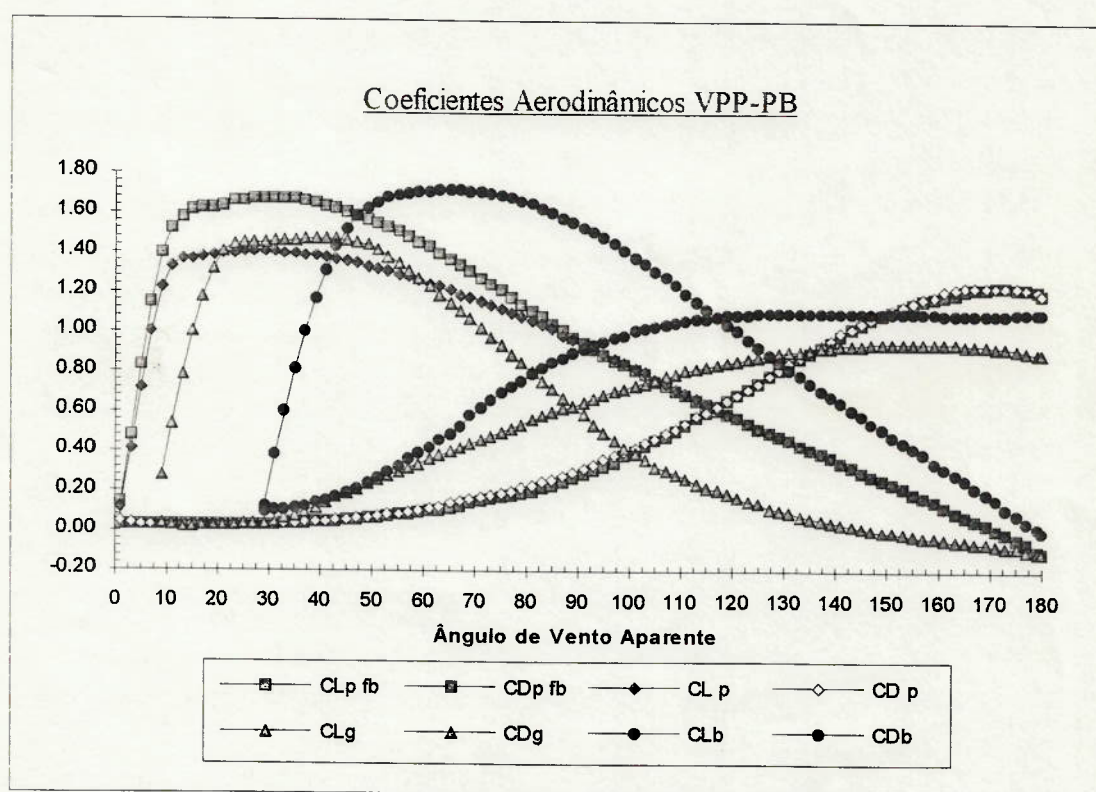


Figura 5.9: Coeficientes Aerodinâmicos Gerados Pelo VPP-PB

### 5.3.1.2. Coeficientes Aerodinâmicos de Milgram

MILGRAM, em seu trabalho de 1968, propõe um modelo numérico baseado na teoria da linha de sustentação para determinar os coeficientes de arrasto e sustentação de uma determinada configuração vélica. O desenvolvimento posterior deste trabalho resultou em uma série de velas que foi publicado em 1971 (MILGRAM (1971)).



A série de Milgram correspondente engloba armações em "sloop" armadas ao tope (estai de proa terminando junto a parte superior do mastro) com razões de aspecto variando entre 2.0 e 4.0 em intervalos de 0.5 tanto para a vela grande quanto para o triângulo de proa. Alguns casos de armações fracionadas também são estudadas bem como "ketches" e "catboats".

Milgram analisa estas configurações para duas condições distintas do formato da vela:

1. A primeira, chamada de alta sustentação ("high lift") corresponde basicamente a condição de ventos fracos e médios e o formato da vela é tal (vela geralmente mais "gorda") que a sustentação é máxima afim de se obter a máxima velocidade. O equilíbrio transversal da embarcação é facilmente obtido com o momento de endireitamento estático. Corresponderia a  $f = 1$  no modelo matemático da IMS.
2. A segunda condição é chamada de sustentação reduzida ("reduced lift"). Deve ser empregada para ventos de médio a fortes, quando uma alta sustentação, gerando uma grande força lateral, acarreta uma banda acentuada e indesejável. Muitas vezes evita-se diminuir a área vélica, e conseqüentemente a velocidade, mas procede-se uma alteração no formato da vela, tornando-a mais plana e reduzindo-se desta maneira a sustentação e por conseqüência a banda.

A série traz além dos coeficientes de sustentação e arrasto, a componente de empuxo total e da força lateral aerodinâmica, bem como seus centros de aplicação. A tabela 5.4 (reprodução das tabelas encontradas nesta série de velas) apresenta como exemplo um dos casos apresentados nesta série: condição de alta sustentação, razão de aspecto da vela mestra de 0.30 e razão de aspecto do triângulo de proa de 0.30.

Como pode ser visto na parte superior do exemplo, muitas hipóteses são adotadas, como ângulo real e aparente do vento, relação entre a velocidade do veleiro e a velocidade do vento, arrasto devido ao mastro, etc. Tudo isto restringe muito a aplicabilidade desta série, sendo recomendada praticamente apenas para embarcações de deslocamento na condição de contravento.

A observação cuidadosa das hipóteses presentes nesta série de vela indicam que, no cálculo total dos coeficientes de sustentação e arrasto, bem como nos coeficientes de empuxo e força lateral aerodinâmica, já foram levados em conta o que chamamos nesta dissertação de fatores geométricos, ou seja, influência do mastro, interferência de velas e razão de aspectos do velame. Sendo assim, quando do uso destes valores deve-se empregar diretamente as equações (5.30) e (5.33) respectivamente, para o cálculo das forças lateral e de arrasto total aerodinâmicas.

HIGH LIFT WITH BOOM = 0.10*MAIN HOIST						
CDF=0.04: MAST CD=0.40 BASED ON MAST DIAMETER OF 0.01*(SPAN+FOOT)						
MAIN ASPECT RATIO = 3.00			FORETRIANGLE ASPECT RATIO = 3.00			
JIB SPAN/MAIN SPAN = 1.100			JIB FOOT/MAIN FOOT = 1.761			
FORETRIANGLE/BOOM LENGTH = 1.10			JIB FOOT/FORETRIANGLE = 1.60			
BOOM HEIGHT/MAIN SPAN = 0.1			LP/FORETRIANGLE = 1.52			
TRUE WIND ANGLE = 42.9 DEG.			APPARENTE WIND ANGLE = 27.0 DEG.			
APPARENTE WIND/TRUE WIND = 1.50 BOAT SPEED/TRUE WIND SPEED = 0.60						
FORCE COEFFICIENTS (ACTUAL AREA)				(1969 NEW INT. RULE AREA)		
	JIB	MAIN	TOTAL	JIB	MAIN	TOTAL
FORWARD	0.454	0.127	0.342	0.491	0.152	0.383
SIDE	1.109	1.445	1.223	1.199	1.734	1.369
LIFT	1.194	1.344	1.245	1.291	1.613	1.393
DRAG	0.101	0.545	0.253	0.110	0.654	0.283
SAIL AREA RATIOS						
RU/AC	0.924	0.833	0.893			
VERT SIDE FORCE CENTER/MAST HT.						
	0.382	0.481	0.422			
VERT FORWARD FORCE CENTER/MAST HT						
	0.457	0.719	0.490			
HOR SIDE FORCE CENT/(BOOM+FORTRI)						
	-0.077	0.160	0.018			

Tabela:5.4: Coeficientes Aerodinâmicos de Milgram

### **5.3.1.3. Resistência Devido ao Descolamento**

Devido ao fato das velas no modelo da IMS operarem na região de máxima sustentação, uma parcela significativa do escoamento sofrerá descolamento. São dados



valores constantes para os coeficientes de arrasto devido ao descolamento para cada vela,

e que são mostrados na tabela 5.5.

	Genoa	Mestra	Balão
Ks	0.016	0.016	0.019

Tabela 5.5: Coeficientes de Arrasto Devido a Separação

A força de arrasto aerodinâmica devido a separação é proporcional ao quadrado da força de sustentação e é resultado da composição da parcela individual da separação em cada vela segundo as equações (5.35).

$$(C_{DS})_{popa} = \frac{(C_{L_b}^2 \cdot FI_b \cdot A_b \cdot K_{Sb} + C_{L_p}^2 \cdot FI_p \cdot A_p \cdot K_{Sp} + C_{L_g}^2 \cdot FI_{gm} \cdot A_{gm} \cdot K_{Sg} + C_{L_m}^2 \cdot A_m \cdot K_{Sp})}{A_N} \quad (5.35-A)$$

$$(C_{DS})_{proa} = \frac{(C_{L_g}^2 \cdot FI_g \cdot A_g \cdot K_{Sg} + C_{L_p}^2 \cdot FI_p \cdot A_p \cdot K_{Sp} + C_{L_g}^2 \cdot FI_{gm} \cdot A_{gm} \cdot K_{Sg} + C_{L_m}^2 \cdot A_m \cdot K_{Sp})}{A_N} \quad (5.35-B)$$

Onde:

- $K_{Sb}$  = Coeficiente de separação para vela balão
- $K_{Sp}$  = Coeficiente de separação para vela marconi (mestra e mezena)
- $K_{Sg}$  = Coeficiente de separação para vela genoa (de proa ou de mezena)

#### **5.3.1.4. Resistência Induzida**

Quando a embarcação está em orça folgada ou cerrada a resistência induzida é a mais significativa das componentes da força de arrasto aerodinâmica atuantes. Isto se

deve ao alto valor do coeficiente de sustentação que as velas principal e mezena desenvolvem nestas mareações.

Devido a estes altos valores da sustentação o diferencial de pressão entre os lados de sotavento e barlavento da vela torna-se muito acentuado, fazendo com que nas extremidades superior e inferior o escoamento tenda a fluir da região de <sup>alta</sup> baixa para a de alta pressão. Isto implica naturalmente numa redução do diferencial de pressão nestas <sup>baixe</sup> regiões e conseqüentemente do valor da sustentação. Várias tentativas têm sido feitas para se minimizar este problema, como retrancas posicionadas o mais baixo possível e com altura da alma grande (diminuição do escoamento cruzado inferior) ou velas com o tope parabólico, que evitam o escoamento cruzado na parte superior. Além disto procura-se aumentar a razão de aspecto das velas de modo que a porcentagem da área atingida pelo escoamento cruzado diminua em relação a área total das velas.

Mas não é apenas este efeito físico que origina a resistência induzida. Devido a sustentação, cria-se uma circulação em torno da vela de modo que o ângulo de ataque atuante não é mais o ângulo de vento aparente, mas sim um ângulo induzido  $\beta_i$ . Como a força resultante surgirá praticamente perpendicular a reta de ângulo de incidência  $\beta_i$ , uma parcela desta sustentação surgirá na direção do escoamento, vindo a ser a própria resistência induzida. A figura 5.10 apresenta a força resultante aerodinâmica com sua parcela de sustentação e a parcela de resistência induzida.

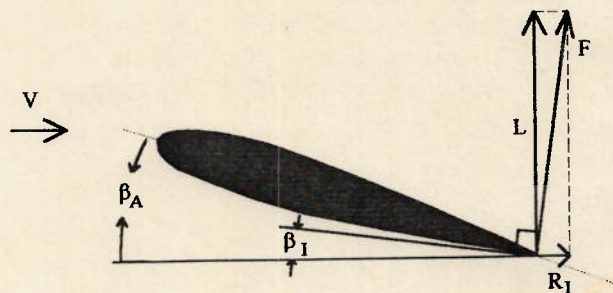


Figura 5.10: Resistência Induzida em Um Fólio

Pelo que foi apresentado acima pode-se concluir que a parcela de resistência induzida depende basicamente da força de sustentação total desenvolvida pelo fólio



(vela) e pela razão de aspecto do mesmo. Esta dependência é mostrada nas equações (5.36).

$$(C_{DI})_{\text{popa}} = \frac{\frac{\left( (C_{L_b})^2 \cdot FI_b \cdot A_b \right)}{\pi \cdot \frac{P_p^2}{A_b}} + \frac{\left( (C_{L_p})^2 \cdot FI_p \cdot A_p \right)}{\pi \cdot \frac{P_p^2}{A_p}} + \frac{\left( (C_{L_g})^2 \cdot FI_{gm} \cdot A_{gm} \right)}{\pi \cdot \frac{I_m^2}{A_{gm}}} + \frac{\left( (C_{L_m})^2 \cdot A_m \right)}{\pi \cdot \frac{P_m^2}{A_m}}}{A_N}$$

(5.36-A)

$$(C_{DI})_{\text{proa}} = \frac{\frac{\left( (C_{L_s})^2 \cdot (1 - 0.1F_{md}) \cdot FI_s \cdot A_s \right)}{\pi \cdot \frac{I^2}{A_s}} + \frac{\left( (C_{L_p})^2 \cdot FI_p \cdot A_p \right)}{\pi \cdot \frac{P_p^2}{A_p}} + \frac{\left( (C_{L_g})^2 \cdot FI_{gm} \cdot A_{gm} \right)}{\pi \cdot \frac{I_m^2}{A_{gm}}} + \frac{\left( (C_{L_m})^2 \cdot A_m \right)}{\pi \cdot \frac{P_m^2}{A_m}}}{A_N}$$

(5.36-B)

Onde:

$(C_{DI})_{\text{popa}}$  = Coeficiente de arrasto induzido para configuração balão/mestra

$(C_{DI})_{\text{proa}}$  = Coeficiente de arrasto induzido para configuração genoa/mestra

As fórmulas (5.36-A e B) foram totalmente desenvolvidas para facilitar a visualização do significado físico de cada termo. Pode-se perceber que o arrasto induzido varia com o quadrado da sustentação e é inversamente proporcional a razão de aspecto (fator que multiplica  $\pi$  no divisor).

### 5.3.1.5. Resistência Parasita

- Nas velas:

A resistência parasita desenvolvida pelo velame é dada diretamente pelos coeficientes da IMS (quando este modelo é adotado) e refere-se praticamente as forças de atrito dentro da camada limite e a resistência de forma. Sendo assim a força é obtida diretamente multiplicando-se o valor do coeficiente pela pressão dinâmica e pelos fatores geométricos que interferem no escoamento.

$$(C_{DP})_{\text{popa}} = \frac{(C_{D_b} \cdot FI_b \cdot A_b + C_{D_p} \cdot FI_p \cdot A_p + C_{D_g} \cdot FI_{gm} \cdot A_g + C_{D_m} \cdot A_m)}{A_N} \quad (5.37-A)$$

$$(C_{DP})_{\text{proa}} = \frac{(C_{D_g} \cdot FI_g \cdot A_g + C_{D_p} \cdot FI_p \cdot A_p + C_{D_b} \cdot FI_{gm} \cdot A_g + C_{D_m} \cdot A_m)}{A_N} \quad (5.37-B)$$

Onde:

$(C_{DP})_{\text{popa}}$  = Coeficiente de resistência parasita para a configuração de ventos de proa

$(C_{DP})_{\text{proa}}$  = Coeficiente de resistência parasita para a configuração de ventos largos

- Nas obras mortas:

As forças aerodinâmicas que agem em um veleiro estão associadas com o vento atuante não apenas sobre as velas mas também sobre os mastros, estais casaria, cascos, tripulação, enfim, também sobre as obras mortas da embarcação. As forças atuantes nas obras mortas são calculadas sem grandes refinamentos, visto representar uma parcela muito pequena do total de forças de resistência na maioria das manobras, exceto na de popa quando, perto do ponto de "speed made good", estas forças podem atingir valores consideráveis. Normalmente adota-se um coeficiente de arrasto constante que será multiplicado pela área frontal (cabine, casco, tripulação, etc.) de exposição.

Primeiramente calcula-se a área de exposição do casco acima da linha d'água e da casaria, a área do mastro e a área da tripulação.

$$A_{p1\alpha} = (B_{L_m} + H_{c_m}) \cdot \frac{(B_{wl} + B)}{2}$$

$$A_{p2\alpha} = (B_{L_m} + H_{c_m}) \cdot \frac{(L_{wl} + L)}{2}$$

$$A_{p\alpha} = A_{p1\alpha} + (A_{p2\alpha} - A_{p1\alpha}) \cdot \sin(\beta_A)$$

$$A_{p_m} = 1.1(H_p \cdot Dm_p + H_m \cdot Dm_m)$$

$$A_{p_i} = 0.6 \frac{m_i}{70}$$



Onde:

$A_{P_{cc}}$	= Área parasita do casco acima da linha d'água
$A_{P_m}$	= Área parasita da mastreação
$A_{P_t}$	= Área parasita da tripulação
$B_{L_m}$	= Borda livre média
$H_{c_m}$	= Altura da casaria em função do comprimento total L
$B_{wl}$	= Boca do casco na linha d'água
$B$	= Boca máxima do casco
$L_{wl}$	= Comprimento da linha d'água
$L$	= Comprimento total do casco
$H_p$	= Altura do mastro principal
$Dm_p$	= Diâmetro médio do mastro principal
$H_m$	= Altura do mastro de mezena
$Dm_m$	= Diâmetro médio do mastro de mezena
$m_t$	= Massa da tripulação

Nas fórmulas para o cálculo da área parasita algumas considerações extras foram feitas:

- Considerou-se a área total da mastreação 10% maior que a área média dos mastros para que seja levada em consideração o estaiamento e as cruzetas.
- No cálculo da área da tripulação levou-se em conta que cada pessoa sentada apresenta uma área frontal de  $0.60 \text{ m}^2$  e um peso de 70 quilos.

Já no cálculo do coeficiente de arrasto parasita a área da tripulação será dividida por dois pois considera-se que metade da tripulação esteja repousando, como mostra a equação (5.38)

$$C_{D0} = \frac{\left( (0.2 + 0.7 \sin \beta_A) \cdot A_{P_{cc}} + A_{P_m} + 0.5 A_{P_t} \right)}{A_N} \quad (5.38)$$

### 5.3.2. Componentes no Referencial do Movimento

Para que se possa proceder a integração entre forças aero e hidrodinâmicas é necessário que as mesmas sejam comparadas sobre um mesmo referencial. Para isto adotou-se um sistema de coordenada onde o eixo x encontra-se na direção do movimento (e não na linha de centro da embarcação) como mostra a figura 5.11. Com isto as forças hidrodinâmicas de resistência ao avanço e lateral encontram-se alinhadas com os eixos do sistema enquanto as aerodinâmicas necessitam ser decompostas.

A decomposição é feita com o auxílio da figura 5.11 e noções básicas de trigonometria conforme o equacionamento abaixo:

$$E_A = FL_{TA} \cdot \sin(\beta_A + \beta) - R_{TA} \cdot \cos(\beta_A + \beta) \quad (5.39)$$

$$FL_A = FL_{TA} \cdot \cos(\beta_A + \beta) + R_{TA} \cdot \sin(\beta_A + \beta) \quad (5.40)$$

Como pode-se perceber, a componente do empuxo aerodinâmico que é responsável pela velocidade final da embarcação não é composta apenas pela força de sustentação que surge nas velas mas também pelo arrasto, que em ventos aparentes acima de 90 graus contribuirá positivamente com a força propulsora.

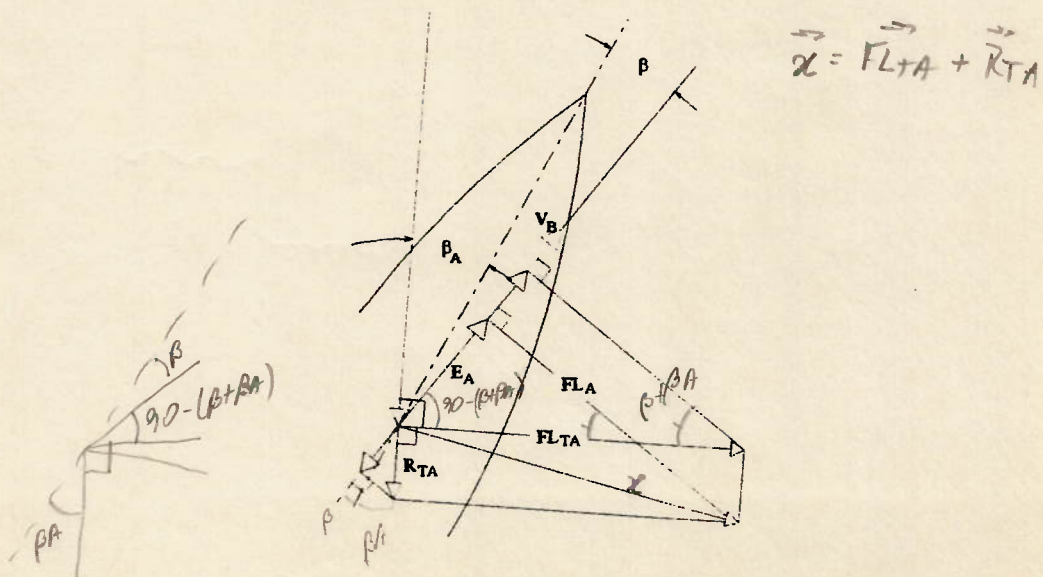


Figura 5.11: Decomposição das Forças Aerodinâmicas



## 6. FORÇAS HIDRODINÂMICAS

No estudo de embarcações convencionais costuma-se estudar apenas uma força hidrodinâmica: a de resistência ao avanço, que é normalmente discriminada em três componentes: a resistência viscosa, a resistência de ondas própria e a resistência adicional em ondas. Isto deve-se ao fato de a força propulsora ser, em última análise, aplicada pelo hélice no sentido longitudinal e na linha de centro da embarcação.

No caso de um veleiro a força propulsora não representa um sistema tão simples visto atuar fora da linha de centro da embarcação. Como ela navega sobre um delicado equilíbrio de forças e momentos, como mostrado no capítulo quatro, e que a força aerodinâmica (no caso representando a força propulsora) apresenta basicamente uma componente no sentido da velocidade da embarcação e outra perpendicular a ela (vide figura 5.11), é de se esperar que as obras vivas (casco e apêndices) venham desenvolver forças de mesma magnitude mas de sentido contrário em resposta a força resultante aerodinâmica.

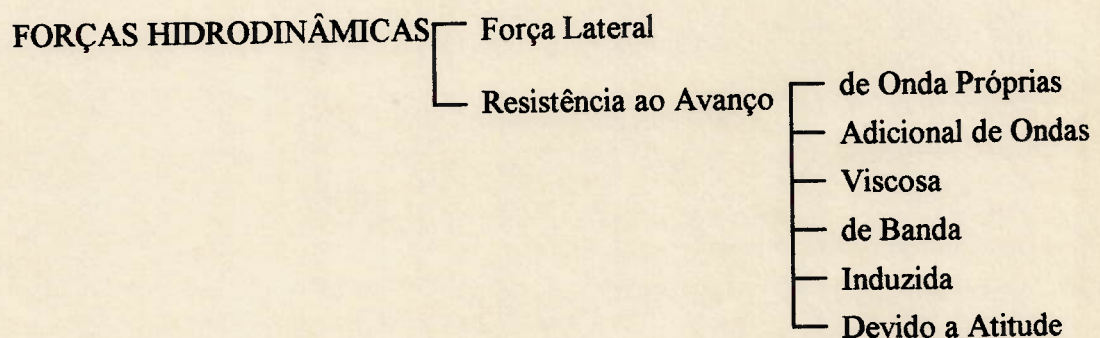


Figura 6.1: Esquema de Forças Hidrodinâmicas Atuantes em Um Veleiro

Para isto o casco desenvolverá velocidade, ângulo de deriva e ângulo de banda. Enquanto que a velocidade acarreta as mesmas forças experimentadas por uma embarcação convencional, o ângulo de deriva resultará em uma força lateral e em duas

novas componentes da resistência: a resistência induzida e a resistência devido a atitude do casco. O ângulo de banda também incorrerá em uma variação na resistência ao avanço que será chamado de resistência devido a banda. Desta maneira as forças hidrodinâmicas agindo em um veleiro podem ser resumidas na figura 6.1, sendo o diagrama de forças representado na figura 6.2.

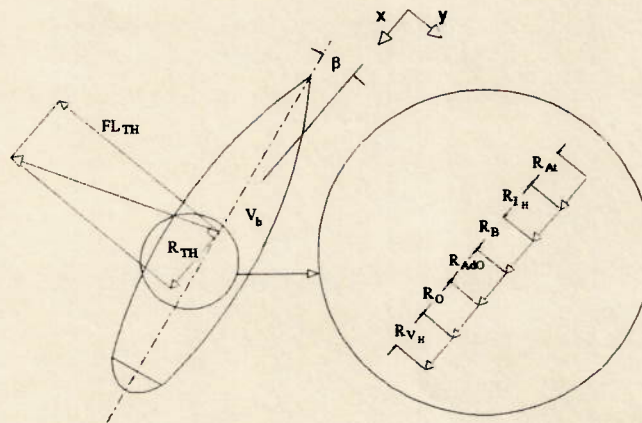


Figura 6.2: Diagrama de Forças Hidrodinâmicas em Um Veleiro

A maneira singular como um veleiro interage com a força propulsora pode ser resumida, do ponto de vista do projeto das obras vivas, como a necessidade de geração de uma força lateral hidrodinâmica e de uma grande estabilidade para o casco, sem incorrer em um grande aumento da resistência ao avanço (hidrodinâmica). Sendo assim têm-se uma tendência de se gerar elementos hidrodinâmicos bem definidos, com funções específicas e alto rendimento, ao contrário do que se praticava até a década de 40 quando as obras vivas tinham a aparência de um único elemento (o casco), com função de prover estabilidade, gerar força lateral e atravessar as ondas com um mínimo de resistência. Nos veleiros contemporâneos pode-se perceber no mínimo três elementos hidrodinâmicos distintos: casco, quilha (pode vir acompanhada de asas e bulbos) e leme (podem ser mais que um e dispostos juntos na popa ou um na popa e outro na proa), com as funções descritas a seguir:



- Casco: deve permitir o deslocamento da embarcação com o mínimo de resistência ao avanço, galgando as ondas ao invés de cortá-las. Responsável pela estabilidade do veleiro através da área de linha d'água e conseqüentemente do raio metacêntrico.
- Quilha: com perfil de asa é a principal responsável pela geração da força lateral podendo possuir pequenas asas em sua extremidade inferior afim de aumentar o rendimento. Normalmente é feita de chumbo, incrementando a estabilidade através de uma redução da altura do centro de gravidade. Através da fixação de um bulbo em sua extremidade inferior, esta idéia é levada as últimas conseqüências.
- Leme: responsável por uma parcela significativa da força lateral hidrodinâmica total. Porém sua principal função é de maximizar a manobrabilidade e a estabilidade direcional da embarcação.

Por terem funções tão distintas os fenômenos físicos hidrodinâmicas atuantes em cada um destes elementos não podem ser tratados de maneira geral, motivo pelo qual este capítulo, ao contrário do referente as forças aerodinâmicas onde subdividiu-se por fenômenos, será dividido por elemento das obras vivas: casco, leme, quilha e bulbo. A figura 6.3 apresenta estes componentes hidrodinâmicos e as forças atuantes em cada um deles no sentido do movimento (eixo  $x$ ) e perpendicular a ele (eixo  $y$ ).

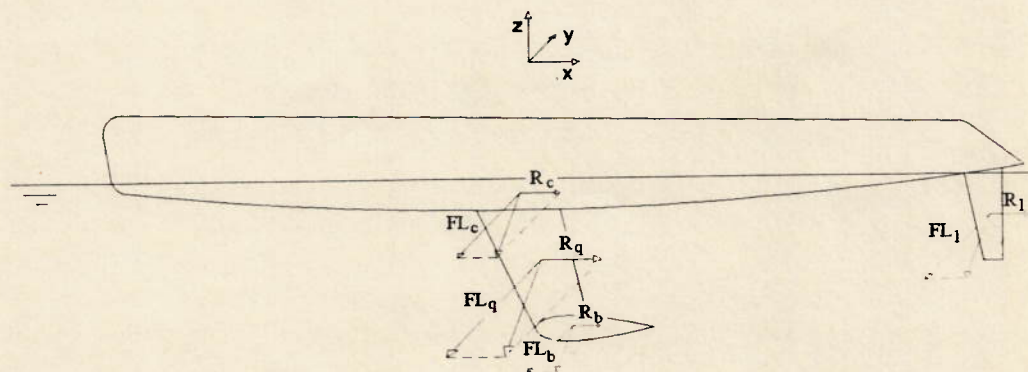


Figura 6.3: Forças Hidrodinâmicas em Cada Componente das Obras Vivas

Leme e quilha são tratados basicamente como superfícies de sustentação, partindo-se de uma formulação para a obtenção do coeficiente de sustentação para fólhos bidimensionais, e aplicando-se uma série de correções empíricas procurando quantificar o efeito da tridimensionalidade do escoamento. Estas correções (explicadas detalhadamente ao longo do capítulo) referem-se a interferências advindas da forma da ponta da quilha/leme, da viscosidade do fluido, proximidade da superfície livre, interação com o casco, bulbo e asas, ângulo de "flap" e "downwash" da quilha sobre o leme. A resistência induzida é calculada a partir da força lateral, calculando-se também a resistência viscosa (de forma mais de atrito).

Os apêndices da quilha, bulbo e asa, serão modelados de uma maneira muito simples por gerarem forças de ordem de grandeza relativamente pequenas quando comparadas com as geradas pela quilha/leme e casco. O bulbo será tratado como um corpo de revolução, cuja força lateral e resistência são sugeridos por HOERNER (1965), enquanto para as asas da quilha só será calculada a resistência viscosa.

Já o casco, por ter uma baixa razão de aspecto, não apresenta um método consagrado para o cálculo da força lateral como demonstra FLAY (1993). Nessa publicação são apresentadas cinco maneiras de se calcular a força lateral gerada pelo casco e quilhas e as interferências de um sobre o outro. Enquanto que para o cálculo da força na quilha a adoção da teoria de sustentação para superfícies com altas razões de aspecto é uma unanimidade, para o casco são sugeridos três enfoques distintos:

- a modelagem do casco segundo meio corpo de revolução com o mesmo perfil da secção mestra.
- considerar a força lateral do casco, quilha e leme como aquela dada por uma quilha e leme equivalentes cuja envergadura se estenderia até a linha d'água.
- modelar a parte submersa do casco como uma placa de baixa razão de aspecto sujeita a um ângulo de ataque.

No item que trata sobre o cálculo da força lateral do casco, cada opção desta será abordada com maior profundidade, mostrando suas vantagens e desvantagens.



No cálculo da resistência ao avanço do casco, o trabalho desenvolvido por GERRITSMA (1981) a partir de uma série sistemática de veleiros têm sido respeitado mundialmente sendo adotado inclusive no VPP desenvolvido pela IMS. GERRITSMA além de fornecer a formulação para resistência de ondas na situação sem banda nem deriva, sugere formulações para o cálculo do adicional de resistência devido a banda e correções no valor da estabilidade estática em função da velocidade e dos altos valores dos ângulos de banda assumidos por uma embarcação a vela. A resistência de atrito pode ser obtida pela ITTC, enquanto a induzida será dada em função da força lateral e da razão de aspecto do casco.

As forças criadas por cada um destes elementos, bem como os fatores que as influenciam são resumidos nos diagramas apresentados nas figuras 6.4-A à 6.4-D.

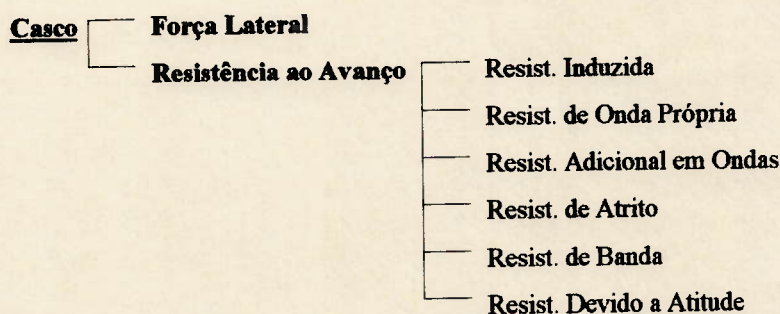


Figura 6.4-A: Diagrama das Forças no Casco

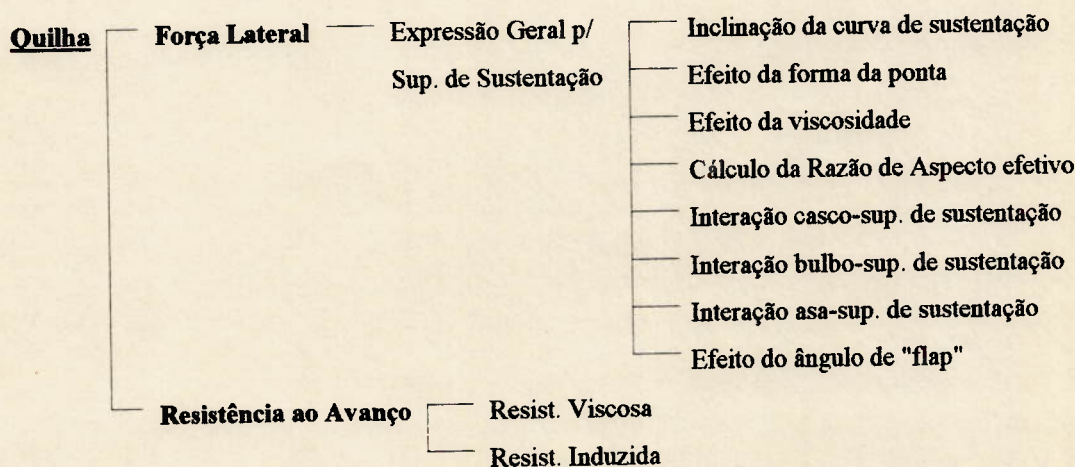


Figura 6.4-B: Diagrama das Forças na Quilha

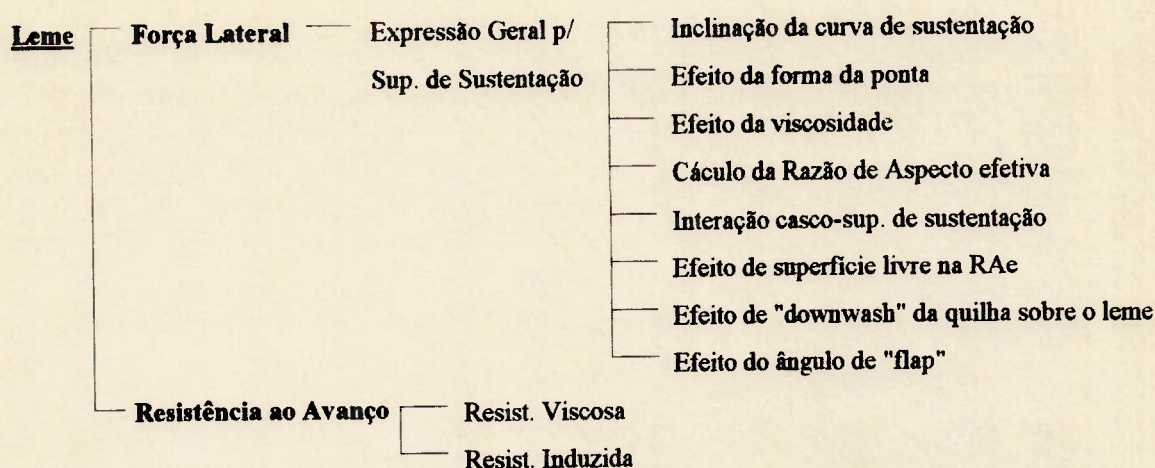


Figura 6.4-C: Diagrama das Forças no Leme

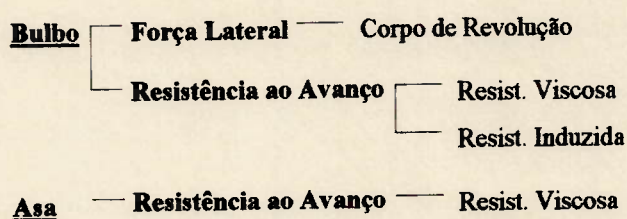


Figura 6.4-D: Diagrama das Forças no Bulbo e Asa

## 6.1. FORÇAS NO CASCO

### 6.1.1. Força Lateral

Devido a forma do casco ser muito arredondada na região abaixo da linha d'água, a existência de um escoamento tridimensional dificulta muito a elaboração de uma formulação abrangente sobre a força lateral que o casco desenvolverá quando navegando com ângulo de deriva. FLAY (1993) em seu trabalho destaca cinco diferentes metodologias e, a partir de testes em túnel de vento, traça comparações e determina faixas de aplicabilidade para cada uma delas. FLAY convencionou chamá-las pelo nome de seus criadores, convenção esta que será seguida neste trabalho. Serão mostradas a seguir as três metodologias que obtiveram melhores resultados nas conclusões de FLAY.



É importante ressaltar que nos trabalhos abordados por FLAY o objetivo final era determinar o valor total da força lateral, ou seja, a soma das contribuições do casco e da quilha. Sendo assim, as formulações procuram calcular a força lateral em cada um destes componentes (casco/quilha) separadamente e depois acrescentar pequenas correções que levem em conta a influência de um sobre o outro. Geralmente este fator de influência é multiplicado pelo valor total da força lateral produzida pela quilha, e nestes casos serão apresentadas no item sobre força lateral na quilha.

#### 6.1.1.1. Nomoto & Tatano

Partindo do pressuposto que um casco fino e profundo (baixos valores de  $Bwl/T_c$ ) possa ser modelado como um corpo de revolução axissimétrico NOMOTO & TATANO apud FLAY (1993) baseiam-se na teoria de corpos finos para determinar a força lateral do casco.

$$FL_c = \frac{1}{2} \rho_{H_2O} V_B^2 (\pi T_c^2) \beta \quad (6.1-A)$$

Onde:

- $FL_c$  = Força lateral do casco
- $\rho_{H_2O}$  = Densidade da água
- $T_c$  = Calado máximo do casco (sem quilha)

A influência do casco sobre a quilha e vice-versa é levada em conta por NOMOTO no cálculo da força da quilha como será mostrado mais adiante.

Esta formulação apresenta bons resultados para cascos com relações entre boca na linha d'água e calado não muito acentuadas e altos valores da relação entre envergadura da quilha/calado do casco (típicos barcos IOR).

### **6.1.1.2. Van Oossanen**

VAN OOSSANEN apud FLAY (1993) prefere modelar o casco por uma placa fina de baixa razão de aspecto (teoria da asa fina) com uma correção não linear para a sustentação.

$$FL_c = \frac{1}{2} \rho_{H_2O} V_B^2 0.78 (\pi T_c^2 \cos\phi + 1.8 A_{lc} \beta) \beta \cos\phi \quad (6.1-B)$$

Este é o único método que leva em conta o efeito da banda de maneira explícita através do termo  $\cos\phi$ , que tanto reduz a razão de aspecto como o ângulo de incidência do fluido (ângulo de ataque), vide figura (6.6).

Apresenta bons resultados para cascos com relações boca/calado mais acentuadas (como os modernos cascos da IMS).

### **6.1.1.3. Gerritsma**

GERRITSMA (1981) não sugere uma formulação para o cálculo da força lateral do casco, mas sim uma série de razões efetivas de aspecto de quilhas em função da razão  $Bwl/T_c$ , boca na linha d'água sobre calado do casco. Desta maneira a força lateral total é calculada como a força da quilha mais a do leme que tem suas envergaduras (e consequentemente suas áreas) aumentadas até a linha d'água de projeto. A área lateral do casco é negligenciada e sua influência sobre a sustentação total desenvolvida pela quilha já é levada em conta na razão de aspecto efetiva sugerida.

Visto a obtenção da força lateral do casco ser toda baseada no cálculo da força da quilha, sua formulação será apresentada no item correspondente do presente capítulo.

Esta metodologia apresenta valores bem razoáveis da força lateral total para cascos com baixos valores para a relação envergadura da quilha/calado do casco, além de ser indicado para cascos mais deslocantes como os da IOR.



### 6.1.2. Resistência ao Avanço

A resistência hidrodinâmica pode ser dividida em seis componentes, sendo três comuns a todas as embarcações: resistência viscosa, resistência de onda e resistência adicional em ondas. Porém, devido a força lateral desenvolvida pelo casco, surgem três outras componentes de força.

A primeira é consequência do ângulo de banda adotado pelo casco que altera as três descritas anteriormente quando achadas na condição sem banda. Esta parcela é chamada de resistência devido a banda.

A segunda parcela é chamada de resistência induzida e surge devido a diferença de pressão entre o dorso e as costas da superfície de sustentação (quilhas, lemes ou casco quando funcionando como tal), fazendo com que a sustentação possua uma componente na direção oposta à do movimento.

E por fim a última das componentes da resistência: aquela devido a atitude do casco. Essa parcela está associada com o descolamento do escoamento no casco devido ao ângulo de deriva e ao ângulo de rotação da quilha, que gerará uma variação em todas as parcelas da resistência descritas anteriormente. Esta parcela atua principalmente quando o casco produz força lateral através do ângulo de deriva.

A partir do exposto acima pode-se definir a resistência do casco como:

$$R_c = R_O + R_{AdO} + R_{V_H} + R_B + R_{I_H} + R_{At} \quad (6.2)$$

Onde:

$R_c$	= Resistência hidrodinâmica do casco
$R_O$	= Resistência de ondas próprias
$R_{AdO}$	= Resistência adicional em ondas
$R_{V_H}$	= Resistência viscosa hidrodinâmica
$R_B$	= Resistência de banda
$R_{I_H}$	= Resistência induzida hidrodinâmica
$R_{At}$	= Resistência devido a atitude do casco

Na maior parte das mareações a resistência de onda é a mais significativa das componentes da resistência ao avanço, seguida da parcela de atrito. Porém, a porcentagem de cada componente sobre a resistência total varia com a velocidade do vento e a mareação como será mostrado no capítulo sete e oito.

### 6.1.2.1. Resistência Viscosa

A resistência viscosa é considerada como a soma da resistência friccional com a resistência de pressão de origem viscosa. A resistência friccional surge devido as forças tangenciais de cisalhamento atuantes ao nível molecular entre as partículas fluidas junto ao casco, leme e quilha e as partículas fluidas ao longe. Já a resistência de pressão de origem viscosa está associada ao crescimento da camada limite, o que origina uma queda de pressão na parte de trás do corpo quando comparado ao bordo de ataque. Este gradiente de pressão traduz-se em uma componente de força com direção oposta a do movimento. Esta força de pressão de origem viscosa é diferente daquela originada pela distribuição de pressão a que um corpo submetido a um escoamento potencial experimentaria.

Desde que a componente de pressão viscosa seja pequena, têm-se para a resistência viscosa atuante no casco do veleiro:

$$(R_{V_H})_c = \frac{1}{2} \rho_{H_2O} \cdot V_B^2 \cdot (C_V)_c \cdot S_c \quad (6.3-A)$$

Com:

$$(C_V)_c = (C_F)_c \cdot (1+k)_c \quad (6.3-B)$$

$$(C_F)_c = \frac{0.075}{(\log(Re)_c - 2)^2} - \frac{1800}{(Re)_c} \quad (6.3-C)$$

$$(Re)_c = \frac{V_B \cdot 0.7Lwl}{\nu} \quad (6.3-D)$$

Onde:

$C_F$  = coeficiente de resistência friccional (ITTC)



- $C_V$  = coeficiente da resistência viscosa  
 $1+k$  = fator de forma tridimensional, que procura levar em conta a resistência viscosa adicional do corpo em relação a placa plana  
 $S_c$  = superfície molhada do casco  
 $Re$  = número de Reynolds  
 $\nu$  = viscosidade cinemática da água

A superfície molhada do casco pode ser obtida por duas formulações diferentes, a de HOLTROP; GERRITSMA apud OOSSANEN (1993) mostradas consecutivamente a seguir:

$$S_c = C_1 \cdot Lwl \cdot (2 \cdot T_c + Bwl) \cdot C_M^{1/2} \quad (6.4-A)$$

Com:

$$C_1 = 0.616C_2 + 0.111C_M^3 + 0.245 \left( \frac{C_2}{C_M} \right) - 0.0228 \quad (6.4-B)$$

$$C_2 = 0.453 + 0.443C_P C_M - 0.286C_M - 0.00347 \left( \frac{Bwl}{T_c} \right) + 0.370C_{wp} \quad (6.4C)$$

Ou ainda:

$$S_c = \left( 1.97 + 0.171 \left( \frac{Bwl}{T_c} \right) \right) \sqrt[3]{\frac{0.65}{C_M}} \sqrt{\nu_c Lwl} \quad (6.5)$$

Onde:

- $C_M$  = coeficiente de secção mestra  
 $C_{wp}$  = coeficiente de linha d'água  
 $\Delta_c$  = deslocamento do casco (sem apêndices)  
 $C_P$  = coeficiente prismático

O fator de forma não procura apenas levar em conta a resistência de pressão viscosa, mas também a parcela de atrito, visto que a força de cisalhamento na camada limite da placa é diferente da de um corpo tridimensional. Um valor médio que pode ser utilizado sem implicar em grandes erros para o fator de forma para cascos de veleiros é 1.09. Entretanto, devido a grande dificuldade em se definir um fator de forma realmente

fidedigno para as diferentes formas de casco deste tipo de embarcações têm-se preferido, ao invés de adotar a resistência viscosa total, calcular apenas a parcela de atrito, considerando que a parcela devido a forma já estaria inclusa na chamada resistência residual. Isto é particularmente verdadeiro quando se adota a série de GERRITSMAN (1981) para o cálculo da resistência, pois o mesmo define através de polinômios a resistência residual de seus modelos, pela subtração da parcela de atrito a partir da resistência total medida.

Quanto ao cálculo do número de Reynolds, duas particularidades devem ser ressaltadas: o fator 0.7 que multiplica o comprimento da linha d'água deve-se ao tipo de perfil normalmente encontrado em embarcações a vela, com um ângulo acentuado na inclinação da roda de proa e corresponde a uma espécie de média para o comprimento. A outra particularidade trata-se do fator  $1800/Re$  que corrige o coeficiente friccional da ITTC. Este fator é utilizado principalmente em embarcações de regata onde os cascos são extremamente polidos e conseqüentemente adiam a transição para o regime turbulento do escoamento sobre as obras vivas.

#### **6.1.2.2. Resistência de Onda**

A velocidade comumente desenvolvida por um veleiro (em condições de orça) implica em números de Froude na faixa entre 0.30 e 0.40, sendo que nestas condições forma-se uma crista de onda na proa e outra na popa, com um cavado a meia-nau. A energia dispendida para formar esta onda é muito grande e fortemente dependente do coeficiente volumétrico ( $Lwl/\nabla_C^{1/3}$ ). Para ilustrar isto desenvolveu-se o exemplo abaixo para uma embarcação sem banda nem deriva:

$$R_c = R_{V_H} + R_O = \frac{1}{2} \rho_{H_2O} V_B^2 C_{Rc} S_c$$

$$C_{Rc} = C_{Fc}(1+k) + C_O$$

Onde:

$R_{V_H}$  = resistência viscosa hidrodinâmica (neste exemplo, a do casco)



$R_O$  = resistência de onda do casco

$R_c$  = resistência total do casco para ângulo de banda e deriva igual a zero

$C_{Rc}$  = coeficiente de resistência total do casco

Comumente costuma-se utilizar para o coeficiente de resistência de onda:

$$C_O = a \cdot Fr^n$$

Onde  $a$  e  $n$  são constantes e  $Fr$  é o número de Froude. Dos gráficos de PROHASKA apud OOSSANEN (1993) têm-se que para muitos modelos de veleiros o valor aproximado de  $n$  é 4 quando o coeficiente variar em uma pequena faixa perto de  $Fr=0.35$ . Pode-se escrever então que:

$$R_O = \frac{1}{2} a \cdot \rho_{H_2O} \cdot V_B^2 \cdot S_c \cdot Fr^4 = \frac{1}{2} a \cdot \rho_{H_2O} \cdot \frac{V_B^6 \cdot S_c}{(g \cdot Lwl)^2}$$

De estudos de cascos semelhante deduz-se que:

$$S_c = C_{S1} \cdot (\nabla_c \cdot Lwl)^{1/2} \text{ ou } S_c = C_{S2} \cdot \nabla_c^{2/3}$$

Lembrando-se que  $(\nabla_c \cdot Lwl)^{1/2} = \nabla_c^{2/3} \cdot (Lwl/\nabla_c^{1/3})^{1/2}$  têm-se que:

$$R_O = \frac{1}{2} a \cdot \rho_{H_2O} \cdot V_B^6 \cdot C_{S1} \frac{(\nabla_c \cdot Lwl)^{1/2}}{(g \cdot Lwl)^2} = \frac{1}{2} \frac{a \cdot \rho_{H_2O} \cdot C_{S1}}{g^2} \frac{V_B^6}{\left(\frac{Lwl}{\nabla_c^{1/3}}\right)^{3/2}}$$

Enquanto que para  $S_c = C_{S2} \nabla_c^{2/3}$  obtém-se:

$$R_O = \frac{1}{2} \frac{a \cdot \rho_{H_2O} \cdot C_{S2}}{g^2} \frac{V_B^6}{\left(\frac{Lwl}{\nabla_c^{1/3}}\right)^2}$$

Portanto se o coeficiente volumétrico crescer de um fator  $f$ , a resistência de ondas cairá em  $1/f^{3/2}$  ou  $1/f^2$ .

Essa é a componente de força que limita a velocidade atingível por um veleiro monocasco deslocante na região de contravento. Para um valor baixo a moderado do

coeficiente volumétrico (5.5) a velocidade em nós gira entre  $2.35\sqrt{Lwl}$  e  $2.70\sqrt{Lwl}$ , com  $Lwl$  em metros. Esta máxima velocidade é chamada de velocidade do casco e não existe fisicamente visto que um incremento na força propulsora sempre resultará em um incremento de velocidade, mas é muitas vezes utilizada como figura de comparação entre veleiros diferentes para aquilatar a performance no contra-vento.

Quanto ao valor quantitativo da resistência de onda, a série Delft têm sido a mais aceita entre a comunidade da arquitetura naval mundial. Isto se deve a seriedade com que essa série tem sido desenvolvida, incrementando-se constantemente o número e o tipo de modelos ensaiados procurando cobrir uma faixa cada vez mais ampla dos adimensionais que definem o casco. Além disto uma séries de outros testes em tanques de prova com os modelos utilizados na série têm sido realizados como por exemplo a determinação da resistência adicional em ondas. Atualmente a série Delft, que foi desenvolvida por GERRITSMA (1981) encontra-se em sua 3ª edição, cobrindo as seguintes faixas de parâmetros:

- Para  $0.125 \leq Fn \leq 0.450$ :

$$3.042 \leq \frac{Lwl}{Bwl} \leq 3.986 \quad ; \quad 2.609 \leq \frac{Lwl}{B} \leq 3.419$$

$$2.41 \leq \frac{Bwl}{T_c} \leq 10.504 \quad ; \quad 0.537 \leq C_p \leq 0.579$$

$$4.453 \leq \frac{Lwl}{\nabla^{1/3}} \leq 7.053 \quad ; \quad -1.254\%Lwl \leq LCB \leq -4.436\%Lwl$$

- Para  $0.475 \leq Fn \leq 0.750$ :

$$3.577 \leq \frac{Lwl}{Bwl} \leq 4.423 \quad ; \quad 3.019 \leq \frac{Lwl}{B} \leq 3.775$$

$$7.04 \leq \frac{Bwl}{T_c} \leq 14.118 \quad ; \quad 0.538 \leq C_p \leq 0.560$$

$$6.779 \leq \frac{Lwl}{\nabla^{1/3}} \leq 7.941 \quad ; \quad -2.365\%Lwl \leq LCB \leq -5.141\%Lwl$$



A separação da faixa de estudo do número de Froude em duas regiões, uma até 0.450 e outra até 0.700 deve-se ao diferente comportamento que o casco apresenta em função da velocidade. Enquanto que para  $Fn \leq 0.450$  o casco apresenta um comportamento basicamente deslocante, para valores mais altos destes adimensionais a embarcação começa a planar, ou seja o comprimento da onda gerada é muito maior que o comprimento da embarcação.

Inicialmente a série Delft continha apenas barcos com características deslocantes, ou seja um baixo valor para o adimensional  $Lwl/\nabla^{1/3}$  e bocas relativamente estreitas em relação ao comprimento de linha d'água e ao calado. A partir destes modelos foi gerado um polinômio que relacionava alguns adimensionais com o valor da resistência. Com o passar dos anos novos modelos foram criados gerando a série Delft II que resultou em uma função da resistência mais abrangente e que foi matida na série Delft III. Este polinômio, que é apresentado na fórmula (6.6) e cujos coeficientes encontram-se tabelados na tabela (6.1), é resultado do estudo de cascos deslocantes e planantes e dever ser utilizada na faixa de número de Froude entre 0.125 e 0.450.

$$R_R = 1000 \cdot \Delta_c \cdot \left[ \begin{array}{l} a_0 + a_1 \cdot C_p + a_2 \cdot LCB + a_3 \cdot \left( \frac{Bwl}{T_c} \right) + a_4 \cdot \left( \frac{Lwl}{\nabla^{1/3}} \right) + a_5 \cdot C_p^2 + \\ a_6 \cdot \left( C_p \cdot \frac{Lwl}{\nabla^{1/3}} \right) + a_7 \cdot LCB^2 + a_8 \cdot \left( \frac{Lwl}{\nabla^{1/3}} \right)^2 + a_9 \cdot \left( \frac{Lwl}{\nabla^{1/3}} \right)^3 \end{array} \right] \quad (6.6)$$

Com a tendência de se projetar barcos não mais para regras (que penalizavam o "rating" de embarcações com bocas muito avantajadas) mas sim para a velocidade pura, a faixa de adimensionais passou a tornar-se pequena, exigindo uma atualização da série com modelos que reproduzissem a tendência dos projetos, e esta tendência apontava para cascos de baixo deslocamento (chamados ULDB's) e altos valores de boca.

Como o resultado dos ensaios em tanques de prova mostravam a diferença de comportamento hidrodinâmico (o planeio), um novo polinômio foi desenvolvido para que se pudesse avaliar a resistência em função dos adimensionais que realmente influíam sobre o comportamento planante da embarcação. Este polinômio, utilizável para cascos

planantes com número de Froude entre 0.475 e 0.700, é apresentado a seguir, e seus coeficientes são apresentados na tabela (6.1):

$$R_R = 1000 \cdot \Delta_c \left[ c_0 + c_1 \cdot \left( \frac{Lwl}{Bwl} \right) + c_2 \cdot \left( \frac{A_{wl}}{\nabla_c^{2/3}} \right) + c_3 \cdot LCB + c_4 \cdot \left( \frac{Lwl}{Bwl} \right)^2 + c_5 \cdot \left( \frac{Lwl}{Bwl} \right) \left( \frac{A_{wl}}{\nabla_c^{2/3}} \right)^3 \right] \quad (6.7)$$

Fn	a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>
	a <sub>5</sub>	a <sub>6</sub>	a <sub>7</sub>	a <sub>8</sub>	a <sub>9</sub>
0.125	-6.7356	38.368	-0.008193	0.055234	-1.9972
	-38.861	0.95659	-0.002171	0.27290	-0.017516
0.150	-0.38287	38.173	0.007243	0.026644	-5.2953
	-39.550	1.2196	0.000052	0.82457	-0.047842
0.175	-1.5035	24.408	0.012200	0.067221	-2.4486
	-31.914	2.2161	0.000074	0.24435	-0.015887
0.200	11.292	-14.519	0.047182	0.085176	-2.67302
	-11.418	5.6541	0.007021	-0.094934	0.006325
0.225	22.179	-49.168	0.086000	0.15073	-2.87868
	7.1671	8.6003	0.012981	-0.32709	0.018271
0.250	25.909	-74.757	0.15352	0.18857	-0.88947
	24.121	10.485	0.025348	-0.85494	0.048449
0.275	40.976	-114.29	0.20723	0.25083	-3.0727
	53.016	13.022	0.035934	-0.71546	0.039874
0.300	45.838	-184.76	0.35703	0.33834	3.8717
	132.26	10.861	0.066809	-1.7192	0.095977
0.325	89.204	-393.01	0.61747	0.46047	11.543
	331.12	8.5981	0.10407	-2.8152	0.15596
0.350	212.68	-1085.1	1.6442	0.53270	-1.2242
	831.14	26.183	0.23880	-2.4505	0.13915
0.400	566.55	-1609.6	2.0161	0.26572	-29.244
	1154.1	51.462	0.28805	-0.17835	0.018446
0.425	743.41	-1708.3	2.4358	0.013553	-81.162
	937.40	115.60	0.36507	1.8390	-0.062023
0.450	1200.6	-2751.7	3.2086	0.25492	-132.04
	1489.3	196.34	0.52823	1.3791	0.013577

Tabela 6.1: Coeficientes Delft Para 0.125 ≤ Fn ≤ 0.450

É importante ressaltar que a série Delft calcula a resistência residual, ou seja a total medida menos a resistência de atrito dada pela formulação da ITTC. Sendo assim não se deve aplicar o fator de forma 1+k para o cálculo do coeficiente viscoso na equação (6.3-B), o que significa que a equação (6.3-A) não calculará mais a resistência viscosa mas



apenas a sua parcela de atrito. Sendo assim, algumas modificações deverão acontecer na equação (6.2) resultanto na equação abaixo para o cálculo da resistência total do casco:

$$R_c = R_R + R_{AdO} + R_A + R_B + R_{I_h} + R_{At} \quad (6.8)$$

Onde

$R_A$  = resistência de atrito

$F_n$	$c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$
0.475	180.10	-31.503	-7.4511	2.1950	2.6986	0.006480
0.500	244.00	-44.526	-11.155	2.1790	3.8574	0.009676
0.525	282.99	-51.520	-12.973	2.2745	4.3437	0.011066
0.550	313.41	-56.583	-14.420	2.3261	4.6904	0.012147
0.575	337.00	-59.190	-16.070	2.4192	4.7668	0.014147
0.600	356.46	-62.854	-16.851	2.4371	5.0788	0.014980
0.625	324.74	-51.313	-15.346	2.3341	3.8554	0.013588
0.650	301.13	-39.796	-15.023	2.0597	2.5457	0.013588
0.675	292.06	-31.853	-15.585	1.8479	1.5699	0.014014
0.700	284.46	-25.146	-16.154	1.7040	0.8179	0.014575
0.725	256.64	-19.319	-13.085	2.1528	0.3483	0.011343
0.750	304.18	-30.115	-15.854	2.8632	1.5244	0.014031

Tabela 6.2 Coeficientes Delft Para  $0.475 \leq F_n \leq 0.700$

### 6.1.2.3. Resistência Adicional em Ondas

A combinação dos movimentos de "pitch", "roll", e "heave" experimentados em mares de proa ou entre o través e a proa ou o movimento de "roll" quando com mar pelo través, algumas vezes combinada com movimentos de "surge", "yaw" e "sway", são considerados a causa principal da resistência adicional em ondas. Na realidade esta resistência é a somatória de diferentes componentes. A primeira e mais importante é a geração de ondas de "damping" devido a movimentação do casco em regime não permanente. Outra parcela se refere a alterações do escoamento e descolamento devido a esses movimentos do casco decorrente da ação das ondas. Uma terceira componente refere-se a transferência de fase entre as ondas incidentes e as ondas "damping" causadas pelo casco. A reflexão e refração de ondas também são associadas com a resistência adicional de ondas. A última parcela, e de menor importância, constitui o acréscimo de

resistência devido as intervenções no leme impostas pelo timoneiro para que a embarcação veleje em linha reta mesmo com a incidência de ondas.

A intensidade do movimento de "pitch" em ondas é altamente influente na resistência adicional. Se for reduzido este movimento, um decréscimo na resistência será sentido de maneira sensível. Outra característica importante é que a resistência adicional é independente daquela em águas calmas, variando porém proporcionalmente com o quadrado da altura de onda.

A máxima resistência adicional ocorre perto ou no ponto de sincronismo do movimento de "pitch" com o da incidência das ondas. Se este ponto ocorre em baixa velocidade, então a curva de resistência total terá um ponto de mínimo e não será possível uma condição de navegação em regime permanente nesta região de velocidade, devido principalmente a variação da força propulsora das velas com o movimento de "pitch" do veleiro.

Quando o mar incidir pela popa, um acréscimo de velocidade será sentido e a embarcação tenderá a surfar onda abaixo atingindo altas velocidades. Isto ocorrerá com ondas de comprimento maior que cinco vezes o comprimento da embarcação, baixa frequência e embarcações com coeficiente volumétrico maior que seis. Em ondas de alta frequência pela popa, um acréscimo da resistência será sentido.

Infelizmente um estudo mais detalhado e quantitativo da resistência adicional de ondas com resultados conclusivos ainda não está disponível para a comunidade científica. Estas informações são resultado de pesquisas em torno de embarcações doze metros internacional ou IACC ("International America's Cup Class") e são matidas em sigilo devido a grande importância desta parcela da resistência na resistência total em contra-vento, situação que uma embarcação enfrenta em mais de 50% do trajeto da Copa América. Sendo assim o modelo desenvolvido neste trabalho para o cálculo da resistência ao avanço levará em conta apenas o comportamento em águas calmas.



#### 6.1.2.4. Resistência Devido a Banda

A resistência devido ao ângulo de banda surge devido a somatória de mudanças nas componentes viscosa, de onda e adicional de ondas da resistência. Seu valor é obtido experimentalmente através da extrapolação dos resultados obtidos com banda e deriva, para uma condição de força lateral nula, não se levando em conta desta maneira a resistência induzida. Traduzindo: a resistência de banda é obtida subtraindo-se da resistência total para a condição de força lateral nula a resistência equivalente medida na condição sem banda e força lateral.

Em alguns casos a resistência devido a banda pode ser negativa. Isto normalmente ocorre com embarcações com mais de vinte graus de banda e pouca borda livre, e é causada por uma diminuição da superfície molhada (e consequentemente da resistência friccional) sem um aumento expressivo nas outras parcelas da resistência associada com o escoamento sobre o casco.

Duas formulações diferentes e que geram resultados não concordantes são sugeridas por OOSSANEN (1993), sendo a primeira fruto de suas próprias experimentações e restritas ao número de Froude entre 0.25 e 0.40. A segunda formulação é a da série Delft III e é válida para toda a faixa de número de Froude desta série (entre 0.125 e 0.750). Como o valor da resistência de banda é algumas ordens de grandeza menor que parcelas como a resistência induzida ou de ondas, pode-se admitir algum erro, mesmo que um pouco acentuado, nos cálculos que o erro total na resistência do casco não comprometerá o resultado final. A seguir apresenta-se as equações de OOSSANEN (6.9) e GERRITSMA apud OOSSANEN (1993) (6.10) para a resistência de banda.

$$R_B = \frac{1}{2} \rho_{H_2O} \cdot V_B^2 \cdot S_c \cdot \phi \cdot \left( 0.000891 F_N \cdot \left( \frac{Bwl}{T_c} \right) + 0.004267 \phi^2 \cdot \left( \frac{Bwl}{T_c} \right) - 0.003142 \right) \quad (6.9)$$

$$R_B = \frac{1}{2} \rho_{H_2O} \cdot V_B^2 \cdot S_c \cdot \phi \cdot F_N^2 \cdot \left( 0.006747 \left( \frac{T_c}{T_{má}} \right) + 0.002517 \left( \frac{Bwl}{T_c} \right) + 0.003710 \left( \frac{T_c}{T_{má}} \right) \left( \frac{Bwl}{T_c} \right) \right)$$

(6.10)

#### **6.1.2.5. Resistência Devido a Atitude do Casco**

Observa-se que a resistência associada com a geração da força lateral, quando calculada através da subtração dos valores da resistência sem banda total da resistência para um determinado ângulo de banda na mesma velocidade, não é igual a soma da resistência devido a banda com a resistência induzida.

Para valores de deriva maiores que oito graus e com o crescimento da relação boca-calado, o escoamento ao longo do casco gera uma grande resistência viscosa, enquanto a resistência de onda (e a adicional de ondas) também sofrem mudanças. Frequentemente ocorre separação do escoamento junto ao corpo nestas condições. Desta maneira torna-se necessário considerar o efeito da resistência devido a atitude do casco e apêndices requerida para a geração da sustentação além da resistência induzida de primeira e segunda ordens ( $R_I$  e  $R_{I\alpha 2}$ ).

Como em geral uma embarcação só atinge valores tão altos de deriva durante manobras como cambar ou arribar, costuma-se negligenciar o cálculo desta parcela da resistência para o computo da velocidade final da embarcação. Se porém um estudo mais detalhado da manobrabilidade do veleiro for necessário, esta parcela não poderá ser desprezada e deverá ser quantificada.

#### **6.1.2.6. Resistência Induzida**

A sustentação em um corpo como uma quilha, leme ou casco é gerada pelo desvio do fluxo ao incidir com um determinado ângulo de ataque sobre este corpo. A diferença de pressão entre o dorso e as costas do corpo resultará em uma circulação que traduz-se em uma força aproximadamente perpendicular com a resultante de velocidades do escoamento no corpo. Esta resultante de velocidades não é coincidente com a velocidade do escoamento ao longe, visto que nas proximidades do corpo a circulação reduzirá o ângulo de incidência do fluido, gerando um ângulo de ataque efetivo que é denominado ângulo induzido (figura 6.5).



A partir disto define-se a sustentação como a componente da força perpendicular ao escoamento no infinito o que resultará em  $L = F_{RES} \cos \alpha_i$ . Devido a diferença entre os valores do ângulo de ataque e do ângulo induzido, a resultante apresentará uma componente na direção do escoamento que será chamada de resistência induzida e é dada através de transformações trigonométricas por  $R_I = F_{RES} \sin \alpha_i = L \tan \alpha_i$ . Ela é chamada de resistência induzida por estar associada ao ângulo de escoamento induzido que causa a resultante de forças.

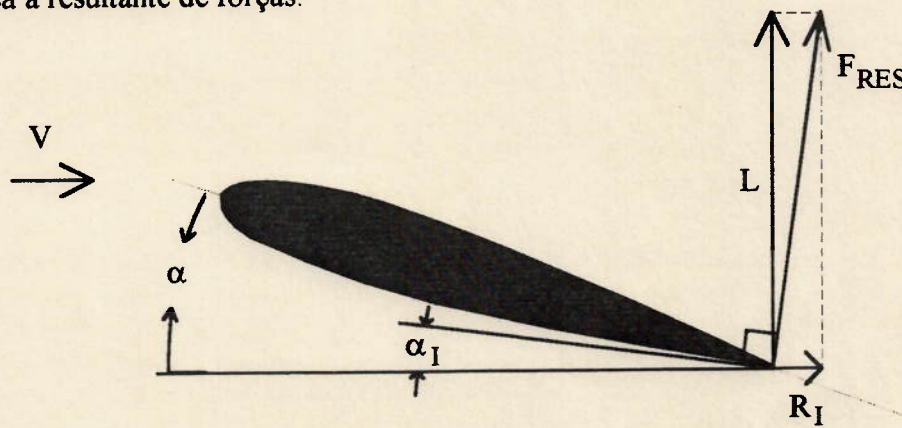


Figura 6.5: Fólio Sujeito a Escoamento Com Ângulo de Ataque

O ângulo de ataque induzido dado para um corpo genérico sujeito a incidência do fluido sobre um ângulo  $\alpha$  (figura 6.5) é dado aproximadamente por:

$$\alpha_i = \frac{C_L(1+\sigma)}{\pi A R_e}$$

Ocasionalmente para pequenos valores de  $\alpha_i$

$$R_I = L \tan \alpha_i = L \alpha_i = \frac{1}{2} \rho V^2 A_L \frac{C_L^2(1+\sigma)}{\pi A R_e}$$

Onde:

- $R_I$  = resistência induzida
- $A_L$  = área lateral do corpo (produto da corda média pela envergadura)
- $C_L$  = coeficiente de sustentação
- $1+\sigma$  = fator de correção para a distribuição de sustentação não elíptica

$AR_e$  = razão de aspecto efetiva (geralmente o dobro da razão de aspecto geométrica)

Segue-se daí que a resistência é uma função que varia com o quadrado da sustentação, conseqüentemente com o quadrado do ângulo de ataque, enquanto a sustentação é proporcional ao ângulo de ataque.

O ângulo de banda apenas tem influência sobre a resistência induzida através do efeito sobre a razão de aspecto efetiva da superfície de controle e do fator  $(1+\sigma)$ .

Aplicando-se a breve introdução teórica acima exposta para a força de sustentação desenvolvida pelo casco pode-se calcular a sua resistência induzida através da fórmula (6.11-A).

$$(R_i)_c = \left( \frac{FL_c}{\cos\phi} \right)^2 \cdot \frac{(1+\sigma)_c}{\frac{1}{2} \rho_{H_2O} \cdot V_B^2 \cdot (A_L)_c \cdot \pi \cdot (AR_e)_c} \quad (6.11-A)$$

O efeito da distribuição não elíptica da sustentação  $(1+\sigma)$  é sugerido por OOSSANEN (1993) para moderados valores da razão de aspecto e da relação corda na ponta/corda na raiz ("taper ratio") como:

$$1+\sigma = 1 + AR_e (0.012 - 0.05TR + 0.095TR^2 - 0.04TR^3) \quad (6.11-B)$$

Onde

$TR$  = é a relação entre a corda na ponta e a corda na raiz da superfície de sustentação e é conhecida como "taper ratio".

A determinação dos valores do "taper ratio" e da razão de aspecto efetiva do casco não é simples de se obter de maneira teórica, por isto adota-se valores resultantes de ensaios com modelos.

$$(AR_e)_c = \frac{2T_c}{0.75Lwl} \quad (6.11-C)$$

$$(TR)_c = 0.3 \quad (6.11-D)$$



Estes valores apresentam uma razoável concordância com a grande maioria dos tipos de casco de veleiros, porém se uma análise mais precisa se fizer necessária outros métodos para a obtenção destes parâmetros deverão ser utilizados.

## 6.2. FORÇAS NA QUILHA

Tanto a quilha como o leme serão tratados como superfícies de sustentação, e para isto seguirão a nomenclatura que define-se a seguir baseada na figura (6.6).

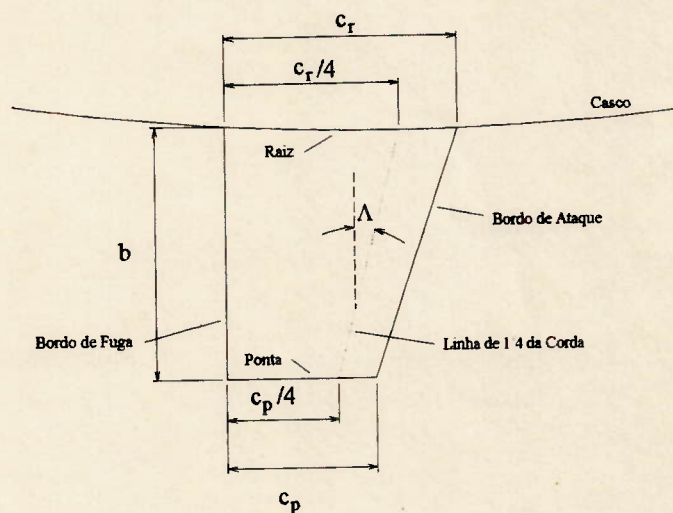


Figura 6.6: Nomenclatura Para Superfície de Sustentação

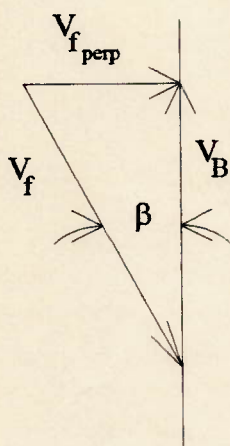
Onde:

- $C_r$  = corda na raiz
- $C_p$  = corda na ponta
- $b$  = envergadura
- $\Lambda$  = ângulo de caimento
- $q$  = subíndice para designar grandezas referentes à quilha
- $l$  = subíndice para designar grandezas referentes ao leme

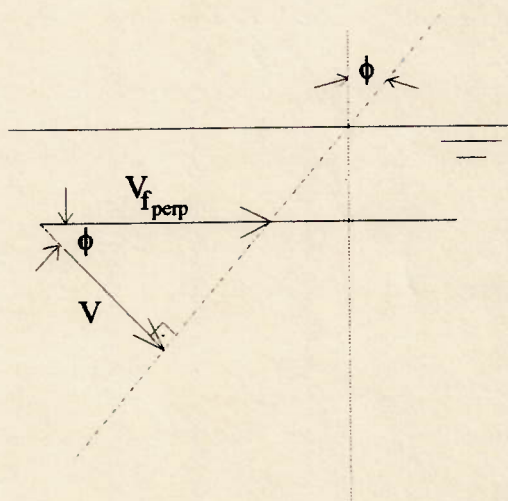
Outra observação a ser feita antes de se iniciar o estudo das forças atuantes sobre a quilha é a determinação do ângulo efetivo de escoamento do fluido sobre a mesma. Devido ao ângulo de banda algumas correções devem se feitas na direção do fluxo a fim de se determinar a correta direção das forças resultantes hidrodinâmicas.

Este ângulo de incidência do fluido sobre a quilha, principal produtora da força lateral, é  $\beta \cos(\phi)$  para valores pequenos de  $\beta$  (precisamente  $\arctan(\tan(\beta)\cos(\phi))$ ), como mostra a figura 6.7.

No plano horizontal



No plano vertical



$$\tan\beta = \frac{V_{f\_perp}}{V_B}$$

$$V_{f\_perp} = V_B \tan\beta$$

$$\cos\phi = \frac{V}{V_{f\_perp}}$$

$$V = V_{f\_perp} \cos\phi$$

$$V = V_B \tan\beta \cos\phi$$

Fig.6.7: Ângulo de Incidência Efetivo do Fluido

Onde:

$V_f$  = velocidade do fluido

$V_{f\_perp}$  = parcela no plano horizontal da velocidade do fluido perpendicular a velocidade da embarcação

$V$  = velocidade efetiva do fluido perpendicular a superfície de sustentação



### 6.2.1. Força Lateral

Assim como no cálculo da força lateral no casco, o trabalho de FLAY (1993) será utilizado como referência para a determinação da força lateral gerada pela quilha. Serão apresentadas as metodologias de Nomoto & Tatano, Van Oossanen e Gerritsma, com apenas uma observação. Como Flay baseou sua pesquisa em um trabalho de Oossanen de 1981, preferiu-se apresentar as conclusões mais recentes de Oossanen publicadas em 1993 por serem mais abrangentes e descrever mais detalhadamente os apêndices.

#### 6.2.1.1. Nomoto & Tatano

Tatano calcula a força lateral total modelando o casco como um corpo fino, adicionando a força gerada por uma quilha finita que se estende até a linha d'água. Sendo assim a força gerada apenas pela quilha será dada por:

$$FL_q = \frac{1}{2} \rho_{H_2O} \cdot V_B^2 \cdot (A'_L)_q \left[ \frac{C_L \cdot AR'_e \cdot \beta}{\cos \Lambda \cdot \sqrt{\frac{AR_e'^2}{\cos^4 \Lambda} + 4 + \frac{C_L}{\pi}}} \right] \cos^2 \phi \quad (6.12)$$

Onde:

- $C_L$  = coeficiente de sustentação bidimensional da secção
- $AR'_e$  = razão de aspecto efetiva, definida como o dobro da geométrica, com a envergadura estendida até a linha d'água
- $A'_L$  = área lateral da quilha com a envergadura estendida até a linha d'água

#### 6.2.1.2. Van Oossanen

O método de OOSSANEN (1993) é o que melhor descreve a superfície de sustentação (quilha ou leme), levando em conta todos os fatores apresentados nos

diagramas das figuras 6.4-B e 6.4-C. Como se obtêm estes fatores é o objetivo deste item.

A componente horizontal da força gerada por uma superfície de sustentação é dada, segundo OOSSANEN (1993) pela equação geral 6.13:

$$(FL)_q = \frac{1}{2} \rho_{H_2O} \cdot V_B^2 \cdot \left( (C_{L_{\alpha^2}})_q \cdot \left( \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \right)_q \cdot \beta \cdot \cos \phi \cdot (L_{c_n})_q \cdot L_{B_n} + (C_{L_{\alpha^2}})_q \cdot (\beta \cdot \cos \phi)^2 \right) (A_L)_q \cdot \cos \phi$$

(6.13)

Onde:

- $(FL)_q$  = força lateral total desenvolvida pela quilha no plano horizontal
- $(C_{L_{\alpha^2}})_q$  = coeficiente dependente da forma da ponta da quilha
- $\left( \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \right)_q$  = tangente da curva do coeficiente de sustentação pelo ângulo de ataque para quilha
- $(L_{c_n})_q$  = fator de interação do casco sobre o escoamento na quilha
- $L_{B_n}$  = fator de interação do bulbo sobre o escoamento na quilha
- $C_{L_{\alpha^2}}$  = constante relacionada à sustentação não linear
- $(A_L)_q$  = área lateral da quilha, igual a envergadura multiplicada pela corda média

Expressão similar pode ser achada para qualquer apêndice com ângulo de ataque apropriado (menores que oito graus) e com razão de aspecto não muito baixa, pois neste caso  $\partial C_L / \partial \alpha$  é linear, concluindo-se que a força lateral pode ser considerada linear com o ângulo de deriva na quilha e leme nestas condições. Quando a razão de aspecto possui valores baixos, ocorre um significativo efeito não linear na sustentação, aqui representado pelo coeficiente  $C_{L_{\alpha^2}}$ .

A influência do casco sobre a quilha e leme não é desprezível, sendo função da relação L/B, B/T, ângulo de fundo do casco, ângulo de banda e do padrão de ondas formados pelo casco, e normalmente é sentida por um incremento na força lateral de ambos (casco e apêndices) quando calculados separadamente. Se o ângulo de banda for

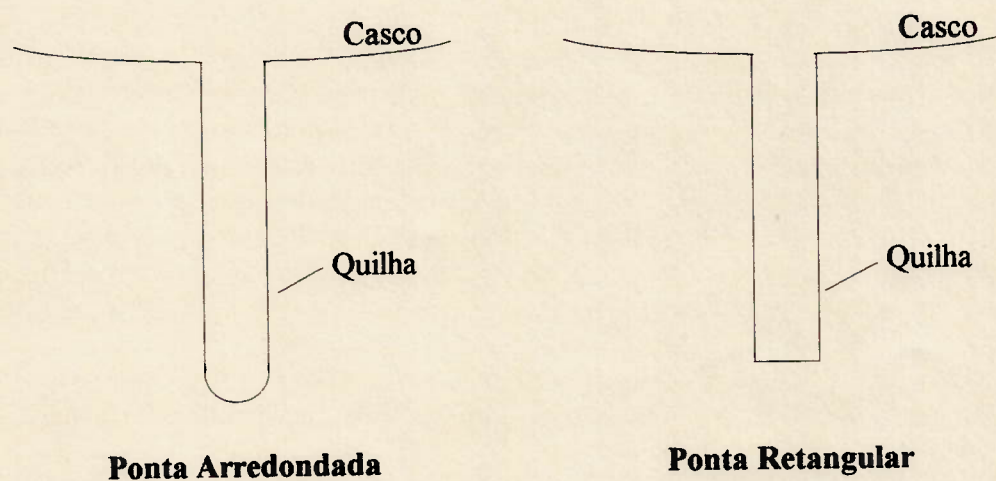


muito acentuado este incremento será menor. Da mesma maneira o bulbo (quando presente) também modificará o escoamento junto a quilha, influenciando o valor final da sustentação.

#### 6.2.1.2.1. Efeito da Forma da Ponta

A fuga do escoamento na extremidade da superfície de sustentação, como descrito no item anterior, é uma das principais razões de perda de eficiência do fólio, e a sua eliminação tem sido motivo de muitas das atuais pesquisas na área de hidrodinâmica de quilhas.

Soluções mais simples do que a adoção de asas na ponta da quilha têm sido adotadas para embarcações de recreio e regata como por exemplo a adoção de diferentes tipos de ponta. Neste trabalho serão enfocados apenas dois tipos, as arredondadas e as retangulares como pode ser visto na figura (6.8).



OBS: Cortes transversais na região da quilha

Figura 6.8: Tipos de Pontas de Quilha

WHICKER e FEHLER (1958) sugerem os valores de  $C_{L\alpha\text{Ponta}}$  e  $c_{L\alpha 2\text{Ponta}}$  (efeito da ponta sobre a sustentação proporcional ao quadrado do ângulo de ataque) para pontas de superfície de sustentação:

- Retangulares

$$C_{L_{\alpha 2\text{Ponta}}} = 1.00 \quad (6.14-A)$$

$$c_{L_{\alpha 2\text{Ponta}}} = 1.60 \quad (6.14-B)$$

- Arredondadas

Ou seja, o dorso e as costas são ligados por arcos de círculo com  $RA_e$  maior que 0.75:

$$C_{L_{\alpha 2\text{Ponta}}} = 1 - \frac{0.135}{AR_e^{2/3}} \quad (6.14-C)$$

$$c_{L_{\alpha 2\text{Ponta}}} = 0.70 \quad (6.14-D)$$

#### 6.2.1.2.2. Inclinação da Curva de Sustentação por Ângulo de Ataque na Sua Parte Linear

A expressão desenvolvida por WHICKER e FEHLER (1958) parte da teoria de sustentação para corpos bidimensionais, acrescentando fatores ligados a tridimensionalidade do escoamento como o ângulo de caimento e a razão de aspecto do fólio. Para razões de aspecto relativamente baixas e pequenos ângulos de ataque (até oito graus) a curva é praticamente uma reta e sua inclinação é dada por sua tangente.

A fórmula final foi obtida a partir de resultados experimentais e é apresentada na equação (6.15).

$$\frac{\partial C_L}{\partial \alpha} = \frac{2\pi k_s AR_e}{2k_s + \cos \Lambda \left( \frac{AR_e^2}{(\cos \Lambda)^4} + 4 \right)^{1/2}} \quad (6.15)$$

Onde:

$k_s$  = fator que leva em conta a influência da viscosidade na inclinação da curva de sustentação com o ângulo de ataque para escoamentos bidimensionais

$\Lambda$  = ângulo de caimento da superfície de sustentação em relação a linha de 1/4 da corda.



Caso o ângulo de caimento não seja constante ao longo da envergadura, um valor médio deverá ser adotado.

#### 6.2.1.2.3. Efeito da Viscosidade na Inclinação da Curva de Sustentação

O efeito da viscosidade em escoamentos bidimensionais para a curva de sustentação é sugerido por OOSSANEN (1981) e é dado aproximadamente por:

$$k_s = 1 + 0.82 \left( \frac{t}{c} \right) - \tan \tau \cdot \left( \frac{0.117}{\left( \frac{t}{c} \right)} + 3.2 \left( \frac{t}{c} \right) + 3.9 \left( \frac{t}{c} \right)^2 \right) \quad (6.16)$$

Onde:

$\frac{t}{c}$  = relação entre a espessura máxima e a corda média da superfície de sustentação

$\tau$  = metade do ângulo do bordo de fuga da superfície de sustentação

#### 6.2.1.2.4. Cálculo do Valor do Raio de Aspecto Efetivo

Quando a região onde a superfície de sustentação se prende ao casco é plana e ortogonal a mesma, considera-se a razão de aspecto efetiva como sendo o dobro da geométrica.

$$AR_e = 2 \frac{b}{c} \quad (6.17)$$

Onde:

$b$  = é a envergadura da superfície de sustentação medida no local onde a linha de 1/4 da corda intercepta a ponta

$c$  = corda média

A colocação de asas, bulbos ou placas terminais na ponta da superfície de sustentação incrementa consideravelmente a razão de aspecto da mesma. O valor mais preciso da razão de aspecto efetiva, inclinação da curva de sustentação e resistência

induzida para uma configuração de geometria complexa pode ser obtida através do uso de CFD's. Em situações em que isto não é possível ou que uma estimativa destes valores é aceitável, o efeito destes apêndices poderá ser levado em conta através de um incremento no valor da área lateral. Para asas ou placas terminais pode-se escrever que a envergadura efetiva é aproximadamente:

$$b_{eq} = b_q + b_{asa} \left( \frac{C_{R_{asa}}}{C_{P_q}} \right)^{1/2} \quad (6.18-A)$$

Onde:

$b_q$  = envergadura da quilha medida da sua parte superior até o encontro com as asas, excetuando-se o arredondamento na região do encontro

$b_{asa}$  = envergadura da asa medida na face superior ao longo da linha de 1/4 da corda

$C_{R_{asa}}$  = comprimento da corda na raiz da asa

$C_{P_q}$  = comprimento da corda na ponta da quilha

Se ao invés de uma asa, a quilha possuir um bulbo em sua extremidade inferior, a envergadura efetiva será dada por:

$$b_{eq} = b_q + 0.2h_B \quad (6.18-B)$$

Onde:

$h_B$  = máxima altura vertical do bulbo assumindo que a mesma esteja situada próxima da localização da linha de 1/4 da corda da quilha na ponta.

Estas formulações são valores aproximados baseados em resultados experimentais de algumas configurações estudadas por OOSSANEN. Configurações muito diferentes deverão ser avaliadas de maneira mais precisa.



### 6.2.1.2.5. Efeitos de Interação Entre Casco/Bulbo e a Superfície de Sustentação

Ensaio para a determinação do coeficiente de sustentação, mesmo quando realizados para superfícies de envergadura finita, costumam fixá-las em posição ortogonal, que funcionando de maneira similar a uma placa terminal, induz um escoamento bidimensional na raiz da superfície de sustentação. Como em geral o casco não apresenta um fundo totalmente plano, na realidade a quilha induz uma certa força adicional lateral sobre a quilha.

A partir de resultados empíricos procurou-se deduzir a influência do casco sobre a sustentação da quilha e vice-versa, o adicional de sustentação que a quilha induz no casco.

Primeiramente calcula-se um calado efetivo na região influenciada pela quilha:

$$\left(T_{c_{e1}}\right)_q = 0.53 (c)_q \cdot \sin(\alpha_c)_q \quad (6.19-A)$$

Onde:

$\alpha_c$  = ângulo de fundo do casco na posição da linha de um quarto de corda da superfície de sustentação, relativo ao ponto na superfície do casco tomado a uma distância de metade da corda ao longo do contorno a partir da intersecção da superfície com o casco

A seguir calcula-se o calado no local levando-se em conta a onda desenvolvida pela embarcação. Este segundo calado é dado pela equação (6.19-B).

$$\left(T_{c_{e2}}\right)_q = \left(T_c\right)_q - 0.75Fn^4 \cdot \left( Lwl \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot x_q}{Lwl}\right) \right) \quad (6.19-B)$$

Onde:

$\left(T_c\right)_q$  = calado do casco no ponto da linha de um quarto de corda da quilha

$x_q$  = posição da linha de um quarto de corda da quilha medida a partir do encontro da roda de proa com a linha d'água

Entre estes dois resultado sai um calado efetivo que é dado pelo seguinte teste lógico: se  $(T_{c_2})_q > (T_{c_1})_q$  então  $(T_c)_q = (T_{c_1})_q$ , senão  $(T_c)_q = (T_{c_2})_q$ . A partir disto pode-se definir uma envergadura efetiva que seria a soma da envergadura da superfície de sustentação com este novo calado calculado, e também uma relação entre esta envergadura efetiva e a razão de aspecto geométrica na equação (6.19-C).

$$(\gamma_c)_q = \frac{(b_q + (T_c)_q)}{b_q} \quad (6.19-C)$$

Trabalhos posteriores indicaram que apenas o ângulo de fundo não descrevia bem a interação entre casco e quilha, e novas relações tiveram que ser desenvolvidas, levando em conta algumas outras dimensões do casco como o comprimento e a boca na linha d'água. As equações (6.19-D) e (6.19-E) introduzem estes parâmetros bem como o ângulo de banda e o número de Froude num fator de geometria do casco.

$$L_{c_{fn(geom)1}} = Fn^2 \cdot \left[ \frac{5.935}{\left(\frac{Bwl}{T_c}\right)^{1/4}} + 0.01357 \left(\frac{Bwl}{T_c}\right) - \frac{11.02}{\left(\frac{Bwl}{T_c}\right)^2} \right] - 0.003517 \left(\frac{Lwl}{Bwl}\right)^2 + \quad (6.19-D)$$

$$0.6698 \left(\frac{Bwl}{T_c}\right) + (8.526 \times 10^{-8}) \cdot \left(\frac{Lwl}{Bwl}\right)^2 \cdot \left(\frac{Bwl}{T_c}\right)^4 - 0.08376$$

$$L_{c_{fn(geom)2}} = 1.165 - 0.1063 \left(\frac{Lwl}{Bwl}\right) \cdot Fn + 2.639 Fn \cdot \phi^2 + \quad (6.19-E)$$

$$0.0001885 \left(\frac{Bwl}{T_c}\right)^4 \cdot Fn^2 \phi^3 - 6.0953 Fn \cdot \phi^3 - 0.09898 \left(\frac{Bwl}{T_c}\right) \cdot \phi$$

Finalmente o fator de interação total entre o casco e a quilha é obtido pela combinação das equações acima pela fórmula apresentada a seguir:

$$(L_{c_n})_q = \left( \frac{0.3125}{Fn^2} + (1 + (\gamma_c)_q)^2 - 4 \right) \cdot L_{c_{fn(geom)1}} \cdot L_{c_{fn(geom)2}} \quad (6.20)$$



A interação entre o bulbo e a quilha é muito mais simples devido a não interferência da superfície livre na extremidade inferior da mesma quando esta é profunda o suficiente.

$$L_{b_n} = \left(1 + \frac{0.4h_b}{b}\right)^2 \quad (6.21)$$

A última observação a ser feita é que estas fórmulas foram desenvolvidas apenas para o número de Froude entre 0.25 e 0.40, não devendo ser aplicada em outras condições de velocidade.

#### 6.2.1.2.6. Efeito Não Linear na Sustentação

Quando a razão de aspecto de uma superfície de sustentação é relativamente baixa uma porcentagem significativa do escoamento tende a passar da região de alta para a de baixa pressão em suas extremidades, diminuindo a eficiência na geração da força de sustentação e modificando o caráter linear que a mesma apresenta em função do ângulo de ataque em fólios de envergadura infinita.

Uma correção no valor da inclinação da curva de sustentação em função do ângulo de ataque deverá ser feita pois a formulação adotada para a obtenção da sustentação é baseada em um escoamento bidimensional (que realmente acontece em superfícies de envergadura muito grande em relação à corda), não levando em conta a tridimensionalidade do fluxo devido ao escoamento cruzado. Esta correção é inserida no modelo matemático através do fator  $C_{L_{\alpha 2}}$ .

Como demonstrado por WHICKER e FEHLNER (1958) a definição do coeficiente  $C_{L_{\alpha 2}}$  é função da razão de aspecto, da forma da ponta e da relação entre a corda na ponta e na raiz. A fórmula para a obtenção deste coeficiente é dada a seguir:

$$C_{L_{\alpha 2}} = \frac{c_{L_{\alpha 2 \text{ Ponta}}} TR + 0.1}{AR_e} \quad (6.22)$$

Onde:

$c_{L_{ca 2Ponta}}$  = coeficiente dependente do formato da ponta da superfície de sustentação

#### 6.2.1.2.7. Efeito do Ângulo de "Flap"

Muitas embarcações a vela atualmente (principalmente na Copa América) procuram incrementar sua performance no contra-vento (aumento da velocidade ótima) com uma redução do ângulo de deriva total. Como o montante da força lateral a ser gerada pelas obras vivas não muda, pois é função das forças aerodinâmicas, a redução do ângulo de deriva deve ser compensada de alguma maneira. A forma encontrada pelos engenheiros navais foi a adoção de "flaps" na quilha e algumas vezes até no leme. Com isto consegue-se uma força lateral hidrodinâmica adicional sem acarretar num aumento da resistência, e a embarcação consegue seguir num rumo mais direto para a bóia nas maréações de contravento.

A formulação adotada para o cálculo da força lateral adicional devido a um ângulo no "flap" é mostrada a seguir:

$$(\Delta FL)_q = \frac{1}{2} \rho_{H_2O} \cdot V_B^2 \cdot (A_L)_q \cdot \cos \phi \cdot L_{cr} \cdot \left( \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \right)_q \cdot \left( \frac{\partial \alpha}{\partial \delta} \right)_q \cdot \delta \cdot \cos \phi \quad (6.23-A)$$

Onde:

$(\Delta FL)_q$  = força adicional lateral na quilha devido ao ângulo de "flap"

$\delta$  = ângulo de "flap" medido a partir da linha de centro da embarcação

$\left( \frac{\partial \alpha}{\partial \delta} \right)_q$  = fator de efetividade do "flap", ou fator de inclinação da curva do ângulo de ataque com o ângulo de "flap"

O fator de efetividade é sugerido por HOERNER apud OOSSANEN (1993).

$$\left( \frac{\partial \alpha}{\partial \delta} \right)_q = \left( \left( \frac{\partial \alpha}{\partial \delta} \right)_{th} \right)_q \cdot k_{sf_q} \cdot \cos \Lambda_d \quad (6.23-B)$$



Onde:

$\left(\frac{\partial\alpha}{\partial\delta}\right)_{th}$  = valor teórico bidimensional para o fator de efetividade do "flap"

$k_{sf_q}$  = efeito da viscosidade relativo ao fator de efetividade do "flap"

$\Lambda_d$  = ângulo de caimento do bordo de ataque do "flap"

O valor teórico bidimensional do fator de efetividade é dado por SCHLICHTING apud OOSSANEN (1993) na fórmula (6.23-C).

$$\left(\left(\frac{\partial\alpha}{\partial\delta}\right)_{th}\right)_q = \frac{2}{\pi} \left( E_q \cdot \sqrt{1-E_q} + \arcsin(\sqrt{E_q}) \right) \quad (6.23-C)$$

Onde:

$E$  = relação entre a área do "flap" e a área total da superfície de sustentação (incluindo o "flap")

O fator de viscosidade deve ser levado em conta através da relação abaixo:

$$k_{sf_q} = 0.75 + 0.25E_q^{0.1} - 7.35(1-E_q^{0.1}) \cdot \tan\tau \quad (6.23-D)$$

### 6.2.1.3. Gerritsma

Como já descrito no cálculo da força lateral do casco, pelo método de GERRITSMA apud FLAY (1993) calcula-se apenas uma força lateral que é dada pela quilha com sua área estendida até a linha d'água e com uma razão de aspecto que é tabulada em função da relação entre a boca e o comprimento na linha d'água presente em GERRITSMA (1981).

A partir de resultados experimentais e fazendo uso da formulação de WHICKER (1958), GERRITSMA sugere que a força lateral total seja dada pela equação (6.25).

$$FL_{q+c+l} = FL_{TH} = \frac{1}{2} \rho_{H_2O} \cdot V_B^2 \cdot (A'_L)_q \cdot \left[ \frac{5.7 \cdot AR_{Gerr} \cdot \beta}{1.8 + \cos\Lambda \cdot \sqrt{\frac{AR_{Gerr}^2}{\cos^4\Lambda} + 4}} \right] \quad (6.25)$$

Onde:

$AR_{Gerr}$  = razão de aspecto sugerida por Gerritsma levando em conta a influência do casco.

Como todos os modelos da série Delft foram testados com leme, esta formulação já fornece o resultado da força lateral total hidrodinâmica. Porém se um leme diferente daquele ensaiado quiser ser testado pelo engenheiro é necessário descontar a força do leme na equação acima e introduzir o seu próprio valor.

### 6.2.2. Resistência ao Avanço

As forças desenvolvidas pela quilha no sentido do deslocamento da embarcação e que vão contribuir para a resistência total são basicamente duas: a resistência viscosa e a resistência induzida. Devido a distância entre a parte superior da quilha e a superfície livre, seja pelo calado profundo do casco, seja pela meia boca, ser relativamente grande, pode-se negligenciar a contribuição da mesma para a resistência de ondas.

#### 6.2.2.1. Resistência Viscosa

A resistência viscosa da quilha é calculada de maneira tradicional como a resistência viscosa de uma asa. O equacionamento necessário é apresentada nas equações (6.26-A) à (6.26-D).

$$(R_{V_H})_q = \frac{1}{2} \rho_{H_2O} \cdot V_B^2 \cdot (C_V)_q \cdot 2(A_L)_q \quad (6.26-A)$$

Com:

$$(C_V)_q = (C_F)_q \cdot (1+k)_q \quad (6.26-B)$$

$$(C_F)_q = \frac{0.075}{(\log(Re)_q - 2)^2} - \frac{1800}{(Re)_q} \quad (6.26-C)$$

$$(Re)_q = \frac{V_B \cdot c_q}{\nu} \quad (6.26-D)$$



Onde:

$c_q$  = corda média da quilha (média aritmética entre a corda na raiz e a corda na ponta)

O fator de forma é dado por HOERNER apud OOSSASNEN (1993) para dois tipos de perfis de asa. O primeiro para asas com sua espessura máxima bem avante como os NACA-4 dígitos é apresentado na equação (6.26-E). Já para perfis com a espessura mais a ré como os NACA 63, 64, 65 e 66 o fator de forma é dado pela equação (6.26-F).

$$(1+k) = 1 + 2\left(\frac{t}{c}\right) + 60\left(\frac{t}{c}\right)^4 \quad (6.26-E)$$

$$(1+k) = 1 + 1.2\left(\frac{t}{c}\right) + 70\left(\frac{t}{c}\right)^4 \quad (6.26-F)$$

Onde:

$t$  = máxima espessura da superfície de sustentação

$c$  = corda máxima da superfície de sustentação

### **6.2.2.2. Resistência Induzida**

A resistência induzida devido a sustentação de corpos que possuam uma importante parcela não linear com o ângulo de ataque (normalmente aqueles com  $RA_e < 5$ ) é em parte calculado com a expressão da resistência induzida associada com a sustentação linear. Hoerner mostra que nestes casos há um termo que varia linearmente com o ângulo de ataque (associado ao escoamento em uma superfície de alta razão de aspecto) e um segundo termo variando com o quadrado do ângulo de incidência (associado com a perturbação do escoamento nas extremidades da superfície de sustentação).

A formulação para a resistência induzida linear com  $\beta$  para a quilha é similar a apresentada para o casco e apresenta-se na equação (6.27).

$$(R_I)_q = \left(\frac{FL_q}{\cos\phi}\right)^2 \cdot \frac{(1+\sigma)_q}{\frac{1}{2} \rho_{H_2O} \cdot V_B^2 \cdot (A_L)_q \cdot \pi \cdot (AR_e)_q} \quad (6.27-A)$$

O cálculo do fator de distribuição não elíptico e do "taper ratio" para podem ser obtidos pelas equações (6.11-B) e (6.11-C) com as grandezas correspondentes para a quilha.

A resistência induzida não linear é definida de uma maneira semelhante a sua parcela linear:  $R_{I\alpha 2} = L_{\alpha 2} \tan \alpha_1$  ou  $C_{RI\alpha 2} = C_{L\alpha 2} \tan \alpha_1$ . Sendo que  $C_{L\alpha 2}$  é proporcional a  $\alpha^2$  e não a  $\alpha$ . Visto que para pequenas razões de aspecto o ângulo de ataque é igual ao ângulo induzido do escoamento, pode-se escrever para pequenos valores de  $\alpha$  que:

$$R_{I\alpha 2} = 1/2 \rho V^2 A_L C_{L\alpha 2} \alpha \quad (6.27-B)$$

Com o coeficiente não linear  $C_{L\alpha 2} = c_{L\alpha 2} \alpha^2$ , sendo  $c_{L\alpha 2}$  constante e função da geometria, velocidade, banda e deriva (calculado no item 6.2.1.2.1).

Segue disto que corpos em que a sustentação total possua um comportamento acentuadamente não linear, terão sua resistência total devido a sustentação proporcional ao quadrado da sustentação, ou ao quadrado do ângulo de ataque.

Em veleiros bem projetados, mesmo quando velejando no contravento, a parcela não linear é muito pequena não sendo detectada em tanques de prova. Nesses veleiros a resistência não linear só é sentida em manobras como cambar ou virar em roda, quando o ângulo de ataque atinge valores acentuados. Porém, quando se têm apêndices ineficientes que necessitam de ângulos de ataque grandes para gerar a força lateral necessária, esta parcela da resistência não poderá ser desprezada.

Do exposto acima pode-se deduzir que a redução da resistência induzida é conseguida através de uma maximização da razão de aspecto efetiva, seja através de uma mudança de geometria, seja através da adoção de asas funcionando como placas terminais. No caso de veleiros da classe doze metros internacionnal, em que a razão de aspecto geométrica situa-se entre 0.3 e 0.5, a resistência induzida de ordem superior é apreciável.



### 6.3. FORÇAS NO LEME

O leme costuma ser modelado de maneira muito semelhante a quilha, sendo na verdade uma quilha com tamanho reduzido, porém algumas diferenças devem ser salientadas. A primeira refere-se ao fato de não existir interação entre leme e bulbo, ou asa e bulbo, visto que o leme normalmente não é dotado destes apêndices. A segunda diferença esta ligada com a proximidade do leme em relação a superfície livre, o que na prática reduzirá sua razão de aspecto efetiva. Outro efeito que deve ser levado em consideração deve-se ao posicionamento da quilha por ante a vante do leme, fazendo com que o escoamento sobre o mesmo apresente um ângulo de ataque menor que o da quilha e casco devido ao efeito de "downwash". Por fim, se o casco for muito profundo uma redução da velocidade incidente sobre o leme deverá ser computada devido ao efeito de esteira.

O ângulo induzido da quilha sobre o leme (equação 6.28-A) é função da distância entre os dois, da razão de aspecto da quilha e da força lateral gerada pela mesma. É importante frisar que a força lateral da quilha a ser computada no efeito de "downwash" não deve levar em conta a influência do casco e nem a parcela não linear da sustentação. Esta força de sustentação da quilha vista como um fólio infinito é apresentada nas equações (6.28-B) e (6.28-C).

$$\alpha_{i_{q \rightarrow l}} = 1.5 \left( \frac{(x_q - x_r)}{3c_q} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \frac{FL_{q0}}{\left( \frac{1}{2} \rho_{H_2O} \cdot V_B^2 \cdot (A_L)_q \right) \cdot (\pi \cdot (AR_e)_q)} \quad (6.28-A)$$

Sendo:

$$FL_{q0} = \frac{FL_q}{\left( 2 - \frac{1}{(\gamma_c)_q} \right) \cdot (1 + \sigma_b)} \quad (6.28-B)$$

$$FL_q = \frac{1}{2} \rho_{H_2O} \cdot V_B^2 \cdot (A_L)_q \cdot (L_{c_n})_q \cdot (L_{b_n})_q \cdot (C_{L_{\alpha_{\text{max}}}})_q \cdot \left( \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \right)_q \cdot \beta \cdot \cos \phi \quad (6.28-C)$$

Onde:

- $\alpha_{i_{q \rightarrow l}}$  = ângulo induzido da quilha sobre o leme
- $x_r$  = distância da linha de 1/4 de corda do leme na raiz até o encontro da roda de proa com a linha d'água
- $FL_{q0}$  = força lateral desenvolvida pela quilha como fólio sem influência do bulbo, casco e sem a parcela não linear da sustentação
- $FL_q$  = força lateral da quilha sem a parcela não linear da sustentação

A partir do ângulo induzido da quilha sobre o leme pode-se determinar o real ângulo de ataque do leme como:

$$\beta_l = \beta + \beta_{ll} - \alpha_{i_{q \rightarrow l}} \quad (6.29)$$

Onde:

- $\beta_{ll}$  = ângulo do leme dado pelo timoneiro em relação a linha de centro da embarcação

A redução da velocidade devido ao efeito de esteira que pode ocorrer com cascos profundos e/ou lemes de baixa razão de aspecto é sugerida por OOSSANEN (1993) como sendo dada pelo seguinte fator de esteira:

$$w = 0.10 + 4.5 \left( \frac{T_c}{h_l + b_l} \right) C_B \cdot C_P \cdot \frac{Bwl}{\left( Lwl \cdot C_{wp} \cdot \left( 7 - 6 \frac{C_B}{C_{wp}} \right) (2.8 - 1.8C_P) \right)} \quad (6.30-A)$$

Onde:

- $h_l$  = distância do topo do leme a linha d'água incluindo efeito de onda
- $b_l$  = envergadura do leme

A velocidade de incidência do fluido sobre o leme será dada então por:

$$V_l = V_B \cdot (1 - w) \quad (6.30-B)$$

A partir da real velocidade de incidência do fluido e do ângulo de ataque efetivo sobre o leme pode-se calcular a força lateral e a resistência ao avanço do mesmo.



### 6.3.1. Força Lateral

A força lateral no leme é calculada da mesma maneira que para a quilha não tendo porém a influência do bulbo, mas sofrendo as perturbações da superfície livre próxima.

Utiliza-se a metodologia de OOSSANEN (1993) para a quilha pois através dela é possível descrever mais detalhadamente o leme.

A equação geral da superfície de sustentação para o caso do leme pode ser escrita como:

$$(FL)_1 = \frac{1}{2} \rho_{H_2O} \cdot V_1^2 \cdot \left( (C_{L_{\alpha Ponta}})_1 \cdot \left( \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \right)_1 \cdot \beta_1 \cdot \cos \phi \cdot (L_{c_n})_1 + (C_{L_{\alpha^2}})_1 \cdot (\beta_1 \cdot \cos \phi)^2 \right) \cdot (A_L)_1 \cdot \cos \phi$$

(6.31)

#### 6.3.1.1. Efeito da Forma da Ponta

O efeito da forma da ponta no estudo da força lateral do leme é importante visto que geralmente o leme não possui nenhum apêndice em sua extremidade inferior. Sendo assim, mesmo com razões de aspecto maiores que as quilhas, existe um forte escoamento cruzado nesta extremidade visto que os ângulos de operação costuma ser maiores (devido a ação do timoneiro).

Os valores de  $C_{L_{\alpha Ponta}}$  e  $c_{L_{\alpha^2 Ponta}}$  para a ponta do leme podem ser obtidos também pelas equações (6.14), desde que se utilize a razão de aspecto do leme.

#### 6.3.1.2. Inclinação da Curva de Sustentação por Ângulo de Ataque na Sua Parte Linear

A expressão desenvolvida por WHICKER e FEHLER (1958) apresentada no item 6.2.1.2.2, equação (6.15), é de uso geral podendo ser utilizada igualmente para a determinação da inclinação da curva de sustentação do leme, desde que se utilize os parâmetros do mesmo.

### 6.3.1.3. Efeito da Viscosidade na Inclinação da Curva de Sustentação

O efeito da viscosidade para o leme é obtido com a expressão (6.16) item 6.2.1.2.3 com a espessura, corda e ângulo do bordo de fuga do leme.

### 6.3.1.4. Cálculo do Valor do Raio de Aspecto Efetivo

Para superfícies de sustentações onde uma das extremidades é plana e ortogonal a mesma, e portanto sem efeito de superfície livre, considera-se a razão de aspecto efetiva como sendo o dobro da geométrica.

$$AR_e = 2 \frac{b}{c} \quad (6.32)$$

Porém no caso do leme a proximidade da superfície altera a razão de aspecto pois o campo de pressão desenvolvido tende a formar uma onda, alterando conseqüentemente o aspecto bidimensional do escoamento. Sendo assim é possível se deduzir uma formulação para a obtenção da razão de aspecto efetiva como uma função do número de Froude. O primeiro passo é calcular o fator de influência da superfície livre:

$$f_{sl} = 1 - \frac{h_1}{(c_1/4)} \quad (6.33-A)$$

Onde:

$c_1$  = corda média do leme

Quando o fator de superfície livre for maior que zero, ou seja o topo do leme estiver a uma distância da superfície menor que um quarto da corda, pode-se dizer que o número de Froude influenciará na razão de aspecto do leme da seguinte maneira:

- Para  $(Fn)_1 \geq 0.6413$ :  $F_{ARe} = 1 + \frac{0.422}{(Fn)_1^3}$  (6.33-B)

- Para  $0.5 < (Fn)_1 < 0.6413$ :  $F_{ARe} = 4.246(Fn)_1 - 0.1230$  (6.33-C)

- Para  $(Fn)_1 \leq 0.5$ :  $F_{ARe} = 2$  (6.33-D)



Com:

$$Fn_1 = \frac{V_B}{\sqrt{g \cdot c_1}}$$

A razão de aspecto efetiva do leme será dada então por:

$$(AR_e)_1 = f_{s1} \cdot F_{ARe} \cdot AR \quad (6.33-E)$$

Onde

AR = razão de aspecto geométrica, igual a envergadura submersa sobre a corda média

### 6.3.1.5. Efeitos de Interação Entre Casco e Leme

Novamente de maneira similar a quilha pode-se calcular o efeito do casco sobre o leme. Para isto são necessários os cálculos dos mesmos fatores de calado e devido a geometria do casco descrito no item 6.2.1.2.5 e repetidos aqui para os parâmetros do leme.

$$(T_{c_{e1}})_1 = 0.53 (c)_1 \cdot \sin(\alpha_c)_1 \quad (6.34-A)$$

$$(T_{c_{e2}})_1 = (T_c)_1 - 0.75Fn^4 \left( Lwl \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot x_1}{Lwl}\right) \right) \quad (6.34-B)$$

$$\begin{aligned} (T_{c_2})_1 > (T_{c_1})_1 &\text{ então } (T_c)_1 = (T_{c_1})_1 \\ &\text{ senão } (T_c)_1 = (T_{c_2})_1 \end{aligned}$$

$$(\gamma_c)_1 = \frac{(b_1 + (T_{c_1})_1)}{b_1} \quad (6.34-C)$$

$$\begin{aligned} L_{c_{ft(geom)1}} = Fn^2 &\left[ \frac{5.935}{\left(\frac{Bwl}{T_c}\right)^{1/4}} + 0.01357 \left(\frac{Bwl}{T_c}\right) - \frac{11.02}{\left(\frac{Bwl}{T_c}\right)^2} \right] - 0.003517 \left(\frac{Lwl}{Bwl}\right)^2 + \\ &0.6698 \left(\frac{Bwl}{T_c}\right) + (8.526 \times 10^{-8}) \cdot \left(\frac{Lwl}{Bwl}\right)^2 \cdot \left(\frac{Bwl}{T_c}\right)^4 - 0.08376 \end{aligned} \quad (6.34-D)$$

$$L_{c_{n(\text{geom})2}} = 1.165 - 0.1063 \left( \frac{Lwl}{Bwl} \right) \cdot Fn + 2.639Fn \cdot \phi^2 + \\ 0.0001885 \left( \frac{Bwl}{T_c} \right)^4 \cdot Fn^2 \phi^3 - 6.0953Fn \cdot \phi^3 - 0.09898 \left( \frac{Bwl}{T_c} \right) \cdot \phi \quad (6.34-E)$$

$$\left( L_{c_n} \right)_1 = \left( \frac{0.3125}{Fn^2} + \left( 1 + (\gamma_c)_1 \right)^2 - 4 \right) \cdot L_{c_{n(\text{geom})1}} \cdot L_{c_{n(\text{geom})2}} \quad (6.35)$$

O número de Froude que aparece nas equações 6.34 referem-se ao comprimento de linha d'água do casco e não do leme.

### **6.3.1.6. Efeito Não Linear na Sustentação**

O efeito não linear da sustentação no leme costuma ser bem menor que na quilha devido a razão de aspecto ser maior. Porém como algumas vezes o ângulo de ataque também é maior, este efeito não pode ser negligenciado.

Pode-se utilizar a equação (6.22) do item 6.2.1.2.6 para o cálculo.

### **6.3.1.7. Efeito do Ângulo de "Flap"**

O efeito do ângulo de "flap" para o leme é muito importante pois muitos veleiros atuais possuem lemes com este implemento hidrodinâmico para aumentar a força de sustentação, porém a principal aplicação é para o cálculo da força de sustentação de lemes com parte fixa a vante ("skegs"), onde o modelo também pode ser utilizado.

As formulações são basicamente as mesmas do item 6.2.1.2.7.

$$(\Delta FL)_1 = \frac{1}{2} \rho_{H_2O} \cdot V_1^2 \cdot (A_L)_1 \cdot \cos\phi \cdot L_{c_n} \cdot \left( \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \right)_1 \cdot \left( \frac{\partial \alpha}{\partial \delta} \right)_1 \cdot \delta_1 \cdot \cos\phi \quad (6.36-A)$$

Onde:

$(\Delta FL)_1$  = força adicional lateral no leme devido ao ângulo de "flap"

$\delta_1$  = ângulo de "flap" medido a partir da linha de centro da embarcação

O fator de efetividade é sugerido por HOERNER apud OOSSANEN (1993).



$$\left(\frac{\partial\alpha}{\partial\delta}\right)_1 = \left(\left(\frac{\partial\alpha}{\partial\delta}\right)_{th}\right)_1 \cdot k_{sf_1} \cdot \cos(\Lambda_d)_1 \quad (6.36-B)$$

Onde:

$k_{sf_1}$  = efeito da viscosidade relativo ao fator de efetividade do "flap" para o leme

O valor teórico bidimensional do fator de efetividade é dado por SCHLICHTING apud OOSSANEN (1993) na fórmula (6.23-C).

$$\left(\left(\frac{\partial\alpha}{\partial\delta}\right)_{th}\right)_1 = \frac{2}{\pi} \left( E_1 \cdot \sqrt{1-E_1} + \arcsin(\sqrt{E_1}) \right) \quad (6.36-C)$$

O fator de viscosidade deve ser levado em conta através da relação abaixo:

$$k_{sf_1} = 0.75 + 0.25E_1^{0.1} - 7.35(1-E_1^{0.1}) \cdot \tan(\tau)_1 \quad (6.36-D)$$

### 6.3.2. Resistência ao Avanço

A resistência ao avanço do leme é calculada da mesma maneira que para a quilha sendo basicamente duas componentes: a resistência viscosa e a a resistência induzida.

#### 6.3.2.1. Resistência Viscosa

Pode-se utilizar as equações (6.26) para o cálculo da força viscosa do leme, desde que se utilize os parâmetros correspondentes.

$$(R_{V_H})_1 = \frac{1}{2} \rho_{H_2O} \cdot V_1^2 \cdot (C_V)_1 \cdot 2(A_L)_1 \quad (6.37-A)$$

Com:

$$(C_V)_1 = (C_F)_1 \cdot (1+k)_1 \quad (6.37-B)$$

$$(C_F)_1 = \frac{0.075}{(\log(Re)_1 - 2)^2} - \frac{1800}{(Re)_1} \quad (6.37-C)$$

$$(Re)_1 = \frac{V_1 \cdot c_1}{\nu} \quad (6.37-D)$$

O fator de forma é dado pelas equações (6.26-E) e (6.27-F)

### **6.3.2.2. Resistência Induzida**

Calculada de maneira similar a da quilha, valendo as mesmas observações ao que se refere a parcela linear e não linear da sustentação.

$$(R_1)_1 = \left( \frac{FL_1}{\cos\phi} \right)^2 \cdot \frac{(1+\sigma)_1}{\frac{1}{2} \rho_{H_2O} \cdot V_1^2 \cdot (A_L)_1 \cdot \pi \cdot (AR_e)_1} \quad (6.38-A)$$

O cálculo do fator de distribuição não elíptico e do "taper ratio" para podem ser obtidos pelas equações (6.11-B) e (6.11-C) com as grandezas correspondentes para o leme.

A resistência induzida não linear é dada por:

$$R_{1\alpha 2} = 1/2 \rho V^2 A_L C_{L\alpha 2} \alpha \quad (6.38-B)$$

Com o coeficiente não linear  $C_{L\alpha 2} = c_{L\alpha 2} \alpha^2$ , sendo  $c_{L\alpha 2}$  constante e função da geometria, velocidade, banda e deriva (calculado no item 6.2.1.2.1).

## **6.4. FORÇAS NO BULBO**

O bulbo foi criado com a única função de carregar o lastro de chumbo com o efeito de abaixamento do centro de gravidade. Porém, como qualquer outra obra viva, desenvolve forças hidrodinâmicas que mesmo muito menores que quilha, leme ou casco podem ser computadas de forma relativamente simples por se tratar, grosso modo, de um corpo de revolução. Nenhum enfoque diferente do que foi apresentado anteriormente será introduzido neste item.



### 6.4.1. Força Lateral

O bulbo é modelado basicamente como uma placa de baixa razão de aspecto, de maneira similar ao casco, no modelo de OOSSANEN (1993), sendo sua força lateral dada pela equação (6.39).

$$FL_b = \frac{1}{2} \rho_{H_2O} \cdot V_B^2 \cdot \left( \frac{1}{2} \pi \cdot h_b + 1.8 (A_L)_b |\beta \cdot \cos \phi| \right) \beta \cdot \cos \phi \quad (6.39)$$

Onde:

$h_b$  = máxima espessura do bulbo

### 6.4.2. Resistência ao avanço

#### 6.4.2.1. Viscosa

Pode-se utilizar as equações (6.26) para o cálculo da força viscosa no bulbo, desde que se utilize os parâmetros correspondentes como mostrado a seguir.

$$(R_{VH})_b = \frac{1}{2} \rho_{H_2O} \cdot V_B^2 \cdot (C_V)_b \cdot S_b \quad (6.40-A)$$

Com:

$$(C_V)_b = (C_F)_b \cdot (1+k)_b \quad (6.40-B)$$

$$(C_F)_b = \frac{0.075}{(\log(Re)_b - 2)^2} - \frac{1800}{(Re)_b} \quad (6.40-C)$$

$$(Re)_b = \frac{V_B \cdot L_b}{\nu} \quad (6.40-D)$$

Onde:

$L_b$  = comprimento do bulbo

$S_b$  = superfície molhada do bulbo

O fator de forma a ser utilizado pode ser de  $(1+k)_b = 1.09$  sem implicar em grandes erros.

### 6.4.2.2. Induzida

A resistência induzida pode ser calculada de maneira similar a do casco.

$$(R_I)_b = \left( \frac{FL_b}{\cos\phi} \right)^2 \cdot \frac{(1+\sigma)_b}{\frac{1}{2} \rho_{H_2O} \cdot V_B^2 \cdot (A_L)_b \cdot \pi \cdot (AR_e)_b} \quad (6.41-A)$$

O efeito da distribuição não elíptica da sustentação  $(1+\sigma)$ , a razão de aspecto e o "taper ratio" são dados pelas equações (6.11-B), (6.11-C) e (6.11-D):

## 6.5. FORÇAS NA ASA

No modelo matemático de forças hidrodinâmicas adotado, as asas que são fixadas na extremidade inferior da quilha contribuem apenas no aumento da razão de aspecto da quilha. Porém sua resistência deve ser computada.

Outros efeitos como aproveitamento dos vórtices para gerar uma força no sentido do movimento e minimizar a resistência viscosa não são levados em conta no modelo e devem ser analisados com alguma outra ferramenta de análise mais precisa como CFD's, túneis de vento, etc...

### 6.5.1. Resistência ao Avanço

Visto as asas não desenvolverem força de sustentação e de se localizarem relativamente longe da superfície livre, a única parcela de resistência ao avanço a ser computada é a resistência viscosa que pode utilizar as equações (6.26) com os parâmetros correspondentes.

$$(R_{V_H})_a = \frac{1}{2} \rho_{H_2O} \cdot V_B^2 \cdot (C_V)_a \cdot 2(A_L)_a \quad (6.42-A)$$

Com:

$$(C_V)_a = (C_F)_a \cdot (1+k)_a \quad (6.42-B)$$



$$(C_F)_a = \frac{0.075}{(\log(\text{Re})_a - 2)^2} - \frac{1800}{(\text{Re})_a} \quad (6.42-C)$$

$$(\text{Re})_a = \frac{V_B \cdot c_a}{\nu} \quad (6.42-D)$$

O fator de forma é dado pelas equações (6.26-E) e (6.27-F).

## **7. O PROGRAMA DE PREDIÇÃO DE VELOCIDADE VPP-PB**

Uma vez compreendido o sistema de forças e momentos que atuam sobre uma embarcação a vela e obtidas as equações que permitem estimar estas forças e momentos, pode-se criar um código que automatize o processo de integração casco-vela, ou seja, um programa de predição de velocidade.

O processo de criação do código passa por quatro etapas distintas:

- determinação do tipo de embarcação a vela que se deseja modelar e as condições de operação.
- escolha do processo de integração e do modelo matemático a ser aplicado para a obtenção das forças.
- criação do código em alguma linguagem de programação.
- avaliação e validação dos resultados obtidos através do programa.

Este capítulo apresenta o programa VPP-PB desenvolvido nesse trabalho, o processo de integração e o modelo matemático escolhido.

### **7.1. O PROGRAMA VPP-PB**

#### **7.1.1. Determinação das Condições de Operação**

O programa VPP-PB foi desenvolvido para obter a predição de velocidade de veleiros monocascos para as seguintes condições de mar e vento:

- Águas calmas.
- Vento verdadeiro de: 06, 09, 12, 15, 21, 24 nós.



- Ângulo de aproamento de vento verdadeiro compreendido entre: 30° e 180°.

O modelo aerodinâmico permite a utilização do programa para armações de:

- Um mastro dotado de uma vela de proa ("sloop").
- Dois mastros dotados de vela de proa e proa de mezena ("ketch's" e "yawl's"), desde que o mastro à ré não seja maior que o de vante (escuna).

Existem três versões do programa VPP-PB:

- VPP-PB1: nesta versão é utilizada apenas a armação de contravento, ou seja, genoa e mestra para todos os ângulos de aproamento.
- VPP-PB2: o programa considera que para ângulos de vento aparente entre 30° e 70°, a armação adotada será sempre a de contravento. Para valores de ângulo de vento aparente acima de 110° o programa assumirá sempre a configuração de ventos largos (balão e mestra). Para ângulos de vento aparente compreendidos entre 70° e 110°, o programa escolherá a configuração que resultar em maior velocidade final.
- VPP-PB3: nesta versão pode-se rodar vários modelos consecutivamente sem que o usuário tenha que especificar o nome do arquivo de dados a cada execução de predição de velocidade. Para isto deve-se criar um arquivo tipo texto com os nomes dos arquivos a serem executados.

Em qualquer uma das três versões, o programa limita o ângulo de banda máximo em trinta graus. Sempre que este ângulo for ultrapassado haverá uma redução de área vélica em proporções que deverão ser fornecidas previamente pelo usuário.

### 7.1.2. Dados de Entrada

Todos os dados para a execução do programa devem estar presentes em dois arquivos tipo texto não formatados:

O primeiro arquivo possui extensão '.REEF' e é constituído de dez linhas e duas colunas, sendo que a primeira coluna apresenta a porcentagem de 'reef' do velame, enquanto a segunda apresenta a porcentagem de 'flat'. O par de valores (1.00 ; 0.75) indica que a vela não foi rizada (redução de área e do centro de esforços aerodinâmicos), porém houve uma redução de área (e não do centro de esforço) de 25%. Os pares de valores devem ser apresentados em ordem crescente de redução de área vélica.

O segundo arquivo de entrada contém os dados que descrevem geometricamente o casco, velame e apêndices (possui extensão '.DAT'). Afim de minimizar os erros de digitação dos dados no processo de criação deste arquivo de entrada, adotou-se que cada linha do arquivo definiria um elemento conforme especificado abaixo (os parâmetros devem ser digitados na ordem apresentada e separados por espaço:

- 1ª linha: Definição do casco:  
 $L, Lwl, B, Bwl, T_c, B_{L_m}, H_{c_m}, V, LCB, A_{lc}, A_{wl}, C_p, C_B, C_{wl}, C_M, K_g, m_t$
- 2ª linha: Definição do leme:  
 $cr_l, cp_l, \Lambda_l, t_l, \tau_l, b_l, x_l, (\alpha_c)_l, (T_c)_l, (cm_f)_l, (bm_f)_l, (\Lambda_d)_l, \text{ponta}_l$ ; onde  $\text{ponta}_l$  define o tipo de ponta: 0 para pontas arredondadas e 1 para pontas quadradas.
- 3ª linha: Definição da quilha:  
 $cr_q, cp_q, \Lambda_q, t_q, \tau_q, b_q, x_q, (\alpha_c)_q, (T_c)_q, (cm_f)_q, (bm_f)_q, (\Lambda_d)_q, \text{ponta}_q$ ; onde  $\text{ponta}_q$  define o tipo de ponta: 0 para pontas arredondadas e 1 para pontas quadradas.
- 4ª linha: Definição do bulbo:  
 $h_B, A_{lb}, L_b$
- 5ª linha Definição da asa:  
 $cr_a, cp_a, L_a$
- 6ª linha definição da vela mestra:  
 $GS_p, GM_p, E_p, P_p, HR_p, \text{tipo}_p$ ; onde  $\text{tipo}_p$  indica o tipo de vela mestra: 0 para vela "full-batten" e 1 para vela marconi.



- 7ª linha: definição do triângulo de proa:  
I, J, DG, DP
- 8ª linha: Definição do balão:  
PBl, LBl, HBl
- 9ª linha: Definição da vela de proa de mezena:  
 $P_{gm}$ ,  $E_{gm}$ ,  $GM_{gm}$ ,  $I_{gm}$ ,  $PBl_m$ ,  $LBl_m$ ,  $HBl_m$
- 10ª linha: Definição da vela de mezena:  
 $GS_m$ ,  $GM_m$ ,  $E_m$ ,  $P_m$ ,  $HR_m$
- 11ª linha: Definição dos mastros:  
 $Dm_p$ ,  $Dm_m$ ,  $LBm$

É importante salientar que para cada veleiro que se desejar rodar o programa VPP-PB, devem estar presente no mesmo diretório os arquivos '.DAT' e '.REF' e que ambos deve possuir o mesmo nome.

Um arquivo de entrada de dados que é utilizado apenas na versão VPP-PB3 apresenta em sua primeira linha o número de casos que se deseja rodar e nas linhas seguintes o nome dos arquivos que descrevem geometricamente o casco, sem extensão. O nome deste arquivo é 'ARQS.DAT'.

### 7.1.3. Dados de Saída

O programa VPP-PB em suas três versões gera três arquivos de saída:

- '.GER': neste arquivo estão apresentados o valor dos parâmetros que descrevem a atitude da embarcação, o vento aparente e as condições do velame para cada velocidade e ângulo de aproamento do vento verdadeiro. Sendo assim são apresentados os valores da velocidade e ângulo do vento aparente, velocidade e velocidade ótima da embarcação, deriva, banda, ângulo de leme, velas armadas, 'reef' e 'flat'.

- 'CAE': neste arquivo são apresentados os valores dos coeficientes geométricos da IMS para a armação de contravento e ventos largos a cada dois graus de incidência de vento aparente. Neste arquivo estão os valores dos fatores de interferência, a redução da sustentação e incremento no arrasto para armações fracionadas, o valor total do coeficiente de sustentação, do arrasto parasita e do arrasto devido ao descolamento para todo o velame.
- 'FHD': os valores das forças hidrodinâmicas para cada velocidade do vento e ângulo de aproamento encontram-se neste arquivo. As forças estão separadas em dois blocos. O primeiro refere-se a força lateral desenvolvida por cada elemento das obras vivas: casco, bulbo, leme e quilha. No segundo bloco estão as parcelas da resistência ao avanço: resistência de atrito, de onda própria, de banda, induzida e a resistência total.

#### 7.1.4. Integração Casco-Vela

O modelo de integração casco-vela adotado foi basicamente o primeiro método de Oossanen. Esta escolha baseou-se no fato de que este método permite que se visualize o fenômeno físico mais facilmente. Por ser um processo mais demorado de integração, devido ao grande número de interações necessárias para a obtenção do resultado final, algumas modificações foram implementadas de modo a se diminuir os cálculos redundantes. Neste sentido, a principal alteração foi o cálculo dos coeficientes aerodinâmicos, tanto para a configuração de contravento como para ventos largos, fora do laço de integração. Os coeficientes são calculados para todos os ângulos de vento aparente, já levando em conta os fatores geométricos da IMS, sendo armazenados em uma matriz que é consultada cada vez que o cálculo das forças aerodinâmicas se fizer necessário.



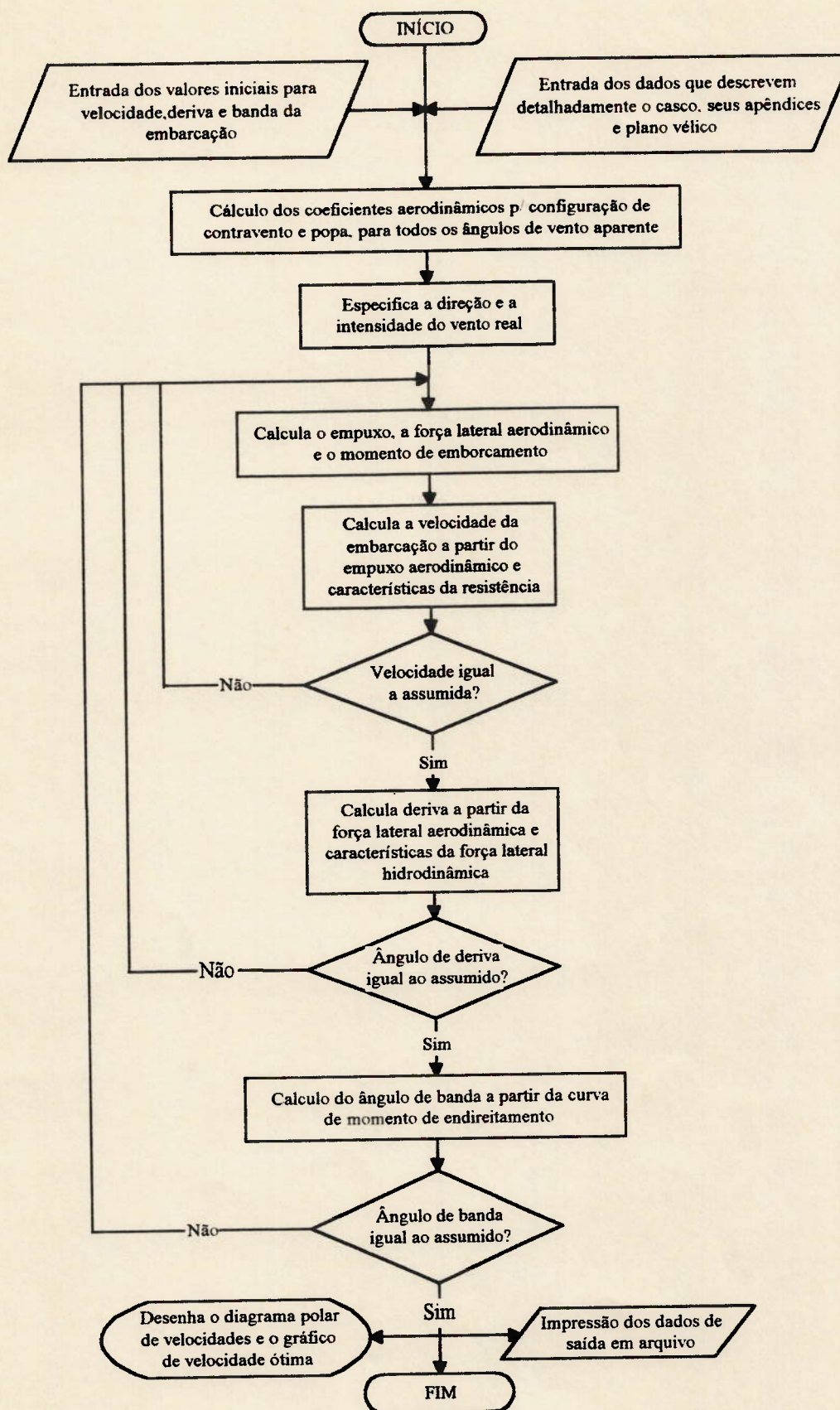


Figura 7.1: Fluxograma de Integração Casco-Vela do Programa VPP-PB

A segunda modificação foi a inversão da ordem de convergência de cada parâmetro que define a atitude da embarcação. Esta inversão foi feita com o objetivo de reduzir o número de interações. Desta maneira os parâmetros que necessitavam de mais interações para convergir foram calculados nos laços mais internos do processo. No modelo do programa VPP-PB, primeiro se obtém a velocidade que equipare a resistência ao avanço com o empuxo aerodinâmico, depois calcula-se a deriva que resulte em forças laterais hidro e aerodinâmicas de mesmo valor, e por último determina-se o ângulo de banda para a condição calculada e compara-o ao inicialmente assumido.

O fluxograma do método de integração adotado pode ser visto na figura 7.1.

Pode-se perceber que o programa não realiza o equilíbrio de momentos no plano longitudinal e nem no plano horizontal. Visto que geralmente os veleiros possuem um momento de inércia alto no sentido longitudinal, o trim assume valores pequenos não comprometendo o resultado final da integração. Quanto ao momento de guinada (momento no plano horizontal) o programa parte do princípio que o engenheiro tenha disposto o velame e os apêndices do casco de tal maneira que os centros de esforços aerodinâmicos e hidrodinâmicos sejam coincidentes, não gerando momento de guinada e conseqüentemente não necessitando de intervenções no leme para se atingir o equilíbrio.

### **7.1.5. Modelos Matemáticos Utilizados**

#### **7.1.5.1. Modelo Hidrodinâmico**

Para a obtenção das forças hidrodinâmicas foram utilizados os seguintes modelos matemáticos apresentados no capítulo 6:

##### **7.1.5.1.1. Resistência ao avanço**

- Resistência residual: a série Delft III apresentada por GERRITSMAN apud OOSSANEN (1993), com informações complementares apresentadas na série



Delft I (GERRITSMA (1981)) foi a escolhida por ser o único trabalho encontrado que permite calcular a resistência de onda com liberdade de escolha em relação a variação dos parâmetros que descrevem o casco.

- Resistência de atrito: utilizou-se a formulação da ITTC visto sua utilização para a obtenção dos valores da resistência residual na série Delft.
- Resistência de banda: a formulação de GERRITSMA apud OOSSANEN (1993) foi implementada no programa VPP-PB por ser aplicável em toda a faixa de variação do número de Froude da série Delft. Além disto, por ter sido obtida com os mesmos modelos que geraram os polinômios para o cálculo da resistência de onda, o modelo matemático apresenta uma uniformidade maior de dados.
- Resistência induzida: a formulação para obtenção da resistência induzida é a utilizada para superfícies de sustentação sujeitas a ângulos de ataque, sendo a resistência diretamente proporcional a quadrado da sustentação e inversamente proporcional a razão de aspecto.
- Resistência adicional em ondas: devido a falta de informação a respeito do cálculo desta parcela da resistência em publicações especializadas, o programa não está habilitado a calcular a resistência ao avanço da embarcações em onda. Todos os resultados aqui apresentados referem-se a condição de águas calmas.
- Resistência devido a atitude do casco: esta parcela da resistência apenas assume valores significativos durante as manobras, quando os ângulos de deriva e banda assumem valores elevados. Como o programa considera o movimento com um regime permanente, esta parcela da resistência pode ser desprezada.

#### 7.1.5.1.2. Força Lateral

- Quilha e Leme: foi adotada a formulação sugerida por OOSSANEN (1993) por descrever em detalhes a quilha e leme como uma superfície de sustentação, levando em conta não apenas suas características geométricas (corda,

envergadura e ângulo de caimento), mas também a influência do casco, bulbo, asas e proximidade da superfície livre no cálculo da força lateral.

- Casco: também para o cálculo da força lateral do casco foi adotado o modelo de OOSSANEN (1993) segundo o qual o casco pode ser modelado por uma superfície de sustentação de baixa razão de aspecto, sendo seu valor e o valor do "taper ratio" efetivo para o casco baseado em valores experimentais.
- Bulbo: utilizou-se a formulação de OOSSANEN (1993) que modela o bulbo como um corpo de revolução.

#### 7.1.5.2. Modelo Aerodinâmico

As forças aerodinâmicas foram obtidas através da formulação da IMS que permite que se faça a integração casco-vela em todas as mareações que o veleiro venha a enfrentar. Esta formulação também descreve em detalhes as características geométricas do velame como foi mostrado no capítulo cinco.



## 8. VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

A validação dos resultados apresentados por um programa de predição de velocidade não é uma tarefa simples. A principal dificuldade está na obtenção de dados medidos em escala real, que apresentem as características da embarcação (velame, plano de linhas, deslocamento) e as condições de mar e vento encontradas. Recentemente o próprio VPP da IMS (gerado a partir de estudos realizados no IMT) foi questionado ao fornecer valores de velocidade que, na prática, eram superados por algumas embarcações.

Em função destas dificuldades optou-se por fazer a validação do código através da comparação de resultados intermediários fornecidos pelo programa, com outras formulações já consagradas ou com resultados apresentados em recentes publicações. Sendo assim, foram motivos de comparação: o cálculo da resistência ao avanço, do coeficiente de sustentação para cálculo da força lateral hidrodinâmica e dos coeficientes aerodinâmicos.

Além desta comparação com resultados conhecidos, foi realizada uma variação paramétrica para avaliar o impacto sobre o modelo matemático para a obtenção de forças, de modo a atestar a coerência e abrangência da formulação utilizada. Esta mesma variação paramétrica foi submetida ao programa VPP-PB afim de aquilatar as alterações na performance resultantes do processo de integração.

## 8.1. RESISTÊNCIA AO AVANÇO

### 8.1.1. Comparação Com Resultados Publicados

Para a validação dos cálculos de resistência de onda realizados pelo programa VPP-PB, foi rodado o casco de número 22 da série Delft cujo gráfico de resistência em função do número de Froude é apresentado por FUNG apud OOSSANEN (1993) na secção de discussões à página 385.

Pode-se perceber através do gráfico 8.1 que os valores da resistência calculados pelo programa estão em concordância com os apresentados na bibliografia. Os pontos em função da velocidade não apresentam distribuição contínua por serem resultado da integração casco-vela.

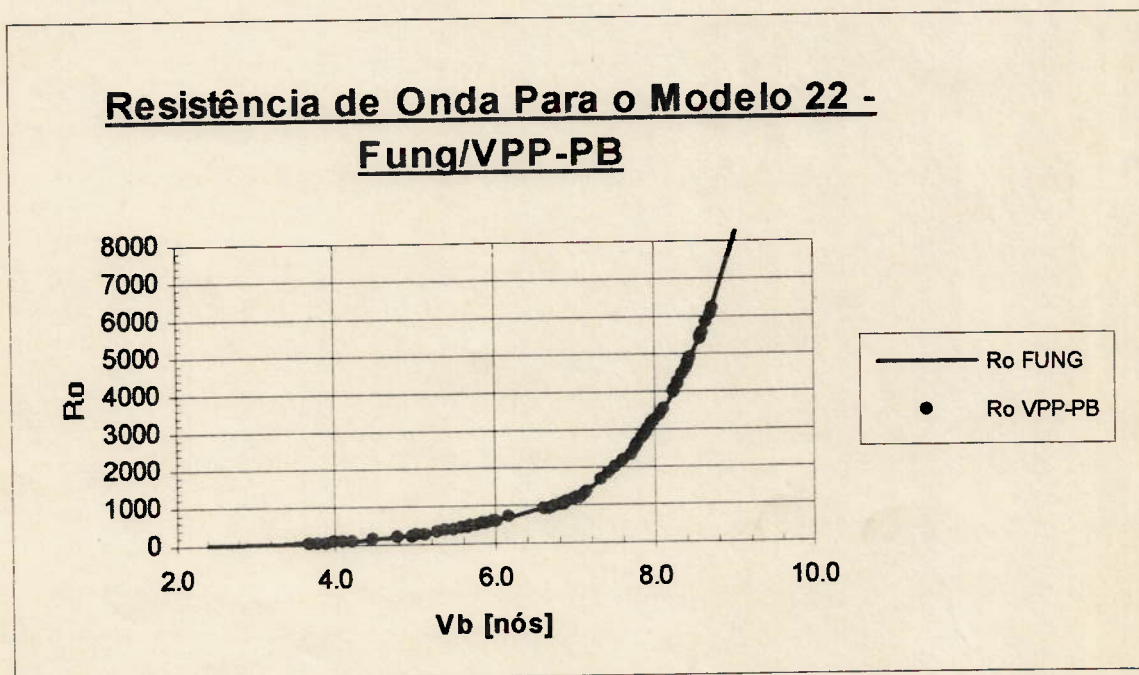


Figura 8.1: Resistência de Onda Para o Modelo 22 - Fung/VPP-PB



### 8.1.2. Variação Paramétrica

Foram realizadas variações nos parâmetros que compõe o polinômio para o cálculo da resistência de onda afim de se estudar a sensibilidade da formulação. As relações  $Bwl/T_c$ ,  $LWL/\nabla^{1/3}$  e  $LCB$  foram variadas isoladamente, mantendo-se todas as outras dimensões e relações fixas, inclusive a área vélica durante a execução do VPP-PB.

#### 8.1.2.1. Coeficiente Volumétrico

Os valores do coeficiente volumétrico que foram comparados são: 4.97, 5.69 e 6.41, resultando em uma grande diferença do valor da resistência de onda, mostrando a sensibilidade da formulação a este adimensional. Como era de se esperar, esta parcela da resistência aumenta consideravelmente com o incremento do deslocamento quando se mantém fixo o comprimento de linha d'água.

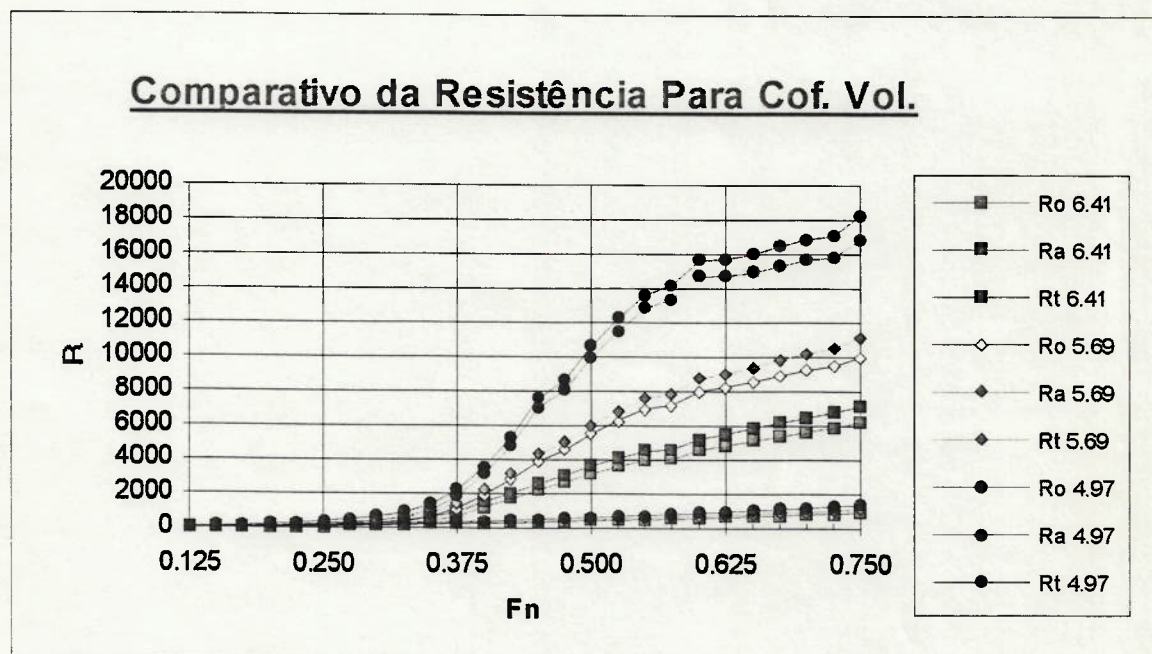


Figura 8.2: Comparativo da Resistência Para Coeficiente Volumétrico

O gráfico da figura 8.2 indica que, mesmo mantendo-se todos os outros adimensionais fixos, para o valor de 4.97 do coeficiente volumétrico, surge uma

descontinuidade da resistência de ondas no ponto de encontro dos dois polinômios da série Delft ( $Fn=450$ ).

O primeiro polinômio aplica-se na faixa de números de Froude abaixo de 0.450 onde GERRITSMA apud OOSSANEN (1993) considerou que a embarcação estaria no regime de deslocamento, e sua resistência seria função do coeficiente volumétrico, do coeficiente prismático, da relação  $Bwl/T_c$  e da posição do centro de flutuação. Para valores maiores do número de Froude, considerou-se que o casco apresentaria regime de planeio, e então, a área de linha d'água, a relação  $Lwl/Bwl$  e a posição do centro de flutuação (LCF) teriam maior influência sobre a resistência de onda. Entretanto, a variação paramétrica indica que a ponderação do coeficiente volumétrico nos polinômios não proporciona uma variação contínua da resistência, principalmente quando se ultrapassa o limite da série.

Apesar da variação de  $LWL/\nabla^{1/3}$  incorrer em um aumento da superfície molhada, a variação da resistência de atrito é muito pequena, principalmente quando comparada aos valores da resistência de onda.

Os mesmos cascos que foram analisados acima, foram introduzidos no programa VPP-PB para que se pudesse analisar como a variação do coeficiente volumétrico poderia interferir na performance do veleiro. Como a diminuição do coeficiente volumétrico implica em um aumento da resistência de onda mas também um incremento da estabilidade, torna-se difícil avaliar a performance final sem utilizar-se de um programa de integração casco-vela.

A figura 8.3 representa a velocidade dos veleiros para vento real da ordem de seis nós. A performance do veleiro mais leve ( $L/\nabla^{1/3}=6.41$ ) é bastante superior aos demais pois sua resistência de onda é menor, e para ventos fracos a estabilidade não têm grande influência sobre a performance.

Para ventos fortes a situação é bastante diferente (figura 8.4). Na região de contravento, onde a embarcação apresenta maiores ângulos de banda, a estabilidade passa a ter grande importância sobre o desempenho total do veleiro, e neste caso, o



casco de menor coeficiente volumétrico atinge maiores velocidades. O fato da estabilidade dos cascos mais leves ser menor implica em uma necessidade de se diminuir a área vélica antes dos veleiros mais deslocantes, o que contribui para uma performance pior.

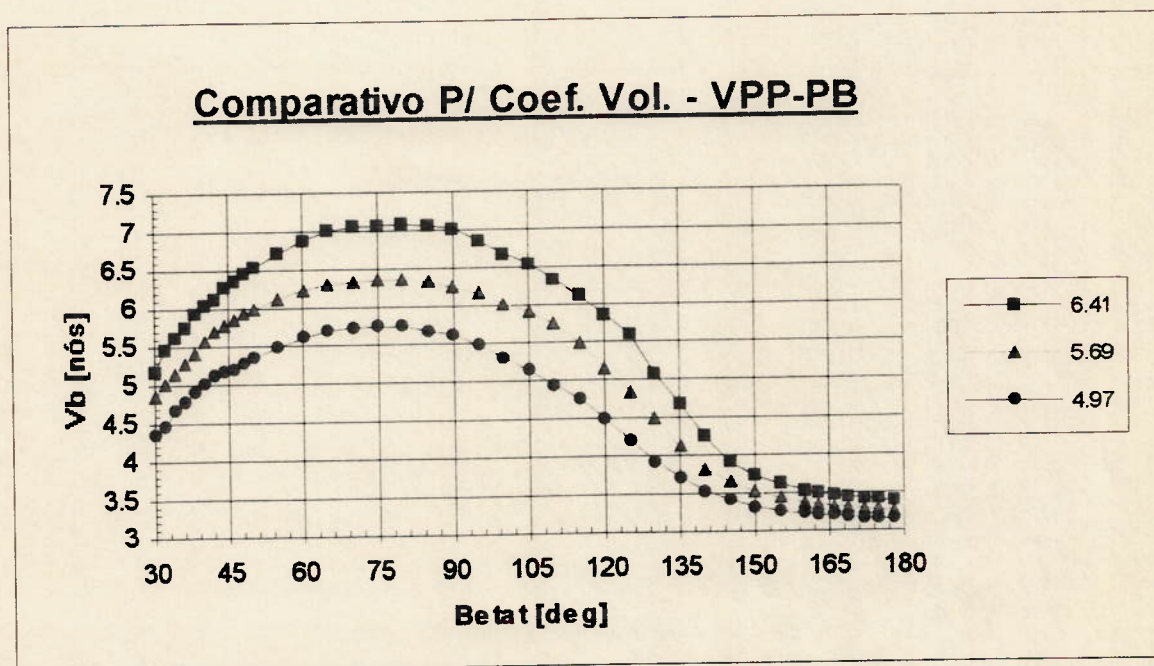


Figura 8.3: Comparativo P/ Coef. Vol. - VPP-PB  $V_v=6.0$  nós

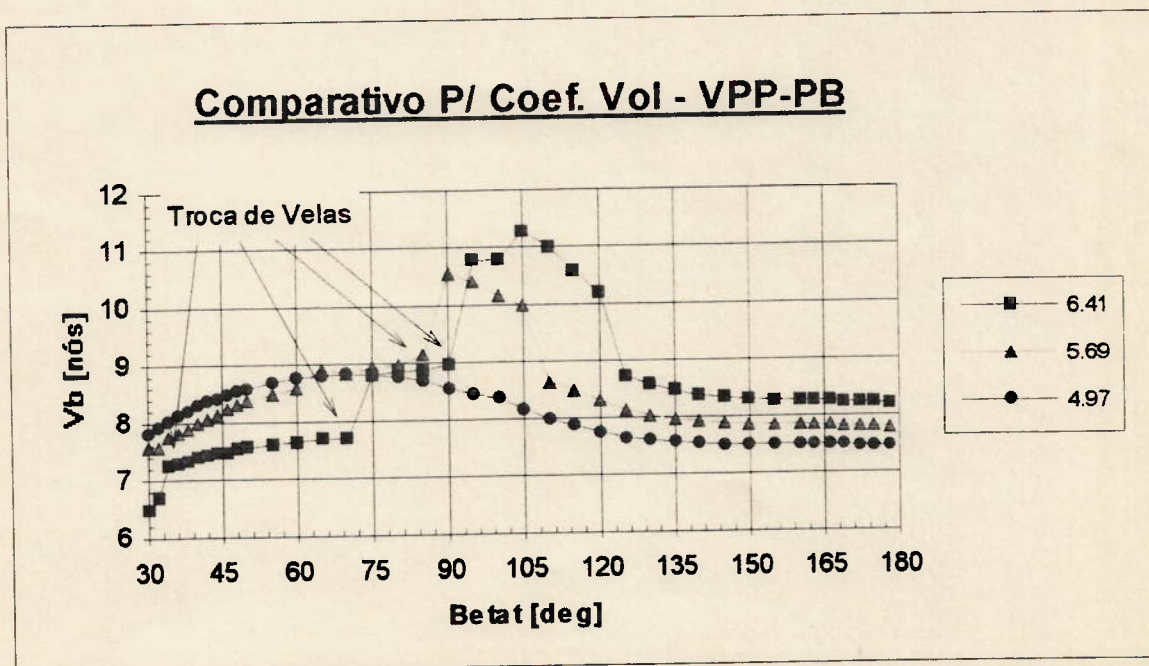


Figura 8.4: Comparativo P/ Coef. Vol. - VPP-PB  $V_v=21.0$  nós

Para ventos de través fortes, onde a resistência de onda é máxima (figura 8.5 e 8.6) e o momento de emborcamento já não é tão grande quanto na orça, os veleiros de maior coeficiente volumétrico superam os mais pesados. Situação semelhante acontece em ventos em popa, onde a estabilidade praticamente não influe na performance, beneficiando os cascos menos deslocantes.

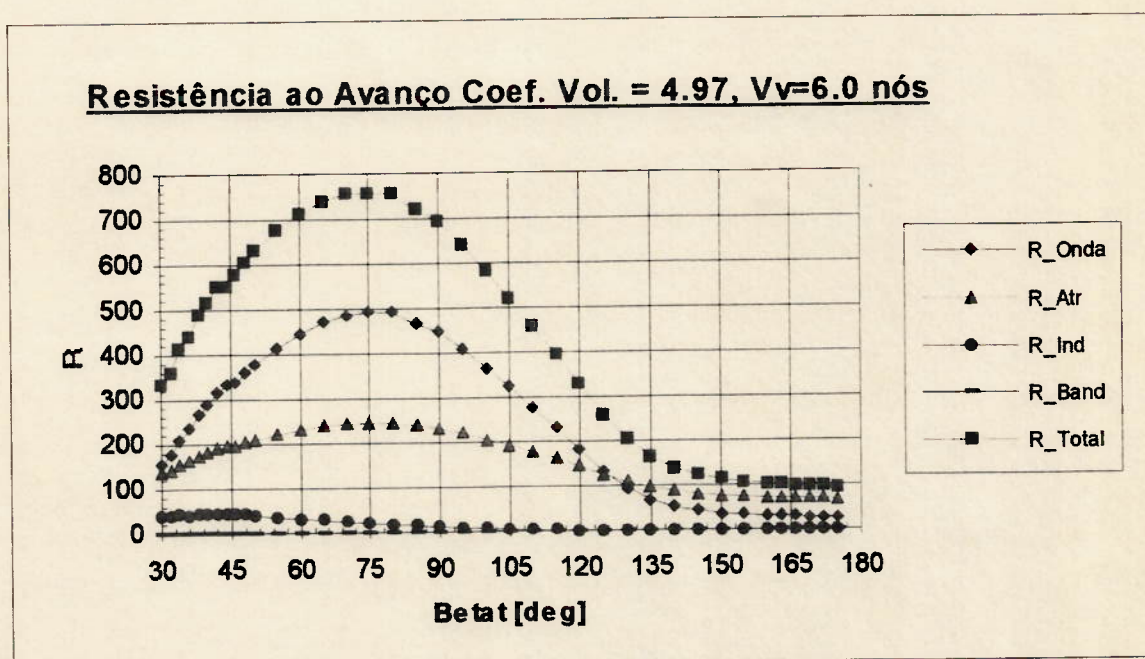


Figura 8.5: Resistência ao Avanço Para Coef. Vol.=4.97 e  $V_v=6.0$  nós

As figura 8.5 e 8.6 apresentam as componentes da resistência ao avanço em função do ângulo de vento aparente para as condições de vento fraco e forte respectivamente. A composição de forças é bastante diferente entre os dois casos como mostrado a seguir:

- Em ventos fracos a resistência de onda atinge seus máximos valores em mareas de través, quando a velocidade da embarcação aumenta consideravelmente. Para ângulos de orça cerrada a resistência de onda ainda é a maior componente, porém a resistência de atrito também apresenta uma parcela significativa da resistência total. Em ventos em popa, as baixas velocidades atingidas fazem com que a resistência de atrito venha a ser a principal componente da resistência total. Resistência de banda e induzida têm pequena influência.



- Em ventos fortes a predominância da resistência de onda sobre todas as outras parcelas da resistência é total em todas a faixa de variação do vento real. A resistência induzida é a única parcela das outras componentes da resistência que chega a ter a mesma ordem de grandeza da resistência de onda para ângulos de vento aparente entre 30° e 40°, devido aos grandes ângulos de deriva necessários a geração de força lateral hidrodinâmica. A resistência induzida também é resultado da geração de força lateral pelo casco, que por ser deslocante apresenta uma grande área lateral, tendo porém, uma baixa razão de aspecto efetiva

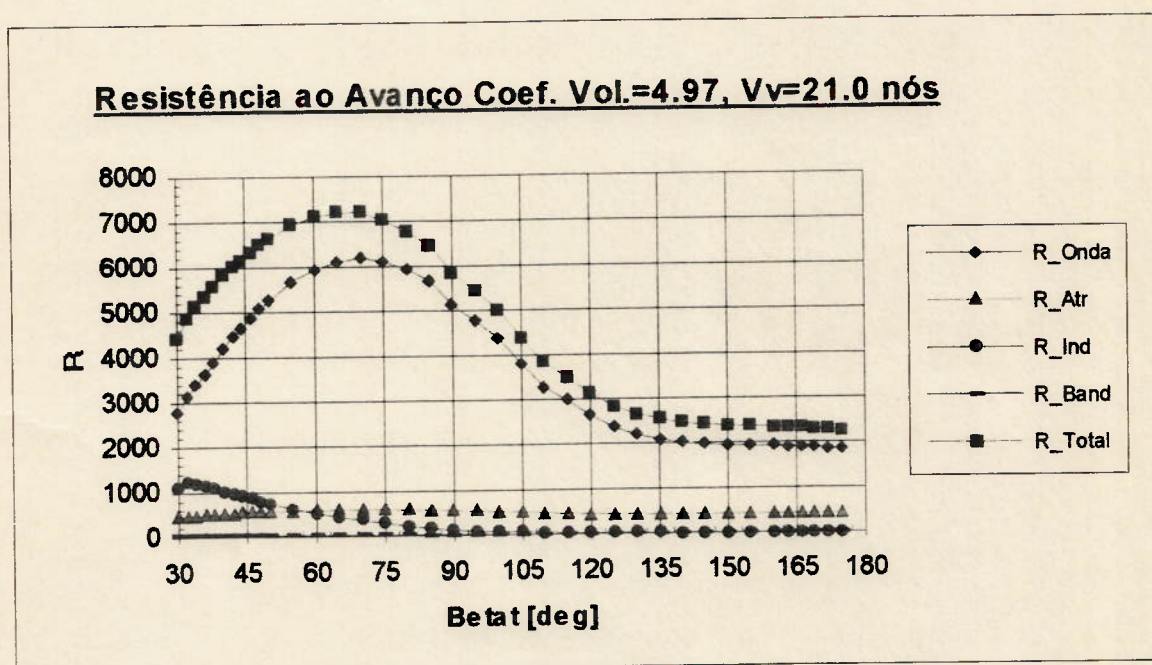


Figura 8.6: Resistência ao Avanço Para Coef. Vol.=4.97 e Vv=21.0 nós

### 8.1.2.2. Relação $Bwl/T_c$

As relações boca na linha d'água/calado que foram utilizadas para comparação da resistência de onda tinham os valores de 4.50, 5.50 e 6.50. Todas as outras características do casco foram mantidas constantes, o que significou na prática uma variação muito pequena da superfície molhada e conseqüentemente da resistência de atrito.

Pode-se perceber que a formulação da série Delft apresenta uma variação da resistência de onda discreta em função da relação  $Bwl/T_c$ , principalmente porque o coeficiente volumétrico era constante para os três cascos.

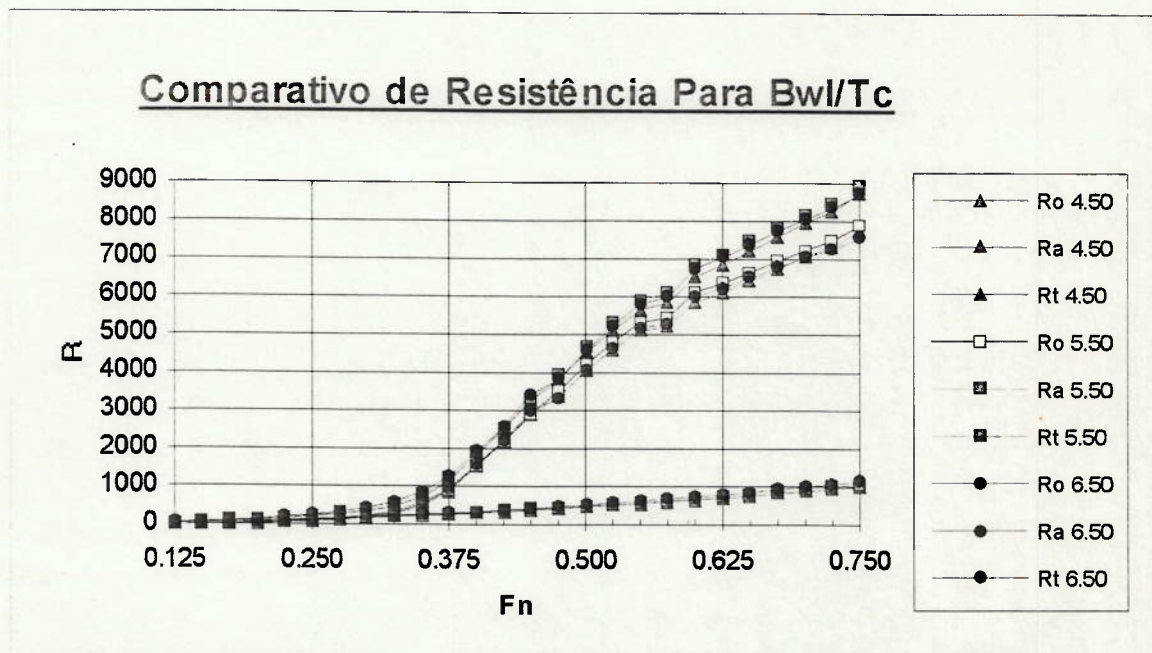


Figura 8.7: Comparativo da Resistência Para  $Bwl/T_c$ .

A pequena variação da resistência total de cada veleiro não implica necessariamente em desempenhos semelhantes. A relação  $Bwl/T_c$ , assim como o coeficiente volumétrico, apresenta um forte impacto sobre a estabilidade da embarcação, favorecendo a performance na região de contravento para ventos fortes. O gráfico de velocidade da embarcação para ventos leves (6.0 nós), na figura 8.9, indica que a pequena diferença na resistência total resultou em uma performance muito próxima dos três cascos. Porém, o de menor relação boca/calado, que tem a menor resistência total, apresenta uma performance superior aos demais, nesta velocidade de vento onde a estabilidade não é um fator crítico.



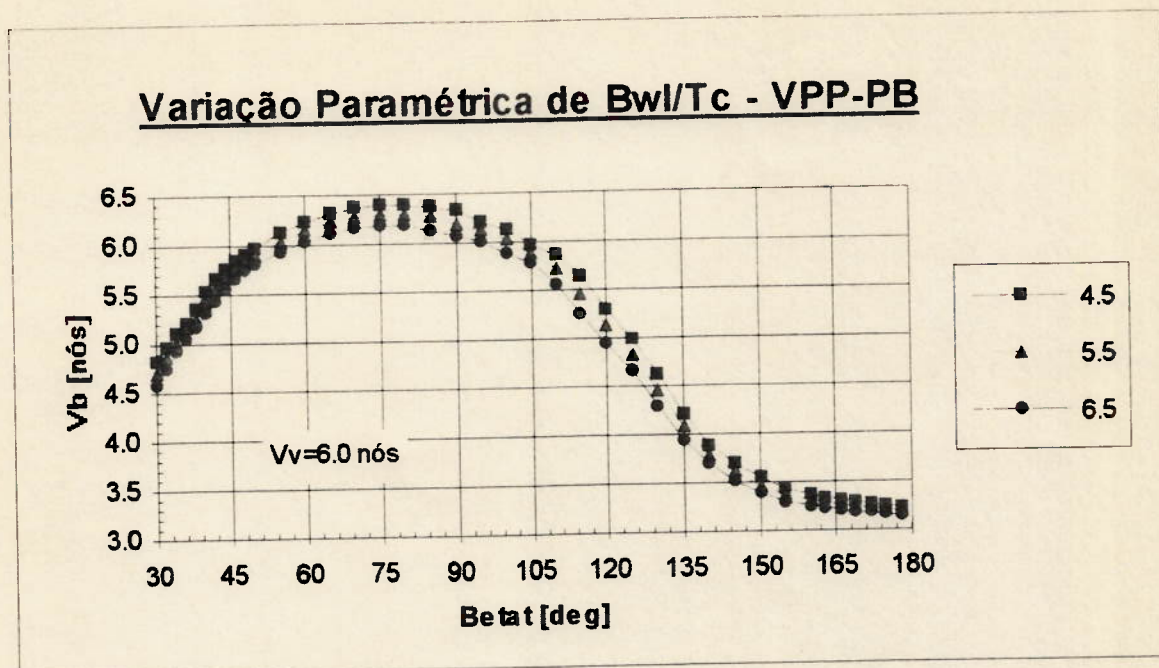


Figura 8.8: Variação Paramétrica de  $Bwl/T_c$  -VPP-PB,  $V_v=6.0$  nós

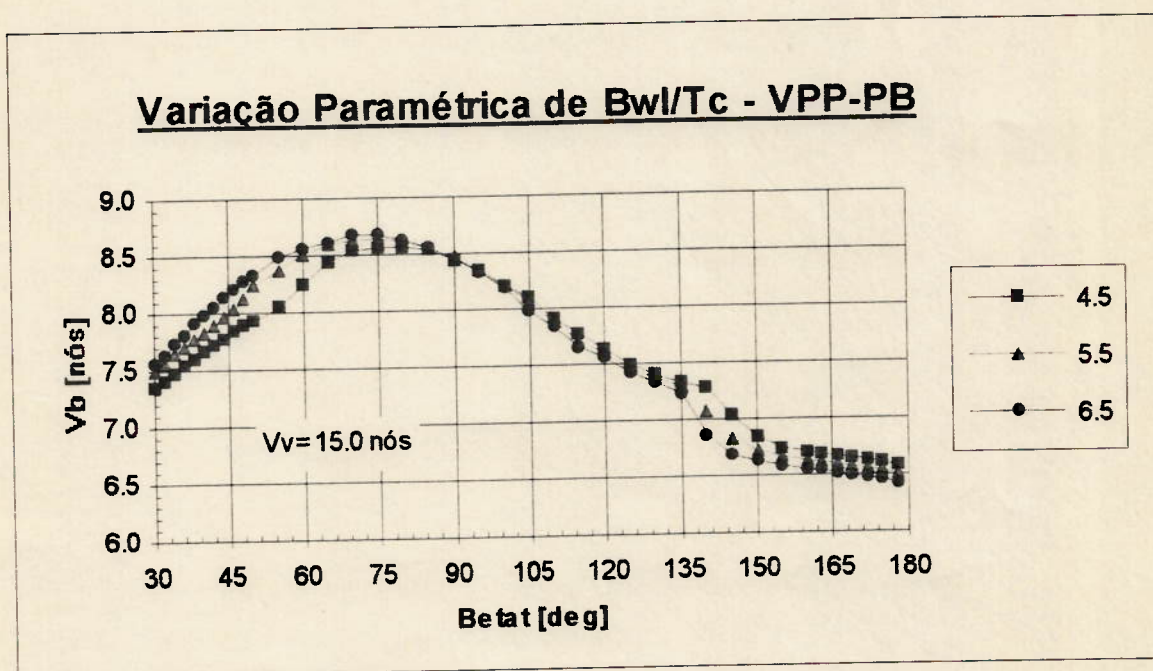


Figura 8.9: Variação Paramétrica de  $Bwl/T_c$  -VPP-PB,  $V_v=15.0$  nós

Para ventos mais fortes a embarcação de maior boca, e conseqüentemente maior estabilidade, obtêm velocidades maiores em contravento, apesar da diferença entre os três cascos não ser superior a 7%.

### 8.1.2.3. Posição Longitudinal do Centro de Flutuação

O posicionamento longitudinal do centro de flutuação é um dos parâmetros que influenciam a resistência de onda em toda a faixa de número de Froude (0.125 a 0.750), aparecendo nos dois polinômios da série Delft. A grande influência deste parâmetro sobre a resistência em regimes de semi-planeio e planeio faz com que o segundo polinômio apresente uma variação mais acentuada com a modificação do posicionamento do LCF. Em geral nota-se uma tendência monotônica de redução da resistência de onda a medida que o LCF desloca-se para a popa para números de Froude maiores que 0.450.

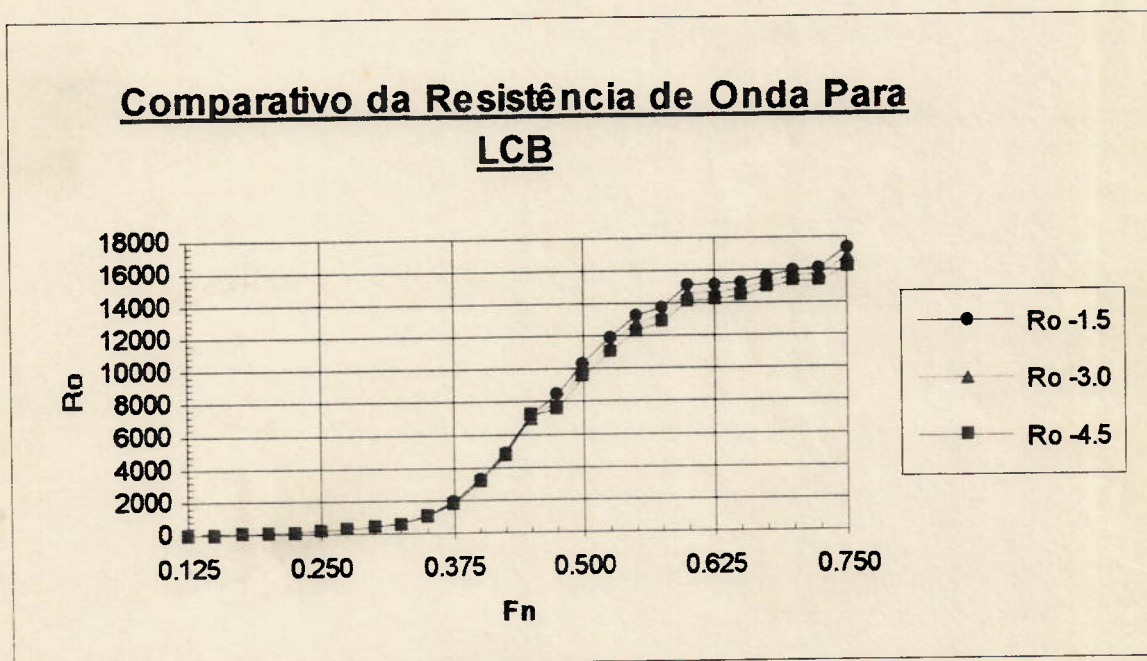


Figura 8.10: Comparativo da Resistência de Onda Para LCF

Mesmo variando o centro de flutuação dentro dos limites permitidos pela série, uma descontinuidade na curva surge no ponto de número de Froude 0.450, em função da diferença de ponderação deste adimensional para cada uma das equações dadas por GERRITSMAN apud OOSSANEN (1993), de maneira semelhante ao ocorrido com o coeficiente volumétrico.

Este comportamento pode ser constatado no gráfico de resistência de onda da figura 8.10, onde são apresentadas as curvas de resistência de onda para os valores



de -1.5, -3.0 e -4.5% do comprimento total para o centro de flutuação (os valores negativos indicam que o LCF encontra-se a ré da secção mestra).

## 8.2. FORÇA LATERAL:

Para a validação da formulação para o cálculo da força lateral das superfícies de sustentação das obras vivas (leme e quilha), os valores do coeficiente de sustentação dados por OOSSANEN (1993) foram comparados aos estudos de superfícies de controle de baixa razão de aspecto realizado por WHICKER (1958) no "David Taylor Model Basin" (DTMB).

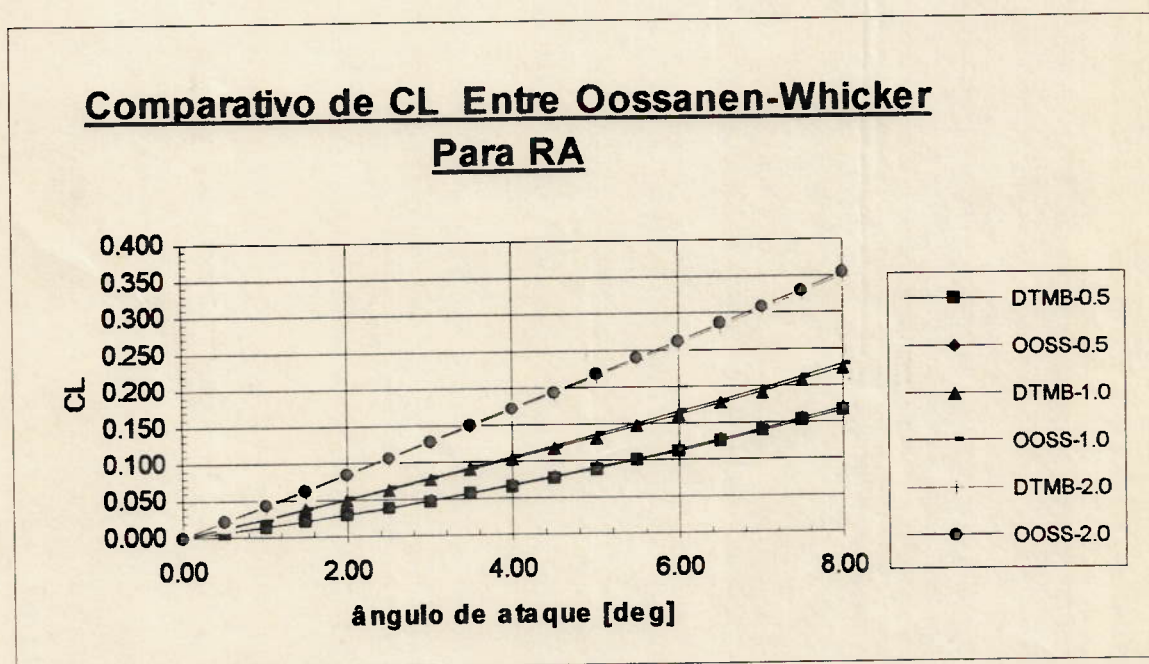


Figura 8.11: Comparativo do  $C_L$  Entre Oossanen e Whilker

Os valores de  $C_L$  foram obtidos para ângulos de ataque entre  $0^\circ$  e  $8^\circ$  graus, que são os valores esperados de deriva e para razões de aspecto geométricas (b/c) de 0.5, 1.0 e 2.0. Para os coeficientes de influência do casco e do bulbo sobre a superfície de sustentação na formulação de OOSSANEN (1993), foram adotados os valores unitários para que a comparação pudesse ser realizada nas mesmas condições, já que no ensaio de

WHICKER (1993) a superfície de sustentação era uma asa fixada perpendicularmente a uma superfície plana e não continha apêndices.

A figura 8.11 mostra que os valores do coeficiente de sustentação encontram-se em concordância, além de indicar o crescimento deste coeficiente com o aumento da razão de aspecto geométrica.

A otimização da quilha têm uma grande importância na busca de uma otimização de performance na região de contravento. Gerar a máxima força lateral, que é sua principal função, com o mínimo de arrasto, conseqüentemente diminuindo o ângulo de deriva sem diminuir a velocidade, trará um incremento na velocidade ótima, que deve ser o parâmetro a ser otimizado na navegação em contravento.

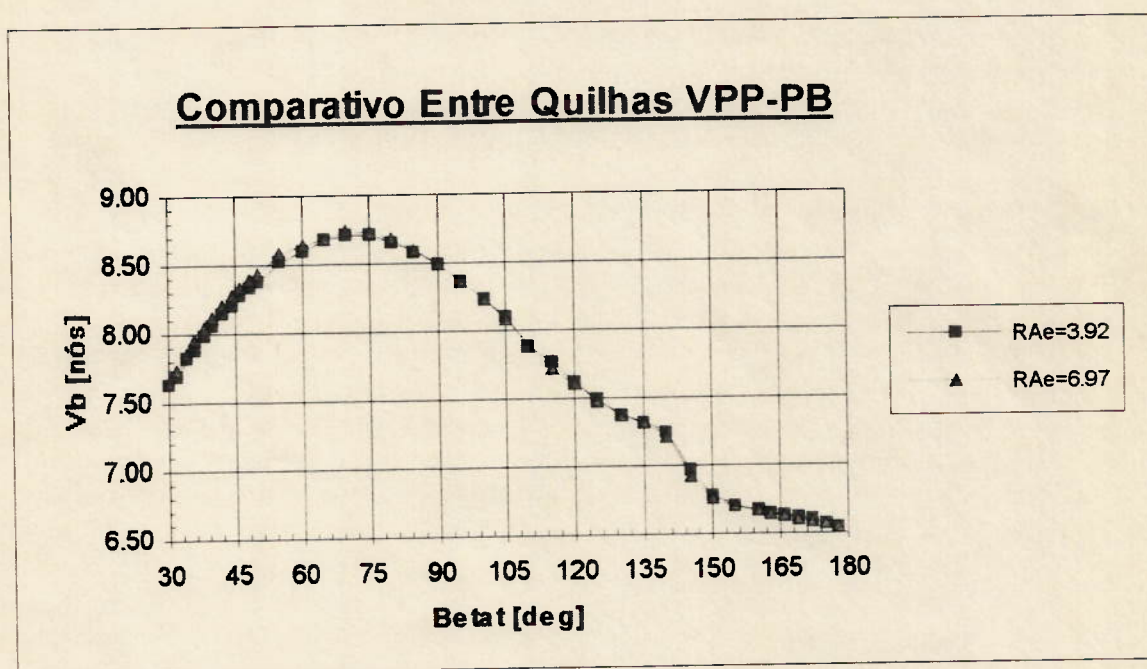


Figura 8.12: Comparativo Entre Quilhas Para Velocidade VPP-PB

Para testar a capacidade do programa VPP-PB em diferir a performance da quilha, foram rodados dois veleiros de mesmo casco e velame, porém com quilhas de razão de aspecto efetiva de 3.92 e 6.97, tendo porém a mesma área lateral. Com isto obtém-se praticamente a mesma resistência ao avanço (a menos da resistência induzida, que é menor para o segundo caso) e mesma velocidade final, como mostra a figura 8.12.



Como foi mostrado na figura 8.11, o coeficiente de sustentação aumenta com o aumento da razão de aspecto, fazendo com que os modelos ensaiados, que possuem quilhas com mesma área mas  $RA_e$  diferentes, gerem ângulos de deriva diferentes para gerar uma mesma força lateral (como a área vélica é igual e a velocidade é praticamente a mesma, a força lateral aerodinâmica é igual em ambos os casos). Isto pode ser visto claramente na figura 8.13, onde a embarcação com quilha de maior razão de aspecto apresenta menor deriva.

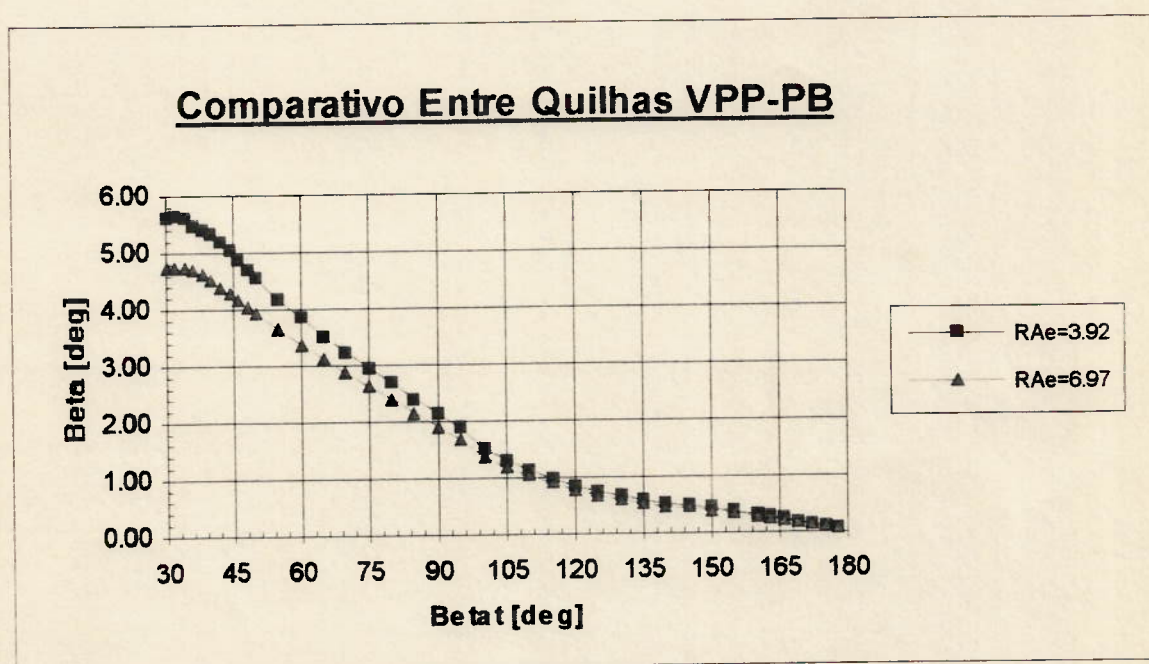


Figura 8.13: Comparativo Entre Quilhas Para Deriva VPP-PB

A combinação entre velocidade e deriva, com o intuito de comparar performances, é a velocidade ótima da embarcação. Para este exemplo, onde as velocidades são praticamente iguais, a velocidade ótima depende apenas do coseno entre a diferença de deriva das duas embarcações, o que resulta em Vmg's muito próximos. Apesar disto, o gráfico da figura 8.14 mostra um resultado coerente pois indica que a embarcação com quilha mais profunda apresenta uma velocidade ótima maior, principalmente na região de contravento onde a diferença entre os ângulos de deriva é mais acentuada.

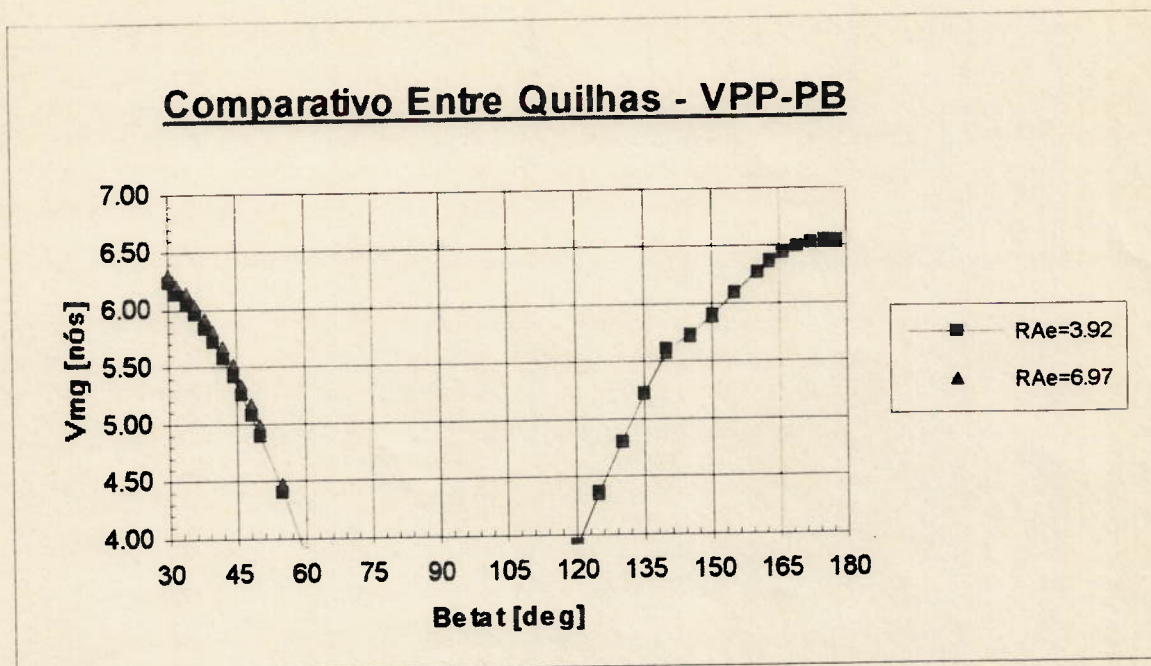


Figura 8.14: Comparativo Entre Quilhas Para Vmg VPP-PB

### 8.3 COEFICIENTES AERODINÂMICOS

Os coeficientes aerodinâmicos sugeridos pela IMS para a força de sustentação e arrasto parasita das velas marconi, "full-batten" genoa e balão são apresentados em função do ângulo de vento aparente. Entretanto, os intervalos entre os valores de  $\beta_A$  são muito grandes e a própria IMS recomenda que se faça a aproximação por curvas do terceiro grau. Como os polinômios do terceiro grau apresentam uma grande flexibilidade, a aproximação por este tipo de curva pode gerar resultados errôneos para valores de  $\beta_A$  intermediários aos dados pela IMS. A solução adotada para este problema foi a adoção de mais pares de pontos para o valor do coeficiente de sustentação e para o coeficiente de arrasto, baseado no gráfico de ANTRIM (1990) à página 298. No citado gráfico são apresentados os coeficientes aerodinâmicos obtidos através do programa de predição de velocidade daquele autor para os coeficientes da IMS.

A partir desta solução foi implementada uma rotina no programa VPP-PB que gera todos os coeficientes com um intervalo de dois graus de ângulo aparente do vento. Estas



curvas estão representadas na figura 8.15 e estão em concordância com a da citada bibliografia.

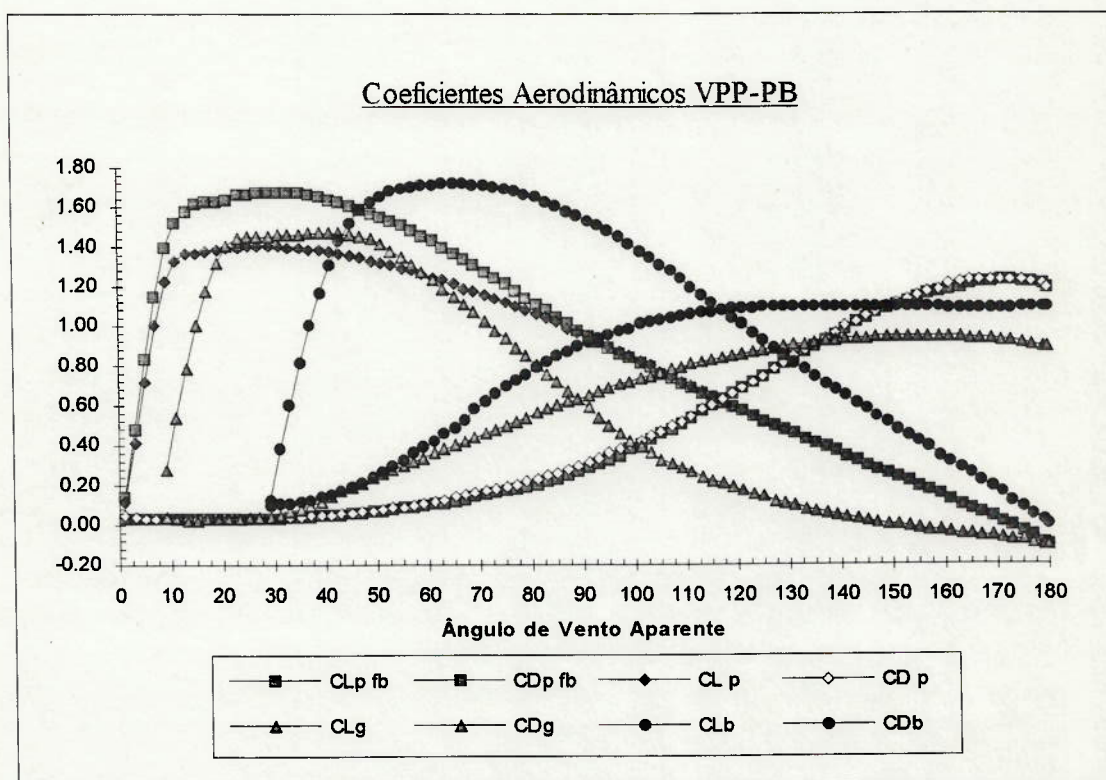


Figura 8.15: Coeficientes Aerodinâmicos Gerados Pelo VPP-PB

Os fatores geométricos sugeridos pela IMS, apesar de não terem seus valores apresentados em nenhuma publicação disponível, podem ser facilmente calculados com a ajuda de uma calculadora. Conferindo estes valores com os obtidos através do programa, conclui-se que as rotinas estavam realizando corretamente as operações.

## 9. MODELO PARA OTIMIZAÇÃO DA PERFORMANCE

Devido a complexidade da integração entre as forças aero e hidrodinâmicas e o grande número de variáveis envolvidas no cálculo das mesmas, torna-se extremamente difícil uma análise subjetiva da variação do desempenho final da embarcação a partir da variação de um determinado parâmetro. Por exemplo: a resposta a simples pergunta "qual a alteração da performance de um veleiro a partir de um aumento de 10% na razão boca/calado?", não pode ser dada de forma conclusiva, visto que, se por um lado esta variação acarretaria um aumento da superfície molhada e conseqüentemente da resistência total, por outro permitiria uma maior área vélica em função do ganho de estabilidade resultante de uma área de linha d'água maior.

Neste sentido um programa de análise de performance como o VPP torna-se muito útil pois permite que se faça rapidamente uma análise no comportamento da embarcação em função da variação dos parâmetros de interesse.

Neste capítulo pretende-se sugerir um modelo de variação de alguns aspectos importantes no desempenho geral de uma embarcação a vela, gerando uma série sistemática de veleiros e submetendo-os ao programa VPP-PB. A partir desses resultados alguns comentários serão tecidos procurando indicar um caminho de análise para a obtenção da melhor performance e elucidando, baseado nas formulações e teorias citadas nos capítulos anteriores, o porque das variações na mesma. Inicialmente será discutido detalhadamente (quantitativamente) a performance do modelo mãe com suas três quilhas nos quesitos velocidade final, deriva e velocidade ótima e também no que se refere as forças hidrodinâmicas desenvolvidas pelas obras vivas. Numa segunda abordagem os vinte e sete modelos serão analisados qualitativamente nos parâmetros anteriormente citados além de uma avaliação da estabilidade.



O interesse não é descobrir qual o melhor casco, quilha ou plano vélico isoladamente, mas sim qual a melhor combinação entre eles, para determinadas condições de vento. Para isto escolheu-se três velocidades de vento real:  $V_v = 6.0$  nós, que corresponde a um regime de ventos leves;  $V_v = 15.0$  nós, correspondente a ventos moderados;  $V_v = 21.0$  nós que representa ventos de moderados a fortes. Com isto espera-se cobrir uma grande porcentagem do regime de ventos encontrados por uma embarcação ao longo da sua vida útil.

## 9.1 VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS

OOSSANEN (1985) sugere para o projeto do casco a observação cuidadosa de quatro parâmetros: o comprimento de linha d'água ( $L_{wl}$ ), a relação boca/calado ( $B_{wl}/T_c$ ), o coeficiente volumétrico ( $L_{wl}/\nabla^{1/3}$ ) e a área vélica ( $A_v$ ). Será sugerido nesta dissertação que se varie os apêndices afim de se poder avaliar a interferência da quilha no processo de integração. Isto torna o campo de análise mais abrangente, não chegando porém, a constituir um problema no que se refere aos cálculos visto os mesmos serem feitos pelo programa.

O primeiro parâmetro a ser dimensionado é o comprimento da linha d'água da embarcação que define fundamentalmente o custo da mesma e seu potencial de velocidade (como comentado no capítulo 3). Uma vez definida a estimativa de  $L_{wl}$  deve-se admitir três valores para o coeficiente volumétrico e conseqüentemente para o deslocamento. Este adimensional é função das condições de mar e vento, resistência de onda e porcentagem do percurso no contravento. Finalmente estima-se três valores para a relação boca/calado (para cada um dos coeficientes volumétricos) que irá influenciar principalmente a estabilidade e a superfície molhada do veleiro.

Ao final deste processo obtêm-se então nove cascos. As áreas vélicas podem ser calculadas a partir do coeficiente ( $A_v/\nabla^{2/3}$ ), e a altura do mastro a partir da "capacidade de carregar velas" (discutido no capítulo 3). Para uma primeira análise pode-

se admitir que estes coeficientes tenham o mesmo valor para todos os nove cascos, o que gerará três áreas vélicas diferentes.

Adota-se então três quilhas com diferentes áreas de plataformas e razões de aspecto. Sugere-se que tenham a mesma envergadura afim de que a variação do centro de gravidade não interfira na análise do incremento de estabilidade advindo da variação dos parâmetros do casco definidos anteriormente. O cruzamento dos nove cascos com as três quilhas resultará em um total de 27 veleiros que podem ter sua velocidade predita pelo VPP e analisada "a posteriori".

O fluxograma desta metodologia pode ser visto na figura 9.1. Percebe-se que há um laço externo que realimenta o comprimento de linha d'agua caso a velocidade desejada não seja obtida.

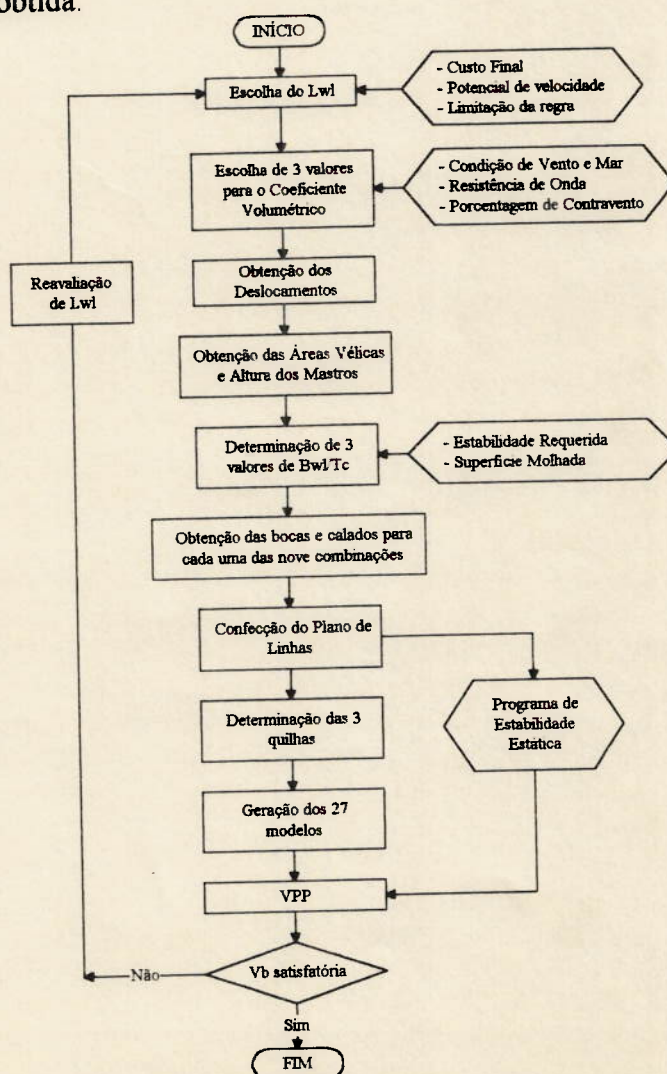


Figura 9.1: Fluxograma Para Geração de Modelos Para Análise de Performance



## 9.2 GERAÇÃO DA SÉRIE SISTEMÁTICA

Tomando por base a metodologia apresentada no item anterior foram gerados vinte e sete combinações de cascos, quilhas e velame para um comprimento de linha d'água fixo (adotado arbitrariamente) de doze metros. Com o auxílio de embarcações semelhantes foram obtidos os valores médios dos adimensionais envolvidos no processo para todas as faixas de comprimento e um valor médio para a faixa compreendida entre 11.5 e 12.5 metros de linha d'água. Estes valores são apresentados na tabela 9.1.

	L/B	L/T <sub>máx</sub>	L/∇ <sup>1/3</sup>	A <sub>v</sub> /∇ <sup>2/3</sup>	A <sub>v</sub> .h/∇	Lastro/∇
μ	3.12	6.00	6.28	19.23	154.84	0.39
μ <sub>11.5-12.5</sub>	3.20	5.87	6.00	19.23	155.00	0.42

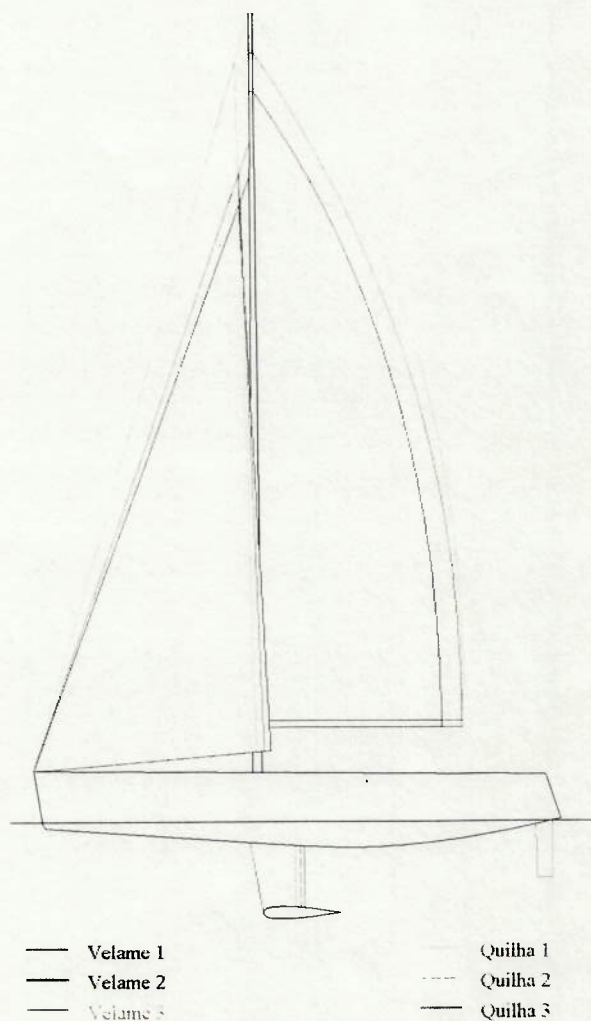
Tabela 9.1: Valores Médios dos Adimensionais

O passo seguinte foi a determinação das principais dimensões do modelo mãe (boca, boca na linha d'água e calado), que só foi possível com a adoção de um coeficiente de bloco igual a 0.34. Suas dimensões são apresentadas nas tabelas 9.2-A e 9.2-B (casco de número cinco).

Os outros oito modelos da série foram obtidos com uma variação de 6% para mais e para menos do coeficiente volumétrico e 10% para mais e para menos da relação boca/calado, mantendo-se o mesmo C<sub>b</sub>. Esta faixa de variação foi escolhida de forma que os coeficientes não ultrapassassem os valores limites das embarcações semelhantes.

É importante ressaltar que existem três diferentes velames, sendo porém todos "sloop's", visto que o mesmo é determinado através da relação entre área vélica e deslocamento. Sendo assim os modelos de 1 a 3 possuem o arranjo vélico 1 (fracionado em 7/8), os modelos 3 a 6 o arranjo vélico 2 (fracionado em 7/8) e os modelos 6 a 9 o velame 3 (armado ao tope) segundo a figura 9.2 (suas dimensões são apresentadas na tabela 9.2).

Para o lastro ocorre o mesmo que para o velame, ocasionando três pesos de lastro diferentes para os modelos 1 a 3, 3 a 6, e 6 a 9 respectivamente como pode ser visto na tabela 9.2-B.



Arranjo vélico e quilhas representados sobre o perfil do modelo 5 apenas para efeito de ilustração

Figura 9.2: Arranjos Vélicos e Quilhas

As dimensões principais do casco dos nove modelos e dos respectivos velames são apresentados nas tabelas 9.2-A e 9.2-B, sendo o modelo número cinco o gerado a partir dos valores médios obtidos de embarcações semelhantes e por isto é tratado aqui como modelo mãe.



Barco	Lwl	Bwl	T	L	B	C <sub>R</sub>	▽	Lwl/▽ <sup>1/3</sup>	Bwl/T	L/B
1	11.60	2.60	0.58	12.00	3.27	0.34	5.92	6.41	4.50	3.67
2	11.60	2.74	0.55	12.00	3.45	0.34	5.92	6.41	5.00	3.48
3	11.60	2.88	0.52	12.00	3.61	0.34	5.92	6.41	5.50	3.32
4	11.60	2.84	0.63	12.00	3.57	0.34	7.04	6.05	4.50	3.36
5	11.60	2.99	0.60	12.00	3.75	0.34	7.04	6.05	5.00	3.20
6	11.60	3.14	0.57	12.00	3.94	0.34	7.04	6.05	5.50	3.05
7	11.60	3.12	0.69	12.00	3.92	0.34	8.49	5.69	4.50	3.07
8	11.60	3.29	0.66	12.00	4.13	0.34	8.49	5.69	5.00	2.91
9	11.60	3.45	0.63	12.00	4.33	0.34	8.49	5.69	5.50	2.77

Dimensões em metros ou m<sup>3</sup>

Tabela 9.2-A: Dimensões Principais dos Modelos da Série

Mod.	Lastro	b <sub>0</sub>	A <sub>v</sub>	h	I	J	D <sub>g</sub>	P	E	(A <sub>T</sub> ) <sub>c</sub>	A <sub>wl</sub>
1	2.50	1.472	63.00	14.60	12.47	5.00	5.00	13.266	3.650	4.178	20.00
2	2.50	1.501	63.00	14.60	12.47	5.00	5.00	13.266	3.650	4.089	21.09
3	2.50	1.527	63.00	14.60	12.47	5.00	5.00	13.266	3.650	3.851	22.12
4	3.00	1.419	70.60	15.50	13.43	5.00	5.00	14.157	4.100	4.713	21.85
5	3.00	1.450	70.60	15.50	13.43	5.00	5.00	14.157	4.100	4.532	22.95
6	3.00	1.479	70.60	15.50	13.43	5.00	5.00	14.157	4.100	4.400	24.12
7	3.60	1.357	80.00	16.40	16.24	5.00	5.00	15.048	4.125	5.144	23.96
8	3.60	1.393	80.00	16.40	16.24	5.00	5.00	15.048	4.125	4.883	25.25
9	3.60	1.423	80.00	16.40	16.24	5.00	5.00	15.048	4.125	4.484	26.49

Dimensões em metros ou m<sup>2</sup>

Tabela 9.2-B: Dimensões Principais dos Modelos da Série

Para que a influência da variação da relação boca/calado e do coeficiente volumétrico no desempenho não fosse confundido com o resultante da variação de outros parâmetros, tentou-se na medida do possível mantê-los constantes. Este é o caso do C<sub>b</sub>, C<sub>p</sub>, C<sub>m</sub>, C<sub>wl</sub>, LCF, do centro de gravidade e do calado máximo, sendo seus valores apresentados na tabela 9.3.

C <sub>R</sub>	C <sub>p</sub>	C <sub>M</sub>	C <sub>wl</sub>	LCF	K <sub>g</sub>	T <sub>máx</sub>
0.34	0.523	0.648	0.662	1.214	1.18	2.05

Dimensões em metros

Tabela 9.3: Valores Constantes Para Todos os Modelos

Para o cálculo do centro de gravidade foi considerado que todo o lastro estaria concentrado em um bulbo fixo na ponta inferior da quilha, sendo que seu eixo axial passaria pela linha de base. O peso da embarcação foi considerado como sendo o

deslocamento total (convertido para toneladas utilizando a densidade da água salgada) menos o peso de lastro, e seu centro de gravidade estaria na altura da linha d'água. Como o calado máximo é igual para todos os modelos, consegue-se o mesmo centro de gravidade total para os modelos, garantindo que a variação na estabilidade a ser sentida de um modelo para o outro será decorrência apenas das diferenças geométricas entre cada um.

A partir do levantamento de embarcações semelhantes e de posse dos coeficientes e dimensões principais gerou-se um plano de linhas do modelo mãe e cujas curvas hidrostáticas são apresentadas nas figuras 9.3-A à 9.3-C.

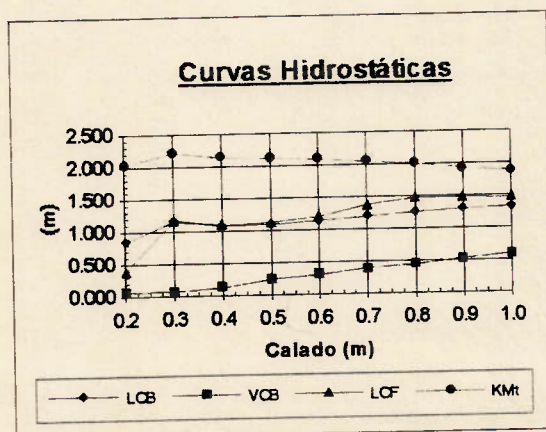


Figura 9.3-A: Curvas Hidrostáticas - Modelo Mãe (LCB, VCB, LCF, KMt)

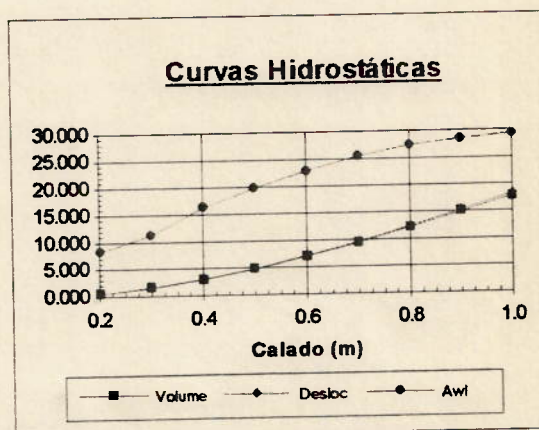


Figura 9.3-B: Curvas Hidrostáticas - Modelo Mãe (Volume, Deslocamento, Awl)

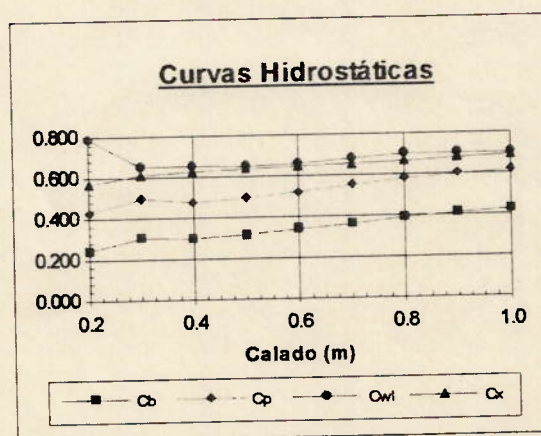


Figura 9.3-C: Curvas Hidrostáticas - Modelo Mãe (Cb, Cp, Cwl, Cm)



As curvas hidrostáticas tornaram possível a conferência dos valores dos adimensionais inicialmente propostos bem como a determinação de outros como a posição do centro de carena e de linha d'água.

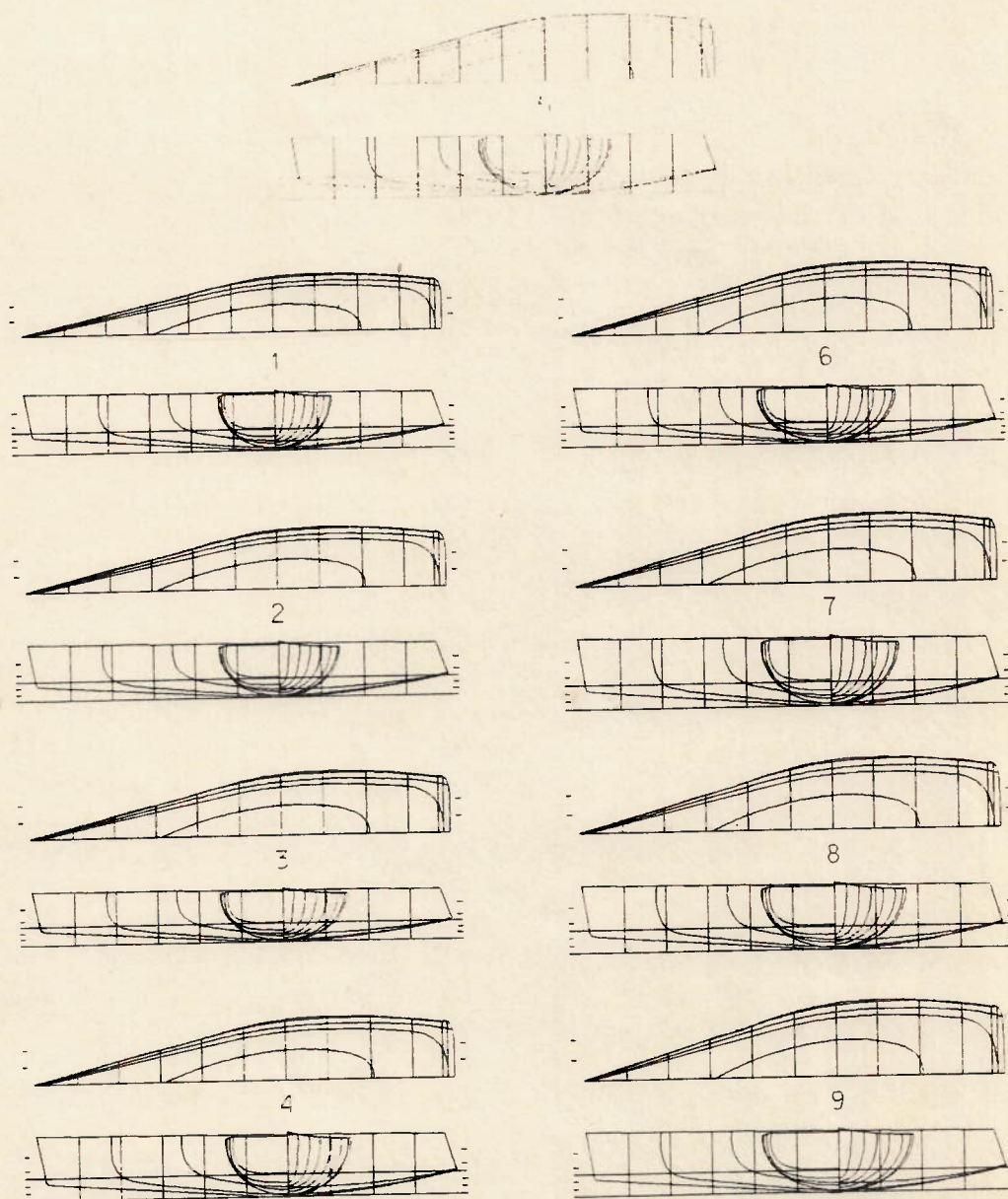


Figura 9.4: Planos de Linhas dos Modelos 1 à 9

De posse das linhas do modelo mãe e das relações entre os dimensionais deste e dos outros oito modelos é possível desenhar todos os planos de linhas dos modelos, sempre procurando manter uma uniformidade nas mesmas, para que a comparação da performance pudesse ser realizada entre cascos de linhas semelhantes. Os planos de linhas são apresentadas na figura 9.4.

O desenvolvimento das quilhas foi feito tomando-se por base o calado máximo de 2.05 metros (obtido a partir do valor médio de embarcações semelhantes), o que influenciou diretamente sua envergadura, que só não foi a mesma para todos os 9 modelos de casco devido a diferença de calado (apenas do casco) entre eles. Foi adotada uma variação de 10 e 20% da corda original alterando-se assim a área e a razão de aspecto final destes apêndices (vide figura 9.2). O leme adotado foi mantido constante para as 27 configurações dos casco e encontra-se, juntamente com as dimensões da quilha, apresentado na tabela 9.4.

	$C_r$	$C_n$	$\Lambda$	$x_{1/a}$
Quilha 1	1.030	0.750	7.53°	4.980
Quilha 2	1.133	0.825	7.53°	4.980
Quilha 3	1.236	0.900	7.53°	4.980
Leme	0.396	0.350	1.62°	11.307

Dimensões em metros e graus

Tabela 9.4: Dimensões dos Apêndices

A partir deste momento adotar-se-á a seguinte convenção: cada modelo será chamado pela combinação de dois números, onde o primeiro refere-se ao modelo do casco e o segundo ao da quilha. Sendo assim o modelo 3.2 será o casco três combinado com a quilha de número dois.

### 9.3 ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS 27 MODELOS DA SÉRIE

Ao se realizar a análise de performance comparativa entre vários casco existe a necessidade da determinação de um critério para a escolha da melhor combinação entre



cascos, velas e quilhas. Neste item será mostrado como escolher esta melhor combinação baseado no critério velocidade ótima máxima em ventos de quinze e vinte e um nós, para todas as maréações. Esta faixa de velocidades de vento foram escolhidas por representar uma porcentagem significativa dos ventos encontrados no litoral brasileiro, e o parâmetro velocidade ótima representa a tentativa de se escolher o melhor casco para regatas oceânicas disputadas em águas brasileiras (um percurso longo, uma de médio percurso e três triângulos olímpicos).

Para uma análise completa de cada caso seria necessário a confecção de três gráficos (velocidade, deriva e velocidade ótima) para cada combinação de quilha para uma dada razão boca/calado e coeficiente volumétrico, mais quatro gráficos (os três anteriores acrescidos de um para a banda) para cada relação boca/calado, e mais quatro para os coeficientes volumétricos. Combinando o cruzamento de todas as possibilidades obtêm-se um total de quarenta e oito gráficos, sem contar os derivados de algum detalhamento que se queira realizar como avaliação apenas em uma região do ângulo de aproamento, forças hidrodinâmicas atuantes, etc.

Numa tentativa de se reduzir o número de gráficos para a escolha da embarcação final, sugere-se a seguinte metodologia:

1. Para cada um dos nove modelos de casco escolhe-se a melhor quilha.
2. A partir das combinações cascos-quilhas do primeiro passo, escolhe-se o melhor casco em relação a razão boca/calado para cada coeficiente volumétrico.
3. Os cascos resultantes do passo 2 são confrontados para cada coeficiente volumétrico, e escolhe-se a combinação final.

Esta metodologia, que está representada no fluxograma da figura 9.5, será utilizada aqui para a procura da embarcação ótima entre as 27 geradas, nas condições apresentadas anteriormente.

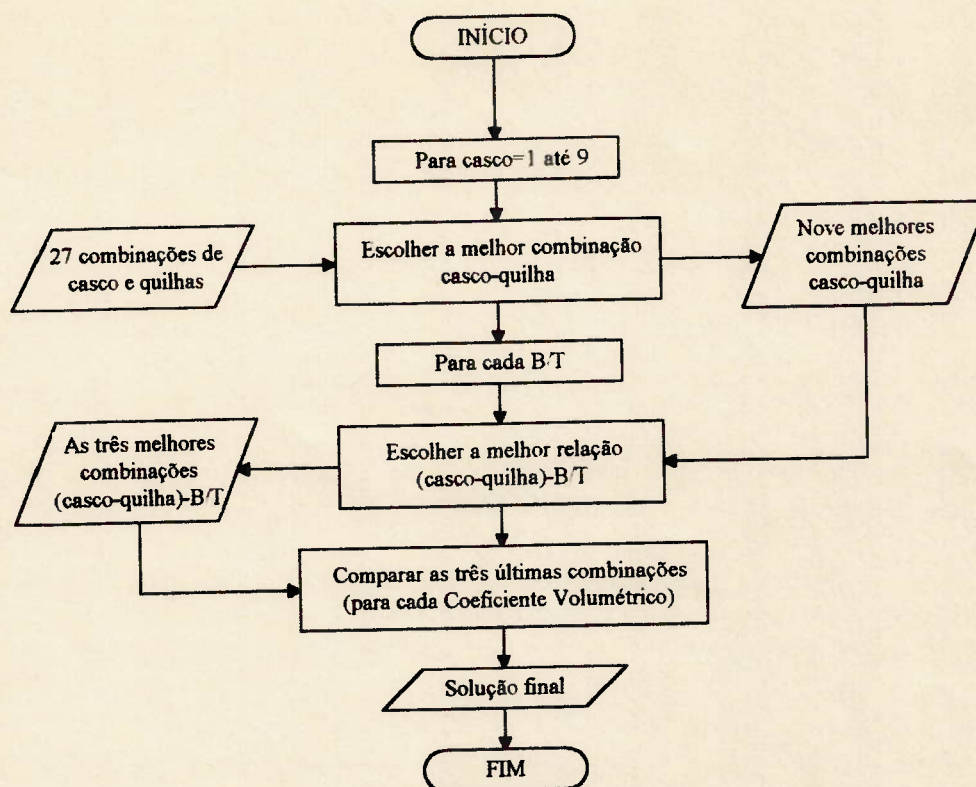


Figura 9.5: Fluxograma Para a Escolha da Embarcação Ótima

### 9.3.1 Avaliação da Variação da Quilha

Para exemplificar a escolha da quilha responsável pela melhor performance, escolheu-se o casco de número cinco. Sendo assim quando se falar que uma determinada quilha resulta em uma performance melhor que uma segunda, neste item, deve-se ter em mente que isto é válido para este modelo de casco (número 5) e vela (velame número 2).

A principal função da quilha é gerar força lateral hidrodinâmica para equilibrar a força aerodinâmica correspondente. Visto que esta força lateral atinge seus valores máximos nas manobras de contravento e través, é de se esperar que a quilha funcione como um diferencial de performance nestas condições de vento incidente, sendo que para ventos largos suas variações sejam menos sentidas.

As quilhas utilizadas nos modelos diferem basicamente no comprimento de suas cordas médias, e conseqüentemente nas suas áreas e razões de aspecto, visto que a envergadura encontra-se limitada pelo calado máximo fixo. Sendo assim a quilha número



1 é a que apresenta a menor área, porém a maior razão de aspecto. Isto resultará em maior eficiência e menor arrasto induzido e viscoso. Já a quilha 2 apresenta uma corda 10% maior que a de número 1, enquanto a 3 apresenta uma corda 20% maior que a quilha 1, o que as coloca em ordem crescente de área e decrescente de razão de aspecto e eficiência.

A variação na superfície molhada dos apêndices resulta em diferentes valores para a resistência de atrito. A quilha 1 portanto deverá apresentar maiores velocidades que as outras duas em todas as condições de vento, fato este que pode ser constatado nas figuras 9.6-A à 9.6-C. Este fenômeno é mais acentuado no gráfico 9.6-A, onde a velocidade real do vento é de seis nós e a velocidade da embarcação situa-se entre 4.75 e 6.40 nós aproximadamente, o que corresponde a uma faixa de número de Froude entre 0.23 e 0.31. Nesta faixa a força hidrodinâmica preponderante é a força de atrito e, portanto, a diferença de superfície molhada influencia a performance de uma maneira mais direta, fazendo com que a embarcação dotada de menor superfície molhada tenha uma velocidade maior, no caso o modelo 5.1 seguido do 5.2 e 5.3 consecutivamente.

A medida que a velocidade do vento aumenta, a velocidade da embarcação também sofre um incremento sensível. Para quinze nós de vento real têm-se uma velocidade da embarcação entre 7.35 e 8.65 ( $0.35 \leq F_n \leq 0.42$ ), aproximando as velocidades dos diferentes modelos uma vez que a resistência de onda passa a constituir uma porcentagem maior da resistência total. A figura 9.6-C, que representa a velocidade da embarcação para um vento real de vinte e um nós praticamente apresenta uma concordância entre as velocidades. Isto é razoável uma vez que a faixa de número de Froude atingida (entre 0.36 e 0.52) situa o problema hidrodinâmico na região onde a resistência ao avanço é preponderantemente devido a resistência de onda, sendo a parcela de atrito bem menor que aquela. Sendo assim, neste regime de velocidade deve-se priorizar as formas do casco em uma tentativa de se diminuir a resistência ao avanço através da redução da resistência de onda, tendo a superfície molhada uma importância secundária.

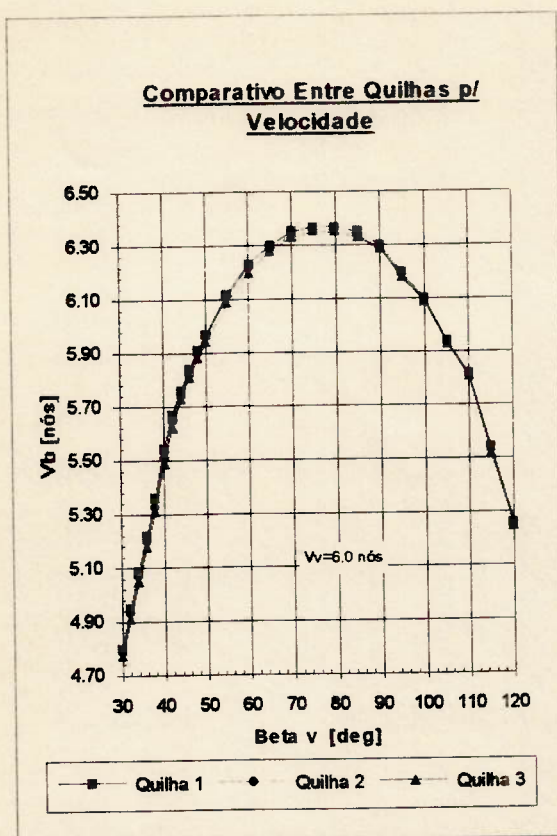


Figura 9.6-A: Comparativo das Quilhas p/ Velocidade  $V_v = 6.0$  nós

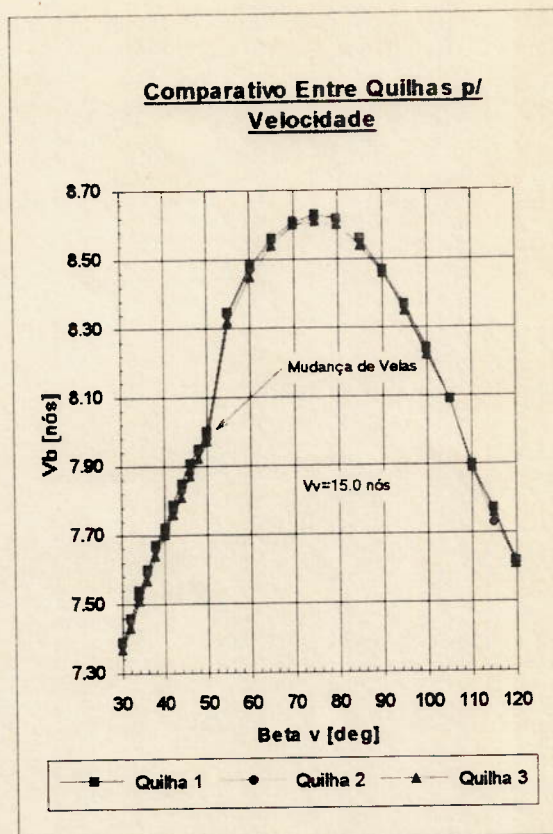


Figura 9.6-B: Comparativo das Quilhas p/ Velocidade  $V_v = 15.0$  nós

Outro fator que deve ser observado quando se analisa a integração casco-vela com a atenção voltada para os apêndices é o ângulo de deriva desenvolvido pela embarcação. Este parâmetro está ligado fundamentalmente a capacidade da embarcação de orçar mais próxima ou não da linha de vento. Ter ou não esta capacidade se fará sentir na velocidade ótima da embarcação como será discutido mais afrente neste capítulo.

A grandeza do ângulo de deriva  $\beta$  reflete a eficiência dos apêndices, e em um segundo plano do próprio casco, em gerar a força lateral necessária ao equilíbrio da embarcação. Isto porém não pode ser analisado de maneira tão simples visto que um apêndice de baixa razão de aspecto, porém com grande área lateral, pode gerar um ângulo de deriva menor que uma quilha com pequena área e alta razão de aspecto, entretanto a resistência induzida e de atrito da primeira será substancialmente maior, comprometendo a velocidade final da embarcação. Por este motivo apresentou-se a análise da velocidade em primeiro plano neste item.



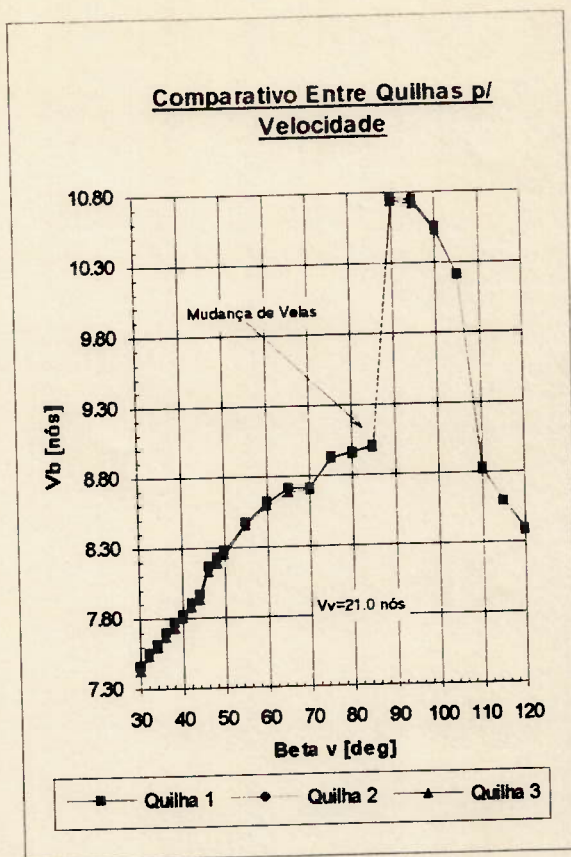


Figura 9.6-C: Comparativo das Quilhas p/ Velocidade  $V_v = 21.0$  nós

Na combinação do casco 5 e seus apêndices, percebe-se, como era de se esperar, que a quilha 3 apresenta ângulos de deriva menores que a quilha 2 e esta também tem o mesmo comportamento quando comparada a quilha 1. Isto quer dizer que o aumento da área lateral compensou a diminuição da razão de aspecto e da velocidade (como mostrado acima) no que se refere a geração de força no sentido perpendicular ao movimento ( $FL_{TH} = f_{(\beta, AL, RA, V_b)}$ ).

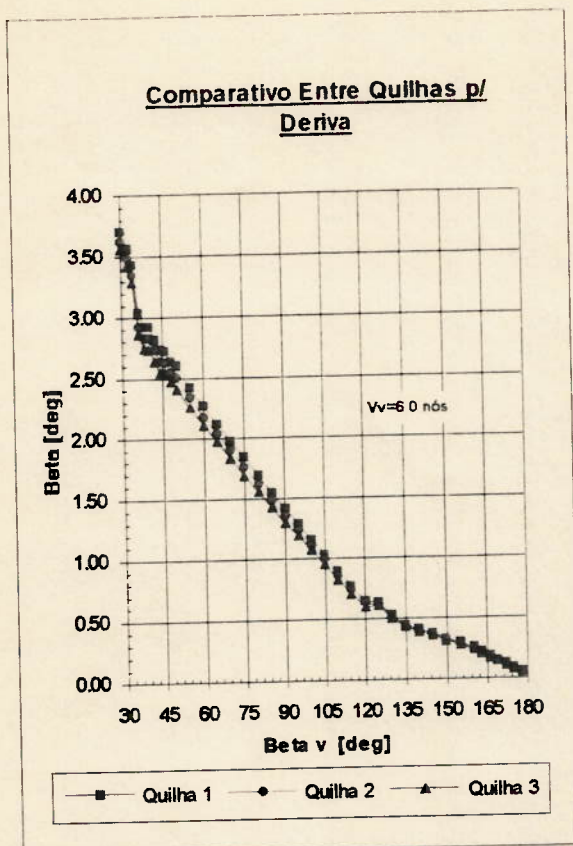


Figura 9.7-A: Comparativo das Quilhas p/ Deriva  $V_v = 6.0$  nós

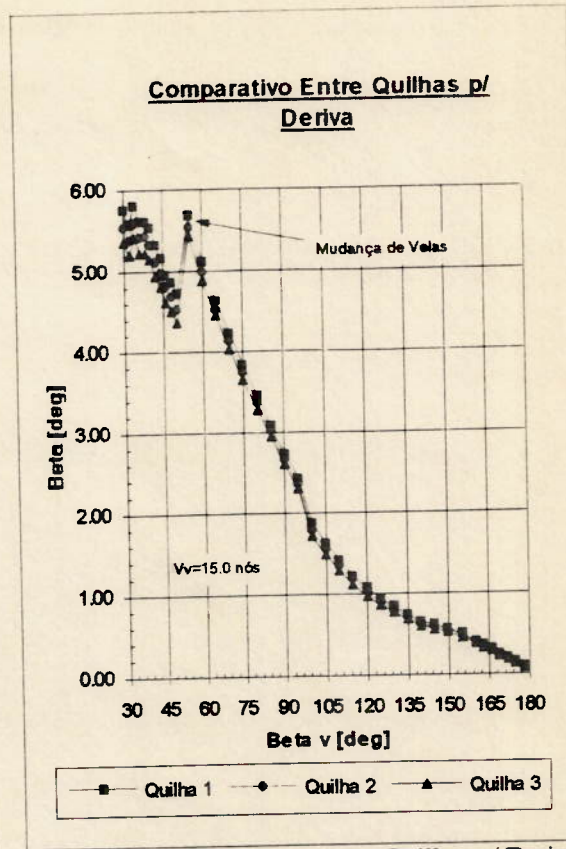


Figura 9.7-B: Comparativo das Quilhas p/ Deriva  $V_v = 15.0$  nós

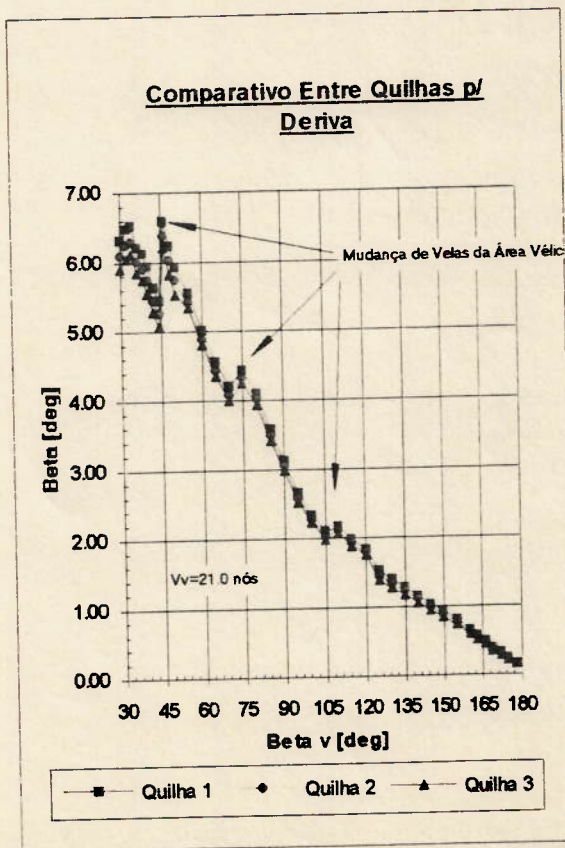


Figura 9.7-C: Comparativo das Quilhas p/ Deriva  $V_v = 21.0$  nós



O compromisso entre velocidade final e deriva pode ser melhor medido através da grandeza chamada de "velocidade ótima", definida no item 6.1 do capítulo 6. A velocidade ótima, Vmg (do inglês "made good"), representa a velocidade da embarcação na direção do vento, e nada mais é que a decomposição da velocidade na direção do vento real, utilizando-se para isto o cosseno do ângulo real do vento mais o ângulo de deriva. Desta maneira pode-se avaliar se o aumento da área lateral e consequente diminuição da velocidade e da deriva está resultando em maior ou menor velocidade na direção do vento, que afinal é o que importa.

A escolha do melhor arranjo casco-quilha em função da velocidade ótima requer um conhecimento maior do que apenas as características do barco, mas também exige uma avaliação das qualidades da tripulação e do tipo de regata, afinal a pergunta que se quer responder é: o que é melhor, um barco mais veloz em termos absolutos mas que orça menos, ou um barco mais lento porém que possui um rumo mais direto a próxima marca?

Se a embarcação for projetada para disputar uma regata oceânica ou simplesmente realizar um cruzeiro, não existirá nestas condições uma marca a ser montada, e neste caso o parâmetro de desempenho velocidade ótima não tem um peso grande no critério de projeto, pois o que interessará será a velocidade absoluta atingida pelo veleiro.

Já no caso de disputas em raias como o triângulo olímpico ou a Copa América (disputada em "match races"<sup>2</sup>) a necessidade de se montar as bóias a frente dos adversários exige que a velocidade seja otimizada ('feita ótima' = "made good" = máxima velocidade ótima) em direção a esta marca. A dicotomia curso-velocidade continua, qual deve ser otimizada? Uma embarcação que veleje mais alto (curso mais próximo do vento) pode levar vantagem sobre outra mais rápida porém com menos capacidade de orçar caso seu comandante consiga posicionar a embarcação a barlavento em relação a

---

<sup>2</sup> As regatas "match races" são disputadas por apenas dois veleiros de cada vez. Desta maneira o objetivo do comandante é sempre situar-se a barlavento da outra embarcação de modo a obstruir-lhe o vento. Esta tática é chamada de marcação, e quando bem aplicada, juntamente com uma tripulação afinada e uma embarcação com boa manobrabilidade, além da sorte, pode fazer com que um barco mais lento tenha sucesso sobre outro mais veloz.

do adversário, tendo para isto que ter uma boa manobrabilidade. Esta vantagem porém pode ser revertida para o veleiro que orça menos caso ele consiga desvencilhar-se da marcação e desenvolver sua maior velocidade impossibilitando que os barcos adversários "sujem" seu vento. Este tipo de análise requer uma avaliação da qualidade da tripulação e sua experiência em tomar as decisões certas durante uma regata baseada nos diferentes comportamentos apresentadas por cada veleiro, fazendo com que as vantagens da embarcação sejam realçadas enquanto as desvantagens não sejam reveladas.

Se analisarmos os gráficos das figuras 9.8-A à 9.8-C algumas interessantes conclusões podem ser tiradas. Estes gráficos representam a porcentagem da diferença entre a velocidade ótima das quilhas 2 e 3 em relação a velocidade ótima da quilha 1. A grandeza que esta sendo medida é dada pela equação 9.1, o que quer dizer que valores positivos representam a superioridade da quilha 1 sobre a quilha analisada.

$$\frac{(Vmg)_i - (Vmg)_1}{(Vmg)_1} \quad i = 1,2 \quad (9.1)$$

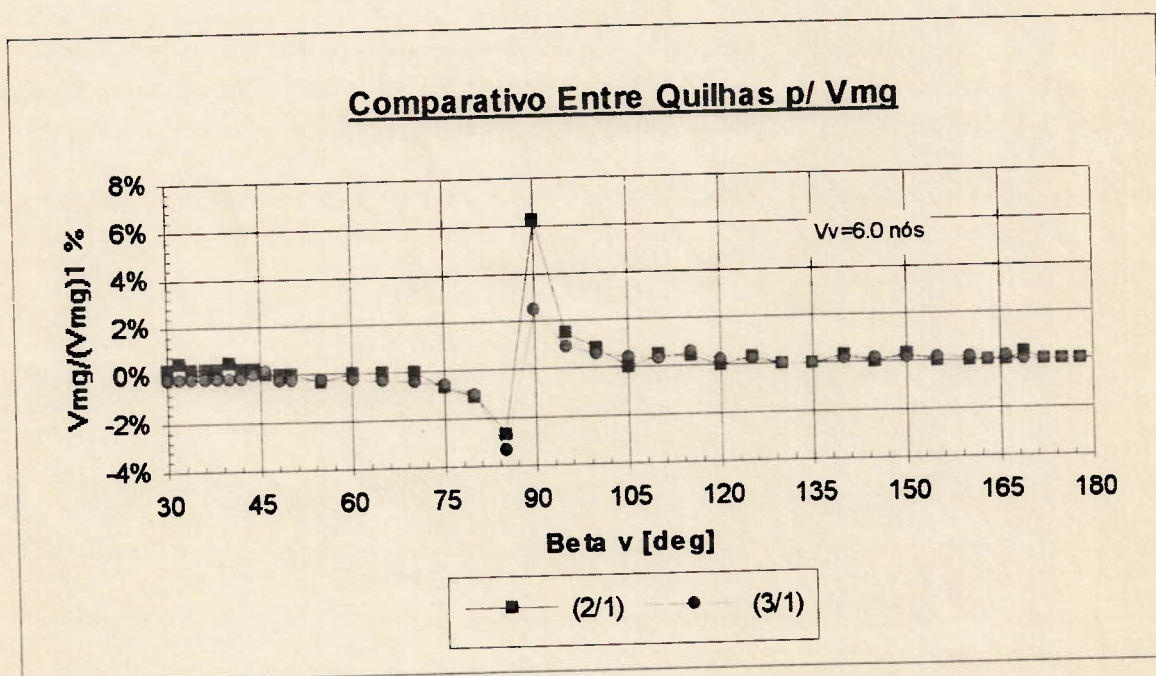


Figura 9.8-A: Comparativo Entre Quilha p/ Vmg Vv = 6.0 nós



Na figura 9.8-A, para vento real de seis nós, a quilha três apresenta os melhores valores para a velocidade ótima na região de contravento do que a quilha 1, o que significa dizer que a diminuição do ângulo de deriva através do aumento da área compensou a redução da velocidade final. Já a quilha dois resultou em um desempenho ou pior ou igual que a quilha 1 na faixa até setenta graus. Apesar de o ganho parecer irrisório, utilizando-se o Vmg para um ângulo de quarenta e cinco graus de aproamento do vento real e uma perna de contravento de 18.55 milhas náuticas (o mesmo tamanho utilizado na Copa América), a diferença na montagem das bóias seria em torno de dezoito segundos a favor do barco com a quilha 3.

À medida que a velocidade do vento real aumenta, esta situação tende a se inverter, com a quilha três apresentando valores iguais ou piores que a de número 1, enquanto que a quilha média (2) apresenta na maior parte dos ângulos de aproamento na região de contravento valores melhores de velocidade ótima. Estas conclusões são facilmente observáveis através das figuras 9.8-B e 9.8-C.

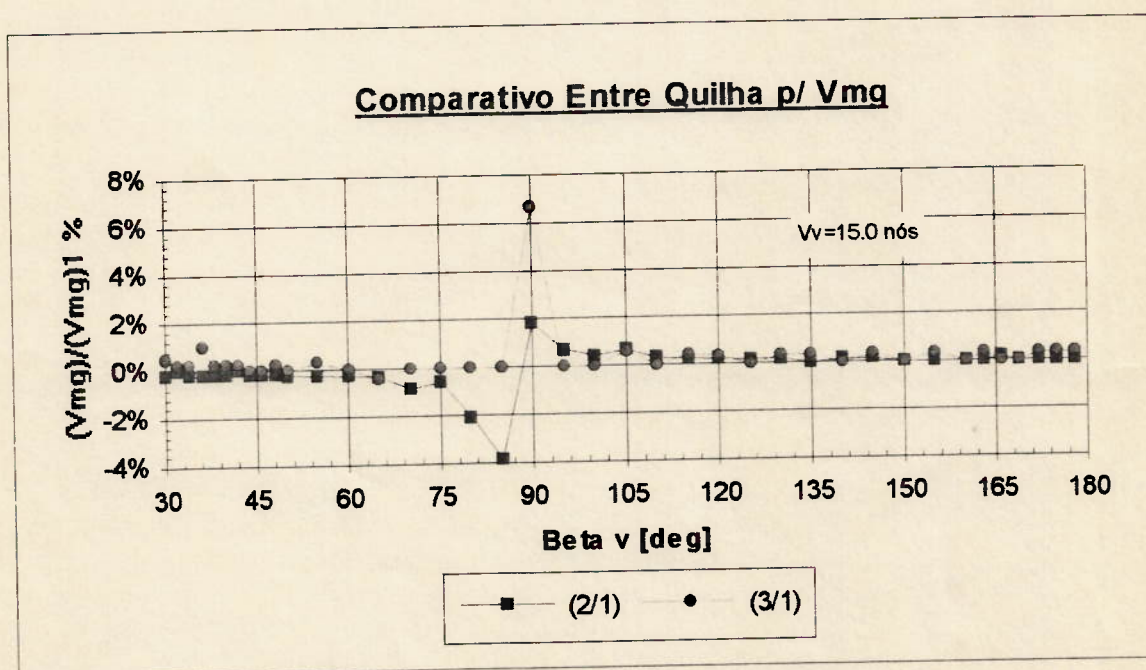


Figura 9.8-B: Comparativo Entre Quilha p/ Vmg Vv = 15.0 nós

Na região de ventos largos, para qualquer valor de velocidade do vento real, a quilha que apresenta o melhor desempenho é a quilha 1. Isto é razoável visto que nesta faixa de ângulos de aproamento a força lateral é muito pequena, e a quilha perde praticamente a sua função. Sendo assim, uma maior superfície molhada representa maior resistência ao avanço e conseqüentemente velocidades menores, que não são compensadas com incrementos significativos no rumo em direção a marca.

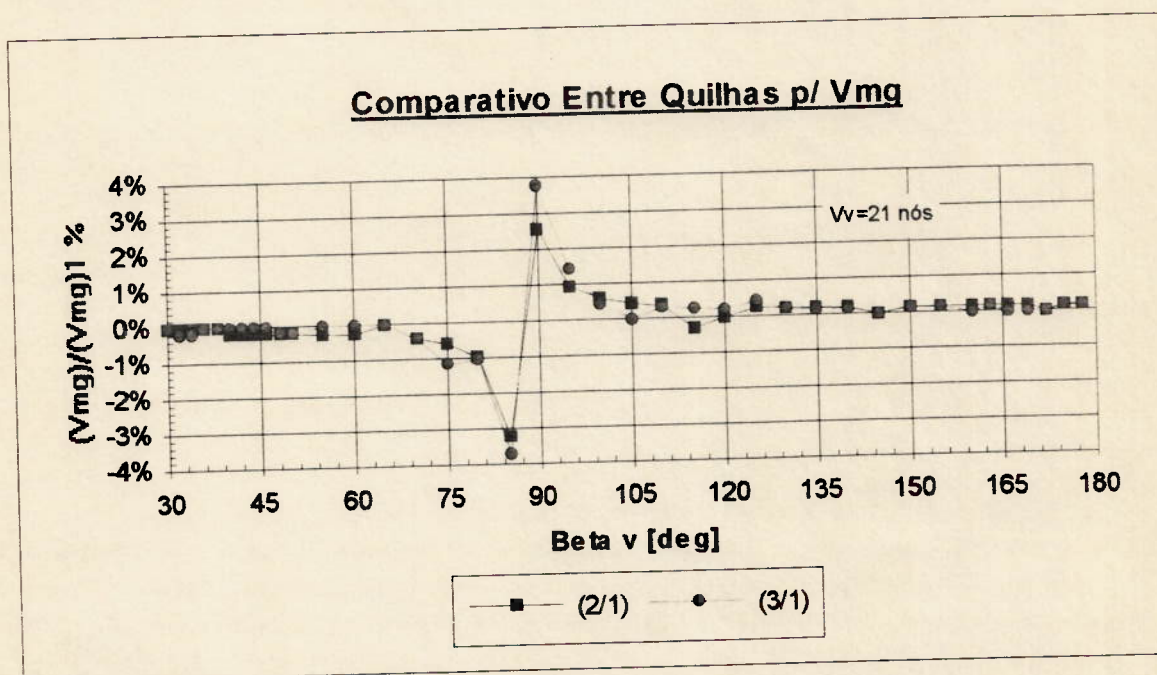


Figura 9.8-C: Comparativo Entre Quilha p/ Vmg Vv = 21.0 nós

A análise da performance total da embarcação fazendo uso do parâmetro 'velocidade ótima' revela um pouco da complexidade da maneira de navegar de uma embarcação a vela, a medida em que as conclusões obtidas confrontam-se com as resultantes da análise direta apenas do quesito velocidade ou do quesito deriva.

Sendo assim é importante voltar a frisar a necessidade de que o engenheiro tenha conhecimento das situações de vento e mar que a embarcação vai encontrar e da aplicação que seu proprietário pretende fazer da mesma para então poder optar por uma ou outra solução.



### 9.3.2 Avaliação da Variação da Razão Boca/Calado

Para se avaliar a variação da relação boca/calado o conjunto de nove casco (já determinados com suas quilhas ideais) foi dividido em três grupos de três modelos cada um, conforme seu coeficiente volumétrico. O grupo utilizado aqui, a título de ilustração, foi o formado pelos modelos de número 1.1, 2.1 e 3.3, cujo coeficiente volumétrico era 6.41, e constituíam-se os veleiros mais leves da flotilha.

Até meados da década de oitenta os veleiros costumavam ter uma relação boca-calado relativamente baixa como pode ser observado pela faixa de parâmetros da série Delft I, e isto era resultado do tipo de regata disputada, que apesar de se chamarem oceânicas, tinham a grande maioria de suas provas no formato de triângulo olímpico, onde 60% do percurso é disputado no contravento. Baixas razões deste adimensional resultavam em uma grande área lateral do casco e conseqüentemente menores ângulos de deriva. Além disto utilizava-se a formulação da IOR para equiparar os tempos de veleiros diferentes, e esta formulação penalizava embarcações com bocas avantajadas.

Com o advento das regatas transoceânicas e conseqüentemente da variação das condições encontradas (a maior parte do tempo em través ou ventos folgados), um incremento da boca foi parcialmente sendo incorporado nas embarcações com um ganho de velocidade apreciável. Este fato somado com a introdução da fórmula da IMS para medir os barcos, redesenhou o veleiro padrão de regata dos anos 90, tornando mais largo, com o espelho de popa muito semelhante a secção mestra e fundo praticamente plano.

As vantagens desta configuração podem ser exploradas de duas maneiras diferentes:

- No caso de se projetar para ventos moderados a fortes o incremento da estabilidade através do aumento da área de linha d'água pode ser seguido do aumento da da área vélica.

- Já para ventos leves pode-se obter uma redução do lastro e conseqüentemente do deslocamento sem comprometer em demasia a estabilidade devido ao ganho na altura do GM.

Como as seções transversais de popa tornaram-se muito semelhantes a secção mestra, o centro de flutuação sofreu um deslocamento razoável para a popa, tornando o ângulo de entrada menor e diminuindo a resistência ao avanço. Isto aliado ao formato do fundo facilitou a obtenção do regime de planeio (em ventos largos) mesmo para embarcações de grande porte como os W60<sup>3</sup>. Além disto o fundo chato favorece em muito o escoamento em torno da quilha tornando-o praticamente bidimensional e aumentando sua eficiência.

Este aumento da boca tem suas desvantagens, sendo a mais visível delas o aumento da área molhada (equação 6.4), o que compromete a velocidade final em ventos leves e conseqüente baixa velocidade da embarcação e alta porcentagem da força de atrito. Porém um outro ponto negativo advém do acréscimo na resistência adicional de ondas pois a boca larga é um grande alvo para ondas desencontradas em um mar bravo. Uma tentativa de diminuir este efeito é tornar as embarcações o mais leve possível (ULDB, "ultra lighth displacement boat"), de forma que o veleiro galgue as ondas e não as corte como os cascos deslocantes.

Este delicado equilíbrio entre ganho de estabilidade e perda de velocidade devido ao aumento da resistência de atrito pode ser visualizado nos gráficos apresentados nas figuras 9.9-A à 9.9-C.

Na primeira delas, para ventos leves (seis nós), as embarcações de razão boca/calado 4.5 e 5.0 levam grande vantagem sobre a de  $B_{wl}/T_c=5.5$ . Este resultado já era esperado pelo que já foi dito sobre forças de atrito.

---

<sup>3</sup> Os W60 foram utilizados na última regata "Withbread Around the World" de 1994-1995 numa tentativa de atualização dos antigos maxi's medidos pela IOR. Suas regras de projeto tinham muito poucas limitações, como área vélica máxima e comprimento máximo de 60 pés. O sucesso destes barcos foi total, superando em muitas situações os maxi's de 80 pés que corriam a mesma regata e estabelecendo velocidades máximas em torno de 33 nós com médias de 22 nós durante 24 horas seguidas.



Para ventos moderados de 15 nós o ganho de estabilidade proporcionado pela boca maior coloca o modelo 3.3 em vantagem para ângulos de aproamento de vento real até 75 graus. Porém acima deste valor o veleiro de menor boca volta a ser o mais rápido. Esta supremacia na orça da embarcação de maior boca deve-se ao fato da mesma atingir ângulos de banda menores (como pode ser visto na figura 9.9), fazendo com que as velas recebam o escoamento sobre um ângulo mais favorável e conseqüentemente aumentando a força de empuxo aerodinâmico.

A medida que o vento torna-se mais forte, a diferença de performance entre os casco de diferentes  $B_{wl}/T_c$  aumenta para a região de orça, pois os menos estáveis são obrigados a rizar as velas para não ultrapassar o limite de trinta graus de banda imposto pelo programa. Este é o motivo do salto abrupto de velocidade a 45 graus que sofre o veleiro de relação boca/calado 4.5 para velocidades de vento real de 21 nós. Já na região de ventos largos a diferença torna-se irrisória, fruto da diminuição da importância da resistência de atrito devido ao aumento da velocidade final da embarcação.

Esta análise torna clara os formatos das embarcações de ponta que disputam as principais regatas na atualidade. Enquanto a Copa América que até 1995 era disputada em San Diego com ventos da ordem de seis a dez nós com metade de seu percurso no contravento impunha barcos deslocantes de baixa razão boca/calado, regatas de volta ao mundo como a "Withbread" e a "BOC Challenger" em que metade do tempo de regata os competidores enfrentam ventos largos acima de trinta nós resulta em barcos planantes, ULDB's e com razões boca/calado altíssimas.

Uma comparação da estabilidade dos diferentes modelos pode ser avaliada com a figura 9.10, onde na legenda o primeiro número representa a relação  $B_{wl}/T_c$  e a segunda a velocidade do vento real. Pode-se perceber que os veleiros de maior boca têm um espécie de "reserva de estabilidade" em relação ao mais esguio, apresentado menores ângulos de banda e rizados na vela mais tardios. Isto quer dizer que para uma dada condição de vento o veleiro de maior boca poderia carregar uma área vélica maior até

atingir o mesmo ângulo de banda que o de menor boca, incrementando mais ainda sua velocidade em relação àquele.

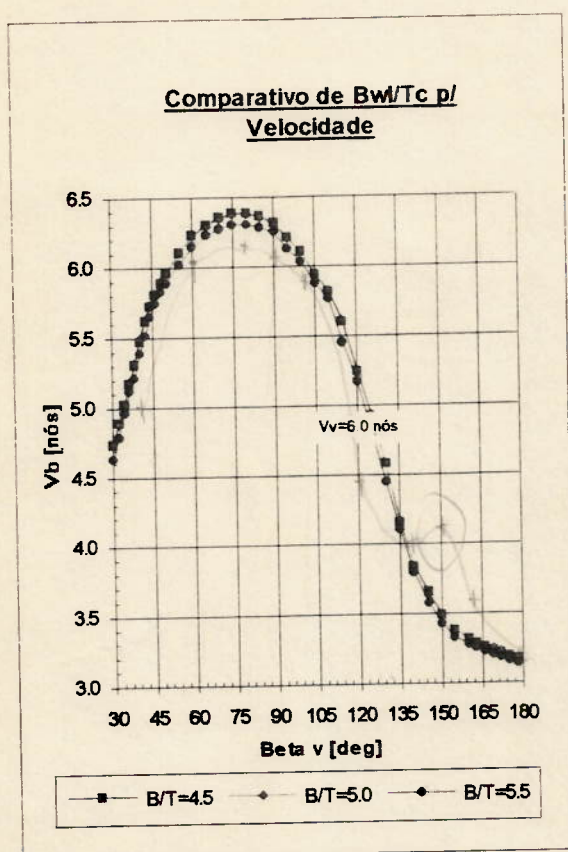


Figura 9.9-A: Comparativo de  $Bw/T_c$  p/ Velocidade  $V_v=6.0$  nós

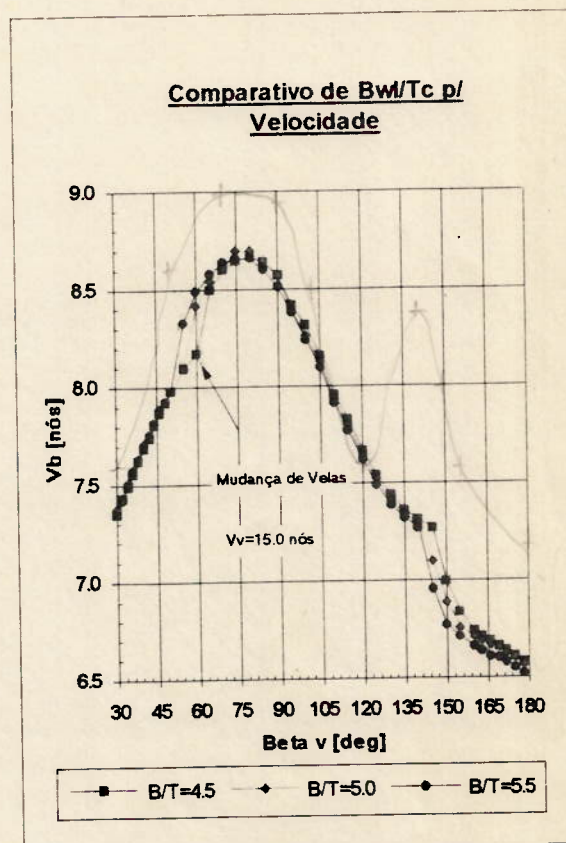


Figura 9.9-B: Comparativo de  $Bw/T_c$  p/ Velocidade  $V_v=15.0$  nós

O mesmo comportamento apresentada na análise do valor da velocidade absoluta é encontrado nos gráficos (figura 9.11-A à 9.11-C) que ilustram a velocidade ótima para os três casco nas três condições de vento real.

Os gráficos foram cortados afim de mostrar com mais clareza os resultados nas regiões de contravento e vento em popa, o que não prejudica a análise visto que a velocidade ótima não apresenta nenhum significado físico para ventos de través.

Na análise da velocidade ótima novamente o barco de maior relação boca calado apresentou velocidades superiores nas condições de contravento para ventos moderados a fortes e na região de popa para  $V_v=21$  nós atingiu praticamente a mesma velocidade dos demais modelos analisados.



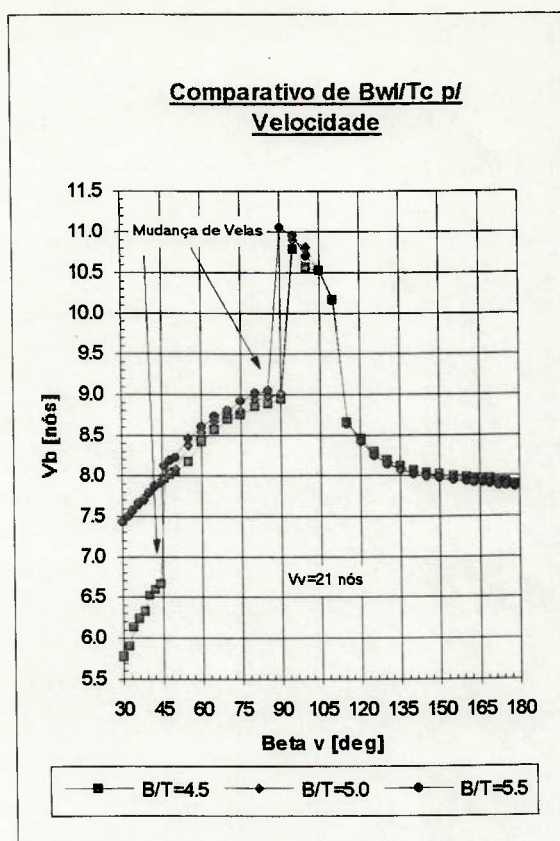


Figura 9.9-C: Comparativo de  $Bwl/T_c$  Para Velocidade  $V_v=21$  nós

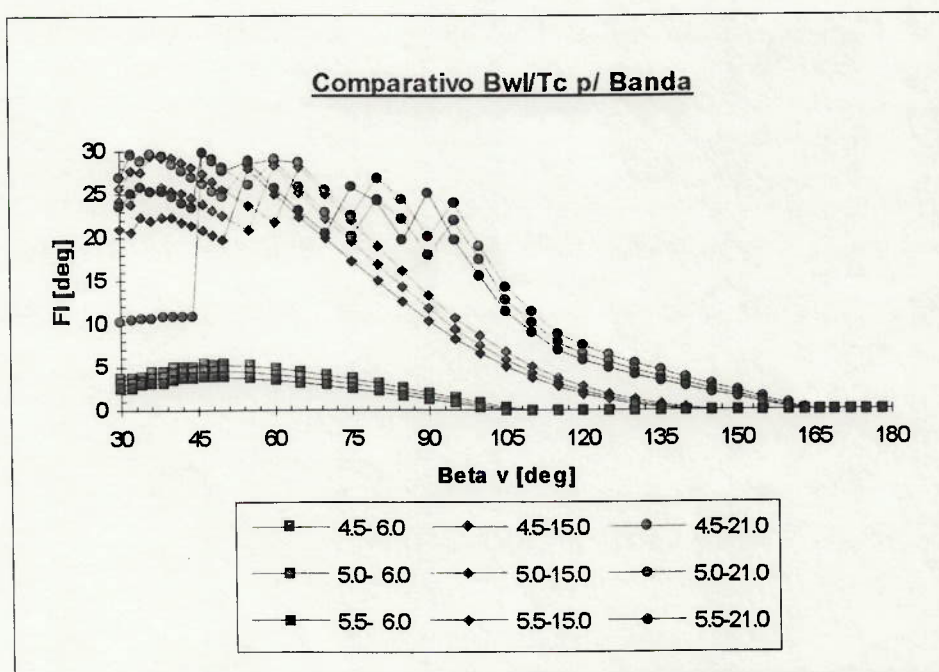


Figura 9.10: Comparativo de  $Bwl/T_c$  Para a Banda

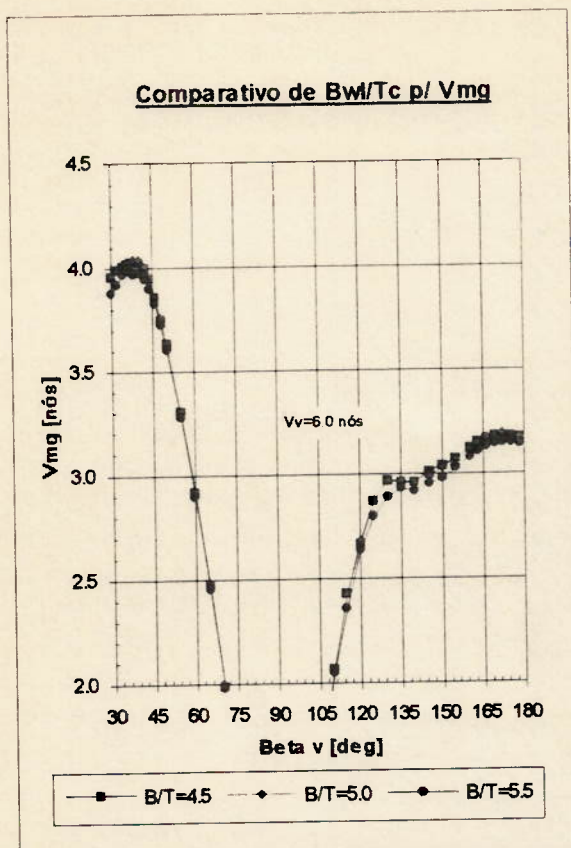


Figura 9.11-A: Comparativo de Bwl/T<sub>c</sub> p/ Vmg V<sub>v</sub>=6.0 nós

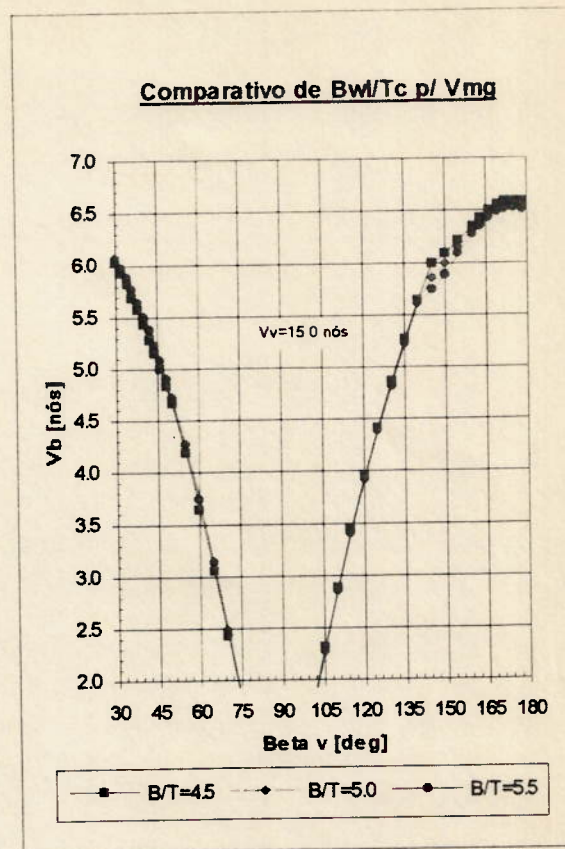


Figura 9.11-B: Comparativo de Bwl/T<sub>c</sub> p/ Vmg V<sub>v</sub>=15.0 nós

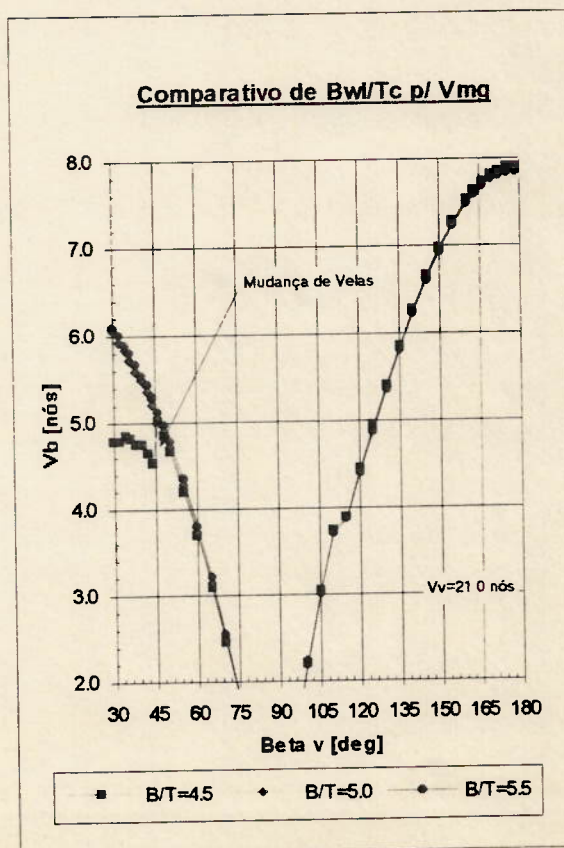


Figura 9.11-C: Comparativo de Bwl/T<sub>c</sub> Para Vmg V<sub>v</sub>=21 nós



Sendo assim, pelos critérios anteriormente apresentados para a escolha da combinação casco-vela-quilha (escolha do maior Vmg para condições de ventos largos), entre os três modelos (1.1, 2.1 e 3.3) analisados para o coeficiente volumétrico de 6.41, o de melhor performance é o modelo 3.3.

Para os outros valores do coeficiente volumétrico, seguindo o mesmo procedimento apresentado neste item os modelos escolhidos foram os de número 6.2 e 9.3.

### 9.3.3 Avaliação da Variação do Coeficiente Volumétrico

Quando da escolha dos modelos com melhores velocidades a partir de uma análise da relação boca-calado, obteve-se para cada coeficiente volumétrico os veleiros de maior boca, os de número 3, 6 e 9 ( $B_{wl}/T_c=5.5$ ) para os coeficientes volumétricos de 6.41, 6.05 e 5.69 respectivamente. Isto significa que a comparação da performance ao nível de  $L_{wl}/\nabla^{1/3}$  se dará sobre embarcações que apresentam o mesmo potencial de estabilidade do ponto de vista geométrico, ou seja, trata-se de uma análise da variação do deslocamento para uma mesma relação  $B_{wl}/T_c$ .

Geralmente o deslocamento não é uma variável que pode ser livremente alterada pelo projetista, sendo uma consequência do arranjo estrutural, material utilizado e conforto interior, que são decorrências de outras diretrizes do projeto e não da maximização da performance. É lógico que o engenheiro pode alterar algumas características como adoção de materiais exóticos e arranjos interiores espartanos, na tentativa de reduzir o peso total, mas a faixa de variação é muito pequena. Um outro componente de peso que pode ser alterado é o lastro, porém qualquer alteração no mesmo deve ser realizada com cuidado pois a estabilidade varia sensivelmente com este parâmetro.

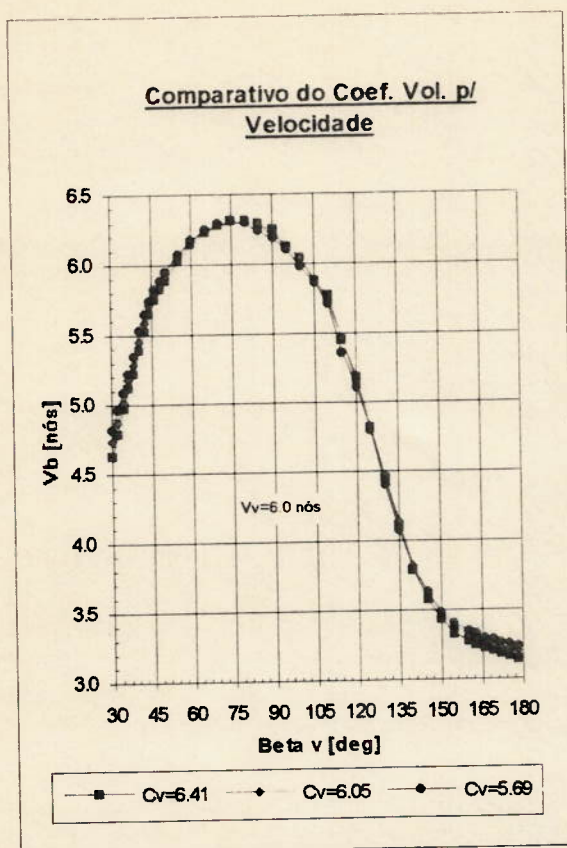


Figura 9.12-A: Comparativo do Coef. Vol. p/ Velocidade  $V_v=6.0$  nós

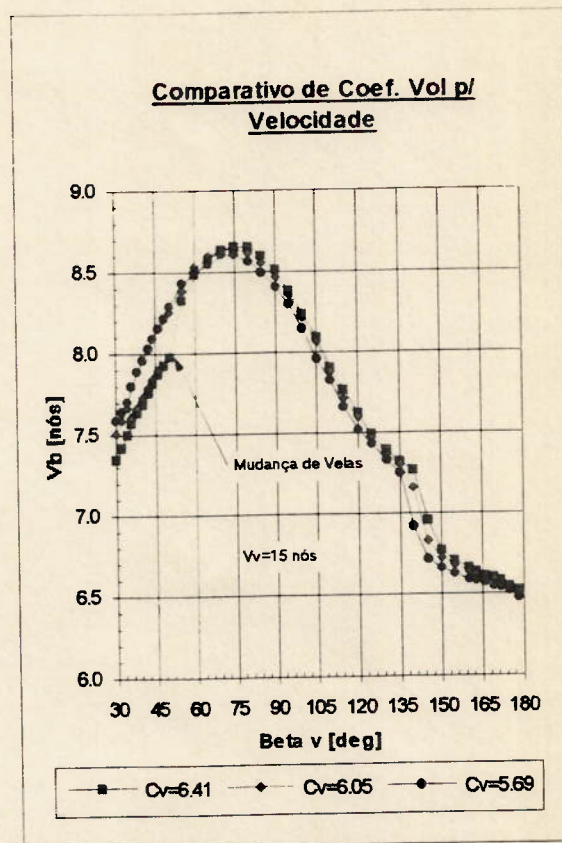


Figura 9.12-B: Comparativo do Coef. Vol. p/ Velocidade  $V_v=15.0$  nós

O modelo 9.3 apresenta uma performance superior aos outros dois cascos mais leves na região de contravento em todas as faixas de vento analisadas: ventos leves, moderados e fortes (figuras 9.12-A à 9.12-C). Isto é decorrência de sua maior estabilidade e consequente ângulo de banda menor, o que favorece o escoamento sobre as velas. Além disto o aumento na área vélica ( $80.00 \text{ m}^2$ ,  $701.60 \text{ m}^2$  e  $63.00 \text{ m}^2$  para os coeficientes volumétricos de 5.69, 6.05 e 6.41 respectivamente) proporcionou um empuxo aerodinâmico maior que anulou o aumento da resistência de atrito devido à grande boca e o aumento da resistência de onda devido ao deslocamento superior, para efeito de velocidade final no contravento.

Para ventos entre a orça folgada e os ventos largos os modelos mais leves desenvolvem melhor um regime de planeio que permite que atinjam, aproximadamente, velocidade superior a partir de setenta e cinco graus. Isto só não acontece para ventos



de popa de seis nós, onde a grande área vélica do modelo 9.3 proporciona o empuxo suficiente para superar a resistência de atrito como comentado anteriormente.

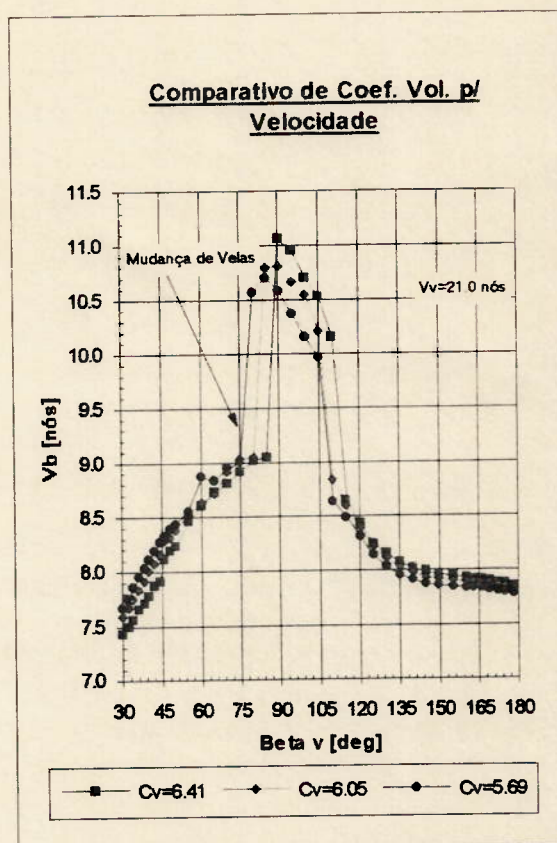


Figura 9.12-C: Comparativo do Coef. Vol. p/ Velocidade  $V_v=21.0$  nós

A partir do momento em que a velocidade aumenta o suficiente para que a resistência de onda seja a principal componente da resistência total, o deslocamento superior deste modelo faz-se sentir em sua performance. Apesar das velocidades terem um valor semelhante aquelas atingidas na região de contravento, quando o vento incide pela popa as embarcações praticamente não apresentam banda, eliminando a vantagem da estabilidade que o modelo 9.3 apresentava sobre os outros dois.

A análise da velocidade ótima aponta novamente a melhor performance do modelo 9.3 para ventos leves na região de orça cerrada e popa, mas valores praticamente coincidentes para orça folgada e través folgado.

Já para vento real de quinze nós pode-se notar uma pequena supremacia da embarcação 3.3 em todas as mareações, sendo a diferença porém ínfima.

Para ventos fortes a embarcação 3.3 apresenta, novamente, valores pouco superiores às de número 9.3 e 6.2, a não ser na região de orça folgada, onde esta diferença é um pouco mais acentuada.

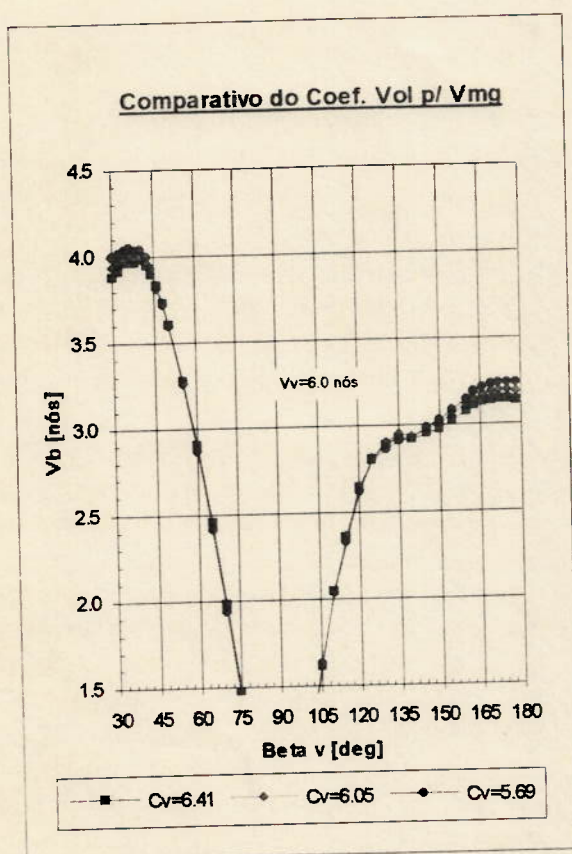


Figura 9.13-A: Comparativo do Coef. Vol. p/ Vmg  $V_v=6.0$  nós

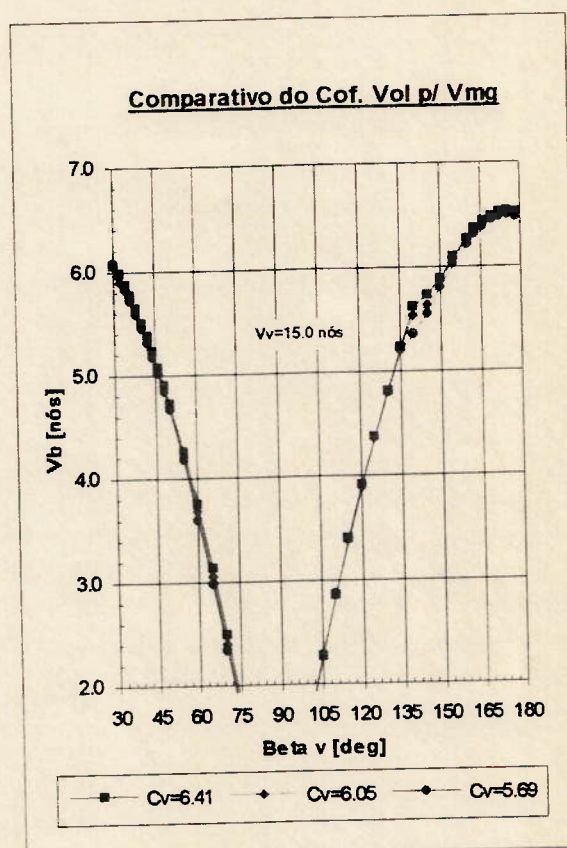


Figura 9.13-B: Comparativo do Coef. Vol. p/ Vmg  $V_v=15.0$  nós

Visto que as diferenças em termos de velocidade ótima são extremamente discretas a escolha do melhor modelo recai sobre o parâmetro velocidade absoluta. A superioridade do modelo 9.3 na região de orça seguido de perto pelo 6.2, contrastando com sua baixa performance em ventos largos quando é superado pelo modelo 3.3, faz o modelo 6.2 ocupar, novamente, uma condição intermediária, tornando a escolha uma decisão não unânime.



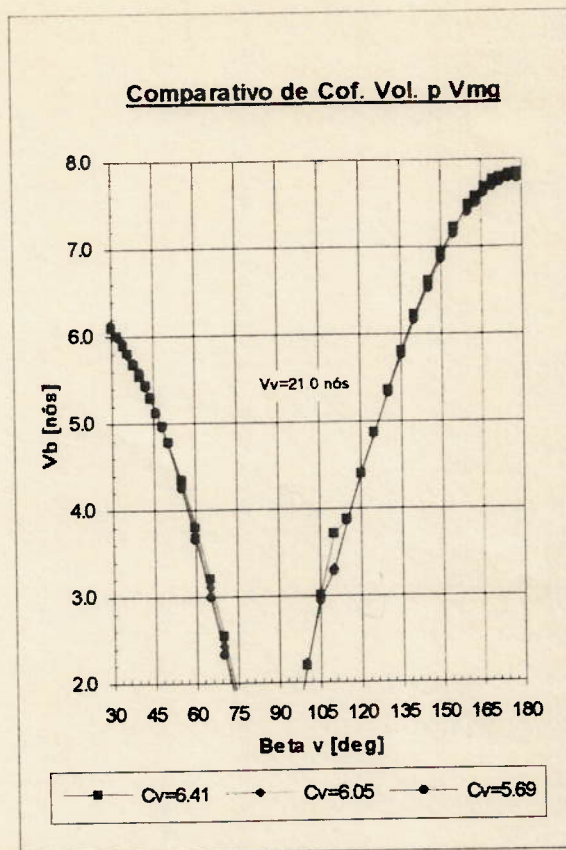


Figura 9.13-C: Comparativo do Coef. Vol. p/ Vmg  $V_v=21.0$  nós

Porém a partir do uso desejado da embarcação, como descrito no começo do capítulo escolheu-se o modelo 6.2 por apresentar uma performance mais constante em todas as mareações e condições de vento.

#### 9.4 ANÁLISE DAS FORÇAS HIDRODINÂMICAS DESENVOLVIDAS:

A título de ilustração são apresentados dois gráficos que mostram as forças hidrodinâmicas no sentido longitudinal e transversal ao movimento para o modelo deslocante (coeficiente volumétrico 4.97) para a velocidade de vento real de vinte e um nós. O objetivo é quantificar cada componente da resistência ao avanço e da força lateral afim de melhor atacar a otimização do desempenho da embarcação. Para cada tipo de veleiro e para cada condição de vento o valor da porcentagem de cada componente das

forças diferem, portanto esta é apenas uma análise ilustrativa para esta específica condição de vento e casco.

Como era de se esperar o gráfico da figura 9.13 mostra que a maior parte da força lateral é gerada pela quilha, enquanto o casco surge como o segundo maior colaborador para o total da força lateral hidrodinâmica. Isto era de se esperar de um casco deslocante e conseqüentemente com grande área lateral. Leme e bulbo contribuem relativamente pouco para o equilíbrio de forças no sentido transversal ao movimento.

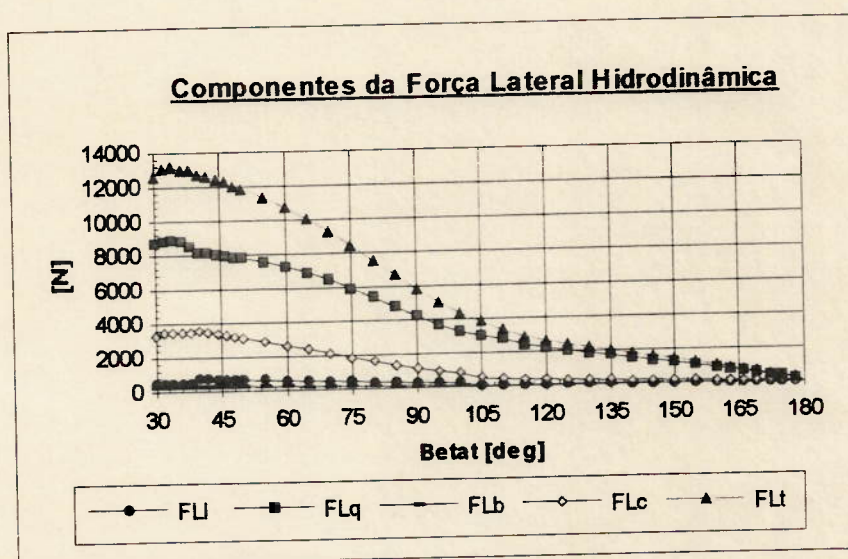


Figura 9.13: Forças Laterais Hidrodinâmicas

No que se refere a resistência ao avanço total, a maior parcela é advinda da resistência de onda própria, seguida pela de atrito. Porém pode-se perceber que proporcionalmente as relações mudam muito conforme a maré em que se navega. Na região de contravento a resistência induzida e de atrito possuem a mesma ordem de grandeza, sendo que a induzida supera a de atrito. Visto que o casco é o segundo maior gerador de força lateral, era de se esperar esta porcentagem alta da resistência induzida, visto que o casco é modelado como uma asa de baixa razão de aspecto. Estes resultados indicam a necessidade de um ganho de eficiência nos principais componentes de geração de força lateral das obras vivas (quilha e leme).



Com o vento incidindo de través a velocidade da embarcação atinge seus valores máximos e a resistência de onda passa contribuir com a maior parte da resistência total.

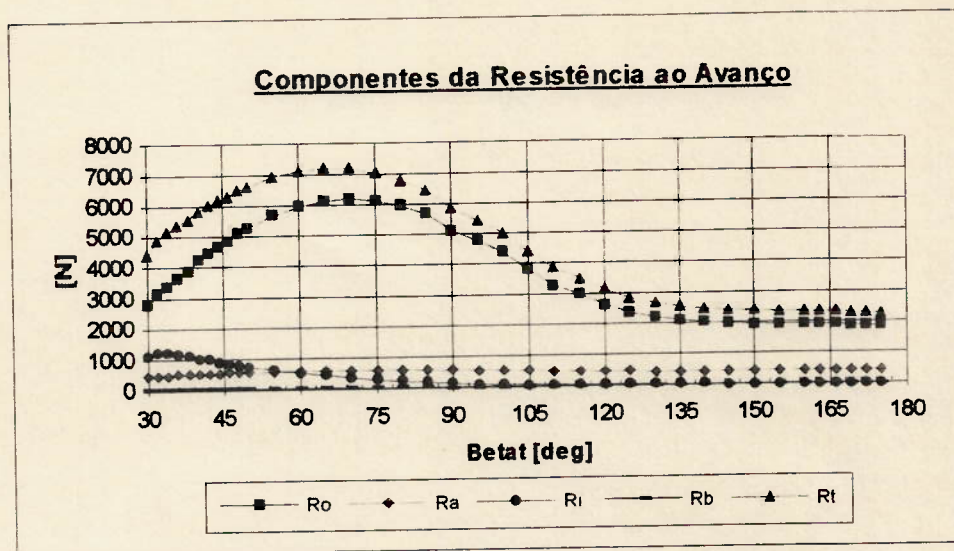


Figura 9.14: Resistência ao Avanço

Para este modelo em particular a resistência de banda é sempre baixíssima. Isto deve-se ao fato de o casco ser bem arredondado, apresentando pouca assimetria em suas obras vivas quando navegando com ângulo de banda.

## **10. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE CONTINUAÇÃO**

### **10.1 CONCLUSÕES**

O trabalho desenvolvido apresenta conclusões em três diferentes áreas: a que concerne do desenvolvimento do programa para predição de velocidade, a de análise orientativa dos resultados em busca de uma otimização da performance e a da filosofia de projeto.

#### **10.1.1 Desenvolvimento do Programa Para Predição de Velocidade**

O desenvolvimento de um programa de predição de velocidades através de formulações semi-empíricas representa o presente. Vários programas deste tipo encontram-se no mercado, podendo o engenheiro optar por utilizar um deles ou escrever seu próprio código. Este trabalho procurou fornecer subsídios para que os interessados possam desenvolver seus programas e assim ter total controle sobre todos os passos dos cálculos, desde os referentes as forças hidrodinâmicas, até a integração casco-vela, passando pela obtenção das forças aerodinâmicas. Isto proporciona uma maior credibilidade aos resultados pois as limitações, e possíveis extrapolações efetuadas nos cálculos são do conhecimento do engenheiro. Além disto, pode-se alterar as formulações tornando-as mais simples ou mais complexas dependendo da experiência adquirida ou da não necessidade de se levar determinados parâmetros em conta. Programas que calculem a performance de embarcações especiais como multicascos ou veleiros que possuam lastro móvel também podem ser desenvolvidos baseados nas formulações apresentadas nesta dissertação. A medida que configurações mais complexas de casco e apêndices vão



afastando os modelos apresentados aqui daquele que se pretende ensaiar, pode-se fazer uso dos códigos de CFD ("Computational Fluid Dynamics") para encontrar alguns parâmetros de entrada, como razão de aspecto efetiva e área para o cálculo da sustentação dos apêndices. Os CFD's representam o futuro dos VPP's. Existe uma grande expectativa no meio científico de que essa ferramenta se torne cada vez mais confiável e abrangente em termos de resultado. Hoje utiliza-se a dinâmica dos fluidos computacional basicamente para problemas potenciais, mas espera-se em breve poder simular toda a equação que rege os movimentos fluidos, incluindo efeitos viscosos e de superfície livre, para a determinação das forças hidrodinâmicas e aerodinâmicas. Para isto um incremento de qualidade faz-se necessário nos códigos e um grande salto de velocidade é exigido das máquinas, porém trabalhos desenvolvidos em vários países indicam que este futuro não tarda a chegar.

O programa VPP-PB, como a maioria dos programas de predição de velocidades presentes no mercado, é baseado em formulações semi-empíricas e por isto sujeita a algumas limitações, principalmente no modelo hidrodinâmico.

A formulação para o cálculo da resistência de onda, por ser composta por dois polinômios, pode vir a apresentar descontinuidade na curva de resistência, adulterando o resultado final da integração. No caso particular do programa VPP-PB é recomendável o levantamento prévio da curva de resistência de onda segundo a formulação da série Delft, para a verificação da existência desta descontinuidade. Caso ela ocorra, os resultados do programa não terão significado físico. Apesar de GERRITSMA (1981) afirmar a possibilidade de utilização dos polinômios para cascos diferentes daqueles ensaiados por ele, ou até mesmo para modelos com alguns parâmetros fora da faixa dos parâmetros da série, uma análise mais criteriosa do comportamento da série (como a realizada no capítulo oito) indica que estes polinômios devem ser utilizados com restrições.

O modelo matemático utilizado no cálculo das forças hidrodinâmicas geradas pelos apêndices também deve ser motivo de um estudo mais detalhado antes de se utilizar o



programa VPP-PB na tentativa de otimizá-los. O percentual das forças (seja lateral, seja de resistência ao avanço) geradas pelo bulbo e asas é muito pequeno comparado com as fornecidas pelo casco, quilha e, até mesmo, leme, fazendo com que as forças atuantes muitas vezes sejam da mesma ordem de grandeza dos erros intrínsecos da própria formulação. Sendo assim, para a otimização de apêndices exóticos, como quilhas aladas, bulbos alados, lemes duplos, ou mesmo da quilha padrão, deverão ser utilizados métodos mais precisos (CFD's ou ensaios em túneis de vento), que forneçam a razão de aspecto efetiva para o cálculo da resistência induzida e a área lateral para o cálculo da força lateral. Estes dois parâmetros seriam então os dados de entrada para um programa de predição de velocidade que conseqüentemente não necessitaria de uma descrição detalhada dos apêndices. Este têm sido o caminho seguido pela grande maioria dos projetistas da Cpa América.

### **10.1.2 Análise Orientativa dos Resultados**

Uma vez de posse de um código confiável, pode-se partir para uma análise sistemática de variação de parâmetros como a desenvolvida no capítulo oito afim de orientar o engenheiro na busca de uma melhora da performance da embarcação. Os resultados obtidos nesse trabalho estão de acordo, do ponto de vista físico, com os apresentados em algumas publicações (presentes na bibliografia) e na experiência relatada em revistas especializadas em competições a vela da performance de determinados veleiros. Muitas conclusões podem ser tiradas dos resultados aqui apresentados para orientar uma busca mais objetiva de uma embarcação ótima.

A primeira destas conclusões é que é praticamente impossível projetar um veleiro que seja superior em todas as condições de mar e vento. É preciso que esteja claro no início do projeto as condições de vento, ou seja, sua velocidade e incidência predominante e as condições de mar tais como altura de onda e frequência e velocidade



da correnteza bem como a aplicação a que se destina. A partir destes dados pode-se afirmar, grosso modo que para:

- Ventos fracos: deve haver uma preocupação constante com o controle da superfície molhada tanto dos apêndices quanto do casco, sendo que no deste último os valores da relação boca-calado não devem ser excessivos. Grandes áreas vélicas ajudam muito em ventos fracos, porém a necessidade de diminuí-las com o aumento da velocidade do vento prejudica a velocidade final da embarcação para ventos fortes. Altos valores do coeficiente volumétrico tendem a melhorar o desempenho para a navegação em orça pois a embarcação apresenta maior estabilidade e conseqüentemente as velas trabalham recebendo um fluxo de vento melhor (menor ângulo de banda) bem como os apêndices, que por não terem a velocidade de incidência diminuída pelo fator  $\cos(\phi)$  apresentam maior eficiência na geração de força lateral e conseqüentemente menor ângulo de deriva. A combinação de maior velocidade com menor deriva resulta em uma velocidade ótima maior e conseqüentemente um melhor desempenho no contravento. A medida que fatores como a estabilidade e ângulo de deriva perdem sua importância no cômputo geral da velocidade final da embarcação (ventos largos) os valores ótimos da relação boca-calado e do coeficiente volumétrico para a condição de orça levam a uma performance pior que a de embarcações leves e bojudas.
- Ventos fortes: a estabilidade deve ser priorizada para esta condição. Ela pode ser conseguida tanto através da adoção de grandes valores para a relação  $Bwl/T_c$  quanto pela minimização da altura do centro de gravidade com o auxílio de bulbos. Normalmente para ventos fortes espera-se altas velocidades da embarcação e conseqüentemente a preponderância da resistência de onda sobre a de atrito. Sendo assim o aumento da boca não constituirá de um empecilho pelo aumento da superfície molhada, mas trará o benefício da redução da resistência



de onda através da obtenção mais facilmente do regime de planeio devido ao aumento da área de linha d'água.

- Ventos médios: é necessária a busca de um valor intermediário entre os dois casos acima, como foi demonstrado na escolha do casco 6.2 no capítulo oito.

O projetista deve estar ciente que cada veleiro possui uma "personalidade" própria, apresentando afinidades com determinadas condições de vento ou maréações. Aliado a isto está a presença do elemento humano, que buscará imprimir sua própria personalidade ao veleiro. A combinação destes dois fatores trás uma característica de imponderabilidade no que se refere a performance final da embarcação. A possibilidade de uma tripulação tirar o máximo de uma embarcação mediana obtendo grandes resultados, enquanto um veleiro veloz nas pranchetas não consegue mais que resultados medíocres deve ser aventada pelo engenheiro e ponderada com a mesma seriedade que uma variação no coeficiente volumétrico ou na área vélica.

### 10.1.3 Filosofia de Projeto

Um programa de predição de velocidade apresenta a possibilidade de se vislumbrar o comportamento do veleiro antes do mesmo tornar-se real. Isto permite que as embarcações a vela não sejam mais vistas, do ponto de vista do projeto, apenas como o resultado de experiências adquiridas pelo projetista ou, simplesmente, um casco cujo único compromisso seria flutuar e chegar a algum lugar.

A possibilidade de se fazer análises comparativas de diferentes tipos de cascos, apêndices e arranjos vélicos permite ao engenheiro que não utilize mais apenas embarcações semelhantes e limitações geométricas impostas pelas fórmulas (IOR, IMS) para elaborar seus projetos. Uma nova janela se abre onde torna-se viável experimentar idéias novas e aquillatar suas qualidades e defeitos, não só pela análise da velocidade final, mas também pelo estudo das forças atuantes em cada componente das obras vivas e do velame.



O veleiro passa a ser visto não apenas como uma embarcação de lazer e competição, mas também como uma embarcação de trabalho, pois pode-se analisar sua viabilidade econômica através do parâmetro velocidade média esperada em função do regime de ventos na rota. O Brasil é um país de litoral extenso onde em toda a região norte-nordeste as condições de vento superam a casa dos vinte nós em 40% do ano, e onde existe uma comunidade vivendo do mar utilizando embarcações a vela semelhantes as do século XIX.

A produção acadêmica tem um compromisso com esta comunidade e o projeto racional de embarcações a vela pode diminuir a distância que as separam, para o aumento do conhecimento de ambas as partes.

## 10.2 SUGESTÕES DE CONTINUAÇÃO

Este foi o primeiro trabalho dentro da Escola Politécnica de se desenvolver o projeto racional de embarcações a vela ao nível de pós-graduação. Sendo assim, há um longo caminho a ser trilhado na busca de mais conhecimentos e experiências nesta área. A sugestão de continuações deste trabalho é uma pequena contribuição na busca deste acúmulo de conhecimentos.

- Aferição dos resultados gerados pelo programa com medidas feitas em escala geral. Como o programa é orientativo, seria necessário o ensaio em escala real de pelo menos três veleiros diferentes que indicassem uma tendência que o programa pudesse captar. Estas medições poderiam ser feitas através de um convênio com estaleiros.
- Geração de outros códigos com processos de integração diferentes, como por exemplo o 2º método de Oossanen (OOSSANEN (1993)), ou interfaceando com valores extraídos de CFD.
- Realizar a integração casco-vela utilizando-se métodos de otimização para achar a área vélica ideal.

- Análise de viabilidade econômica de uma embarcação pesqueira a vela para atuar no litoral do nordeste.



## 11. BIBLIOGRAFIA ESPECÍFICA:

- ANTRIM, J. K.. Design of 40 ft multihull sailboat for offshore racing. **Marine Technology**, V.27, n.5, p. 285-299, September 1990.
- FLAY, R. G. J.; McMillan, D. C.. A wind tunnel investigation of yacht hydrodynamic side force and drag. **Journal of Ship Research**, Vol. 37, Nº 4, December, 1993.
- GERRITSMA, J.; O. R.; Versluis, A.. Geometry, resistance and stability of the Delft systematic yacht hull series. **International Ship Building Progress**, December, 1981.
- HERRESHOFT, Halsey C.. Hydrodynamics and aerodynamics of sailing yacht. **Transactions of SNAME**, V.72, p.445-492, 1964
- LETCHER, Jr., J. S., Cressy, C. P., Oliver III, J. C., Fritts, M.J.. Hydro-numeric design of winglet keels for *Stars & Stripes*. **Marine Technology**, Vol. 24, No 4, p. 265-285, October 1987.
- MARCHAJ, C. A.. **Sailing theory and practice**. 2ª Edição, London, Granada, 1982.
- MILGRAM, J. H.. **Sail force coefficients for systematic rig variations**. New York, SNAME, September, 1971 (Technical & Research Report R-10).
- MILGRAM, J. H.. The analytical design of yacht sails. **Transactions of SNAME**, 1968.
- MILLER, R. T.; Kirkman, K. L. Sailing yacht design : a new appreciation of a fine art. **Transactions of SNAME**, Vol. 98, p.187-237, 1990.
- MYERS, H.. Theory of sailing: with applications to modern catamarans. **Marine Technology**, Vol. 1, Nº-1, p.10-28, October, 1964.

OFFSHORE RACING COUNCIL. **IMS - International Measurement System.** ,  
Washington, 1991.

OSSANEN, P. Von. Predicting the speed of sailing yachts. **Transactions of  
SNAME**, Vol. 101, p.337-397, 1993.

POOR, C. L.. **The international measurement system : a description of the new  
international rating system.** Washington D.C., August 1986.

SCRAGG, C. A., Chance, B. Jr., Talcott, J. C., Wyatt, D.C.. Analysis of wave  
resistance in the design of the 12-Meter yacht *Stars & Stripes*. **Marine  
Technology**, Vol. 24, No 4, p.286-295 October 1987.



## 12. BIBLIOGRAFIA GERAL:

- ABOTT, I. H.; Doenhoff, A. E. Von. **Theory of wing sections.** New York, Dover, 1959.
- CIVITA, V. **Dicionário Ilustrado de Navegação a Vela.** Editora Abril, São Paulo, 1975.
- EVEREST, J. T.. **Some research on the hydrodynamics of catamarans and multi-hulled vessels in calm water.** Newcastle, National Physical Laboratory, 1963. (Ship Report n.123)
- GERTLER, M.. **A Reanalysis of the original test data for the Taylor standard series.** Washington, Navy Department, David Taylor Model Basin, 1954. (Report 806)
- GIBBS and Cox Inc.. **Marine design manual for fiberglass reinforced plastics.** New York, Mc-Graw-Hill, 1960.
- GOUGEAN Brothers Inc.. **The Gougean Brothers on Boat Construction: Wood and West System Materials.** Michigam, 1979.
- HEYERDAHL, Thor. **A Expedição Kon-Tiki.** 5ª Edição, São Paulo, Editora José Olympio, 1987.
- HOERNER, S. F., **Fluid-Dynamic Drag.** Hoerner Fluid Dynamics, 1965.
- HOERNER, S. F., **Fluid-Dynamic Lift.** Hoerner Fluid Dynamics, 1965.
- INSEL, M.; Molland, A. F.. **An investigation into the resistance components of high speed displacement catamarans.** *The Naval Architec*, V.134, p.1-20, January, 1992.
- LEITCH, M.. **O Fascinante Livro dos Navios.** São Paulo, Siciliano, 1983.

**WHICKER, L. F.. Free-stream characteristics of a family of low aspect ratio all movable control surfaces for application to ship design. Washington, David Taylor Model Basin, 1958.**

**YEH, Hugh Y. H.. Series 64 resistance experiments on high-speed displacement forms. *Marine Technology*, V.2, N.3, p.248, July, 1965**



